

При $\sigma R = 1$, например, максимальное значение достигается при $\alpha = \frac{1}{4}\pi$. На фиг. 2 приведены графики функций

$$F_1(\alpha) = \frac{\sigma R}{K(\cos \alpha) + \sigma R K(\sin \alpha)}, \quad F_2(\alpha) = \frac{1}{K(\cos \alpha) + \sigma R K(\sin \alpha)}$$

для $\sigma R = 0.1, 1$ и 10 .

Нетрудно показать, что при $\sigma R < 1$ максимум $F_1(\alpha)$ будет лежать на отрезке $(\frac{1}{4}\pi, \frac{1}{2}\pi)$, а при $\sigma R > 1$ — на отрезке $(0, \frac{1}{4}\pi)$.

При фиксированном угле α разность потенциалов будет возрастать от 0 при $\sigma R = 0$ до e при $\sigma R \rightarrow \infty$.

Полный ток при этом будет изменяться от значения

$$J = \frac{Q H_0 \sigma}{c R_0 K(\cos \alpha)}$$

соответствующего короткому замыканию, когда $\sigma R = 0$, до нуля при $R \rightarrow \infty$, когда внешняя цепь разомкнута.

Поступила 26 III 1964

ЛИТЕРАТУРА

- Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. Гостехиздат, 1958.

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЯВЛЕНИЙ В УДАРНЫХ ТРУБАХ

М. К. Березкина, А. Н. Семенов, М. П. Сыщиков

(Ленинград)

Ударная труба может быть использована для изучения ряда нестационарных задач газовой динамики. Одной из таких задач является возникновение и развитие течения около модели, когда течение создается проходящей ударной волной. Процесс формирования течения, состоящий из отражения и дифракции ударных волн, образования головной ударной волны перед телом, возникновения и развития пограничного слоя, формирования течения в следе за телом, представляет интерес для теории нестационарных газодинамических процессов, а также имеет большое практическое значение. Поскольку длительность процессов очень мала, необходима специальная регистрирующая аппаратура. В настоящей статье дается описание простой ударной трубы, ее оборудования и методов, применяющихся для исследования такого рода процессов.

1. Конструкция и оборудование ударной трубы. Схематическое изображение экспериментальной установки дано на фиг. 1. Труба имеет прямоугольное поперечное сечение 150×50 мм. Длина канала 8 м, длина камеры 2 м. Канал трубы заканчивается баком, отделяемым от канала тонкой диафрагмой.

Канал трубы неподвижно закреплен на станине. Камера высокого давления и бак могут перемещаться вдоль нее. Это перемещение и одновременно уплотнение диафрагмы (между баком и каналом, между каналом и камерой) осуществляются двумя грузовыми винтами с опорами на торцевых стенках бака и камеры.

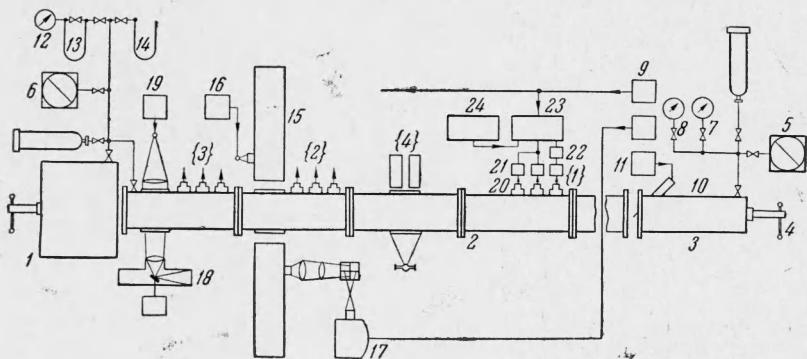
Канал и камера трубы перед наполнением их рабочими газами откачиваются форвакуумными насосами типа ВН-1М и ВН-2 до давления $1 \cdot 10^{-2}$ мм Hg. Насос ВН-1М снабжен газобалластным устройством, позволяющим производить откачу газов с парами воды. Начальное давление газа в канале трубы регистрируется термопарным вакуумметром ВТ-2 (диапазон измеряемых давлений от $1 \cdot 10^{-2}$ до 1 мм Hg), масляным манометром (от 1 до 50 мм Hg) и ртутным манометром при давлениях свыше 50 мм Hg.

Разрыв диафрагмы между каналом и камерой трубы осуществляется иглой, приводимой в движение электромагнитом. Наличие иглы позволяет с хорошей точностью воспроизводить начальные условия в камере ударной трубы.

