

УДК 539.374, 536.46, 623.5

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭКСТРУЗИИ ПОЛИЭТИЛЕНА ПРИ УСКОРЕНИИ МЕТАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В БАЛЛИСТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Н. В. Быков, А. С. Карнейчик, А. А. Макаров, М. С. Товарнов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
105005 Москва, Россия

E-mails: bykov@bmstu.ru, karas-dmitrov@mail.ru, galaxy_burn@mail.ru, mtovarnov@mail.ru

Экспериментально и теоретически исследуется процесс ускорения метаемых элементов в баллистических установках за счет высокоскоростной экструзии полиэтилена через конический насадок. Используются квазиодномерная газодинамическая модель полидисперсной смеси газа и пороховых частиц и вязкопластическая модель деформируемого поршня. Приведены результаты численного моделирования исследуемого процесса, а также результаты серии выстрелов из пороховой баллистической установки. Экспериментально изучено влияние на выходную скорость метаемого элемента геометрии конического перехода и входной скорости деформируемого тела.

Ключевые слова: высокоскоростная экструзия, методы ускорения тел, гидродинамический эффект, внутренняя баллистика, баллистические установки, деформация.

DOI: 10.15372/PMTF20190422

Введение. Баллистические установки для ускорения тел в лабораторных условиях широко используются при проведении аэробаллистических исследований, в частности при имитации взаимодействия объектов с космическим “мусором”. Известно, что негативным следствием космической деятельности является накопление в околоземном пространстве техногенного космического “мусора”, состоящего из частей отработавших ракет-носителей и космических аппаратов. В сочетании с естественными частицами-метеороидами такая среда представляет угрозу для космических аппаратов. При этом с течением времени количество техногенных осколков увеличивается и опасность столкновения их с орбитальными космическими аппаратами возрастает. Для наземного экспериментального исследования экранов защитных конструкций используются различные экспериментальные баллистические установки [1]: в низкоскоростном диапазоне (менее 3 км/с) — пороховые баллистические установки (ПБУ) и одноступенчатые газовые пушки, в диапазоне скоростей 5 ÷ 7 км/с — двухступенчатые легкогазовые баллистические установки, в высокоскоростном диапазоне (более 7 км/с) — метательные установки взрывного (кумулятивного) типа. При этом в диапазоне скоростей 3 ÷ 5 км/с в России экспериментальная отработка элементов защиты не проводится вследствие отсутствия соответствующего оборудования.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 12-08-31408, 16-38-00948).

© Быков Н. В., Карнейчик А. С., Макаров А. А., Товарнов М. С., 2019

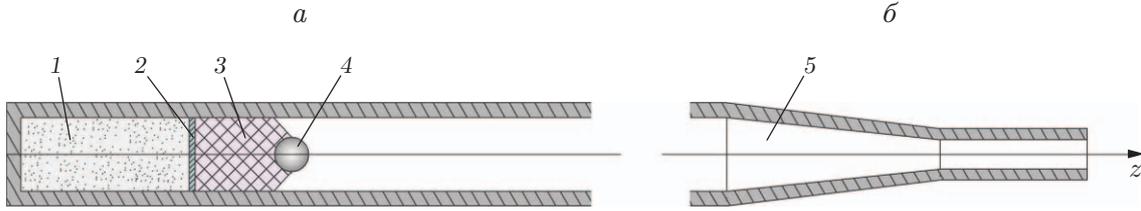


Рис. 1. Схема метательной установки, в которой используется гидродинамический эффект:

a — базовая схема, *б* — модуль ГДЭ; 1 — пороховой заряд или сжатый газ, 2 — обтюрирующий поддон, 3 — деформируемый поршень, 4 — метаемый элемент, 5 — конус

Поэтому актуальной является задача разработки наиболее простых и доступных способов разгона тел до указанных скоростей.

Известно, что при наличии гидродинамического эффекта (ГДЭ) скорость метаемого элемента на конечной стадии разгона увеличивается [2]. Схема метания с использованием ГДЭ приведена на рис. 1. Метательная установка включает базовую схему, с помощью которой разгоняется сборка, состоящая из метаемого элемента, деформируемого поршня и обтюрирующего поддона, а также модуль для создания ГДЭ.

