

УДК 532.5; 623.5

ДЛИТЕЛЬНОЕ УДАРНОЕ НАГРУЖЕНИЕ ТЕЛ КОМБИНИРОВАННЫМ ЗАРЯДОМ ВЗРЫВНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ

С. Г. Субботин, А. В. Проскурин, А. Ю. Мельникова

Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
им. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск
E-mail: niik@five.ch70.chel.su

Представлены методика и результаты расчетов параметров длительного ударного нагружения тел, создаваемого газодинамическим формирователем с комбинированным зарядом взрывного инициирования. Рассмотрена расчетная модель, основанная на представлениях гидродинамической теории детонации и теории горения конденсированных веществ. Расчетно-экспериментальным методом определены давление форсирования и физическая закономерность горения комбинированного заряда. Динамика процесса изучена на примере расчета параметров импульса ускорения нагружаемого тела при инициировании и горении заряда, состоящего из навесок взрывчатого вещества — дымного и пироксилинового порохов. Исследована зависимость параметров импульса ударного нагружения от параметров комбинированного заряда и размеров камеры горения.

Ключевые слова: ударный импульс, газодинамический формирователь, взрывное инициирование, комбинированный заряд.

Интенсивное ударное нагружение массивных объектов наиболее успешно осуществляется на экспериментальных установках взрывного действия. Однако и в этом случае формирование импульсов ускорений объектов с малой (по сравнению с общей длительностью импульса порядка 5 мс и более) длительностью переднего фронта существенно затруднено. В данной работе представлены методика и результаты расчетных исследований работы газодинамического формирователя ударных импульсов с комбинированным зарядом взрывного инициирования, предложенным в [1].

На рис. 1 представлена схема газодинамического формирователя ударного импульса. Комбинированный заряд состоит из двух пороховых навесок и навески взрывчатого вещества (ВВ), масса которой составляет не более 2 % общей массы комбинированного заряда.

Для того чтобы определить параметры движения нагружаемого тела, решается задача внутренней баллистики газодинамического формирователя с использованием расчетной модели для оценки параметров процессов детонации ВВ, расширения продуктов детонации и воспламенения порохового заряда, а также для описания процессов образования пороховых газов при горении двух видов пороха комбинированного заряда и процесса преобразования химической энергии заряда в кинетическую энергию движения нагружаемого тела.

Термодинамическая расчетная модель. Сложные процессы превращений, имеющих место в газодинамическом формирователе в результате взрыва, можно разделить на несколько этапов.

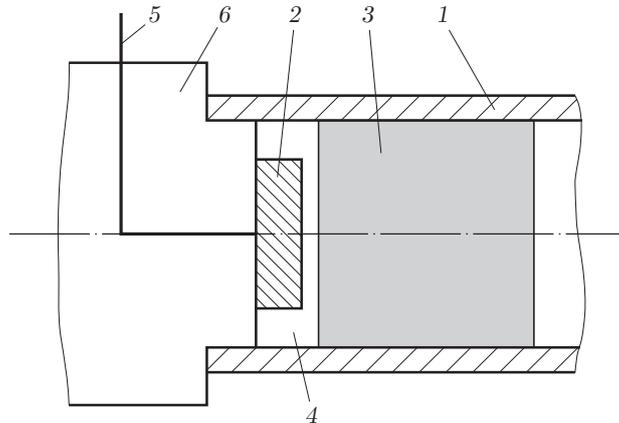


Рис. 1. Схема газодинамического формирователя:

1 — корпус; 2 — комбинированный заряд; 3 — нагружаемое тело; 4 — камера горения;
5 — детонационный мостик; 6 — затвор

На первом этапе происходит детонация ВВ, расширение продуктов детонации и воспламенение порохового заряда.

В результате срабатывания взрывопроводящего мостика (см. рис. 1) инициируется детонация навески конденсированного ВВ. Давление p_G и плотность ρ_G в детонационной волне (в точке Жуге) приближенно определим по формулам [2]

$$\rho_G = \rho_0(k + 1)/k; \quad (1)$$

$$p_G = \rho_0 D^2 / (k + 1), \quad (2)$$

где ρ_0 — плотность ВВ; k — показатель изоэнтропы в точке Жуге; D — скорость детонации ВВ.

