

УДК 533.6.011.72

Ибрагим Махер
Азиз (Египет)
А. И. Климов
Ф. В. Шугаев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ
ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА ЧЕРЕЗ УДАРНУЮ
ВОЛНУ

Проведены опыты по взаимодействию ударной волны с вихревым кольцом при числах $M=1,1\div 3$. Обнаружено уменьшение скорости вихревого кольца относительно газа после прохождения через ударную волну. В опытах наблюдалось разрушение вихревого кольца при скорости движения, большей 160 м/с.

Изучение взаимодействия вихревых образований с ударными волнами важно для решения ряда аэродинамических и астрофизических задач [1—3]. До настоящего времени этот вопрос слабо изучен.

Нами исследовалось взаимодействие ударных волн с вихревыми кольцами в ударной трубе сечения 28×28 мм². Для получения вихревых колец был собран генератор, изображенный на рис. 1. Запуск электронной схемы генератора вихрей осуществлялся через блок задержки с пьезодатчика, расположенного на ударной трубе. Емкость C (1 мкФ) разряжалась через промежуток 1, 2, в результате чего формировалась ударная волна S . После ее выхода из круглого отверстия камеры 3 возникало вихревое кольцо V . В опытах использовался ряд сменных вихревых камер с отверстиями диаметром от 2 до 10 мм. Разрядник и вихревая камера размещались в рабочей секции ударной трубы. В зависимости от применяемых диафрагм в этой трубе получались ударные волны с числами Маха (M) от 1,08 до 3. Толкающим газом был гелий или азот. Рабочим газом служил воздух, давление которого в опытах изменялось от 0,1 до 1 атм.

Фотографирование производилось при помощи теневого прибора ИАБ-451 и фоторегистратора ЖФР. Источником света служили лампа ИФП-2000 или искровой разрядник с длительностью вспышки 1 мкс.

Все параметры вихрей определялись из обработки отдельных кадров и фоторазверток на измерительном микроскопе УИМ-1.

Из опытов следует, что скорость вихревого кольца растет с повышением энергии конденсатора C . При энергиях выше 16 Дж рост скорости вихря замедляется, а вихревое кольцо становится сильно турбулентным.

Ламинарные вихревые кольца получались при скоростях v_0 , не превышающих 160 м/с. Диаметр их составлял 4—12 мм, а отношение $R/r > 10$, где R — радиус вихревого кольца, r — радиус его поперечного сечения. Числа $Re = \frac{2Rv_0}{\nu}$ по оценкам составляют 500—2500. Размеры R , r и скорость v_0 ламинарных вихрей в течение всего опыта $[10^{-3}\text{с}]$ изменялись в пределах 3—5%. Характер изменения зависимости скорости и размеров турбулентных вихрей от времени хорошо согласуется с результатами работы [4].

