

4. Sommerfeld M. The unsteadiness of shock waves propagating through gas — particles mixtures // Experiments in fluids.— 1985.— 3, N 4.— P. 197.
5. Гавриленко Т. П., Григорьев В. В. Распространение ударной волны в аэрозвеси твердых частиц // ФГВ.— 1984.— 20, N 1.— С. 68—90.
6. Olim M., Igra O., Mond M. et al. A general attenuation law of planar shock waves propagating into dusty gases // Shock tubes and waves: Proc. 16th Symp. (Intern.) on shock tubes and waves, Aachen, 1987.
7. Кругликов В. С., Кутушев А. Г. Ослабление ударных волн экранирующими решетками // ФГВ.— 1988.— 24, N 1.— С. 115—118.
8. Whitham G. B. Linear and nonlinear waves.— N. Y.; London: Wiley Inters. Publ., 1974.— Рус. пер.: Уизем Г. Линейные и нелинейные волны.— М.: Мир, 1977.
9. Zloch N. Shock attenuation in beds of granular solids // Arch. Mech. Stosow.— 1976.— 28, N 5—6.— P. 817.
10. Wallis G. B. One-dimensional two-phase flow.— N. Y., McGraw H., 1969.— Рус. пер.: Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения.— М.: Мир, 1972.
11. Igra O., Ben-Dor G. Dusty shock waves // Appl. Mech. Rev.— 1988.— 41, N 11.— P. 379.

г. Москва

Поступила в редакцию 4/XI 1989,
после доработки — 22/V 1990

УДК 623.428

В. И. Таржанов

О РАЗГОНЕ МАССИВНОГО ТЕЛА НА ФРОНТЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

Рассмотрена схема ускорения — модификация схемы прямоточного реактивного ускорения с внесением горючего и окислителя извне. С использованием решения задачи Прандтля — Майера о сверхзвуковом обтекании угла продуктами детонации с газовым уравнением состояния при показателе политропы, равном 3, получены зависимости давления на хвостовик тела от угла полураствора хвостовика для чисел Маха $M = 1 \div 10$. Рассмотрены способы предварительного ускорения тела и вопросы сохранения телом компактности.

Известны различные способы и устройства для метания компактных тел с высокими скоростями (пушечные и взрывные [1, 2], реактивные [3]). Реально достигаемые в пушках скорости тел W падают с увеличением их массы. Препятствует увеличению W ограниченность скорости расширения рабочего газа, пропорциональной скорости звука в нем, второе ограничение — падение давления в газе за телом по мере его разгона.

Названные ограничения обходятся в идеях устройства, рассматриваемого ниже [4—9]. Эти идеи родственны идее Е. И. Забабахина о «ноплавке» на ударном фронте [10].

Схемы устройств показаны на рис. 1. Тело, которому предварительно сообщается скорость, равная скорости детонации используемого взрывчатого вещества (ВВ), при входе в трубчатый заряд вызывает с помощью пояса кольцевую детонацию последнего. Продукты детонации (ПД), обтекая хвостовик тела, создают составляющую давления вдоль оси и толкают его вперед с ускорением. Реализуется ситуация, аналогичная ситуации в сопле реактивного двигателя, а схема устройства на рис. 1, б — по сути схема твердотельного прямоточного реактивного двигателя, окислитель и горючее в котором вносятся извне.

Толщина стенки трубы из ВВ (см. рис. 1, а) выбирается расчетно такой, чтобы первая характеристика волны разгрузки, исходящая из точки пересечения детонационного фронта с внешней образующей заряда, приходила в концевую точку хвостовика.

Для оценки параметров течения ПД использовалось решение задачи Прандтля — Майера [11]. Схема рассматриваемого течения показана на

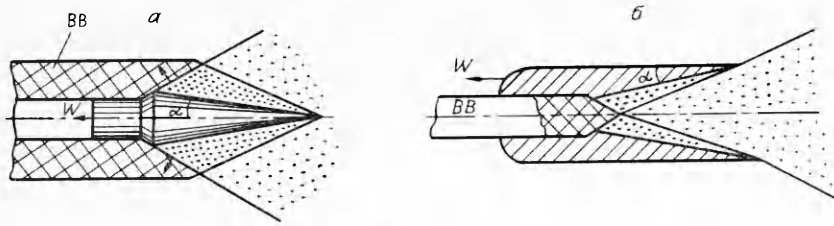


Рис. 1.

