

# О ВЛИЯНИИ ПРОВОДИМОСТИ УДАРНО-СЖАТОГО ГАЗА НА РЕГИСТРАЦИЮ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЛАЙНЕРА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

*В. А. Огородников\**, *А. Л. Михайлов*, *В. В. Пешков*, *Е. Н. Богданов*,  
*А. В. Родионов*, *А. А. Седов*, *А. В. Федоров*, *Д. В. Назаров*,  
*С. А. Финюшин*, *В. И. Дудолодов*, *С. В. Ерунов*, *А. О. Бликов\*\**

*РФЯЦ-ВНИИЭФ  
607188, Саров, Нижегородская обл., Россия*

Поступила в редакцию 28 февраля 2011 г.

Приведены результаты исследования динамики разгона алюминиевого лайнера до скорости 5.5 км/с с использованием методик непрерывной регистрации скорости (ВИЗАР и Фабри–Перо) и траектории движения (радиоинтерферометр, резистивный датчик) в атмосфере воздуха и гелия. Установлено, что при скоростях лайнера более 4.0 и 5.0 км/с с помощью радиоинтерферометра регистрируется перемещение фронта ударной волны соответственно в воздухе и гелии. При этих скоростях сделаны оценки проводимости воздуха и гелия за фронтом ударной волны.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

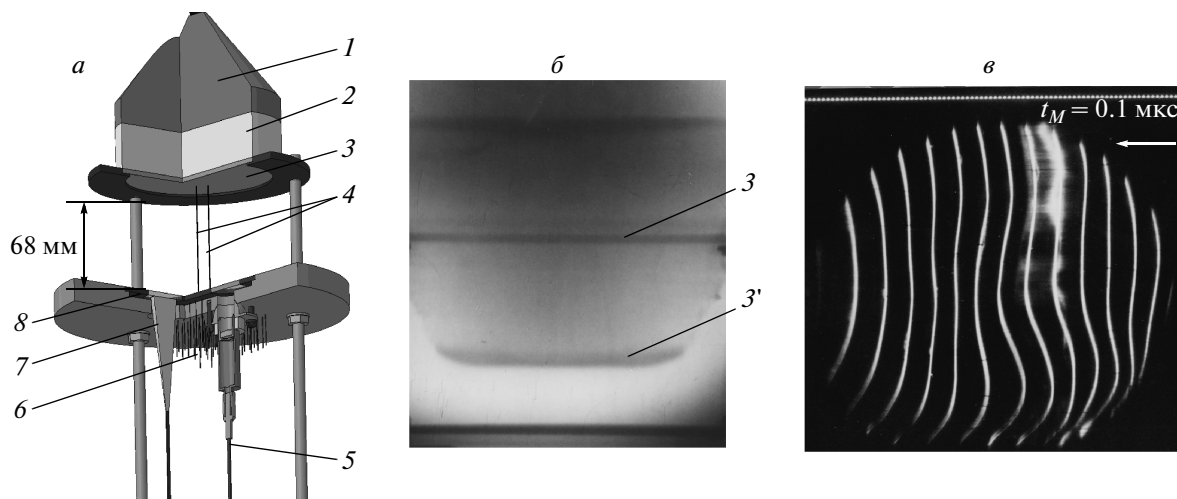
При решении различных газодинамических задач, связанных с разгоном пластин и оболочек (лайнеров) до скоростей 1–10 км/с, в соответствии с принципами использования методик, построенных на разных физических эффектах и их дублировании [1], наряду с дискретной методикой электроконтактных и контактно-оптических датчиков регистрации временных интервалов на фиксированных уровнях [2] применяют ряд методик непрерывной регистрации. К ним относятся методики резистивных датчиков [3], радиоинтерферометра с длиной волны  $\lambda_0 = 3.2$  мм [4], лазерных интерферометров систем Фабри–Перо и ВИЗАР [5] с длиной волны  $\lambda_0 = 532$  нм. Первые две методики позволяют проводить непрерывную регистрацию траектории движения поверхности лайнера,  $x(t)$ , а последние — ее скорости  $W(t)$ . Особенности перечисленных методик являются высокие пространственное и временное разрешения при достаточно больших базах измерения (более 100 мм). Наряду с этим, методики непрерывной регистрации движения лайнеров, разгоняемых, например, с помощью взрыва заря-

да взрывчатого вещества (ВВ), позволяют определять возможность их откольного разрушения и последующего компактирования. Отмеченные обстоятельства важны для тестирования моделей, применяемых для расчетного описания разгона лайнеров.

