

УДК 533.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ УДАРНО-СЖАТОГО АРГОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

Е. Н. Богданов, М. В. Жерноклетов, Г. А. Козлов, А. В. Родионов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

Методом микроволновой диагностики с использованием радиоинтерферометров с длинами волн 3.2 и 2.1 мм исследованы кинематические и электрофизические характеристики плазмы ударно-сжатого аргона, изначально находившегося при атмосферном давлении. Исследование проведено в диапазонах давления $12 \div 56$ МПа, скорости ударных волн $3.1 \div 6.2$ км/с, температуры $9\,000 \div 19\,000$ К, плотности $0.006 \div 0.012$ г/см³ при степенях кулоновской неидеальности от 10^{-4} до 0.2. Полученные данные об ударно-волновой сжимаемости аргона согласуются с известными результатами измерений и расчетов по модифицированной модели Ван-дер-Ваальса и модели химической плазмы. Получен массив значений коэффициента отражения электромагнитного излучения от фронта ударной волны на длинах волн 3.2 и 2.1 мм, на основании которого оценены проводимость и концентрация электронов за фронтом ударной волны. Экспериментальные данные согласуются с результатами расчетов в диапазоне волновых скоростей $3.1 \div 3.6$ км/с. Обнаружено, что при дальнейшем увеличении скорости коэффициент отражения остается постоянным.

Ключевые слова: аргон, неидеальная плазма, микроволновая диагностика.

DOI 10.15372/FGV20200412

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов исследования свойств плазмы, генерируемой при воздействии на вещество мощных ударных волн, является метод микроволновой (радиоинтерферометрической) диагностики [1]. В основе методов лежит отражение зондирующего микроволнового излучения от фронта ударных волн в газах, что обусловлено ионизацией и высокой проводимостью сжатого и разогретого вещества за фронтом.

В работе [2] исследовалось влияние проводимости ударно-сжатого газа на регистрацию скорости движения лайнера доплеровскими методами невозмущающей диагностики. Полученные с помощью микроволнового интерферометра оценки проводимости воздуха и гелия за фронтом ударных волн (УВ) указывают на существование пороговых значений скорости лайнера, при превышении которых радиоизлучение отражается от фронта УВ в газе. Таким образом, радиоинтерферометр регистрирует перемещение фронта УВ в газе, а не поверхности лайнера. Проведенные в [2] исследования продемонстрировали возможность по-

лучения информации о кинематических и электрофизических параметрах ударно-сжатой газовой плазмы.

Цель настоящей работы заключалась в определении параметров ударно-волновой сжимаемости газообразного аргона и коэффициентов отражения излучения миллиметрового диапазона длин волн от фронта ударной волны в аргоне. Выбор аргона обусловлен наличием экспериментальной и расчетной информации о его ударно-волновой сжимаемости и проводимости за фронтом ударной волны. В проведенном исследовании аргон изначально находился при атмосферном давлении и температуре $T_0 = 273$ К.

МЕТОД МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

Микроволновая диагностика [1] относится к методам невозмущающей диагностики быстротекающих процессов в сплошных средах и служит для определения перемещений и скоростей физических объектов, способных отражать радиоволны миллиметрового диапазона. Для реализации данного метода используется радиоинтерферометр, обобщенная структурная схема которого представлена на рис. 1.

Радиоинтерферометр работает следующим образом. Создаваемые генератором непре-

рывные электромагнитные колебания постоянной мощности на фиксированной частоте через элементы волноводного тракта и развязывающее устройство поступают на антенну и облучают исследуемый объект. При появлении на пути радиоизлучения препятствия со скачком диэлектрической проницаемости (например, фронта УВ) происходит отражение радиоволн. Часть энергии отраженного от препятствия излучения возвращается на антенну, и в приемном устройстве осуществляется преобразование (интерференция) принятого сигнала и формирование интерферограммы на разностной частоте.