Канал трубы состоит из ряда заменяемых секций, длиной 1 м каждая. Секции оборудованы станциями измерения скорости фронта ударной волны.

Для получения теневых картин потока применяются простая теневая фотография, искровая скоростная съемка и специальная схема получения временных разверток, использующая теневой прибор ИАБ-451 и ждущий фотoreгистратор ЖФР-1.

2. Измерение скорости фронта ударной волны. На большинстве станций скорость распространения ударной волны в канале трубы определяется по времени, в течение которого волна проходит расстояние между двумя пьезодатчиками давления.



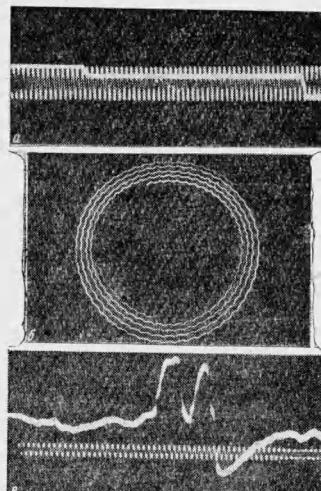
Фиг. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — бак, 2 — канал, 3 — камера, 4 — грузовой винт, 5, 6 — насосы, 7 — вакуумметр, 8 — манометр, 9 — питание реле фотоаппаратов, 10 — игла, 11 — питание иглы, 12 — термопарный вакуумметр, 13, 14 — масляный и ртутный манометры, 15 — теневой прибор ИАБ-451, 17 — скоростной фотогенератор ЖФР-1, 18 — установка для скоростной съемки, 19 — искровой генератор, 20 — пьезодатчики, 21 — катодные повторители, 22 — усилитель, 23 — осциллограф ОК-17М, 24 — генератор стандартных сигналов ГСС-6, {1}, {2}, {3} — пьезоэлектрические станции, {4} — фотоэлектрические станции

Каждая станция состоит из трех пьезодатчиков. Усиленный сигнал первого пьезодатчика запускает развертку осциллографа ОК-17М. Предварительный запуск ОК-17М позволяет рассматривать фронты импульсов давления на одном из лучей осциллографа. Кругизна фронта импульса давления определяется размерами пластины титаната бария и скоростью ударной волны, идущей мимо пьезоэлемента. Второй луч осциллографа ОК-17М служит для регистрации «меток времени» с генератора стандартных сигналов ГСС-6. Точность определения интервала времени порядка 1%. Типичная осциллограмма сигналов с пьезодатчиками показана на фиг. 2, а.

Широко известен метод определения скорости ударных волн в ударных трубах при помощи световых экранов [1]. Каждый световой экран представляет собой небольшую спиральную систему, состоящую из источника света, двух объективов и ножа. Не менее точным, но более простым способом измерения скорости является фотоэлектрический метод, в основе которого лежит простой теневой метод регистрации ударных волн.

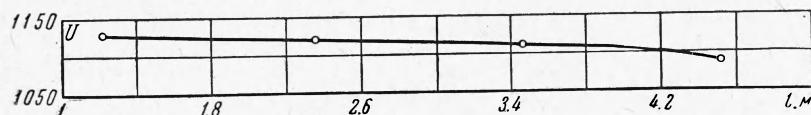
Схема содержит два основных элемента: точечный источник света и два фотоумножителя. В качестве точечного источника света применяется шаровая ртутьно-кварцевая лампа сверхвысокого давления ДРШ-100 с размером дуги 0.3×0.3 мм, работающая в постоянном режиме. Светоприемниками служили фотоумножители ФЭУ-19 или ФЭУ-33. Фотоумножитель вместе с катодным повторителем заключается в металлический светонепроницаемый кожух, торец которого имеет регулируемую щель УФ-1. Выбор режима работы ФЭУ осуществляется варьированием напряжения питания (стабилизированный выпрямитель ВС-16), шириной и высотой щели. Режим контролируется по величине тока на нагрузке ФЭУ. Для снижения собственных шумов фотоумножителя напряжение питания ФЭУ выбирается минимальным (600—700 в). Ширина щели составляет несколько сотых долей миллиметра, высота — порядка 5 мм.

