

УДК 533.9

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗА ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ СКОЛЬЗЯЩИМ РАЗРЯДОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

И. М. Минаев, А. А. Рухадзе

Рассматривается начальная стадия развития газодинамических процессов, следующая непосредственно после завершения энерговыделения в скользящем разряде на пластине, обтекаемой сверхзвуковым потоком газа. Показано, что при иницировании скользящим разрядом ударной волны, в зоне пограничного слоя наблюдается поток газа в направлении, перпендикулярном к пластине, приводящий к возмущению структуры пограничного слоя.

В работах [1, 2] рассматриваются характеристики плазменного пограничного слоя, образованного скользящим разрядом, на поздних стадиях после завершения энерговыделения и газодинамических процессов, сопутствующих развитию разряда. Однако представляет значительный интерес и начальная стадия развития газодинамических процессов, следующая непосредственно после завершения процесса энерговыделения в скользящем разряде. В отличие от других видов разрядов в скользящем разряде создается плоский плазменный лист с линейными размерами, много большими толщины слоя.

Известно [3], что при иницировании скользящего разряда на поверхности пластины в газовой среде возникают газодинамические возмущения в виде ударных волн, образующихся за счет резкого, практически мгновенного по сравнению с газокинетическими временами выделения энергии и повышения температуры в тонком слое газа над поверхностью.

Повышение температуры приводит к значительному росту давления в слое и соответственно изменению плотности газа. Можно считать, что за время развития разряда образуется замкнутый объем газа с повышенной температурой, давлением по сравнению с окружающей газовой средой. Скачок давления инициирует ударную волну, распространяющуюся в направлении нормали к поверхности (рис. 1).

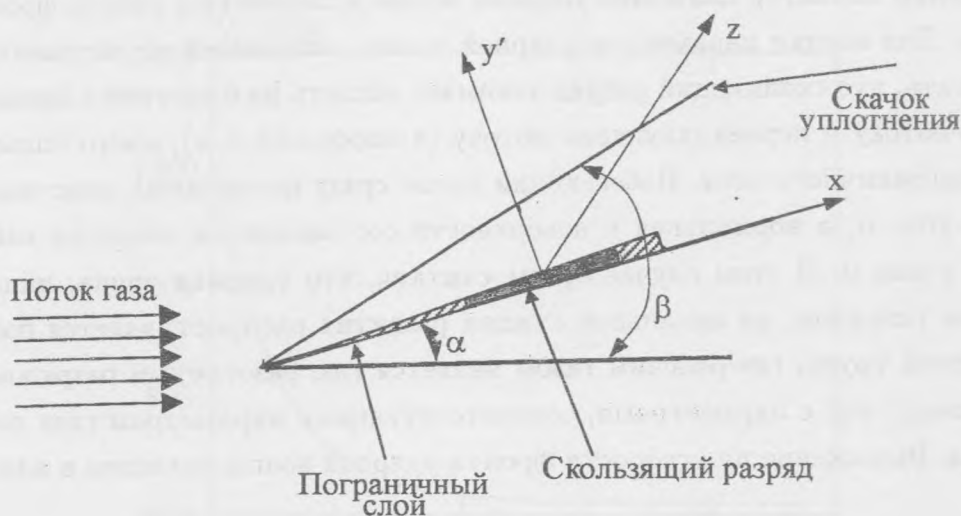


Рис. 1.

В случае, когда скользящий разряд создается на поверхности пластины, обтекаемой сверхзвуковым потоком газа, область энерговыделения находится полностью в зоне пограничного слоя [2]. Следовательно, возникающая в этом слое ударная волна будет распространяться от поверхности обтекаемого тела в зоне под скачком уплотнения. Распространение ударной волны и следующей за ней области разрежения приведет к тому, что в области под скачком уплотнения изменятся характеристики потока, что, в свою очередь, приведет к изменению параметров обтекающего пластину газа.

