

6. Dobrovolsky V. I., Dobrovolsky S. V. Mechanical Tests of Materials: study guide. – Izhevsk : Publishing House of ISTU, 2013. – 268 p.

7. Стеннов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.

8. Добровольский В. И., Добровольский С. В. Механические испытания материалов : учеб.-метод. пособие.

9. Dobrovolsky V. I., Dobrovolsky S. V. Mechanical Tests of Materials: study guide.

Получено 12.01.15

10. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. – М. : Физматгиз, 1961. – 356 с.

11. Добровольский С. В., Шакиров Р. Ф., Добровольский В. И. Результаты конечноэлементного анализа напряжений в зонах концентрации деталей гидрооснастки // Вестник машиностроения. – 1999. – № 1. – С. 11–14.

12. Нейбер Г. Концентрация напряжений. – М. ; Л. : Гостехиздат, 1947. – 204 с.

13. Там же.

УДК 621.77; 623.52

**В. Е. Останин**, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова  
**С. А. Алексеев**, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ В ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

**Р**учное оборудование для резки бетона и других твердых материалов, обладающее свойствами мобильности и автономности, актуально во многих сферах деятельности человека. Такое оборудование, действующее по принципу пескоструйной резки, может быть создано на базе образца автоматического стрелкового оружия при использовании специальных или штатных холостых патронов без имитатора пули.

Важным этапом на стадии эскизного проектирования является анализ возможности достижения характеристик, определяющих эффективность функционирования инструмента, в частности скорости абразивной смеси, при максимальной его унификации со штатным образцом стрелкового оружия. Результатам такого анализа при использовании в качестве базового образца автомата АК-103 и штатного холостого патрона 57-Х-231 посвящена данная статья.

Анализ проводился для двух вариантов исполнения инструмента: 1) штатный образец автомата с дульной втулкой для холостой стрельбы; подвод абразивной смеси в канал ствола предполагался в сечении, отстоящим от казенного среза на 250 мм; 2) образец автомата с укороченным стволом и дополнительным дульным сопловым насадком при том же патроне и условиях подвода абразивной смеси.

При математическом моделировании приняты следующие допущения.

1. Абразивная смесь состоит из двух фаз: газопороховой смеси (ГПС) и твердой фазы – кварцевого песка.

2. Термодинамическая постановка задачи для определения параметров газа.

3. Двухскоростная модель течения смеси в стволе и сопловом насадке. Твердая фаза не влияет на течение газа в канале. Движение твердой фазы моделируется движением одной твердой частицы.

4. Изэнтропичность течения газа в сопловом насадке.

5. Квазистационарность течения в сопловом насадке.

6. Газ идеальный.

### Математическая модель движения твердой частицы в цилиндрическом канале

Рассмотрим математическую модель, описывающую динамику движения твердой частицы в потоке порохового газа в цилиндрическом канале.

При рассмотрении процесса приняты следующие дополнительные допущения.

1. В холостом патроне отсутствует имитатор пули, а роль пули выполняет переменная масса воздуха, вытесняемого из ствола. Влияние движения воздуха на твердую частицу, находящуюся в стволе, не учитывается.

2. Частица, расположенная в стволе на расстоянии  $X_{т0}$  от дна канала, начинает движение с момента прихода к ней границы раздела ГПС – воздух. Скорость движения частицы  $V_T$  в силу ее инертности меньше скорости течения газа  $V_G$ .

3. Принята термодинамическая модель внутренней баллистики с допущением о равномерной плотности газа по длине заснарядного пространства [1].

При данном допущении аналитические зависимости для скорости  $V_x$  и давления  $p_x$  в сечении  $x$ , также средней плотности  $\rho_r$  порохового газа имеют вид

$$V_x = V \frac{x}{l}; \quad (1)$$

$$p_x = p_{кн} - (p_{кн} - p_l) \frac{x^2}{l^2}; \quad (2)$$

$$\rho_r = \frac{\omega \Psi}{Sl}; \quad (3)$$

$$l = l_0 + l_d,$$

где  $V$  и  $l$  – скорость и перемещение границы раздела пороховой газ – воздух соответственно;  $p_{\text{кн}}$  и  $p_l$  – давление порохового газа у дна канала ствола и у границы раздела ГПС – воздух соответственно;  $\omega$  – масса порохового заряда;  $\psi$  – относительная масса сгоревшего пороха;  $S$  – площадь сечения канала ствола;  $l_0$  и  $l_d$  – приведенная длина зарядной камеры и длина ведущей части канала ствола соответственно. Эти соотношения позволяют составить уравнение движения твердой фазы.