Для измерения промежутка времени между импульсами с двух фотоумножителей был применен хронограф ИВ-22, в схему которого внесены некоторые изменения. Положительный импульс с первого ФЭУ, пройдя первый канал широкополосного усилителя, подается на «пуск» хронографа и запускает спиральную развертку. По-



Фиг. 2. Осциллограммы для измерения скорости фронта ударной волны: а — пьезодатчиками, б — фотоумножителями, в — форма сигнала на ФЭУ

ложительный импульс со второго ФЭУ, пройдя через второй канал усилителя, попадает в схему гасящего тиатрона. Отрицательный импульс с выхода тиатрона схемы подается через высоковольтную разделительную емкость непосредственно на модулятор лампы 23ЛО51 хронографа и гасит развертку. Схема гасящего тиатрона полностью повторяет схему пускового тиатрона хронографа. На фиг. 2, б, приведена осциллограмма, на которой в конце спирали виден разрыв, соответствующий импульсу гасящего тиатрона.



Фиг. 3. Скорость фронта ударной волны по длине трубы

Форма импульса, который возникает на фотоумножителе при движении теневого изображения фронта ударной волны по щели ФЭУ, показана на фиг. 2, в. Импульс зарегистрирован на осциллографе ОК-17М, частота меток времени $f = 5 \text{ мс}$, скорость ударной волны $U = 1100 \text{ м/сек}$, начальное давление азота $p_0 = 200 \text{ мм Hg}$.

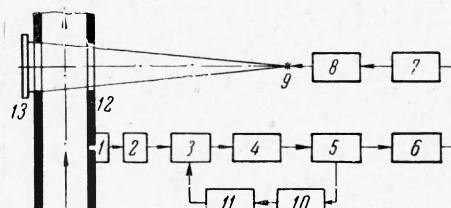
В случае расходящегося пучка света базой измерения скорости является величина l , которая определяется формулой

$$ml = (L_1 + L_2) + \frac{h}{d} (L_1 - L_2) \quad (m = \frac{a + b}{a})$$

Здесь a — расстояние от источника света до оси трубы, b — расстояние от оси трубы до плоскости щелей фотоумножителей, h — полуширина канала трубы, $(L_1 + L_2)$ — расстояние между щелями ФЭУ. В случае симметричного расположения щелей ($L_1 = L_2$) база определяется выражением $l = (L_1 + L_2) / m$.

Фиг. 3 показывает результаты измерения скорости фронта ударной волны на четырех станциях вдоль трубы. Каждая точка графика дает среднеарифметическое значение скорости для двадцати экспериментов при постоянном значении начальных параметров в камере и канале трубы: $p_4 = 15 \text{ atm}$, водород; $p_0 = 200 \text{ мм Hg}$, азот. Среднее отклонение измеренных значений от средних величин, изображенных на фиг. 3, не превышает 1%.

