

## Влияние индуцированных волн в камере на динамику процесса газодинамического разгона поршня в трубе

© Н.В. Быков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Исследовано влияние индуцированных возмущений газа в ресивере на баллистические характеристики одноступенчатых метательных установок на сжатом газе. Рассмотрено два способа создания волн в начальный момент: с помощью неоднородного начального распределения параметров газа и путем создания ударной волны, распространяющейся от дна трубы, внешними силами. Исследование проведено на основе численного решения одномерных газодинамических уравнений на подвижной сетке. Показано, что для относительно больших (по сравнению с массой разгоняющего газа) масс метаемых тел индуцированные неоднородным заполнением волны приводят к увеличению скорости вылета метаемого тела в 1,4 раза, а создание ударных волн внешним источником — в 1,8 раза.*

**Ключевые слова:** газодинамический разгон тел, неоднородное заполнение, ударные волны, методы ускорения тел, высокоскоростное метание, внутренняя баллистика, баллистические установки

**Введение.** Вопросы повышения эффективности разгона тел с помощью сжатого газа имеют большое практическое значение, что обусловлено большим числом областей использования этого процесса: от аэробаллистических и ударно-прочностных исследований [1–4] до спортивного и нелетального оружия, а также спасательных линеметов [5, 6]. В то же время известно, что стремление к достижению высоких скоростей при таком способе разгона приводит к существенному падению КПД системы [7, 8]. Это связано в первую очередь с низкой эффективностью обмена энергией внутри газа: давление на разгоняемое тело довольно быстро падает по мере расширения газа, при этом ускоряется часть собственной массы газа. Для повышения интенсивности энергетического обмена внутри газа можно использовать искусственно индуцированный волновой процесс, способствующий более полному заполнению площади под кривой давления на дно метаемого тела. Сделать это можно разными способами. В настоящей работе рассматриваются два способа: неоднородное начальное заполнение камеры и внешнее создание ударной волны на дне канала. При этом учитывается зависимость процессов от отношения  $\mu$  массы метаемого тела  $m$  к массе разгоняющего газа  $M$ .

Вопросы повышения КПД за счет неоднородного заполнения исследовались в работах [9, 10], в которых были получены некоторые частные решения при ряде допущений. В этих работах соотношение

плотностей в областях не варьировалось. При этом в работе [10] только начальное распределение давлений было неоднородным, что мало отвечает практическим задачам, а в работе [9] задача оптимизации ставилась при постоянном давлении, в то время как более рационально сравнивать разные случаи неоднородного распределения при одинаковой суммарной внутренней энергии газа в камере — именно этот подход принят в настоящей работе. Задача об ударно-волновом подгоне метаемого тела была впервые рассмотрена в работе [11].

**Математическая модель и численный метод решения.** Расчеты проведены с использованием одномерной безразмерной системы газодинамических уравнений [7, 8]:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \xi} = 0, \quad (1)$$

$$\text{где } \mathbf{q} = \begin{pmatrix} r \\ ru \\ r(e + u^2 / 2) \end{pmatrix}; \quad \mathbf{f} = \begin{pmatrix} ru \\ \sigma + ru^2 \\ ru(e + u^2 / 2) + \sigma u \end{pmatrix}.$$

Здесь введены безразмерные координата, время, скорость, давление, плотность и удельная внутренняя энергия газа соответственно:

$$\xi = \frac{x}{l_0}; \quad \tau = \frac{t}{l_0} \sqrt{\frac{p_0 W_0}{m}}; \quad u = v \sqrt{\frac{m}{p_0 W_0}}; \quad \sigma = \frac{p}{p_0}; \quad r = \rho \frac{W_0}{m}; \quad e = \frac{m}{p_0 W_0} \varepsilon,$$

где  $x$  — координата;  $l_0$  — приведенная длина газового ресивера;  $p_0$  — начальное давление газа в ресивере;  $W_0$  — объем ресивера;  $m$  — масса метаемого тела;  $v$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $\varepsilon$  — скорость, давление, плотность и удельная внутренняя энергия газа соответственно.

Система уравнений (1) дополняется уравнением состояния идеального газа в безразмерной форме  $\sigma = (\gamma - 1)re$ , где  $\gamma$  — показатель адиабаты газа, и уравнением движения поршня в безразмерной форме

$$\frac{du_p}{d\tau} = \sigma_p, \quad (2)$$

где  $u_p$  — скорость поршня;  $\sigma_p$  — давление на поршень со стороны газа; нижний индекс « $p$ » характеризует значение соответствующих функций при  $x = x_p$ ;  $x_p$  — координата разгоняемого поршня.