В заснарядном пространстве твердая частица убыстрит свое движение в основном под действием сил, которые своим происхождением обязаны скоростному напору (динамическому давлению) и градиенту статического давления.

Сила, действующая на твердую частицу от скоростного напора:

$$P_v = 0,5 C_x(M) \rho_g (V_x - V_T)^2 S_T,$$

где  $C_x(M)$  – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления твердой частицы в функции от числа Маха [2]. Для данного случая

$$M = \frac{V_x - V_T}{a},$$

где  $a$  – скорость звука в пороховом газе.

Сила, создаваемая градиентом статического давления:

$$P_c = \int_x^{x+l_T} S_T \frac{\partial p_x}{\partial x} dx,$$

где  $l_T$  и  $S_T$  – соответственно, длина и площадь мишеля твердой частицы.

Эти силы действуют на твердую частицу в одном направлении и ускоряют ее движение согласно уравнениям:

$$\frac{dV_T}{dt} = \frac{P_v + P_c}{m_T}, \quad (4)$$

$$\frac{dX_T}{dt} = V_T, \quad (5)$$

где  $t$  – время;  $m_T$  – масса твердой частицы.

Для малых по размеру сферических частиц сила  $P_c$  пренебрежимо мала. Ее учет необходим только

для относительно протяженных частиц, когда давление на передний и задний торец частицы существенно отличаются.

Математическая модель для оценки скорости и перемещения твердой частицы в потоке ГПС составлена на основе термодинамической модели внутренней баллистики холостого выстрела [3]. В соответствии с ней же вычисляются и указанные выше величины:  $V$ ,  $l$ ,  $p_{\text{кн}}$ ,  $p_l$ ,  $\psi$ ,  $a$ . Указанная математическая модель, дополненная уравнениями (1)–(5), позволяет рассчитать параметры движения твердой частицы.

Ниже и на рис. 1 приведены результаты расчета и анализ параметров движения твердой частицы и газа при выстреле из штатного образца автомата с дульной втулкой для холостой стрельбы. Здесь и далее  $V_T$  – скорость газа в координате твердой частицы, т. е.  $V_T = V_x$  при  $x = X_T$ .

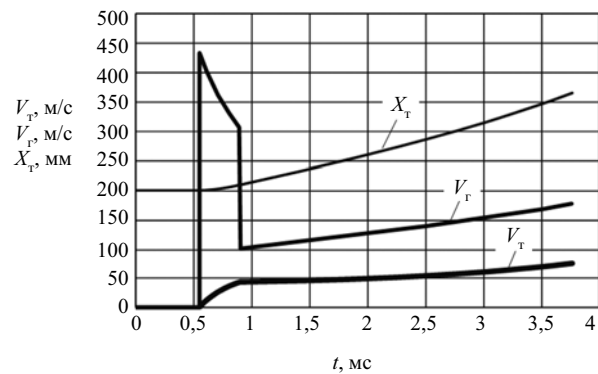


Рис. 1. Параметры движения твердой частицы и газа возле нее в функции времени (автомат с дульной втулкой для холостой стрельбы)

Движение частицы начинается с момента  $t = 54$  мс, когда граница раздела ГПС – воздух проходит путь  $l = X_{T0} = 200$  мм. После достижения границей раздела дульной втулки с меньшим пропускным сечением скоростью газа значительно падает, а разгон частицы продолжается. Дульной втулки твердая частица достигает со скоростью  $V_T = 43,8$  м/с.

#### Математическая модель движения твердой частицы в сопловом дульном насадке

Рассмотрим разгон твердой частицы пороховым газом при наличии дульного соплового насадка (размеры и форма приведены на рис. 2).

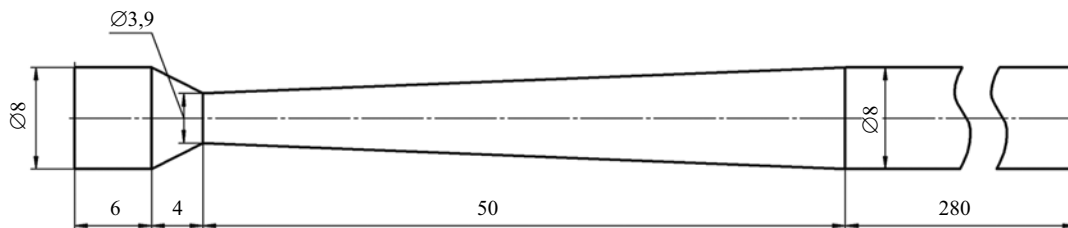


Рис. 2. Форма дульного соплового насадка

Дифференциальные уравнения движения твердой частицы остаются прежними, а термодинамические параметры газа и его скорость в сечении соплового

