

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

**ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М. И. КАЛИНИНА**

Кафедра гидроаэродинамики

**ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ
НА МАЛОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ**

Описание лабораторной работы

Ленинград

1 9 7 7

**ЛЕНИНГРАДСКИЙ ордене ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени Н.И.КАЛИНИНА**

Кафедра гидроаэродинамики

**Измерение скорости ударной волны и определение
чувствительности пьезоэлектрических датчиков
давления на малой ударной трубе**

**О П И С А Н И Е
лабораторной работы**

**Ленинград
- 1977**

Работа утверждена кафедрой гидроаэродинамики и
рекомендована к изданию методической комиссией Физико-
Механического факультета.

Составитель: Руслан Леонидович Петров

Измерение скоростей ударной волны и определение
чувствительности пьезоэлектрических датчиков давления на
малой ударной трубе.

Описание лабораторной работы.

Подписано к печати 14/У1-77 г.

Усл.печ.л.2,0

Заказ 80

Тираж 300

Бесплатно

Ротапринт Ленинградского политехнического института
имени М.И.Каданина

195251, Ленинград, Политехническая ул., 29

1. ДОПУЩЕНИЯ И ОСНОВНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ТЕОРИИ УДАРНОЙ ТРУБЫ

Ударная труба - простая и удобная экспериментальная установка, позволяющая изучать течение газов с большой скоростью и высокой температурой и нашедшая широкое применение в исследованиях по сверхзвуковой и дозвуковой газовой динамике, физике плазмы, спектроскопии, химической кинетике [1 - 4] .

Простейшая ударная труба представляет собой канал постоянного сечения круглой или прямоугольной формы, разделенный диафрагмой на две части: камеру высокого давления и канал низкого давления (рис.1). Камера высокого давления имеет заглушенный торец; канал низкого давления может быть перекрыт или иметь открытый конец, выходящий в ресивер.

В канале, наполненном "рабочим" газом, создается давление P_1 . Камера высокого давления заполняется "толкающим" газом, имеющим в момент разрыва диафрагмы давление P_2 .

После разрыва диафрагмы в ударной трубе возникает нестационарное течение.

При расчете этого течения в ударной трубе по простейшей элементарной теории полагают:

- 1) диафрагма раскрывается мгновенно и в тот же момент образуется ударная волна, распространяющаяся вниз по каналу, а к торцу камеры высокого давления движется волна разрежения;
- 2) движение газа в ударной трубе одномерное, так что параметры газа зависят только от времени t и координаты X ;
- 3) течение газа в ударной трубе адиабатическое - за время эксперимента газ не успевает обменяться энергией со стенками ударной трубы;
- 4) газ, движущийся в ударной трубе, рассматривается как идеальный (невязкий) газ;
- 5) отношение теплоемкостей газов $\kappa = \frac{C_p}{C_v}$ принимается постоянным, газы совершенны, т.е. состояние газов описывается уравнением Клапейрона.

На рис.1 в плоскости $X-t$ показаны характерные области течения, возникающие в ударной трубе с заглушенным каналом после разрыва диафрагмы. Там же показано распределение давле-

ния ρ , скорости потока U и температур T газа по длине труб для двух моментов времени:

- а) ударная волна не достигла торца канала (момент t_1),
- б) ударная волна отразилась от торца канала (момент t_2),

Пунктиром на $X-t$ диаграмме отмечена контактная поверхность (поверхность соприкосновения рабочего и толкающего газов).

Как следует из приведенных далее формул (4)–(7), условие однородности начальных параметров газа в камере и канале позволяет в элементарной теории считать скорости ударной волны, контактной поверхности постоянными и выдать на $X-t$ диаграмме между ударной волной и волной разрежения области с однородными параметрами газа.

Области с постоянными параметрами отмечены на $X-t$ диаграмме индексами I – 5.

Следует отметить характерные особенности течения газа в различных областях $X-t$ диаграммы. Падающая ударная волна движется со скоростью U_1 по рабочему газу, имеющему скорость звука a_1 . За падающей ударной волной резко возрастает температура T , давление p и плотность ρ газа и возникает спутный поток, скорость которого U_2 при больших числах $M_1 = \frac{U_1}{a_1}$ ударной волны сравнима со скоростью ударной волны.

Число $M_2 = \frac{U_2}{a_2}$ спутного потока при неограниченном увеличении числа M_1 стремится к пределу $M_{2,max} = \sqrt{2/K_1(K_1-1)}$, для двухатомного газа равному $M_{2,max} = 1,89$.

По элементарной теории число $M_3 = \frac{U_3}{a_3}$ потока в области 3 неограниченно возрастает при стремлении отношения $\frac{p_2}{p_1}$ давлений на диафрагме к бесконечности, так как при расширении толкающего газа температура T_3 падает, скорость звука a_3 стремится к нулю, а число M_1 и скорость U_3 остаются конечными.

Приведем вывод основного соотношения элементарной теории ударной трубы, связывающего величину отношения $\frac{p_2}{p_1}$ давлений на диафрагме с числом M_1 ударной волны, и покажем, как могут быть определены параметры газа в различных областях, указанных на рис. 1 [5, стр. 171–173]

Представим отношение $\frac{p_2}{p_1}$ в виде $\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_2}{p_3} \cdot \frac{p_3}{p_2} \cdot \frac{p_2}{p_1}$.

(1)

Запишем условие

$$u_2 = u_3, \quad p_2 = p_3 \quad (2)$$

равенства скоростей и давлений рабочего и толкающего газов на контактной поверхности.

Движение в волне разрежения изэнтропическое, так что отношение $\frac{p_4}{p_3}$ давлений может быть выражено через отношение $\frac{a_4}{a_3}$ скоростей звука следующим образом

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{a_4}{a_3} \right)^{\frac{2k_4}{k_4-1}} \quad (3)$$

Одномерное нестационарное движение газа, возникающее в волне разрежения, описывается уравнением Эйлера и уравнением неразрывности [5, стр.160-170]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\quad (5)$$

Введем для баротропного газа функцию \tilde{P} , положив

$$\tilde{P} = \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho(p) a(p)}. \quad (6)$$

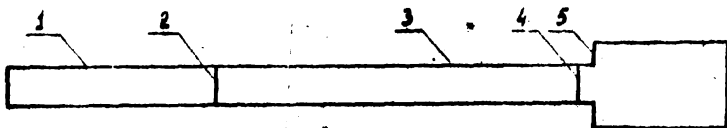
Тогда система уравнений (4), (5) может быть преобразована к виду

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t}(\tilde{P} + u) + (u + a) \frac{\partial}{\partial x}(\tilde{P} + u) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\tilde{P} - u) + (u - a) \frac{\partial}{\partial x}(\tilde{P} - u) = 0. \end{array} \right. \quad (7)$$

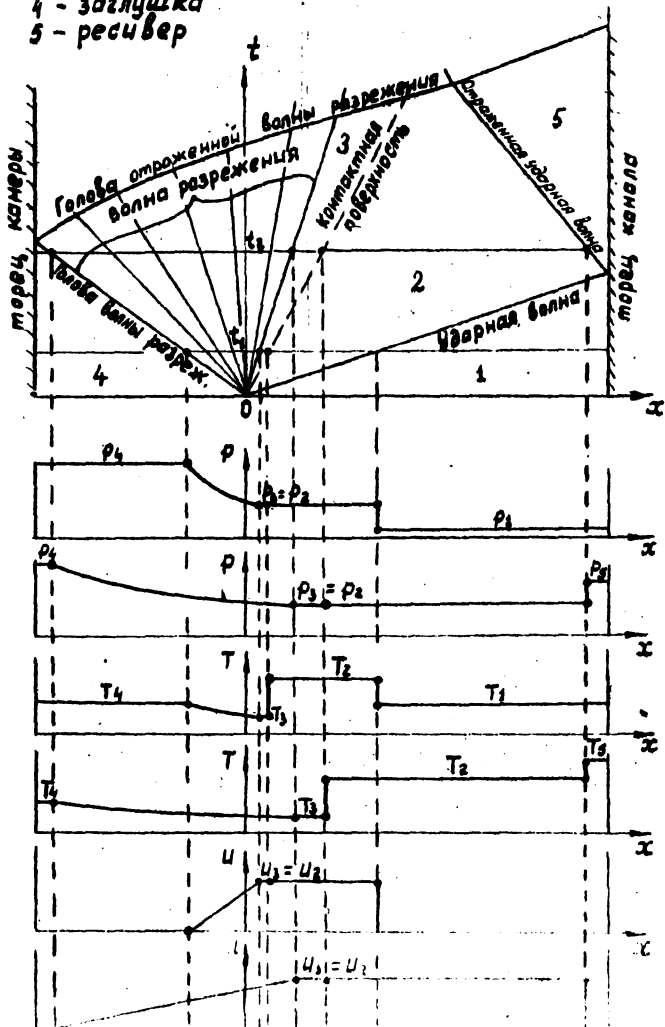
$$\quad (8)$$

Левые части уравнений (7), (8) представляют собой одномерные индивидуальные производные от величин $\tilde{P} + u$ и $\tilde{P} - u$. Равенство нулю производной от величин $\tilde{P} + u$ говорит о сохранении величины $\tilde{P} + u$ в точке, движущейся со скоростью $u + a$. Равенство нулю производной от величин $\tilde{P} - u$ означает сохранение величины $\tilde{P} - u$ в точке, движущейся со скоростью $u - a$. Величины $r = \tilde{P} + u$ и $s = \tilde{P} - u$ носят наименование инвариантов Римана. Для совершенного газа с постоянным отношением теплоемкостей имеем $\tilde{P} = \frac{2}{k-1} a$, так что

$$r = u + \frac{2}{k-1} a, \quad s = -u + \frac{2}{k-1} a. \quad (9)$$



- 1 - камера высокого давления
- 2 - диафрагма
- 3 - канал низкого давления
- 4 - заглушка
- 5 - ресивер



Отметим, что через каждую точку $X-t$ плоскости могут быть проведены 2 кривые, называемые характеристиками первого и второго семейства и описываемые уравнениями

$$\frac{dy}{dt} = U + a \quad (\text{характеристика первого семейства}), \quad (10)$$

$$\frac{dy}{dt} = U - a \quad (\text{характеристика второго семейства}). \quad (11)$$

На характеристиках первого семейства сохраняется величина

$$r = U + \frac{2}{k-1} a. \quad (12)$$

На характеристиках второго семейства сохраняется величина

$$s = U + \frac{2}{k-1} a. \quad (13)$$

Двум семействам характеристик, существующих в плоскости $X-t$, соответствуют две системы плоских волн, распространяющихся относительно стенок ударной трубы со скоростями $U+a$ и $U-a$.

