

## Газодинамическое исследование пневматического линемета

© В.В. Григорьев, С.Н. Исаков, Р.Л. Петров, С.В. Юркин

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: yurkin@ista-pneumatics.ru

(Поступило в Редакцию 7 июня 2005 г.)

В квазистационарной постановке решена задача о движении снаряда в стволе пневматического линемета, оснащенного быстродействующим клапаном большого проходного сечения. Результаты расчетов представлены в удобной для использования графической форме и позволяют учесть влияние целого ряда газодинамических и конструктивных параметров линемета на скорость снаряда. Результаты расчетов сопоставлены с данными многопараметрических экспериментальных исследований. Отмечено хорошее соответствие результатов расчетов данным опытов.

PACS: 89.20.Bb

В качестве спасательных средств широко распространены различные метательные устройства, которыми оснащают морские суда и другие плавучие объекты, спасательные и пожарные команды. Как правило, используют пороховые метательные устройства, однако применение пороховых зарядов небезопасно и не лишено неудобств эксплуатационного характера [1].

Более перспективны пневматические метательные устройства, оснащенные быстродействующими клапанами большого проходного сечения. Такие клапаны разработаны, например, для ударных труб [2,3].

Дальность или высота полета снаряда с линем зависит в первую очередь от начальной скорости движения снаряда. Скорость снаряда на срезе ствола может быть определена из решения задачи внутренней баллистики с учетом геометрических и газодинамических особенностей быстродействующего клапана [2].

Конструкция исследуемого линемета схематически изображена на рис. 1. Камера высокого давления 1 — сосуд объемом  $V_1$ , заполненный воздухом или другим газом под давлением  $p_{10}$ . Сжатый газ поступает из баллона 6. Как правило, камера имеет форму круглого цилиндра диаметром  $D_1$  и длиной  $L_1$ . Быстродействующий клапан 5 эффективным диаметром проходного сечения  $D_v$  отделяет камеру 1 от ствола 2 диаметром  $D$  и длиной  $L$ . К наружному торцу снаряда 4 прикреплен гибкий и прочный линь 3. Между внутренним торцом снаряда и подвижным запорным колпаком быстродействующего клапана имеется небольшой объем  $V_k$ . Объем  $V_k$  и конечное время открытия клапана  $t_v$  влияют

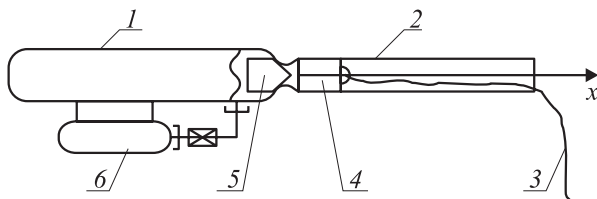


Рис. 1. Конструкция линемета.

на движение снаряда в начальный период. Кроме того, необходимо учесть утечку сжатого газа по зазору между стволом и снарядом.

Уравнение движения снаряда массой  $M$  под действием избыточного давления  $p(t) - p_a$  при скорости снаряда  $U$  малой по сравнению со скоростью звука  $a_{10}$  без учета силы веса снаряда и силы трения имеет вид

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = [p_T(t) - p_a]S, \quad (1)$$

где  $x$  — координата, отсчитываемая от начального положения внутреннего торца снаряда,  $t$  — время,  $p_T$  — давление газа на внутренний торец снаряда,  $p_a$  — атмосферное давление,  $S$  — площадь поперечного сечения ствола. Здесь и в дальнейшем при описании задачи внутренней баллистики индексом 1 отмечены параметры и переменные в камере, без индекса — в стволе.

Будем предполагать движение газа квазистационарным, давление зависящим только от времени, пренебрежем также кинетической энергией газа по сравнению с его потенциальной энергией.