Для уравнения состояния продуктов детонации $p = A\rho^k$ (A — константа) показатель $k = 3$, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными [3–5]. Используя соотношения (1), (2), определим начальные плотность и давление продуктов детонации:

$$\rho_{D0} = 4\rho_0/3, \quad p_{D0} = \rho_0 D^2 / 4.$$

После завершения процесса детонации ВВ начинается процесс заполнения камеры (см. рис. 1) продуктами детонации, сопровождаемый образованием ударных волн.

Поскольку при детонации ВВ и расширении продуктов детонации процессы химического превращения происходят в течение малого (несколько микросекунд) по сравнению с длительностью процесса горения порохового заряда (несколько миллисекунд) промежуток времени, они не оказывают значительного влияния на параметры ударного импульса, действующего на массивное нагружаемое тело, которое в данной задаче полагается твердым. В этом случае достаточно определить установившиеся значения давления и плотности продуктов детонации в момент окончания первого этапа. Исходя из сказанного выше в расчете примем допущение, что после подрыва ВВ на нагружаемое тело действует усилие, вызываемое осредненным по объему давлением, а влиянием волновых процессов на разгон тела можно пренебречь. Правомерность использования данного допущения при оценке параметров ударного импульса ускорения тела подтверждена экспериментально.

Давление p_0 , установившееся в камере горения после детонации ВВ, в расчетной модели принимается в качестве давления форсирования, т. е. давления, действующего на торец нагружаемого тела в момент начала его движения.

Как правило, при применении в установках бризантных ВВ давление p_0 определяется по экспериментальным данным [6–8]. При этом предполагается, что максимальное давление в камере пропорционально отношению массы ВВ m_0 к начальному объему камеры W_0 :

$$p_0 = \varphi_1 m_0 / W_0, \quad (3)$$

где φ_1 — коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально и зависящий от плотности заряжения ρ_L . Зависимость $\varphi_1(\rho_L)$ можно представить в виде [7]

$$\varphi_1 = (0,88 + 0,0045\rho_L) \cdot 10^6. \quad (4)$$

Расчеты, проведенные для газодинамического формирователя с комбинированным зарядом взрывного инициирования с учетом зависимостей (3), (4), показывают, что давление форсирования меньше давления, полученного в экспериментах на газодинамической установке. Для получения расчетных значений давления p_0 , более близких к экспериментальным, используем степенную зависимость

$$p_0 = A_P \left(\frac{m_0}{W_0 - W_S} \right)^{n_P}, \quad (5)$$

где A_P , n_P — коэффициент и показатель степени, определяемые экспериментально; W_S — объем, занимаемый пороховыми навесками.

Из анализа данных, полученных в экспериментах на газодинамической установке, следует, что коэффициент A_P зависит от плотности ВВ, давления продуктов детонации и определяется по формуле

$$A_P = p_{D0} / \rho_{D0}^{n_P}. \quad (6)$$

В результате воздействия на комбинированный заряд продуктов детонации начинается процесс его воспламенения. Учет особенностей воспламенения комбинированного заряда в случае его взрывного инициирования приводит к неоправданному усложнению задачи и увеличению погрешности расчетов, поэтому в предлагаемой расчетной модели кинетика процесса воспламенения не учитывается.

Использование соотношения (5) (при учете объема, занятого пороховыми навесками), отличающегося от выражения (3) наличием показателя степени n_P , позволяет учитывать влияние воспламенения комбинированного порохового заряда на давление форсирования. Эффективность использования формул (5), (6) подтверждена результатами многочисленных расчетных экспериментов, согласующимися с опытными данными.

На втором этапе происходят процессы горения комбинированного заряда и движения нагружаемого тела.