Численное решение системы (1) осуществляется с помощью двухшаговой схемы предиктор — корректор на подвижной сетке [7, 8].

**Неоднородное заполнение камеры.** Для корректного сравнения решений с однородным и неоднородным заполнением камеры следу-

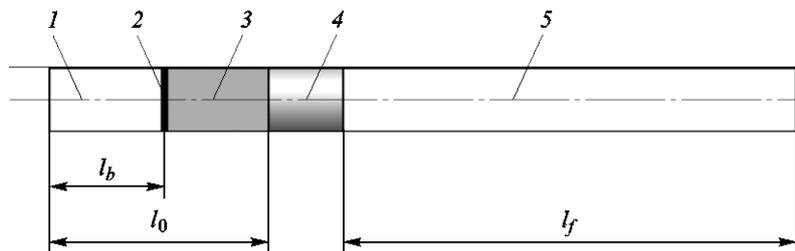
ет потребовать выполнения условий равенства полной энергии газа и его объемов в обоих случаях:

$$p_0 W_0 = p_1 W_1 + p_2 W_2; \quad (3)$$

$$W_0 = W_1 + W_2, \quad (4)$$

где  $p$  — давление газа;  $W$  — занимаемый газом объем; индекс «0» соответствует однородному заполнению; индексы «1» и «2» характеризуют области при неоднородном заполнении.

На практике неоднородное заполнение газом камеры может быть осуществлено за счет размещения дополнительной диафрагмы или быстродействующего клапана, что отвечает наличию двух газовых областей с постоянным начальным распределением параметров в них. При этом можно считать, что установка остается одноступенчатой, поскольку начальному моменту ее функционирования соответствует удаление диафрагмы. Схема задачи показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема баллистической установки с неоднородным начальным заполнением камеры:

1 — область с газом «1»; 2 — диафрагма; 3 — область с газом «2»; 4 — метаемое тело; 5 — направляющая труба (ствол)

Считая, что площади поперечного сечения камеры одинаковы в обеих областях, можно определить объемы соответствующих областей  $W_i = x_i S$ . Обезразмеривая соответствующие координаты на полную длину камеры  $l_0$ , давления — на начальное давление при однородном заполнении  $p_0$ , получим вместо равенств (3) и (4) одно безразмерное соотношение, связывающее параметры в двух областях:

$$\sigma_1 \xi_1 + \sigma_2 (1 - \xi_1) = 1.$$

Здесь  $\sigma_{1,2} = p_{1,2} / p_0$  — безразмерные давления в областях «1» и «2»;  $\xi_1 = l_b / l_0$  — безразмерная координата диафрагмы. Отсюда при  $\xi_1 \neq 0$  (что соответствовало бы случаю однородного заполнения) можно получить

$$\sigma_1 = \frac{1 - \sigma_2(1 - \xi_1)}{\xi_1}. \quad (5)$$

Таким образом, значение  $\sigma_1$  определяется заданием  $\sigma_2$  и  $\xi_1$ . При этом  $\xi_1 \in (0, 1]$ , а диапазон изменения  $\sigma_2$  определяется из условия неотрицательности выражения (5):

$$0 \leq \sigma_2 \leq \frac{1}{1 - \xi_1}.$$

Температура газа в обеих областях считается одинаковой. Течение газа описывается безразмерными уравнениями (1) с начальными плотностями:

$$r_1 = \frac{M_1}{W_1} \frac{W_0}{m} = \frac{\mu_1}{\xi_1}, \quad r_2 = \frac{M_2}{W_2} \frac{W_0}{m} = \frac{\mu_2}{1 - \xi_1},$$

где  $M_1, M_2$  — массы газа в областях 1 и 2. Используя уравнение состояния идеального газа, найдем  $\mu_1 = \mu \sigma_1 \xi_1$  и  $\mu_2 = \mu \sigma_2 (1 - \xi_1)$ . Таким образом,  $r_1 = \mu \sigma_1$  и  $r_2 = \mu \sigma_2$ .

Решение проведено для полной безразмерной длины трубы  $\xi_f = 4$  на сетке из 300 ячеек, показатель адиабаты  $\gamma = 1,4$ . Таким образом, задача является трехпараметрической и зависит от  $\mu, \sigma_2$  и  $\xi_1$ .

Зависимости отношения выходной скорости  $u_p$  к выходной скорости для однородного заполнения  $u_{p0}$  от  $\sigma_2$  и  $\xi_1$  при различных  $\mu$  приведены на рис. 2. Для того чтобы область определения функции  $u_p / u_{p0}$  была прямоугольной, графики построены в координатах  $\xi_1$  и  $\sigma_2(1 - \xi_1)$ .

