

И. И. НОВИКОВ

О СУЩЕСТВОВАНИИ УДАРНЫХ ВОЛН РАЗРЕЖЕНИЯ

(Представлено академиком Л. Д. Ландау 20 I 1948)

Невозможность ударных волн разрежения обусловливается, как известно, тем обстоятельством, что адиабатическая сжимаемость вещества $-(\partial V / \partial p)_s$ является в большинстве случаев убывающей функцией давления, вследствие чего производная $(\partial^2 V / \partial p^2)_s$ обычно имеет положительное значение. А так как приращение энтропии в слабой ударной волне равно, согласно Жуге:

$$S_2 - S_1 = \frac{1}{12 T_1} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial p_1^2} \right)_s (p_2 - p_1)^3, \quad (1)$$

то ясно, что при $(\partial^2 V / \partial p^2)_s > 0$ ударные волны разрежения термодинамически невозможны. С другой стороны, если в какой-либо области состояний производная $(\partial^2 V / \partial p^2)_s$ имела бы отрицательный знак, что принципиально вполне допустимо, то в этой области могли бы реально существовать ударные волны разрежения.

Возможность образования ударных волн разрежения в ван-дер-ваальсовом газе (т. е. газе, строго удовлетворяющем уравнению ван-дер-Ваальса) была исследована Я. Б. Зельдовичем (1), который установил, что у веществ с большой молекулярной теплоемкостью при $V = \text{const}$ ($c_v \gg 40$ кал/град·моль) имеется область однофазных состояний, в которой $(\partial^2 V / \partial p^2)_s < 0$ и где, следовательно, могут иметь место волны разрежения. В настоящей статье мы проанализируем еще одну реальную возможность образования ударных волн разрежения, относящуюся к области двухфазных состояний вещества, а именно — к течению влажного пара.

При теплоизолированном обратимом (т. е. равновесном и лишенном вязкости) течении влажного пара состояние пара изменяется по адиабате, дифференциальное уравнение которой имеет вид

$$dp / dV = -kp / V, \quad (2)$$

где k есть показатель адиабаты влажного пара, являющийся в общем случае функцией давления p , а V — удельный объем влажного пара, $V = xv + (1-x)v'$ (здесь v есть удельный объем насыщенного пара, v' — удельный объем жидкой фазы, x — степень сухости пара).

Продифференцировав уравнение (2) по p при $S = \text{const}$, получим

$$\left(\frac{\partial^2 V}{\partial p^2} \right)_s = \frac{V}{k^2 p} \left[\frac{k+1}{p} + \left(\frac{\partial k}{\partial p} \right)_s \right]. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что $(\partial^2 V / \partial p^2)_s$ будет иметь отрицательное значение в том случае, если

$$\left(\frac{\partial k}{\partial p} \right)_s < -(k+1) / p, \quad (4)$$

т. е. в области состояний, где показатель адиабаты влажного пара является убывающей функцией давления p .

Проведенное нами исследование зависимости k от давления при адиабатическом изменении состояния пара показало, что с ростом давления показатель адиабаты влажного пара сначала возрастает, достигает при некотором значении p максимума и затем убывает. Представление об этой зависимости дает рис. 1, относящийся к адиабатическому расширению насыщенного водяного пара начального давления $p_0 = 200$ атм. Значения показателя адиабаты k при различных значениях p были рассчитаны по экспериментальным данным об удельных объемах v и v' и энтропиях s , s' насыщенного пара и воды, приводимым в таблицах водяного пара ⁽²⁾, с помощью уравнений для двух близких состояний 1 и 2*:

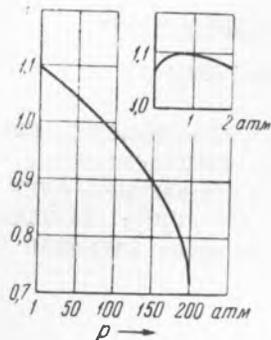


Рис. 1

$$k = \frac{\log p_1 - \log p_2}{\log V_2 - \log V_1} \quad (5)$$

$$x_1 s_1 + (1 - x_1) s_1' = x_2 s_2 + (1 - x_2) s_2' = S_0 \quad (6)$$

На рис. 1 видно, что при больших давлениях показатель адиабаты влажного водяного пара убывает тем быстрее, чем больше p . Поэтому можно ожидать, что вблизи критической точки, где $(\partial k / \partial p)_s$ имеет по абсолютной величине наибольшее значение, а $(k+1)/p$, наоборот, будет выполняться условие (4), т. е. $(\partial^2 V / \partial p^2)_s$ будет отрицательно. Действительно, непосредственное вычисление по табличным данным показывает, что для водяного пара в области давлений от $p_{кр} = 225,5$ атм. до $p = 215 \div 210$ атм. $(\partial k / \partial p)_s < -(k+1)/p$ и $(\partial^2 V / \partial p^2)_s < 0$. В этой области, следовательно, могут реально существовать ударные волны разрежения.

Таким образом, в потоке водяного пара при давлениях, близких к критическому давлению, термодинамически возможно образование ударных волн разрежения. Аналогичный вывод будет иметь силу, по видимому, и для некоторых других веществ.

Военно-морская академия
кораблестроения и вооружения
им. А. Н. Крылова

Поступило
12 XII 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Я. Б. Зельдович, ЖЭТФ, № 4, 363 (1946). ² М. П. Вукалович, Термодинамические свойства водяного пара, Таблицы и диаграммы, М.—Л., 1946.

* Состояния 1 и 2 выбирались настолько близко друг к другу, насколько это допускалось точностью таблиц. Обычно они соответствовали разнице температур не более $1 - 2^\circ$.