Связь перемещения и мгновенной скорости фронта УВ с мгновенной частотой интерферограммы определяется эффектом Доплера. В случае нормального падения плоской монохроматической электромагнитной волны для поступательно движущейся отражающей поверхности эта связь может быть получена из уравнения для текущей фазы плоской отраженной волны $\varphi(t)$:

$$\varphi(t) = \omega_0 t - kx, \quad (1)$$

где ω_0 — круговая частота падающей волны, t — текущее время, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число падающей волны, λ — длина волны в свободном пространстве, $x = x_0 + 2Vt$ — расстояние от антенны интерферометра до отражающей поверхности в момент времени t , x_0 — начальное расстояние от антенны интерферометра до отражающей поверхности, V — модуль скорости движения объекта. Из уравнения (1) следует, что приращение фазы $\Delta\varphi$ за время Δt равно

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - 4\pi\nu\Delta t/\lambda, \quad (2)$$

где $\varphi_0 = \omega_0\Delta t$ — приращение фазы опорного сигнала. Таким образом, средняя скорость в интервале времени Δt составляет

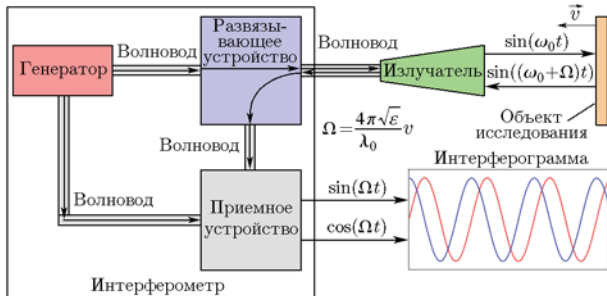


Рис. 1. Обобщенная схема интерферометра

$$v = -(\Delta\varphi/\Delta t - \omega_0)\lambda/4\pi, \quad (3)$$

где $\Delta\varphi/\Delta t = \omega(t)$ — мгновенная частота принимаемого сигнала, а разность частот $\{\omega(t) - \omega_0\} = \Omega(t)$ — доплеровский сдвиг частоты принимаемого интерферометром сигнала относительно частоты излучаемого им сигнала.

Помимо фазы интерферограммы, имеется возможность использовать и ее амплитудные характеристики для определения коэффициента отражения Γ от фронта УВ по значению отношения амплитуды A сигнала, отраженного от фронта УВ, к амплитуде A_0 сигнала, отраженного от эталонного отражателя. В миллиметровом диапазоне длин волн эталонным отражателем является поверхность металла с коэффициентом отражения электромагнитной волны по модулю $|\Gamma| = 1$. Следовательно, модуль коэффициента отражения радиоизлучения от фронта УВ можно определить как

$$|\Gamma| = A/A_0. \quad (4)$$

В свою очередь, коэффициент отражения радиоизлучения от границы раздела двух сред связан с диэлектрической характеристикой этих сред соотношением

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_1 = 1$ — коэффициент диэлектрической проницаемости невозмущенного газа перед фронтом УВ, ε_2 — комплексный коэффициент диэлектрической проницаемости ударно-сжатого ионизованного газа за фронтом УВ:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon - \frac{4\pi\sigma}{\omega_0} i, \quad (6)$$

$\omega_0 = 2\pi f_0$ — круговая частота, f_0 — частота зондирующего излучения, σ — удельная проводимость ударно-сжатого ионизованного газа.

Для оценки диэлектрической проницаемости и удельной проводимости σ ионизованного газа воспользуемся выражениями из [3]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{N_e e^2}{m_e \varepsilon_0 (\omega_0^2 + \nu^2)}, \quad \sigma = \frac{N_e e^2 \nu}{m_e (\omega_0^2 + \nu^2)}, \quad (7)$$

здесь ν — частота соударений электрона с тяжелыми частицами, $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31}$ кг — масса электрона, $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона, N_e — концентрация электронов проводимости.

Частота соударений электронов с тяжелыми частицами складывается из частоты соударений с нейтралами и ионами: $\nu = \nu_n + \nu_i$. Поскольку $\nu_n \gg \nu_i$, то основной вклад в диэлектрическую проницаемость дают соударения с нейтральными атомами (молекулами) [3]:

$$\nu_n = 1.22 \cdot 10^{27} a^2 \frac{N_m}{N_L} \sqrt{\frac{T}{T_0}}, \quad (8)$$

где a — радиус молекулы газа, для аргона $a = 0.37 \cdot 10^{-7}$ см [4]; N_m — концентрация атомов, см^{-3} ; $N_L = 2.7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ — число Лошмидта; T — температура ударно-сжатого газа.