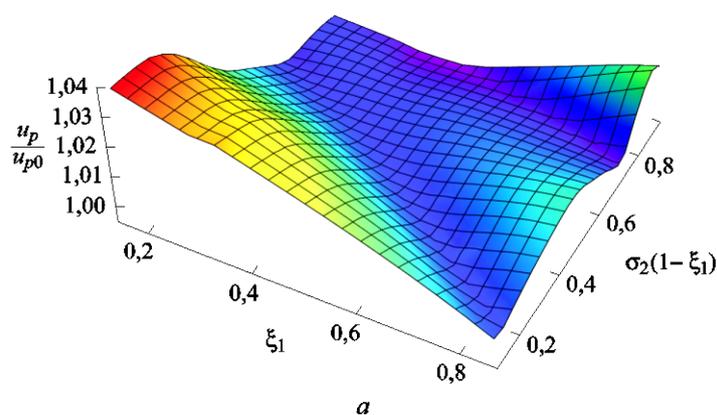


Рис. 2 (начало). Зависимости безразмерной выходной скорости

тела  $\frac{u_p}{u_{p0}}$  от  $\sigma_2$  и  $\xi_1$  при  $\mu$ , равном 0,1 (а)

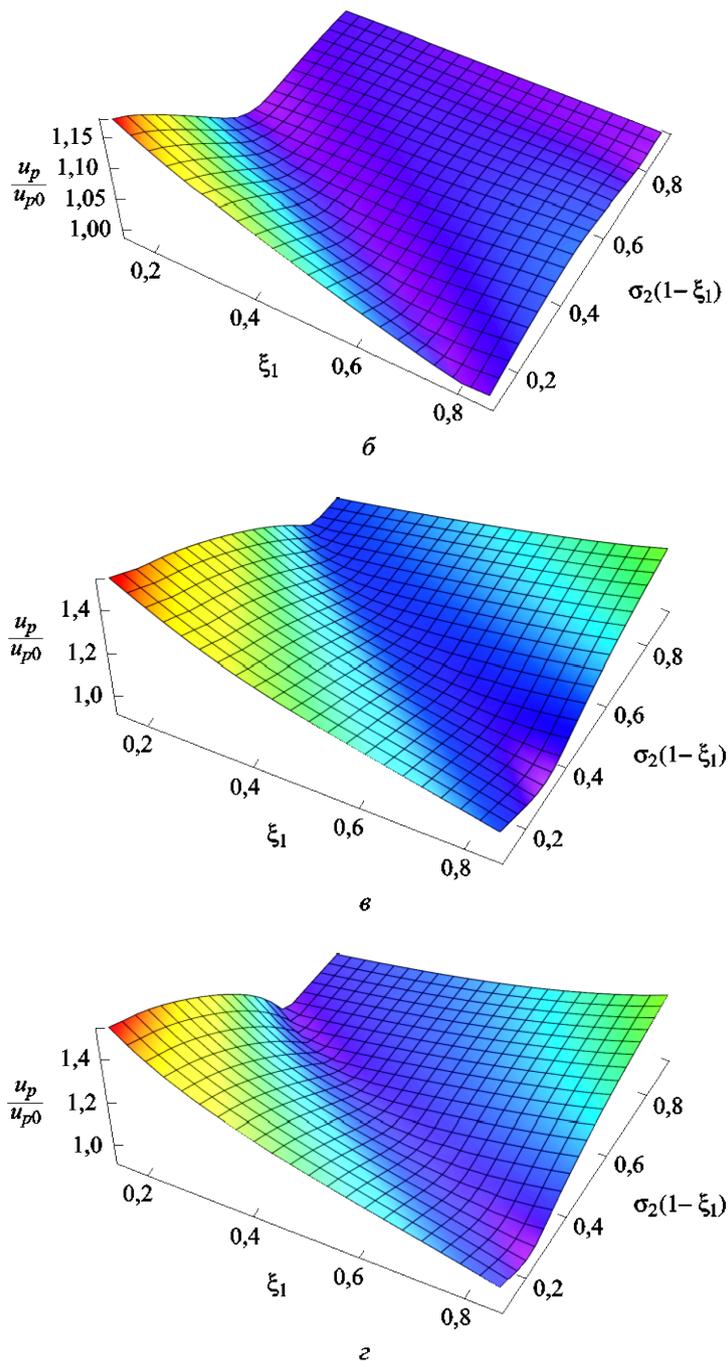
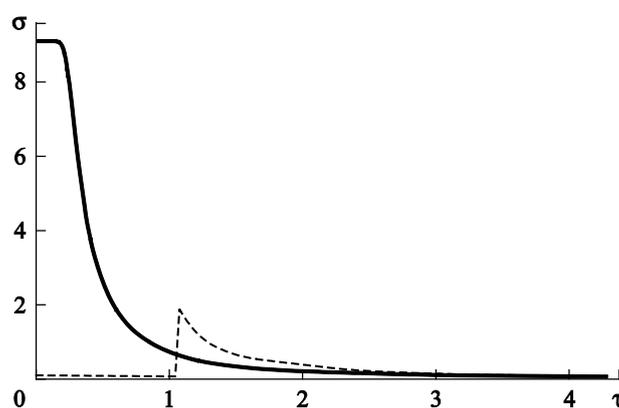