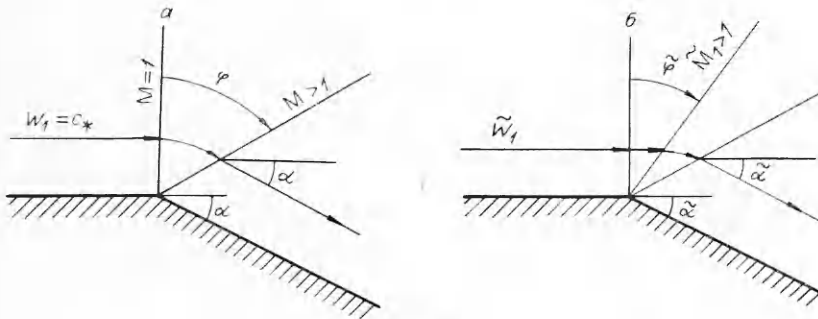


Рис. 2.

рис. 2. Для газового уравнения состояния ПД $E = pV/(n - 1)$ решение задачи для случая $W = c_1$ (рис. 2, а) имеет вид

$$\frac{p}{p_*} = \left(\cos \sqrt{\frac{n-1}{n+1}} \varphi \right)^{\frac{2n}{n-1}}, \quad (1)$$

$$\alpha = \varphi + \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}} \operatorname{ctg} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}} \varphi - \frac{\pi}{2}.$$

Здесь E , p и V — внутренняя энергия, давление и удельный объем ПД; n — показатель политропы; W — скорость в потоке; c — скорость звука в ПД; φ — полярный угол; p_* — критическое давление; M , равное W/c — число Маха; α — угол поворота потока.

Для сверхзвукового потока (рис. 2, б) начальное состояние соответствует состоянию с таким же M в потоке звуковом [11]. Поэтому решение $p(\alpha)$ для сверхзвукового потока получается из уравнения (1) путем перехода

$$\tilde{\varphi} = \varphi_{W=c} - \alpha_{\tilde{M}_1}, \quad \tilde{\alpha} = \alpha_{W=c} - \alpha_{\tilde{M}_1}, \quad (2)$$

где $\alpha_{\tilde{M}_1}$ — угол поворота в звуковом потоке (см. 2, а) на линии Маха $M = \tilde{M}_1$.

Результаты вычислений по (1) и (2) при параметрах ($n = 3$, $D = 8$ км/с, $p_{\text{ж}} = 27 \times 10^9$ Па, $\rho_{\text{ВВ}} = 27/16$), примерно соответствующих ТГ 50/50 (см., например, [12]), показаны на рис. 3. Видно, во-первых, что давление на грани обтекаемого угла при фиксированном M довольно резко падает с увеличением α . Во-вторых, в диапазоне $\alpha = 0 \div 10^\circ$ зависимости $p(\alpha)$ мало отличаются друг от друга для $M = 1 \div 1,5$. Итак, давление на хвостовик в виде двугранного угла, движущегося с $M = W/D$ и скоростью W (D — скорость детонации ВВ, равная критической скорости звука в звуковом потоке), описывается зависимостями рис. 3.

Случай осесимметричного тела с коническим хвостовиком оказывается более сильным из-за сходимости потока. Грубая оценка по геометрии течения дает давление на хвостовик, в 1,5 раза превышающее давление на клинообразный хвостовик. Сила F , действующая со стороны ПД на хвостовик в направлении движения, не зависит от формы хвостовика и равна pS , где S — площадь максимального поперечного сечения

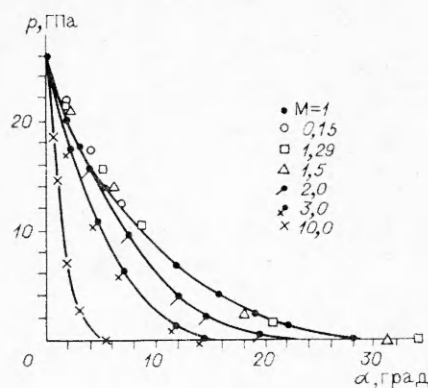


Рис. 3.

