

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М. И. КАЛИНИНА

**Газодинамические исследования
при больших сверхзвуковых скоростях**

Методические указания к лабораторным работам

Ленинград

1 9 8 0

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Р С Ф С Р

**Ленинградский ордена Ленина политехнический институт
имени М.И.Калинина**

**ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРИ БОЛЬШИХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ**

Методические указания к лабораторным работам

**Ленинград
1980**

УДК 533.6.011.72

В методических указаниях к лабораторным работам на аэродинамической ударной трубе с соплом приведено описание установки, позволяющей получать потоки газа с большой сверхзвуковой скоростью. Рассмотрены программы лабораторных работ, предусматривающих исследование обтекания затупленных тел и исследование отрывных течений. Определен порядок выполнения эксперимента, отмечена последовательность выполнения газодинамических расчетов и обработки результатов измерений, рекомендована форма отчета.

Составители: Михаил Григорьевич Бабинский,
Руслан Леонидович Петров

Газодинамические исследования при больших сверхзвуковых скоростях
Методические указания к лабораторным работам

Редактор С.А.Мартынова
Корректор И.В.Тарасова

Подписано к печати 12.08.80. Формат бумаги 60x90 1/16
Бумага тип. №3 Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 3 Тираж 200 Заказ 304
Бесплатно

Издание ЛПИ имени М.И.Калинина
195251, Ленинград, Политехническая ул., 29

Отпечатано на ротапринтере Ленинградского ордена Ленина политехнического института имени М.И.Калинина
195251, Ленинград, Политехническая ул., 29 .

1. Программа выполнения лабораторных работ на аэродинамической ударной трубе

Лабораторные работы состоят из расчетного и экспериментального разделов. Вначале студенты знакомятся с методикой расчета газодинамических параметров в установке и на модели и выполняют расчет, результаты которого позволяют правильно подготовить и провести эксперимент. Экспериментальная часть лабораторных работ предполагает изучение конструктивных особенностей, порядка эксплуатации установки и освоение некоторых малоинерционных оптических и радиотехнических методов исследования сверхзвуковых течений.

Пояснения к каждой лабораторной работе содержат следующие разделы:

а) указания к выполнению расчетной части работы (исходные данные, расчет параметров газа в ударной трубе и параметров торможения перед сверхзвуковым соплом, расчет параметров сверхзвукового потока в заданном сечении рабочей зоны, особенности обтекания исследуемого тела, расчет обтекания модели сверхзвуковым потоком),

б) указания к выполнению экспериментальной части работы (исходные данные, настройка регистрирующих приборов по данным предварительных газодинамических расчетов, подготовка установки к выполнению эксперимента, пуск установки),

в) указания к методике обработки экспериментальных результатов. Требования к содержанию и форме отчета по лабораторной работе изложены в разделе 2.

2. Указания к составлению отчета

В отчете по лабораторной работе необходимо:

1. кратко охарактеризовать особенности течения газа в аэродинамической ударной трубе,

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

3. для заданных начальных параметров рабочего и толкающего газов, линейных размеров ударной трубы выполнить газодинамический расчет по элементарной теории, а также с учетом вязкости и наличия соплового отверстия в горле канала; составить таблицы, содержащие результаты расчета (таблицы 1,2),

4. по данным газодинамического расчета построить $\bar{x} - \bar{t}$ диаграмму течения газа в ударной трубе, указав области с постоянными пара-

метрами газа, основные возмущения, отметив характерные точки диаграммы и положение датчиков; нанести на $\bar{x}-\bar{t}$ диаграмме масштабы, позволяющие перейти от безразмерных величин \bar{x} , \bar{t} к размерным $x(M)$, $t(c)$, и отметить основные параметры, характеризующие режим работы ударной трубы (K_1 , K_4 , P_{41} , P_4 , M_{10} , T_{41} , T_4 , $\Delta M_1/M_1$),

5. по одномерной теории рассчитать параметры газа в заданном сечении сверхзвукового потока, привести и пояснить расчетные формулы, составить таблицы по результатам расчета (табл.2),

6. обсудить задачу взаимодействия сверхзвукового потока с конкретной моделью, рассчитать параметры взаимодействия, пояснив методику расчета, и заполнить соответствующие таблицы (табл.3,5),