Рис. 2 (окончание). Зависимости безразмерной выходной скорости тела  $\frac{u_p}{u_{p0}}$  от  $\sigma_2$  и  $\xi_1$  при  $\mu$ , равном 1,0 (б), 10 (в) и 20 (г)

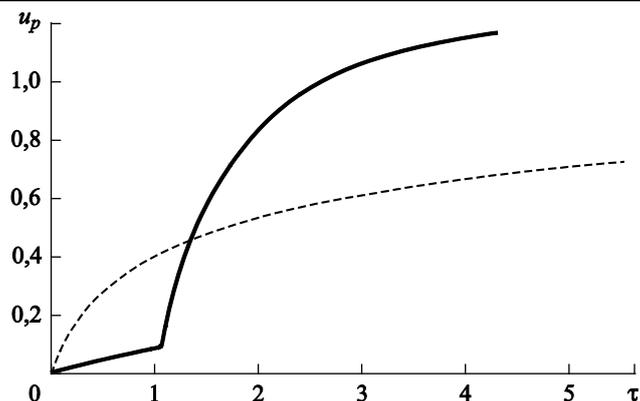
При малых  $\mu$  (рис. 2, а) неоднородное заполнение камеры не дает существенных преимуществ по сравнению с однородным заполнением, однако для тяжелых метаемых тел, т. е. при  $\mu \geq 1$  (рис. 2, б–г), наблюдается рост скорости практически при любой неоднородности. При этом с возрастанием  $\mu$  наблюдаются более ярко выраженные повышенные значения скоростей при малых и больших значениях аргументов. Наибольшие скорости достигаются при малых  $\xi_1$  и  $\sigma_2$ , что подразумевает концентрацию газа с высоким давлением в короткой области у дна камеры. Такая начальная конфигурация способствует формированию ударной волны, которая догоняет снаряд и придает ему ускоряющий импульс. Для демонстрации этого эффекта на рис. 3 представлены графики давлений на дно канала и дно снаряда при  $\mu = 10$ ,  $\xi_1 = 0,1$  и  $\sigma_2 = 0,1$ .



**Рис. 3.** Зависимость безразмерного давления на дно канала (сплошная кривая) и дно метаемого тела (штриховая) от безразмерного времени при  $\mu = 10$ ,  $\xi_1 = 0,1$  и  $\sigma_2 = 0,1$

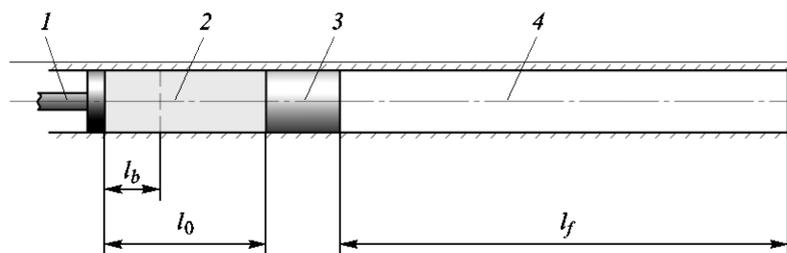
График зависимости безразмерной скорости от времени для этого же случая приведен на рис. 4. Для сравнения также показан график скорости метаемого тела при однородном заполнении. На рис. 3 и 4 видно, что ударная волна, идущая от дна канала и приходящая на поршень, создает ускоряющий импульс большой интенсивности, который позволяет получить более высокую скорость за счет большего значения площади под кривой давлений на дно поршня, равной полному импульсу, переданному ему за время разгона.

Менее значительное повышение скорости при больших  $\xi_1$  и  $\sigma_2$  (см. рис. 2, б–г) происходит за счет стартового импульса, который приобретает метаемое тело, движущееся без сопротивления за счет небольшой примыкающей области с большим давлением. В этом случае дальнейшее движение газа практически не влияет на скорость тела и такой вариант подгона менее эффективен.



