

А. А. Пашкевичу, а также А. И. Матыцину, Н. А. Костюкову и В. Ф. Нестеренко за помощь в проведении крупномасштабных экспериментов.

*Институт гидродинамики
СО АН СССР,
Новосибирск*

*Поступила в редакцию
13/1 1977*

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Н. Рябинин. ЖТФ, 1956, 26, 266.
2. P. S. De Karli, I. G. Jamison. Science, 1961, 133, 3467, 1821.
3. Патент США, № 3.238.019, Кл. 23—209.1.
4. Патент США, № 3.401.019, Кл. 23—209.1.
5. Патент Франции, № 2.014.426, Кл. C01—3100.
6. L. F. Trueb. JAP, 1968, 39, 10, 47.
7. L. F. Trueb. JAP, 1971, 42, 2, 503.
8. Г. А. Ададунов, О. Н. Бреусов и др. Тез. докл. II Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., ВНИИФТРИ, 1976, с. 28.
9. A. Deribas, A. Staver a. o. Behaviour of dense media under high dynamic pressures. Paris. 1968.
10. А. Н. Дремин, И. А. Карпунин. ПМТФ, 1960, 3.
11. E. K. Kinslow. High — Velocity Impact Phenomena. New York — London, 1970.
12. A. M. Staver. 5-th International Conference on High Energy Rate Fabrication. USA, Denver. Colorado, 24—26 June 1975.
13. Г. В. Беляков. Докл. АН СССР, 1974, 218, 6, 1280.
14. А. А. Дерибас, А. М. Ставер. ФГВ, 1974, 10, 4, 568.
15. Е. Я. Куцовский, А. М. Ставер. ФГВ, 1974, 10, 3, 509.
16. F. P. Vandy. JCP, 1963, 38, 3, 631.
17. В. Н. Бакуль, В. Д. Андреев и др. Вестник АН УССР, 1976, 8.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСНОЙ ЗОНЫ ЗА ФРОНТОМ ИОНИЗУЮЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Р. И. Солоухин, Ю. А. Якоби, В. И. Яковлев

Интерпретация экспериментальных данных, полученных на ударных трубах, существенно облегчается тем, что равновесное состояние газа за фронтом ударной волны можно рассчитать по законам сохранения потоков массы, импульса и энергии, исходя лишь из скорости ударной волны. Это обстоятельство может быть использовано для определения термодинамических свойств газов. Необходимо, однако, знать эволюцию равновесного состояния вследствие неидеальности течения, связанного с радиационным охлаждением нагретого газа и развитием пограничного слоя на стенках ударной трубы [1]. Наиболее чувствительным индикатором состояния ионизованного газа при высоких температурах является плотность электронов.

В настоящей работе кратко излагаются некоторые результаты исследования равновесной зоны за фронтом ударных волн в атомарных газах с помощью интерферометрии в инфракрасной области спектра. Известно [2], что использование длинноволновых источников существенно повышает чувствительность оптических методов к электронной концентрации.

Эксперименты проводились с инертными газами — ксеноном и аргоном, нагретыми в ударных волнах с числами Маха $M=9\div 12,5$ при начальных давлениях 3—5 мм рт. ст. Для получения ударных волн использовалась ударная труба с внутренним диаметром 76 мм при длине секции низкого давления 3,6 м. Ударная труба выполнена по двухдиафрагменной схеме с подогревом гелия в камере высокого давления и ар-

Т а б л и ц а 1

Номер п/п	ε_1	ε_2	Работа
1	0	1,0	[5]
2	3,0	0	[6]
3	2,9	0,8	[7]
4	5,2	0,8	[8]
5	1,73	1,0	[9]
6	0	1,4	[10]

гоном в качестве буферного газа. Для получения меньших скоростей использовался однодиафрагменный режим работы. Скорость ударных волн измерялась с помощью ионизационных датчиков, расположенных симметрично по обе стороны от измерительного сечения. Временной интервал измерялся частотомером с метками времени 10 нс. Случайная погрешность измерения скорости составляла 0,5÷0,8%.

Для исследования влияния эффектов неидеальности течения за фронтом ударной волны были проведены измерения распределения как электронной плотности, так и плотности атомов. Для этого использовалась двухдлинноволновая интерферометрия [3] с гелий-неоновым лазером на длинах волн $\lambda_1=1,15$ мкм и $\lambda_2=3,39$ мкм. Сравнивались измеренные значения степени ионизации $\alpha = N_e/N_e + N_a$ с расчетными по формуле (обозначения общепринятые) [4]:

$$\frac{N_i}{N_e} \cdot \alpha = \frac{1}{8} \left\{ 5 \div \frac{3}{M^2} - \left[9 \left(1 - \frac{1}{M^2} \right)^2 + \frac{96 \cdot \alpha}{5M^2} \cdot \frac{\theta_i}{T_1} \right]^{1/2} \right\}, \quad (1)$$

являющейся следствием законов сохранения, с привлечением только измерений электронной плотности N_e . Было установлено, что в начале равновесной зоны оба значения в пределах точности измерений совпадают. В дальнейшем измеренные значения становятся меньше расчетных, достигая отклонения до 20% вблизи контактной поверхности. Таким образом, эксперименты показали относительно слабое влияние эффектов неидеальности течения на равновесную зону. Электронная плотность за фронтом ударных волн измерялась также с помощью интерферометрии с CO₂-лазером ($\lambda=10,6$ мкм). В этих экспериментах использовался аргон повышенной чистоты. Случайная ошибка измерения максимальных значений плотности электронов составляла 1÷2%.