Поскольку разгон лайнеров происходит, как правило, в газовой среде (в воздухе, гелии, дейтерии и т. п.), при использовании интерферометрических методов, в частности радиоинтерферометра с  $\lambda_0 = 3.2$  мм, возникает вопрос о распространении зондирующего излучения в системе «невозмущенный газ–ударно-сжатый слой газа–поверхность разгоняемого лайнера» [6]. При скоростях в несколько км/с возможна ионизация сжатого газа и появление в нем заметной проводимости [7], что может привести к регистрации движения не поверхности лайнера, а фронта ударной волны (УВ) в газе, движущейся перед лайнером. Однако в работе [6] было показано, что при скоростях лайнера до 5.5 км/с с помощью радиоинтерферометра с длиной волны  $\lambda_0 = 3.2$  мм регистрировали движение его поверхности, а не фронта УВ в воздухе. Полученные экспериментальные результаты не согласуются с оценками коэффициентов отражения радиоволн от ударно-сжатого воздуха в этом диапазоне скоростей, полученными на основе формул из [8, 9].

\*E-mail: root@gdd.vniief.ru

\*\*E-mail: mcleodjr@mail.ru



**Рис. 1.** Внешний вид экспериментальной сборки (а) и рентгенограмма полета ( $t = 40.8$  мкс) лайнера (б): 1 — генератор УВ; 2 — заряд ВВ; 3 и 3' — первоначальное и смещенное положения лайнера; 4 — резистивные датчики; 5 — датчик лазерного интерферометра; 6 — электроконтакты; 7 — датчик радиоинтерферометра; 8 — экран. в) Растрограмма поверхности лайнера на базе 68 мм: стрелка указывает направление развертки;  $t_M$  — шаг по времени между точками в верхней части растрограммы

В связи с этим данная работа посвящена исследованию влияния ионизации газовой среды (воздуха и гелия) на работоспособность радиоинтерферометрической методики регистрации движения лайнера. Для методик лазерной интерферометрии с  $\lambda_0 = 532$  нм этого вопроса не существует, поскольку для наличия концентрации электронов  $3.9 \cdot 10^{21}$  см $^{-3}$  при  $P_0 = 10^5$  Па [8], способной влиять на световую волну, необходимы значительно большие начальное давление и скорость лайнера. Тестирование методик непрерывной регистрации траектории и скорости движения лайнера проводили в экспериментах по разгону алюминиевой пластины толщиной 2 мм продуктами взрыва до скорости 5.5 км/с, специально в той же постановке, как и в работе [6].

## 2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментов приведена на рис. 1а. Алюминиевый (АМг6) лайнер диаметром 120 мм и толщиной 2 мм разгоняли продуктами взрыва заряда ВВ высотой 40 мм, который инициировали генератором плоской УВ. База полета лайнера в воздухе и в гелии при начальном давлении  $P_0 = 10^5$  Па составляла соответственно 68.0 и 62.0 мм и была ограничена стальным (Ст. 3) экраном толщиной 2 мм. Под экраном устанавливали приемник с электроконтактными датчиками, расположенными на расстоянии 1 и 2 мм от него. Непрерывную регистрацию переме-

щения лайнера,  $x(t)$ , осуществляли с помощью радиоинтерферометра и резистивных датчиков, а скорости  $W(t)$  — с помощью лазерных интерферометров ВИЗАР и Фабри–Перо. Для прохождения оптического и радио-сигналов в стальном экране находились окна из оргстекла диаметром 20 мм, расположенные на одинаковом расстоянии от оси устройства ( $R = 20$  мм). На таком же расстоянии от оси через отверстие диаметром 0.4 мм устанавливали два резистивных датчика.