**Рис. 4.** Зависимость безразмерной скорости метаемого тела от безразмерного времени при неоднородном (сплошная кривая) и однородном (штриховая) заполнении камеры при  $\mu = 10$ ,  $\xi_1 = 0,1$  и  $\sigma_2 = 0,1$

**Ударно-волновой подгон метаемого тела.** Развитием описанного выше способа создания ударной волны с помощью начального неоднородного заполнения является непосредственное создание ударной волны, идущей от дна канала, которая бы догоняла разгоняемое тело и придавала ему дополнительное ускорение. Такая ударная волна может быть создана несколькими способами, в частности с использованием взрывчатых веществ. На рис. 5 изображена модельная схема формирования ударной волны с помощью движущегося поршня.



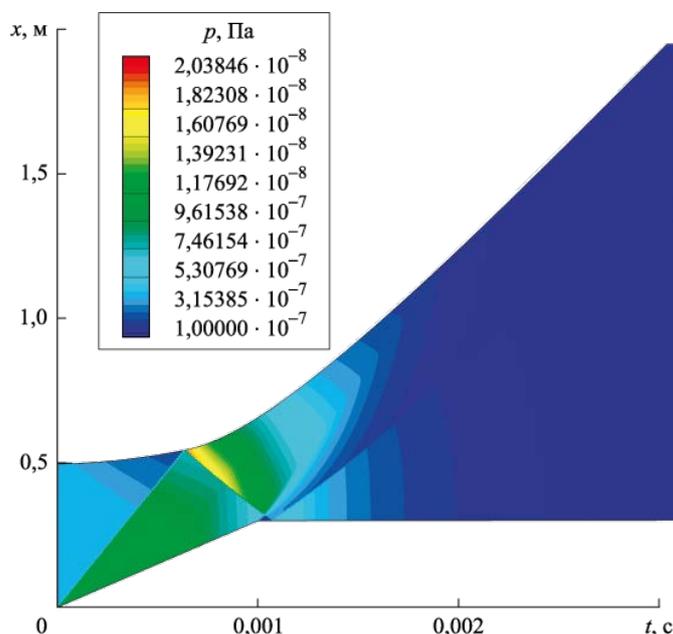
**Рис. 5.** Схема формирования ударной волны:

1 — поршень; 2 — сжатый газ; 3 — метаемое тело; 4 — разгонная труба (ствол)

Газ с давлением  $p_0$  находится в камере 2 и занимает в начальный момент длину  $l_0$  (соответствующую объему  $W_0$ ). Поршень 1 зафиксирован в крайнем левом положении. После начала движения метаемого тела 3 с заданной задержкой  $t_{\text{init}}$  поршень начинает перемещаться до тех пор, пока не пройдет расстояние  $l_p$ . Для простоты движение поршня моделируется с помощью импульсного скоростного сигнала: в момент времени  $t_{\text{init}}$  поршень начинает движение с постоянной ско-

ростью  $v$  в течение времени  $\Delta t$ , таким образом,  $l_p = v\Delta t$ . В результате перемещения поршня формируется ударная волна, которая догоняет уже разогнанное метаемое тело и придает ему дополнительный ускоряющий импульс.

Прежде чем переходить к обобщенным расчетам, проведем анализ модельной задачи. Для установки с параметрами  $d = 0,03$  м,  $l_0 = 0,5$  м,  $l_f = 1,5$  м,  $p_0 = 40$  МПа,  $T_0 = 283$  К без ударно-волнового подгона скорость тела массой  $m = 0,1$  кг составляет  $v_p = 416$  м/с. При инициировании ударно-волнового подгона в начальный момент времени ( $t_{\text{init}} = 0$ ) поршнем, движущимся со скоростью  $v = 300$  м/с в течение времени  $\Delta t = 1$  мс, скорость тела составляет 706 м/с, таким образом, прирост скорости достигает порядка 70 % по сравнению с базовым вариантом (без подгона). На рис. 6 показано распределение давления, соответствующее рассматриваемому случаю.



**Рис. 6.** Распределение давления в запоршневом пространстве при  $v = 300$  м/с,  $t_{\text{init}} = 0$ ,  $\Delta t = 1$  мс

При  $t_{\text{init}} = 1$  мс выходная скорость тела составляет 615 м/с. При более позднем времени инициирования скорость тела еще больше снижается. Исходя из этого анализа и физических соображений, можно предположить, что увеличение времени задержки формирования ударной волны при прочих равных условиях всегда приводит к снижению скорости, поскольку волна догоняет тело позже.