Преобразуем левую часть уравнения (1) к виду  $M \cdot U \cdot dU/dx$ . Тогда, используя уравнение адиабаты для определения давления в расширяющемся газе, запишем первый интеграл уравнения (1) при нулевых начальных условиях в форме

$$U_{an}(L) = \sqrt{\frac{2p_{10}V}{M} \left\{ \frac{1}{\gamma-1} \frac{V_1}{V} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{V}{V_1} \right)^{1-\gamma} \right] - \frac{p_a}{p_{10}} \right\}}, \quad (2)$$

где  $V$  — объем ствола,  $U_{an}(L)$  — скорость снаряда на срезе ствола,  $\gamma = c_p/c_v$  — отношение удельных теплоемкостей газа.

Оценку влияния волновых процессов на скорость снаряда можно получить, сопоставив результаты расчета по формуле (2) при  $p_{a1} = p_a/p_{10} = 0$  с решением задачи

методом характеристик в гладком метательном устройстве ( $D_1 = D$ ) без учета противодействия [4].

При характерных для спасательных линеметов значениях отношения массы сжатого газа к массе снаряда не превышающих 0.3 неточность определения скорости по формуле (2) при  $\gamma = 1.4$  будет менее 6% [4]. Значения скорости снаряда, найденные методом характеристик, будут меньше рассчитанных по формуле (2), так как в характеристических интегралах учтена кинетическая энергия газа.

Формула (2) верна при упрощенной постановке задачи без учета ряда геометрических и газодинамических факторов. Уточненное решение внутрибаллистической задачи было получено с учетом особенностей конструкции линемета. Для оценки влияния на скорость снаряда вышеупомянутого объема  $V_k$  и конечного времени открытия клапана  $t_v$  полагали, что за время  $t_v$  растет объем, занятый сжатым газом, а перепад давления, действующий на снаряд, увеличивается пропорционально времени. Принятый закон изменения давления основан на экспериментальных данных, причем для испытанных систем  $t_v < 1$  ms. Задавая известное из опытов значение  $t_v$ , полагая при  $t = t_v$  объем сжатого газа равным  $V_1 + V_k + Sx_k$ , можно для  $0 < 1 \leq t_v$  решить уравнение (1), найти скорость и смещение  $x_k$  снаряда за время  $t_v$ .

Влияние величин  $V_k$  и  $t_v$  на скорость снаряда можно учесть коэффициентом  $U_k(L)/U_{an}(L) = f_v(t_{v1}, V_k/V, V_1/V, p_a/p_{10}, \gamma)$ , записанным в форме  $f_v = f_{v1}(0, V_k/V, V_1/V, p_a/p_{10}, \gamma) \cdot f_{v2}(t_{v1}, V_k/V, V_1/V, p_a/p_{10}, \gamma)$ , где  $t_{v1} = t_v \sqrt{p_{10}V/ML^2}$ ,  $U_k(L)$  — скорость снаряда, найденная с учетом  $V_k$  и  $t_v$  по формуле, аналогичной (2) и полученной при ненулевых начальных условиях.

Коэффициент  $f_{v1}(0)$  позволяет учесть основное влияние объема  $V_k$  на скорость снаряда. Считая здесь  $V_k/V$  аргументом, можно уменьшить количество параметров и представить результаты расчета  $f_{v1}(0)$  в графической форме (рис. 2). Здесь и в дальнейшем в иллюстрируемых графических расчетах принято  $\gamma = 1.4$ .

Расчет коэффициента  $f_{v1}(0)$  выполняли по формуле (2), считая начальный объем камеры равным  $V_1 + V_k$  при сохранении массы сжатого газа, полагая процесс расширения адиабатическим, а начальное давление уменьшенным соответственно уменьшенной плотности сжатого газа. Коэффициент  $f_{v2} = f_v/f_{v1}$  определяли, решая уравнение (1) методом последовательных приближений, позволяющим уточнять давление к моменту времени  $t = t_v$ .

Графики, приведенные на рис. 3, дают представление о влиянии  $t_v$  на скорость снаряда. Для разработанных систем линемета  $t_v < 1$  ms, масштаб времени составляет 5 ms, так что значения  $t_{v1} \ll 1$  и влияние  $t_v$  на скорость снаряда незначительно.