Для более надежной интерпретации ожидаемых результатов специально проведены дополнительные опыты по регистрации состояния поверхности разгоняемого лайнера в воздухе с помощью рентгенографической ( $x = 46.3$  мм) и фотохронографической ( $x = 68$  мм) методик (рис. 1б,в). Их анализ показывает, что разновременность полета поверхности лайнера на диаметре 90 мм не превышает 0.4 мкс, а на диаметре установки используемых в работе датчиков ( $2R = 40$  мм) — 0.2 мкс. Кроме того, в той же постановке проведен опыт в разреженной среде воздуха при остаточном давлении  $9 \cdot 10^3$  Па.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены зависимости  $x(t)$  для движения лайнера в среде воздуха и гелия, регистрируемые с использованием методик резистивного дат-

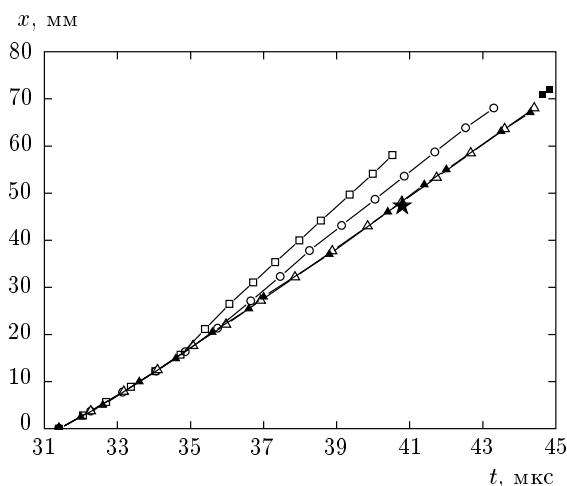


Рис. 2. Диаграммы  $x(t)$  движения лайнера: ★ — рентген; □ и ○ — радиоинтерферометр, лайнер движется соответственно в гелии и воздухе; ▲ и △ — резистивный датчик (гелий и воздух); ■ — электроконтактные датчики

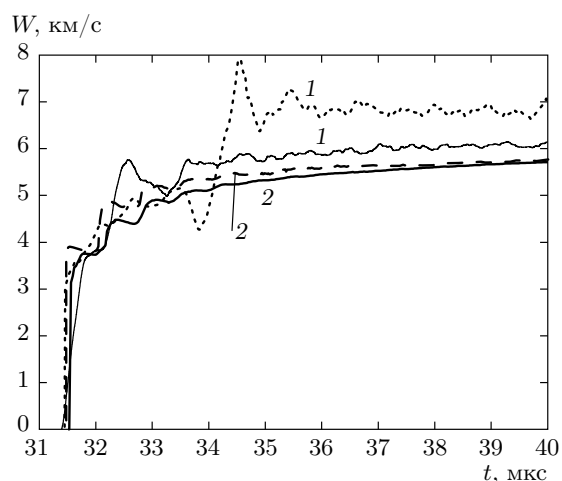


Рис. 3. Диаграммы  $W(t)$  движения лайнера в воздухе (сплошные кривые) и гелии (штриховые): 1 — радиоинтерферометр; 2 — лазерный интерферометр

чика и радиоинтерферометра. Здесь же приведены результаты регистрации движения стального экрана при ударе по нему лайнером с помощью электроконтактных датчиков, а также результат независимого рентгенографического опыта. На рис. 3 приведены профили скорости движения лайнера, регистрируемые лазерными интерферометрами ВИЗАР и Фабри–Перо. Для сравнения на том же рисунке приведены профили  $W(t)$ , полученные путем дифферен-

цирования зависимостей  $x(t)$ , регистрируемых с помощью радиоинтерферометра.