В расчетной модели горения комбинированного заряда примем следующие основные допущения, характерные для термодинамических моделей: давление в камере горения однородно; скорости и другие характеристики горения порохов осреднены по заряду; сила и коволюм продуктов горения каждого вида пороха в комбинированном заряде постоянны. Допущения, относящиеся к движению нагружаемого тела, общеприняты [9].

С целью учета горения комбинированного заряда, состоящего из двух видов пороховых навесок, переформулируем классическую систему уравнений внутренней баллистики. Аналитические зависимости, описывающие процессы горения порохов и образования пороховых газов, заранее неизвестны. Количество образующихся газов в расчетной модели находим по формуле

$$\psi_i = \varkappa_i z_i (1 + \lambda_i z_i + \mu_i z_i^2), \quad (7)$$

где индексы $i = 1, 2$ соответствуют первой и второй навескам порохов; \varkappa_i , λ_i , μ_i — характеристики формы пороха; $z_i = e_i / e_{i1}$ — относительная толщина слоя сгоревшего пороха; e_i —

толщина слоя сгоревшего пороха; e_{1i} — начальная толщина слоя пороха. Закон изменения скорости горения комбинированного заряда зададим системой уравнений с использованием степенных и линейных функций:

$$\frac{de_i}{dt} = A_{i1}p^{\nu_i} \quad \text{при } p \leq p_{Ji}; \quad (8)$$

$$\frac{de_i}{dt} = A_{i2}p \quad \text{при } p > p_{Ji}. \quad (9)$$

Здесь A_{i1} , A_{i2} — коэффициенты, зависящие от вида пороха и условий проведения испытаний; p — давление в камере горения газодинамического формователя; ν_i — показатель степени, зависящий от вида пороха и условий проведения испытаний; p_{Ji} — давление, соответствующее переходу степенной зависимости скорости горения в линейную и зависящее от вида пороха.

Уравнения (8), (9) дают изоэнтальпийную зависимость скорости горения комбинированного заряда от давления в камере горения, позволяющую подобрать коэффициенты A_{i1} , A_{i2} таким образом, чтобы результаты расчета с достаточной точностью соответствовали значениям давления, полученным экспериментально. Таким образом учитываются особенности реального процесса горения заряда в условиях испытания.

При использовании в комбинированном заряде черного пороха скорость притока газа можно вычислить по эмпирической зависимости [10]

$$\frac{d\psi_i}{dt} = \alpha_{bi}(1 - \psi_i)p \exp[\beta_{bi}(T_0 - 288)],$$

где t — время; α_{bi} , β_{bi} — температурные коэффициенты скорости горения пороха; T_0 — начальная температура пороха.

Поскольку в навесках комбинированного заряда различна длительность горения пороха, второй этап включает две фазы горения: 1) совместное горение двух навесок пороха, заканчивающееся при выполнении условия $\psi_2 = 1$ (при этом следует учитывать, что порох второй навески сгорает быстрее); 2) горение одной навески пороха, заканчивающееся при выполнении условия $\psi_1 = 1$.

Используя уравнение Резаля [9] и закон Дальтона о сумме парциальных давлений, определим давление пороховых газов при горении комбинированного заряда:

$$p = \frac{K_2}{s(l_\psi + l)} \left(f_1\omega_1\psi_1 + f_2\omega_2\psi_2 - \frac{1}{2} \frac{\theta_1\omega_1 + \theta_2\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \varphi m v^2 + p_0 l_{\psi_0} s \right). \quad (10)$$

Здесь K_2 — коэффициент дополнительных потерь энергии, зависящий от конструкции газодинамического формователя и условий проведения испытаний; f_i , ω_i — сила и вес пороха (см. [9. С. 116, 314–319]); θ_i — коэффициент пропорциональности; φ — коэффициент фиктивности массы; m — масса нагружаемого тела; l — расстояние, на которое перемещается нагружаемое тело; $v = dl/dt$ — скорость перемещения нагружаемого тела; l_{ψ_0} — начальная приведенная длина свободного объема камеры горения; s — площадь поперечного сечения камеры горения; l_ψ — приведенная длина свободного объема камеры горения.

