

[5] Ш и к А.Я. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 8. С. 40-43.

[6] Андо Т., Фаулер А., Стерн Ф. Электронные свойства двумерных систем. М.: Мир, 1985. 80 с.

Поступило в Редакцию
23 февраля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 10

26 мая 1990 г.

03; 04

© 1990

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН
КОЛЬЦЕВОГО РАЗРЯДА
С НЕПОДВИЖНЫМИ И ДВИЖУЩИМИСЯ ТЕЛАМИ

А.П. Б е д и н, М.Н. Т р о и ц к и й

На герметизированной баллистической установке БУ-88 (основные ее данные: общая длина - 25 м, длина барокамеры - 10.5 м, количество сечений фоторегистрации - 17, применяемые методы визуализации течения - простой теневой или теплеровский - в зависимости от целей исследования; фотографирование - ортогональное, его масштаб - 1 : 1) проведено исследование взаимодействия воронкообразных ударных волн (ВУВ) кольцевого разряда с неподвижной сферой и с движущимся со скоростью $V_M = 670 \pm 30$ м/с сегментальным диском. Диаметр сферы в экспериментах был $d = 27$ мм, диаметр диска, составленного из двух сегментов, - 28 мм (радиус лобового сегмента - $R = 41$ мм, кормового - 22 мм). Эксперименты проводились при атмосферном давлении и температуре 290 К. Исследовалось только осесимметричное взаимодействие, поэтому угол атаки сегментального диска в экспериментах выдерживался близким к нулевому.

Ударные волны (УВ) генерировались разрядником, представлявшим собой кольцо диаметром 100 мм с 24 разрядными промежутками, через которые разряжался конденсатор емкостью $C = 0.5$ мкФ. Электрическая схема разрядника была близка к схеме, описанной в работах [1, 2]. Пробой разрядника осуществлялся при напряжении $U = 30$ кВ. При пробое в разрядных промежутках возникали сфероидальные УВ. Взаимодействуя между собой, эти УВ образовывали тороидальную ударную волну, которая после схлопывания приобретала характерную воронкообразную форму с диском Маха в центре. Фотографирование воронкообразных ударных волн и процесса их взаимодействия с неподвижным и движущимся телами проводилось теплеровским методом. Образцы полученных в экспе-

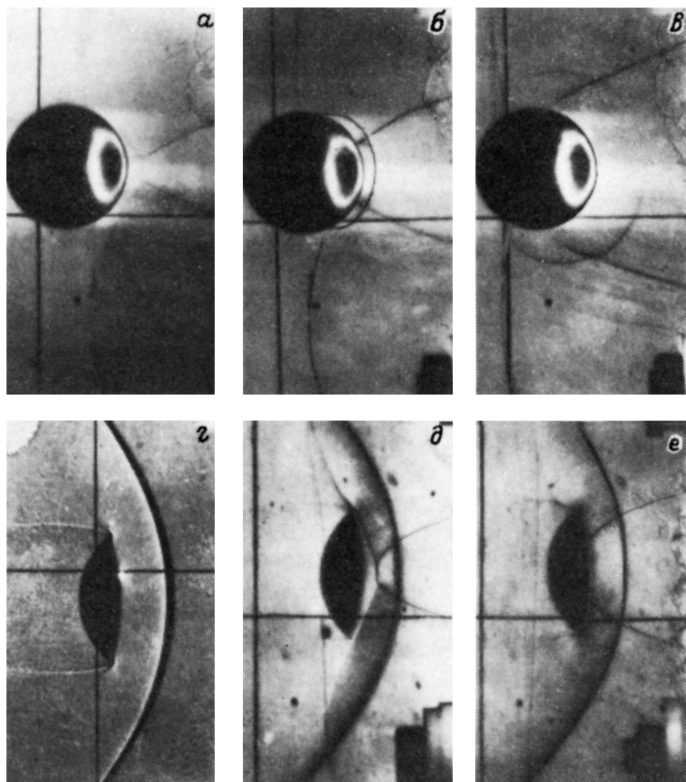


Рис. 1. Теневые фотографии воронкообразных ВУВ, взаимодействующих с неподвижной сферой и движущимся сегментальным телом.
 τ , мкс: 0 - г; 90 - а, д; 100 - е; 112 - б; 130 - в.

