

**ВЛИЯНИЕ ОТДАЧИ КАНАЛА  
НА СКОРОСТЬ МЕТАНИЯ ПРОБОЙНИКА  
ПОТОКОМ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ**

УДК 534.222.2

**В. А. Склад**

**Военная инженерно-космическая академия им. А. Ф. Можайского,  
197032 Санкт-Петербург**

*Рассматривается влияние отдачи канала на динамику метания массивного пробойника нестационарным двухфазным (порошок — газ) потоком. Представлены результаты математического моделирования и экспериментальные данные, позволяющие оценить влияние отдачи канала на скорость метаемого пробойника у его среза в зависимости от начального давления порохового газа и геометрических параметров пробойника.*

При создании подвижных устройств порошкового тушения очагов горения в замкнутых объемах с перфорацией их оболочек метаемым телом (пробойником) встает задача учета влияния отдачи на динамику выброса тушащего порошка и скорость пробойника. Движение сжатой двухфазной (твердые частицы — газ) среды насыпной плотности при внезапном расширении рассматривалось в [1, 2]. В [2] дана система уравнений, описывающая движение двухфазной среды внутри канала в рамках модели равновесного течения [3]. Результаты экспериментальных исследований метания массивных тел нестационарным потоком двухфазной среды представлены в [1]. При этом канал, из которого осуществлялось истечение, рассматривался как неподвижный. В случае движущегося канала, как показано в [4], у его дна возникают области пониженного давления. Наложение волн разрежения от среза и дна канала приводит к падению градиента давления, разгоняющего частицы сыпучего заполнителя и пробойник, что ведет к снижению их скорости на срезе канала.

Задачу о влиянии отдачи канала на скорость метаемого тела схематизировали следующим образом. Абсолютно жесткий горизонтально расположенный канал заполнен сыпучим материалом с избыточным давлением газа в пороховом пространстве и закрыт герметичной мембраной. Непосредственно в сыпучем заполнителе расположено метаемое тело (пробойник). Канал имеет возможность свободно перемещаться в направлении, противоположном выбросу двухфазной среды. После прорыва мембраны происходит выброс сыпучего заполнителя, разгон и метание пробойника. При этом канал под действием избыточного давления на его дне движется в обратную сторону. Движение канала и пробойника приводит к необходимости расчета в деформируемых координатных сетках [2]. Кроме того, предварительный анализ выполненных экспериментальных исследований свидетельствует о том, что основным процессом, определяющим динамику движения двухфазной среды и метаемого тела, следует считать внутриканальную фазу их разгона. Поэтому задачу можно решать в одномерной постановке.

Принимая допущения о равенстве скоростей движения фаз, пренебрегая действием

объемных сил и считая поровый газ идеальным, систему уравнений, описывающую движение среды без теплообмена между фазами и без теплоотдачи в стенки канала в квазиодномерной постановке (с учетом небольших изменений площади поперечного сечения канала), в деформируемых координатах можно записать в следующем виде [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\delta p}{\delta \tau} + \frac{\delta p}{\delta \eta} \left( \frac{u + a - \eta \varphi^*}{\varphi} \right) + a \rho \left[ \frac{\delta u}{\delta \tau} + \frac{\delta u}{\delta \eta} \left( \frac{u + a - \eta \varphi^*}{\varphi} \right) \right] &= - \frac{u a^2 \rho}{\varphi} \frac{\delta \ln f}{\delta \eta}, \\ \frac{\delta p}{\delta \tau} + \frac{\delta p}{\delta \eta} \left( \frac{u - a - \eta \varphi^*}{\varphi} \right) - a \rho \left[ \frac{\delta u}{\delta \tau} + \frac{\delta u}{\delta \eta} \left( \frac{u - a - \eta \varphi^*}{\varphi} \right) \right] &= - \frac{u a^2 \rho}{\varphi} \frac{\delta \ln f}{\delta \eta}, \quad \frac{dS}{d\tau} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Система (1) замыкается уравнением состояния порового газа

$$p = \rho_1 RT. \quad (2)$$

Здесь  $a = \sqrt{(kp/\rho)(\rho_0/(\rho_0 - \rho(1 - \Pi_0)))}$ ;  $\rho = \rho_1 \rho_0 / (\Pi_0((\rho_1)_0 - \rho_1) + \rho_1)$ ;  $\delta/\delta t = \delta/\delta \tau - (\eta \varphi^*/\varphi)(\delta/\delta \eta)$ ;  $\delta/\delta x = (1/\varphi)(\delta/\delta \eta)$ ;  $\varphi^* = d\varphi/dt$ ;  $t, x$  — время и продольная координата;  $p, u, \rho$  — давление, скорость и плотность двухфазной среды;  $a$  — скорость распространения малых возмущений в двухфазной среде;  $\Pi_0$  — начальная пористость среды (относительный объем, занимаемый поровым газом);  $T, k$  — температура и показатель адиабаты порового газа;  $\rho_0$  — насыпная плотность сыпучего заполнителя;  $\rho_1, \rho_2$  — плотности порового газа и материала заполнителя;  $f$  — площадь поперечного сечения канала;  $S$  — энтропийная функция порового газа;  $p_0, p_a$  — начальное давление порового газа и атмосферное давление соответственно.