В качестве базовой схемы могут использоваться ПБУ, установка для метания тел сжатым газом (в том числе легким), а также установка взрывного ствольного метания. Модуль ГДЭ представляет собой сужающийся канал трубы с входным диаметром, равным диаметру сборки, и меньшим выходным диаметром. Гидродинамический эффект заключается в перераспределении скоростей внутри материала деформируемого поршня в процессе его высокоскоростной экструзии через конический сужающийся элемент. Это позволяет создать дополнительный ускоряющий импульс для метаемого элемента за счет ускорения передней части деформируемого поршня. При этом скорости обтюрирующего поддона и задней части деформируемого поршня уменьшаются. В ряде работ изучаются свойства полиэтилена при его высокоскоростной экструзии [3, 4].

Целью данной работы является получение новых экспериментальных результатов работы баллистических установок с использованием ГДЭ. При этом не ставилась цель достижения предельной скорости метания.

Впервые теоретическое исследование влияния геометрии модуля ГДЭ на характеристики метательного устройства проведено в работе [5].

1. Теоретическая модель. Горение пороха и движение продуктов сгорания описываются квазиодномерной системой уравнений гетерогенной смеси с несжимаемой конденсированной фазой [6, 7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\varphi \rho_g S) + \frac{\partial}{\partial x} (\varphi \rho_g u_g S) &= \dot{m}_c S, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\varphi \rho_g u_g S) + \frac{\partial}{\partial x} (\varphi S (\rho_g u_g^2 + p)) &= p \frac{\partial}{\partial x} (\varphi S) + (\dot{m}_c u_p - f_s) S, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\varphi \rho_g E_g S) + \frac{\partial}{\partial x} (\varphi \rho_g u_g S (E_g + \frac{p}{\rho_g})) &= (\dot{m}_c (Q_{ex} + \frac{p}{\rho_p} + \frac{u_p^2}{2}) - f_s u_p) S - p \frac{\partial}{\partial t} (S \varphi), \quad (1) \\ \frac{\partial}{\partial t} (\beta \rho_p S) + \frac{\partial}{\partial x} (\beta \rho_p u_p S) &= -\dot{m}_c S, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\beta \rho_p u_p S) + \frac{\partial}{\partial x} (\beta S (\rho_p u_p^2 + p + R_p)) &= p \frac{\partial}{\partial x} (\beta S) + (f_s - \dot{m}_c u_p) S, \end{aligned}$$

где x, t — пространственная координата и время соответственно; φ — объемная доля газовой фазы (пористость); ρ_g, u_g — плотность и скорость газовой фазы соответственно; S — площадь поперечного сечения канала ствола; \dot{m}_c — приток массы газа в единицу времени в единице объема смеси вследствие горения; p — давление; $\beta = 1 - \varphi$ — объемная доля конденсированной фазы; ρ_p, u_p — плотность и скорость конденсированной фазы соответственно; f_s — сила межфазного взаимодействия, обусловленная разностью скоростей фаз; $E_g = e_g + u_g^2/2$ — полная удельная энергия газовой фазы; e_g — удельная внутренняя энергия газовой фазы; Q_{ex} — поток тепла, выделяющегося при горении пороха (калорийность); R_p — межгранулярное давление.

Система уравнений (1) замыкается определяющими соотношениями, включающими уравнение состояния газа в форме уравнения Дюпре, уравнение притока газа вследствие сгорания конденсированной фазы, уравнение для определения силы взаимодействия фаз в приближении Эргана, уравнение переноса относительной толщины сгоревшего пороха, закон горения Вьеля и уравнение межгранулярного давления R_p , препятствующего чрезмерному уплотнению конденсированной фазы, используемое при достижении критического значения β_c , соответствующего гравиметрической упаковке частиц:

$$R_p = \begin{cases} 0, & \beta \leq \beta_c, \\ B\{[(1 - \beta_c)/(1 - \beta)]^n - 1\}, & \beta > \beta_c \end{cases}$$

(B, n — эмпирические константы). Расчеты проводились при $\beta_c = 0,56$, $B = 150$ МПа, $n = 0,57$ [8].

Более подробно данная модель изложена, например, в работах [6–10].