Согласно уравнениям (10), (11), наклон касательной к характеристике первого семейства в некоторой точке плоскости $X-t$ определяется суммой скорости U потока и скорости a звука в выбранной точке, наклон касательной к характеристике второго семейства - разность тех же величин. На рис. I прямолинейные границы волны разрежения образованы характеристиками второго семейства.

Так как все характеристики первого семейства централизованной волны разрежения (одна из этих характеристик образует голову отраженной волны разрежения) проходят через область 4 (рис. I) с однородными параметрами газа, то соответствующий инвариант Римана $U + \frac{2}{k-1} a$ постоянен во всей области нестационарного течения, т.е. $U + \frac{2}{k-1} a = \text{const}$.

Определив константу из условий в области 4, где $U=0$, $a=a_4$, получим $U + \frac{2}{k-1} a = \frac{2}{k-1} a_4$. Положив $U=U_3$, $a=a_3$, будем иметь

$$U_3 + \frac{2}{k-1} a_3 = \frac{2}{k-1} a_4 \quad (14)$$

Подчеркнем, что характеристики второго семейства в волне разрежения - прямые линии в плоскости $X-t$, т.к. на каждой характеристике постоянны скорость U и скорость звука a .

Действительно, на каждой характеристике второго семейства выполняется условие (14) и условие $u - \frac{2}{K_4-1} a = c$, откуда следует неизменность на характеристике величин u и a

Скорость спутного потока $u_2 = u_3$ за ударной волной может быть представлена как следующая функция числа M_1 ударной волны [5, стр.150-153.]

$$u_2 = \frac{2}{K_1+1} \left(M_1 - \frac{1}{M_1} \right) a_1 \quad (15)$$

Отношение $\frac{p_2}{p_1}$ давлений на фронте ударной волны связано с числом M_1 соотношением [5, стр. 147]

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2K_1 M_1^2}{K_1+1} - \frac{K_1-1}{K_1+1} \quad (16)$$

Выразив по формуле (14) скорость звука a_3 через u_3 , учитывая условия (2) и формулы (3), (14) - (16), представим отношение $\frac{p_2}{p_1}$ как функцию числа M_1 и параметров $K_1, K_4, \frac{a_1}{a_4}$ в виде

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{2K_1}{K_1+1} M_1^2 - \frac{K_1-1}{K_1+1} \right) \left[1 - \frac{K_4-1}{K_1+1} \left(M_1 - \frac{1}{M_1} \right) \frac{a_1}{a_4} \right]^{\frac{2K_4}{K_4-1}} \quad (17)$$

При бесконечно большом отношении давлений на диафрагме предельное число M_{1max} определяется по формуле

$$M_{1max} \approx \frac{K_1+1}{K_4-1} \cdot \frac{a_4}{a_1} = \frac{K_1+1}{K_4-1} \sqrt{\frac{K_4}{K_1} \cdot \frac{T_4}{T_1}} \quad (18)$$

следующей из соотношения (17) при условии $\frac{p_2}{p_1} \rightarrow \infty, M_1 \gg 1$. В частности, оценка предельного числа M_1 по формуле (18) для различных комбинаций толкающего и рабочего газов дает следующие результаты:

"воздух-воздух"

$$K_1 = K_4 = \frac{7}{5}, \mu_1 = \mu_4 = 29 \quad \begin{cases} \frac{T_4}{T_1} = 1, M_{1max} \approx 6, \\ \frac{T_4}{T_1} = 4, M_{1max} \approx 12, \end{cases}$$

"гелий-воздух"

$$K_4 = \frac{5}{3}, K_1 = \frac{7}{5}, \mu_4 = 4, \mu_1 = 29 \quad \begin{cases} T_4/T_1 = 1, M_{1max} \approx 10,6, \\ T_4/T_1 = 4, M_{1max} \approx 21,1, \end{cases}$$

"водород-азот"

$$K_4 = K_1 = \frac{7}{5}, \mu_4 = 2, \mu_1 = 28 \quad \begin{cases} T_4/T_1 = 1, M_{1max} \approx 22,2, \\ T_4/T_1 = 4, M_{1max} \approx 44,4. \end{cases}$$

Для получения интенсивных ударных волн необходимо обеспечить возможно большее значение отношений $\frac{p_2}{p_1}$ и $\frac{a_2}{a_1}$.

При фиксированных значениях p_1 и a_1 увеличение отношений $\frac{p_2}{p_1}$ и $\frac{a_2}{a_1}$ достигается использованием высоких уровней давления толкающего газа, применением толкающих газов и их нагревом. Для нагрева толкающих газов используются различные методы (взрыв в камере высокого давления горючей смеси, нагрев стенок камеры, электрический разряд, нагрев ударными волнами в многодиафрагменных ударных трубах).

2. РАСЧЕТ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ В УДАРНОЙ ТРУБЕ ПО ЗАДАННОМУ ОТНОШЕНИЮ ДАВЛЕНИЙ НА ДИАФРАГМЕ; ПОСТРОЕНИЕ X-t ДИАГРАММЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОВЕДЕННОГО РАСЧЕТА

Расчет выполняется для ознакомления с методикой определения параметров течения в ударной трубе, предварительной оценки параметров газа в различных областях течения при подготовке измерительных систем, построения X-t диаграммы течения, а также для оценки времени существования газа с однородными параметрами, не искаженными возмущением, приходящим к измерительной секции от торца камеры высокого давления или торца канала.

Задаются следующие начальные данные для расчета:

длина камеры высокого давления - L_2 (м),

длина канала низкого давления - L_1 (м),

расстояние от диафрагмы до измерительной секции - L (м),

давление толкающего газа в камере высокого давления - p_2 (бар),

давление рабочего газа в канале низкого давления - p_1 (бар),

отношение удельных теплоемкостей толкающего газа - K_2 ,

отношение удельных теплоемкостей рабочего газа - K_1 ,

температура толкающего газа - T_2 (°K),

температура рабочего газа - T_1 (°K),

молекулярный вес толкающего газа - μ_2 (г/моль),

молекулярный вес рабочего газа - μ_1 (г/моль).

Скорость звука a в газе рассчитывается по формуле

$$a = \sqrt{\frac{KRT}{\mu}} \quad (19)$$

где $R = 848 \cdot g \frac{m^2}{сек^2 \cdot град \cdot моль}$ - универсальная газовая постоянная

ная, g - ускорение свободного падения.

При использовании в камере высокого давления или канале смеси S газов задаются относительные парциальные давления

$$\bar{p}_i = \frac{p_i}{p_{см}} \quad , \quad \text{так что} \quad \sum_{i=1}^s \bar{p}_i = p_{см} = 1 \quad .$$

Тогда скорость звука $a_{см}$ в смеси будет равна

$$a_{см} = \sqrt{K_{см} \cdot R_{см} \cdot T} \quad , \quad (20)$$

где

$$R_{см} = \frac{R}{M_{см}} \quad , \quad (21)$$

$$K_{см} = \frac{c_{pсм}}{c_{vсм}} = \frac{\sum_{i=1}^s \frac{K_i}{K_i - 1} \bar{p}_i}{\sum_{i=1}^s \frac{1}{K_i - 1} \bar{p}_i} \quad , \quad (22)$$

$$M_{см} = \sum_{i=1}^s \bar{p}_i M_i \quad , \quad (23)$$

M_i - молекулярный вес i -го компонента смеси.

Для расчета отношения K_i удельных теплоемкостей компонентов смеси может быть использовано соотношение

$$K_i = \frac{\gamma_i + 2}{\gamma_i} \quad , \quad (24)$$

где γ_i - число степеней свободы атомов в молекуле газа.

Число M_1 ударной волны для известных начальных параметров p_1, ρ_1, a_1, d_1 рабочего и толкающего газов находится по формуле (17) методом последовательных приближений.