Для определения скоростей и координат метаемого тела и канала при выбросе запишем их уравнения движения.

Уравнение движения канала имеет вид [4]

$$\frac{d\varphi_k^*}{d\tau} = \frac{\Delta p f}{m_k}, \quad \frac{d\varphi_k}{d\tau} = \varphi_k^*, \quad (3)$$

где  $\varphi_k$  — продольная координата расчетного узла, связанного с дном канала;  $\Delta p$  — перепад давления на задней стенке канала;  $m, m_k$  — масса сыпучего заполнителя и канала.

Как показали эксперименты, разгон пробойника нестационарной двухфазной струей внутри канала можно разделить на два этапа. Сразу после вскрытия мембраны среда движется, сохраняя свой «скелет», т. е. частички сыпучего заполнителя не теряют контакта между собой и, соответственно, пористость такой среды близка к начальной. В этих условиях пробойник разгоняется вместе с частицами среды без скольжения. Его скорость равна скорости среды.

При достижении определенного значения пористости  $\Pi_{ск}$  ( $\Pi_{ск} = 0,55 \div 0,75$  [5]) «скелет» разрушается и идет этап газодинамического разгона пробойника со скольжением относительно среды. В этом случае направления действия гидродинамического сопротивления на пробойнике и метания совпадают. На этом этапе разгона основной является «волновая сила», т. е. разность давлений на носке и у днища пробойника. Вклад силы гидродинамического сопротивления, как показали расчеты, составляет менее 3%, поэтому в рамках данной модели ее не учитываем.

Исходя из этого уравнение движения пробойника имеет вид

$$\varphi_{\Pi}^* = u_{д}, \quad \Pi(t) < \Pi_{ск}; \quad \frac{d\varphi_{\Pi}^*}{d\tau} = \frac{p_{д} - p_{н}}{m_{\Pi}} f_{\Pi} + C_x \rho \frac{(u_{д} - \varphi_{\Pi}^*)^2}{2}, \quad \Pi(t) \geq \Pi_{ск}; \quad \frac{d\varphi_{\Pi}}{d\tau} = \varphi_{\Pi}^*. \quad (4)$$

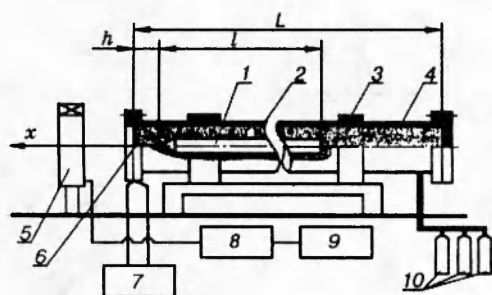


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 — метаемый пробойник; 2 — сыпучий наполнитель; 3 — направляющая втулка; 4 — канал; 5 — измерительная катушка; 6 — мембрана; 7 — схема прожига мембраны; 8 — мостовая схема; 9 — осциллограф; 10 — ресивер

где  $\varphi_n$  — продольная координата расчетных узлов, связанных с пробойником;  $u_d, p_d$  — скорость и давление среды у дна пробойника;  $p_n$  — давление среды у носка пробойника;  $f_n, C_x$  — площадь поперечного сечения и коэффициент лобового сопротивления пробойника;  $m_n$  — масса метаемого пробойника.

Коэффициент гидродинамического сопротивления задавался на основании экспериментальных зависимостей, представленных в [6].

Система дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа (1) с учетом (2) решалась методом характеристик с сеткой обратного типа [7] при следующих начальных и граничных условиях:

$$\begin{aligned} t = 0: \quad p &= p_0, \quad \rho = \rho_0, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad x < L; \\ p &= p_a, \quad \rho = \rho_0, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad x > L; \\ u &= \varphi_k^* \quad \text{при} \quad x = 0. \end{aligned}$$

Задание граничного условия при  $x = L$  в одномерной задаче связано с определенными трудностями. Они могут быть разрешены формальным введением за срезом канала расширяющейся области, что вызывает образование на срезе канала критического сечения.

Интегрирование уравнений (3), (4) выполнялось неявным методом Клиппинджера — Димсдейла [8].

С помощью представленной выше модели равновесного течения двухфазной среды для различных значений  $(m + m_n)/m_k$  проведены расчеты для оценки влияния отдачи канала на скорость метаемого пробойника.

