

УДК 534.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА–ЦЕНДЕРА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ “НОЖКИ” МАХА ПРИ ОТРАЖЕНИИ УДАРНОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ОТ ЖЕСТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2015 г. М. М. Карзова^{1,2}, П. В. Юлдашев¹, В. А. Хохлова¹, С. Оливье², Ф. Блан-Бенон²

E-mail: masha@acs366.phys.msu.ru

Экспериментально исследовано отражение нелинейной N -волны, создаваемой искровым источником в воздухе, от плоской жесткой поверхности. Профиль давления N -волны восстанавливали по оптическим измерениям, выполненным с помощью интерферометра Маха–Цендера. В эксперименте наблюдали нерегулярное отражение; исследована эволюция “ножки” Маха и измерена траектория тройной точки по мере распространения N -волны вдоль поверхности.

DOI: 10.7868/S0367676515100129

ВВЕДЕНИЕ

Исследования явления отражения ударных волн от поверхностей начались с экспериментов Э. Маха в 1878 г. [1]. Прделанные Махом эксперименты свидетельствовали о том, что закон зеркального отражения волн, при котором угол падения равен углу отражения, нарушается в случае сильных ударных волн. Более того, в опытах Маха наблюдалась трехволновая структура отражения, когда вместо фронтов падающей и отраженной волн вблизи поверхности формировался один ударный фронт, соединяющий точку пересечения фронтов падающей и отраженной волн с поверхностью. Такой процесс взаимодействия ударных волн получил название нерегулярного отражения, а образовавшийся возле поверхности ударный фронт стал называться “ножкой” Маха, в честь Э. Маха, впервые наблюдавшего это явление. Точка пересечения трех ударных фронтов получила название тройной точки.

Теоретическое исследование нерегулярного отражения было начато в 40-х годах прошлого века в работах Дж. фон Неймана [2]. Разработанная фон Нейманом теория трехволнового взаимодействия описывает нерегулярный режим отражения только в случае сильных ударных волн со значениями акустического числа Маха $M_a > 0.47$ [3]. При меньших значениях M_a теория фон Неймана начинает расходиться с экспериментальными данными, а для слабых ударных волн (значения $M_a < 0.035$) опровергает принципиальную возможность суще-

ствования нерегулярного режима отражения. В то же время экспериментальные наблюдения подтверждают обратное [4]. Расхождение теории фон Неймана с экспериментальными данными известно как парадокс фон Неймана, который впервые был сформулирован Дж. Биркхофом в 1950 г. [5]. В предпринятых попытках разрешить парадокс фон Неймана предметом исследования являлись плоские ударные волны, имеющие форму ступеньки, а акустические числа Маха M_a составляли не менее 0.03 [3, 4, 6–8]. Такие волны характерны для аэродинамики, но не реалистичны для акустики. Акустические возмущения с ударными фронтами имеют сложную временную структуру (N -волны, пилообразные волны и др.) и на порядок меньшие значения чисел Маха M_a . Задача отражения таких разрывных акустических волн от поверхностей до сих пор остается не изученной до конца. Насколько известно авторам, единственный эксперимент, подтверждающий образование “ножки” Маха для разрывных акустических волн, проведен в [9] в случае взаимодействия фронтов двух пилообразных волн, распространяющихся в воде. В работе [10] отражение разрывных акустических волн от жесткой поверхности исследовано в численном эксперименте для случаев плоских N -волн и пилообразной волны. Цель данной работы – экспериментальное исследование отражения сферически расходящейся N -волны, создаваемой искровым источником в воздухе, от плоской жесткой поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Пространственно-временная структура акустического поля, формирующаяся при отраже-

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва.

² Высшая инженерная школа г. Лиона, Франция.

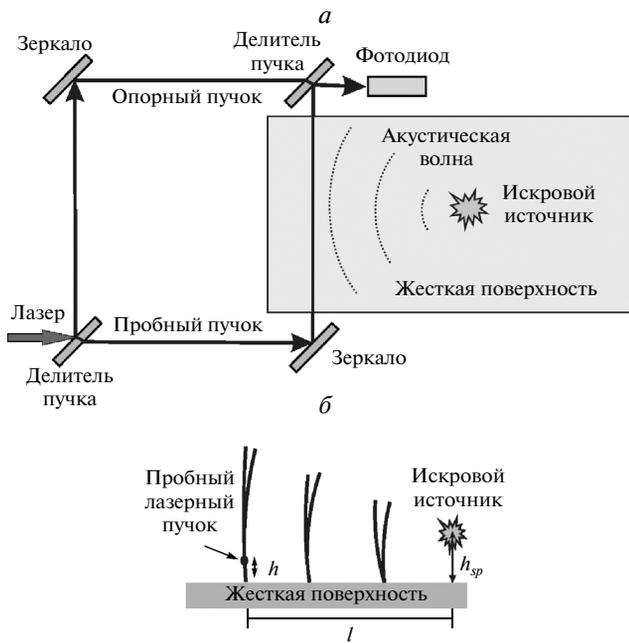


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с использованием интерферометра Маха–Цендера: а – вид сверху, б – вид сбоку на отражающую поверхность.