рименте фотографий представлены на рис. 1. Фотографии рис. 1, а-в демонстрируют процесс отражения ВУВ от неподвижной сферы, фотографии рис. 1, г-е - процесс взаимодействия такой же ВУВ с движущимся сегментальным диском.

Набор фотографий невозмущенной взаимодействием ВУВ, полученных с различными задержками τ ($\tau = 0$ соответствует началу разряда), позволил определить скорость распространения волны и установить, что различные ее участки движутся с различными скоростями. В частности установлено, что при $\tau \approx 175$ мкс скорость движения диска Маха превышает скорость движения торoidalной части ВУВ в осевом направлении, причем при $\tau \sim 60$ мкс - значительно. В этом легко убедиться, проведя расчеты по полученным в результате обработки фотографий эмпирическим соотношениям, связывающим числа Маха $M_d = \frac{V_d}{a}$ и $M_T = \frac{V_T}{a}$ с време-

нем τ (V_d - скорость распространения диска Маха, V_T - скорость распространения тороидальной части ВУВ в осевом направлении):

$$M_d = \frac{6.4 \tau^{-0.02(\tau-57)}}{(\tau-57)^{0.2}} + 1,$$

$$M_T = \frac{23}{\tau} + 1,$$

где τ в микросекундах.

При проведении экспериментов по взаимодействию ВУВ с неподвижной сферой последняя располагалась соосно с разрядником так, чтобы расстояние между ее лбом и плоскостью электродов x_M было равным 37 мм. В экспериментах с движущимся вдоль оси разрядника сегментальным диском расстояние между лбом модели и плоскостью электродов в момент фотографирования составляло ту же величину 37 мм. Тороидальный фронт ВУВ достигал плоскости с координатой $x_M = 37$ мм в момент времени $\tau \approx 70$ мкс диск Маха - при $\tau \approx 90$ мкс. Соответствующие этим моментам времени числа M были $M_T \approx 1.3$ и $M_d \approx 2.7$. Диаметр диска Маха при $x_M = 37$ мм достигал ~ 8 мм.

Взаимодействие ВУВ со сферой начиналось с соприкосновения тороидальной ее части с поверхностью сферы. Линия соприкосновения при осесимметричном взаимодействии представляла собой окружность. Коснувшись сферы, УВ отражалась от ее поверхности. Отражение сначала носило регулярный характер, а затем по мере расширения области взаимодействия - маховский. При достижении диском Маха поверхности сферы и последующем его отражении возникала вторая область взаимодействия, отделенная от первой зоной невозмущенного течения. Со временем обе области сливались в одну, при этом образовывалась единая эллипсоидальная поверхность отраженной воронкообразной ударной волны. О характере изменения поверхности отражения во времени можно судить по данным рис. 2, на котором показан относительный отход от сферы отраженной ВУВ - $\frac{s}{d}$ на лучах с различными углами наклона к осевому - φ в разные моменты времени. Рассмотрение рис. 2 показывает, что зависимость $\frac{s}{d} = \frac{s}{d}(\varphi)$ имеет максимум, который с течением времени смещается в сторону больших φ .

Взаимодействие ВУВ с летящим со сверхзвуковой скоростью сегментальным диском проходило в три этапа. Первый из них сводился к встречному взаимодействию ВУВ с отошедшей от диска головной ударной волной. В процессе этого взаимодействия происходило отражение и преломление ударных волн, а также возникновение контактных разрывов. Отраженные волны (3 и 4 на рис. 3) принимали при этом форму деформированных ВУВ и головной УВ.