Анализ полученных результатов (см. рис. 2) указывает на то, что резистивные датчики, независимо от состава газовой среды, регистрируют совпадающие (в пределах погрешности измерений) зависимости  $x(t)$ , ход которых согласуется с результатами регистрации смещения стального экрана электроконтактными датчиками, а также с результатом рентгенографического опыта. Это является основанием для утверждения о том, что резистивные датчики регистрируют движение поверхности лайнера, а не фронта УВ в газе перед лайнером. При получении диаграммы  $x(t)$  с помощью радиоинтерферометра регистрируются особенности. Так, например, при разгоне лайнера в воздухе и гелии наблюдаются смещения зависимостей  $x(t)$  в сторону опережения, причем величина смещения качественно соответствует тому, что должно иметь место при регистрации радиоинтерферометром сигнала, отраженного от фронта УВ в газовой среде [10, 11]. Из рис. 3 следует, что профили скорости  $W(t)$  разгона лайнера, регистрируемые лазерными интерферометрами систем ВИЗАР и Фабри–Перо, независимо от состава газовой среды, совпадают в пределах погрешности измерений и дают конечную скорость движения лайнера  $W_f = 5.50 \pm 0.05$  км/с, которая согласуется с расчетными оценками [12]. Однако профили скорости движения лайнера,  $W(t)$ , полученные путем дифференцирования зависимостей  $x(t)$ , регистрируемых с помощью радиоинтерферометра, после второго скачка скорости идут выше как в воздухе, так и в гелии. Причем величина этого превышения не противоречит высказанной выше гипотезе о регистрации радиоинтерферометром сигнала, отраженного от фронта УВ в газовой среде. Таким образом, полученные результаты (рис. 2, 3) свидетельствуют о том, что при использовании лазерных интерферометров в экспериментах регистрировали движение поверхности лайнера до конечной скорости 5.5 км/с. При использовании радиоинтерферометра сначала определяли движение лайнера, а начиная со скоростей 4.5 и 5.0 км/с регистрировали движение фронта УВ соответственно в воздухе и в гелии. В этой связи выводы работы [6] нуждаются в уточнении.

Рассмотрим более детально вопрос о влиянии воздуха на регистрацию перемещения лайнера с помощью радиоинтерферометра. При высокоскоростном метании лайнера за фронтом воздушной УВ, движущейся впереди него, происходят процессы ионизации воздуха. При определенной скорости лайнера степень ионизации вещества за фронтом УВ дости-

гает некоторого критического значения, при котором зондирующее излучение радиоинтерферометра отражается от фронта УВ в воздухе, не проникая в вещество за ним. Если имеется возможность экспериментального определения с помощью радиоинтерферометра момента изменения свойств отраженного сигнала, то появляется основание для проведения простых оценок электрических параметров вещества за фронтом УВ в воздухе (например, проводимости и концентрации электронов).

Момент изменения (перехода) характера отражения можно определить из сравнения траекторий движения, зарегистрированных лазерными интерферометрами и радиоинтерферометром. В момент перехода должен наблюдаться резкий излом на диаграмме  $x(t)$ , зарегистрированной радиоинтерферометром. При этом профиль скорости, полученный путем дифференцирования диаграммы  $x(t)$ , будет идти выше профилей скорости, измеренных лазерными системами (см. рис. 3). Поскольку модуль коэффициента отражения радиоизлучения от металлического ударника равен единице ( $|\Gamma| = 1$ ), а коэффициент отражения от фронта УВ в воздухе в исследуемом диапазоне скоростей лайнера всегда меньше единицы ( $|\Gamma| < 1$ ), при изменении характера отражающей поверхности на экспериментальных радиоинтерферограммах должен наблюдаться скачок амплитуды сигнала. Нормирование амплитуды сигнала, отраженного от фронта УВ в воздухе, на амплитуду сигнала, отраженного от лайнера, дает амплитудный коэффициент отражения радиоизлучения от фронта УВ в газе. Пусть  $A_1$  и  $A_2$  — амплитуды интерферограмм, соответствующие отражению радиоизлучения соответственно от поверхности ударника и от фронта УВ. Тогда экспериментальное значение модуля коэффициента отражения радиоизлучения от фронта УВ будет определяться как  $|\Gamma| = A_2/A_1$ .