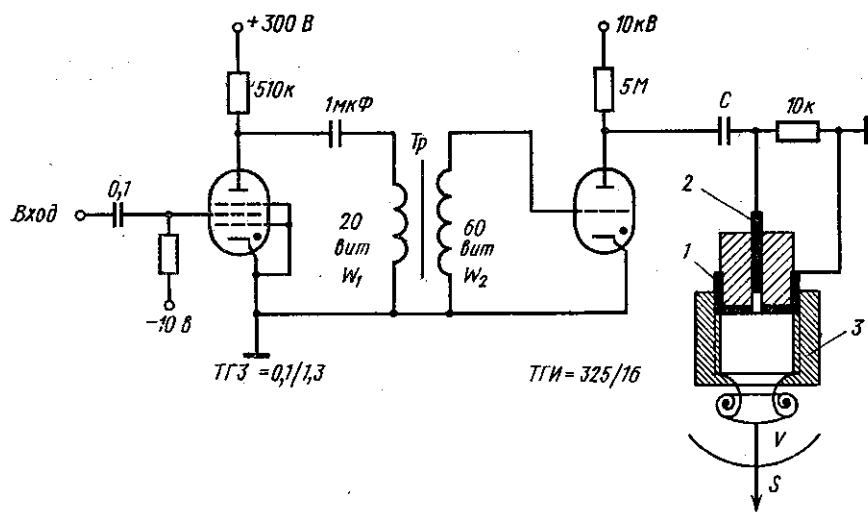


Рис. 1

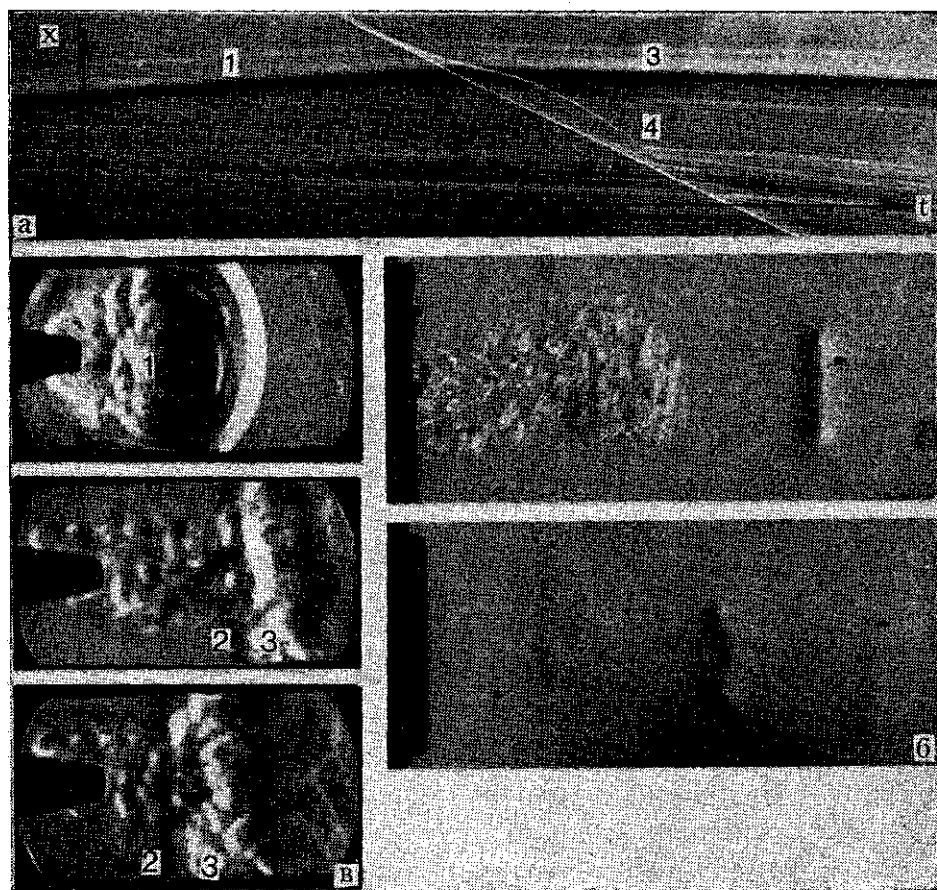


Рис. 2

На рис. 2 а, б показаны временные фоторазвертки и отдельные кадры прохождения вихревого кольца 1 через ударную волну 2. В результате их взаимодействия на плоском фронте ударной волны возникает возмущение 4. На верхнем кадре (рис. 2, б) вихревое кольцо 1 удаляется от генератора, расположенного в левой стороне снимка, видна также турбулентная струя, образованная в результате расширения нагретого электрическим разрядом газа. На нижнем снимке, соответствующем моменту времени после взаимодействия, изображена ударная волна 2, распространяющаяся справа налево, и вихревое кольцо 3, движущееся вверх по потоку за этой ударной волной (возмущение 4 к этому моменту затухало). Ударная волна 5, возникающая при запуске генератора вихрей, на этих снимках не видна.

Нами было обнаружено уменьшение скорости v_2 по отношению к начальной скорости v_0 при определенном режиме работы установки (см. таблицу).

М	v_0 , м/с	v_2 , м/с	v_2/v_0
1,18	110	95	0,86
1,34	100	83	0,83
1,37	116	93	0,81
1,4	110	94	0,85

Этот результат противоречит результатам работ [1, 2], согласно которым скорость вихревого кольца относительно газа должна увеличиваться. Уменьшение скорости вихря после прохождения ударной волны качественно можно объяснить следующим образом. Как известно, скорость тонкого вихревого кольца (в предположении постоянного распределения угловой скорости ω внутри вихревого тора) определяется следующим выражением [4]:

$$v_0 \cong \frac{\omega r^2}{R} \ln(8R/r - 1/4), \quad \omega r/c_0 \ll 1, \quad (1)$$

где c_0 — местная скорость звука на границе вихревого тора. Из работ [1, 2] следует, что ω — увеличивается после прохождения вихревых образований через фронт ударной волны. Из наших экспериментов, а также по данным работы [2] следует, что величина r после взаимодействия вихревого кольца с ударной волной уменьшается. Этот факт в рамках указанного теоретического подхода не учитывался. Диаметр вихревого тора с точностью до 5% оставался постоянным. Таким образом, уменьшение скорости вихревого кольца следует рассматривать на основании анализа конкурирующих вкладов в выражение (1) члена ω и члена r^2 для конкретной постановки задачи.

В наших экспериментах качественно исследовалось наклонное встречное взаимодействие вихревого кольца с плоской ударной волной. Вихревые кольца значительно отклоняются от первоначального направления после движения взаимодействия с сильными ударными волнами ($M > 2$). При уменьшении числа M до единицы эффект становится крайне слабым. Отклонение вихрей от первоначального направления слабо зависит и от основных характеристик вихря (R , r , v_0).

В опытах наблюдалась неустойчивость вихревого кольца после взаимодействия с ударной волной при скоростях $v_0 > v_*$, где $v_* \cong \cong 150$ м/с. При этом на фронте ударной волны появлялись хаотические возмущения. Вихрь после взаимодействия становился сильно турбу-

лентным, или даже наблюдалось его разрушение. На рис. 2, в, соответствующем этому типу взаимодействия: 1 — вихрь до прохождения, 2 — ударная волна, 3 — вихрь после прохождения ударной волны. Видно, что механизм взаимодействия имеет иной характер по сравнению со случаем $v_0 < v_*$ (рис. 2, а, б).

Переход к критическому режиму легче происходит для более слабых ударных волн. При увеличении диаметра вихря критическое взаимодействие последнего с ударной волной начинается с меньших значений M . Наблюдалось также интенсивное излучение звуковых возмущений при этом режиме взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ribner H. S. The sound generated by interaction of a single vortex with a shock wave. Proceedings of Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, 1957. Stanford University Press, pp. 2—22.
2. Dosanja D. S., Weeks T. M. AIAA, 1965, 2, 8—21.
3. Singh P. «Indian J. Phys.», 1972, 46, N 3, 151—160.
4. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М., 1973.

Поступила в редакцию
1,6 1977 г.
Кафедра
молекулярной физики