Следовало также учесть сужение канала в области расположения быстродействующего клапана (рис. 1), приводящее при относительно большой скорости сна-

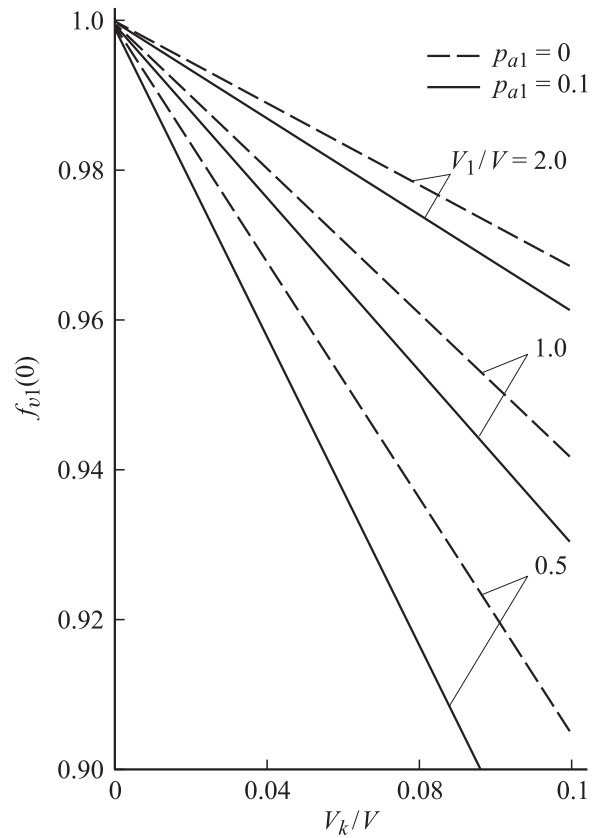


Рис. 2. Поправочный коэффициент  $f_{v1}(0)$ , учитывающий влияние мгновенно заполняемого газом объем  $V_k$  на скорость снаряда.

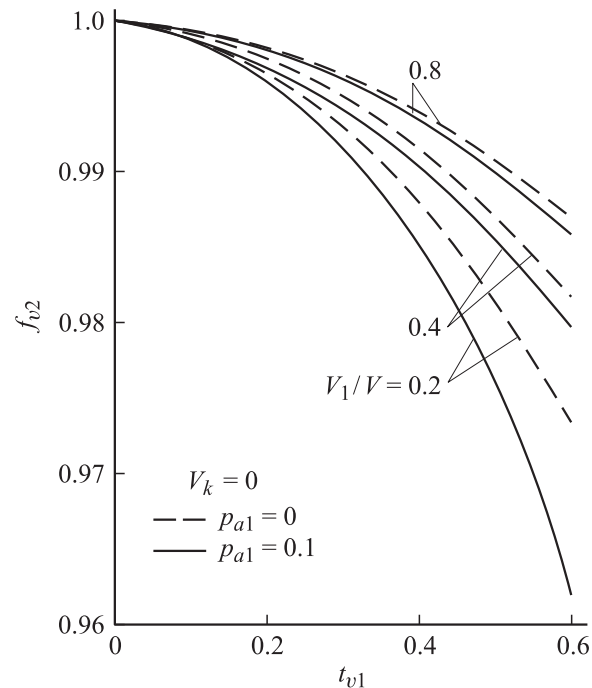


Рис. 3. Поправочный коэффициент  $f_{v2}(0)$ , учитывающий влияние конечного времени  $t_v$  открытия быстродействующего клапана на скорость снаряда.

ряда к возникновению критического истечения газа из камеры, „запиранию“ камеры [5], а также учесть утечку газа по зазору между снарядом и стволом.

Система уравнений, описывающих движение снаряда при наличии зазора, но без учета „запирания“ камеры приведена в работе [6].