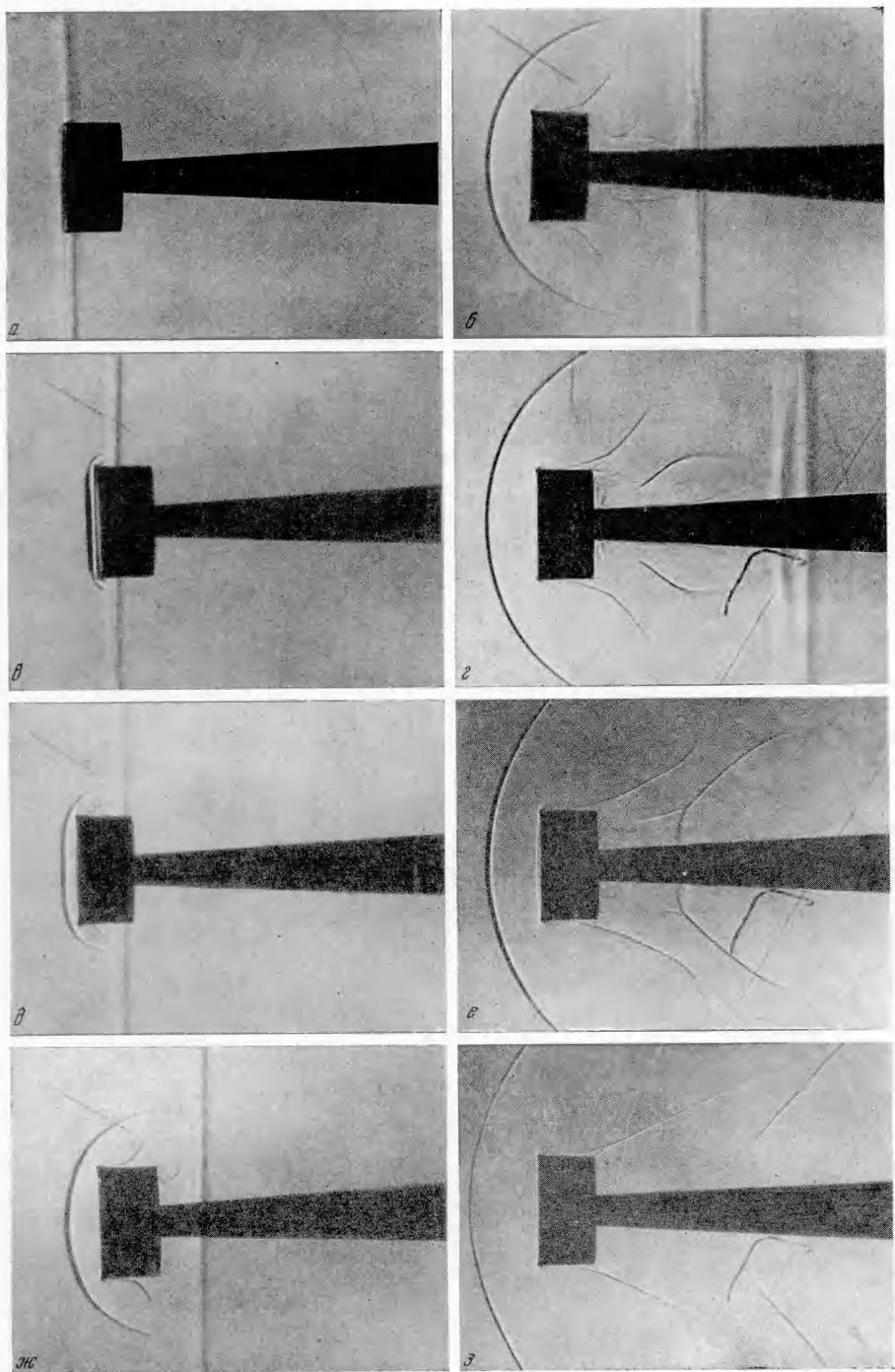
3. Методы съемки потока газа около модели. Для изучения протекания процесса во времени использовались простая теневая фотография и схема синхронизации искрового источника света, позволяющая получать спектры обтекания модели в точно определенные моменты времени. Серию теневых фотографий получают в ряде опытов, сохраняя начальные условия в камере и канале ударной трубы постоянными. Точность воспроизведения процесса весьма велика.



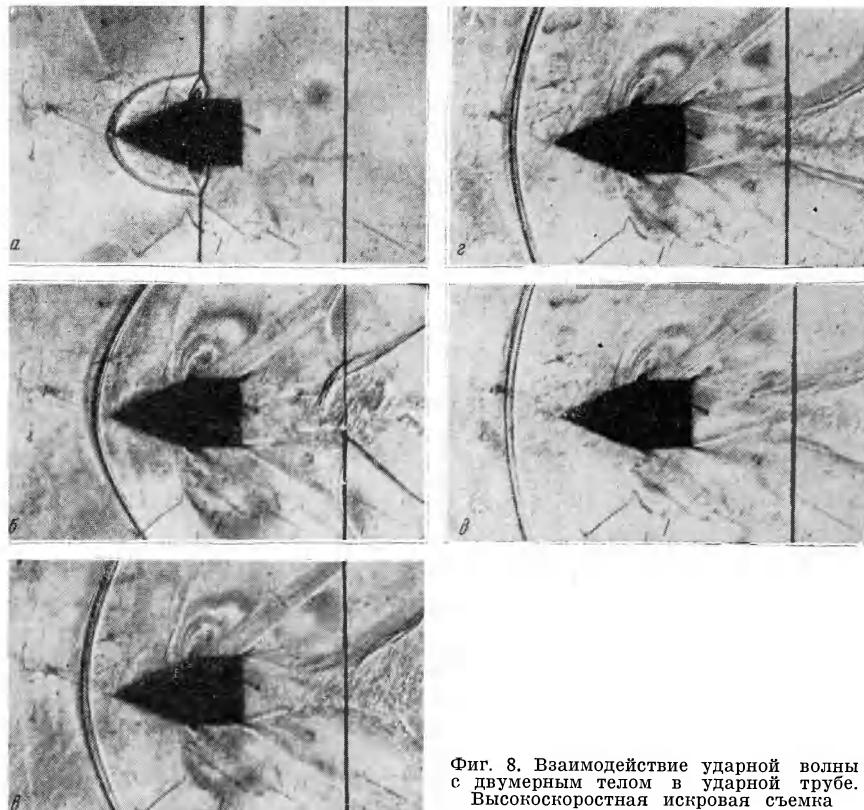
Фиг. 4. Схема получения простых теневых фотографий: 1 — пьезодатчик, 2 — фазоинверсный каскад, 3 — усилитель, 4 — фантагенстрон, 5 — катодный повторитель, 6 — дифференцирующая цепочка, 7 — блок формирования и усиления, 8 — выходной каскад на тиатроне, 9 — разрядный промежуток, 10 — фазоинверсный усилитель, 11 — блок однократного срабатывания схемы, 12 — ударная труба, 13 — фотопластинка

