

УДАРНАЯ ВОЛНА В ГАЗЕ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ
ПОДКАЧКЕ ЭНЕРГИИ

С. И. Грицинин, Е. Е. Ловецкий ^{*)}, М. Б. Панкова ^{**)}

УДК 531

Рассмотрено движение газа за фронтом ударной волны при непрерывной подкачке энергии в ограниченный объем газа.

В работах /1,2/ экспериментально изучались газодинамические явления, инициированные импульсными микроволновыми разрядами. Теоретическое описание этих явлений было проведено в предположении мгновенности энерговыделения /2,3/, т.е. малости времени вклада энергии в газовую среду импульсным микроволновым разрядом по сравнению со временем прохождения звуковой волны через область энерговыделения. С развитием микроволновой техники /4/ появилась возможность существенного удлинения микроволнового импульса без изменения плотности потока энергии. Для теоретического описания поведения среды под воздействием таких импульсов нельзя использовать предположения о мгновенном выделении энергии. Поэтому в настоящей работе рассмотрено движение газа в предположении непрерывного и равномерного выделения энергии микроволнового разряда в среде.

Рассмотрим одномерную задачу. Пусть в газе имеется некоторый объем с линейным размером L , в котором происходит непрерывная и равномерная по объему подкачка энергии в среду (в плоском случае L — толщина плоского слоя газа, в сферически симметричном — радиус сферической области подкачки энергии). Размер L может изменяться со временем в течение процесса. В области L в нача-

^{*)} Московский инженерно-физический институт.

^{**)} Научно-исследовательский институт автоматических систем.

ле энергoвыделения формируются повышенные по сравнению с окружающим газом давление и температура, в результате чего нагретый газ будет расширяться и по окружающему газу начнет распространяться ударная волна. Будем считать, что скорость ударной волны постоянна $/2,5/$. При этом во всем объеме газа за ударной волной давление постоянно. По характеру движения в газе можно выделить три области. Первая область соответствует размеру L , в ней происходит поглощение энергии и разогрев газа. Вытесненный из первой области нагретый газ образует вторую область. Между нагретым газом и ударной волной имеется третья область поджатого ударной волной газа.

В первой области, считая газ идеальным, можно записать связь между величиной энергии, поглощаемой газом, и изменением объема области

$$q = \frac{\gamma p}{\gamma - 1} \frac{dV}{dt}, \quad (1)$$

где q — количество энергии, поглощаемое газом в единицу времени, γ — показатель адиабаты, p — давление газа, V — объем области поглощения.

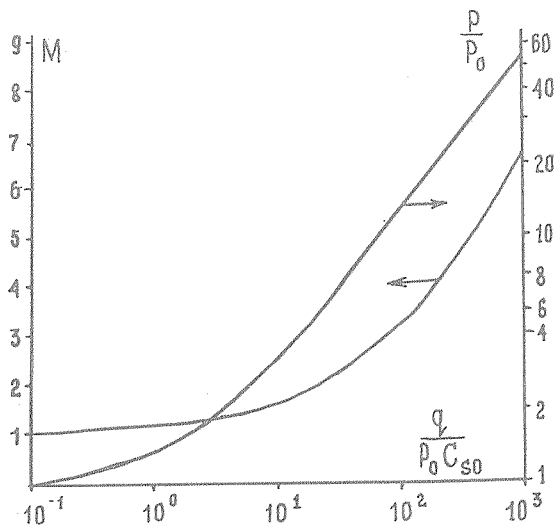
Во второй и третьей областях скорость газа постоянна, что следует из уравнения движения при учете постоянства давления. Эта скорость определяется из условия непрерывности потока вещества на границе первой и второй области. Распределение плотности газа во второй и третьей областях можно найти из уравнения непрерывности и граничных условий. Граница между этими областями перемещается в пространстве со скоростью газа v . На этой границе плотность испытывает скачок, который возникает в начальный момент движения. Величина этого скачка определяется из общего баланса вещества.