Переход от докритического к критическому истечению газа рассчитывали, исходя из условий равенства массовых расходов газа в наиболее узком сечении  $S_v$  клапана и на торце снаряда со стороны сжатого газа. Вводя числа  $M_v$  и  $M_T$  потока в этих сечениях, используя интеграл Бернулли и известные изэнтропические формулы [5], получили уравнение, позволяющее для известной координаты и скорости снаряда найти число  $M_v$ , а именно:

$$S_v M_v a_{10} \left(1 + \frac{Sx}{V_1}\right)^{\frac{1-\gamma}{2}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_v^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2(1-\gamma)}} = SU(x) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_T^2\right)^{\frac{1}{1-\gamma}}, \quad (3)$$

где

$$M_T = U(x) \left[ a_{10}^2 \left(1 + \frac{Sx}{V_1}\right)^{1-\gamma} - \frac{\gamma-1}{2} U^2(x) \right]^{-1/2}. \quad (4)$$

По мере увеличения скорости снаряда при определенных параметрах линемета число  $M_v$  может стать равным единице ( $M_v = M^* = 1$ ). При расчете  $M_v$  следует учесть, что  $(dM_v/dx) \rightarrow \infty$  при  $M_v \rightarrow 1$ .

С момента  $t = t_{bl}$  „запирания“ камеры движение снаряда в стволе с учетом зазора описывает система уравнений

$$M \frac{dU}{dt} = [p_T(t) - p_a] S, \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = U, \quad (6)$$

$$\frac{dp}{dt} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} a_{10}^3 \rho_{10} \frac{S_v}{S} \left(\frac{p}{p_{10}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \times \left[ \left(\frac{p_{1bl}}{p_{10}}\right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}} \left(\frac{p_1}{p_{1bl}}\right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}} - \frac{S_{sl}}{S_v} \left(\frac{p}{p_{10}}\right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}} \right] \frac{1}{x} - \frac{\gamma p U}{x}, \quad (7)$$

где  $p_{1bl} = p_1(t_{bl})$ , функция  $p_1(t)$  известна [6]. Утечку газа по зазору площадью поперечного сечения  $S_{sl}$  учитывали в предположении критического течения газа в зазоре, так как избыточное давление сжатого газа, как правило, больше атмосферного. Системы уравнений для  $M_v < 1$  и  $M_v = 1$  решали численно методом Рунге–Кутты.

Проанализируем методом теории размерностей [5] зависимость скорости снаряда от определяющих параметров, учитывающих вышеперечисленные факторы, имея целью представить результаты расчетов в удобной для

использования форме. Запишем с учетом формулы (2) выражение для  $U(L)$  в виде

$$U(L) = U_{an}(L) \cdot f_v \cdot f(p_{10}, V, M, V_1, S, S_v, S_{sl}, a_{10}, p_a, \gamma). \quad (8)$$

Согласно формуле (2), величинами с независимыми размерностями будем считать  $p_{10}, V, M$ . Тогда безразмерную форму зависимости (8) запишем с учетом расходных соотношений для критического сечения и зазора в виде

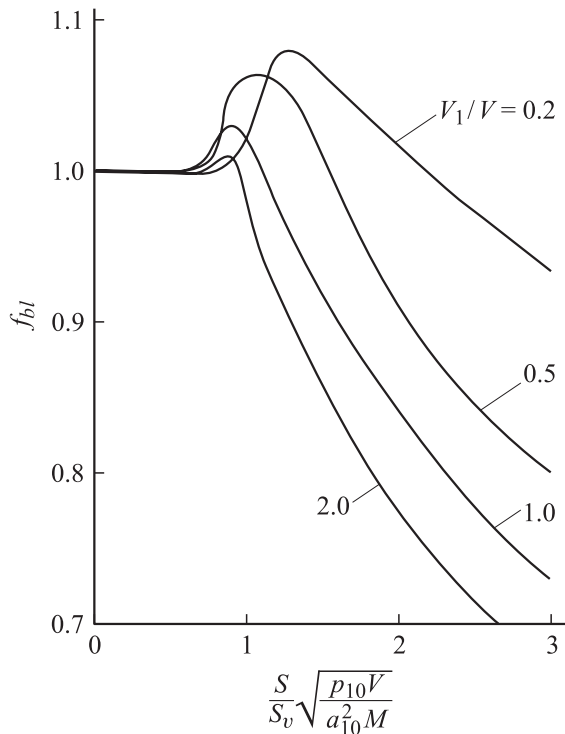
$$U_1 = \frac{U(L)}{\sqrt{p_{10} V / M}} = U_{an1} \cdot f_v \times f_1 \left( \frac{V_1}{V}, \frac{S}{S_v} \sqrt{\frac{p_{10} V}{a_{10}^2 M}}, \frac{S_{sl}}{S} \sqrt{\frac{a_{10}^2 M}{p_{10} V}}, \frac{p_a}{p_{10}}, \gamma \right). \quad (9)$$