Схема получения простых теневых фотографий дана на фиг. 4. Она состоит из фотопластиинки, точечного источника света и блока синхронизации. Искровый разряд длительностью около 1 мксек происходит при разряде емкости $0.01\text{--}0.02 \mu\text{ф}$ через искровой промежуток и тиатрон ТГИ-4-325/16. Параллельно искровому промежутку включается сопротивление 150 ом . Конденсатор заряжается до напряжения 16 кв . Синхронизация искрового источника света с изучаемым процессом осуществляется при помощи пьезодатчика через фантагенстронную схему задержки. Сигнал от пьезодатчика, пройдя фазоинверсный каскад и усилитель, поступает в блок регулируемой задержки (фантагенстрон, катодный повторитель, дифференцирующая цепочка). Время задержки можно изменять в пределах от 20 до 1500 мксек на четырех диапазонах. После блока формирования и усиления импульс подается на выходной тиатрон; импульс от последнего используется для поджига высоковольтного тиатрона, через который происходит разряд основной осветительной искры. Фазоинверсный усилитель и блок однократного срабатывания схемы предохраняют фотопластиинку

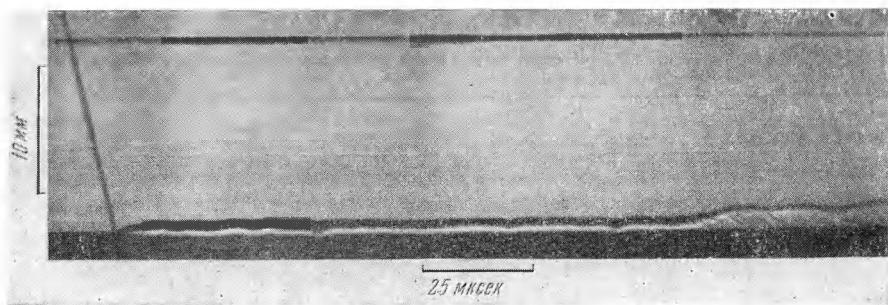
зоны. После блока формирования и усиления импульс подается на выходной тиатрон; импульс от последнего используется для поджига высоковольтного тиатрона, через который происходит разряд основной осветительной искры. Фазоинверсный усилитель и блок однократного срабатывания схемы предохраняют фотопластиинку



Фиг. 5. Взаимодействие ударной волны с цилиндром в ударной трубе. Простая искровая съемка



Фиг. 8. Взаимодействие ударной волны с двумерным телом в ударной трубе.
Высокоскоростная искровая съемка



Фиг. 10. Изменение отхода головной ударной волны во времени. Метод (x, t) -разверток

ПМТФ, № 5

Градуировка фантастронной схемы показала, что зависимость времени задержки от сопротивления линейна. Величина задержки воспроизводится с точностью $\pm 1\%$. Градуировка фантастрона периодически проверяется при помощи какого-либо измерителя времени.

В качестве иллюстрации на фиг. 5 представлено несколько фотографий, показывающих развитие течения около цилиндра в азоте при числе Maxa ударной волны $M_1 = 3.67$. Фиг. 6 показывает полученную в результате обработки такой серии фотографий временную характеристику положения головной ударной волны, возникающей перед цилиндром (число Maxa спутного потока $M_2 = 1.51$). По этим же фотографиям могут быть получены данные об изменении во времени формы ударной волны, возникновении и развитии пограничного слоя и многие другие характеристики процесса.

