

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМИ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЗА СЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ  
ДВИЖЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ**

В работе рассматривается механизм воздействия ударной волны (УВ) на активную среду, приводящий к появлению дополнительного источника энерговыделения. Этот источник движется вместе с фронтом ударной волны и зависит (в плазме) от величины и направления приложенного электрического поля и плотности тока. В работе [1] рассмотрен случай движения слабых УВ, данная работа является ее продолжением. Рассматриваются УВ любой интенсивности и любой механизм возникновения дополнительного энерговыделения за счет изменений параметров среды при прохождении УВ. Частными случаями является движение УВ в плазме и детонационное горение.

Система нестационарных уравнений, описывающая параметры ударной волны при наличии движущегося в направлении оси  $x$  со скоростью  $w$  источника тепла, имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho u^2 + P - \frac{4}{3} \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{2} \rho u^2 + \rho e \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left( \frac{1}{2} u^2 + e \right) \rho u + \left( P - \frac{4}{3} \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) u - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right\} - Q(x - wt) = 0$$

где  $\rho$ ,  $u$ ,  $e$  - соответственно плотность, массовая скорость и внутренняя энергия газа,  $\mu$  - вязкость газа,  $P$  - статическое давление  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $T$  - абсолютная температура газа,  $Q$  - поступающая в единицу объема мощность. Рассматривается решение данной системы, стационарное в системе координат  $\xi = x - wt$ , движущейся со скоростью  $w$ . В качестве искомой функции взята скорость  $v = w - u$ , что, очевидно, соответствует выбору системы координат, движущийся с источником.

После ряда преобразований в ходе решения системы нестационарных уравнений получено уравнение для относительной скорости УВ  $\bar{v}(z) = \frac{v(z)}{v_1}$ . В дальнейшем в качестве

искомой функции использовалась величина  $p(z) = \frac{1 - \bar{v}(z)}{\alpha}$ , которая удовлетворяет уравнению

$$(1 - \alpha p) \frac{dp}{dz} = p(p - 1) + \frac{1}{4} \beta \left[ \int_z^\infty \omega(z') dz' + J(z) \right]$$

$$J(z) = e^{-az} \int_z^\infty \omega(z') e^{-az'} dz',$$

где

$$\beta = \frac{8\mu}{3} \frac{\gamma(\gamma^2 - 1)M^2}{\rho_1^2 a_1^4 (M^2 - 1)^3} Q_0, \quad a = \frac{\gamma M^2}{M^2 - 1}, \quad z = M \alpha \frac{3\rho_1 a_1 (\gamma + 1)}{8\mu\gamma} \xi.$$

Численное решение полученного уравнения третьего порядка для функции  $p(z)$ :

$$\frac{d^3 p}{dz^3} = -\frac{1}{1 - \alpha p} \left\{ \left[ a(1 - \alpha p) - 2p + 1 - 3\alpha \frac{dp}{dz} \right] \frac{d^2 p}{dz^2} - [2 + \alpha a] \left( \frac{dp}{dz} \right)^2 + a(1 - 2p) \frac{dp}{dz} + \frac{a\beta}{4} \omega(z) \right\}$$

позволило определить важнейшие для управления аэродинамическими характеристиками параметры: скорость ударной волны, давление, плотность, температуру, число Маха.

Результаты проведенных расчетов позволяют сделать следующие выводы.

Увеличение числа Маха:

- удаляет от начала координат точку повторного выхода числа Маха на значение  $M = 1$ ;

- увеличивает максимальную разницу температур  $\Delta T_{\max}$ ;

- уменьшает ширину ударного фронта;

- уменьшает безразмерный энергетический параметр  $\beta$ .

Увеличение величины энерговклада  $Q_0$  ( $\text{Вт}/\text{м}^3$ ):

- приближает к началу координат точку повторного выхода числа Маха на значение  $M = 1$  (т.е. уменьшает область существования стационарного решения задачи);

- практически не меняет максимальную разницу температур;

- практически не меняет ширину ударного фронта;

- увеличивает безразмерный энергетический параметр  $\beta$ .

Графики, подтверждающие эти выводы, приведены на рис. 1.

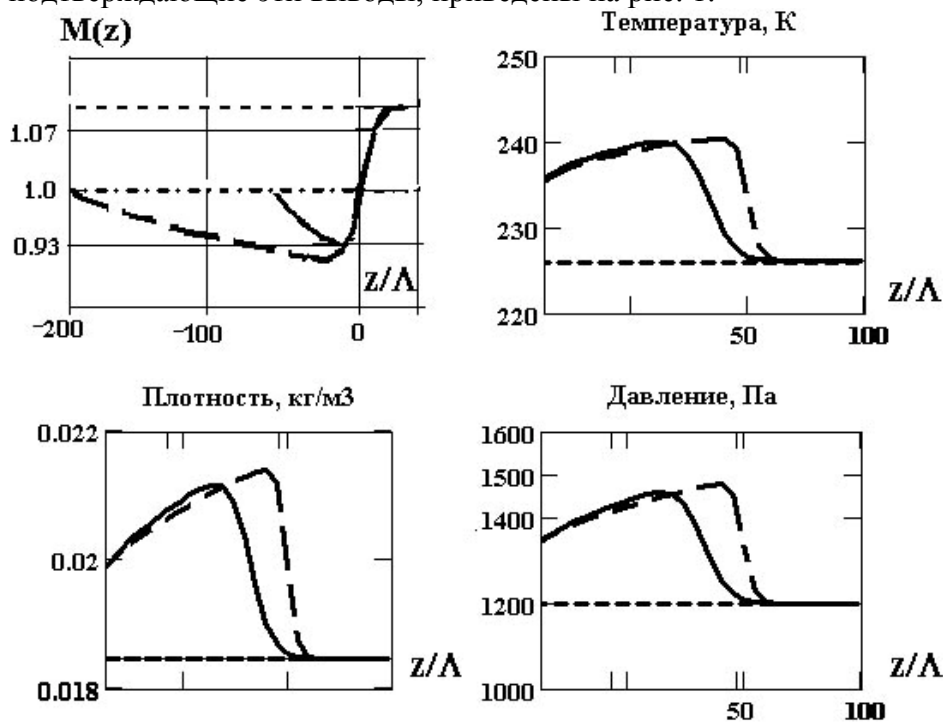


Рис. 1. Сопоставление расчетов при различных вариантах энерговклада.

Высота  $h = 30$  км, число Маха  $M = 1.1$ , длина свободного пробега  $\Lambda = 5.213527 \cdot 10^{-6}$  м.

Сплошная линия:  $Q_0 = 300 \text{ Вт}/\text{м}^3$ ,  $\beta = 0.104553$ , пунктирная линия:  $Q_0 = 100 \text{ Вт}/\text{м}^3$ ,  $\beta = 0.034851$

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Н.А.Герасимов, В.В.Кучинский В.С.Сухомлинов, С.В.Сухомлинов. ЖТФ, 2007, т.77, вып. 7, с.11-17.