

ЭВОЛЮЦИЯ ВОЛН РАЗРЕЖЕНИЯ ВБЛИЗИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ

*А.А.Борисов, А.А.Борисов, С.С.Кутателадзе,
В.Е.Накоряков*

Экспериментально впервые доказано существование ударной волны разрежения в веществе, невозмущенное состояние которого находится вблизи термодинамической критической точки. Приведено уравнение, описывающее эволюцию длинноволновых возмущений вблизи КТ.

В [1] теоретически показана возможность образования ударных волн разрежения вблизи критической точки (КТ). Прямые измерения скорости звука в окрестности КТ [2], показывающие аномальное увеличение ее с понижением давления, также позволяют предположить возможность существования ударной волны разрежения (ВР). К настоящему време-

ни в литературе отсутствуют данные об экспериментальном подтверждении существования ударной ВР. Для изучения эволюции волн сжатия и разрежения была построена экспериментальная установка, оригинальной частью которой является тщательно термостатируемая ударная труба, общей длиной 3 м. Конструкция установки давала возможность получать невозмущенное состояние вещества в УТ с параметрами, находящимися в произвольной точке $P-T$ -плоскости, в том числе и критической. Наблюдение за состоянием вещества в окрестности КТ и перемещением межфазной границы осуществлялось визуально с помощью катетометра КМ-6, через оптические окна в УТ. Погрешность измерения границы раздела фаз составляла 0,01 мм. Статическое давление измерялось поршневым манометром класса 0,05% в комплексе с мембранным нуль-индикатором. Градиент температуры по длине УТ и абсолютная температура измерялись термометрами сопротивления ПТС-10, изготовленными во ВНИИФТРИ. Погрешность измерения абсолютной температуры — 0,01 К, величина $\Delta T/L = 3 \cdot 10^{-5}$ К/м, т.е. рабочий участок УТ был достаточно изотермичен. Погрешность в определении массы вещества, заполняющего УТ составляла менее 0,093%. Динамические характеристики, измеренные с помощью пьезодатчиков, имели погрешности в определении скоростей волн менее 1%, амплитуд давления менее 12%. Критические параметры определялись по методике [3].

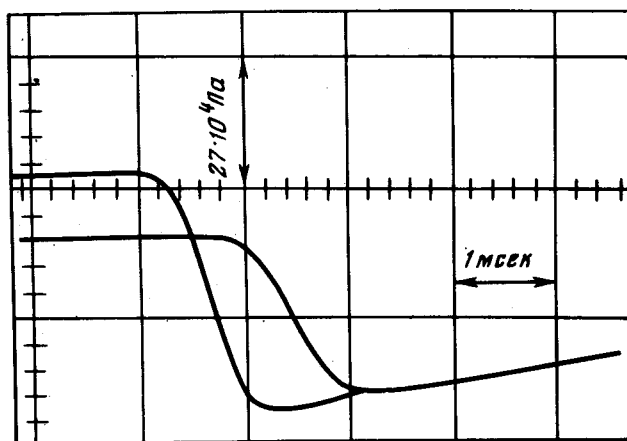


Рис.1. Эволюция ударной волны разрежения во фреоне-13 вблизи КТ. Верхний луч на осциллограмме соответствует датчику, расположенному от диафрагмы на расстоянии 0,45 м, а нижний — 2,35 м

Одним из важных результатов является получение критического состояния трифторхлорметана (фреон-13) на длине 3 м. Критические параметры Ф-13 составляют $P_K = 38,12 \cdot 10^5$ Па, $T_K = 302,02$ К, $\rho_K = 0,580$ г/см³. Наблюдавшиеся ранее [4] закономерности поведения небольших количеств вещества в критической области выполняются также и на данной установке для Ф-13, где масса вещества, выводимого в критическое состояние, составляет 4,311 кг. Время достижения критического состояния 20 час.

Скорость и структура волн разрежения регистрировалась пьезоэлектрическими датчиками давления с независимой амплитудно-частотной характеристикой свыше 50 кГц. Некоторые результаты экспериментов

приведены на осциллограмме (1). Начальное состояние перед волной разрежения имеет параметры $P_0 = 38,12 \cdot 10^5$ Па; $T_0 = 302,02$ К; $\rho_0 = 0,576$ г/см³.

На рис.1 видно, что волна разрежения распространяется в виде поверхности внезапного весьма резкого изменения давления с последующей полочкой на вершине.

Таким образом, в смысле определения ударной волны разрежения данного в работе [1], как поверхности внезапного весьма резкого изменения состояния вещества, распространяющегося относительно этого вещества, наш эксперимент наглядно демонстрирует, что наблюдаемое образование является ударной волной разрежения. Другим важным признаком ударных волн является свойство, по крайней мере, не уменьшать крутизну своего фронта в процессе эволюции.