Расчет параметров за падающей и отраженной ударной волной может быть выполнен по формулам [3, стр.140-14Р, 146-147]

$$\frac{p_2}{p_1} = p_{21} = \frac{1}{\alpha_1 \beta_1} (M_1^2 - \beta_1) \quad , \quad (25)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \rho_{21} = \frac{1 + d_1 p_{21}}{d_1 + p_{21}} \quad , \quad (26)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = T_{21} = \frac{p_{21} (d_1 + p_{21})}{1 + d_1 p_{21}} \quad , \quad (27)$$

$$\frac{a_2}{a_1} = a_{21} = \sqrt{T_{21}} \quad , \quad (28)$$

$$\frac{u_2}{a_1} = u_{21} = \frac{p_{21} - 1}{K_1 \sqrt{\beta_1 (d_1 p_{21} + 1)}} \quad , \quad (29)$$

$$M_2 = \frac{U_2}{a_2} = \frac{U_{21}}{a_{21}}, \quad (30)$$

$$M_3 = \frac{U_3}{a_3}, \quad (31)$$

$$\frac{a_3}{a_4} = a_{34} = \left[\frac{P_1}{P_4} \cdot \frac{P_2}{P_1} \right]^{\beta_4}, \quad (32)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = P_{21} = P_{52} \cdot P_{21} = P_{21} \cdot \frac{P_{21}(d_1+2)-1}{P_{21}+d_1}, \quad (33)$$

$$\frac{P_5}{P_1} = P_{51} = P_{52} \cdot P_{21} = P_{21} \cdot \frac{1+d_1 P_{52}}{d_1 + P_{52}}, \quad (34)$$

$$\frac{T_5}{T_1} = T_{51} = T_{52} \cdot T_{21} = T_{21} \cdot P_{52} \cdot \frac{d_1 + P_{52}}{1 + d_1 P_{52}}, \quad (35)$$

$$\frac{|U_{\text{омп}}|}{a_1} = \frac{2P_{21} + d_1 - 1}{V(d_1+1)(d_1 P_{21} + 1)}, \quad (36)$$

$$\frac{|U_{\text{омп}}|}{U_1} = \frac{2P_{21} + d_1 - 1}{d_1 P_{21} + 1}, \quad (37)$$

где $\alpha = \frac{K+1}{K-1}, \quad (38)$

$$\beta = \frac{K-1}{2K} \quad (39)$$

Правильность расчета некоторых параметров проверяется по формулам

$$P_{21} = T_{21} \cdot P_{21}, \quad (40)$$

$$P_{51} = T_{51} \cdot P_{51}, \quad (41)$$

$$a_{34} = 1 - \frac{K_4 - 1}{2} \cdot \frac{U_3}{a_4}, \quad (42)$$

$$M_3 = \frac{1}{K_4 \beta_4} \left[\left(\frac{P_1}{P_4} \cdot \frac{P_2}{P_1} \right)^{\beta_4} - 1 \right]. \quad (43)$$

Для построения $X-t$ диаграммы течения в ударной трубе необходимо знать координаты характерных точек, определяющих положение границ областей I-5 с однородными параметрами газа.

$X-t$ диаграмма строится в безразмерных координатах

$$\bar{X} = \frac{X}{L_4}, \quad \bar{t} = \frac{a_4}{L_4} \cdot t, \quad (44)$$

где X - расстояние от диафрагмы до выбранного сечения удар-

ной трубы,

t — время, отсчитанное от момента разрыва диафрагмы.

При разрыве диафрагмы влево от нее (см. рис.1) распространяется волна разрежения, которая затем отражается от дна камеры высокого давления и смещается вниз по потоку, догоняя контактную поверхность и ударную волну. Если до появления волны разрежения параметры потока в областях 1-5 (рис.1) были постоянными, то с приходом первого возмущения поток становится существенно нестационарным.

Волна разрежения нарушает однородность параметров течения поэтому при проведении экспериментов необходимо знать момент появления головы отраженной волны разрежения в определенном сечении ударной трубы. Положение в плоскости $x-t$ головы отраженной волны разрежения характеризуется точками А, В, С, D, E (рис.2).

Точка А имеет координаты $\bar{x}_A = -1$, $\bar{t}_A = 1$

Безразмерные координаты точки В рассчитываются по формулам [3, стр.65-66]

$$\bar{x}_B = (M_3 - 1) \left(1 + \frac{K_4 - 1}{2} M_3 \right) \frac{3 - K_4}{2(K_4 - 1)}, \quad (45)$$

$$\bar{t}_B = \left(1 + \frac{K_4 - 1}{2} M_3 \right) \frac{K_4 + 1}{2(K_4 - 1)}, \quad (46)$$

где $M_3 = \frac{U_3}{a_3}$, причем скорость $U_3 = U_2$ находится по формуле (15), скорость звука a_3 — по формуле (14).

Определяя координаты точки С, запишем систему уравнений прямых ОС и ВС в форме

$$\begin{cases} \bar{x}_C - \bar{x}_B = \frac{U_3 + a_3}{a_4} (\bar{t}_C - \bar{t}_B), & (47) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \bar{x}_C = \frac{U_3}{a_4} \bar{t}_C. & (48) \end{cases}$$

Решая систему уравнений (47), (48) относительно координат \bar{x}_C , \bar{t}_C , получим [3, стр 67-68]

$$\bar{x}_C = M_3 \left(\frac{U_3 + a_3}{a_4} \bar{t}_B - \bar{x}_B \right) = \frac{2 M_3 a_4^2 - 1}{2 a_4^2}, \quad (49)$$

$$\bar{t}_C = \frac{a_4}{U_3} \bar{x}_C = (M_3 + 1) \bar{t}_B - \frac{a_4}{a_3} \bar{x}_B = 2 \bar{t}_B. \quad (50)$$

В режиме без отраженной ударной волны (рис.2,а) координаты

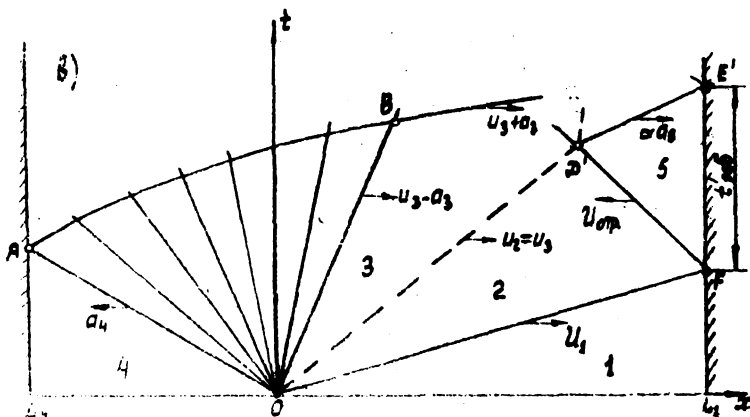
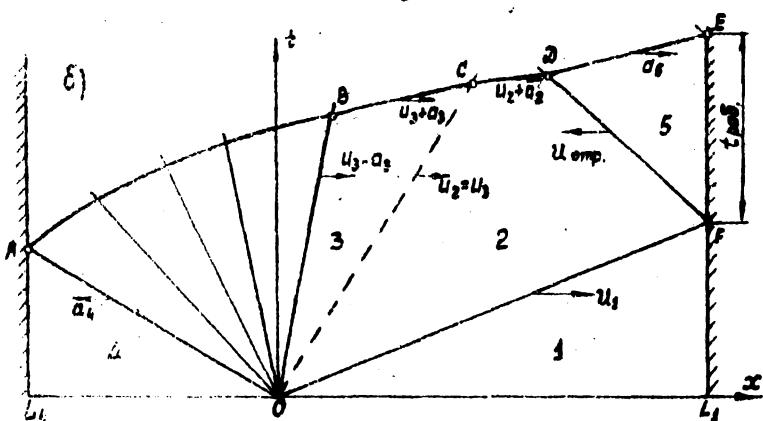
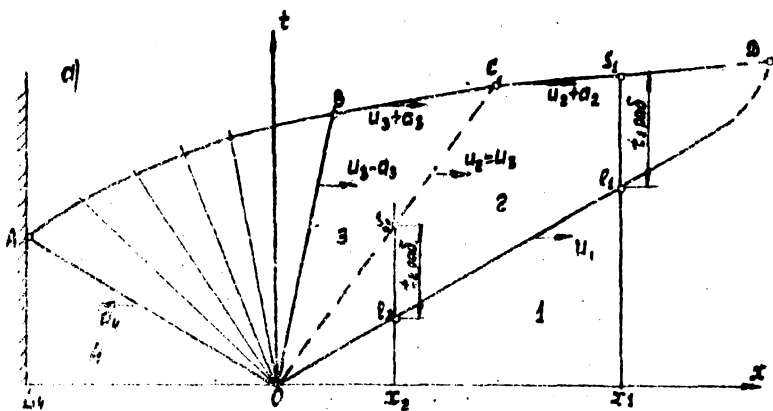


Рис. 2

ты точки D (точки пересечения прямых OD и CD) будут

$$\bar{x}_D = \frac{U_1}{U_2 + \alpha_2 U_1} \cdot \left(\frac{U_2 + \alpha_2}{\alpha_4} \cdot \bar{t}_c - \bar{x}_c \right), \quad (51)$$

$$\bar{t}_D = \frac{1}{U_1} \cdot \frac{\alpha_4}{\alpha_1} \cdot \bar{x}_D = \frac{\alpha_4}{U_2 + \alpha_2 U_1} \cdot \left(\frac{U_2 + \alpha_2}{\alpha_4} \cdot \bar{t}_c - \bar{x}_c \right). \quad (52)$$

При больших значениях координат \bar{x}_D , \bar{t}_D положение точки D на X-t диаграмме может быть показано условием (рис.2,а)

Определим рабочее время $\bar{t}_{\text{раб}}$ в режиме, рассмотренном на рис.2,а, как интервал времени между приходом в заданное сечение ударной трубой скачка уплотнения и следующего за ним возмущения, изменяющего параметры газа в области 2.

Для координаты \bar{x}_1 , удовлетворяющей неравенству $\bar{x}_c \leq \bar{x}_1 \leq \bar{x}_D$, рабочее время $\bar{t}_{\text{раб}}$ ограничивается приходом в заданное сечение головы отраженной волны разрежения и рассчитывается как разность ординат точек S_1 , S_2 по формуле

$$\bar{t}_{\text{раб}1} = \bar{t}_c + \frac{\alpha_4}{U_2 + \alpha_2} \cdot (\bar{x}_1 - \bar{x}_c) - \frac{\alpha_4}{U_1} \cdot \bar{x}_1. \quad (53)$$

Если заданная координата \bar{x}_2 оказывается в интервале $\bar{x}_D \leq \bar{x}_2 \leq \bar{x}_c$, то рабочее время $\bar{t}_{\text{раб}}$ ограничивается приходом в сечение \bar{x}_2 контактной поверхности, так что

$$\bar{t}_{\text{раб}2} = \bar{x}_2 \cdot \left(\frac{\alpha_4}{U_2} - \frac{\alpha_4}{U_1} \right). \quad (54)$$

В случае с отраженной ударной волной возможны два варианта (рис.2,б и 2,в).