Параметры ударной волны и волны разрежения, возникающей после окончания скользящего разряда в пограничном слое, могут быть получены, если известны параметры газа под скачком уплотнения и параметры высокотемпературного пограничного слоя. Для примера рассмотрим характер протекающих процессов для случая, когда скорость газа в набегающем потоке соответствует $M = 2$ (где M – число Маха) с заданными параметрами газа под скачком уплотнения и в пограничном слое. Считая, что скользящий разряд полностью заполняет пограничный слой, а температура и плотность газа принимают значения, равные среднему значению температуры и плотности сразу после разряда, можно считать, что поверхностный слой в начальный момент времени после разряда представляет собой некоторый объем газа с постоянными значениями температуры и плотности по всему объему этого слоя. Так как при резком повышении температуры после разряда давление газа также возрастает, то из объема, заполненного разрядом, начинается движение разогретый газ, который и будет источником возникающей ударной волны. При заданных параметрах газа вне пограничного слоя и внутри

него определим характер движения ударной волны и параметры газа за фронтом ударной волны. Для оценки параметров ударной волны, отходящей от пограничного слоя, будем считать, что скользящий разряд занимает область на пластине с линейными размерами по потоку и перпендикулярно потоку (в плоскости x, z), много большими, чем толщина пограничного слоя. Набегающий поток сразу после носка пластинки поворачивает на угол α , а нормальная к поверхности составляющая скорости набегающего потока V_y равна 0. В этом случае будем считать, что ударная волна, инициируемая скользящим разрядом, на начальной стадии развития распространяется подобно волнам в ударной трубе, где рабочим газом является газ, разогретый разрядом, а исследуемым газом – газ с параметрами, соответствующими параметрам газа под скачком уплотнения. Выражение для скорости фронта ударной волны запишем в виде [4]:

$$V_2 = \sqrt{((\gamma - 1)/2)((\gamma + 1)G + 2\gamma C_v T) + ((\gamma - 1)/(\gamma + 1))\sqrt{((\gamma + 1)/2)(\gamma - 1)G}}, \quad (1)$$

где G – удельная величина энергии, вложенной в газ при прохождении скользящего разряда; C_v – теплоемкость воздуха; γ – постоянная адиабаты, $\gamma = 1.4$; T – температура газа в момент времени $t = t_0$. Считаем, что вся энергия разряда преобразовалась в тепло. В нашей постановке задачи фронт ударной волны будет двигаться в условиях противодействия встречного газа, с одной стороны, и уменьшения давления в волне разрежения, с другой стороны, определяемых наличием стенки пластины. Для определения характера изменения скорости движения фронта ударной волны воспользуемся данными работы [3], из которых следует, что скорость распространения фронта ударной волны в покоящемся газе меняется по закону, близкому к

$$V_y(t) = V_0(1 + S^{-t/\tau}), \quad (2)$$

где $\tau = 20$ мкс, $S = 4 - 6$, и стремится к значению V_0 при $t \rightarrow \infty$ (рис. 2).

Если считать газ идеальным, то есть пренебречь влиянием вязкости, то можно воспользоваться этим приближением $V_y(t)$ и в нашем случае. Область, в которой газ совершает движение рассматриваемого типа, ограничена двумя плоскостями, наружная плоскость представляет собой поверхность самой ударной волны, а внутренняя является поверхностью слабого разрыва, на которой скорость обращается в нуль из-за наличия стенки.