На детонационную скорость ≈ 8 км/с можно вывести тело в рассмотренном устройстве при использовании ВВ пониженной плотности с меньшей скоростью детонации. Оценка по (1) и (2) длины промежуточной секции устройства на диапазон $W = 4 \div 8$ км/с с использованием пористого гексогена для массы тела 10 кг дала значение 12 м. Для массы в 1 кг соответствующая длина 1,2 м. Наиболее труден диапазон $W = (1,5 \div 4)$ км/с. Однако есть патенты США [4—9] на устройства, в принципе позволяющие реализовать этот диапазон скорости тела. В качестве предварительного ускорителя (до 1,5 км) могут, например, использоваться легкогазовые пушки [1, 2], взрывной легкогазовый ускоритель по [9], устройство [13].

Специального рассмотрения требует вопрос сохранения компактности ускоряемым телом в процессе разгона и связанный с ним вопрос автоиницирования ВВ в устройстве. Для снижения давления на инициирующем пояске тела в [5], например, предлагается инициировать ВВ не пояском, а ведомой им в остаточной атмосфере ударной волной. Для решения этих вопросов полезно двумерное математическое моделирование устройства. Таким образом, показано, что разгон массивного тела на фронте детонации ВВ возможен от ≈ 4 до 12 км/с. Масштаб устройства для разгона пропорционален массе тела и обратно пропорционален давлению ПД, определяемому геометрией его хвостовика.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Высокоскоростные ударные явления**/Под ред. В. Н. Николаевского.— М.: Мир, 1973.
2. **Баллистические установки**/Под ред. Н. А. Златина, Г. И. Мишина.— М.: Наука, 1974.
3. Саттон Д. **Ракетные двигатели**.— М.: ИЛ, 1952.
4. Pat. 3411403 USA, F 41 f 1/00. Propellant lined high velocity accelerator/C. A. Rodenberger // Offic. Gaz.— 1968.— 856, N 3.
5. Pat. 3418878 USA, F 41 f 1/00. Method and means for augmenting hypervelocity flight/J. A. Stricklin // Offic. Gaz.— 1968.— 857, N 5.
6. Pat. 3880044 USA, F 41 f 1/00. Muzzle attachment for accelerating a projectile/A. L. Korr, E. N. Walker // Offic. Gaz.— 1975.— 933, N 5.
7. Pat. 3572248 USA, F 41 f 1/00. Ammunition for high firing rate hypervelocity Gun/P. V. Estates // Offic. Gaz.— 1971.— 884, N 4.
8. Pat. 3357306 USA, F 41 f 1/00. Accelerating particles to high velocities/C. A. Bovd, P. G. Luckhardt // Offic. Gaz.— 1967.— 845, N 2.
9. Pat. 3465638 USA, F 41 f 1/00. Hypervelocity gun/T. N. Canning // Offic. Gaz.— 1969.— 866, N 2.
10. Забабахин Е. И., Забабахин Н. Е. Стационарное перемещение тела ударной волной // ПМТФ.— 1980.— № 2.
11. Курант Г., Фридрихс К. **Сверхзвуковое течение и ударные волны**.— М.: ИЛ, 1950.
12. **Физика взрыва**/Под ред. К. П. Станюковича.— М.: Наука, 1975.
13. Херцберг А., Брюкнер А. П., Богданов Д. У. Прямочный ускоритель: новый способ использования химической энергии для метания снарядов со сверхвысокими скоростями // *Аэрокосмическая техника*.— 1988.— № 11.

г. Челябинск

Поступила в редакцию 13/III 1990