Более целесообразно создание искровой установки, при помощи которой можно получить некоторое число последовательных моментальных снимков одного и того же явления. В литературе описаны подобные схемы [2, 3]. В случае, когда последовательные вспышки искры осуществляются в едином разряднике, оптическая схема фоторегистрирующего устройства наиболее проста. Поэтому была использована схема, изображенная на фиг. 7.

Свет от искрового источника размером 0.3 мм собирается объективом 10. Исследуемый объект располагается в сходящемся конусе лучей вблизи поверхности этого объектива. Объектив камеры 6 (Индустар-51) и вращающееся зеркало дают изображение снимаемого объекта на пленке. Пленка неподвижна и располагается на внутренней стороне цилиндрической камеры на расстоянии 187 мм от оси вращения зеркала. Изображения объекта разделяются вращающимся зеркалом, плоскость которого составляет 45° с оптической осью системы. За время одного оборота зеркала изображение объекта на пленке поворачивается на 360° . Зеркало приводится во вращение электродвигателем мощностью 0,1 квт с максимальным числом оборотов $1 \cdot 10^4$ мин $^{-1}$.

Используя редуктор, можно получить скорость вращения зеркала до $6 \cdot 10^4$ мин $^{-1}$, при этом линейная скорость перемещения изображения по пленке составит 1200 м/сек. Питание электродвигателя камеры и регистрация скорости вращения осуществлялись при помощи пульта прибора СФР-2М.

Фиг. 7. Схема высокоскоростной искровой съемки: 1 — пьезодатчик, 2 — входной тиатрон, 3 — задающий мультивибратор, 4 — блокинг-генератор, 5 — блок пересчетной схемы, 6 — многоканальный усилитель, 7 — искровое устройство, 9 — источник света, 10 — объектив, 11 — ударная труба, 12 — фотографическая камера, 13 — входной объектив камеры, 14 — вращающееся зеркало, 15 — мотор

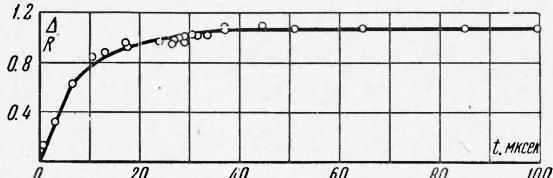
Используя редуктор, можно получить скорость вращения зеркала до $6 \cdot 10^4$ мин $^{-1}$, при этом линейная скорость перемещения изображения по пленке составит 1200 м/сек. Питание электродвигателя камеры и регистрация скорости вращения осуществлялись при помощи пульта прибора СФР-2М.

На основе блока управляющих импульсов, задающих частоту высоковольтных импульсов искрового осветительного устройства, взята схема многоканального электронного синхронизатора, предложенная в работе [4]. Здесь используется разомкнутая пересчетная схема с рядом вспомогательных устройств. Частота съемки точно устанавливается в пределах от $5 \cdot 10^3$ до $4 \cdot 10^4$ кадров в секунду при общем числе кадров, равном 5. Число кадров по желанию может быть увеличено.

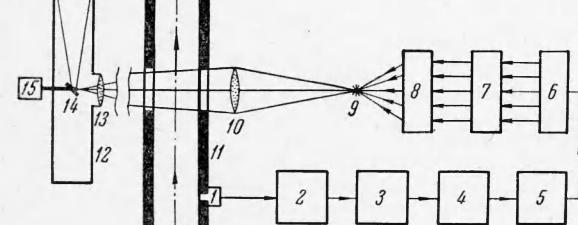
Запускающий сигнал подается на входной тиатрон блока. С нагрузки тиатрона на снимается сигнал для запуска триггера, который запирает лампу, управляющую мультивибратором. После этого начинает работать задающий мультивибратор, причем генерируемая им частота может легко изменяться в требуемых пределах. Импульсы, получаемые на выходе задающего мультивибратора, формируются и усиливаются по схеме блокинг-генератора.

Эти импульсы с крутыми фронтами и амплитудой порядка от 150 до 200 в поступают в блок пересчетной схемы, где они разделяются.

Разделенные импульсы усиливаются каждый в своем канале и подаются в искровое устройство.