нии нелинейной N -волны от жесткой поверхности в воздухе, была измерена экспериментально с помощью интерферометра Маха–Цендера. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Сферически расходящаяся N -волна создавалась искровым разрядным источником, на электроды которого подавали напряжение порядка 15 кВ. Зазор между электродами составлял 2 см. Под искровым источником на расстоянии $h_{sp} = 21$ мм помещали жесткую поверхность. На расстоянии l в горизонтальном направлении от источника проходил пробный лазерный пучок интерферометра, в котором, за счет изменения оптического показателя преломления при прохождении акустической волны, создавался дополнительный набег фазы φ . Интерферометр состоял из источника непрерывного лазерного излучения ($\lambda = 632$ нм, He–Ne-лазер, 10 мВт), двух делителей пучка и двух зеркал, расположенных под углом 45° к пучку; сигнал регистрировали с помощью фотодиода.

Измерения выполняли следующим образом. В отсутствие акустической волны интерферометр стабилизировали таким образом, что выходной сигнал был равен сумме интенсивностей опорного и пробного пучков: $I = I_1 + I_2$. При прохождении акустической волны через пробный пучок в него вносится дополнительная фаза φ , и интен-

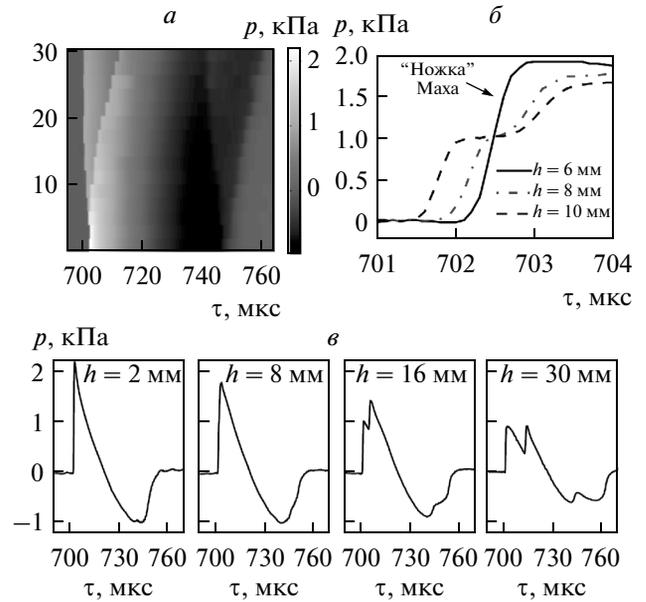


Рис. 2. Пространственно-временные характеристики акустического поля при отражении N -волны от поверхности: а – структура поля; б – структура переднего фронта; в – восстановленные профили N -волны на различной высоте h от поверхности.

сивность света на фотодиоде изменяется согласно формуле

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi. \quad (1)$$

В приближении отсутствия рефракции пробного лазерного пучка и с учетом сферической симметрии задачи оптический набег фазы φ связан с возмущением показателя преломления воздуха n прямым преобразованием Абеля

$$\varphi(R) = \frac{4\pi}{\lambda} \int_r^\infty \frac{n(r)rdr}{\sqrt{r^2 - R^2}}, \quad (2)$$

где R – расстояние от искрового источника. Восстанавливая фазу из оптического сигнала (1) и применяя обратное преобразование Абеля к выражению (2), восстанавливается возмущение показателя преломления n . Акустическое давление в волне вычисляли при помощи соотношения Глэдстона [11] $p = nc_0^2/G$, где c_0 – скорость звука в воздухе и $G = 0.000226$ м³/кг – константа Глэдстона при $\lambda = 632$ нм. Как показали проведенные авторами измерения N -волны в свободном поле [12], временное разрешение интерферометра составляет 0.4 мкс.

Восстановленная с помощью интерферометра Маха–Цендера структура поля при отражении представлена на рис. 2а для случая $l = 25$ см. Данная картина представляет результаты измерений

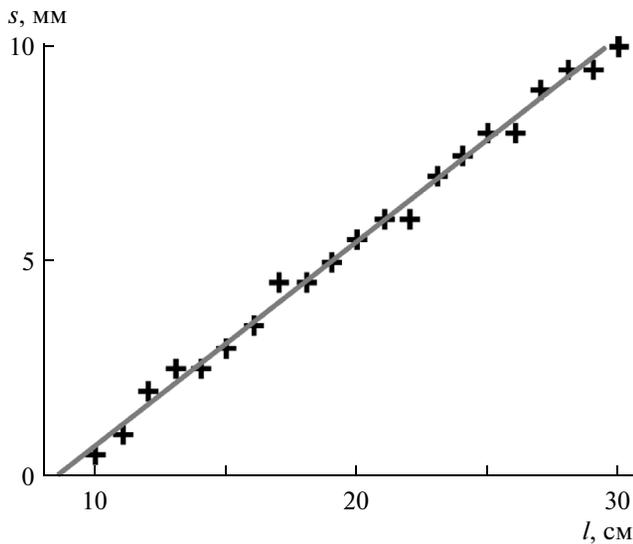


Рис. 3. Траектория тройной точки: s — высота “ножки” Маха, l — расстояние вдоль поверхности от искрового источника до точки измерения.