Концентрацию нейтральных атомов N_m можно определить из закона сохранения массы при ударном сжатии:

$$\frac{N_m}{N_L} = \frac{D}{D - U} = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (9)$$

где D — скорость УВ, U — массовая скорость вещества за фронтом УВ, ρ_0 — начальная плотность газа.

Следовательно, для определения концентрации электронов N_e и проводимости σ газа за фронтом УВ необходимо решить систему уравнений (5)–(9), в которой экспериментально определяемыми параметрами являются волновая D и массовая U скорости и коэффициент отражения излучения Γ от фронта УВ в газе. Плотность ρ и давление p ударного сжатия определяются соответственно из закона сохранения массы (9) и закона сохранения импульса:

$$p = \rho_0 D U + p_0. \quad (10)$$

Поскольку температура ударного сжатия T в экспериментах не определялась, ее значение оценивалось с использованием уравнений состояния аргона, например, из [5, 6].

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыты по ударному сжатию аргона выполнены на взрывных метательных устройствах плоской геометрии, аналогичных примененным в работах [7, 8]. На рис. 2 представлена общая схема проведения экспериментов.

Разгон металлических лайнеров (ударников) в этих устройствах осуществлялся продуктами детонации цилиндрических зарядов взрывчатых веществ. При столкновении лайнера с экраном газовой кюветы образуется ионизирующая УВ в исследуемом газе — аргоне.

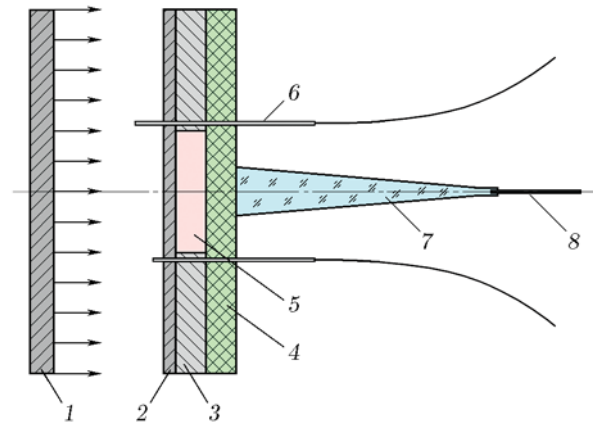


Рис. 2. Схема проведения экспериментов: 1 — лайнер, 2 — экран, 3 — корпус, 4 — крышка, 5 — газ, 6 — электроконтактный датчик, 7 — излучатель, 8 — диэлектрический волновод

Изменение характеристик ударно-сжатой плазмы осуществлялось путем применения активных зарядов взрывчатого вещества различных геометрических размеров, а также за счет варьирования толщины и материалов лайнеров.

Для диагностики ионизирующих УВ использовались микроволновые интерферометры с длинами волн зондирующего излучения 3.2 и 2.1 мм. Измерение скоростей лайнеров осуществлялось электроконтактным методом [7]. При обработке экспериментальных результатов использовался метод отражения ударных адиабат, поэтому массовая скорость газа за фронтом УВ принималась равной скорости свободной поверхности экрана (скорости лайнера перед соударением). По проведенным оценкам при разгрузке алюминиевого экрана в аргон имеющееся отклонение от правила удвоения $W = 2U$ заметно меньше экспериментальной ошибки определения параметров ударного сжатия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведено десять экспериментов, в каждом из которых применялся радиоинтерферометр с длиной волны зондирующего излучения $\lambda_1 = 3.2$ мм, а в четырех из них использовался радиоинтерферометр с длиной волны $\lambda_2 = 2.1$ мм.