На ударной волне законы сохранения имеют вид:

$$\begin{aligned} \rho_0 D &= \rho u, \\ \rho_0 + \rho_0 D^2 &= p + \rho u^2, \\ \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_0}{\rho_0} + \frac{1}{2} D^2 &= \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} u^2, \\ v &= D - u. \end{aligned} \quad (2)$$

Первые три уравнения соответствуют законам сохранения потока массы, импульса и энергии на ударном переходе, где ρ_0 и ρ ,

ρ_0 и p — плотности газа и давления в газе соответственно перед ударной волной и за ней; D и u — скорости ударной волны относительно газа перед ней и за ней, v — скорость газа относительно лабораторной системы. Зависимости величины p/p_0 и числа Маха $M = D/c_{s0}$, где c_{s0} — скорость звука в невозмущенной среде ($c_{s0}^2 = \gamma p_0/\rho_0$), от безразмерного параметра $q/p_0 c_{s0}$ представлены на рис. I.



Р и с. I. Зависимость относительного давления за ударной волной p/p_0 и числа Маха M от безразмерного энерговклада $q/p_0 c_{s0}$

Приведем два примера рассматриваемого процесса.

I. Имеется плоский поглощающий слой толщины L , причем L может увеличиваться со временем. Из соотношения (I) определяем скорость газа $v = (\gamma - 1)q/\gamma p$. Из закона сохранения массы газа находим изменение со временем плотности газа в первой области:

$$\rho_1 = \rho_0 \exp \left(-v \int_0^t dt/L \right). \quad (3)$$

Изменение плотности газа во второй области можно определить из уравнения движения: $\rho_2 = \rho_2(x - vt)$, где неопределенная функция ρ_2

находится из граничного условия на границе поглощающей области с использованием (3):

$$\rho_2(x, t) = \rho_0 \exp \left(- \int_{L_0}^{x-vt} \frac{v dz}{L(z)[\dot{L}(z) - v]} \right). \quad (4)$$

Здесь $L_0 = L(0)$, а функция $L(z)$ получается из $L(t)$ заменой $z = L(t) - vt$. При $L(t) = L_0 = \text{const}$ имеем:

$$\rho_2(x, t) = \rho_0 \exp \left(\frac{x - vt}{L} - 1 \right). \quad (5)$$

В третьей области $\rho_3 = \rho = \text{const}$. В точке $L + vt$ на границе областей 2 и 3 существует контактный разрыв: плотность слева равна ρ_0 , справа — ρ . Температуру газа находим из уравнения состояния

$$T_i = T_0 (p_i \rho_0 / \rho_0 p_i), \quad (6)$$

где $i = 1, 2, 3$ — номер области, T_0 — начальная температура газа,

2. В сферически симметричном случае скорость газа дается выражением

$$v = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{q}{4\pi r L^2(t)}. \quad (7)$$

Отсюда следует, что для постоянства скорости ударной волны при движении границы области энерговыделения мощность q должна быть пропорциональна $L^2(t)$. Плотности газа в областях 1 и 2 равны соответственно:

$$\rho_1(t) = \rho_0 \exp \left[- 3v \int_0^t dt / L(t) \right], \quad (8)$$

$$\rho_2(r, t) = \rho_0 [L(r - vt)/r]^2 \exp \left(- 3v \int_0^{r-vt} \frac{dz}{L(z)[\dot{L}(z) - v]} \right), \quad (9)$$

где $L(z)$ и $\dot{L}(z)$ имеют тот же смысл, что и в (4). При сферическом разлете газа плотность в области 3 не будет постоянной:

$$\rho_3(r, t) = \frac{\rho}{r^2} \left[L(t) + \frac{u}{u - v} (r - vt - L(t)) \right]^2, \quad (10)$$

где ρ — плотность газа непосредственно за фронтом ударной волны.

Авторы благодарят А. А. Рухадзе, Г. М. Батанова и И. А. Коссого за плодотворные дискуссии и помощь в работе.

Поступила в редакцию

24 декабря 1978 г.

Л и т е р а т у р а

1. R. Musson-Genon, M. Braisseau, "Proc. 5-th Int. Conf. on Ioniz. Phen. in Gases", ed. by H. Maecker, North-Holland publ., Amsterdam, (1962).
2. S. C. Lin, G. P. Theofilos, Phys. Fluids, 6, 1369 (1963).
3. E. L. Resler, S. C. Lin, A. R. Kantrowitz, J. Appl. Phys., 23, 1390 (1952).
4. Н. И. Зайцев, Т. Б. Панкратова, М. И. Петелин, В. А. Флягин, Радиотехника и электроника, XIX, вып. 5, 1056 (1974).
5. Б. Л. Борович, П. Г. Григорьев, В. С. Зуев, В. Б. Розанов, А. В. Старцев, А. П. Широких, Труды ФИАН 76, 3 (1974).