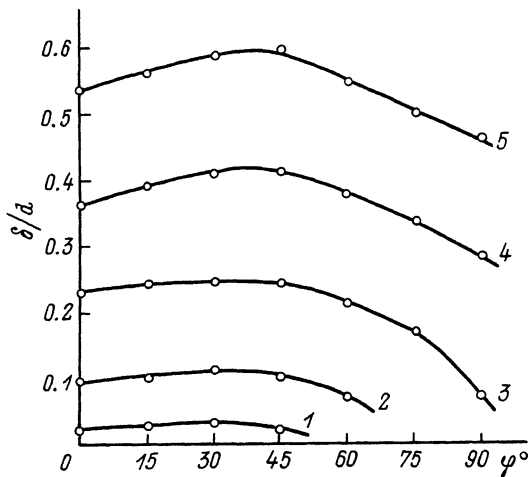


Рис. 2. Положение и форма отраженной от сферы воронкообразной УВ при τ , мкс: 1 - 105, 2 - 110, 3 - 120, 4 - 130, 5 - 140.

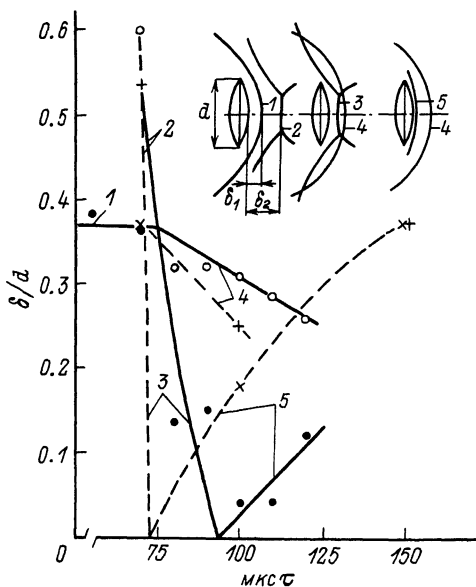


Рис. 3. Изменение во времени осевого положения УВ при взаимодействии ВУВ с сегментальным телом.

Волна 3, перемещаясь в ударном слое модели, достигала поверхности лобового сегмента, касаясь его своей тороидальной частью. С момента касания начинался второй этап взаимодействия - отражение ВУВ-3 от сегментального диска. Процесс отражения, как и в случае неподвижной сферы, охватывал сначала тороидальную часть ВУВ-3, затем отражался диск Маха. Отраженные от тела волны, взаимодействуя между собой, порождали единую эллипсоидальную поверхность отражения 5, скорость распространения которой была выше скорости движения отраженной волны 4. Это приводило к догонному взаимодействию УВ-5 с УВ-4 - третьему этапу взаимодействия ВУВ с сегментальным диском. Конечным его результатом было восстановление головной ударной волны в невозмущенном виде.

Перечисленные этапы взаимодействия хорошо просматриваются на графике, устанавливающем зависимость между положением головной УВ, диска Маха и отраженных УВ на оси модели - δ_i и временем (рис. 3). Темными точками на графике показано положение ближайшей к телу УВ, светлыми - дальней ($x_M = 37$ мм). Для $x_M = 17$ мм положение УВ, ближайшей к телу отмечено косыми крестами, а дальней - прямыми. Цифрами отмечены номера ударных волн. Приведенные на графике данные позволяют судить о характере изменения осевых скоростей УВ в процессе взаимодействия. В частности, при $x_M = 37$ мм в системе координат, связанной с моделью, $V_1 = 0$, $V_2 = V_M + V_d \approx -1600$ м/с, $V_3 \approx -1300$ м/с (в среднем), $V_4 \approx -50$ м/с, $V_5 \approx 150$ м/с. В случае $x_M = 17$ мм скорости выше, а длительность процесса взаимодействия - меньше, чем при $x_M = 37$ мм. Кратковременность взаимодействия, длящегося несколько десятков микросекунд в обоих случаях, указывает на малую величину импульса, получаемого моделью при воздействии на нее ВУВ.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Бережецкая Н.К., Большаков Е.Ф., Дорофеев А.А. и др. // Препринт ФИАН, № 244, М., 1983, 28 с.
- [2] Бархударов Э.М., Бережецкая Н.К., Большаков Е.Ф. и др. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 6. С. 1219-2222.

Поступило в Редакцию
22 февраля 1990 г.