При условии слабого влияния „запирания“ камеры и зазора на скорость снаряда зависимость (9) представим так:

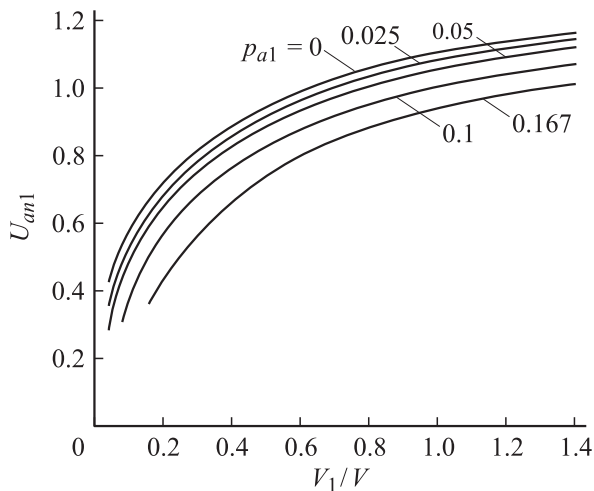
$$U_1 = U_{an1} \cdot f_v \cdot f_{bl} \left( \frac{V_1}{V}, \frac{S}{S_v} \sqrt{\frac{p_{10} V}{a_{10}^2 M}}, \frac{p_a}{p_{10}}, \gamma \right) \times f_{sl} \left( \frac{V_1}{V}, \frac{S_{sl}}{S} \sqrt{\frac{a_{10}^2 M}{p_{10} V}}, \frac{p_a}{p_{10}}, \gamma \right). \quad (10)$$

Первый множитель в формуле (10) есть безразмерная скорость, определяемая формулой (2). Расчет второго множителя пояснен выше. Третий и четвертый множители рассчитывали по программе численного решения системы уравнений (5)–(7). Так, учитывая влияние „запирания“ камеры на скорость снаряда на срезе ствола, исключали другие факторы ( $V_k = 0, t_v = 0, S_{sl} = 0$ ), задавали размерные значения величин, от которых зависит эффект запирания, рассчитывали скорость, относили ее к скорости, найденной по формуле (2), и получали точку на кривой (рис. 4) при фиксированных безразмерных параметрах  $V_1/V$  и  $p_a/p_{10}$ . Изменяя в исходных данных программы значения  $S_v$  и выполняя вышеописанную расчетную процедуру, получали функциональную зависимость, изображенную на рис. 4. Найденную зависимость проверяли следующим образом. Задавали различные значения величин, образующих аргумент функции при постоянных значениях параметров  $V_1/V$  и  $p_a/p_{10}$ , рассчитывали относительную скорость и убеждались в том, что результаты расчетов согласуются с кривой, полученной изменением  $S_v$ . Влияние зазора на скорость снаряда определяли аналогично учету „запирания“, заменив  $S_v$  на  $S_{sl}$ .

Графики функций  $U_{an1}$ ,  $f_{bl}$  и  $f_{sl}$  приведены на рис. 4–6. Предсказанное расчетом небольшое увеличение скорости снаряда ( $f_{bl} > 1$ ) вследствие „запирания“ камеры при определенных значениях аргумента связано с наличием в уравнении (7) двух слагаемых разного знака, в то время как для варианта, соответствующего формуле (2),  $dp/dt < 0$  всегда.



