

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени М. И. КАЛИНИНА

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА**

Методические указания
к лабораторным работам

Ленинград 1990

Здравствуй Майя Дмитриевна
с благодарностью за внимание
показанное в журнале "Знамя".
31.10.91 Г.Резнов

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени М.И.КАЛИНИНА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА

Методические указания
к лабораторным работам

ЛЕНИНГРАД
1990

Экспериментальные исследования сверхзвуковых течений газа:
Методические указания к лабораторным работам. /Сост. Р.Л.Петров. -
Л.: ЛПИ, 1990. - 36 с.

Методические указания составлены для студентов, выполняющих лабораторные работы по курсу "Механика сплошных сред" (раздел "Одномерный поток идеального газа").

В методических указаниях к лабораторным работам на атмосферной ударной трубе приведено описание установки, позволяющей создавать и исследовать плоские ударные волны и кратковременные установившиеся сверхзвуковые потоки в соплах Лавала.

Рассмотрены программы двух лабораторных работ, предусматривающих исследование свойств прямых скачков уплотнения и одномерных установившихся сверхзвуковых потоков. Пояснены особенности течения газа в установке, определены порядок выполнения экспериментов и методика обработки экспериментальных данных, рекомендована форма отчета.

Рекомендованы к изданию кафедрой гидроаэродинамики и методическим советом физико-механического факультета.

Составитель: Руслан Леонидович Петров

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА

Методические указания к лабораторным работам

Редактор С.А.Мартинова

Технический редактор А.И.Колодзяная

Подписано к печати 30.01.90. Формат бумаги 60x90 1/16.
Бумага, тип. № 3. Печать офсетная. Усл.печ.л. 2,25. Уч.-изд.л. 2,25.
Тираж 300. Заказ 46. Бесплатно.

Издание ЛПИ им.М.И.Калинина. 195251, Ленинград, Политехническая, 29.

Отпечатано на ротатристе ЛПИ им.М.И.Калинина.
195251, Ленинград, Политехническая ул., 29.

ВВЕДЕНИЕ

Большой интерес как с точки зрения современных инженерных приложений, так и для дальнейшего теоретического изучения механики сплошных сред представляют особенности и свойства сверхзвуковых течений, которые могут быть изучены на простой модели одномерного течения идеальной (невязкой и нетеплопроводной) сплошной среды. Здесь в первую очередь имеется в виду следующее фундаментальное положение: в газе, жидкости и плазме, рассматриваемых как сплошная среда, возможно образование поверхностей разрыва непрерывности переменных течения, называемых также скачками уплотнения или ударными волнами.

Другой интересный и часто встречающийся в инженерной практике объект исследования — сверхзвуковой поток в соплах Лаваля.

В данных методических указаниях рассмотрены две лабораторные работы, связанные с разделом "Одномерный поток идеального газа" [I, с.112–157] курса "Механика сплошных сред". В первой работе исследуются некоторые свойства ударной волны (движущегося скачка уплотнения), во второй — особенности течения газа в соплах Лаваля.

Лабораторные работы выполняются на атмосферной ударной трубе — простой в эксплуатации установке кратковременного действия, оснащенной малоинерционными системами измерения газодинамических переменных, позволяющей генерировать плоские ударные волны и исследовать как нестационарные, так и установившиеся дозвуковые и сверхзвуковые течения газа.

Работа I

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОГО СКАЧКА УПЛОТНЕНИЯ

Объектом исследования являются первичная падающая ударная волна в атмосферной ударной трубе и отраженная ударная волна, возникающая при взаимодействии падающей ударной волны с плоской торцевой стенкой.

Основные цели лабораторной работы следующие:

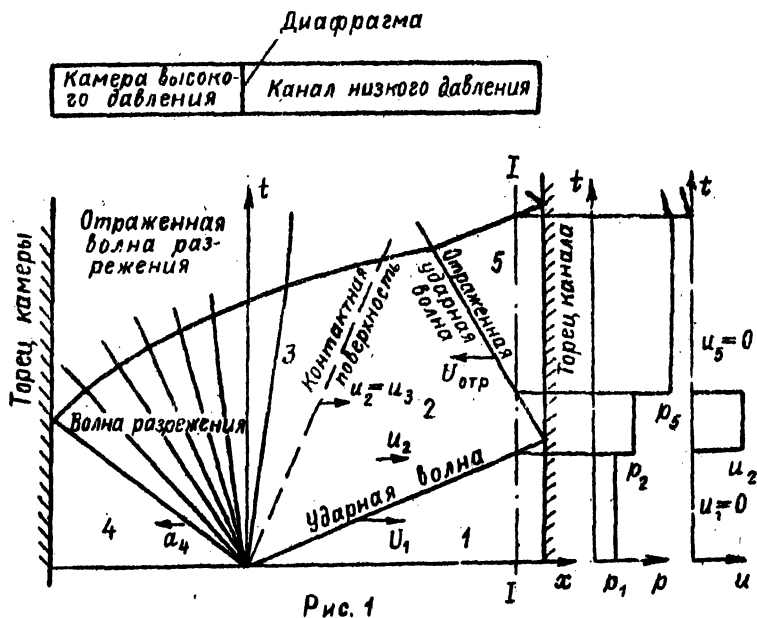
а) умение рассчитывать изменение газодинамических переменных на прямом скачке уплотнения и применять известные из курса "Механика сплошных сред" формулы прямого скачка уплотнения [1, с.124-137], выведенные в связанной со скачком системе координат, к движущимся скачкам: падающей и отраженной ударным волнам; экспериментальная проверка соотношений для относительного изменения давления на падающей и отраженной ударных волнах;

б) умение простыми средствами (в ударной трубе) создавать ударные волны и с применением пьезоэлектрических датчиков измерять скорость ударной волны и изменение давления на ударной волне;

в) умение применять метод наименьших квадратов при обработке результатов экспериментов на примере данных, аппроксимированных прямо пропорциональной зависимостью.

Прямой скачок уплотнения - первичная ударная волна - генерируется в установке кратковременного действия - ударной трубе. Простейшая ударная труба представляет собой канал постоянного сечения, заглушенный с торцов и разделенный диафрагмой на две части: камеру высокого давления и канал низкого давления (рис. I). Канал заполняют рабочим газом при давлении p_1 , камеру высокого давления - толкающим газом при давлении $p_2 > p_1$. При разрыве диафрагмы толкающий газ устремляется в канал низкого давления, сжимая рабочий газ. В ударной трубе возникает нестационарное течение, распространяются возмущения, которое удобно изобразить на $x-t$ диаграмме. На рис. I

приведена $x-t$ диаграмма, соответствующая элементарной теории ударной трубы [1, с.155-157], [2], основанной на ряде простейших предположений и в то же время позволяющей дать верные оценки основных газодинамических переменных в установке. На $x-t$ диаграмме отмечены цифрами области течения с установившимися и однородными значениями переменных, а также нанесен ряд линий - границ этих областей.



В канале низкого давления по покоящемуся рабочему газу (область I) распространяется прямой скачок уплотнения с постоянной (согласно элементарной теории, а в действительности с незначительно уменьшающейся) скоростью U_1 , большей начальной скорости звука a_1 ($U_1 > a_1$). За первичной ударной волной движется со скоростью U_2 спутный поток нагретого и сжатого рабочего газа (область 2). Спутный поток может быть в лабораторной системе координат как дозвуковым ($M_2 = u_2/a_2 < 1$) при умеренных значениях числа $M_1 = U_1/a_1$, так и сверхзвуковым

($M_2 = u_2 / a_2 > 1$) при больших значениях M_1 . Для воздуха $M_2 = 1$ при $M_1 \approx 2$. В системе координат, связанной со скачком уплотнения, поток перед скачком сверхзвуковой, а за скачком дозвуковой. Граница рабочего и толкающего газов, движущаяся со скоростью u_2 , называется контактной поверхностью. На контактной поверхности давления и скорости рабочего и толкающего газов одинаковы, т.е. $u_2 = u_3$, $p_2 = p_3$. Падающая ударная волна отражается от торца канала низкого давления, за отраженной ударной волной газ неподвижен (область 5).

С разрывом диафрагмы начинается нестационарное истечение толкающего газа в канал, возникает так называемая центрированная волна разрежения, "голова" которой перемещается по неподвижному толкающему газу (область 4) со скоростью звука a_4 . Отразившись от торца камеры высокого давления, волна разрежения движется к торцу канала, нарушая однородность газодинамических переменных в отмеченных цифрами областях и ограничивая рабочее время установки.

Значение M_1 ударной волны зависит от отношения a_4/a_1 , скорости звука в толкающем и рабочем газах, отношения p_4/p_1 , давлений на диафрагме, отношений удельных теплоемкостей $K_4 = C_{p4}/C_{v4}$, $K_1 = C_{p1}/C_{v1}$. При прочих равных условиях M_1 растет с увеличением отношения p_4/p_1 , стремясь к асимптотическому значению $M_{1, \max} = \frac{K_1 + 1}{K_4 - 1} \times \frac{a_4}{a_1}$. Справа от $x-t$ диаграммы на рис. 1 приведены эпюры изменения давления и скорости в зависимости от времени в сечении I канала ударной трубы, выбранном недалеко от торца канала.

Лабораторную работу выполняют на так называемой атмосферной ударной трубе, где в качестве толкающего газа используют атмосферный воздух, находящийся в негерметизированной камере высокого давления, а перепад давления на диафрагме создают за счет заполнения герметизированного канала низкого давления рабочим газом до давлений, меньших атмосферного.