В первом варианте отраженная ударная волна встречается в точке D с головой отраженной волной разрежения. Определяя координаты точки D как координаты точки пересечения прямых CD и DF, будем иметь

$$\bar{x}_D = \frac{|U_{\text{отн}}|}{|U_{\text{отн}}| + (U_2 + \alpha_2)} \left[\bar{x}_c + (t_c) \cdot \frac{U_1}{|U_{\text{отн}}|} \cdot \frac{U_2 + \alpha_2}{U_1} \bar{t}_c - \frac{U_2 + \alpha_2}{\alpha_4} \cdot \bar{t}_c \right], \quad (55)$$

$$\bar{t}_D = (\bar{x}_c - \bar{x}_D) \cdot \frac{\alpha_4}{|U_{\text{отн}}| + U_1} + \bar{t}_c \cdot \frac{\alpha_4}{|U_{\text{отн}}| + U_2 + \alpha_2} \cdot \left(U_1 \cdot \frac{|U_{\text{отн}}|}{U_1} - \bar{x}_c + \frac{U_2 + \alpha_2}{\alpha_4} \bar{t}_c \right). \quad (56)$$

Если учесть, что точка F имеет координаты

$$\bar{x}_F = \bar{L}_1, \quad \bar{t}_F = \frac{a_1}{u_1} \cdot L_1 \quad (57)$$

Если при расчете координаты \bar{x}_2 по формуле (55) оказывается $\bar{x}_2 > \bar{x}_D$, это означает, что отраженная ударная волна встречает контактную поверхность раньше, чем голову отраженной волны разрежения. Координаты точки D' встречи отраженной ударной волны с контактной поверхностью находят, решая совместно систему уравнений прямых OD' и FD' .

Координаты точки D' будут

$$\bar{x}_{D'} = \frac{u_2}{|u_{отп}| + u_2} \left(1 + \frac{|u_{отп}|}{u_1} \right) \bar{L}_1, \quad (58)$$

$$\bar{t}_{D'} = \bar{x}_{D'} \cdot \frac{a_2}{u_2} = \frac{a_2}{|u_{отп}| + u_2} \left(1 + \frac{|u_{отп}|}{u_1} \right) \bar{L}_1. \quad (59)$$

В режиме с отраженной ударной волной будем считать рабочее время равным промежутку времени от момента прихода к торцу канала ударной волны до момента прихода к торцу возмущения, нарушающего однородность параметров газа в области 5. Тогда рабочее время $\bar{t}_{раб}$ у торца канала для режима, представленного на рис.2,б, будет равно разности ординат точек E и F . Учитывая, что голова отраженной волны разрежения движется к торцу канала со скоростью a_s , рассчитаем рабочее время $\bar{t}_{раб}$ по формуле

$$\bar{t}_{раб} = \bar{t}_E - \bar{t}_F = \frac{a_2}{a_s} (\bar{L}_1 - \bar{x}_D) + \bar{t}_D - \bar{t}_F. \quad (60)$$

При взаимодействии отраженной ударной волны с контактной поверхностью (рис.2,в) возмущение $D'E'$ представляет собой скачок уплотнения умеренной интенсивности или голову волны разрежения. Методика расчета взаимодействия отраженной ударной волны с контактной поверхностью рассмотрена в работе [6].

Считая скорость возмущения $D'E'$ близкой к скорости звука a_s , находят рабочее время $\bar{t}_{раб}$ по формуле (60), заменив координаты точки D координатами точки D' .

Результаты расчета абсолютных и относительных параметров газа в различных областях течения, а также координаты характерных точек диаграммы заносятся в сводную табл.1.

Ход диаграммы строится по рассчитанным координатам характерных точек. На диаграмме указываются коэффициенты, позволяющие рассчитывать безразмерное время \bar{t} и длину \bar{x} в раз-

Таблица 1

L_1 X_1	L_4	K_1	K_4	a_1	a_4	p_1	p_4	$\frac{p_4}{p_1}$	M_1
M	M	бар бар	бар бар	M/c	M/c	бар мм/с	бар		
U_1	$\frac{p_2}{p_1}$	p_2	$\frac{T_2}{T_1}$	T_2	$\frac{p_2}{p_1}$	p_2	$\frac{a_2}{a_1}$	a_2	$\frac{U_2}{a_1}$
M/c		бар		°K		кг/м ³		M/c	
U_2	M_2	$\frac{a_2}{a_4}$	a_3	M_3	\bar{x}_0	x_0	\bar{t}_0	t_0	\bar{x}_c
M/c			M/c			M		C	
x_c	\bar{t}_c	t_c	\bar{x}_0	x_0	\bar{t}_0	t_0	$\bar{t}_{\text{проб}}$	$t_{\text{проб}}$	
M		C		M		C		C	
$\frac{U_{\text{проб}}}{U_1}$	$U_{\text{проб}}$	$\frac{p_5}{p_1}$	p_5	$\frac{T_5}{T_1}$	T_5	$\frac{p_5}{p_1}$	p_5	$\frac{a_5}{a_1}$	a_5
	M/c		бар		°K		кг/м ³		M/c
$\frac{\bar{x}_D}{\bar{x}_0}$	x_D x_D	\bar{t}_D \bar{t}_D'	t_D t_D'	\bar{t}_E \bar{t}_E'	t_E t_E'	\bar{t}_F	t_F	$\bar{t}_{\text{проб}}$	$t_{\text{проб}}$
	M		C		C		C		C

мерные величины.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА МАЛОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ

Описание малой ударной трубы кафедры гидроаэродинамики

Малая ударная труба кафедры гидроаэродинамики (рис.3) имеет камеру высокого давления круглого поперечного сечения и канал низкого давления, состоящий из двух секций 4,6 круглого сечения или трех секций: круглой 4, переходной 6 и прямоугольной 7. В обоих вариантах площадь поперечного сечения канала сохраняется постоянной.

В измерительной секции 7 канала расположены последовательно на известном расстоянии друг от друга датчики, по показаниям которых контролируются параметры течения в ударной трубе. Канал ударной трубы подсоединяется к ресиверу 9 или перекрывается плоским фланцем 8 при работе с отраженной ударной волной.

Между камерой и каналом расположен диафрагменный узел 3. Конструкция диафрагменного узла позволяет быстро менять в ходе экспериментов диафрагму, разделяющую камеру и канал.

Диафрагмы, деформируемые давлением толкающего газа, разрезаются крестообразным ножом, установленным со стороны канала в диафрагменном блоке.

Вместо диафрагменного узла может быть использован пневматический быстродействующий клапан, соединяющий в определенный момент камеру с каналом.

Камера I подсоединяется к лабораторной системе высокого давления, подающей воздух, или к баллонам I3 с различными газами. Давление P_0 в камере определяется по манометру 2.

Газы из камеры, канала и ресивера могут откачиваться вакуумным насосом IO. Канал заполняется атмосферным воздухом или газом из баллонов I2. Давление P_1 в канале измеряется ртутным II или стрелочным 5 манометром.

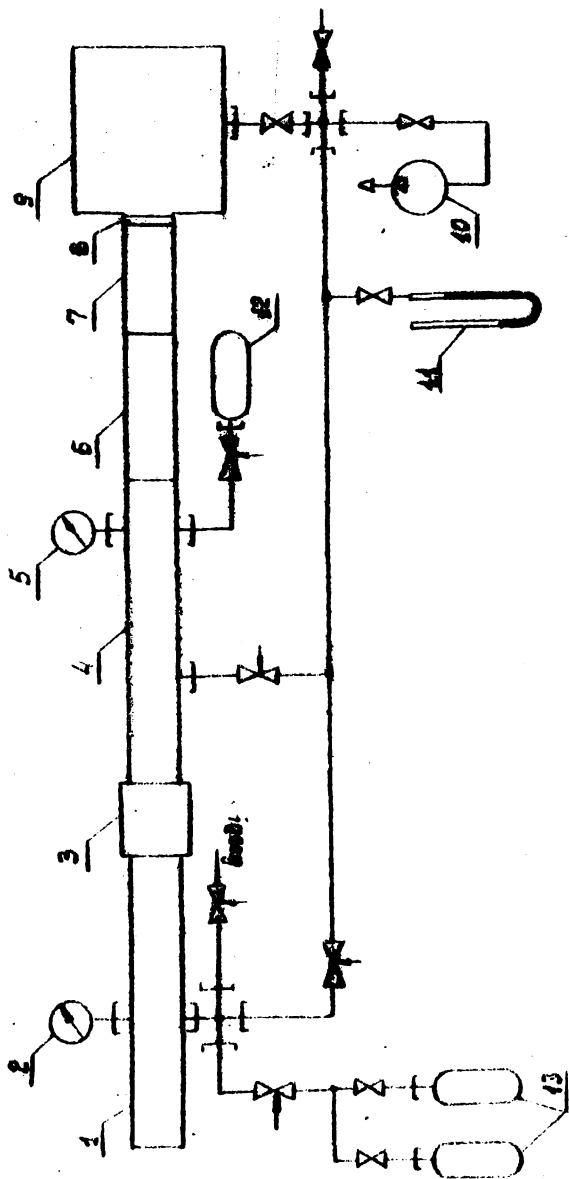


Рис. 3

Принцип действия, конструкция и методика определения чувствительности пьезоэлектрических датчиков

При измерении скорости ударных волн умеренной интенсивности и регистрации нестационарных давлений в ударных трубах широкое применение нашли пьезоэлектрические датчики, действие которых основано на пьезоэффекте [2, стр. 133-137; 3, стр. 364-376; 4, стр. 153-157, стр. 196-201; 7]

Пьезоэффект состоит в появлении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов при их деформации под действием механической нагрузки. Таким же свойством обладают и искусственные пьезокерамические материалы, из которых изготавливаются разнообразные по форме и размерам заготовки, приобретающие пьезоэлектрические свойства после поляризации в постоянном электрическом поле. Широкое распространение получила пьезокерамика ЦТС (Цирконат - титанат свинца).