Учитывая наличие в пороховом заряде двух навесок, для приведенной длины l_ψ и коэффициента φ имеем

$$l_\psi = \frac{1}{s} \left(W_0 - \frac{\omega_1}{\delta_1} (1 - \psi_1) - \alpha_1 \omega_1 \psi_1 - \frac{\omega_2}{\delta_2} (1 - \psi_2) - \alpha_2 \omega_2 \psi_2 \right); \quad (11)$$

$$\varphi = K + \frac{\omega_1 + \omega_2}{3q} \left(1 - \frac{l_0^3}{(l_0 + l_E)^3} \right), \quad (12)$$

где δ_i — плотность пороха; α_i — коэффциент пороховых газов; K — коэффициент, зависящий от конструкции камеры горения и условий проведения испытаний [9]; l_0 — приведенная длина камеры горения; l_E — длина газодинамического формователя; q — вес нагружаемого тела.

Поступательное движение нагружаемого тела описывается уравнением

$$\frac{dv}{dt} = \frac{ps}{\varphi m}. \quad (13)$$

Обобщенным условием завершения второго этапа (при сгорании всего комбинированного порохового заряда) являются соотношения $\psi_1 = 1$ и $\psi_2 = 1$.

На третьем этапе наблюдается адиабатическое расширение образовавшихся газов. Потерей тепла можно пренебречь, так как время движения нагружаемого тела в газодинамическом формователе очень мало. Учитывая, что после сгорания комбинированного заряда образуется смесь газов, выражение для определения давления в камере горения запишем в виде

$$p = K_2 p_B \left(\frac{l_1 + l_B}{l_1 + l} \right)^{1 + (\theta_1 \omega_1 + \theta_2 \omega_2) / (\omega_1 + \omega_2)}, \quad (14)$$

где p_B , l_B — давление и перемещение нагружаемого тела в момент окончания процесса горения пороха; l_1 — значение функции l_ψ в момент завершения второго этапа.

Условия, при которых завершается второй этап, являются начальными условиями третьего этапа, заканчивающегося в момент выхода нагружаемого тела из газодинамического формователя, т. е. при $l = l_E$.

Вследствие нелинейности систем уравнений (7)–(13) и (13), (14) основная задача внутренней баллистики решалась численно по изложенной выше методике.

Результаты расчета и их сравнение с экспериментальными данными. По изложенной выше методике проведено исследование внутренней баллистики экспериментальной метательной ствольной установки с комбинированным зарядом взрывного инициирования. Нагружающий комбинированный заряд состоял из навесок пироксилинового и дымного порохов массой m_1 и m_2 соответственно, а также инициирующей навески конденсированного ВВ массой m_0 .

Результаты расчетов, соответствующих опытам с различными условиями заряжания, представлены в таблице. Видно, что максимальные ускорения a_{\max} нагружаемого тела, определенные при одних и тех же значениях коэффициентов A_{i1} , A_{i2} в зависимостях (8), (9), отличаются от экспериментальных в пределах погрешности измерений. Это

Безразмерные максимальные ускорения нагружаемого тела
в опытах с различными условиями заряжания

Номер опыта	Условия заряжания				a_{\max}/a_n	
	m_1 , кг	m_2 , кг	m_0 , кг	l_0 , м	Расчет	Эксперимент
1	4,5	0,25	0,034	0,075	22,3	20,8
2	6,0	0,25	0,033	0,075	34,9	32,0
3	7,2	0,47	0,090	0,075	70,7	70,5
4	5,5	0,25	0,033	0,080	27,7	29,1
5	8,0	0,25	0,030	0,080	56,6	56,0
6	6,0	0,25	0,033	0,080	31,9	31,0
7	8,6	0,25	0,030	0,077	70,5	68,0

Примечание. a_n — нормирующий уровень ускорений.