Конструкция атмосферной ударной трубы, а также основные элементы газовой системы и приборы контроля начального давления p_1 в канале ударной трубы приведены на рис. 2. Основной элемент установки — герметический канал низкого давления б с быстротъемным торцом в и коротким каналом малого диаметра з. При выполнении работы I перед

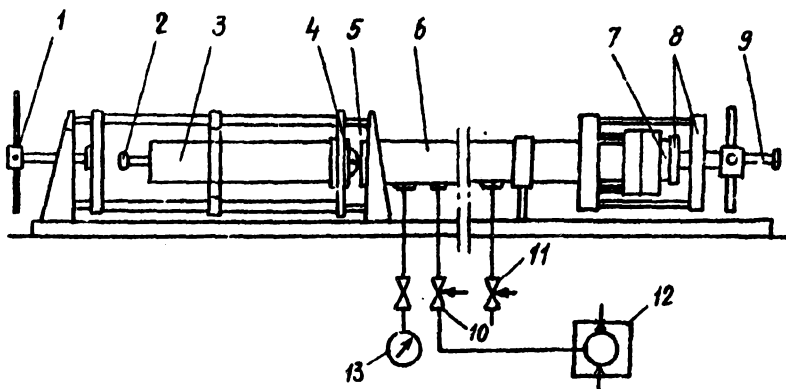


Рис. 2

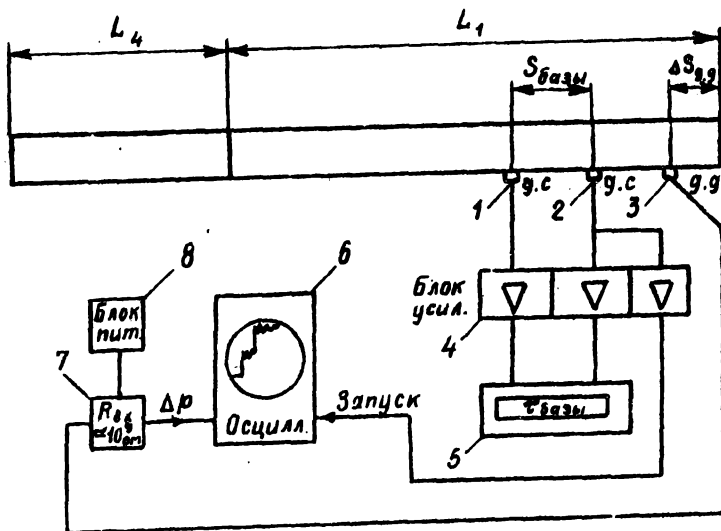


Рис. 3

быстросъемным торцом устанавливают плоскую заглушку 7, отражающую падающую ударную волну. На втором торце канал отсекают от атмосферного воздуха тонкой диафрагмой 5. Диафрагму уплотняют с помощью винта с рукоятками 1, перемещающего жесткую раму по направляющим, связанным с основанием установки. К диафрагменному узлу, имеющему байонетный быстросъемный разъем, могут подсоединяться негерметичные камеры высокого давления 3 различной длины. Вдоль оси симметрии каждой камеры может перемещаться с помощью рукоятки 2 стержень с крестообразным пробойником 4, разрезающим диафрагму. В работе 1 используют камеру наибольшей длины ($L_4 \approx 0,8$ м).

К каналу через вентиль 10 подсоединен вакуумный насос 12. Вентиль 11 позволяет регулировать заполнение канала атмосферным воздухом. Двухкальным стрелочным барометром-анероидом 13 измеряют давление p_1 в канале.

На рис. 3 показана блок-схема пьезоэлектрической системы измерения скорости ударной волны и изменения давления на падающей и отраженной ударной волне. Скорость ударной волны измеряют базовым методом с применением пьезоэлектрических датчиков 1, 2, расстояние $S_{\text{баз}}$ между которыми известно. Пьезоэлектрические датчики при воздействии на них резкого перепада давления на фронте ударной волны генерируют электрические сигналы большой крутизны. Сигналы усиливаются и управляют работой электронного цифрового прибора 5, регистрирующего интервал времени $\tau_{\text{баз}}$ за который ударная волна проходит расстояние $S_{\text{баз}}$. Скорость U_1 падающей ударной волны находят, разделив базовое расстояние $S_{\text{баз}}$ на измеренный интервал времени $\tau_{\text{баз}}$, так что $U_1 = S_{\text{баз}} / \tau_{\text{баз}}$.

Пьезоэлектрическая система регистрации скачкообразного изменения давления $\Delta p_{\text{фр}}$ на фронте ударной волны включает следующие элементы:

- а) пьезоэлектрический датчик давления 3, преобразующий зависящее от времени t изменение давления $\Delta p(t)$ в пропорциональную этому изменению разность потенциалов $\Delta U(t)$.
- б) запоминающий осциллограф 6, регистрирующий изменение во времени разности потенциалов $\Delta U(t)$, пропорциональное изменению давления $\Delta p(t)$, в сечении канала ударной трубы, где установлен датчик;

в) радиотехнический прибор 7 с высоким входным сопротивлением (например, истоковый повторитель), уменьшающий утечку электрических зарядов пьезодатчика по входному сопротивлению и предотвращающий тем самым заметное искажение регистрируемой разности потенциалов $\Delta U(t)$; блок питания 8;

г) систему запуска развертки осциллографа, включающую пьезодатчик 2 запуска развертки и усилитель 4.

Базовый метод измерения скорости ударной волны с анализом погрешности измерений и пьезоэлектрическая система регистрации нестационарных давлений с описанием принципа действия и конструкции пьезоэлектрических датчиков подробно рассмотрены в работе [2].

В процессе выполнения лабораторной работы экспериментально исследуют зависимость величины, прямо пропорциональной относительному изменению давления на прямом скачке уплотнения (фронте ударной волны) $(p_d - p_n)/p_n$, от числа $M_n = U_n/a_n$ скачка уплотнения. Здесь индекс n относится к газодинамическим переменным перед скачком, индекс d - к газодинамическим переменным за скачком, U_n есть скорость скачка уплотнения относительно газа перед скачком. На рис. 4 приведены картины течения для падающей (а) и отраженной (б)

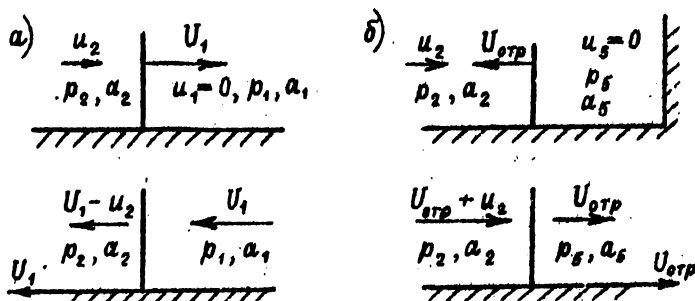


Рис. 4

ударной волны, позволяющие переход от лабораторной системы координат (верхний ряд) к системе координат с неподвижным скачком уплотнения (нижний ряд).

Датчик, установленный вблизи торца, позволяет регистрировать перепады давления как на падающей, так и на отраженной ударной волне, причем зависимости от числа M_n величин, пропорциональных отно-

сительному изменению давления, должны совпадать. Для подтверждения этого важного положения применим известные формулы прямого скачка уплотнения в газе с постоянным отношением удельных теплоемкостей [1, с. I24-I37] к расчету переменных на падающей и отраженной ударной волне.

Для падающей ударной волны (рис. 4, а) с учетом обозначений $p_n = p_1$, $p_d = p_2$, $M_n = M_1 = U_1/a_1$ запишем

$$\frac{p_2 - p_1}{p_1} = \frac{\Delta p_{2-1}}{p_1} = \frac{\Delta U_{2-1}}{K_{датч} \cdot p_1} = \frac{2K_1}{K_1 + 1} (M_1^2 - 1), \quad (1)$$

откуда

$$\frac{\Delta U_{2-1}}{p_1} = B_{пад} (M_1^2 - 1). \quad (2)$$

Здесь $B_{пад} = \frac{2K_1}{K_1 + 1} K_{датч}$; $K_{датч} = \frac{\Delta U}{\Delta p}$ - чувствительность пьезоэлектрического датчика; ΔU - разность потенциалов на электродах датчика, возникающая при изменении давления Δp . Принято также, что коэффициент передачи напряжения истокового повторителя 7 (см. рис. 3) постоянен и равен единице, так что коэффициент $K_{датч}$ определяет чувствительность системы "датчик-истоковый повторитель".

Для отраженной ударной волны зависимость, аналогичная (1), примет вид

$$\frac{p_5 - p_2}{p_2} = \frac{2K_1}{K_1 + 1} (M_{отр}^2 - 1), \quad (3)$$

где

$$M_{отр} = \frac{|U_{отр}| + u_2}{a_2} \quad (\text{рис. 4, б}).$$

Зависимость, аналогичную (2), запишем в форме

$$\frac{\Delta U_{5-2}}{p_2} = B_{отр} (M_{отр}^2 - 1), \quad (4)$$

причем теоретически $B_{пад} = B_{отр}$.

Необходимые для расчета числа $M_{отр}$ величины u_2 , a_2 , $U_{отр}$ определят по формулам

$$\frac{u_2}{a_1} = \frac{2}{\kappa_1 + 1} \left(M_1 - \frac{1}{M_1} \right); \quad (5)$$

$$\frac{a_2}{a_1} = \sqrt{1 + \frac{(\kappa_1 - 1)(1 + \kappa_1 M_1^2)}{(\kappa_1 + 1)M_1} \frac{u_2}{a_1}}; \quad (6)$$

$$\frac{|U_{отр}|}{U_1} = 1 - \frac{3 - \kappa_1}{\kappa_1 + 1} \left(1 - \frac{1}{M_1^2} \right). \quad (7)$$

Зависимости (5), (6), (7) затабулированы и приведены в приложении I. Исследовать экспериментально зависимости $\frac{p_n - p_n}{p_n} = f(M_n)$ в форме (1), (3) имеет смысл в том случае, когда коэффициент $K_{детч}$ известен с высокой точностью. Определение чувствительности датчика в экспериментах на ударной трубе является самостоятельной и трудоемкой задачей [2], поэтому в дальнейшем экспериментальные данные следует представлять в форме (2), (4).

Последовательность подготовки и выполнения лабораторной работы такова.