В качестве начальных условий для системы (1) выбираются значения функций, соответствующие давлению 5 МПа, при котором начинается устойчивое горение пороха [7].

Деформирование поршня описывается уравнениями [6, 7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u S)}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho u S)}{\partial t} + \frac{\partial((\rho u^2 - \sigma^{xx})S)}{\partial x} &= 2\pi R \sigma_w^{n\tau} - \sigma_w^{nn} \frac{\partial S}{\partial x}, \\ \frac{\partial(\rho E S)}{\partial t} + \frac{\partial}[\partial x] [(\rho E - \sigma^{xx})u S] &= 2\pi R \sigma_w^{n\tau} u, \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ, u, E — плотность, скорость и полная удельная энергия материала поршня соответственно; σ^{xx} — осевая составляющая тензора напряжений; R — радиус канала ствола; индексом w отмечены величины, соответствующие внешней поверхности поршня: $\sigma_w^{n\tau}$ — касательное напряжение, σ_w^{nn} — нормальное напряжение.

Уравнения (2) замыкаются следующими эмпирическими зависимостями [11]. Касательное напряжение на стенке определяется формулой

$$\sigma_w^{n\tau} = -\tau(u) \operatorname{sign} u,$$

где

$$\tau(u) = \begin{cases} k_0(1 + b_1 u) e^{-b_2 u} \sigma, & \sigma < \sigma_*, \\ \tau_0(1 + b_1 u) e^{-b_2 u}, & \sigma \geq \sigma_*, \end{cases}$$

σ — давление осевого сжатия; для полиэтилена высокого давления значения эмпирических констант равны $\sigma_* = 25,2$ МПа, $k_0 = 0,054$, $b_1 = 0,027$ с/м, $b_2 = 0,00675$ с/м; $\tau_0 = k_0 \sigma_* = 1,36$ МПа — напряжение трения при значении скорости скольжения, близком к нулю.

Предполагается, что материал деформируемого поршня является вязкопластической жидкостью [6], поэтому

$$\sigma^{xx} = -p + \tau^{xx}, \quad \tau^{xx} = \frac{2}{3} k(h) \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{u}{S} \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad k(h) = \mu + \frac{\tau_s}{2h},$$

где μ — динамическая вязкость; τ_s — предел текучести при чистом сдвиге,

$$h = \frac{1}{2\sqrt{3}} \left| 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{u}{S} \frac{\partial S}{\partial x} \right|.$$

Используется следующее двучленное калорическое уравнение состояния материала поршня [6]:

$$e = \frac{p - c_0^2(\rho - \rho_0)}{(k - 1)\rho}.$$

Для полиэтилена высокого давления значения постоянных, определенных на основе экспериментальных данных [12], равны $\rho_0 = 919,03$ кг/м³, $c_0 = 2380$ м/с, $k = 1,63098$. При этом можно считать, что при $\rho < \rho_0$ материал испытывает растяжение до того момента, когда давление в нем становится равным нулю или некоторому условному пределу, после чего разрушается [13].

Скорость движения обтюрирующего поддона определяется уравнением

$$m \frac{du_b}{dt} = S(p_g + \sigma^{xx}),$$

где u_b — скорость движения обтюрирующего поддона; m — масса обтюрирующего поддона; $\sigma^{xx} = -p + \tau^{xx}$ — напряжение на левой границе поршня; p_g — давление пороховых газов. Для определения скорости метаемого тела записывается аналогичное уравнение.

При численном решении системы уравнений (1), (2) в силу наличия перемещающихся контактных границ использовалась двухшаговая схема типа предиктор-корректор на подвижной сетке. Потoki на границах ячеек определялись в результате решения задачи о распаде разрыва с использованием процедуры AUSM+ [14, 15]. При определении потоков с использованием метода AUSM+ в расчетной области, содержащей гетерогенную смесь, происходит потеря устойчивости численного решения, что обусловлено существованием областей, в которых система уравнений (1) не является гиперболической [16]. Для устранения неустойчивости решения проводится расчет потоков конденсированной фазы по схеме Русанова [13].

2. Экспериментальные исследования. Эксперименты проводились в специализированном центре коллективного пользования “Экспериментальная физика быстропротекающих процессов” Дмитровского филиала Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана.