Оценим на этом модельном примере энергетическую эффективность предложенного метода подгона. В рассмотренном случае к полной энергии газа также необходимо добавить энергию на сжатие газа поршнем  $E_{pst}$ :

$$E_0 = \frac{p_0 W_0}{k-1} + E_{pst}.$$

Последнюю можно рассчитать численно, поскольку приближенный подход на основе автомодельного решения даст бóльшую погрешность. Как видно на рис. 6, давление на поршень не является постоянным в течение всего времени его разгона, поэтому

$$E_{pst} = \int_0^{W_p} p_b dW = S \int_0^{l_p} p_b dx = vS \int_0^{\Delta t} p_b dt,$$

где  $p_b$  — давление на дно канала (поршень);  $S$  — площадь поперечного сечения канала.

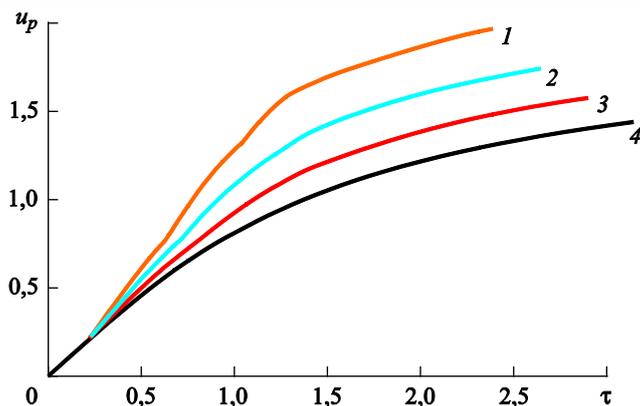
Для случая, соответствующего наиболее эффективному подгону, КПД установки равен 43 %, в то время как без ударно-волнового подгона (при скорости 416 м/с) он составляет 24,5 %. Таким образом, ударно-волновой подгон позволяет повысить не только скорость, но и энергетическую эффективность схемы метания сжатым газом.

Рассмотрим теперь более общий случай решения задачи на основе безразмерной системы уравнений (1). Поскольку уже известно, что оптимальным является отсутствие задержки, рассмотрим влияние ударно-волнового подгона, реализуемого движением поршня, которое начинается в момент времени  $\tau = 0$ , с безразмерной скоростью  $U = v\sqrt{m/(p_0 W_0)}$  в течение промежутка времени  $\Delta\tau = 1$ .

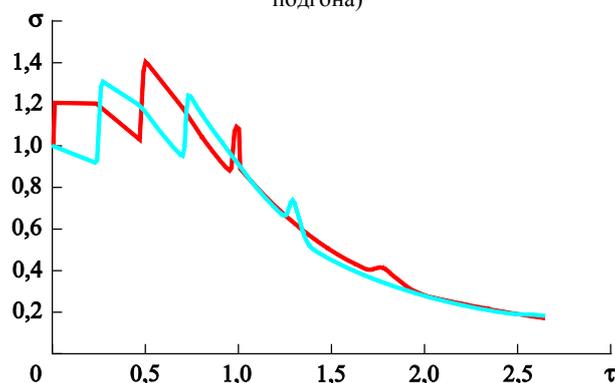
На рис. 7 приведены зависимости скоростей метаемых тел от времени при  $\mu = 0,1$  для различных скоростей движения поршня  $U$ .

Видны небольшие возмущения, особенно для больших скоростей вдвигаемого поршня. Для объяснения этих возмущений на рис. 8 представлены зависимости давлений на дно вдвигаемого поршня и дно метаемого тела при  $U = 0,5$ . На этих зависимостях видно многократное переотражение волн, которое и приводит к описанному эффекту.

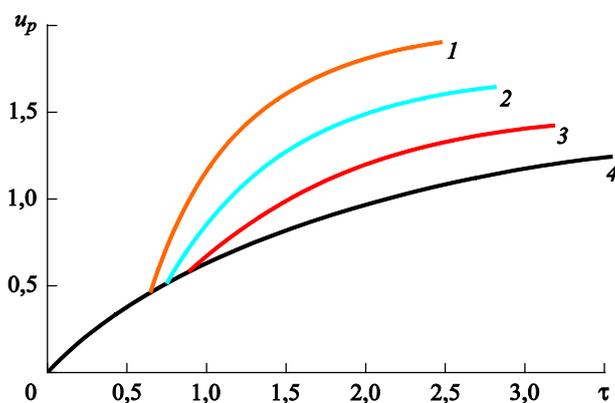
Зависимости скоростей метаемого тела от времени при  $\mu$ , равных 1 и 10, для различных  $U$ , аналогичные зависимостям на рис. 7, представлены на рис. 9 и 10. Из них следует, что чем больше  $\mu$ , тем позже начинает влиять на движение метаемого тела ударно-волновой подгон. Однако во всех случаях он позволяет существенно увеличить скорость метаемого тела.