1. Составляют систему измерений согласно блок-схеме (см. рис. 3).
2. После проверки системы измерений руководителем работ включают питание приборов, отмеченных на блок-схеме.

3. На запоминающем регистрирующем осциллографе устанавливает указанную преподавателем чувствительность, которую корректируют по мере необходимости так, чтобы амплитуды сигналов, соответствующие давлению за отраженной ударной волной, составляли 3-5 больших делений шкалы экрана.

Устанавливают также однократный режим работы осциллографа. Длительность однократной развертки электронного луча по экрану осциллографа выбирают равной 1 мс.

4. Герметизируют канал ударной трубы с одной стороны плоской заглушкой 7 (см. рис. 2), используя быстросъемный торец 8, а с другой - тонкой металлической фольгой или пленкой из синтетического материала (диафрагмой). Диафрагму 5 прижимают к неподвижному фланцу канала подвижным фланцем, перемещающимся при вращении рукояток винта I системы уплотнения диафрагмы.

5. Откачивают воздух из канала ударной трубы до заданного дав-

ления p , используя вакуумный насос 12 (см. рис. 2) и регулируя от-
качку вентилями 10, 11.

6. Регулируют яркость и фокусировку развертки запоминающего
осциллографа, инициируя однократную развертку нажатием кнопки "Пуск".
Засвечивают экран осциллографа, нажимая кнопку "Стирание". Нажимают
кнопку "Готов" и следят за готовностью осциллографа по световому
индикатору. Подготавливают к работе измеритель интервалов времени,
нажимая кнопку "Пуск". Уточняют по манометрам и записывают в про-
токол величину начального давления p , и резким движением
пробойника разрывают диафрагму. После пуска установки открывают
быстросъемный торец и продувают канал со стороны диафрагменного
узла, освобождая канал от обрывков диафрагмы и нагретого ударной
волной воздуха.

7. Записывают в протокол показания цифрового прибора, измеряю-
щего интервал времени $\tau_{\text{базы}}$. Аккуратно переносивают на кальку
с экрана осциллографа полученную осциллограмму, обязательно отметив
на кальке узлы масштабной сетки по внешнему периметру сетки, нуле-
вую линию и характерные особенности осциллограммы (колебания напря-
жения входного сигнала, моменты прихода падающей и отраженной удар-
ных волн к датчику давления и т.д.). Эксперимент выполняют 4-6 раз,
изменяя начальное давление p , в пределах $2 \times 10^3 \dots 2 \times 10^4$ Па так, что-
бы каждое последующее давление p , примерно в полтора раза отлича-
лось от предыдущего.

Далее следуют указания к методике обработки экспериментальных
данных, оформлению и обсуждению результатов экспериментов. Исходные
данные, результаты расчетов, промежуточные и окончательные резуль-
таты обработки экспериментальных данных заносят в табл. 1 и 2.

Табл. 2 содержит промежуточные и окончательные результаты статисти-
ческой обработки экспериментальных данных.

Порядок обработки экспериментальных данных следующий.

1. По известному базовому расстоянию $S_{\text{базы}}$ и измеренному в
каждом эксперименте интервалу времени $\tau_{\text{базы}}$ рассчитывают скорость
ударной волны $U_1 = S_{\text{базы}} / \tau_{\text{базы}}$. Определив температуру T_n в поме-
щении, где находятся ударные трубы, и полагая $T_1 = T_n$, вычисляют
скорость звука a_1 воздуха по формуле $a_1 = 20,1 \sqrt{T_1}$ м/с. Находят
по данным измерений число $M_1 = U_1 / a_1$ ударной волны и $M_1^2 - 1$.

Таблица 1

Сводная таблица результатов экспериментов

$a_1 =$ м/с, $S_{\text{базн}} =$ м, $K_1 =$, $\rho_a =$ н/м², $T_a = T_1 =$ К.

Номер опыта	$\rho_1,$ Па	$\tau_{\text{базн}},$ мкс	$u_1 = \frac{S\tau}{\tau_1},$ м/с	$M_1 = \frac{u_1}{a_1}$	$M_1^2 - 1$	
	экспер.	экспер.	экспер.	экспер.	экспер.	
1 2 ⋮						
Номер опыта	$A_{2-1},$ делен.	$K_{\text{осцил.}}$ В/дел	$\Delta V_{2-1} = K_{\text{осц.}} \cdot A_{2-1}$ В	$\frac{\Delta V_{2-1}}{\rho_1}$ В/Па		
	экспер.	экспер.	экспер.	экспер.		
1 2 ⋮						
Номер опыта	$\frac{u_2}{a_1}$	$\frac{a_2}{a_1}$	$M_2 = \frac{u_2}{a_2}$	$\frac{ u_{\text{отр}} }{u_1}$	$\frac{ u_{\text{отр}} }{a_2}$	$M_{\text{отр}} = \frac{u_{\text{отр}}}{a_2}$
	Форм. 5	Форм. 6	Расчет	Форм. 7	Расчет	Расчет
1 2 ⋮						
Номер опыта	$M_{\text{отр}}^2 - 1$	$A_{5-1},$ дел.	$\Delta V_{5-1} = K_{\text{осц.}} \cdot A_{5-1}$ В	$\Delta V_{5-2} = \Delta V_{5-1} - \Delta V_{2-1}$ В	$\frac{\Delta V_{5-2}}{\rho_2}$ В/Па	$\frac{P_{52}}{\rho_{21}}$
	Расчет	экспер.	экспер.	экспер.	эксп. расч.	экспер.
1 2 ⋮						

Таблица 2

Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов

$\alpha_{\text{наг}} = \alpha_{\text{отр}} = t_{\alpha}(N_{\text{наг}} - 1) = t_{\alpha}(N_{\text{отр}} - 1) =$

Номер опыта i	$M_{1i}^2 - 1$	$\frac{\Delta V_{2-1,i}}{\rho_{1,i}}$, мкВ/Па	$q_{i1} = \left(\frac{K_{\text{осц},1}/\rho_{1,i}}{K_{\text{осц},1}/\rho_{1,i}} \right)^2$	$\frac{M_{1i}^2 - 1}{q_{i1}}$
1 2 ⋮ N				
Номер опыта i	$\frac{(M_{1i}^2 - 1)^2}{q_{i1}}$	$\frac{\Delta V_{2-1,i} M_{1i}^2 - 1}{\rho_{1,i} q_{i1}}$ мкВ/Па	$\frac{\Delta V_{2-1,i} \hat{B}_N (M_{1i}^2 - 1)}{\rho_{1,i}}$ мкВ/Па	$\left(\frac{\Delta V_{2-1,i} \hat{B}_N (M_{1i}^2 - 1)}{\rho_{1,i}} \right)^2$ мкВ ² /Па ²
1 2 ⋮ N				
$\sum_{i=1}^N$			—	
$\hat{B}_{\text{наг}}$, мкВ/Па	$\hat{\sigma}_{\text{наг}}^2$, делен. ²	$\hat{D}\{\hat{B}_{\text{наг}}\}$, мкВ ² /Па ²	$t_{\alpha} \sqrt{\hat{D}\{\hat{B}_{\text{наг}}\}}$, мкВ/Па	$ \hat{B}_{\text{наг}} - t_{\alpha} \sqrt{\hat{D}} $ $\hat{B}_{\text{наг}}$
Номер опыта i	$M_{\text{отр},i}^2 - 1$	$\frac{\Delta V_{5-2,i}}{\rho_{2,i}}$, мкВ/Па	$q_{i2} = \left(\frac{K_{\text{осц},2}/\rho_{2,i}}{K_{\text{осц},2}/\rho_{2,i}} \right)^2$	$\frac{M_{\text{отр},i}^2 - 1}{q_{i2}}$
1 2 ⋮ N				
Номер опыта i	$\frac{(M_{\text{отр},i}^2 - 1)^2}{q_{i2}}$	$\frac{\Delta V_{5-2,i} M_{\text{отр},i}^2 - 1}{\rho_{2,i} q_{i2}}$ мкВ/Па	$\frac{\Delta V_{5-2,i} \hat{B}_{\text{отр}} (M_{\text{отр},i}^2 - 1)}{\rho_{2,i}}$ мкВ/Па	$\left(\frac{\Delta V_{5-2,i} \hat{B}_{\text{отр}} (M_{\text{отр},i}^2 - 1)}{\rho_{2,i}} \right)^2$ мкВ ² /Па ²
1 2 ⋮ N				
$\sum_{i=1}^N$			—	
$\hat{B}_{\text{отр}}$, мкВ/Па	$\hat{\sigma}_{\text{отр}}^2$, делен. ²	$\hat{D}\{\hat{B}_{\text{отр}}\}$, мкВ ² /Па ²	$t_{\alpha} \sqrt{\hat{D}\{\hat{B}_{\text{отр}}\}}$, мкВ/Па	$ \hat{B}_{\text{отр}} - t_{\alpha} \sqrt{\hat{D}} $ $\hat{B}_{\text{отр}}$
			$t_{\alpha}(N_{\text{наг}} + N_{\text{отр}} - 2)$	$t_{\alpha}(N_{\text{наг}} + N_{\text{отр}} - 2)$ эксн.

2. Рассчитывают по формулам (I), (5), (6), (7) для найденного по данным измерений числа M_1 ударной волны или определяют по таблицам, приведенным в приложении I, соответственно давление p_2 , скорость спутного потока u_2 , скорость звука a_2 , скорость отраженной ударной волны $U_{отр}$, находят число $M_{отр} = \frac{|U_{отр}| + u_2}{a_2}$ и вычисляют $M_{отр}^2 - 1$.

3. Определяют по осциллограммам, скопированным с экрана осциллографа на кальку, амплитуды сигналов A_{2-1} , A_{5-1} , $A_{5-2} = A_{5-1} - A_{2-1}$ в делениях шкалы экрана, при необходимости осредняя по времени (за 2-4 периода) амплитуды затухающих колебаний сигнала датчика, вызванных возбуждением собственных колебаний пьезоэлемента при резком изменении давления на фронте ударной волны. Умножая измеренные амплитуды A_{2-1} , A_{5-2} на чувствительность осциллографа $K_{осц}$ (В/дел), определяют в вольтах разности потенциалов ΔU_{2-1} , ΔU_{5-2} .

