

К ТЕОРИИ УДАРНЫХ ВОЛН В НЕПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ ПРИ НАЛИЧИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

И.В.Иоффе

В теории ударных волн обычно не рассматривают случай наличия внешнего электрического поля. В статье показано, что при наличии внешнего электрического поля ударная волна малой интенсивности может быть волной разряжения.

Если обозначить фигурными скобками разность значений величин по обе стороны разрыва, а через ρ , V , v , T , s , w , u , ε , E , D плотность, объем единицы массы, скорость, температуру, энтропию, тепловую функцию, внутреннюю энергию, диэлектрическую проницаемость, напряженность электрического поля и вектор индукции, то система граничных условий примет вид [1-3] (значки \parallel и \perp означают составляющие, параллельные и поперечные направлению фронта ударной волны):

$$\begin{aligned} \{\rho v_{\parallel}\} &= 0, \\ \left\{P + \rho v_{\parallel}^2 + \frac{\varepsilon(E_{\perp}^2 - E_{\parallel}^2)}{8\pi}\right\} &= 0, \\ \left\{P + \rho v_{\parallel} v_{\perp} + \frac{\varepsilon E_{\parallel} E_{\perp}}{8\pi}\right\} &= 0, \\ \left\{\rho v_{\parallel} \left[w + \frac{v^2}{2}\right] + \frac{v_{\parallel}(ED) - D_{\parallel}(vE)}{4\pi}\right\} &= 0, \\ \{D_{\parallel}\} &= 0, \\ \{E_{\perp}\} &= 0. \end{aligned} \tag{1}$$

Из этой системы получаем уравнение ударной адиабаты:

$$\begin{aligned} (u_2 - u_1) + \frac{P_2 + P_1}{2} (V_2 - V_1) + \\ + \frac{D_{\parallel}^2}{16\pi} \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(V_2 - V_1)}{\varepsilon_1 \varepsilon_2} + \frac{E_{\perp}^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)(V_2 - V_1)}{16\pi} = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Перейдем к случаю волны малой интенсивности и рассмотрим случай $E_{\perp} = 0$. Для газов [1] и полярных жидкостей [4] с хорошей точностью $\epsilon - 1 \sim \rho$; коэффициент пропорциональности зависит от величины поля. Мы пренебрежем этой зависимостью. Тогда из (2) имеем:

$$T(s_2 - s_1) = \frac{1}{12} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} \right) (P_2 - P_1)^3 + \frac{D_{\parallel}^2}{16\pi} \left| \frac{\partial \epsilon}{\partial V} \right| \left(\frac{\partial V}{\partial \rho} \right)^2 \frac{(P_2 - P_1)^2}{\epsilon_1 \epsilon_2}. \quad (3)$$

Из (3) видно, что при

$$E_{\parallel}^2 > \frac{4\pi}{3} |P_2 - P_1| \frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} \left(\frac{\partial V}{\partial \rho} \right)^{-2} \left| \frac{\partial \epsilon}{\partial V} \right|^{-1}$$

возможна ударная волна разряжения. Такая ударная волна может образоваться, например, из звуковой волны. Действительно, рассмотрение, аналогичное [2], показывает, что при

$$E_{\parallel}^2 > \frac{4\pi}{3} \rho^4 \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)^3 \left(\frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} \right)$$

скорость перемещения профиля волны уменьшается с ростом плотности, и образуется ударная волна разряжения. Используя экспериментальные значения сжимаемости [5] и скорости звука [6], находим, что последнее неравенство выполняется, например, для органических жидкостей при электрических полях около 10 кв/см, что значительно меньше полей пробоя. Наличие $E_{\perp} \neq 0$ не изменяет результата, если

$$\frac{\epsilon E_{\perp}^2}{8\pi} \ll \frac{1}{3} \frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} \left| \frac{\partial V}{\partial \rho} \right|^{-1} (P_2 - P_1)^2.$$

В обратном случае ударные волны разряжения малой интенсивности возможны, если

$$\left(\frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} \right)^2 > \frac{V^2}{|P_2 - P_1|} (\epsilon_1 + \epsilon_2) \left| \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right|^{-1} \left| \frac{\partial V}{\partial \rho} \right|^{-1}.$$

Отметим, что из (1) и (3) видно, что в ударной волне разряжения электрическое поле усиливается, а в волне сжатия - ослабляется.

Последнее проще всего понять, разобрав случай $E_{\perp} = 0$, в котором из условия непрерывности D_{\parallel} видно, что отношение E с двух сторон разрыва обратно отношению $\varepsilon(\rho)$. С уменьшением (увеличением) ρ в волне разряжения (сжатия) ε также уменьшается (увеличивается), что приводит к увеличению (уменьшению) электрического поля.

Автор благодарен А.И.Саету за обсуждение результата.

Физико-технический
институт им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
25 июля 1966 г.

Литература

- [1] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. Физматгиз, М., 1959.
- [2] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Механика сплошных сред, Физматгиз, М., 1956.
- [3] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория поля. Физматгиз, М., 1965.
- [4] А.И.Ансельм. ЖЭТФ, 14, 364, 1944.
- [5] П.Бриджмен. Физика высоких давлений. ОНТИ, М., 1935.
- [6] Л.Бергман. Ультразвук. Изд. Иностран. лит. М., 1957.