Интерферограмма исследуемого процесса представляет собой запись двух квадратурных сигналов $C(t)$ и $S(t)$ (рис. 3,а). На рис. 3,б показана амплитудная характеристика интерферо-

Результаты экспериментов по исследованию плазмы аргона

Параметр	Номер эксперимента								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U , км/с	2.32 ± 0.05	2.50 ± 0.12	2.71 ± 0.06	2.84 ± 0.08	2.93 ± 0.07	3.50 ± 0.10	4.6 ± 0.15	4.85 ± 0.15	5.40 ± 0.05
p , МПа	13	15	17	19	20	28	45	50	60
ρ , 10^3 г/см ³	7.0	6.9	7.5	7.5	7.6	8.0	11.4	11.7	13.4
T , 10^3 К	9.0	10.3	11.2	12.0	12.4	14.7	17.0	17.7	18.9
γ	$1 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$7.8 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-1}$	1.5	2.2
$\lambda_0 = 3.2$ мм									
D , км/с	3.11 ± 0.07	3.37 ± 0.07	3.56 ± 0.02	3.73 ± 0.08	3.83 ± 0.18	4.51 ± 0.22	5.45 ± 0.30	5.72 ± 0.30	6.23 ± 0.05
$ \Gamma $	0.67 ± 0.05	0.78 ± 0.06	0.84 ± 0.07	0.85 ± 0.07	0.86 ± 0.08	0.86 ± 0.06	0.87 ± 0.07	0.86 ± 0.09	0.85 ± 0.09
σ , (Ом·см) ⁻¹	0.7 ± 0.3	1.7 ± 0.6	3.6 ± 1.7	4.1 ± 2.1	4.7 ± 2.8	5.0 ± 2.1	5.4 ± 2.8	5.0 ± 2.1	4.1 ± 2.8
N_e , 10^{17} см ⁻³	1.1 ± 3.0	2.4 ± 0.9	5.3 ± 1.1	5.8 ± 1.5	6.7 ± 2.6	7.5 ± 2.0	8.2 ± 3.0	7.5 ± 2.0	5.8 ± 1.5
$\lambda_0 = 2.1$ мм									
D , км/с	3.11 ± 0.06	3.39 ± 0.07	3.54 ± 0.04	—	3.80 ± 0.15	—	—	—	—
$ \Gamma $	0.60 ± 0.05	0.80 ± 0.05	0.83 ± 0.06	—	0.85 ± 0.06	—	—	—	—
σ , (Ом·см) ⁻¹	0.4 ± 0.3	2.3 ± 1.5	3.1 ± 2.2	—	4.1 ± 2.1	—	—	—	—
N_e , 10^{17} см ⁻³	4.96 ± 3.01	3.0 ± 0.91	4.2 ± 1.14	—	5.7 ± 1.5	—	—	—	—

граммы $I(t) = \sqrt{C^2(t) + S^2(t)}$ и указаны значения амплитуд сигнала, по которым определялся модуль коэффициента отражения $|\Gamma| = A/A_0$, где амплитуда сигнала определялась по результату линейной экстраполяции амплитуды отраженного сигнала к моменту времени входа УВ в аргон ($t = 0$).

В результате фазовой обработки интерферограммы получена зависимость мгновенной скорости УВ в аргоне D от времени, которая представлена на рис. 3, в.

На рис. 3 также указаны моменты времени характерных процессов в эксперименте: t_1 — вход УВ в аргон, t_2 — завершение переходных процессов, обусловленных разрешающей способностью использованного метода исследования, t_3 — выход УВ из аргона.

В таблице приведены экспериментальные результаты: волновая D и массовая U скорости, давление p , плотность ρ , оценки температуры T ударного сжатия и степени кулоновской

неидеальности γ по [5], коэффициент отражения $|\Gamma|$ от фронта УВ и оцененные значения проводимости σ и концентрации электронов N_e за фронтом УВ.

На рис. 4 представлены экспериментальные данные из таблицы в координатах $D-U$ для ударной адиабаты аргона при атмосферном давлении. На нем же приведены данные работ [9–12] и результаты двух вариантов термодинамических расчетов с использованием модели химической плазмы [5] и модифицированной модели Ван-дер-Ваальса [6]. При расчетах в [5, 6] комплексы типа Ar_2^+ и эксимеры Ar_2^* [13] не учитывались.

Как видим из рис. 4, данные, полученные в настоящей работе, находятся в удовлетворительном согласии как с экспериментальными данными других работ, так и с результатами расчетов по модели химической плазмы [5] и модифицированной модели Ван-дер-Ваальса [6].