Пример обработанной осциллограммы представлен на рис. 5.

4. Вычисляют отношения $\Delta U_{2-1}/p_1$, $\Delta U_{5-2}/p_2$ и в координатах $\Delta U_{d-n}/p_n$, $M_n^2 - 1$ наносят экспериментальные точки, соответствующие падающей и отраженной ударным волнам (рис. 6, а). Прямые, осредняющие экспериментальные данные, наносят на рис. 6, а по результатам обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов, рассчитав по формуле (II) оценки коэффициентов $\hat{B}_{пад}$ и $\hat{B}_{отр}$.

Для сопоставления свойств падающей и отраженной ударных волн строят расчетную кривую отношения давлений p_{52}/p_{21} в зависимости от числа M_1 , используя данные табл. I (рис. 6, б). На том же рисунке наносят экспериментальные точки, причем отношение $(p_{52}/p_{21})_{эксп}$ определяют по формуле

$$\left(\frac{p_{52}}{p_{21}}\right)_{эксп} = \left(\frac{p_5}{p_2} ; \frac{p_2}{p_1}\right)_{эксп} = \frac{1}{p_{21}} \left[1 + \frac{\Delta U_{5-2}}{\Delta U_{2-1}} \left(1 - \frac{1}{p_{21}}\right) \right]. \quad (8)$$

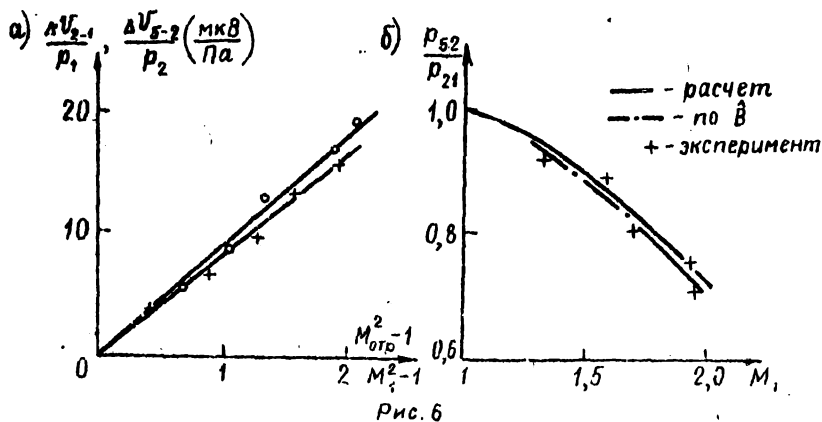
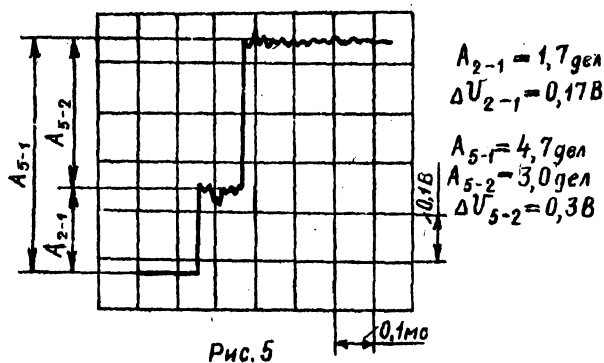
5. Выполняют статистическую обработку экспериментальных данных методом наименьших квадратов раздельно для падающей и отраженной ударной волны, имея в виду следующую модель измерений.

Считая случайными величинами амплитуды A_i электрических сигналов, регистрируемых на экране осциллографа, представляют результат i измерения в виде

$$\Delta U_{d-n,i} = K_{осц,i} \cdot A_{d-n,i} + K_{осц,i} \cdot n_{A,i} \quad (9)$$

где $n_{A,i}$ - статистически независимые случайные ошибки измерения амплитуд A , распределенные по нормальному (гауссовскому) закону с нулевым математическим ожиданием $M\{n_i\} = 0$ и дисперсией

$D\{n_i\} = \sigma^2$ и не зависящие от чувствительности осциллографа $K_{осц,i}$ и давления p_{ni} .



Учитывая линейность пьезоэффекта и полагая в соответствии с формулами (2), (4) величины $\left(\frac{\Delta U_{d-n}}{P_n}\right)_{\text{точн}}$ прямо пропорциональными величинам $M_n^2 - 1$, можно записать результаты i эксперимента в виде

$$\frac{\Delta U_{d-n,i}}{P_{ni}} = B(M_{ni}^2 - 1) + \frac{K_{осц,i}}{P_{ni}} n_{A,i}, \quad (10)$$

где B - коэффициент пропорциональности.

Коэффициент $K_{осц,i}$ а также величины P_{ni}, M_{ni} , определяемые с малой по сравнению с амплитудами $A_{d-n,i}$ погрешностью, считают известными точно.

Множители $K_{осц,i} / P_{ni}$ при ошибках $n_{A,i}$ означают, что измерения величин $\frac{\Delta U_{d-n}}{P_n}$, выполненные при различных давлениях P_{ni} и коэффициентах $K_{осц,i}$, являются неравноточными.

Введем коэффициенты

$$q_i = \left(\frac{K_{осц,i}}{P_{ni}}\right)^2 \quad \text{и} \quad q_{i1} = \left(\frac{K_{осц,i}}{P_{ni}} / \frac{K_{осц,1}}{P_{n1}}\right)^2,$$

где цифрой 1 отмечены данные в первом по порядку спите, например, в опыте с наименьшим или наибольшим начальным давлением.

При сделанных предположениях оценку \hat{B} коэффициента пропорциональности находят из условия

$$\min_{\hat{B}'} \sum_{i=1}^N \frac{[\Delta U_{d-n,i} / P_{ni} - \hat{B}'(M_{ni}^2 - 1)]^2}{q_i}$$

и рассчитывают по формуле

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta U_{d-n,i} / P_{ni}) \cdot \frac{M_{ni}^2 - 1}{q_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{(M_{ni}^2 - 1)^2}{q_i}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\Delta U_{d-n,i}}{P_{ni}} \cdot \frac{M_{ni}^2 - 1}{q_{i1}}}{\sum_{i=1}^N \frac{(M_{ni}^2 - 1)^2}{q_{i1}}}, \quad (11)$$

где N - количество экспериментов.

Погрешность оценки \hat{B} коэффициента пропорциональности характеризуют дисперсией $D\{\hat{B}\}$. Оценку $\hat{D}\{\hat{B}\}$ определяют из выражения

$$\hat{D}\{\hat{B}\} = \frac{\hat{\sigma}^2}{\sum_{i=1}^N \frac{(M_{ni}^2 - 1)^2}{q_i}} = \frac{q_1 \cdot \hat{\sigma}^2}{\sum_{i=1}^N \frac{(M_{ni}^2 - 1)^2}{q_i}}, \quad (12)$$

где $\hat{\sigma}^2$ - оценка дисперсии случайной величины n_A , равная

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{\left[\frac{\Delta U_{a-n_i}}{p_{ni}} - \hat{B}(M_{ni}^2 - 1) \right]^2}{q_i} = \frac{1}{N-1} \frac{1}{q_1} \sum_{i=1}^N \frac{\left[\frac{\Delta U_{a-n_i}}{p_{ni}} - \hat{B}(M_{ni}^2 - 1) \right]^2}{q_{i1}}. \quad (13)$$

Окончательный результат определения коэффициента пропорциональности B записывают в форме

$$\hat{B} - t_{\alpha}(N-1) \cdot \sqrt{\hat{D}\{\hat{B}\}} < B < \hat{B} + t_{\alpha}(N-1) \cdot \sqrt{\hat{D}\{\hat{B}\}}, \quad (14)$$

где $t_{\alpha}(N-1)$ - коэффициент Стьюдента, найденный по таблицам [3], [4] для заданной вероятности α и числа измерений N . В частности, $t_{\alpha}(n)$ при $\alpha = 0,9$ и $\alpha = 0,95$ принимает значения, приведенные в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha = 0,9$	2,9	2,4	2,1	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8
$\alpha = 0,95$	4,3	3,2	2,8	2,6	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2

Коэффициент α имеет смысл вероятности того, что истинное значение величины B лежит в пределах, указанных формулой (14), т.е.

$$\alpha = P \left\{ \frac{|B - \hat{B}|}{\sqrt{\hat{D}\{\hat{B}\}}} \right\},$$

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

По найденным оценкам $\hat{B}_{наг}$ и $\hat{B}_{отр}$ с учетом соотношения

$$\frac{p_{52}}{p_{21}} = \frac{1}{p_{21}} + \frac{\hat{B}_{отр}}{\hat{B}_{наг}} \left(1 - \frac{1}{p_{21}} \right) \frac{M_{отр}^2 - 1}{M_{наг}^2 - 1} \quad (15)$$

строят на рис. 6,6 штрихпунктирную кривую, огибающую экспериментальные данные.

Согласно соотношению $\frac{p_d - p_n}{p_n} = \frac{2K_1}{K_1 + 1} (M_n^2 - 1)$ теоретические значения коэффициентов пропорциональности $B_{пад}$ и $B_{отр}$ в формулах (2), (4) должны совпадать. Оценки $\hat{B}_{пад}$ и $\hat{B}_{отр}$ величин $B_{пад}$ и $B_{отр}$, найденные на основе экспериментальных данных по формуле (II), как правило, не совпадают. Следует выяснить, имеет ли это различие случайный характер (H_0 - гипотеза) или различие обусловлено влиянием некоторых факторов, например, не существенных для падающей ударной волны, существенных для отраженной ударной волны и имеющих систематический характер (H_1 - гипотеза).