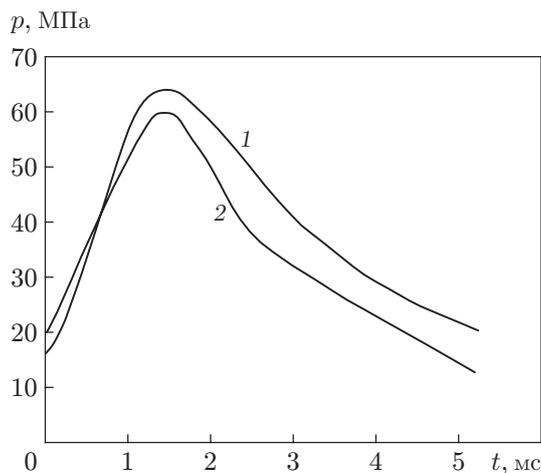


Рис. 2. Зависимость давления газа от времени:
1 — результаты расчетов; 2 — экспериментальные данные

свидетельствует о правомерности предлагаемых модели процесса и методики определения коэффициентов физических закономерностей горения порохового комбинированного заряда, учитывающих особенности реальных процессов, происходящих в рассматриваемой установке.

На рис. 2 представлены результаты расчетного моделирования опыта 3 (см. таблицу). Анализ расчетной и экспериментальной зависимостей $p(t)$ позволяет получить информацию о процессах, происходящих в экспериментальных установках, и оценить правильность расчета. На рис. 2 видно, что результаты расчета и экспериментальные данные хорошо согласуются.

Характерные зависимости параметров ударных импульсов. Расчетные исследования проводились с целью получения зависимостей параметров ударных импульсов от параметров формователя с комбинированным зарядом взрывного инициирования (рис. 3, 4). Следует отметить, что зависимости ускорения нагружаемого тела от условий заряжания аналогичны зависимостям давления от условий заряжания (см. рис. 3).

Влияние массы пироксилинового пороха. Изменение массы пироксилинового пороха m_1 оказывает наиболее существенное влияние на максимальное давление в камере и ускорение нагружаемого тела. При значительном увеличении массы пироксилинового пороха увеличивается плотность заряжания камеры горения, что в свою очередь влияет на процессы горения порохового заряда: скорости горения дымного и пироксилинового порохов также увеличиваются.

Влияние массы дымного пороха. При увеличении массы дымного пороха m_2 увеличивается скорость горения пироксилинового пороха, кроме того, наблюдается рост максимального давления и максимального ускорения нагружаемого тела, а длительность переднего фронта нагружающего импульса уменьшается.

Влияние массы ВВ. Увеличение массы ВВ m_0 приводит к увеличению начального давления в камере горения, вследствие чего возрастают интенсивность процессов горения порохового заряда и максимальное давление в камере горения. В результате длительность переднего фронта нагружающего импульса уменьшается, а его максимальное значение, наоборот, увеличивается.

Влияние начальной длины камеры горения газодинамического формователя. Уменьшение начальной длины камеры горения l_0 приводит к уменьшению начального объема камеры. Это оказывает значительное влияние на все процессы, происходящие после

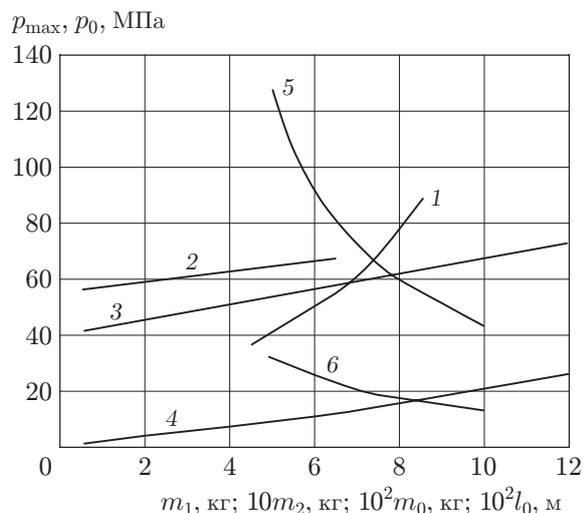


Рис. 3

Рис. 3. Зависимости начального и максимального давлений от условий заряжения:

1 — $p_{\max}(m_1)$; 2 — $p_{\max}(m_2)$; 3 — $p_{\max}(m_0)$; 4 — $p_0(m_0)$; 5 — $p_{\max}(l_0)$; 6 — $p_0(l_0)$

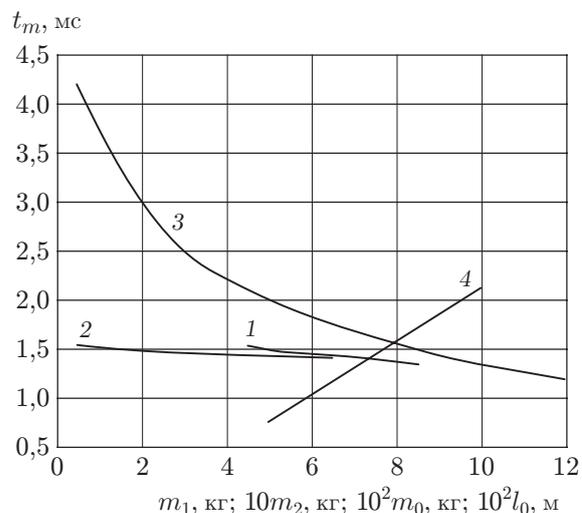


Рис. 4

Рис. 4. Зависимости длительности переднего фронта нагружающего импульса от условий заряжения:

1 — $t_m(m_1)$; 2 — $t_m(m_2)$; 3 — $t_m(m_0)$; 4 — $t_m(l_0)$

срабатывания порохового заряда: начальное давление в камере горения и интенсивность горения порохового заряда увеличиваются, максимальное давление в камере и максимальное ускорение нагружаемого тела также возрастают, а длительность переднего фронта нагружающего импульса уменьшается.

Закключение. Разработана методика расчета параметров длительных ударных нагружений, создаваемых газодинамическим формирова­те­лем с помощью комбинированного заряда взрывного инициирования, в которой используются аналитические зависимости, описывающие процессы горения комбинированного заряда и выведенные с использованием уравнения Резаля и закона Дальтона. Получены полуэмпирические зависимости определения давления форсирования при взрывном инициировании. Эффективность использования предложенных закономерностей горения комбинированного заряда подтверждена экспериментально.

В результате расчетных исследований влияния условий заряжения и размеров камеры горения газодинамического формирова­те­ля с комбинированным зарядом взрывного инициирования получены зависимости, позволяющие прогнозировать и корректировать параметры длительного ударного нагружения массивных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Занегин И. В., Карачинский С. И.** Детонационные и физико-химические характеристики артиллерийских порохов // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 5. С. 81–84.
2. **Физика взрыва** / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2004.
3. **Дремин А. Н.** Детонационные волны в конденсированных средах / А. Н. Дремин, С. Д. Савров, В. С. Трофимов, К. К. Шведов. М.: Наука, 1970.

4. **Каннель Г. И.** Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Г. И. Каннель, С. В. Разоренов, А. В. Уткин, В. Е. Фортов. М.: Янус-К, 1996.
5. **Ударные** волны и экстремальные состояния вещества / Под ред. В. Е. Фортова. М.: Наука, 2000.
6. **Новиков С. А.** Полезные взрывы. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2000.
7. **Новиков С. А.** Установки взрывного типа для механических испытаний материалов и конструкций / С. А. Новиков, В. А. Петров. М.: ЦНИИАтоминформ: Всесоюз. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1989.
8. **Новиков С. А., Петров В. А., Багрянов Б. В.** Установка взрывного типа для создания инерционных перегрузок // Пробл. прочности. 1982. № 2. С. 97–100.
9. **Серебряков М. Е.** Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962.
10. **Ассовский И. Г.** О влиянии воспламенителя на горение пороха в условиях артвыстрела / И. Г. Ассовский, З. Г. Закиров, О. И. Лейпунский. М.: Ин-т хим. физики АН СССР, 1982.

Поступила в редакцию 13/V 2008 г.