В экспериментах использовалась ПБУ с нарезным стволом калибром 23 мм и длиной разгонной цилиндрической части 884 мм, располагающаяся на стапеле баллистического стенда. Общий вид этой ПБУ показан на рис. 2. К дульному срезу ствола ПБУ с помощью резьбового соединения крепился дульный насадок, конструкция которого позволяет закреплять конические удлинители с различными выходными диаметрами (14, 16 и 18 мм), их входной диаметр равен 23 мм. Для обеспечения сохранности ствола ПБУ между выходом из ствола и входом в конус помещен цилиндрический бандаж длиной 100 мм с внутренним диаметром 23 мм. Соединительные стыки изолировались от прорыва газов с помощью отожженных медных прокладок. Конструкция устройства дульного насадка показана на рис. 3.



Рис. 2. Баллистическая установка с дульным насадком

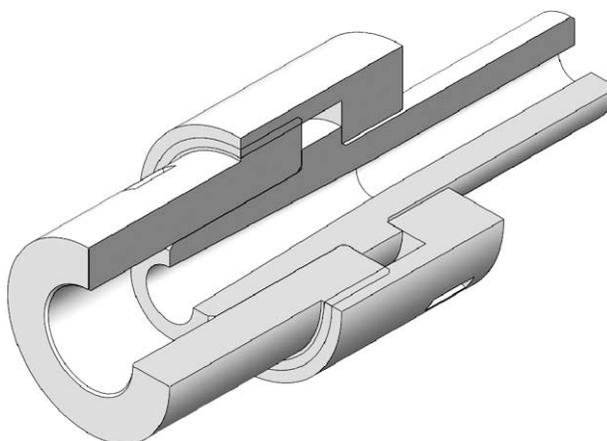


Рис. 3. Конструкция конического дульного насадка

В ПБУ разгонялась сборка, состоящая из медного метаемого элемента, деформируемого поршня из полиэтилена низкого давления и медного обтюрирующего поддона (рис. 4). Суммарная масса сборки равна 86,5 г, масса метаемого элемента — 21,9 г, масса деформируемого поршня — 25,1 г, масса обтюрирующего поддона — 39,5 г.

Проводились измерения дульной скорости метаемого элемента и давления на дно канала ствола. Дульная скорость измерялась тремя способами: с помощью контактных раммишеней, путем обработки результатов высокоскоростной видеосъемки камерами Phantom V1610 и с помощью доплеровского локатора Infinition BR 3503. Давление измерялось с использованием системы “Нейва 2К” и пьезоэлектрических датчиков 2Т6000, максимальное давление — крешерным прибором, показания которого сравнивались с показаниями пьезоэлектрического датчика.

В экспериментах с помощью пороховой навески зерненого семиканального пороха марки 4/7 Цгр, имеющей массу 25,0 или 43,6 г, варьировалась скорость сборки на входе в конус, а за счет использования конусов различного диаметра исследовалось влияние геометрии конического перехода на процесс метания. Использовались конусы 23/18, 23/16 и 23/14 (первое число означает входной диаметр в миллиметрах, второе — выходной), схема которых представлена на рис. 5, а геометрические параметры — в табл. 1.

Скорость сборки на входе в конус определялась при проведении дополнительных экспериментов (метание сборки в отсутствие дульного конического насадка).

3. Результаты экспериментальных и теоретических исследований. Проведен расчет параметров процесса метания для конуса 23/16 при скорости сборки на входе в конус 572 м/с. Распределения скорости и давления в материале поршня в различных его