насадка, определяющие движение частицы, для каждого значения времени  $t$  при указанных допущениях рассчитываются с использованием стандартных га-

зодинамических функций для давления  $\pi(\lambda)$  и плотности  $\varepsilon(\lambda)$  газа соответственно:

$$p_x = p^* \pi(\lambda_x) = p^* \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_x^2\right)^{\frac{k}{k-1}}; \quad (6)$$

$$\rho_x = \rho^* \varepsilon(\lambda_x) = \rho^* \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_x^2\right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (7)$$

где  $p^*$  и  $\rho^*$  – давление и плотность газа в заторможенном состоянии соответственно;  $\lambda_x$  – безразмерная скорость газа в сечении с координатой  $x$ ;  $k$  – показатель адиабаты газа.

Безразмерная скорость газа  $\lambda_x$  определяется из газодинамической функции приведенного расхода

$$q(\lambda_x) = \frac{S_{кр}}{S_x} = \lambda_x \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_x^2\right)^{\frac{1}{k-1}},$$

где  $S_{кр}$  и  $S_x$  – площадь критического сечения соплового насадка и площади в сечении  $x$ .

Скорость газа в сечении  $x$

$$V_x = \lambda_x a_{кр}, \quad (8)$$

где  $a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT^*}$  – критическая скорость звука;

$T^*$  – температура торможения.

В данном случае уравнения (1)–(3) заменяются уравнениями (7), (8).

Ниже и на рис. 3 приведены результаты расчета и анализ параметров движения твердой частицы и газа при выстреле из автомата с укороченным стволом и дополнительным дульным сопловым насадком.

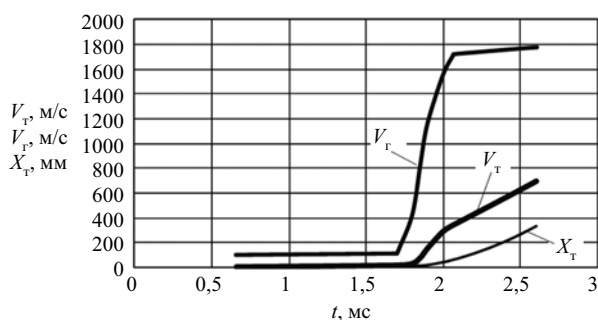


Рис. 3. Параметры движения твердой частицы и газа возле нее в функции времени (автомат с укороченным стволем и дульным насадком)

Получено 20.01.2015

Твердая частица начинает движение в момент  $t = 66$  мс от начала выстрела, когда граница раздела ГПС – воздух дойдет до дульного насадка. К моменту  $t = 186$  мс частица, пройдя путь  $X_t = 10$  мм, достигает критического сечения насадка со скоростью  $V_t = 77$  м/с. К моменту  $t = 207$  мс частица достигает конца сопла. На выходе дульного насадка частица достигает скорости  $V_t = 696$  м/с.

### Выводы

Проведенный анализ показывает, что необходимая эффективность функционирования инструмента для пескоструйной резки, спроектированного на базе образца стрелкового оружия может быть достигнута при использовании дополнительного дульного соплового насадка.

Для расчета скоростей вылета последующих частиц абразивного снаряда необходимо знать расход частиц при подаче их в дульный насадок. При этом общая масса выброшенных частиц и их скорости будут определяться длительностью периода действия и параметрами истекающего газа. Эффективность работы дульного устройства будет возрастать с увеличением порохового заряда вследствие увеличения плотности газового потока, что приведет к увеличению скорости твердых частиц. Для получения наибольшей скорости вылета частиц необходимо оптимизировать геометрию насадка при заданных ограничениях на его длину.

Результаты работы позволяют определить необходимые этапы и процедуры эскизного и технического проектирования инструмента для пескоструйной резки на базе образца стрелкового оружия.

### Библиографические ссылки

1. Внутренняя баллистика артиллерийских систем и некоторые задачи нестационарного теплообмена в их узлах / под общ. ред. Б. В. Орлова. – М. : ЦНИИ информации, 1978. – 136 с. : ил.
2. Коновалов А. А., Николаев Ю. В. Внешняя баллистика. – М. : ЦНИИ информации, 1979. – 228 с.
3. Платонов Ю. П. Термогазодинамика автоматического оружия. – М. : Машиностроение, 2009. – 356 с.