**Рис. 4.** Поправочный коэффициент  $f_{bl}$ , учитывающий влияние „запирания“ камеры на скорость снаряда.



**Рис. 5.** Зависимость безразмерной скорости снаряда  $U_{an1} = U_{an}(L)/\sqrt{p_{10}V/M}$  от отношения  $V_1/V$  объема камеры к объему ствола.

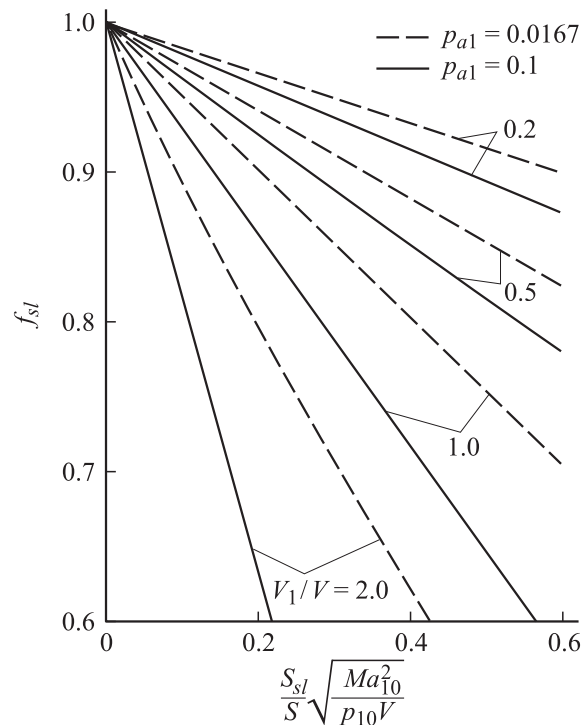
Влияние противодействия (параметр  $p_a/p_{10}$ ) оказалось несущественным для эффекта „запирания“ камеры и весьма заметным при уносе газа через зазор.

Экспериментальное исследование внутренней баллистической задачи было выполнено в лабораторных условиях на стенде. Стенд объединял систему подвода сжатого газа в камеру с образцовым манометром для измерения давления  $p_{10}$ , систему измерения скорости снаряда  $U(L)$  непосредственно за срезом ствола базовым методом [4],

пьезоэлектрическую систему измерения нестационарных давлений в стволе [7] и улавливатель моделей с амортизирующим наполнителем, предотвращающим разрушение снаряда. Снаряд пересекал два световых луча диаметром 1.5 mm, разнесенных на 9.6 или на 36 см. В качестве источника света применили осветитель с лампой накаливания от теневого прибора ИАБ-451. К осветителю подсоединили два гибких световода. Преобразователями светового потока в электрический ток служили фотоэлектронные умножители ФЭУ-13. Интервалы времени измеряли цифровым прибором ЧЗ-35. Эти измерения могли дублироваться осциллографическими измерениями.

Погрешность измерения скорости снаряда не превышала 2%. Была отмечена высокая стабильность работы линемета. Относительное среднее квадратичное отклонение для скорости в серии из четырех–шести опытов при фиксированных параметрах линемета составляло 1–2%.

Измерения скорости снаряда проводили при испытании всех вариантов линеметов. Нестационарные давления измеряли одновременно в трех точках одного из стволов длиной  $L = 0.36$  m, диаметром  $D = 68.4$  mm. Один из пьезодатчиков измерял давление на торце ствола, второй на середине ствола, третий на расстоянии 1 см от среза ствола. Пьезодатчики градуировали на ударной трубе и на специальном пневматическом устройстве, оснащенный малогабаритным быстродействующим клапаном. Были установлены также датчики давления у торца и у среза ствола с параметрами:  $L = 1.39$  m,  $D = 24.65$  mm.



**Рис. 6.** Поправочный коэффициент  $f_{sl}$ , учитывающий влияние утечки газа в зазор между снарядом и стволом на скорость снаряда.