Рассмотрим цилиндрический пьезоэлемент, поляризованный в направлении оси симметрии пьезоэлемента и нагруженный усилием, равномерно распределенным по плоской поверхности пьезоэлемента и действующим по нормали к поверхности. Деформация пьезоэлемента под действием приложенного усилия приводит к появлению на плоских торцах разноименных электрических зарядов.

Изменение заряда ΔQ пропорционально изменению приложенного усилия, так что

$$\Delta Q = d \cdot S \cdot \Delta p, \quad (61)$$

где d - коэффициент, характеризующий пьезоэлектрические свойства керамики,

S - площадь поверхности пьезоэлемента, нагруженной внешним усилием,

Δp - изменение давления.

Заряд ΔQ создает на торцах пьезоэлемента разность потенциалов ΔU , связанную с собственной емкостью C_n пьезоэлемента соотношением

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C_n}, \quad (62)$$

Выражая емкость $C_{пз}$ через площадь S , высоту пьезоэлемента h , диэлектрическую постоянную пьезокерамики ϵ и учитывая соотношение (61), запишем

$$\Delta U = \frac{d \cdot h}{\epsilon} \Delta p, \quad (63)$$

откуда следует, что изменение напряжения ΔU на обкладках пьезоэлемента пропорционально изменению давления Δp .

Заметим, что подсоединение параллельно пьезоэлементу с емкостью $C_{пз}$ коаксиального кабеля или масштабной емкости

C_m уменьшает чувствительность $K_{датч} = \frac{\Delta U}{\Delta p}$ датчика в $1 + \frac{C_m}{C_{пз}}$ раз, так что

$$\Delta U = \frac{d \cdot h}{\epsilon (1 + \frac{C_m}{C_{пз}})} \Delta p. \quad (64)$$

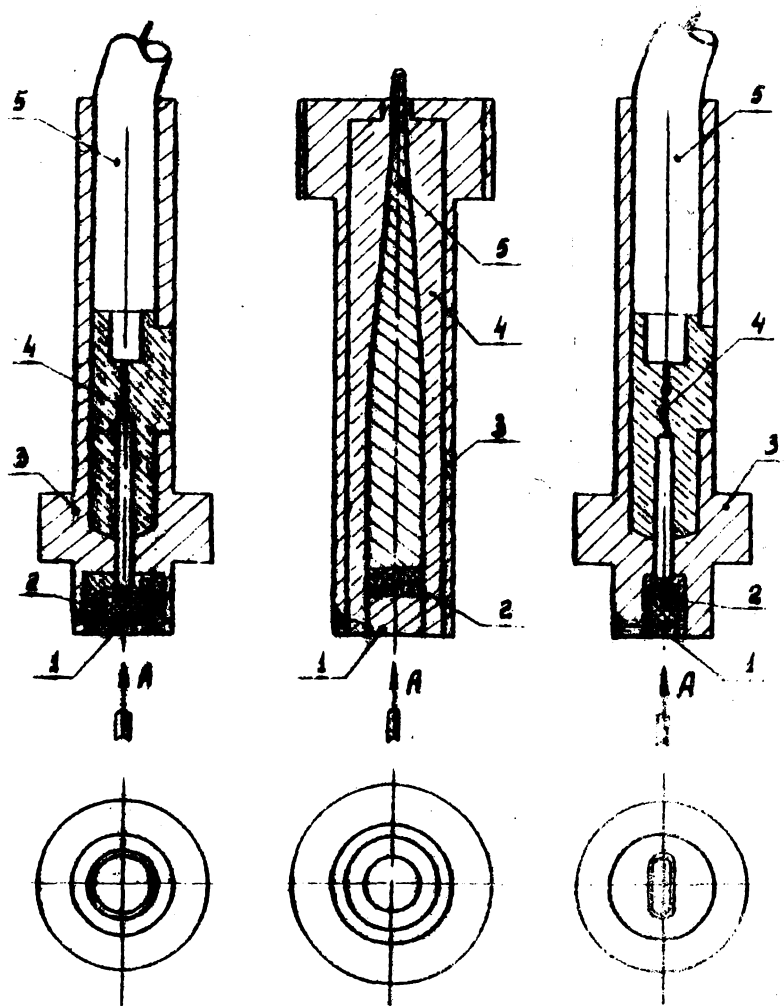
В ударной трубе изменение Δp давления на фронте ударной волны, равное $\Delta p = p_2 - p_1$, приводит к возникновению разности потенциалов ΔU на выводах пьезодатчика, связанной с изменением давления Δp соотношением (64).

В экспериментах на ударных трубах используются пьезодатчики, конструкция которых определяется уровнем измеряемого давления, частотными характеристиками, габаритами, условиями крепления и т.д.

На малой ударной трубе используются три типа пьезодатчиков, разработанных на кафедре гидроаэродинамики.

Наиболее простой в изготовлении и эксплуатации датчик (рис. 4, а) предназначен для регистрации нестационарных давлений в процессах с рабочим временем, превышающим 10^{-4} с. Такое ограничение связано с особенностями крепления пьезоэлемента, приводящими к возбуждению собственных колебаний пьезоэлемента при резком его нагружении ударной волной.

Чувствительным элементом датчика является цилиндр 2 из пьезокерамики ЦТС-19 с посеребренными плоскими торцами. К поверхности пьезоэлемента, выходящей в канал ударной трубы, припаивается латунная цилиндрическая пластинка 1, предохраняющая пьезоэлемент от механических повреждений, устраняющая нагрев пьезоэлемента и возникновение пирозффекта. Пьезоэлемент с пластинкой, покрытой тонким слоем резины, устанавливается в вилочку, сделанную в корпусе 3. Свободное пространство заливается эпоксидной смолой. Тонкий проводник 4, изолированный от латунного корпуса и припаянный к внутренней поверхности пьезоэлемента



Вид по стрелке А

а)

б)

Рис. 4

та, соединяется с центральной жилой кабеля 5. К корпусу датчика припаивается оплетка кабеля и внешняя поверхность пьезоэлемента. Корпус датчика изолируется от колебаний канала ударной трубы с помощью несольких резиновых шайб.

Датчики, изображенные на рис. 4,б, имеют высокое временное разрешение и позволяют регистрировать давления в широком интервале рабочих времен ($10^{-5} < t_{\text{рег}} < 10^{-2}$) [8].

Такой датчик, сконструированный по типу пьезоэлектрических датчиков с акустическим волноводом [4, стр.200], состоит из пьезоэлемента 2, защищенного коротким цилиндром 1, и волновода 5, по форме близкого к конусу. Пьезоэлемент 2 из керамики ЦТС-10 с припаянными к нему цилиндром 1 и волноводом 5 центрируется в трубке 3 и заливается воском 4.

Подбор акустических пар ЦТС - латунь из материалов, имеющих близкие значения произведения ρc плотности материала на скорость звука в нем, заостренная форма волновода и крепление волновода в воске способствует тому, что волна сжатия, распространяющаяся по пьезоэлементу и волноводу, отражается от криволинейной поверхности волновода и поверхности контакта материалов ЦТС-латушь как очень слабое возмущение, не возбуждающее пьезоэлемент. Усилие, действующее на цилиндр 1 и передающееся пьезоэлементу 2, не создает колебаний в пьезоэлементе, и датчик передает характер изменения давления без искажений. Датчик чувствителен к внешним механическим воздействиям. Для изоляции датчика от вибрации канала ударной трубы применяются резиновые кольца с малой жесткостью.

Датчики, используемые в системе измерения скорости ударной волны (рис.4,в), отличаются от датчиков, изображенных на рис.4,а, только формой пьезоэлемента. Уменьшение размера пьезоэлемента в направлении движения ударной волны позволяет увеличить крутизну фронта сигнала, генерируемого датчиком при движении ударной волны по пьезоэлементу.

При измерении пьезодатчиками перепадов давления ступенчатой формы могут возникнуть искажения как в воспроизведении резкого изменения давления на фронте ударной волны, так и в регистрации постоянного давления в областях 2; 3; 5 (рис.1).

Резкое нагружение пьезодатчика приводит к возбуждению его

собственных колебаний. Частота собственных колебаний пьезоэлементов зависит от их размеров, материала, условий закрепления и может достигать нескольких сотен кГц. Пьезодатчики мембранного типа, в которых усилие передается к пьезоэлементу через мембрану, имеют относительно низкую частоту собственных колебаний. Собственные колебания пьезодатчика могут исказить воспроизведение давления в процессе, в несколько раз превосходящем по длительности период колебаний. Применение датчиков, подобных изображенному на рис. 4, б, позволяет регистрировать резкое изменение давления без заметных искажений.

Для правильного измерения пьезодатчиком постоянного уровня давления за ударной волной следует учесть возможность утечки зарядов с обкладок пьезоэлемента по входному сопротивлению $R_{вх}$ прибора, подключенного к выводам пьезодатчика (рис. 5). Если давление p_2 в газе за ударной волной сохраняется постоянным в течение времени $t_{пост}$, то для неискаженной регистрации электрического сигнала постоянной амплитуды, соответствующего разности давлений $p_2 - p_1$, следует выполнить условие

$$R_{вх}(C_{пз} + C_{м}) \gg t_{пост} \quad (65)$$

Необходимое входное сопротивление $R_{вх}$ может быть оценено по формуле

$$R_{вх} \geq \frac{U}{\delta U} \cdot \frac{t_{пост}}{C_{пз} + C_{м}} \quad (66)$$

где $\frac{\delta U}{U}$ — относительное изменение за время $t_{пост}$ напряжения U , генерируемого пьезодатчиком, имеющим емкость $C_{пз} + C_{м}$.

