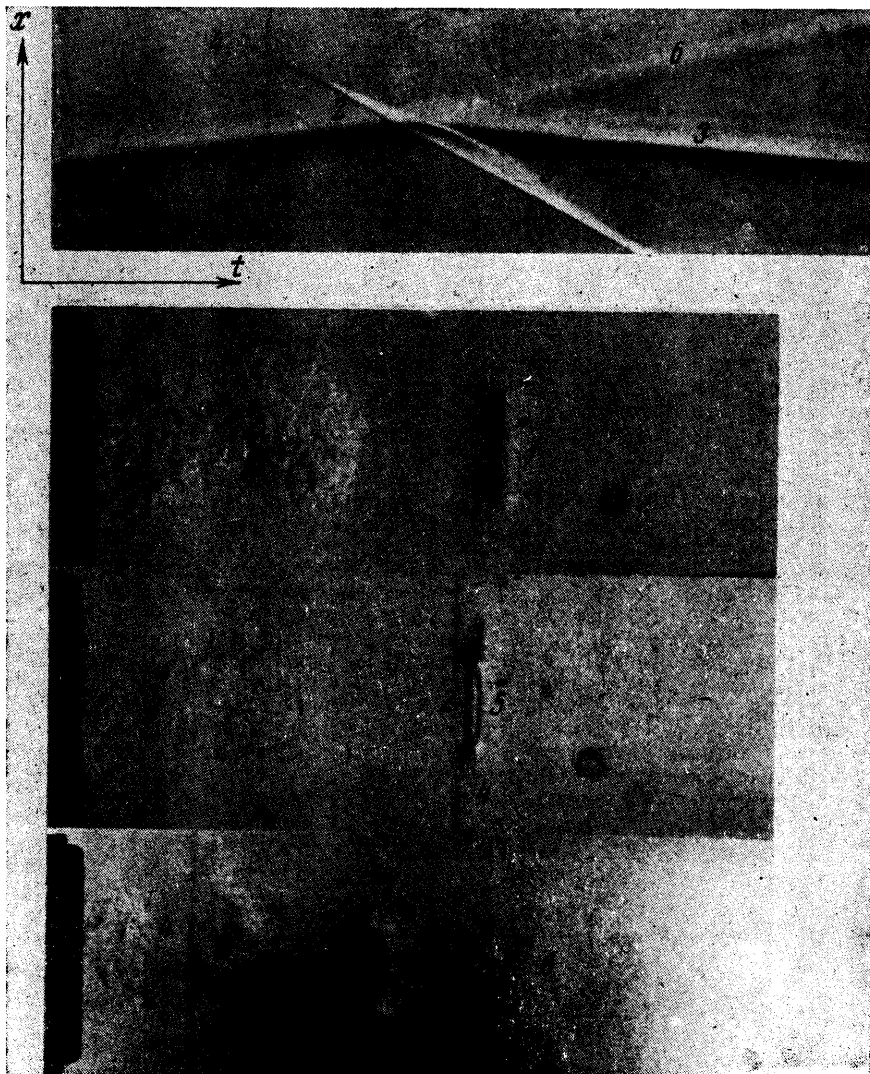


УДК 534.222.2

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА
С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ****М. А. ИБРАГИМ, А. И. КЛИМОВ, Ф. В. ШУГАЕВ***(Москва)*

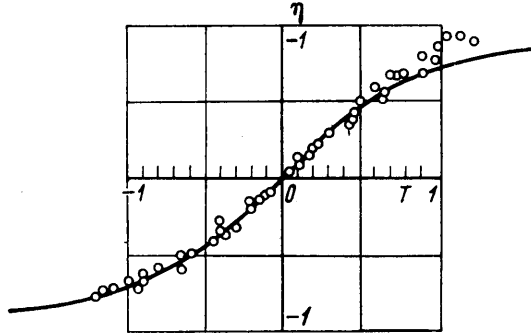
В [1, 2] исследовалось прохождение одиночного прямолинейного вихря через ударную волну. Однако вопрос о деформации плоского фронта ударной волны при этом взаимодействии подробно не рассматривался. В данной работе теоретически и экспериментально изучено прохождение вихревого кольца через плоскую ударную волну.



Фиг. 1

Для получения вихревых колец использовался генератор, описанный в [3]. Генератор запускался сигналом пьезодатчика, расположенного на ударной трубе, квадратного сечения 28×28 мм². Генератор вихрей помещался в рабочей секции ударной трубы. Толкающим газом были азот или гелий. Рабочим газом служил воздух, давление которого в опытах изменялось от 0.01 до 0.1 МПа. В зависимости от применяемых диафрагм получались ударные волны с числами Маха (M) от 1.08 до 3.

Фотографирование проводилось при помощи прибора ИАБ-451 и фоторегистратора ЖФР. Источником света служила лампа ИФП-2000 или искровой разрядник с длительностью вспышки 1 мксек. В опытах получались вихри со скоростями v_0 от 50 до 180 м/сек, диаметром от 4 до 12 мм и отношением $R/r > 10$, где R — радиус вихревого кольца, r — радиус его поперечного сечения. Числа $Re = v_0 2R/\nu$ по оценкам составляют 500–1500. Все параметры вихрей рассчитывались по кадрам и фоторазверткам, обработка которых проводилась на микроскопе УИМ-1.



Фиг. 2

Типичные кадры и фоторазвертки показаны на фиг. 1. Вихрь 1 двигался навстречу ударной волне 4. В момент их встречи на фронте возникло возмущение 5. Сопутствующим этому взаимодействию было излучение звуковой волны 6, имеющей сложное распределение давления по фронту [2].