Чтобы выяснить, какая из гипотез (H_0 или H_1) справедлива, вычисляют положительную разность коэффициентов \hat{B} , например

$$\hat{B}_{пад} - \hat{B}_{отр} > 0, \text{ и составляют случайную величину}$$

$$t_{\alpha, \text{эксн}} (N_{пад} + N_{отр} - 2) = \frac{\hat{B}_{пад} - \hat{B}_{отр}}{\sqrt{\hat{D}\{\hat{B}_{пад}\} + \hat{D}\{\hat{B}_{отр}\}}} \quad (16)$$

Случайная величина $t_{\alpha, \text{эксн}} (N_{пад} + N_{отр} - 2)$ для прямо пропорциональных зависимостей (2) и (4) и при условии $N_{пад} \approx N_{отр}$ имеет известную плотность распределения вероятностей (распределение Стьюдента [3]). Задают коэффициент α , полагая $\alpha = 0,9$ или $\alpha = 0,95$, и для числа $n = N_{пад} + N_{отр} - 2$ находят по таблицам [3], [4]

или используют приведенные в табл. 3 значения коэффициента Стьюдента $t_{\alpha}(n)$. Если $t_{\alpha, \text{эксн}} < t_{\alpha}(n)$, то различие коэффициентов $\hat{B}_{пад}$ и $\hat{B}_{отр}$ статистически незначимо, т.е. вызвано случайным разбросом экспериментальных данных. При $t_{\alpha, \text{эксн}}(n) > t_{\alpha}(n)$ различие коэффициентов $\hat{B}_{пад}$ и $\hat{B}_{отр}$ статистически значимо, т.е. не может быть объяснено только случайными причинами и связано, видимо, с различием в условиях эксперимента и в условиях определения числа M_n для падающей и отраженной ударной волны.

Статистическая обработка экспериментальных данных позволяет найти оценку $K_{датч}$ чувствительности пьезодатчика согласно модели неравноточных измерений

$$\Delta U_{d-n,i} = K_{датч} \cdot \Delta p_{d-n,i} + K_{осц,i} \cdot n_{\lambda,i} \quad (17)$$

Приведем формулы для расчета величин $\hat{K}_{датч}$, $\hat{\sigma}_{датч}^2$, $\hat{D}\{\hat{K}_{датч}\}$:

$$\hat{K}_{датч} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta U_{d-n,i} \cdot \frac{\Delta p_{d-n,i}}{(K_{осц,i}/K_{осц,1})^2}}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta p_{d-n,i}}{K_{осц,i}/K_{осц,1}} \right)^2}; \quad (18)$$

$$\hat{\sigma}_{датч}^2 = \frac{1}{K_{осц,1}^2 (N-1)} \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta U_{d-n,i} - \hat{K}_{датч} \cdot \Delta p_{d-n,i})^2}{(K_{осц,i}/K_{осц,1})^2}; \quad (19)$$

$$\hat{D}\{\hat{K}_{датч}\} = \frac{K_{осц,1}^2 \cdot \hat{\sigma}_{датч}^2}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta p_{d-n,i}}{K_{осц,i}/K_{осц,1}} \right)^2}. \quad (20)$$

Если результаты эксперимента таковы, что справедлива H_0 -гипотеза, то при определении чувствительности датчика данные для падающей и отраженной ударных волн могут обрабатываться совместно. В противном случае при величине $(\sqrt{\hat{\sigma}^2}/\hat{B})_{пад}$, не превышающей 2-3%, чувствительность датчика рассчитывают по экспериментальным данным для падающей ударной волны. Условия эксперимента здесь ближе к модели течения, принятой при выводе формулы $\Delta p_{d-n} = f(M_n)$, по сравнению с условиями для отраженной ударной волны.

По осциллограммам оценивают максимальные и минимальные погрешности измерений амплитуд A_{d-n} , относя неопределенность ΔA_{d-n} результата измерения величины A_{d-n} к измеренной амплитуде A_{d-n} .

Заполнив табл. 1 и табл. 2, формулируют частные и общий выводы о результатах работы, сопоставляя между собой данные экспериментов для падающей и отраженной ударных волн, а также сравнивая экспериментальные данные с результатами расчетов. При этом учитывают относительную разность $(\hat{B}_{отр} - \hat{B}_{пад})/\hat{B}_{пад}$ как характеристику несовпадения оценок коэффициентов $B_{пад}$ и $B_{отр}$, статистическую значимость (H_1 - гипотеза) или статистическую незначимость (H_0 - гипотеза) различия оценок $\hat{B}_{пад}$ и $\hat{B}_{отр}$, а также относительные величины

$$\frac{|\hat{B}_{наг} - t_{\alpha} \sqrt{\hat{D}} \{\hat{B}_{наг}\}|}{\hat{B}_{наг}}, \quad \frac{|\hat{B}_{отр} - t_{\alpha} \sqrt{\hat{D}} \{\hat{B}_{отр}\}|}{\hat{B}_{отр}},$$

характеризующие разброс экспериментальных данных относительно осредненных зависимостей (2), (4).

Работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ В СОПЛАХ ЛАВАЛЯ

В работе исследуют близкие к одномерным потоки воздуха в сменных каналах переменного сечения, помещенных в диафрагменный блок атмосферной ударной трубы.

Основные цели работы следующие:

а) умение рассчитывать газодинамические переменные в потоках, близких к одномерным;

б) экспериментальная проверка известного из курса "Механика сплошных сред" [1, с.129-134] явления потери полного давления в прямых скачках уплотнения;

в) умение анализировать течение внутри сопла, в частности, явление записания сопла (возникновения внутри него скачков уплотнения) при повышении противодавления (по показаниям датчика полного давления p_0').

Основным объектом исследования является сверхзвуковой установившийся поток воздуха в сменных конических соплах Лавалья в диафрагменном блоке атмосферной ударной трубы. Все сопла имеют один и тот же угол раствора и одинаковый диаметр сечения выхода, но различные диаметры d^* критического сечения, определяющие числа M потока на выходе сопла.

Установка позволяет при спятой камере высокого давления, т.е. при неограниченно большом объеме камеры, исключить волну разрежения при запуске ударной трубы (рис. 1) и получать вначале неустановившиеся, а через несколько миллисекунд после разрыва диафрагмы -- установившиеся течения в соплах. Продолжительность установившегося течения ограничена возвратом к соплу ударной волны, отразившейся от торца канала низкого давления.

Одномерное установившееся адиабатическое течение идеального

совершенного газа с постоянным отношением теплоемкостей: $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ по соплу Лавала описывается известными формулами [1, с. 110-120, 129-134]. Результаты расчетов относительных переменных по этим формулам для случая $\kappa = 1,4$ (двухатомный газ) приведены в приложении 2. Обозначения газодинамических переменных общеприняты: T - температура; ρ - плотность; p - давление; u - скорость потока; a - скорость звука; M - число Маха потока; $q = \rho u^2 / 2$ - скоростной напор; A - площадь поперечного сечения; A^* - площадь критического сечения сопла Лавала. Давление p_0' - полное давление газа (давление торможения) за прямым скачком уплотнения. Отметим наиболее интересные свойства сверхзвуковых потоков в соплах Лавала. Из сопоставления изэнтропических формул следует, что наиболее быстро вдоль по соплу падает давление, наименее быстро ^{скорость звука} - температура. Скорость потока быстро достигает значений, близких к предельной скорости истечения $u_{max} = \sqrt{\frac{2}{\kappa-1}} a_0$. Так, для $\kappa = 1,4$ при $M = 2$ имеем $u/u_{max} = 0,667$, при $M = 3$ $u/u_{max} = 0,802$, при $M = 4$ $u/u_{max} = 0,873$. Относительный скоростной напор q/p_0' так же, как и скорость потока, быстро достигает значений, близких к предельному значению $(q/p_0')_{M \rightarrow \infty}$, для $\kappa = 1,4$, равному 0,544.

Весьма важное свойство сверхзвуковых потоков - невозможность или по крайней мере затруднительность их изэнтропического торможения (без скачков уплотнения). Следствие этого свойства - неизбежная необратимая потеря механической энергии, характеризующаяся падением давления торможения на скачках уплотнения. Наибольшие потери давления торможения возникают при простейшем способе торможения с образованием оттопленного скачка уплотнения на осесимметричном затупленном теле (рис. 7). Вблизи оси симметрии течения скачок уплотнения по форме близок к прямому, и потеря полного давления p_0' здесь максимальная.

Свойство сверхзвуковых потоков - увеличение потери полного давления в прямом скачке при увеличении числа M - экспериментально исследуется в работе 2.

Следует подчеркнуть, что во многих случаях потери полного давления на скачках уплотнения как немалотельные явления приводят, например, к ухудшению рабочих характеристик реактивных двигателей. Принимают специальные меры для преобразования прямых скачков в сис-

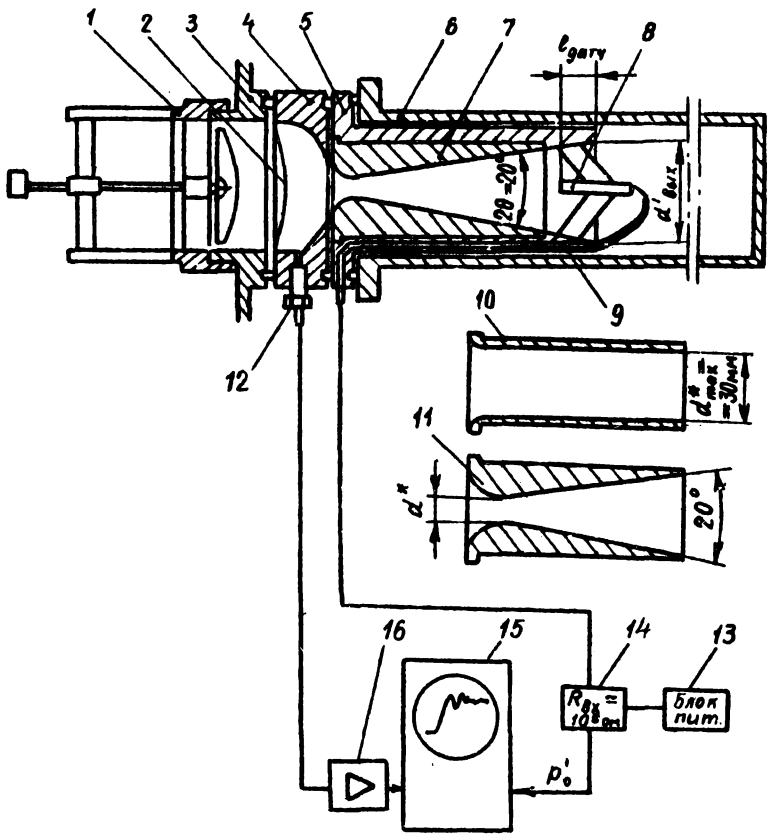


Рис. 7

тому косых скачков уплотнения, на которых потери полного давления меньше, чем для прямых скачков.