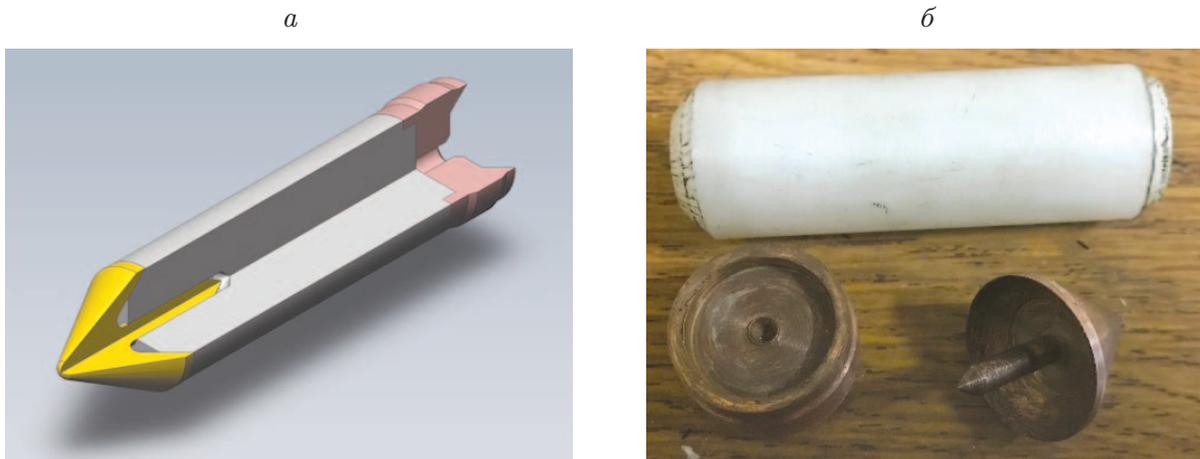


Рис. 4. Конструкция (а) и общий вид (б) метаемой сборки

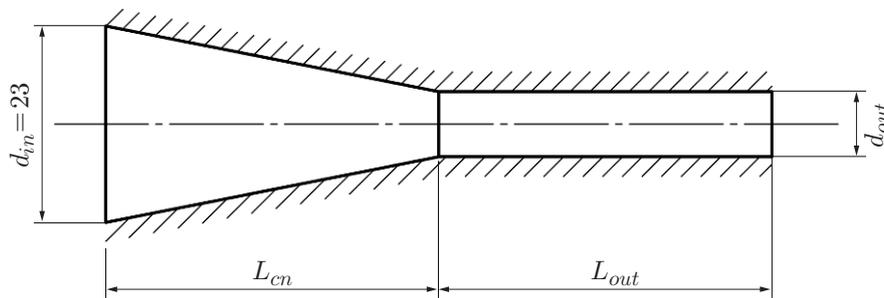


Рис. 5. Геометрия конического насадка

Таблица 1

Параметры конических насадков

d_{out} , мм	L_{cn} , мм	L_{out} , мм	Конусность
14	80	120	9 : 80
16	100	100	1 : 14
18	100	100	1 : 20