К фронту ударной волны примыкает область газа, движущаяся за фронтом со скоростью фронта. Далее следует волна разрежения, в которой газ движется в том же

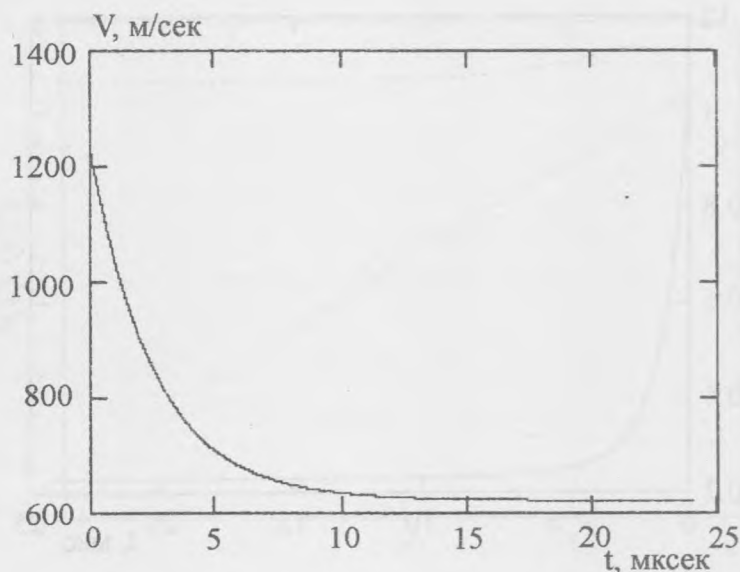


Рис. 2. График изменения скорости движения фронта ударной волны (по данным работы [3]).

направлении со скоростью, меняющейся от значения V_0 до нуля у пластины по линейному закону. Давление в этом слое газа можно представить как [5]

$$P_1 = P_0 \left(1 - ((\gamma - 1)/2)V(t)/C_0 \right)^{2\gamma/\gamma-1}. \quad (3)$$

Давление меняется от значения P_1 до значения P_0 у пластины, здесь $V(t)$ – закон изменения скорости фронта ударной волны (2) (рис. 3).

На рис. 3 представлены результаты расчетов зависимости изменения температуры и давления в пограничном слое от времени в первые 20 мкс после окончания скользящего разряда. Из полученных результатов следует, что при инициировании скользящим разрядом ударной волны в зоне пограничного слоя будет наблюдаться поток газа в направлении, перпендикулярном к стенке. При этом происходит изменение давления, плотности и температуры в пограничном слое, что приведет к возмущению структуры пограничного слоя. Из графика изменения температуры в пограничном слое следует, что в течение первых 5 мкс температура повышается (до момента, когда скорость фронта ударной волны становится равной скорости звука в газе под скачком уплотнения), а затем температура понижается до стационарного уровня T_1 . Такое изменение температуры приведет к изменению толщины пограничного слоя и коэффициента сопротивления C_F . Если считать, что температура в газе за фронтом ударной волны

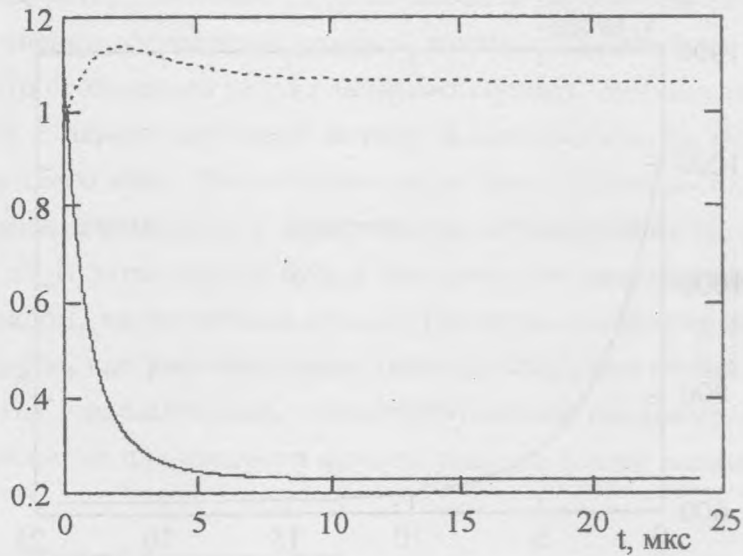


Рис. 3. Зависимость изменения давления и температуры в пограничном слое от времени. $(G(t) = P/P_0)$ (непрерывная линия), $(F(t) = T/T_0)$ (пунктирная линия).