На рис. 4 приведена радиоинтерферограмма, полученная в одном из опытов по разгону лайнера в воздухе, и профили скорости, зарегистрированные лазерными интерферометрами и построенные путем дифференцирования диаграммы  $x(t)$ , регистрируемой радиоинтерферометром. На профилях скорости и интерферограммах штриховыми линиями указаны следующие моменты времени:  $t_1$  — время начала движения лайнера;  $t_2, t_3$  — времена последующих скачков скорости. На протяжении первого периода интерферограммы (интервал  $t_1-t_2$  соответствует первому скачку скорости) отражение зондирующего излучения происходит от поверхности лайнера. Далее на распространение излучения начинают оказывать влияние процессы ионизации за фронтом

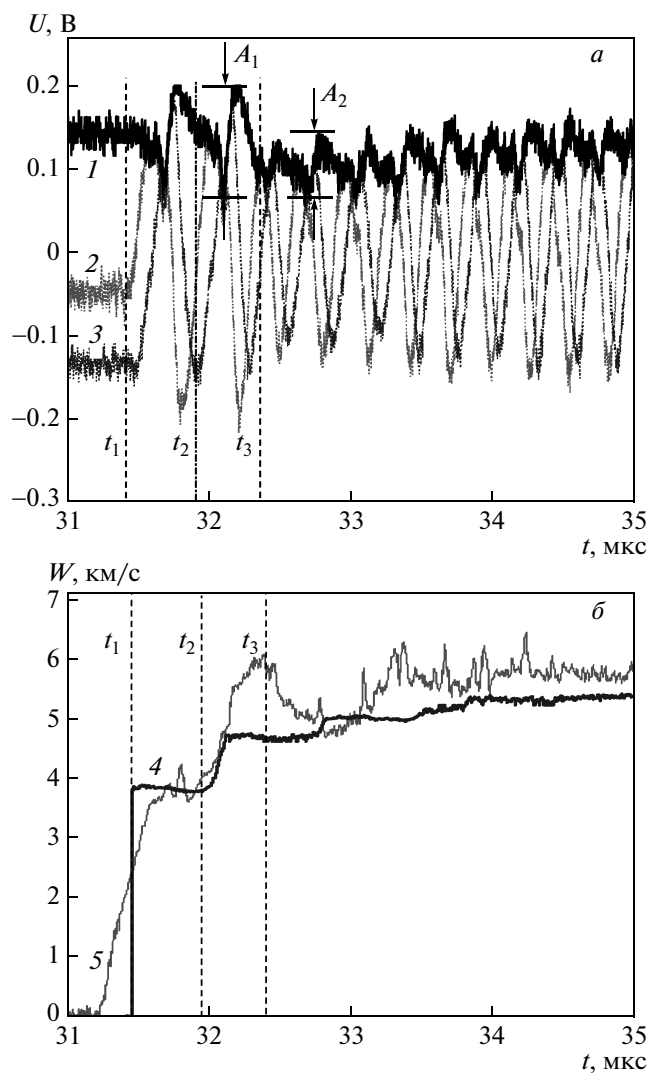


Рис. 4. Экспериментальные радиоинтерферограммы (а) и профили скорости (б): 1 — модуль амплитуды сигнала; 2 и 3 — соответственно действительная и мнимая части сигнала; 4 и 5 — сигналы, полученные соответственно с помощью лазерных и радиоинтерферометров

УВ, и после момента времени  $t_3$  радиоизлучение отражается только от фронта УВ. Из приведенных рисунков можно сделать заключение, что переход к отражению от фронта УВ в воздухе происходит в интервале времени, соответствующем второму скачку скорости лайнера ( $W \approx 4.5$  км/с).

Рассмотрим нормальное падение из воздуха на границу раздела с другой средой (фронт УВ) плоской монохроматической электромагнитной волны [8, 9],

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp [i(\omega_0 t - kx)], \quad (1)$$

где  $\omega_0$  — круговая частота,  $k$  — волновое число,  $x$  — ось вдоль направления распространения излучения. Будем считать, что на границе раздела свойства сред меняются скачком, что оправдано для случая УВ в воздухе, поскольку ширина зоны релаксации концентрации электронов проводимости много меньше длины волны излучения. В общем случае диэлектрическая проницаемость, вследствие процессов ионизации среды, является также комплексной величиной:

$$\varepsilon' = \varepsilon - i \frac{4\pi\sigma}{\omega_0}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — удельная проводимость среды.