Действительно, в ходе экспериментов было установлено, что ударная волна разрежения пройдя несколько десятков единиц, измеренных в длинах своего переднего фронта, практически не изменила крутизну переднего фронта, т.е. сохранила ее постоянной на протяжении всей УТ.

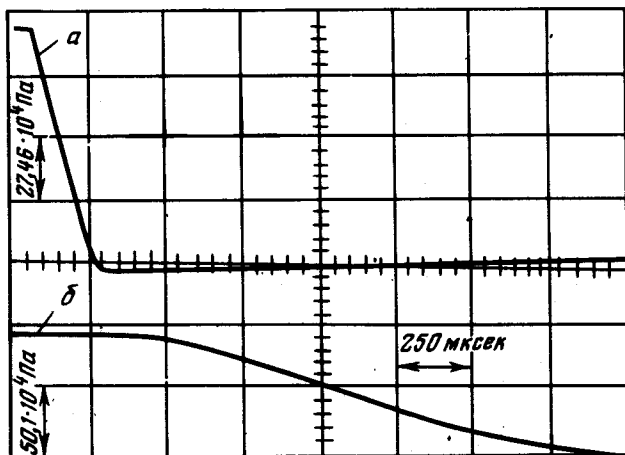


Рис.2. Эволюция волны разрежения в азоте: а — на расстоянии от диафрагмы 0,45 м, б — 2,35 м

Для подтверждения существования ударной волны разрежения только в области критических параметров были проведены экспериментальные исследования эволюции волн разрежения в азоте. Начальные параметры перед волной выбирались такими же как и для фреона-13, но, естественно не являлись критическими для азота. Как и следовало ожидать, ни в одном из экспериментов с азотом не образовалось ударной волны разрежения. В процессе эволюции волны разрежения здесь размывались так, что крутизна фронта на идентичных расстояниях уменьшалась в пять и более раз (рис.2). Эксперименты, проведенные в разное время, дали хорошую повторяемость всех результатов, приведенных на осциллограммах.

Таким образом, экспериментально доказано существование ударной волны разрежения. Скорость ударной волны разрежения, приведенной на рис.1, составляла 58,5 м/сек. Для случая длинноволновых возмущений, когда радиус корреляции много меньше длины волны, можно пре-

небрежь релаксационными процессами. Тогда следуя методу Хохлова [5] для любой из возмущенных величин: $P' = P - P_0$, $\rho' = \rho - \rho_0$, $v' = v - v_0$ в системе координат x, t , можно получить уравнение Бюргерса:

$$P'_t + c_0 P'_x + \frac{1}{2\rho_0^3 c_0^2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2} \right)_S \frac{1}{\rho_0 c_0} P' P'_x = \left[\frac{4}{3} \eta + \xi + \kappa \left(\frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_P} \right) \right] P'_{xx} / 2\rho_0. \quad (1)$$

P_0, ρ_0, v_0 - давление, плотность и скорость частиц среды в невозмущенном состоянии, c_0 - скорость звука, V - удельный объем. Для реаль-

ных газов $\alpha = \frac{1}{2\rho_0^3 c_0^2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2} \right)_S$ вблизи КТ имеет аномальный вид:

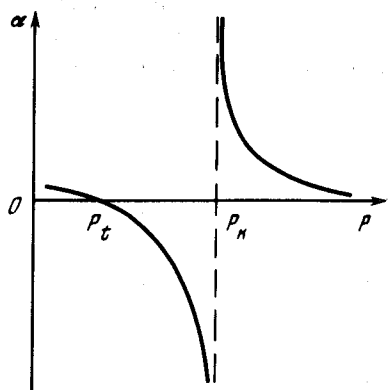


Рис.3 Поведение коэффициента α в зависимости от давления вблизи критической точки

меняет знак и становится отрицательным (рис.3). В этом случае уравнение (1) дает решение в виде ударных волн разрежения. Из рис.3 видно, что в зависимости от неравенств между P_0, P_K, P_1, P_t возможна многоволновая структура волны разрежения. Коэффициент перед второй производной имеет аномально высокое значение вблизи КТ. Это обстоятельство приводит к значительному уширению фронта УВ по сравнению с идеальным газом.

Институт теплофизики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
27 февраля 1980 г.

Литература

- [1] Я.Б.Зельдович. ЖЭТФ, 16, 363, 1946.
- [2] W.Schneider. Canad. J.Chem., 29, 243, 1951.
- [3] В.Г.Мартынец, Э.В.Матизен. ЖЭТФ, 67, 607, 1974.
- [4] Ed. M.S.Green. Critical Phenomena. Proc. of Intern.School of Physics " Enrico Fermi", Course 51, Acad. Press, N.-Y., London, 1971.
- [5] Р.В.Хохлов. Радиотехника и электроника, 6, 917, 1961.