принимает значение, равное среднему по толщине пограничного слоя, то можно оценить величину изменения коэффициента динамической вязкости и плотности газа в слое [1]:

$$\mu_1 = \mu_0(T_1/T_0)^K, \quad \rho_1 = \rho_0(T_0/T_1), \quad (4)$$

где ρ_0, T_0 – плотность и температура в пограничном слое до начала разряда; ρ_1, T_1 – те же величины к моменту времени, когда скорость фронта ударной волны $V = V_0$, а $k = 0.6 - 0.8$. Подставляя полученные соотношения в выражения для толщины пограничного слоя и коэффициента сопротивления [4], получим

$$C_F = 1.328/Re^{1/2}, \quad \delta(T_1)/\delta(T_0) = (T_1/T_0)^{(1+R)}, \quad (5)$$

где Re – число Рейнольдса. При заданной температуре можно определить коэффициент сопротивления, толщину пограничного слоя (рис. 4) и другие параметры пограничного слоя.

Для несжимаемого потока на рис. 4 приведены графики зависимости отношения $\delta(T_1)/\delta(T_0)$ и C_F/C_{F0} от T . Видно, что с увеличением температуры толщина пограничного слоя растет, а C_F уменьшается.

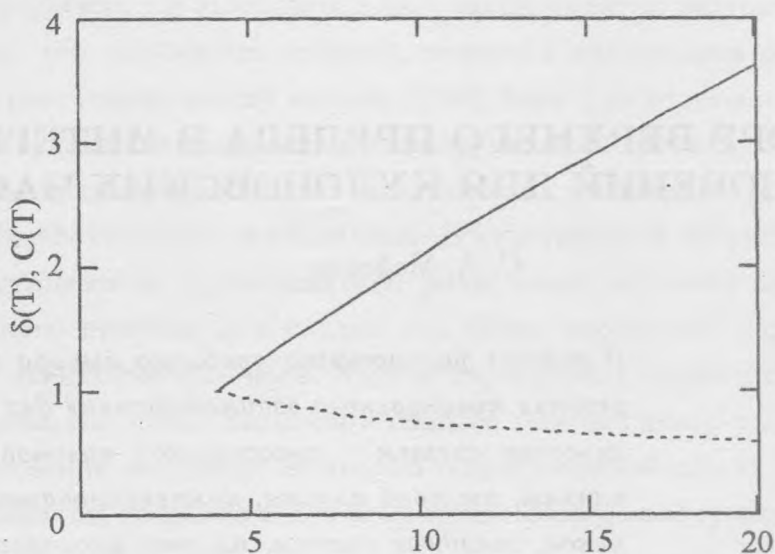


Рис. 4. График изменения ширины пограничного слоя $\delta(T)/\delta(T_0)$ (непрерывная линия) и коэффициента сопротивления $C(T)/C(T_0)$ (пунктирная линия) от температуры.

Приведенные результаты носят оценочный характер и отражают качественную картину газодинамических процессов в пограничном слое при инициировании скользящим разрядом ударной волны. Для получения количественных результатов требуются экспериментальные данные для уточнения параметров $\delta(T)$, T_1 , и коэффициентов τ , S , k .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кузьмин Г. П., Минаев И. М., Рухадзе А. А. ТВТ, **40**, N 3, 515 (2002).
- [2] Минаев И. М., Рухадзе А. А. ТВТ, **41**, N 6, 731 (2003).
- [3] Труды ИОФАН, М., Наука, **52**, 68 (1996).
- [4] Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Механика сплошных сред, М., ГИТТЛ, 1954.
- [5] Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, М., ГИТТЛ, 1963.

Институт общей физики
им. А. М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 21 января 2004 г.