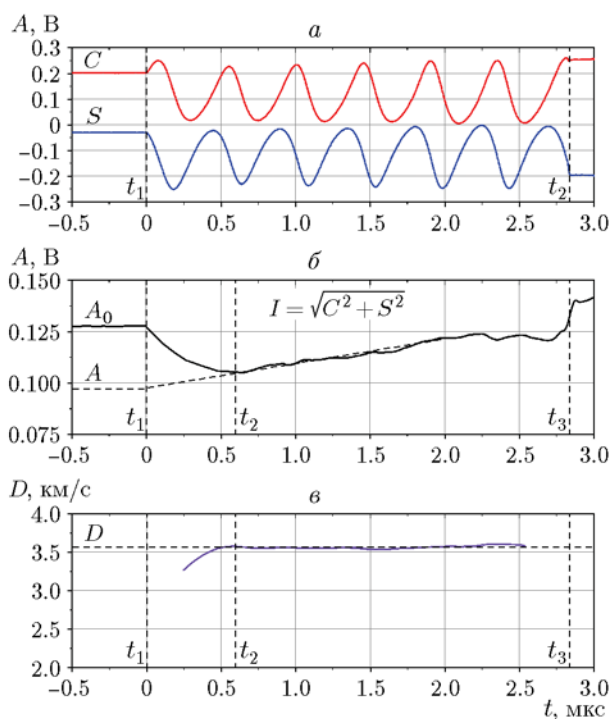


Рис. 3. Результаты микроволновой диагностики:

a — микроволновая интерферограмма, *b* — зависимость огибающей сигнала от времени, *c* — зависимость скорости ударной волны от времени

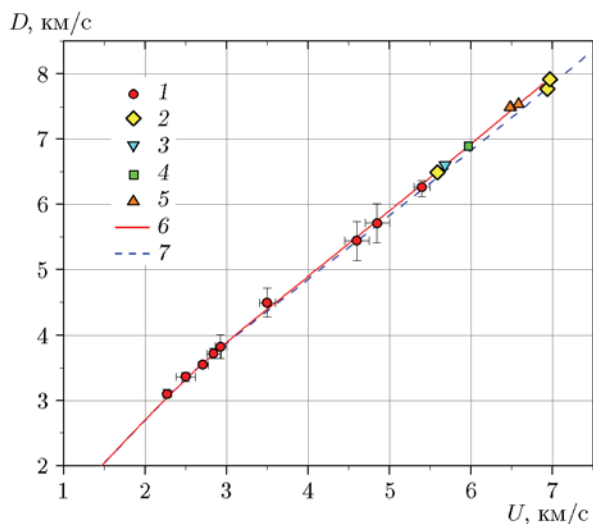


Рис. 4. Ударная адиабата аргона в переменных $D-U$:

эксперимент: 1 — настоящая работа, $\lambda_0 = 3.2$ мм, 2 — [9], 3 — [10], 4 — [11], 5 — [12]; расчет: 6 — по модифицированной модели Ван-дер-Ваальса [6], 7 — по модели химической плазмы [5]

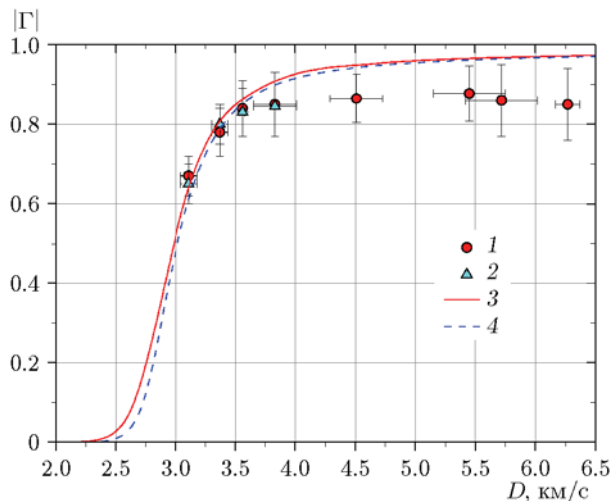


Рис. 5. Зависимость модуля коэффициента отражения за фронтом ударной волны от ее скорости:

эксперимент: 1, 2 — настоящая работа, $\lambda_0 = 3.2$ и 2.1 мм соответственно; расчет: 3 — по модифицированной модели Ван-дер-Ваальса [6], 4 — по модели химической плазмы [5]

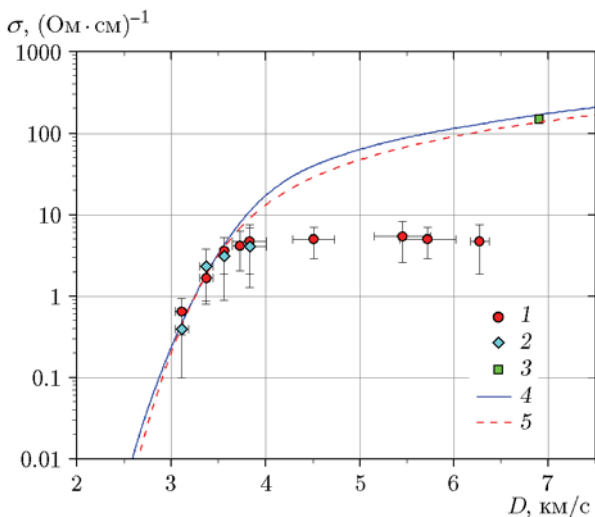


Рис. 6. Зависимость удельной проводимости за фронтом ударной волны от ее скорости:

эксперимент: 1, 2 — настоящая работа, $\lambda_0 = 3.2$ и 2.1 мм соответственно, 3 — работа [11]; расчет: 4 — по модифицированной модели Ван-дер-Ваальса [6], 5 — по модели химической плазмы [5]

На рис. 5–7 представлены зависимости модуля коэффициента отражения, проводимости и концентрации электронов за фронтом УВ в аргоне от скорости УВ, а также приведены данные работ [10, 11] и результаты расчетов с использованием модели химической плазмы [5]

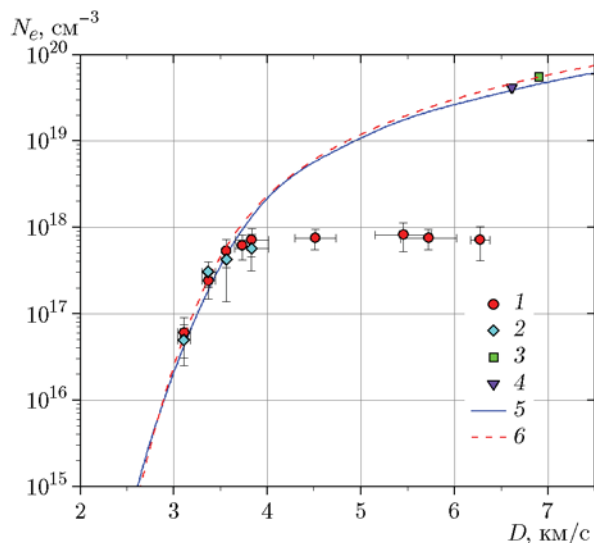


Рис. 7. Зависимость концентрации электронов за фронтом ударной волны от ее скорости: эксперимент: 1, 2 — настоящая работа, $\lambda_0 = 3.2$ и 2.1 мм соответственно, 3 — [11], 4 — [10]; расчет: 5 — по модифицированной модели Ван-дер-Ваальса [6], 6 — по модели химической плазмы [5]

и модифицированной модели Ван-дер-Ваальса [6]. Из рис. 5–7 видно, что экспериментальные данные находятся в удовлетворительном согласии с результатами расчетов только в диапазоне волновых скоростей $D = 3.1 \div 3.6$ км/с. Дальнейшее увеличение скорости приводит к существенному расхождению экспериментальных данных с расчетом, которое может быть объяснено эффектом экранировки излучения. Этот эффект, описание которого дано в [14], заключается в разогреве невозмущенного газа перед фронтом УВ потоком излучения, испускаемого нагретым до температур $10\,000 \div 20\,000$ К газом за фронтом УВ, что приводит к поглощению части энергии зондирующего микроволнового излучения и, соответственно, к уменьшению коэффициента отражения от волнового фронта. Дополнительные эксперименты показали, что при увеличении скорости УВ в аргоне до $8 \div 9$ км/с невозмущенный газ ионизируется настолько, что в итоге перестает пропускать зондирующее микроволновое излучение.