Во время взаимного сближения вихревого кольца и ударной волны последняя выгибалась в сторону, противоположную ее движению. Глубина этого прогиба зависит от числа M ударной волны, радиуса R и скорости v_0 вихревого кольца. Размер возмущенной области на фронте ударной волны несколько превышает диаметр вихревого кольца. До взаимодействия вихрь 1 двигался с постоянной скоростью v_0 , при этом его характерные размеры R и r оставались неизменными. После взаимодействия скорость вихревого кольца 4 относительно газа изменялась, причем в опытах со слабыми ударными волнами ($M < 1.5$) она уменьшалась, в опытах с более сильными ударными волнами, как правило, увеличивалась. Диаметр вихревого кольца после прохождения ударной волны оставался практически неизменным, а радиус вихревого тора уменьшался. Факт уменьшения скорости вихревого кольца противоречит теоретическим выводам работы [1], согласно которой вихревые образования должны усиливаться после прохождения ударной волны. Интересно отметить, что при достаточно больших скоростях вихря ($v_0 > 160$ м/сек) после взаимодействия с ударной волной происходила его сильная турбулизация, а вместо гладкой формы возмущения на плоском фронте ударной волны наблюдалось хаотическое возмущение.

Для теоретического описания движения ударной волны в поле вихря вдоль оси, проходящей через центр кольца, воспользуемся уравнением, полученным в [4]

$$A(M) \frac{dM}{dt} = \frac{3-\gamma}{2Mc_1} \frac{\partial v}{\partial a} \Big|_1 + \frac{(\gamma-1)}{\rho_1} \frac{\partial \rho}{\partial a} \Big|_1 +$$

$$+ \frac{(\gamma-1)M^2+2}{2M^2} \left[\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \rho}{\partial a} \Big|_2 - \frac{4H}{\gamma+1} \right] + \frac{\gamma-1}{2R_0} \frac{\partial S}{\partial a} \Big|_1,$$

$$A(M) = - \left[\frac{2(\gamma-1)(M^2-1)}{(\gamma-1)M^2+2} + 3 + M^2 \right] M^2 / (M^2-1)c_1$$

Здесь c_1 — скорость звука перед ударной волной, $\partial v/\partial a|_{1,2}$ — градиент скорости, $\partial \rho/\partial a|_{1,2}$ — градиент плотности, $\partial S/\partial a|_{1,2}$ — градиент энтропии, H — средняя кривизна ударной волны, индексы 1 и 2 обозначают соответственно области перед ударной волной и за ней, R_0 — универсальная газовая постоянная.

На основании результатов [2] считаем, что в поле вихря член с градиентом плотности во много раз меньше члена с градиентом скорости, для вычисления которого можно воспользоваться моделью вихревого кольца в несжимаемой жидкости [5]

$$v(x) = B/[1 + (x/R)^2]^{3/2}, \quad B = 2\pi v_0 / \ln(8R/r - 1/4), \quad R/r \gg 1$$

Здесь x — расстояние от центра вихревого кольца до ударной волны.

Из опытных данных следует, что величина члена с кривизной во все моменты времени (кроме очень поздних) составляет менее 10% величины члена с градиентом скорости. Пренебрегая дополнительно членом с градиентом плотности за фронтом ударной волны, получаем для чисел M , близких к единице

$$K(M) \frac{dM}{dt} c_1 = \frac{\partial v}{\partial x}, \quad K(M) = 4/(3 - \gamma)(M - 1)$$

В опытах изменение числа M ударной волны в области возмущения было невелико

$$M(t) = M_0 + \delta M(t), \quad \delta M(t)/M_0 < 0.1$$

Учитывая это, легко получить решение задачи. В лабораторной системе отсчета

$$\delta x(t) = -B c_1 R / [M c_1 + v_0]^2 \sqrt{[R / (M c_1 + v_0) t]^2 + 1} K(M)$$

На фиг. 2 построена теоретическая кривая в безразмерных переменных

$$\eta = -\delta x(t) K(M) [M c_1 + v_0]^2 / B c_1 R, \quad T = t(M c_1 + v_0) / R$$

и нанесены экспериментальные точки. Экспериментальные точки получены в результате измерения на микроскопе УИМ-1 амплитуды возмущения на временных фоторазвертках. Величина амплитуды возмущения определялась как разность между положением невозмущенного фронта и границей возмущения.

Нетрудно заметить хорошее качественное и количественное совпадение теории с опытом. Отметим некоторое расхождение расчетных и экспериментальных данных при $T > 1.5$. Это вызвано, по-видимому, тем, что при больших значениях T вклад члена, учитывающего кривизну, является существенным. Затухание возмущения на фронте ударной волны при больших значениях T исследовалось ранее [3]. Ошибки измерений опытных данных в рассматриваемой работе составляют менее 5%.

Поступила 16 V 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Ram G. S., Ribner H. S. The sound generated by interaction of a single vortex with a shock wave. In: Proc. Heat Transfer and Fluid. Mech. Inst. Pasadena, Calif., 1957. Stanford, Calif., Univ. Press., 1957.
2. Dosanjh D. S., Weeks T. M. Interaction of a starting vortex as well as a vortex street with a traveling shock wave. AIAA Journal, 1965, vol. 3, No. 2.
3. Климов А. И. Затухание возмущений на плоском фронте ударной волны. Вест. МГУ, Сер. физ., астрон., 1978, т. 19, № 1.
4. Шугаев Ф. В. О движении ударных волн в газе с переменными параметрами. Ж. вычислит. матем. и матем. физ., 1976, т. 16, № 3.
5. Ламб Г. Гидродинамика. М.—Л., Гостехиздат, 1947.