Амплитуды падающей, прошедшей и отраженной электромагнитных волн связаны следующими соотношениями [8, 9]:

$$\mathbf{E}_2 = \Gamma \mathbf{E}_0, \quad \mathbf{E}_1 = T \mathbf{E}_0, \quad (3)$$

где

$$\Gamma = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon'}}{1 + \sqrt{\varepsilon'}}, \quad T = \frac{2}{1 + \sqrt{\varepsilon'}}, \quad (4)$$

$\Gamma$  и  $T$  — амплитудные коэффициенты соответственно отражения и прохождения электромагнитных волн. В случае проводящей среды коэффициенты становятся комплексными.

Дополнительно для удобства, в соответствии с [8, 9], вводятся показатели преломления  $n$  и поглощения  $\vartheta$  с помощью дисперсионного уравнения

$$k = \sqrt{\varepsilon'} \frac{\omega}{c} = (n - i\vartheta) \frac{\omega}{c}, \quad (5)$$

где

$$n = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + \frac{4\pi^2\sigma^2}{\omega^2}} \right)}, \quad (6)$$

$$\vartheta = \sqrt{\frac{1}{2} \left( -\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + \frac{4\pi^2\sigma^2}{\omega^2}} \right)}.$$

Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и проводимость среды  $\sigma$  в ионизованном газе вводятся так же, как и в [8], в виде

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_e^2}{\omega_0^2 + \nu_{eff}^2}, \quad \sigma = \frac{\omega_e^2 \nu_{eff}}{4\pi(\omega_0^2 + \nu_{eff}^2)}, \quad (7)$$

$$\omega_e = \sqrt{\frac{4\pi N e^2}{m}},$$

где  $\omega_e$  — плазменная частота,  $\nu_{eff}$  — эффективная частота столкновений электронов с нейтральными частицами и ионами,  $N$  — концентрация электронов,  $m$  и  $e$  — масса и заряд электрона. Эффективная частота столкновений в общем случае зависит от компонентного (атомы, молекулы, электроны, ионы обоих знаков) состава газа, давления и температуры.

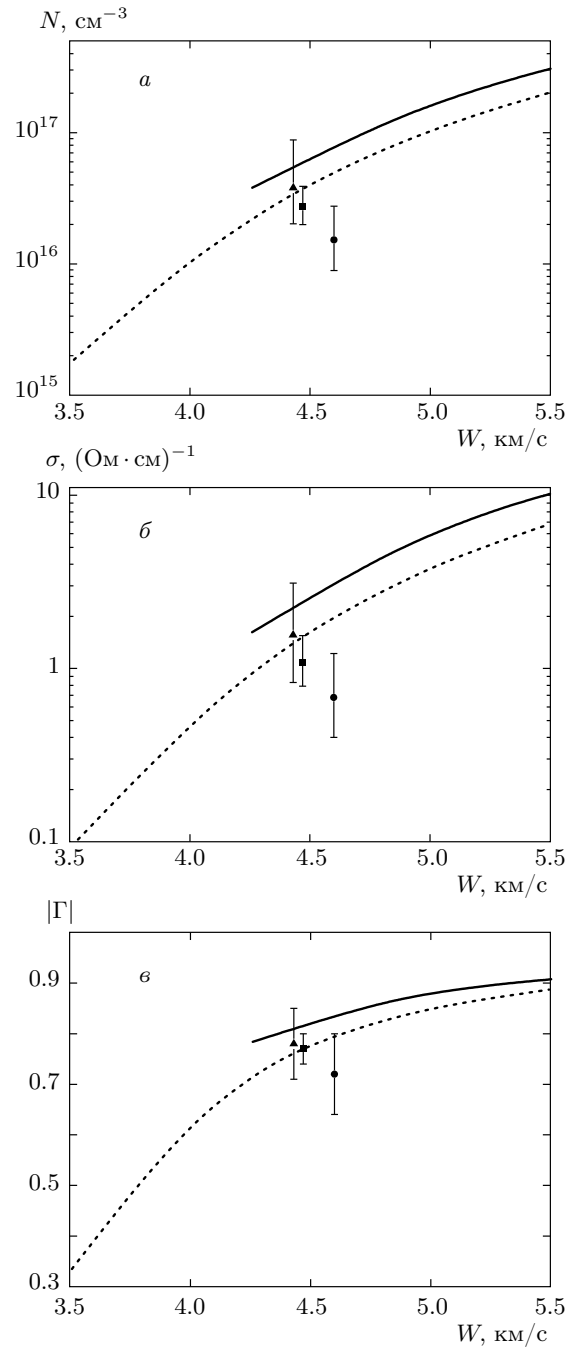


Рис. 5. Зависимости концентрации электронов (а) и проводимости воздуха (б) за фронтом УВ, а также модуля коэффициента отражения радиоизлучения от фронта УВ (в) от скорости лайнера: сплошные кривые — расчет по [10]; штриховые — расчет по [11]; точки — данные экспериментов № 1 (■); № 2 (●); № 3 (▲)