Будем считать $\frac{\delta U}{U} = 0,01$, $t_{пост} = 5 \cdot 10^{-4}$ с,
 $C_{пз} + C_{м} = 250 \cdot 10^{-12}$ фарад.

Тогда получим для $R_{вх}$ оценку: $R_{вх} \geq 2 \cdot 10^9$ ом.

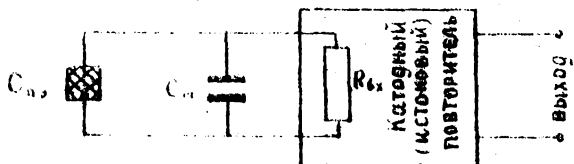


Рис. 5.

Столь высокие входные сопротивления могут быть получены в схемах сложных катодных повторителей или истоковых повторителей [7].

Сопротивление $R_{пз}$ пьезокерамических элементов имеет конечную величину ($R_{пз} \approx 10^{12} - 10^{14}$ ом), что не позволяет использовать пьезокерамические датчики для измерения медленно изменяющихся и установившихся давлений даже при условии $R_{вх} > R_{пз}$ из-за утечки зарядов по пьезоэлементу.

Ударная труба позволяет проводить динамическую градуировку датчиков давления различного типа, в том числе и пьезодатчиков [3, стр. 364-373]. На фронте ударной волны давление практически мгновенно изменяется на величину $p_2 - p_1$.

Разность давлений Δp определяется числом M_1 ударной волны, отношением теплоемкостей газа K_1 и начальным давлением p_1 , так что

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{\alpha_1 \beta_1} (M_1^2 - 1), \quad (67)$$

где α и β рассчитываются по формулам (38), (39).

Основным результатом градуировки пьезодатчика является определения зависимости изменения напряжения ΔU , генерируемого датчиком, от разности давлений $\Delta p = p_2 - p_1$. Согласно формуле (64) зависимость ΔU от Δp должна быть прямо пропорциональной. Коэффициент пропорциональности находится по тарировочной кривой, построенной на основании результатов экспериментов при различных значениях величины Δp .

Эксперимент по градуировке датчиков проводится обычно с использованием воздуха в камере и канале. Задавшись давлением p_1 , необходимо заранее рассчитать начальные давления p_2 так, чтобы изменения давления Δp увеличивались или уменьшались в каждом последующем эксперименте на постоянную величину. Тогда экспериментальные точки на градуировочной кривой распределяются равномерно (рис.6).

При расчете изменения давления $p_2 - p_1$ по формуле (67) используется число M_1 , найденное по экспериментально измеренной скорости U_1 ударной волны.

Спытывания по тарировке проводятся, как правило, в режиме без отраженной ударной волны, однако, если необходимо расширить

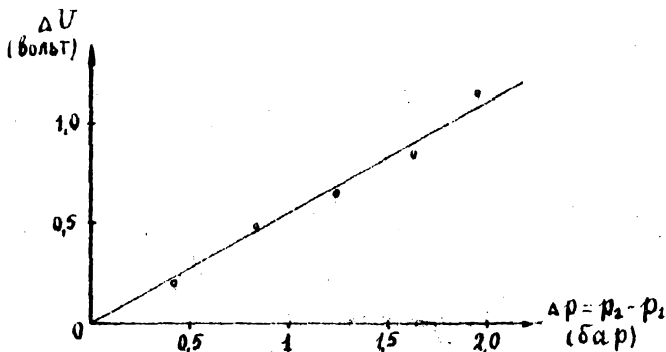


Рис. 6.

пределы изменения давления, используется режим с отражением.

Обработка результатов градуировки пьезодатчика методом наименьших квадратов позволяет найти среднюю чувствительность датчика и дать оценку погрешности определения чувствительности.

Полагая, согласно формуле (64), изменение напряжения $\Delta U_{датч}$, генерируемого датчиком, прямо пропорциональным изменению давления Δp , запишем результат i -го эксперимента в виде

$$\Delta U_{датч i} = K_{датч} \cdot \Delta p_i + n_i, \quad (68)$$

где $K_{датч}$ - определяемая чувствительность датчика,

n_i - статически независимые случайные ошибки, возникающие в результате измерения напряжения $\Delta U_{датч}$,

$i = 1, 2, 3, \dots, N$, N - количество экспериментов.

Предполагается, что ошибки n_i распределены по нормальному (гауссовскому) закону с нулевым математическим ожиданием $M\{n_i\} = 0$ и дисперсией $D\{n_i\} = \sigma^2$.

При этих предположениях оценка $\hat{K}_{датч}$ чувствительности датчика находится из условия

$$m_{\hat{K}} \sum_{i=1}^N (\Delta U - \hat{K} \Delta p_i)^2 = \sum_{i=1}^N (\Delta U_{датч i} - \hat{K}_{датч} \Delta p_i)^2$$

рассчитывается по формуле

$$\hat{K}_{датч} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta U_{датч i} \cdot \Delta p_i}{\sum_{i=1}^N (\Delta p_i)^2} \quad (69)$$

Погрешность оценки $\hat{K}_{датч}$ чувствительности датчика характеризуется дисперсией $D\{\hat{K}_{датч}\}$.

Оценка $\hat{D}\{\hat{K}_{датч}\}$ дисперсии определяется из выражения

$$\hat{D}\{\hat{K}_{датч}\} = \frac{\hat{\sigma}^2}{\sum_{i=1}^N (\Delta p_i)^2}, \quad (70)$$

где $\hat{\sigma}^2$ - оценка дисперсии σ^2 , равная

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta U_{датч.i} - \hat{K}_{датч} \cdot \Delta p_i)^2. \quad (71)$$

Окончательный результат определения чувствительности датчика записывается в форме

$$\hat{K}_{датч} - t_{\alpha}(N-1) \cdot \hat{D}\{\hat{K}_{датч}\} < K_{датч} < \hat{K}_{датч} + t_{\alpha}(N-1) \cdot \hat{D}\{\hat{K}_{датч}\}, \quad (72)$$

где $t_{\alpha}(N-1)$ - коэффициент Стьюдента, найденный по таблицам

[9] для заданной вероятности α и числа измерений N
 $(t_{0,95}(3) = 3,18; t_{0,95}(5) = 2,57; t_{0,95}(8) = 2,31;$
 $t_{0,95}(12) = 2,18).$

Коэффициент α имеет смысл вероятности того, что истинное значение величины $K_{датч}$ лежит в пределах, указанных формулой (72), т.е.

$$\alpha = P \left\{ \frac{|K_{датч} - \hat{K}_{датч}|}{\hat{D}\{\hat{K}_{датч}\}} \right\},$$

где $P\{A\}$ - вероятность события A .

Базовый метод измерения скорости ударной волны

В экспериментах на ударных трубах скорость ударной волны является важным и относительно просто измеряемым параметром.

По измеренной скорости ударной волны удается рассчитать параметры рабочего газа в области, примыкающей к ударной волне.

Наиболее часто используется базовый метод измерения скорости ударной волны, когда вдоль канала на определенном расстоянии друг от друга располагаются датчики, регистрирующие момент прихода к ним ударной волны, и измеряется время прохождения ударной волны расстояния между датчиками.

В базовом методе скорость U_1 ударной волны находится как отношение базового расстояния $S_{\text{баз}}$ к измеренному интервалу времени $T_{\text{баз}}$, так что $U_1 = \frac{S_{\text{баз}}}{T_{\text{баз}}}$.

Таким образом, скорость U_1 определяется в результате косвенных измерений.

Для возможно более точного измерения скорости ударной волны желательно, чтобы погрешность измерения времени между сигналами скоростных датчиков была малой и относительное положение пьезоэлементов измерялось достаточно точно.

Измерение времени $T_{\text{баз}}$ между двумя электрическими сигналами, соответствующими приходу ударной волны к последовательно расположенным пьезодатчикам, обычно производится с помощью катодного осциллографа (С1-52, ОК-17М) или цифрового прибора (43-35, 43-33).

Если для измерения времени используется осциллограф, то размер пьезоэлемента не имеет решающего значения, так как на осциллограмме отмечается момент прихода ударной волны к краю пьезоэлемента. Для пьезоэлементов с одинаковыми диаметрами база измерения равна расстоянию между их центрами. Пример осциллограммы, полученной на двухлучевом осциллографе ОК-17М, приведен на рис.7. В эксперименте регистрируются сигналы пьезодатчиков, используемых в системе измерения скорости ударной волны. Затем в качестве меток времени фотографируют синусоидальные сигналы известной частоты, совмещая их на осциллограмме с сигналами датчиков. Метод определения по осциллограмме интервала времени $T_{\text{баз}}$ пояснен на рис.7.

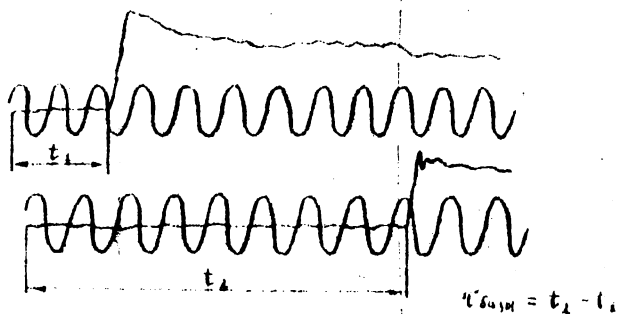


Рис. 7

Множественная обработка осциллограммы и повторные измерения базового расстояния позволяют получить для одного эксперимента несколько значений величин $\tau_{\text{базы}}$ и $S_{\text{базы}}$. В этом случае может быть применена стандартная методика определения относительной погрешности измерения скорости ударной волны.