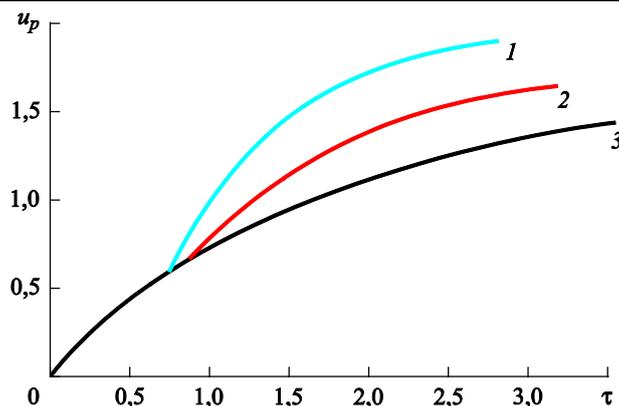
**Рис. 7.** Зависимости безразмерных скоростей метаемого тела от безразмерного времени при  $\mu = 0,1$ :  
 1–3 —  $U$  равно 0,75; 0,5; 0,25; 4 —  $U = 0$  (без ударно-волнового подгона)



**Рис. 8.** Зависимости давлений на дно поршня (красная линия) и дно метаемого тела (синяя линия) от времени при  $\mu = 0,1$  и  $U = 0,5$



**Рис. 9.** Зависимости скоростей метаемого тела от времени при  $\mu = 1$ :  
 1–3 —  $U$  равно 0,75; 0,5; 0,25; 4 —  $U = 0$  (без ударно-волнового подгона)



**Рис. 10.** Зависимости скоростей метаемого тела от времени при  $\mu = 5$ :

1–2 —  $U$  равно 0,5; 0,25; 3 —  $U = 0$  (без ударно-волнового подгона)

**Заключение.** В результате проведенного исследования показана эффективность начального неоднородного заполнения газового ресивера для увеличения скорости разгона тел. Для относительно тяжелых тел, масса которых превышает массу газа в ресивере, выигрыш в скорости может составить 1,4 раза. При этом наибольший эффект достигается при концентрации газа с высоким давлением в небольшой области у дна канала, что приводит к созданию в начальный момент ударной волны, распространяющейся по газу в ресивере и обеспечивающей основной ускоряющий импульс для метаемого тела. Меньший, но положительный эффект наблюдается при инверсной картине: небольшая область с высоким давлением располагается непосредственно у дна метаемого тела. Из этих результатов следует положительный эффект создания ударных волн, распространяющихся от дна канала. Поэтому в качестве развития задачи было рассмотрено создание ударной волны у дна канала за счет внешних сил. Установлено, что наиболее эффективно возбуждать ударную волну в начальный момент времени. При этом чем больше скорость поршня, создающего начальное сжатие, тем эффективнее разгон. Таким способом скорость метаемого тела может быть увеличена в 1,8 раза. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых схем баллистических установок.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-29-09596 офи-м).*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Seiler F., Igra O., ed. *Hypervelocity Launchers*. Springer, 2016, 300 p.
- [2] Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И., Попов Н.Н. *Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях*. Москва, Наука, 1974, 344 с.

- [3] Павленко А.В., Балабин С.И., Козелков О.Е., Казаков Д.Н. Одноступенчатая газовая пушка для изучения динамических свойств конструкционных материалов в диапазоне до 40 ГПа. *Приборы и техника эксперимента*, 2013, № 4, с. 122–124.
- [4] Jones D.R., Chapman D.J., Eakins D.E. A Gas Gun Based Technique for Studying the Role of Temperature in Dynamic Fracture and Fragmentation. *J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 114, p. 173508.
- [5] Horák V., Do Duc L., Vítek R., Beer S., Mai Q.H. Prediction of the Air Gun Performance. *Advances in Military Technology*, 2014, vol. 9 (1), pp. 31–44.
- [6] Григорьев В.В., Исаков С.Н., Петров Р.Л., Юркин С.В. Газодинамическое исследование пневматического линемета. *ЖТФ*, 2006, т. 76, вып. 3, с. 75–80.
- [7] Быков Н.В. Оптимизация процесса передачи энергии при одноступенчатом разгоне тел сжатым газом. *ПМТФ*, 2019, т. 60, № 3, с. 29–37.
- [8] Быков Н.В. Сравнительный анализ численного и приближенных аналитических решений задачи о разгоне поршня в трубе сжатым газом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 2 (86). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-2-1852
- [9] Голубятников А.Н., Леонтьев Н.Е. К оптимизации решения задачи Лагранжа по начальным данным. *Труды математического института им. В.А. Стеклова*, 1998, т. 223, с. 118–122.
- [10] Голубятников А.Н. К оптимальной постановке газодинамической задачи Лагранжа. *Вестник МГУ им. М.В. Ломоносова. Сер. Математика. Механика*, 1995, № 6, с. 59–61.
- [11] Быков Н.В. Ударно-волновой подгон в одноступенчатых метательных газовых установках. *XXV Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям*. Санкт-Петербург, Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2018, с. 56–57.