Таблица. Оценка электрических параметров газа за фронтом УВ

Параметр	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3	Эксперимент 4
Газ	Воздух	Воздух	Воздух	Гелий
$u$ , м/с	4470	4600	4430	5450
$D$ , м/с	4980	5132	4949	6865
$T$ , К	6910	7183	6850	2700
$\Gamma$	$0.77 \pm 0.03$	$0.73 \pm 0.08$	$0.78 \pm 0.07$	$0.16 \pm 0.02$
$N$ , см <sup>-3</sup>	$(2.72^{+1.17}_{-0.73}) \cdot 10^{16}$	$(1.52^{+1.23}_{-0.63}) \cdot 10^{16}$	$(3.80^{+5.02}_{-1.78}) \cdot 10^{16}$	$(1.45^{+0.18}_{-0.16}) \cdot 10^{14}$
$\sigma$ , (Ом·см) <sup>-1</sup>	$1.08^{+0.47}_{-0.29}$	$0.68^{+0.54}_{-0.28}$	$1.18^{+1.55}_{-0.53}$	$0.028^{+0.004}_{-0.003}$
$T_0$ , К	278	295	260	280
$P_0$ , Па	$\sim 10^5$	$\sim 10^5$	$9 \cdot 10^3$	$\sim 10^5$

Заметим, что в исследуемом диапазоне скоростей движения лайнеров (до 4–6 км/с) основную роль играют столкновения с нейтральными частицами,  $\nu_{eff} \approx \nu_{eff,m}$ , поскольку степень ионизации  $\alpha = N/(N + N_m)$ , где  $N_m$  — концентрация нейтральных частиц за фронтом УВ в воздухе, достаточно мала,  $\alpha \sim 10^{-9}$ – $10^{-4}$ , и частота столкновений с ионами много меньше частоты столкновений с нейтральными частицами. Тогда для воздуха в соответствии с [8] имеем

$$\nu_{eff} = 1.7 \cdot 10^{11} \frac{N_m}{2.7 \cdot 10^{19}} \sqrt{\frac{T}{300}}, \quad (8)$$

где  $T$  [К] — температура среды за фронтом ударной волны.

Концентрацию нейтральных частиц можно приближенно определить из соотношения

$$N_m = \frac{D}{D - u} N_L, \quad (9)$$

где  $D$  — скорость фронта УВ в воздухе,  $u$  — массовая скорость газа за фронтом УВ,  $N_L = 2.68719 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> — число Лошмидта. Необходимые для проведения оценок значения  $D$  и температуры  $T$  среды за фронтом УВ определяют по известному значению  $u$ , равному скорости лайнера  $W$  с помощью таблиц термодинамических функций воздуха [11].

Выражение (4) для коэффициента отражения от фронта УВ в воздухе с учетом выражений (5), (6) можно записать в виде

$$\Gamma = \frac{1 - (n - i\vartheta)}{1 + (n - i\vartheta)}. \quad (10)$$

Коэффициент отражения радиоизлучения от фронта УВ,  $\Gamma$ , является функцией скорости лайнера (температура и скорость УВ связаны со скоростью лайнера уравнением состояния) и концентрации электронов, поэтому появляется возможность определения с помощью численных методов концентрации электронов по полученным в эксперименте значениям модуля коэффициента отражения ( $|\Gamma| = A_2/A_1$ ).