Лабораторную работу по исследованию сверхзвукового течения в соплах Лаваля выполняют на атмосферной ударной трубе (см. рис. 2). Конструкция диафрагменного блока со сменными соплами и блок-схема пьезоэлектрической системы измерения полного давления p'_0 приведены на рис. 7. Там же даны схемы течения внутри сопла в режиме, близком к расчетному при малых начальных давлениях $p_1 < 10^3$ Па в канале ($p_1 \ll p_a$) и в режиме перерасширения при больших начальных давлениях $p_1 = 5 \cdot 10^3 \dots 15 \cdot 10^3$ Па с прямым скачком уплотнения внутри сопла.

Быстросъемная насадка I с крестообразным ножом пробойника установлена на фланце 3, жестко связанном с подвижной рамой. Тонкая лавсановая диафрагма 2 помещена между фланцем 3 и вкладышем 4. Вкладыш 4 примыкает к стакану 5, вложенному в канал 6 ударной трубы. В стакан 5 в свою очередь вложена сопловая вставка 7. Десять сопловых вставок 7, II имеют различные диаметры критического сечения d^* , изменяющиеся в пределах от 20 до 8 мм. В каждой вставке короткий цилиндрический канал диаметром d^* плавно сопрягается в дозвуковой части со сферической поверхностью вкладыша 4 и плавно переходит в коническую поверхность с углом раствора $2\theta_c = 20^\circ$ в сверхзвуковой части сопла, где создается конический поток. Имеется также вставка 10 с цилиндрическим каналом диаметром $d_{max}^* = 30$ мм. Вставка 10 служит для создания звукового потока с числом $M = 1$. Вдоль оси симметрии сопла на пилонах закреплен пьезодатчик 8 полного давления p'_0 . Датчик 8 в форме цилиндра диаметром 5 мм обращен торцом навстречу потоку. В центре торца имеется отверстие диаметром 0,8 мм, ведущее непосредственно к пьезоэлементу. Зная диаметр $d'_{вых} = 36$ мм, расстояние $l_{датч}$ между торцами датчика и стакана и угол $2\theta = 20^\circ$, можно рассчитать площадь поперечного сечения $A_{S_{вых}}$ сопла в плоскости торца датчика. Кабель 9 датчика проходит через отверстие в корпусе стакана 5 и герметизируется на выходе из стакана.

При вращении винта I (см. рис. 2) осевое усилие передается фланцу 3 и следующим за ним деталям 4, 5 (рис. 7). Диафрагма 2 и резиновые кольца в деталях 3, 4, 5 позволяют герметизировать канал 6. Газовая система атмосферной ударной трубы в работе 2 не отличается от описанной в работе I (см. рис. 2).

Блок-схема пьезоэлектрической системы измерения полного давления (рис. 7) состоит из пьезодатчика 8, регистрирующего полное давление p'_0 , прибора 14 с высоким входным сопротивлением с блоком питания 13, запоминающего осциллографа 15, пьезодатчика 12 и усилителя 16 запуска развертки осциллографа.

Лабораторную работу подготавливают и выполняют в такой последовательности.

I. Преподаватель указывает номера 4-5 сопловых вставок (табл. 4) и расстояние $l_{датч}$, характеризующее положение торца датчика 8. Как правило, $l_{датч} = 20$ мм. На каждой сопловой вставке отмечен ее номер и диаметр критического сечения d^* .

Т а б л и ц а 4

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d^* , мм	30	20,2	18	16,2	14,2	13	12	11	10	9	8,2

Для заданного расстояния $l_{датч}$ с учетом угла $2\theta = 20^\circ$ и диаметра $d'_{вых} = 36$ мм определяют диаметр $d_{вых}$ сечения сопла Лавала, совпадающего с торцом датчика полного давления. Для каждой сопловой вставки рассчитывают отношение $A_{вых}/A^*$ по формуле

$$\frac{A_{вых}}{A^*} = \left(\frac{d_{вых}}{d^*} \right)^2 = \left(\frac{d'_{вых} - 2 \cdot l_{датч} \cdot \operatorname{tg} 10^\circ}{d^*} \right)^2 = \left(\frac{d'_{вых} - 0,352 \cdot l_{датч}}{d^*} \right)^2. \quad (21)$$

По формулам [1, с. 110-120, 129-134] или по таблице в приложении 2 находят с учетом условия $p_0 = p_{атм}$ для отношения $A_{вых}/A^*$ число $M > 1$ и расчетное давление $p_{расч}$ в плоскости торца датчика, а также отношение p'_0/p_0 , характеризующее потерю полного давления на прямом скачке уплотнения. Определение давления $p_{расч}$ необходимо для оценки начального давления p_0 в канале атмосферной ударной трубы при создании режима истечения из сопла с перерасширением, когда внутри сопла образуются скачки уплотнения.

Расчет отношения p'_0/p_0 позволяет определить ожидаемый в экспериментах уровень давления p'_0 и правильно установить коэффициент усиления осциллографа, регистрирующего разность потенциалов ΔU , пропорциональную изменению давления $\Delta p'_0 = p'_0 - p_0$.

2. По заданной ориентировочно чувствительности $K_{\text{датч}} = \Delta U / \Delta p$ пьезодатчика 8 оценивают в вольтах амплитуды сигналов, соответствующих атмосферному давлению и давлениям p'_0 для заданных сопловых вставок. Считая начальное давление p_0 в канале малым по сравнению с давлением p'_0 , определяют заранее чувствительность усилителя вертикального отклонения луча осциллографа так, чтобы амплитуда регистрируемого сигнала составляла 2-5 больших делений шкалы экрана осциллографа.

3. Выполнив предварительные расчеты и оценив амплитуды измеряемых сигналов, подготавливают и проводят серию экспериментов в такой последовательности:

а) подготавливают системы измерения скорости ударной волны и нестационарного давления согласно блок-схеме (см. рис. 7);

б) после проверки правильности компоновки систем измерений руководителем работы включают питание приборов;

в) на запоминающем осциллографе устанавливает чувствительность усилителя, необходимую для регистрации перепада давления Δp , равного $p_{\text{атм}}$; для последующих экспериментов чувствительность осциллографа при необходимости корректируют в соответствии с величиной регистрируемого давления Δp ; устанавливают также однократный режим работы осциллографа с длительностью развертки электронного луча по экрану, равной 10 мс;

г) подготавливают установку к калибровке пьезодатчика 8, регистрирующего давление p'_0 , для этого заглушают быстросъемный торец 8 канала (см. рис. 2); максимально отведя фланец 3 (см. рис. 7) от фланца канала 6, помещают в канал стакан 5, а в него - сопловую вставку 10 с отверстием максимального диаметра $d^* = 30$ мм, в которой будет создан звуковой поток с пренебрежимо малыми потерями полного давления; устанавливают вкладыш 4, диафрагму 2, насадку 1 согласно рис. 7 и герметизируют канал, вращая винт 1 (см. рис. 2);

д) в первом эксперименте откачивают канал вакуумным насосом до давления p_0 , равного 1000 - 2000 Па, используя вакуумный насос 12 (см. рис. 2) и регулируя откачку вентилями 10, 11;

е) балансируют усилитель запоминающего осциллографа, регулируют яркость и фокусировку развертки осциллографа, иницируя однократную развертку нажатием кнопки "Пуск"; проверяют правильность выбора уровня запуска развертки осциллографа, нажимая кнопку "Пуск" на

приборе запуска развертки осциллографа и добиваясь появления однократной развертки; засвечивают экран осциллографа, нажимая кнопку "Стирание"; нажимают кнопку "Готов" и следят за готовностью осциллографа по световому индикатору; уточняют по манометру и записывают в протокол величину начального давления p_1 , и затем резким движением пробойника разрывают диафрагму;

ж) аккуратно копируют осциллограмму с экрана на кальку с нанесенной заранее масштабной сеткой (при отсутствии на кальке масштабной сетки отмечают узлы масштабной сетки экрана по внешнему периметру сетки); переносят на кальку нулевую линию (уровень отсчета амплитуды сигнала) и характерные особенности осциллограммы (колебания напряжения и установившееся значение амплитуды входного сигнала, резкие увеличения и плавные спады амплитуды сигнала, соответствующие ударным волнам и волнам разрежения и т.д.); если в эксперименте нулевая линия оказалась не зафиксированной из-за запоздавшего запуска развертки осциллографа, инициируют появление на экране нулевой линии нажатием кнопки "Пуск" осциллографа или усилителя запуска;

з) выполняют еще 2-3 калибровочных эксперимента, задавая различные начальные давления p_1 в диапазоне $10^4 - 8 \cdot 10^4$ Па; по результатам калибровочных экспериментов, определяя установившееся значение амплитуды электрического сигнала, строят на миллиметровке зависимость амплитуды сигнала от перепада давлений $p_a - p_1$, осредняя графически экспериментальные данные; экспериментальные точки не должны заметно отклоняться от прямой, проходящей через начало координат; для режимов со значительным отклонением экспериментальных данных от прямой выполняются повторные эксперименты;

и) далее приступают к основной серии экспериментов; помещая в стакан 5 сменные вставки, указанные преподавателем, выполняют для каждой из них по одному эксперименту при малом давлении p_1 в канале, равном 1000 - 2000 Па, тогда внутри сопла при установившемся течении не будет возникать скачков уплотнения, характерных для режима перерасширения (см. рис. 7); для одной из сопловых вставок эксперимент повторяют при фиксированном давлении p_1 3-4 раза, чтобы оценить разброс экспериментальных данных;

к) осуществляют дополнительную серию из 2-3-х экспериментов в режиме сверхзвукового течения по соплу с перерасширением, когда расчетное давление в сверхзвуковом потоке вблизи среза сопла ниже давления p_1 в канале за ударной волной; при таких условиях внутри

сопла возникают скачок или система скачков уплотнения, приводящие к нарушениям однородности и стабильности течения по соплу [1, с.118], (см. рис. 7).