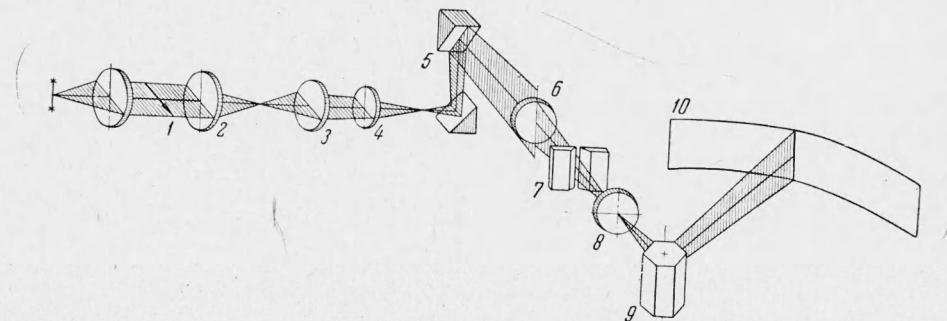


Фиг. 6. Изменение отхода головной ударной волны во времени. Метод простой искровой съемки



Искровые фотографии, полученные на описанной выше установке для скоростного фотографирования, приведены на фиг. 8. Сняты спектры обтекания двумерной модели в азоте при числе Маха потока $M_2 = 1.5$. Частота съемки 20 000 кадров/сек, коэффициент увеличения 0.25, диаметр изображения поля на пленке 23 мм.

Съемка процессов в ударной трубе требует ждущей регистрирующей аппаратуры. Это связано с тем, что ударная волна и поток в трубе возбуждаются вследствие разрыва диафрагмы, время раскрытия которой может изменяться в относительно широких пределах, в то время как длительность процессов мала и требует точной



Фиг. 9. Оптическая схема непрерывной развертки: 1 — модель, 2 — объектив ИАБ-451, 3—4 — объективы переходной оптической системы, 5 — поворотные зеркала, 6 — входной объектив ЖФР-1, 7 — щель ЖФР, 8 — внутренний объектив ЖФР, 9 — зеркальный двенадцатигранник, 10 — фотопленка

синхронизации. Именно поэтому практически трудно использовать для скоростной съемки процессов в трубе фоторегистратор СФР. Прибор ЖФР-1 не требует синхронизации начала явления с положением врачающегося зеркала. Скорость регистрации может варьироваться в пределах от 1500 до 4000 м/сек при скорости вращения зеркального двенадцатигранника от 3000 до 80 000 мин⁻¹.

Метод оптического соединения теневого прибора ИАБ-451 и фоторегистратора ЖФР-1 изложен в работе [5]. Однако там рассчитывается дополнительная система, предусматривающая полное использование поля прибора ИАБ-451 при коэффициенте увеличения 0.1. Для регистрации процесса образования головной ударной волны, когда положение ударной волны изменяется в пределах нескольких миллиметров, была использована схема, приведенная на фиг. 9.

Изображение модели строится объективом 2 теневой установки и объективом 3 (Индустар-51) дополнительной системы вблизи передней фокальной плоскости объектива 4 (РО2-2). Две плоские зеркала 5 поворачивают изображение объекта на 90° из горизонтальной плоскости в вертикальную. Входной объектив ЖФР-1 дает изображение объекта в плоскости, вертикальной регулируемой щели, которая вырезает из этого изображения узкую полоску шириной до 0.01 мм. Объектив 8 при помощи врачающегося зеркала 9 строит изображение этой полоски на фокальной поверхности, где располагается фотопленка 10. При конструировании переходной системы необходимо предусмотреть возможность точного перемещения объектива 4, так как фокусировку изображения на пленке удобнее всего производить перемещением именно этого объектива. В качестве источника света были использованы импульсные лампы ИФК-20 и ИФК-50, работающие в номинальном режиме. При заданных параметрах оптической системы в кадре ЖФР-1 получается изображение небольшой части поля ИАБ-451, но коэффициент увеличения $m \sim 1$.

На фиг. 10 приведена (x, t) -развертка, показывающая изменение во времени положения головной ударной волны перед сферой диаметром 10 мм в углекислом газе при числе Маха ударной волны $M_1 = 6.4$.

По (x, t) -разверткам можно получить целый ряд данных о потоке в трубе и о формировании течения около модели. По ним можно определить скорость падающей ударной волны, скорость потока в горячей и холодной зонах, скорость контактной поверхности, длительность течения газа между ударной волной и контактной поверхностью, числа Маха потока по величине отхода головной ударной волны в однородных зонах течения. Можно определять также время, в течение которого головная ударная волна достигает стационарного положения, и зависимость этого времени от параметров ударной волны, создающей движение газа около модели.