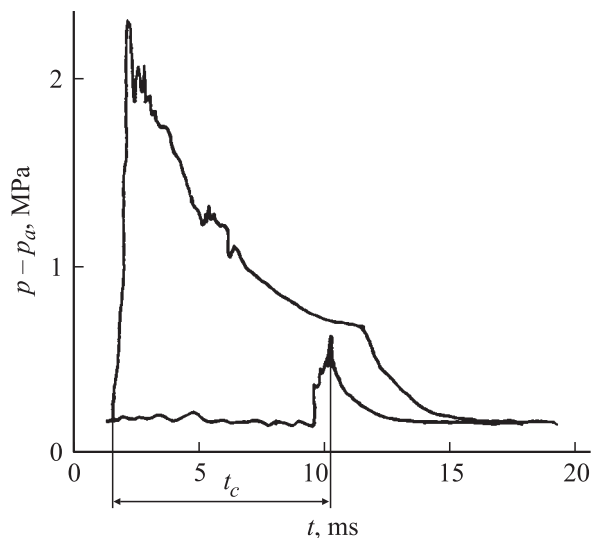


Рис. 7. Осциллограммы сигналов пьезоэлектрических датчиков давления.

Обработка осциллограмм сигналов датчиков давления, установленных на торце и у среза ствола, полученных на двухлучевом запоминающем осциллографе С8-17, позволяла рассчитать импульс силы, действующей на снаряд, и определить скорость снаряда на срезе ствола. Результаты таких косвенных измерений скорости снаряда хорошо согласовались с результатами измерений скорости базовым методом. В большинстве экспериментов скорость, измеренная по импульсу силы, была меньше измеренной базовым методом, но расхождение не превышало 5%.

Погрешность измерения давления при нестационарных давлениях, близких к значению  $p_{10}$ , составляла 5–7%. Пример осциллограммы сигналов двух датчиков давления, установленных на торце и у среза ствола, приведен на рис. 7, где верхняя кривая — давление на торце,  $t_c$  — время движения снаряда в стволе. Скорость снаряда, измеренная базовым методом, 75.8 м/с; скорость снаряда, найденная по импульсу силы, 74 м/с.

Газодинамические и геометрические параметры испытанных линеметов варьировали в таких пределах:  $V_1 = (1-2) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ;  $D = 2.5-7.5 \text{ см}$ ;  $L = 0.36-1.39 \text{ м}$ ;  $p_{10} = 1-6 \text{ МПа}$ ;  $D_v = 3-5 \text{ см}$ ;  $M = 0.25-2.5 \text{ кг}$ ;  $V_k = 20-120 \text{ см}^3$ . Данные измерений скорости снаряда были меньше результатов расчетов на 3–15%, для большинства опытов на 5%. Скорость снаряда не превышала 150 м/с.

Различие можно объяснить пренебрежением в расчетной модели рядом второстепенных факторов: потерей полного давления при движении газа в быстродействующем клапане со сложной геометрией канала, уменьшением давления в движущемся со скоростью снаряда газе и т.д. Наибольшие различия между экспериментальными и расчетными данными наблюдали в опытах с тяжелыми снарядами и при малых давлениях.

В экспериментах использовали в основном штатные снаряды диаметром 5–7 см, массой не более 0.6 кг,

набранные из концевых резиновых и средних пенопластовых дисков, стянутых болтом на металлической оси, а также металлические цилиндры малой и большой массой. Радиальный зазор между снарядом и стволом составлял 0.1–0.2 мм.

Кроме большой серии ординарных экспериментов, были выполнены специальные эксперименты, позволившие выявить влияние на скорость снаряда „запирания“ камеры, объема  $V_k$  и радиального зазора как при малых, так и при умеренных значениях определяющих параметров. Явление „запирания“ камеры было продемонстрировано в сравнительных экспериментах с использованием сжатых газов с сильно различающимися скоростями звука. Линемет со сравнительно длинным стволом имел следующие параметры:  $V_1 = 1.44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ,  $V_k = 0.06 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ,  $L = 0.787 \text{ м}$ ;  $D = 75 \text{ мм}$ ;  $D_v = 32 \text{ мм}$ ; причем  $M = 0.609 \text{ кг}$ ;  $p_{10} = 3.1 \text{ МПа}$ . В серии экспериментов с одноатомными газами аргоном и гелием наблюдали устойчивый эффект уменьшения скорости снаряда от 95.3 до 85.4 м/с, т.е. на 11% при использовании аргона, для которого при малой по сравнению с гелием скорости звука „запирание“ камеры имело место уже при небольших смещениях снаряда в стволе. Для гелия „запирание“ почти не влияло на скорость снаряда, так как могло возникнуть при движении снаряда в середине ствола, когда скорость была близка к максимальной. Предсказанное расчетом различие в скорости снаряда для аргона и гелия составляло 13%.