4. Приведем указания по методике обработки экспериментальных данных, оформлению и обсуждению результатов экспериментов. Исходные

Таблица 5

Сводная таблица результатов расчетов и экспериментов

Расчет: $T_{расч} = 290\text{ К}$; $l_{затч} = \text{мм}$; $2\theta_c = 20^\circ$; $d_{вых} = \text{мм}$; $a_{вззд} = 20,1\sqrt{T}\text{ м/с}$

Номер опыта	d^* , мм	$\frac{A_{вых}}{A^*}$	$M_{вых}$	T/T_0 Т, К	P/P_0 р, кПа	ρ/ρ_0 $\rho, \text{кг/м}^3$	u/a_0 и, м/с	q/p q, кПа	P'_0/P_0 $P'_0, \text{кПа}$
1	30	1	1						1 P_0
2									
⋮									

Эксперимент: калибровка

Номер опыта	P_1 , кПа	$\frac{\Delta P_K}{P_1 - P_2}$, кПа	$A_{кал}$, делен.	$K_{осц}$, В/дел	ΔU_K , В	$K_{затч}$, мВ/Па
1						
2						
⋮						

Основной режим: $P_0 = \text{кПа}$, $T_0 = \text{К}$

Номер опыта	d^* , мм	$M_{вых расч}$	P_1 , кПа	$P'_0 расч$, кПа	$A_{осц}$, дел.	$K_{осц}$, В/дел	$\Delta U_{осц}$, В	$\frac{\Delta P'_0}{P_0} = \frac{P'_0 - P_0}{P_0}$, кПа	$\frac{P'_0}{P_0 атм}$	$\frac{P'_0}{P_0 расч}$	$\frac{P'_0 - P_0}{P_0}$
1											
2											
⋮											

Режим перерасширения

Номер опыта	d^* , мм	$P_{вых расч}$, кПа	P_1 , кПа	$\frac{A_{пер}}{A_{пер}}$, дел	$K_{осц}$, В/дел	$\Delta U_{пер}$, В	ΔP_0 , кПа	$\bar{P}'_0 = \frac{P'_0 - P_0}{P_0}$, кПа	$\frac{P'_{оср}}{P_{атм}}$	$\frac{P'_{оср}}{P'_{оср ср}}$	$\frac{P'_0 - P_0}{P_0 расч}$
1											
2											
⋮											

данные, результаты предварительных расчетов, промежуточные и окончательные результаты обработки экспериментальных данных заносят в табл. 5.

Порядок обработки экспериментальных данных следующий:

1. Вначале обрабатывают результаты калибровочных экспериментов (см. п. 3, ж, з) и определяют чувствительность датчика полного давления p'_o .

По скопированным на кальку с экрана осциллографа осциллограммам определяют установившиеся значения амплитуд A_k сигнала пьезодатчика, осредняя по амплитуде малые колебания сигнала (рис. 8, а).

По амплитудам A_{ki} , где i - порядковый номер опыта, определяют с учетом чувствительности $K_{осц,i}$ разности потенциалов $\Delta U_{ki} = K_{осц,i} \cdot A_{ki}$, соответствующие разностям полных давлений $\Delta p'_{окi} = p'_{окi} - p'_{ii}$. Проводят на миллиметровке оси координат $\Delta p'_{ок}$, ΔU_k и, откладывая в удобном масштабе на оси абсцисс величины

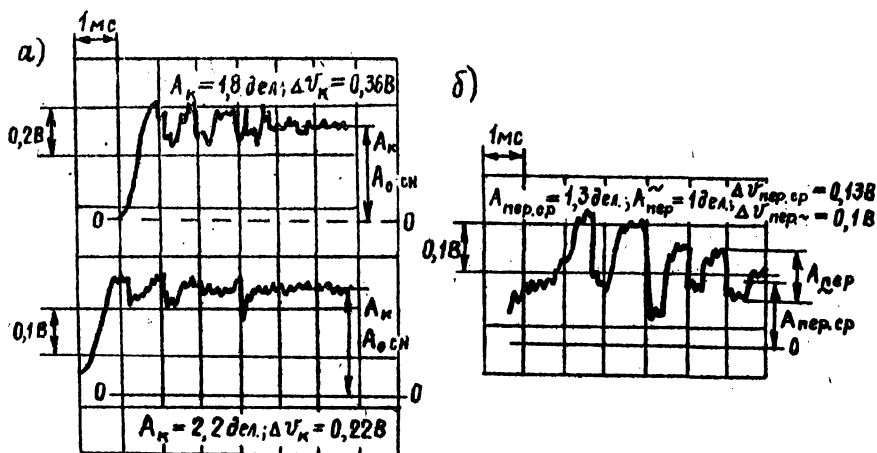


Рис. 8

$\Delta p'_{окi}$, а на оси ординат величины ΔU_{ki} строят экспериментальные точки. Считая зависимость разности потенциалов ΔU_k от перепада давления $\Delta p'_{ок}$ прямо пропорциональной, осредняют графически резуль-

таты эксперимента и определяют чувствительность $K_{датч} = \Delta U / \Delta p$ (В/МПа) датчика полного давления (рис. 9, а).

2. Обрабатывают осциллограммы, полученные в основной серии экспериментов по исследованию потерь полного давления в соплах Лаваля, определяя амплитуды $A_{осн, i}$ и соответствующие разности потенциалов $\Delta U_{осн, i} = K_{осц, i} \cdot A_{осн, i}$ (рис. 8, а). Рассчитывают полные давления $p'_{oi} = p_1 + \Delta U_{осн, i} / K_{датч}$ и относительные полные давления $p'_{oi} / p_{атм}$. По данным обработки строят экспериментальные точки на графике функции $p'_o / p_o = f(M)$ (рис. 9, б). Там же должны быть приведены не показанные на рис. 9, б графики затабулированных функций $T / T_o = \bar{T}(M)$, $p / p_o = \bar{p}(M)$, $u / a^* = \bar{u}(M)$.

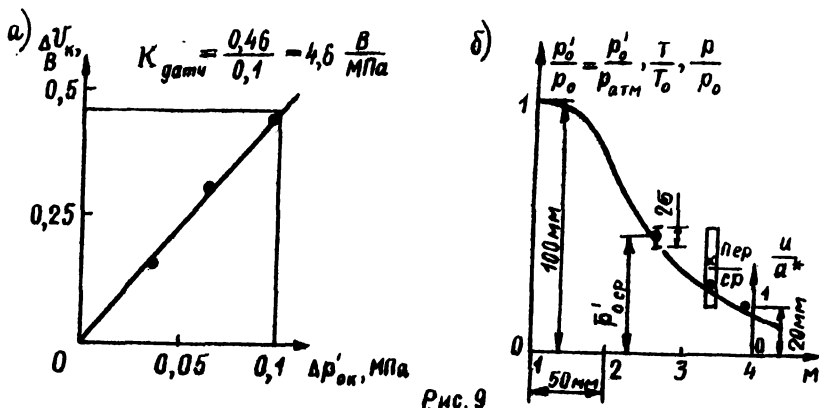


Рис. 9

На рис. 9, б точками отмечены данные для основного режима, крестиками — для режима с перерасширением.

Для одной из сопловых вставок эксперимент повторяют при фиксированном давлении p_1 3–4 раза, чтобы оценить разброс экспериментальных данных (п.3, и). По данным однократных опытов находят среднеарифметическое значение относительного давления

$$\left(\frac{p'_o}{p_o} \right)_{ср} = \bar{p}'_{o, ср} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{p}'_{o, i} ,$$

где N - количество экспериментов;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{p}_{oi}' - \bar{p}_{o\text{ср}}')^2}{N-1}}$$

-среднеквадратичное отклонение. На рис. 9,б знаком \int отмечена величина 2б.

3. Обрабатывают осциллограммы, полученные в дополнительной серии экспериментов по исследованию сверхзвукового течения с перерасширением при высоких значениях начального давления p_1 (см. рис. 8,б). Определяют среднее значение амплитуды $A_{\text{ср}}$ и амплитуду нерегулярных незатухающих колебаний $A_{\text{нр}}$ сигнала датчика полного давления, вызванных, видимо, возникновением нестабильных скачков уплотнения внутри сопла.

Данные обработки осциллограмм наносят на график (рис. 9,б) для числа M , рассчитанного по отношению площадей A/A^* . Амплитуду $A_{\text{нр}}$ колебаний относительного полного давления отмечают на графике (рис. 9,б) двойной чертой $\int\int$. Обсуждают причины возможного отклонения результатов обработки от данных, полученных для того же числа M в основном режиме.

По данным табл.5 формулируют выводы о результатах работы, отмечив в первую очередь основные эффекты исследованных режимов, а также сравнив количественно экспериментальные данные с результатами расчетов полного давления p_0' .

СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет о лабораторной работе каждый студент составляет индивидуально, в нем необходимо отразить следующие сведения:

а) отметить основные цели лабораторной работы, дать краткое теоретическое обоснование ожидаемых экспериментальных результатов; для работы 1 привести рис. 4 и обосновать малое ожидаемое расхождение зависимостей (2) и (4) для падающей и отраженной ударных волн в системах координат, связанных с ударными волнами; для работы 2 привести изэнтропические формулы, графики зависимости относительных газодинамических переменных от числа M , обсудить особенности изменения газодинамических переменных потока и переменных торможения в сверхзвуковой и дозвуковой части сопла Лавеля, в том числе и для

нерасчетных режимов истечения с повышенным противодавлением;

б) кратко охарактеризовать по $x-t$ диаграмме (см. рис. 1) особенности течения газа в атмосферной ударной трубе, указать последовательность и результаты оценки газодинамических переменных в установке;

в) привести схему установки (см. рис. 2 или 7) с указанием элементов газовой системы и контрольных приборов для измерения начального давления в канале ударной трубы, пояснить порядок подготовки установки к эксперименту и пуска установки;

г) привести блок-схему системы измерений нестационарных переменных (см. рис. 3 или 7), указать назначение элементов блок-схемы;

д) привести полученные в эксперименте осциллограммы, отметив на них амплитуды сигналов, а также масштабы времени и амплитуды (см. рис. 5 или 8);

е) пояснить методику обработки первичных экспериментальных данных, включая статистическую обработку результатов измерений, и привести на графике (см. рис. 6 или 9) данные экспериментов и результаты статистической обработки экспериментальных данных;

ж) составить сводную таблицу результатов измерений и расчетов (табл. 1, 2 или 5), включающую все исходные данные, промежуточные и конечные результаты расчетов и измерений, полученные согласно методике обработки экспериментальных данных;

з) сформулировать выводы по выполненной работе, отметив исследованные эффекты, сопоставляя данные экспериментов с теоретическими зависимостями и учитывая величину относительной дисперсии статистически оцениваемых переменных.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА АТМОСФЕРНОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ

Атмосферная ударная труба представляет собой газодинамическое устройство импульсного типа, не требующее применения сматых до высоких давлений газов и поэтому более безопасное, более простое и удобное в эксплуатации по сравнению с ударными трубами, использующими избыточное по отношению к атмосферному давлению толкающего газа.

Потенциальными источниками опасности при работе на атмосферной ударной трубе могут быть радиотехнические приборы, питающиеся от

однофазной сети напряжением 220 В, и вакуумный насос, подключенный к трехфазной сети напряжением 380 В. Для обеспечения безопасной эксплуатации оборудования, подключаемого к сети переменного тока, корпуса приборов и вакуумного насоса должны быть занулены (подсоединены к контакту электрической сети, имеющему нулевой потенциал). В случае нарушения правил техники безопасности и эксплуатации установки может возникнуть опасность поражения электрическим током.

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

Перед проведением лабораторной работы следует ознакомиться с конструкцией установки, назначением измерительных приборов и элементов газовой системы, с инструкцией по эксплуатации и технике безопасности, присутствовать на вводном инструктаже и расписаться в журнале инструктажа. В опытах с камерой высокого давления неопределенно большого объема, т.е. при подсоединении к откачиваемому каналу непосредственно помещения ударной трубы без камер высокого давления ограниченного объема, следует предупредить окружающих о пуске установки, чтобы звук при разрыве диафрагмы не был неожиданным.

После окончания работы необходимо выключить вакуумный насос, электроизмерительные приборы, электросиловые щиты, соединить вход вакуумного насоса с атмосферой, продуть канал низкого давления, убрать обрывки диафрагм и привести в порядок рабочее место.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

I. Относительные газодинамические переменные течения
двухатомного газа в ударной трубе при $K_1 = K_2 = 1,4$

M_1	$\frac{p_4}{p_1}$	$\frac{p_2}{p_1}$	$\frac{p_3}{p_1}$	$\frac{u_2}{a_1}$	$\frac{a_2}{a_1}$	$\frac{ U_{ср} }{U_1}$
1,00	1,000	1,000	1,000	0	1,000	1,000
1,05	1,258	1,120	1,252	0,0813	1,016	0,9381
1,10	1,560	1,245	1,540	0,1591	1,032	0,8843
1,15	1,925	1,377	1,870	0,2337	1,047	0,8375
1,20	2,354	1,514	2,237	0,3055	1,062	0,7963
1,25	2,862	1,657	2,652	0,3750	1,076	0,7600
1,30	3,453	1,805	3,108	0,4423	1,091	0,7278
1,35	4,148	1,959	3,611	0,5079	1,106	0,6991
1,40	4,958	2,120	4,167	0,5715	1,120	0,6735
1,45	5,900	2,287	4,773	0,6335	1,134	0,6505
1,50	7,004	2,459	5,425	0,6945	1,149	0,6296
1,55	8,282	2,637	6,136	0,7539	1,164	0,6109
1,60	9,758	2,820	6,893	0,8125	1,178	0,5937
1,65	11,47	3,010	7,710	0,8699	1,193	0,5783
1,70	13,45	3,205	8,579	0,9265	1,208	0,5640
1,75	15,73	3,407	9,509	0,9821	1,222	0,5510
1,80	18,39	3,614	10,49	1,037	1,238	0,5391
1,85	21,47	3,827	11,53	1,091	1,253	0,5281
1,90	24,99	4,045	12,63	1,145	1,268	0,5180
1,95	29,03	4,270	13,79	1,198	1,283	0,5087
2,00	33,71	4,500	15,00	1,250	1,299	0,5000
2,05	39,12	4,736	16,27	1,302	1,314	0,4920
2,10	45,30	4,979	17,61	1,353	1,330	0,4845
2,15	52,51	5,226	19,00	1,404	1,346	0,4776
2,20	60,80	5,480	20,45	1,454	1,363	0,4711

M_1	$\frac{p_4}{p_1}$	$\frac{p_2}{p_1}$	$\frac{p_3}{p_1}$	$\frac{u_2}{a_1}$	$\frac{a_2}{a_1}$	$\frac{ U_{opt} }{U_1}$
2,25	70,40	5,740	21,96	1,505	1,378	0,4650
2,30	81,38	6,005	23,53	1,554	1,395	0,4604
2,35	94,12	6,276	25,16	1,604	1,412	0,4540
2,40	108,8	6,554	26,85	1,653	1,428	0,4491
2,45	125,6	6,836	28,59	1,701	1,445	0,4445
2,50	145,4	7,125	30,40	1,750	1,462	0,4400

2. Установившееся изэнтропическое течение двухатомного газа, $K = 1,4$

M	$\frac{A}{A^*}$	$\frac{p}{p_0}$	$\frac{T}{T_0}$	$\frac{q}{p_0}$	$\frac{p'}{p_0}$	$\frac{u}{a^*}$
0,00	∞	1,0000	1,0000	0,0000	1,000	0,0000
0,05	11,591	0,9983	0,9995	0,1747-2	1,000	0,0548
0,10	5,822	0,9930	0,9980	0,6951-2	1,000	0,1094
0,15	3,910	0,9844	0,9955	0,1550-1	1,000	0,1639
0,20	2,963	0,9725	0,9921	0,2723-1	1,000	0,2182
1,0	1,000	0,5283	0,8333	0,3698	1,000	1,0000
1,2	1,030	0,4124	0,7764	0,4157	0,9928	1,1583
1,4	1,115	0,3142	0,7184	0,4311	0,9582	1,2999
1,6	1,250	0,2353	0,6614	0,4216	0,8952	1,4254
1,8	1,439	0,1740	0,6068	0,3947	0,8127	1,5360
2,0	1,688	0,1278	0,5556	0,3579	0,7209	1,6330
2,2	2,005	0,9352-1	0,5081	0,3169	0,6281	1,7179
2,4	2,403	0,6840-1	0,4647	0,2758	0,5401	1,7922
2,6	2,896	0,5012-1	0,4252	0,2371	0,4601	1,8571
2,8	3,500	0,3685-1	0,3894	0,2022	0,3895	1,9140
3,0	4,235	0,2722-1	0,3571	0,1713	0,3283	1,9640
3,2	5,121	0,2023-1	0,3281	0,1450	0,2752	2,0079
3,4	6,184	0,1512-1	0,3019	0,1224	0,2322	2,0466
3,6	7,450	0,1138-1	0,2784	0,1033	0,1953	2,0808
3,8	8,951	0,8629-2	0,2572	0,8722-1	0,1645	2,1111
4,0	10,72	0,6586-2	0,2381	0,7376-1	0,1388	2,1381
4,2	12,79	0,5062-2	0,2208	0,6251-1	0,1173	2,1621
4,4	15,21	0,3918-2	0,2053	0,5309-1	0,0995	2,1837
4,6	18,02	0,3053-2	0,1911	0,4522-1	0,0846	2,2030
4,8	21,26	0,2394-2	0,1783	0,3862-1	0,0721	2,2204
5,0	25,00	0,1890-2	0,1667	0,3308-1	0,0617	2,2361

Пример: $M = 3$; $p/p_0 = 0,2722 \cdot 10^{-1}$; $T/T_0 = 0,3571$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л о й ц я н с к и й Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Физматгиз, 1987. - 840 с.

2. П е т р о в Р.Л. Измерение скорости ударной волны и определение чувствительности пьезоэлектрических датчиков давления на малой ударной трубе: Описание лабораторной работы. - Л.: ЛПИ, 1977.- 39 с.

3. К а с с а н д р о в а О.Н., Л е б е д е в В.В. Обработка результатов наблюдений. - М.: Физматгиз, 1970. - 104 с.

4. З а й д е л ь А.Н. Погрешности измерений физических величин. - Л.: Наука, 1985. - 112 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.	3
Работа 1. Исследование прямого скачка уплотнения	4
Работа 2. Исследование сверхзвуковых потоков в соплах Лаваля.	21
Составление отчета.	31
Правила техники безопасности для студентов, работающих на атмосферной ударной трубе	32
Приложения.	34
Литература.	36

БЕСПЛАТНО