Согласно приближенному подходу к оценке погрешности определения величины при косвенных измерениях, изложенному в работе [9], может быть найден с вероятностью α доверительный интервал ΔU_1 измерения скорости U_1 , основанный на результатах n измерений базы S и m измерений интервала времени τ , реализуемого в одном эксперименте на ударной трубе.

Будем иметь

$$\Delta U_1 = \sqrt{\frac{\Delta S^2}{\bar{\tau}^2} + \frac{S^2 \Delta \tau^2}{\bar{\tau}^4}}, \quad (73)$$

где

$$\Delta S = t_{\alpha}(n-1) \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{S} - S_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (74)$$

$$\Delta \tau = t_{\alpha}(m-1) \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\bar{\tau} - \tau_i)^2}{m(m-1)}}, \quad (75)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i, \quad \bar{\tau} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tau_i, \quad (76)$$

$t_{\alpha}(n-1), t_{\alpha}(m-1)$ - коэффициенты Стьюдента для заданных вероятности α и числа измерений n или m .

Относительная погрешность $\varepsilon_{u_1} = \frac{\Delta U_1}{U_1}$ измерения скорости ударной волны будет

$$\varepsilon_{u_1} = \sqrt{\varepsilon_S^2 + \varepsilon_{\tau}^2}, \quad (77)$$

где

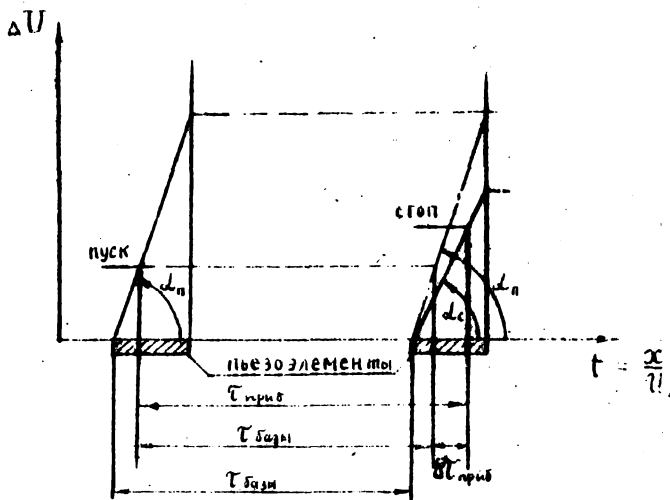
$$\varepsilon_S = \frac{\Delta S}{S}, \quad \varepsilon_{\tau} = \frac{\Delta \tau}{\bar{\tau}}. \quad (78)$$

Наглядный и надежный осциллографический метод определения интервала времени $\tau_{\text{базы}}$ имеет два недостатка: невысокую точность измерения и большую трудоемкость, связанную с необходимостью обрабатывать осциллограмму.

Применение высокоточных цифровых измерителей интервалов времени в системе измерения скорости ударной волны позволяет получать отсчет величины $\tau_{\text{базы}}$ в ходе эксперимента и при определенных условиях уменьшить погрешность измерения интервала

времени.

Высокая точность и надежность системы измерения скорости ударной волны с применением цифровых приборов реализуется в случае, когда датчики, управляющие работой цифрового прибора, имеют близкую крутизну фронтов сигналов, а чувствительности усилителей и уровни пуска и остановки цифрового прибора различаются незначительно [10]. В противном случае время будет измеряться цифровым прибором с ошибкой $\delta\tau_{\text{приб}}$ (рис. 6). Увеличение крутизны фронтов сигналов, управляющих работой прибора, за счет уменьшения размеров пьезоэлементов и усиления сигналов позволяет уменьшить ошибку $\delta\tau_{\text{приб}}$.



t - время, пропорциональное расстоянию x , пройденному ударной волной, U - напряжение, генерируемое пьезодатчиком, α - угол, характеризующий крутизну фронта пьезодатчика.

Рис. 6.

Увеличение базовых расстояний приводит к уменьшению относительных ошибок измерения величин $S_{\text{базы}}$ и $\tau_{\text{базы}}$.

Рассчитывая скорость U_1 по формуле $U_1 = \frac{S_{\text{базы}}}{\tau_{\text{базы}}}$ и относя результат измерения к среднему сечению базового промежутка, следует учесть, что расчетная скорость U_1 может заметно

отличаться от истинного значения в середине базового участка в том случае, если ускорение ударной волны будет значительно изменяться на отрезке канала длиной $S_{\text{базы}}$ [10].

Опыт эксплуатации ударных труб показывает, что при умеренных интенсивностях ударной волны ($M_1 < 5$) и базовых расстояниях $S_{\text{базы}} \approx 0,5\text{м}$ различия в свойствах пьезодатчиков и уровнях срабатывания цифрового прибора незначительны. Относительная погрешность измерения скорости ударной волны в этом случае не превышает 1%.

Измерение скорости падающей ударной волны и определение чувствительности пьезодатчика давления

В экспериментах по определению чувствительности пьезодатчиков давления на ударной трубе одновременно регистрируется сигнал датчика и измеряется скорость ударной волны.

Блок-схема системы измерений представлена на рис.9.

В измерительной секции канала ударной трубы установлены 4 пьезодатчика. Датчики 1,2,4 подсоединены к трехканальному усилителю. Частотные характеристики усилителя таковы, что форма передних фронтов сигналов датчиков не искажается при усилении. Сигнал первого датчика запускает развертку осциллографа. Усиленные сигналы двух датчиков, расстояние между которыми равно $S_{\text{базы}}$, поступают на цифровой отсчетчик времени и осциллограф. Таким образом, интервал времени $\tau_{\text{базы}}$ может измеряться в эксперименте двумя методами. После регистрации сигналов датчиков 2 и 4 к входу осциллографа 1 подключается генератор стандартных сигналов. Сигналы генератора известной частоты фиксируются на осциллограмме вместе с сигналами датчиков и используются в качестве меток времени (рис.7).

Схема регистрации сигнала датчика давления 3 состоит из катодного или истокового повторителя и осциллографа 2. Запуск развертки осциллографа, регистрирующего давление, осуществляется тем же сигналом, что и в системе измерения скорости ударной волны.

Рассмотренная схема измерений сохраняется и для режима с отраженной ударной волной.

Возможность потенциалов $\Delta U_{\text{датч}}$, генерируемая исследуемым

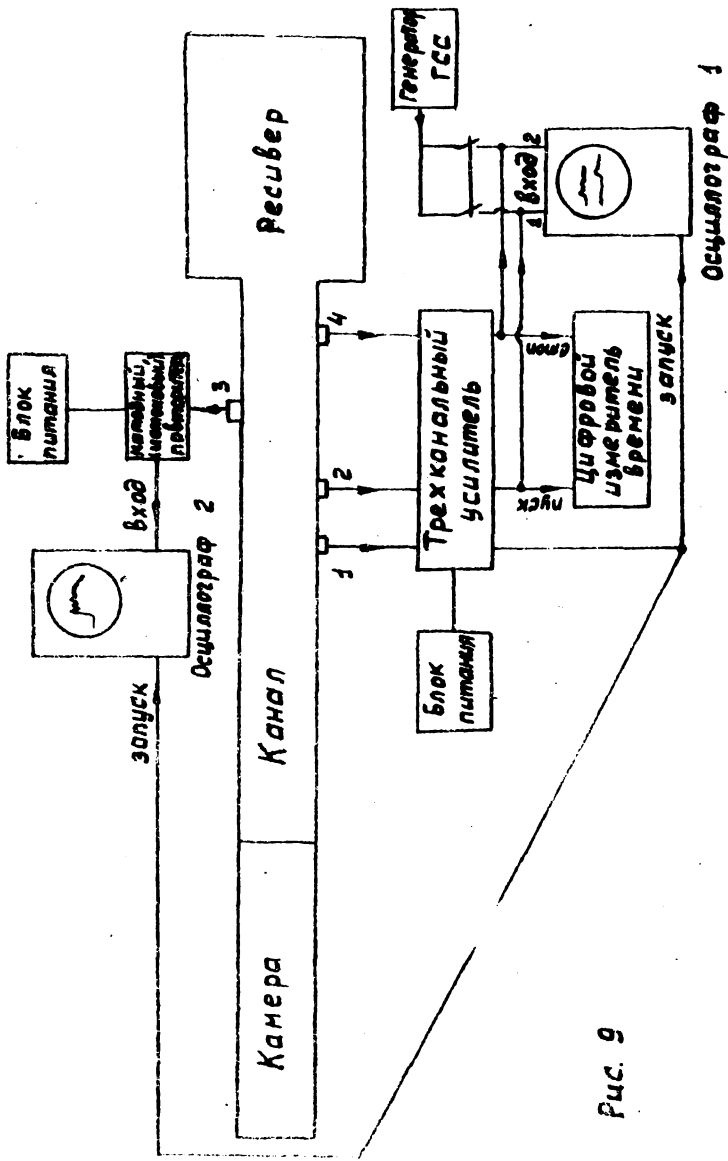


Рис. 9

датчиком при изменении давления на фронте ударной волны, определяется по осциллограмме с учетом коэффициента передачи $K_{\text{д}}$ катодного повторителя.

Задавая диапазон изменения давлений и рассчитывая для различных экспериментов ориентировочные значения начальных давлений P_1 и P_2 согласно указанию к рисунку 6, выполняют 8 - 10 экспериментов. Каждый эксперимент подготавливает и проводят в такой последовательности:

1. Составляется схема измерений согласно рис. 9;
2. Включается питание приборов, отмеченных на блок-схеме;
3. По ориентировочно известной чувствительности датчиков, заданному коэффициенту усиления и рассчитанной по формуле (67) разности давлений ΔP на фронте ударной волны оценивается амплитуда сигналов датчиков, идущих с выхода усилителя на клемму пуска, входы осциллографов и к цифровому прибору.