В заключение считаем необходимым отметить, что разработка отдельных узлов ударной трубы и скоростной фотокамеры выполнена Я. П. Андреевым, а разработка радиоэлектронной аппаратуры — И. Г. Парийским, которых авторы благодарят.

Поступила 14 III 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Хеншелл Б. Некоторые аспекты использования ударных труб в аэродинамических исследованиях. Сб. «Ударные трубы», Изд. иностр. лит., М., 1962.
2. Саламандра Г. Д. и др. Некоторые методы исследования быстропротекающих процессов и их применение к изучению формирования детонационной волны. Изд-во АН СССР, М., 1960.
3. Сахаров А. А. Высокоскоростная киносъемка. Госкиноиздат, М., 1950.
4. Дунаев Ю. А., Мишин Г. И. Баллистическая труба для измерения коэффициентов сопротивления тел в свободном полете. Изв. АН СССР, ОТН, механика и машиностроение, 1959, № 2.
5. Дубовик А. С., Сицинская Н. М. О применении высокоскоростных фотокамер совместно с теневыми установками. Приборы техн. эксперимента, 1962, № 5.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ЗВУКОВЫХ ВОЛН В НАСЫЩЕННОМ ПАРЕ ВОДЫ ПРИ ВЫСOKИХ
ДАВЛЕНИЯХ**

В. И. Авдонин, И. И. Новиков, Е. П. Шелудяков

(Новосибирск)

В работе [1] были приведены результаты измерений скорости звука в насыщенных парах воды в интервале температур 50—250°С. В последнее время удалось довести измерения до температуры 350°С. Для этих целей была реконструирована экспериментальная установка, описанная в [1, 2], разработана новая экспериментальная установка, также основывающаяся на методе стоячих волн.

В реконструированной установке использовался новый акустический резонатор, изготовленный вместе с гребнем из нержавеющей стали длиной 803.75, внутренним диаметром 65 и толщиной стенки 10 м.м. В гребне и прилегающей к нему стенке трубы резонатора были просверлены отверстия диаметром 1.5 м.м с шагом 10 м.м для заполнения резонатора насыщенным паром.

Новый автоклав, рассчитанный на работу с высокими температурами и большими давлениями, изготовлен в виде цилиндра из нержавеющей стали IX18H9T длиной 124.0, внутренним диаметром 12.0 и толщиной стенки 1.5 см.

Баллон автоклава на одном конце имеет отверстие, закрывающееся крышкой с фланцевыми соединениями, а на втором конце герметически заварен. Оба фланца баллона съемочные. Первый фланец крепится к баллону на резьбе, а второй фланец служит крышкой и крепится к первому двенадцатью болтами диаметром 20 м.м из стали повышенной прочности.

Поддержание постоянной температуры в термостате обеспечивалось двумя нагревательными элементами — основным и вспомогательным (до реконструкции имелся один нагреватель). Основной нагреватель питается стабилизированным напряжением, мощность которого варьируется от 0 до 6 квт в зависимости от поддержания заданного температурного уровня в термостате.

Второй автоматически регулирующийся нагреватель устанавливается на мощность от 0 до 0.5 квт. Регулируемая мощность второго нагревателя составляет не более 10% от мощности основного нагревателя. Это позволяет использовать для регулирования термостата малоинерционное реле. Датчиком регулирования температуры термостатирующей жидкости служит ртутный контактный термометр, расположенный вблизи второго нагревательного элемента. В зависимости от величины температурного уровня использовался один из набора контактных термометров с различными пределами регулирования.

Термостатирующая жидкость в термостате интенсивно перемешивалась четырьмя мешалками пропеллерного типа, приводимыми во вращение четырьмя электромоторами, расположенными на крышке термостата.

Простая и надежная система регулирования термостата позволяла поддерживать температуру в нем с точностью до 0.02°С. Надежность регулирования термостата подтверждается и тем, что 4 медно-константановые термопары, расположенные в автоклаве для измерения градиента температуры в нем по длине и по радиусу, не дали разности в показаниях температуры с точностью до 0.02°С.

Измерение температуры в автоклаве производилось 100-омным платиновым термометром сопротивления и четырьмя медно-константановыми термопарами на потенциометрах ПМС-48 и ППТН-1 с точностью до 0.02°С.

При измерениях ниже комнатной температуры использовался водно-ледяной термостат. От комнатной температуры до 120°С термостатирующей жидкостью служило минеральное масло с малой вязкостью, а от 120°С и выше — масло «Вапор Т».