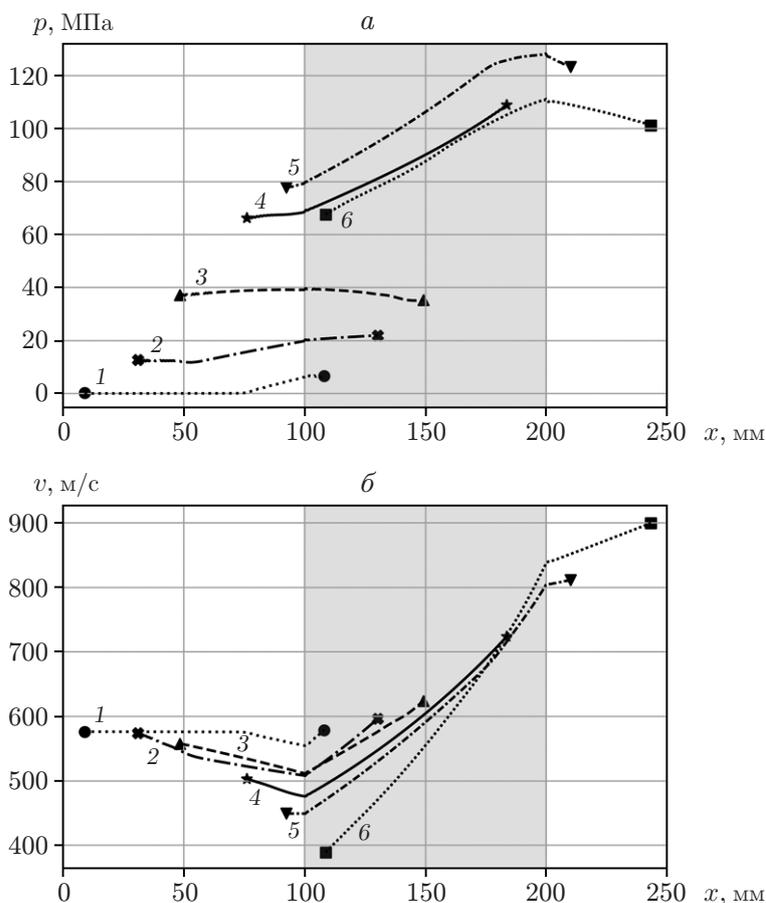


Рис. 6. Распределения давления p (а) и скорости v (б) в материале поршня при прохождении конического участка (заштрихованная область) в различные моменты времени после входа передней части поршня в конус:
 1 — $t = 0,01$ мс, 2 — $t = 0,05$ мс, 3 — $t = 0,08$ мс, 4 — $t = 0,14$ мс, 5 — $t = 0,17$ мс, 6 — $t = 0,21$ мс

положениях показаны на рис. 6. На рис. 6,а видно, что по мере продвижения деформируемого поршня в конус давление в его материале увеличивается до определенного значения, а после выхода поршня из конуса уменьшается. Анализ распределения скорости показывает, что по мере прохождения конического участка скорость передней части деформируемого поршня увеличивается по сравнению со скоростью на входе, в то время как скорость задней части уменьшается.

В табл. 2 приведены полученные в экспериментах масса навески пороха ω , скорость сборки на входе в конус $V_{\text{вх}}$, выходной диаметр конуса d_{out} , скорость метаемого элемента на выходе из конуса $V_{\text{вых}}^3$, отношение скоростей сборки на выходе из конуса и входе в него $V_{\text{вых}}/V_{\text{вх}}$, а также скорость сборки на выходе из конуса $V_{\text{вых}}^p$, полученная на основе численного моделирования.

В эксперименте обнаружено увеличение скорости метаемого элемента на выходе из конуса при уменьшении выходного диаметра конуса. Следует отметить, что при замене конуса 23/16 на конус 23/14 скорость увеличивается на меньшую величину. Это может быть обусловлено меньшей длиной конического участка (соответственно, бóльшим значением конусности) в конусе 23/14. Таким образом, для этого вида конусов результаты расчетов различаются более существенно, поскольку в данном случае на диссипативные

Таблица 2

Результаты экспериментов

ω , г	$V_{\text{ВХ}}$, м/с	d_{out} , мм	$V_{\text{ВЫХ}}^{\text{э}}$, м/с	$V_{\text{ВЫХ}}/V_{\text{ВХ}}$	$V_{\text{ВЫХ}}^{\text{р}}$, м/с
25,0	572	18	788	1,38	798
		16	860	1,50	876
		14	864	1,51	902
43,6	900	18	1193	1,32	1204
		16	1241	1,38	1289
		14	1260	1,40	1312

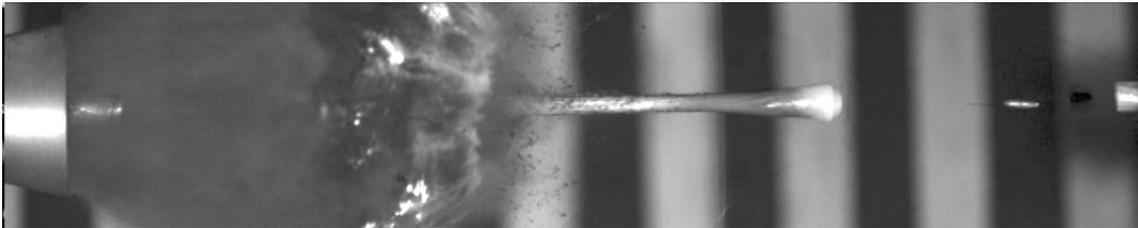
a*б**в*

Рис. 7. Результаты высокоскоростной видеосъемки:

a — конус 23/18 с навеской массой 43,6 г; *б* — конус 23/16 с навеской массой 43,6 г;*в* — конус 23/14 с навеской массой 43,6 г

процессы, происходящие в конусе при деформации, затрачивается большее количество энергии. Наиболее значительное увеличение скорости имеет место в экспериментах с конусами 23/16 и 23/14, причем увеличение скорости в этих двух экспериментах приблизительно одинаково. Это может быть вызвано тем, что в конусе 23/14 обжатие происходит при больших потерях энергии на деформацию и преодоление трения, а также тем, что для данного насадка длина конического участка составляет 80 мм, в то время как для остальных насадков — 100 мм.