4. На цифровом приборе включается режим работы "измерение интервалов времени", устанавливается полярность сигналов, управляющих началом и остановкой счета интервала времени

$T_{\text{сч}} ;$ уровень срабатывания каналов начала и остановки счета интервала времени $T_{\text{сч}}$ выбирается в 3-4 раза меньше ожидаемой амплитуды усиленных сигналов датчиков 2 и 4 (рис. 8, рис. 9).

5. На осциллографах устанавливается длительность развертки, в 1,5-2 раза превышающая ожидаемые значения интервалов времени $T_{\text{сч}}$ и $t_{\text{рпб}}$; регулируется яркость и фокусировка луча; по оценке ожидаемой амплитуды сигналов выбирается чувствительность усилителей вертикального отклонения луча так, чтобы отклонение луча составляло примерно две трети допустимого значения; проверяется работа осциллографов в ждущем режиме.

6. Подбирается частота сигналов генератора ГСС так, чтобы на экране осциллографа помещалось 25 - 40 периодов.

7. Вводятся и открываются затворы фотоаппаратов, фиксирующих сигналы датчиков.

8. В диффрагменный блок ударной трубы устанавливается диффрагма или пневматический быстродействующий клапан.

9. Канал ударной трубы откачивается, продувается и заполняется рабочим газом до давления P_1 .

10. При использовании диафрагмы камера высокого давления медленно заполняется толкающим газом до разрыва диафрагмы.

При применении быстродействующего клапана камера высокого давления медленно заполняется толкающим газом до заданного уровня давления P_4 , затем производится пуск клапанного устройства.

11. Записывается значение $\tau_{баз}$ по показаниям цифрового прибора.

12. К осциллографу 1 переключением тумблера подсоединяется генератор стандартных сигналов. Иницируется однократная развертка луча и изображение сигналов фиксируется на пленке фотоаппарата вместе с изображением сигналов пьезодатчиков (рис.7).

13. На экране осциллографа 2 устанавливаются и фиксируются на фотопленку метки времени и масштабные амплитудные метки.

14. Закрываются затворы фотоаппаратов.

Далее следуют операции, связанные с обработкой экспериментальных данных.

1. По известному базовому расстоянию $S_{баз}$ и измеренному интервалу времени $\tau_{баз}$ рассчитывается скорость ударной волны.

2. По формуле (67) рассчитывается разность $\Delta P = P_2 - P_1$ давлений на фронте ударной волны.

3. По осциллограмме сигнала датчика давления с помощью лупоувеличителя определяется в миллиметрах величина $A_{инп}$ отклонения луча на экране осциллографа (рис.10). При использовании запоминающего осциллографа отклонение луча может быть измерено непосредственно на экране в процессе эксперимента.

4. Зная чувствительность осциллографа, находят разность напряжений $\Delta U_{осц}$ на входе усилителя вертикального отклонения. Разделив величину $\Delta U_{осц}$ на коэффициент $K_{к.п}$ передачи напряжения катодного (истокового) повторителя, определяют изменение ΔU напряжения, генерируемого датчиком, соответствующее изменению ΔP давления на датчике.

5. По осциллограмме (рис.10), используя метки времени, определяют рабочее время $t_{раз}$ как интервал времени от момента прихода к датчику давления ударной волны до момента прихода возмущений, вызванных волной разрежения.

6. По результатам обработки осциллограмм, полученных в серии экспериментов с различным изменением давлений на фронте ударной волны, строят калибровочную характеристику датчика (см.рис.6).

7. Начальные параметры и результаты обработки данных каждого эксперимента заносятся в табл.2.

8. По данным серии экспериментов рассчитывается чувствительность датчика давления и находится оценка погрешности определения чувствительности.

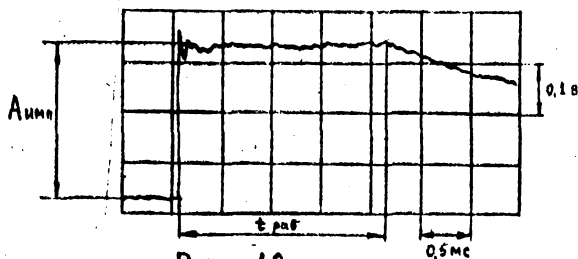


Рис. 10.

4. УКАЗАНИЯ К СОСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТА

В отчете по лабораторной работе необходимо:

1. кратко охарактеризовать особенности течения газа в ударной трубе,

2. описать последовательность определения параметров рабочего и толкающего газов в различных областях течения, приводя соответствующие расчетные формулы;

3. для заданных начальных параметров газов, линейных размеров ударной трубы и указанного режима работы установки с падающей или отраженной ударной волной выполнить газодинамический расчет по приведенным в п. I руководства формулам и составить таблицу, содержащую результаты расчета (табл. I);

4. по данным газодинамического расчета построить диаграмму течения газа в ударной трубе, указав области с постоянными параметрами газа, основные возмущения, отметить характерные точки диаграммы и положение датчиков; нанести масштабы, позволяющие перейти от безразмерных величин \bar{x} , \bar{t} к размерным x (М),

, t (с);

5. привести схему малой ударной трубы и пояснить порядок подготовки установки к эксперименту;

6. привести блок-схему измерений и дать краткое описание ее работы;

7. привести полученные в эксперименте осциллограммы, отметив масштабы времени и амплитуды ($A_{имп}$, $t_{раз}$, $\tau_{базы}$);

8. составить таблицу результатов измерений (табл.2);

9. сформулировать выводы по выполненной работе, сопоставляя результаты расчетов с полученными экспериментальными данными и отмечая отклонение действительного течения газа в ударной трубе от модели, принятой в элементарной теории.

5. ПРАВИЛА ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА МАЛОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ КАФЕДРЫ ГИДРОАЭРОДИ- НАМИКИ

Источником опасности при работе на малой ударной трубе является применение сжатых газов в камере высокого давления, а также использование электрического переменного напряжения 220 в (однофазного) для питания радиоаппаратуры и напряжения 380 в (трехфазного) для питания электродвигателя вакуумного насоса.

В случае нарушения правил по технике безопасности и эксплуатации установки может возникнуть опасность поражения электрическим током и аварийная обстановка при превышении допустимого рабочего давления в камере.

Меры, обеспечивающие безопасность работы на установке, и обязанности студентов, выполняющих лабораторную работу, подробно изложены в "Инструкции по эксплуатации и технике безопасности при работе на малой ударной трубе".

Преподаватель, ведущий лабораторную работу, проводит инструктаж, поясняя студентам характер работы и правила по технике безопасности.

К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, изучившие настоящее руководство и "Инструкцию" и расписавшиеся в журнале инструктажа.

Ударная труба в совокупности со вспомогательным оборудованием, нестандартными измерительными системами представляет сложное экспериментальное устройство импульсного типа, позволяющее изучать установившиеся и неустановившиеся течения газа с большой скоростью и высокой температурой.

Лабораторная работа на ударной трубе выполняется группой студентов в составе не более 4-5 человек, что связано как с обеспечением безопасности условий работы студентов в тесном помещении, так и с особенностями подготовки и проведения эксперимента на установке. В процессе подготовки и проведения эксперимента каждый студент должен иметь время и возможность получить определенные навыки работы с радиотехническими приборами, используемыми в измерительных системах, познакомиться с техникой эксперимента на установке.

Литература

1. В.Я.Безменов, Л.Б.Беляев, П.М.Ирмаинов. Развитие ударных труб для аэродинамических исследований. Обзор ЦАГИ им.Н.Е.Жуковского, № 365, 1971.
2. А.Ферри, ред. Основные результаты экспериментов на ударных трубах. Госатомиздат, М., 1963.
3. Х.А.Рахматуллин, С.С.Семенов, ред. Ударные трубы. ИЛ, М., 1962.
4. А.Гейдон, Н.Геря. Ударная труба в химической физике высоких температур, "Мир", М., 1966.
5. Л.Г.Донцянскии. Механика жидкости и газа. Физматгиз, М., 1973.
6. D.W. Holder, D.L. Schultz, On the Flow in a Reflected - Shock Tunnel, ARC Report and Memoranda, № 3265, August, 1960.
7. А.Н.Петушии. Методы и техника измерений параметров газового потока. "Машиностроение", М., 1972.
8. В.Г.Колыванов. Экспериментальное исследование силового воздействия ударной волны на круговой цилиндр. Дипломная работа, кафедра гидроаэродинамики ЛПИ им.М.И.Кадомкина, 1972.
9. О.Н.Кассандрова, В.В.Лебедев. Обработка результатов наблюдений. "Наука", М., 1970.
10. М.Г.Бабинскии, В.Б.Григорьев, С.Н.Исакон, Р.Л.Петров. Система измерения скорости ударной волны в ударной трубе. Отчет с научно-исследовательской работе ЛПИ, кафедра гидроаэродинамики, тема № 1239/171/74, 1975.

1. Допущения и основное соотношение элементарной теории ударной трубы	4
2. Расчет газодинамических параметров течения в ударной трубе по заданному отношению давлений на диафрагме; построение $X-t$ диаграммы по результатам проведенного расчета	10
3. Экспериментальное определение скорости ударной волны и чувствительности пьезодатчиков давления на малой ударной трубе	18
Описание малой ударной трубы кафедры гидроаэродинамики	18
Принцип действия, конструкция и методика определения чувствительности пьезоэлектрических датчиков	20
Базовый метод измерения скорости ударной волны	27
Измерение скорости падающей ударной волны и определение чувствительности пьезодатчика давления	31
4. Указания к составлению отчета	35
5. Правила по технике безопасности при работе на малой ударной трубе кафедры гидроаэродинамики	37
Л и т е р а т у р а	38

БЕСПЛАТНО