Зависимость  $U(S_{st})$  исследовали на линемете с параметрами  $V_1 = 1.76 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ,  $V_k = 0.07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ;  $D_v = 35 \text{ мм}$ ;  $D = 68.4 \text{ мм}$ ;  $L = 0.36 \text{ м}$  при фиксированной массе  $M = 0.435 \text{ кг}$  и трех значениях давления  $p_{10}$ : 1.1, 1.6, 2.1 МПа. Эбонитовый цилиндрический снаряд первоначальным диаметром  $D = 68.05 \text{ мм}$  испытывали, затем трижды протачивали до диаметров 67.6, 67.0, 66.55 мм, компенсируя уменьшение массы металлическими шайбами. Проточенные снаряды двигались в стволе без смещения оси симметрии за счет четырех пар небольших выступов на поверхности снаряда.

Осредненные значения скорости, отнесенные к максимальным осредненным значениям при минимальном зазоре, в эксперименте составляли 0.985, 0.95, 0.92. Расчетные значения мало отличались от экспериментальных и равнялись 0.976, 0.9455, 0.921 соответственно. Заметного разброса экспериментальных данных относительно осредненных значений, связанного с различными значениями давления, отмечено не было.

Зависимость  $U(V_k)$  исследовали на линемете с вышеотмеченными параметрами при давлении  $p_{10} = 1.6 \text{ МПа}$  и массе штатного снаряда  $M = 0.562 \text{ кг}$ . В исходных экспериментах снаряд первоначально погружали в ствол до упора. В последующих сериях экспериментов уменьшали расстояние от среза ствола до внешнего торца снаряда на 3.8 и 6.3 см, так что исходной величине  $V_k = 0.07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  соответствовала длина  $L = 0.36 \text{ м}$ , при  $V_k = 0.21 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  имели  $L = 0.322 \text{ м}$  и при  $V_k = 0.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  было  $L = 0.207 \text{ м}$ . Составленные

подобно описанным выше экспериментальные осредненные относительные значения скоростей оказались равными 0.95 и 0.92. Соответствующие расчетные значения были 0.915 и 0.861.

Экспериментировали со снарядами, имеющими минимальное поверхностное трение за счет применения жидкой масляной смазки или колец из фторопласта. Влияния трения на скорость снаряда выявить не удалось ввиду слабого воздействия этого фактора.

Экспериментальные данные, полученные в большой серии (более ста) опытов, подтвердили достоверность принятой расчетной модели для вышеотмеченного диапазона определяющих параметров.

Выражаем благодарность А.Ю. Штаб за помощь в выполнении расчетов.

## Список литературы

- [1] Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях: Реферативный сборник. Вып. 11. М.: Изд. ВИНТИ, 1990. С. 18–20.
- [2] Исаков С.Н., Пакин П.А., Смирнов Г.В. Пусковой клапан для ударных труб. АС № 496405. Б.И. 1975. № 47.
- [3] Tesejumi Iku, Kazuyasi Matsuo // Bulletin of JSME. 1969. Vol. 12. N 52.
- [4] Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И. и др. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М.: Физматгиз, 1974. 344 с.
- [5] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Физматгиз, 1987. 840 с.
- [6] Гинзбург И.П. Прикладная гидрогазодинамика. Л.: Изд-во ЛГУ, 1958. 338 с.
- [7] Петров Р.Л. Измерение скорости ударной волны и определение чувствительности пьезоэлектрических датчиков давления на малой ударной трубе. Описание лабораторной работы. Л.: ЛПИ, 1977. 39 с.