Заметим, что для деформации в конусе сборки, конструкция которой представлена на рис. 4, требуется большая энергия, поэтому для уменьшения нагрузки на установку следует использовать сборку, для деформации которой требуется меньшее количество энергии.

На рис. 7 показаны кадры высокоскоростной видеосъемки процесса вылета сборки из канала ствола при использовании пороховой навески с максимальной массой. Метаемый

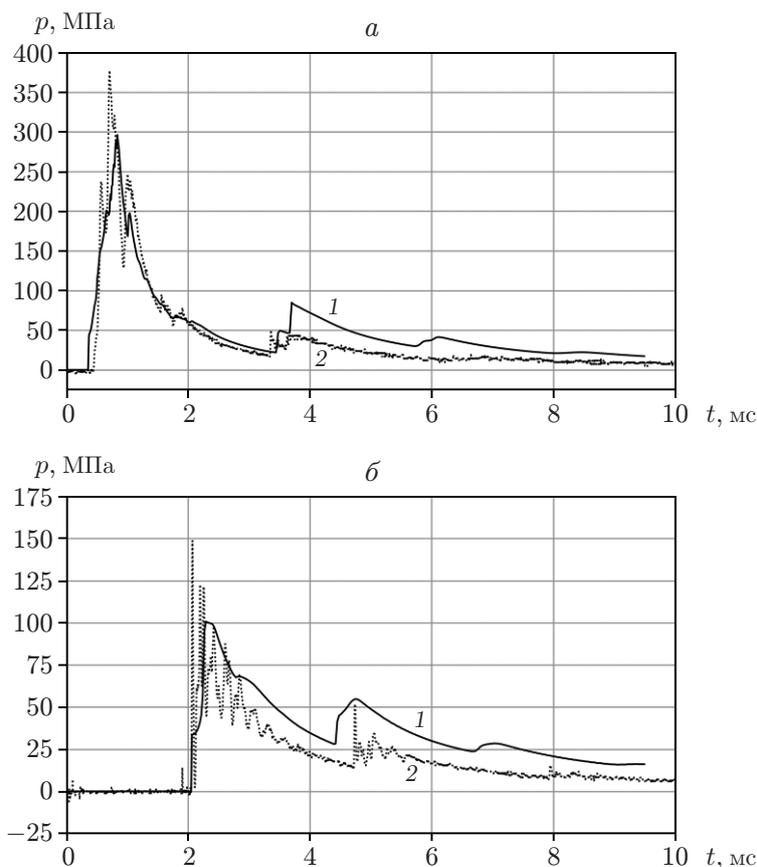


Рис. 8. Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости давления от времени для конуса 23/16 с навеской массой 43,6 г:

a — датчик, расположенный в камере; b — датчик, расположенный перед конусом

элемент отделяется от поршня после вылета из ствола, поскольку средняя скорость поршня меньше, чем у метаемого элемента. На рис. 7 видно, что по мере уменьшения выходного диаметра деформируемый поршень растягивается. Это свидетельствует о перераспределении скоростей в материале. На рис. 7, b виден разрыв материала поршня.

На рис. 8 приведены кривые давления, записанные пьезоэлектрическими датчиками, расположенными в камере баллистической установки и вблизи дульного среза (перед входом в конус), а также теоретические кривые давления в соответствующих сечениях канала ствола. Сборка входит в конус с достаточно большой скоростью, поэтому в момент ее удара о коническую поверхность возникает волна, распространяющаяся от конуса ко дну канала ствола. По показаниям датчика, установленного в камере баллистической установки, помимо максимального давления на дно канала можно определить момент возникновения и амплитуду обратной волны, появляющейся после входа разгоняемой сборки в конус. Датчик давления, расположенный вблизи входа в конус, фиксирует давление в газопороховой смеси, однако его показания могут содержать дополнительную погрешность вследствие наличия перед датчиком паразитного объема газа и достаточно большой скорости потока, направленного перпендикулярно сечению, в котором находится датчик. По этим показаниям могут быть определены моменты прохождения сборки, а также волн сжатия через соответствующее сечение. Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей показывает, что они удовлетворительно согласуются, при этом наибольшее различие достигается в тех областях, где поток является высокоскоростным (см. рис. 8, b) либо волна

давления распространяется перпендикулярно оси отверстия, в котором расположен датчик (см. рис. 8, *a*).