Статья поступила в редакцию 05.07.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Быков Н.В. Влияние индуцированных волн в камере на динамику процесса газодинамического разгона поршня в трубе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-8-1908>

**Быков Никита Валерьевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные и импульсные системы», заместитель заведующего кафедрой по научной работе, заведующий отделом «Ракетные и ствольные системы» Научно-исследовательского института специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 65 научных работ в области исследования внутрикамерных процессов, газовой динамики, внутренней баллистики и методов синтеза технических систем.  
e-mail: bykov@bmstu.ru

## **Effect of induced waves in the reservoir on piston acceleration in a single-stage gas gun**

© N.V. Bykov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The purpose of the paper was to study the effect of induced gas perturbations in the reservoir on the ballistic characteristics of single-stage gas guns. Two ways of waves generation at the initial moment are considered: by means of a non-uniform initial distribution of gas parameters and by creating a shock wave propagating from the bottom of the reservoir by external forces. The study is based on the numerical solution of one-dimensional gas-dynamic equations on a moving grid. Findings of research show that for relatively large (compared to the accelerating gas mass) mass of the projectiles, the wave processes induced by inhomogeneous filling lead to an increase in the muzzle velocity 1.4 times, and the shock waves generation by an external source — 1.8 times.*

**Keywords:** *gas-dynamic acceleration of bodies, inhomogeneous filling, shock waves, methods of body acceleration, high-speed launching, internal ballistics, ballistic installations*

### REFERENCES

- [1] Seiler F., Igra O., ed. *Hypervelocity Launchers*. Springer, 2016, 300 p.
- [2] Zlatin N.A., Krasilshchikov A.P., Mishin G.I., Popov N.N. *Ballisticheskie ustanovki i ikh primeneniye v eksperimentalnykh issledovaniyakh* [Ballistic ranges and their application in experimental research]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 344 p.
- [3] Pavlenko A.V., Balabin S.I., Kozelkov O.E., Kazakov D.N. *Pribory i tekhnika eksperimenta — Instruments and Experimental Techniques*, 2013, vol. 56 (4), pp. 482–484.
- [4] Jones D.R., Chapman D.J., Eakins D.E. A gas gun based technique for studying the role of temperature in dynamic fracture and fragmentation. *J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 114, p. 173508.
- [5] Horák V., Do Duc L., Vitek R., Beer S., Mai Q.H. Prediction of the Air Gun Performance. *Advances in Military Technology*, 2014, vol. 9 (1), pp. 31–44.
- [6] Grigorev V.V., Isakov S.N., Petrov R.L., Yurkin S.V. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 51 (3), pp. 367–372.
- [7] Bykov N.V. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60, no. 3, pp. 29–37.
- [8] Bykov N.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 2 (86). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-2-1852
- [9] Golubyatnikov A.N., Leontyev N.E. *Trudy matematicheskogo instituta im. V.A. Steklova — Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*, 1998, vol. 223, pp. 118–122.
- [10] Golubyatnikov A.N. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 1. Matematika. Mekhanika (Bulletin of Moscow University. Series 1. Mathematics. Mechanics)*, 1995, no. 6, pp. 59–61.

- [11] Bykov N.V. Udarno-volnovoy podgon v odnostupenchatykh metatelnykh gazovykh ustanovkakh [Shock-wave adjustment in single-stage gas guns]. *XXV Vserossiiskiy seminar s mezhdunarodnym uchastiem po struynym, otrivnym i nestatsionarnym techeniyam* [XXV All-Russian seminar with international participation on jet, separated and unsteady flows]. St. Petersburg, BSTU “VOENMEH” named after D.F. Ustinov Publ., 2018, pp. 56–57.

**Bykov N.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Missile and Kinetic Warfare Systems, Deputy Head of Department for Scientific Work, Head of Department of Rocket and Barrel Systems, Institute of Special Machinery, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 65 scientific papers in the field of intrachamber processes, gas dynamics, interior ballistics and optimization techniques in engineering systems. e-mail: bykov@bmstu.ru