В таблице приведены начальные параметры и результаты оценок концентрации электронов  $N$  и проводимости  $\sigma$  для воздуха и гелия за фронтом УВ. Значения  $u$  определяли усреднением значений скоростей лайнера на втором скачке профиля  $W(t)$  (см. рис. 3), поскольку при данных условиях происходил переход к отражению радиоизлучения от лайнера к фронту УВ в воздухе и гелии. Используя известные ударные адиабаты воздуха [10] и гелия [13], а также известные значения  $u$ , находили скорость  $D$  фронта УВ и температуру  $T$  вещества за фронтом УВ. После этого проводили оценочные расчеты концентрации свободных электронов  $N$  и проводимости  $\sigma$  воздуха и гелия за фронтом УВ с использованием соотношений (7), (8).

На рис. 5 приведено сравнение полученных оценок и расчетов по формулам (7), (8) с использованием необходимых данных из таблиц термодинамических функций для воздуха [10, 11]. Видно удовлетворительное согласие величин проводимости и коэффициента отражения с результатами расчетов по таблицам термодинамических функций для воздуха при скоростях лайнера 4–5 км/с.

На результаты приведенных оценок может влиять целый ряд обстоятельств. Так, например, наибольшую ошибку может внести определение коэффициента отражения, так как определение амплитуд сигналов, отраженных от ударника и от фронта УВ, проводится всего на одном периоде интерферограммы, что связано со ступенчатым разгоном ударника.

Тем не менее из полученных оценок следует, что значения скорости лайнера около 3.5 км/с и 4.5 км/с можно считать пороговыми соответственно для воздуха и гелия, поскольку радиоизлучение с длиной волны 3.2 мм при превышении скорости лайнера данных значений будет отражаться от фронта УВ в газе. При этом радиоинтерферометр будет регистрировать перемещение фронта УВ в газе, а не поверхности лайнера.

Для уточнения пороговой скорости, при которой радиосигнал с длиной волны 3.2 мм начнет отражаться от фронта УВ в воздухе и гелии, необходимо проведение дополнительных экспериментов с меньшими амплитудами скачков скорости при разгоне лайнера, т. е. экспериментов с более плавным разгоном лайнера.

В целом следует отметить, что одновременное использование для регистрации движения лайнера в газовой среде радио ( $\lambda = 3.2$  мм) и лазерного ( $\lambda = 532$  нм) интерферометров позволяет получать в эксперименте информацию о волновой ( $D$ ) и массовой ( $u$ ) скоростях в среде, а также проводить оценки проводимости газа за фронтом УВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Огородников, *Физические основы информатики быстротекающих процессов*, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (2010).
2. Н. Д. Анохин, В. В. Баканов, И. Н. Будников и др., Патент РФ № 2364834, Бюлл. изобрет. № 23 (2009).
3. А. Г. Иванов, Б. М. Ловягин, В. И. Дудолодов, в *Труды II международной конф. по проблемам физической метрологии Физмет-96*, Ин-т проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург (1996), с. 18.
4. А. Л. Михайлов, В. Е. Костюков, Ю. И. Орехов и др., в сб. VII *Харитоновские научные чтения*, под ред. А. Л. Михайлова, РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров (2005), с. 649.
5. А. О. Бликов, С. В. Ерунов, В. А. Огородников и др., в сб. X *Харитоновские научные чтения*, под ред. С. Г. Гарилина, РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров (2008), с. 141.
6. Е. Н. Богданов, В. М. Бельский, А. В. Родионов, в сб. IX *Харитоновские научные чтения*, под ред. А. Л. Михайлова, РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров (2007), с. 680.
7. В. А. Горелов, Л. А. Кильдюшова, В. М. Чернышев, ТВТ **21**, 449 (1983).
8. В. Л. Гинзбург, *Распространение электромагнитных волн в плазме*, Физматгиз, Москва (1960).
9. Л. Д. Ландау, М. Д. Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред*, Наука, Москва (1982).
10. Н. М. Кузнецов, *Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах*, Машиностроение, Москва (1965).
11. А. С. Предводителев, *Таблицы термодинамических функций воздуха* (для температур от 6000 до 12000 °С и давлений от 0.001 до 1000 атмосфер), Изд-во АН СССР, Москва (1957).
12. Е. И. Забабахин, *Некоторые вопросы газодинамики взрыва*, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск (1997).
13. И. Н. Кикоин, *Таблицы физических величин*, Атомиздат, Москва (1976).