4. Выводы. В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований процесса высокоскоростной экструзии полиэтилена в баллистических установках можно сделать следующие выводы.

Увеличение скорости метаемого элемента за счет перераспределения скоростей в материале деформируемого поршня из полиэтилена подтверждено экспериментально. При этом при уменьшении выходного диаметра вследствие экструзии увеличивается скорость метаемого элемента. Установлено, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Авторы выражают благодарность О. Л. Бондареву, А. В. Богданову и В. И. Бойкину за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Златин Н. А.** Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Н. А. Златин, А. П. Красильщиков, Г. И. Мишин, Н. Н. Попов. М.: Наука, 1974.
2. **Bykov N. V.** Numerical modelling of physical processes in a ballistic laboratory setup with a tapered adapter and plastic piston used for obtaining high muzzle velocities // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014. V. 572. 012055.
3. **Brown E. N., Furmanski J., Ramos K. J., et al.** High-density polyethylene damage at extreme tensile conditions // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014. V. 500. 112011.
4. **Furmanski J., Trujillo C. P., Martinez D. T., et al.** Dynamic-tensile-extrusion for investigating large strain and high strain rate behavior of polymers // *Polymer Test.* 2012. V. 31. P. 1031–1037.
5. **Быков Н. В., Зеленцов В. В., Карнейчик А. С.** Баллистическая бикалиберная установка с деформируемым поршнем // *Инж. журн.: Наука и инновации.* 2013. Вып. 9. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/945.html>.
6. **Касимов В. З., Ушакова О. В., Хоменко Ю. П.** Численное моделирование внутрибаллистических процессов в легкогазовой пушке // *ПМТФ.* 2003. Т. 44, № 5. С. 13–22.
7. **Хоменко Ю. П.** Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах / Ю. П. Хоменко, А. Н. Ищенко, В. З. Касимов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
8. **Семенов И. В., Уткин П. С., Ахмедьянов И. Ф., Меньшов И. С.** Применение многопроцессорной вычислительной техники для решения задач внутренней баллистики // *Вычисл. методы и программирование.* 2011. Т. 12. С. 183–193.
9. **Быков Н. В., Нестеренко Е. А.** Анализ и сравнение вычислительных кодов для решения задачи внутренней баллистики на примере тестовой задачи AGARD // *Оборон. техника.* 2015. № 2. С. 21–36.
10. **Быков Н. В., Нестеренко Е. А.** Математическое моделирование и визуализация внутрикамерных процессов в баллистических установках с гидродинамическим эффектом // *Науч. визуализация.* 2015. Т. 7, № 1. С. 65–77.
11. **Иоселевич В. А., Пилюгин Н. Н., Чернявский С. Ю.** О влиянии трения на движение поршня под действием продуктов горения // *ПМТФ.* 1978. № 5. С. 73–79.
12. **Weir C. E.** Temperature dependence of compression of linear high polymers of high pressures // *J. Res. Nat. Bureau Standards.* 1954. V. 53, N 4. P. 245–252.
13. **Куликовский А. Г.** Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений / А. Г. Куликовский, Н. В. Погорелов, А. Ю. Семенов. М.: Физматлит, 2001.

14. **Liou M. S., Steffen C. J.** A new flux splitting scheme // J. Comput. Phys. 1993. V. 107. P. 23–39.
15. **Wada Y., Liou M.-S.** A flux splitting scheme with high-resolution and robustness for discontinuities. S. l., 1994. (Paper / AIAA; N 94-0083).
16. **Nessbaum J., Helluy P., Herard J.-M., Carriere A.** Numerical simulations of gas-particle flows with combustion // Flow, Turbulence Combust. 2006. V. 76, iss. 4. P. 403–417.

*Поступила в редакцию 19/X 2018 г.,
после доработки — 17/XII 2018 г.
Принята к публикации 25/II 2019 г.*