Как было описано выше, проводимость и концентрация электронов ударно-сжатой плазмы определялась только по измеренному коэффициенту отражения от слоя газовой плазмы, а значения температуры ударного сжатия аргона рассчитывались по уравнению состояния [5, 6]. Стоит отметить, что использован-

ная в работе методика определения коэффициента отражения имеет большую погрешность измерения (около 10 %). Поэтому данные о проводимости и концентрации электронов плазмы носят больше оценочный характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы ударно-волновые и электрофизические характеристики плазмы ударно-сжатого аргона, характеризуемого в начальном состоянии давлением 0.1 МПа и температурой ≈ 273 К. Использовался метод микроволновой доплеровской диагностики с применением радиоинтерферометров с длинами волн зондирующего излучения 3.2 и 2.1 мм в диапазоне давлений ударного сжатия от 12 до 56 МПа ($D = 3.1 \div 6.2$ км/с).

По результатам измерения скоростей ударных волн получена ударная адиабата аргона, которая хорошо согласуется с данными других авторов и результатами расчета по модели химической плазмы и модифицированной модели Ван-дер-Ваальса. Получен массив значений коэффициента отражения электромагнитного излучения на длинах волн 3.2 и 2.1 мм от фронта ударной волны, на основании которого оценены проводимость и концентрация электронов во фронте ударной волны. Экспериментальные данные согласуются с расчетом по модели химической плазмы и модифицированной модели Ван-дер-Ваальса в диапазоне скоростей $D = 3.1 \div 3.6$ км/с. При дальнейшем увеличении скорости проявляется эффект экранирования зондирующего излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бельский В. М., Михайлов А. Л., Родионов А. В., Седов А. А. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 29–41.
2. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Пешков В. В. и др. О влиянии проводимости ударно-сжатого газа на регистрацию параметров движения лайнера с помощью интерферометрических методов // ЖЭТФ. — 2012. — Т. 141, № 1. — С. 182–188.
3. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1967.
4. Справочник химика / под ред. Б. П. Никольского. — 3-е изд. — Л.: Химия, 1971. — Т. 1.

5. **Грязнов В. К., Иосилевский И. Л., Форттов В. Е.** Термодинамические свойства ударно сжатой плазмы в представлении химической модели // Ударные волны и экстремальные состояния вещества. — М.: Наука, 2000.
6. **Медведев А. Б.** Уравнение состояния и коэффициенты переноса аргона на основе модифицированной модели Ван-дер-Ваальса до давлений 100 ГПа // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 4. — С. 116–126.
7. **Методы** исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / под ред. М. В. Жерноклетова. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.
8. **Экспериментальные** данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / под ред. Р. Ф. Трунина. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
9. **Грязнов В. К., Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Иосилевский И. Л., Форттов В. Е.** Термодинамические свойства неидеальной плазмы аргона и ксенона // ЖЭТФ. — 1980. — Т. 78, № 2. — С. 546–585.
10. **Форттов В. Е., Леонтьев А. А., Дремин А. Н., Грязнов В. К.** Генерация неидеальной плазмы мощными ударными волнами // ЖЭТФ. — 1976. — Т. 71, № 1(7). — С. 225–236.
11. **Иванов Ю. В., Минцев В. Б., Форттов В. Е., Дремин А. Н.** Электропроводность неидеальной плазмы // ЖЭТФ. — 1976. — Т. 71, № 1(7).
12. **Беспалов В. Е., Грязнов В. К., Дремин А. Н., Форттов В. Е.** Динамическое сжатие неидеальной плазмы аргона // ЖЭТФ. — 1975. — Т. 69, № 6(12). — С. 2059–2066.
13. **Коробицин А. А., Колганова Е. А.** Двух- и трехчастичные кластеры инертных газов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2017. — Т. 48, № 6. — С. 836–845.
14. **Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Физматлит, 1963.

Поступила в редакцию 24.06.2019.

После доработки 25.09.2019.

Принята к публикации 06.11.2019.