При расчете электронной плотности в равновесной области за фронтом ударной волны необходимо учитывать снижение потенциала ионизации в плазме по сравнению с изолированным атомом. Поскольку по этому вопросу отсутствует единая точка зрения, представляет интерес сопоставить измеренные значения плотности электронов с рассчитанными по различным существующим теориям [5—10]. Выражение для снижения потенциала ионизации может быть представлено в виде [11]:

$$\Delta\chi = \varepsilon_1 \cdot e^2/\gamma_0 + \varepsilon_2 \cdot e^2/r_D,$$

где $\Delta\chi$ — снижение потенциала ионизации; r_0 — расстояние до ближайшего атома, равное $(3/4\pi N)^{1/3}$; N — плотность частиц; r_D — дебаевский радиус; ε_1 и ε_2 —

Т а б л и ц а 2

$N_e \cdot 10^{-16}$, см ⁻³ (эксперимент)	β_1	$\beta_2 = \beta_3$	β_4	β_5	β_6
2,03	0,85	0,74	0,66	0,78	0,84
1,94	1,19	0,96	0,85	1,02	1,11
2,00	1,33	1,13	1,00	1,20	1,33
1,34	0,88	0,75	0,66	0,80	0,88
1,16	0,83	0,70	0,62	0,75	0,82
1,30	0,97	0,81	0,71	0,87	0,96
2,08	0,91	0,80	0,71	0,84	0,91
0,96	0,93	0,77	0,67	0,82	0,92
1,98	0,92	0,81	0,72	0,85	0,92
1,49	1,31	1,10	0,96	1,18	1,30
2,37	1,13	0,98	0,87	1,03	1,12
2,38	0,95	0,84	0,75	0,88	0,95
2,18	1,06	0,92	0,82	0,98	1,06
2,13	0,95	0,83	0,74	0,87	0,94
1,80	1,03	0,89	0,78	0,94	1,03
2,32	1,08	0,98	0,90	1,01	1,07
2,44	1,09	0,99	0,91	1,03	1,09
2,27	1,00	0,91	0,83	0,94	1,00
2,52	1,09	0,99	0,90	1,03	1,08
2,57	1,02	0,93	0,86	0,96	1,01
1,70	0,92	0,83	0,76	0,87	0,92
1,88	0,90	0,82	0,75	0,85	0,90
2,79	1,00	0,92	0,85	0,95	0,99
2,22	1,08	0,98	0,90	1,01	1,07
$\bar{\beta}_i$	1,02	0,89	0,80	0,94	1,01

коэффициенты, специфичные для данной теории. Их значения приведены в табл. 1. Результаты сравнения приведены в табл. 2 в относительных величинах β_i , равных отношению измеренной плотности электронов к расчетной, определенной по соответствующей модели для снижения потенциала ионизации (индекс у β соответствует номеру табл. 1).

Удобство такого представления состоит в том, что могут сравниваться эксперименты, выполненные при различных начальных условиях нагреваемого газа. Как показывают результаты табл. 2, наиболее близкое совпадение получается при $\epsilon_1=0$, что соответствует теориям Дебая — Хюккеля и Эккера — Кроля [5, 10]. Таким образом оказывается, что предположение, связанное с формальным ограничением размера электронных орбит соседними частицами некорректно. Это имеет важное принципиальное значение для термодинамики плазмы.

*Институт теоретической и прикладной механики
СО АН СССР,
Новосибирск*

*Поступила в редакцию
13/1 1977*

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Лосев, А. И. Осипов, Е. В. Ступоченко. Релаксационные процессы в ударных волнах. М., «Наука», 1965.
2. Р. И. Солоухин, Ю. А. Якоби, В. И. Яковлев.— В сб.: Газодинамика и физическая кинетика. ИТПМ, Новосибирск, 1974, с. 158.
3. Р. И. Солоухин, Ю. А. Якоби, В. И. Яковлев. Всесоюзный симпозиум по методам аэрофизических исследований. Тез. докл. Новосибирск, 1976, с. 186.
4. M. I. Hoffert, H. Lien. Phys. Fl., 1967, 10, 8.
5. H. R. Griem. Phys. Rev., 1962, 128, 3.
6. A. Unsöld. Zs. Astrophys., 1948, 24, 355.
7. G. Ecker, W. Weizel. Ann. Phys., 1956, 17, 126.
8. J. Brunner. Zs. Phys., 1960, 159, 288.
9. G. Ecker, W. Kröll. Phys. Fl., 1963, 6, 1.
10. G. Ecker, W. Kröll. Zs. Naturforsch., 1966, 21a, 2023.
11. Методы исследования плазмы. Под ред. В. Лохте-Хольтгрена. М., «Мир», 1971.