профилей волны на расстояниях h от жесткой поверхности в интервале от 2 до 30 мм с шагом 2 мм. Для каждой позиции h измеряли профили от 150 разрядов искрового источника, из которых впоследствии выбирали один “средний” профиль, т.е. профиль со значениями пикового положительного и отрицательного давлений, а также времени прихода волны наиболее близкими к средним значениям, вычисленным по всем искровым разрядам. Уровни давления в волне показаны цветом.

На рис. 2а хорошо видно, что передний фронт N -волны отражается от поверхности нерегулярным образом — на расстояниях $h \leq 6$ мм формируется только один фронт — “ножка” Маха, который, начиная с расстояния $h = 8$ мм, расходится на два фронта — падающей и отраженной волн. Структура переднего фронта в окрестности тройной точки изображена на рис. 2б, где отчетливо наблюдается процесс разделения “ножки” Маха на два фронта. Нерегулярный характер отражения наблюдали только для переднего фронта N -волны; отражение заднего фронта происходило регулярным образом. Это связано с тем, что задний фронт генерируемой искровым источником волны является более “размытым” и имеет меньший перепад давлений по сравнению с передним фронтом. На представленных на рис. 2в профилях волн на разной высоте h от поверхности в структуре заднего фронта изначально наблюдаются фронты падающей и отраженной волн (профиль при $h = 2$ мм), которые впоследствии быстро расходятся друг от друга.

В работе была также измерена траектория тройной точки по мере распространения “ножки” Маха вдоль поверхности (рис. 3). Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью в пределах исследуемых в эксперименте расстояний l . Минимально доступное для измерения расстояние h от поверхности составляло 2 мм, однако линейная интерполяция данной зависимости в сторону уменьшения длины “ножки” Маха предсказывает, что регулярный режим отражения переходит в нерегулярный при $l = 8$ см. Стоит отметить, что результаты численного моделирования, проведенного в [10], предсказывают нелинейный характер (сначала нелинейный рост, потом спад) изменения длины “ножки” Маха по мере ее распространения вдоль поверхности в случае плоской идеальной N -волны. Является ли полученная в данной работе линейная зависимость следствием сферичности распространения волны и ее более быстрым затуханием по сравнению с исследуемой в [10] плоской волной или же полученная в данном эксперименте траектория тройной точки является начальным участком более сложной нелинейной зависимости — вопрос дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное подтверждение образования пространственных структур типа “ножки” Маха при отражении в воздухе акустической сферически расходящейся N -волны от жесткой поверхности для акустических чисел Маха в диапазоне $M_a \sim 10^{-2} - 10^{-1}$.

1. Использование интерферометра Маха—Цендера позволяет количественно восстанавливать профили ударноволновых импульсов в случае сферической геометрии задачи, в том числе при отражении от жесткой поверхности. Временное разрешение восстановленного профиля составляет 0.4 мкс, что в 6 раз превышает разрешение, достигаемое при измерениях конденсорным микрофоном.

2. Высота “ножки” Маха линейно увеличивается по мере отражения сферически расходящейся N -волны от жесткой поверхности. Данный эффект наблюдался в пределах исследуемых в эксперименте расстояний, составляющих около пятнадцати длин N -волны.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ № 14.124.13.5895-М, РФФИ № 14-02-31878_мол_а и стипендии Французского правительства написание кандидатской диссертации в рамках совместного франко-российского научного руководства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mach E.* // Sitzungsbr. Akad. Wiss. Wien. 1878. № 78. P. 819.
2. *von Neumann J.* // In John von Neumann Collected Work / ed. Taub A.H. 1963. V. 6. P. 238.
3. *Colella P., Henderson L.F.* // J. Fluid Mech. 1990. V. 213. P. 71.
4. *Skews B., Ashworth J.* // J. Fluid Mech. 2005. V. 542. P. 105.
5. *Birkhoff G. Hydrodynamics. A Study in Logic. Fact and Similitude.* Princeton: Univ. Press, 1950.
6. *Brio M., Hunter J.K.* // Physica D. 1992. V. 60. № 1–4. P. 194.
7. *Zakharian A.R., Brio M., Hunter J.K., Webb G.M.* // J. Fluid Mech. 2000. V. 422. P. 193.
8. *Vasil'ev E., Kraiko A.* // Comput. Maths. Math. Phys. 1999. V. 39. P. 1335.
9. *Marchiano R., Coulouvrat F., Baskar S.* // Phys. Rev. 2007. E 76. P. 056602.
10. *Baskar S., Coulouvrat F., Marchiano R.* // J. Fluid Mech. 2007. V. 575. P. 27.
11. *Merzkirch W.* Flow Visualization. N. Y., L.: Acad. Press, 1974.
12. *Yuldashev P.V., Karzova M.M., Khokhlova V.A., Ollivier S., Blanc-Benon Ph.* // J. Acoust. Soc. Am. (166th meeting of the Acoustical Society of America). 2015. V. 137 (6). P. 3314.