Как показали расчеты, отдача оказывает влияние на динамику метания лишь в том случае, когда волна разрежения, движущаяся от дна канала к его срезу, успевает догнать донный срез пробойника. При этом уменьшается разница давлений, действующих на носовую и донную части пробойника, что приводит к падению величины разгоняющей силы, а следовательно, и скорости метаемого тела на срезе канала. Отсюда следует, что относительная длина пробойника  $l/L$  (рис. 1) и его начальное положение в канале  $h$  имеют большое значение при учете влияния отдачи.

На рис. 2 представлены расчетные значения (линии) «скольжения» пробойника при различных значениях  $l/L$ . Под скольжением  $v$  здесь понимается отношение скорости пробойника к теоретической максимальной скорости двухфазной струи при истечении в атмосферу ( $v_{\max}$ ). Данный масштаб может быть получен аналитически в стационарном приближении на основании теоремы Бернулли с принятием следующих допущений: баротропное движение идеальной жидкости стационарное, объемные силы малы по сравнению с по-

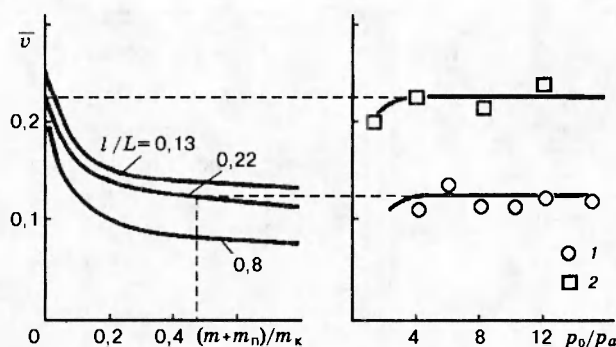


Рис. 2. Влияние отдачи на «скольжение» пробойника ( $h = 0$ ):

1 — с отдачи; 2 — без отдачи

верхностными, движение по поровому газу изоэнтропическое. Тогда

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{k p_0}{\rho_0 \Pi_0}} \sqrt{\frac{2 \Pi_0 (1 - \Pi_0)}{k} (1 - 1/p_0) + \frac{2 \Pi_0^2}{k-1} (1 - (1/p_0)^{k-1/k})}.$$

Для проверки результатов счета проведено три серии опытов на экспериментальном стенде (см. рис. 1). Канал 4 заполняли песком с насыпной плотностью  $1720 \text{ кг/м}^3$ , характерным диаметром частиц  $0,25 \text{ мм}$  и пористостью  $0,43$ . На определенном расстоянии от среза в песке 2 размещался пробойник 1. После наддува порового пространства песка сжатым воздухом мембрана 6, закрепленная на срезе канала, прожигалась, в результате чего происходил выброс песка и метание пробойника в одну сторону и отдача канала по направляющим втулкам 3 — в противоположную. При пролете пробойника сквозь катушку индуктивности 5, установленную неподвижно и подключенную по мостовой схеме к осциллографу 9, возникает разбалансировка моста, величина которой пропорциональна скорости пробойника у среза канала.

В экспериментах использовались пробойники различных геометрических размеров и форм носка. Исследования показали, что ни диаметр пробойника, ни форма его носка в данных диапазонах моделирования ( $1,6 < p_0/p_a < 40$ ;  $0,2 < l/L < 1$ ;  $0,1 < f_n/f < 0,5$ ;  $0,2 < \rho_0/(m_n/l f_n) < 1,3$ ) существенно не влияют на его скорость у среза канала.

Как видно из рис. 2, наблюдается хорошее соответствие результатов расчета и эксперимента, что свидетельствует о возможности использования представленной математической модели для оценки влияния отдачи канала на скорость метаемого тела.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. С. Экспериментальное исследование метания тел нестационарным потоком двухфазной среды // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 1. С. 73–77.
2. Любарский С. Д., Иванов А. С. Движение сжатой двухфазной среды насыпной плотности при внезапном расширении // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 3. С. 78–81.
3. Rudinger G. // AIAA J. 1965. V. 3. P. 7.

4. Любарский С. Д., Иванов А. С., Скляр В. А. Влияние отдачи на параметры нестационарного истечения двухфазной среды из канала // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 58-61.
5. Муштаев В. И., Ульянов В. М. Сушка дисперсных материалов. М.: Химия, 1988.
6. Розенбаум Р. Б., Тодес О. М. Движение тел в псевдооживленном слое. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980.
7. Зауэр Р. Нестационарные задачи газодинамики. М.: Мир, 1969.
8. Холл Дж., Уатт Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1979.

*Поступила в редакцию 18/VII 1995 г.,  
в окончательном варианте — 3/I 1996 г.*

---