7. отметить особенности конструкции гиперзвуковой ударной трубы ЛПИ, привести упрощенную схему газовой системы установки, пояснить порядок подготовки установки к эксперименту и пуска установки,

8. привести блок-схему измерений и дать краткое описание её работы,

9. пояснить методику обработки первичных результатов опыта, привести полученные в эксперименте осциллограммы, отметив масштабы времени и амплитуды и указав измеренные по осциллограммам величины (рис.8),

10. привести картину обтекания модели сверхзвуковым потоком, указав геометрические характеристики течения (рис.9, 10) и основные исходные данные,

11. составить таблицу результатов измерений по приведенному для каждой лабораторной работы образцу (табл.3-5),

12. сформулировать выводы по выполненной работе, сопоставляя результаты расчетов с полученными экспериментальными данными; обсудить вероятные причины отмеченного в опыте несовпадения расчетных и экспериментальных данных.

3. Правила техники безопасности для студентов, выполняющих учебные работы на аэродинамической ударной трубе ЛПИ

Аэродинамическая (гиперзвуковая) ударная труба ЛПИ в совокупности со вспомогательным оборудованием, нестандартными измерительными системами представляет сложное экспериментальное устройство импульсного типа, позволяющее изучать высокоэнтальпийные установившиеся и неустановившиеся течения газа больших сверхзвуковых скоростей.

Источником опасности при работе на установке является применение сжатых газов в камере высокого давления и других элементах газо-

вой системы высокого давления, а также использование электрического переменного напряжения 220 вольт (однофазного) для питания радиоаппаратуры и напряжения 380 вольт (трехфазного) для питания электродвигателей.

В случае нарушения правил техники 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 правила эксплуатации установки подробно изложены в "Инструкции по эксплуатации и технике безопасности при работе на гиперзвуковой ударной трубе".

Для обеспечения безопасной работы на установке пульт управления установкой вынесен в отдельное помещение, электросиловые и измерительные приборы занулены, установка оснащена исправной контрольно-измерительной, запорной и предохранительной аппаратурой. В систему включения компрессоров введена блокировка, отключающая компрессоры, когда открывается дверь, ведущая в помещение ударной трубы.

Перед проведением лабораторной работы студенты должны быть проинструктированы ответственным руководителем о характере и правилах по технике безопасности при выполнении работы с обязательной распиской в журнале проведения инструктажа.

Студенты проводят эксперимент на установке только под наблюдением руководителя.

Перед проведением эксперимента студенты должны ознакомиться с конструктивными особенностями установки, знать значение основных узлов и элементов ударной трубы, инструкцию по эксплуатации и технике безопасности.

Во время работы установки не разрешается превышение максимально допустимого уровня давления в масляных фильтрах и камере высокого давления ($P_{\text{макс}} = 4 \cdot 10^5$ Па). Запрещается вход в помещение, где расположена ударная труба, до окончания эксперимента.

Запрещается оставлять установку без присмотра до окончания эксперимента, а также под давлением, если по каким-либо причинам не удалось закончить эксперимент.

После окончания работы необходимо сбросить давление из фильтров, а при необходимости и из канала и камеры, выключить электроизмерительные приборы и электросиловые щиты.

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.

4. Пояснения к газодинамическому расчету аэродинамической ударной трубы с соплом

Аэродинамическая ударная труба - простое и широко распространенное устройство для исследования разнообразных явлений сверхзвуковой, нестационарной и физической газовой динамики, в том числе и для моделирования движения тел с большими скоростями и высокими температурами торможения.

Существует ряд модификаций аэродинамических ударных труб, имеющих различное назначение, отличающихся газодинамическими параметрами и геометрическими размерами [1], [2].

Рассмотрим аэродинамическую ударную трубу с соплом, работающую в режиме с отраженной ударной волной. Такой режим позволяет достигать высоких параметров торможения рабочего газа при относительно большом рабочем времени.

Аэродинамическая ударная труба с соплом состоит из ряда существенных элементов (рис.1): камеры высокого давления 1, канала низкого давления 3, сверхзвукового сопла 5, рабочей камеры 7. В варианте работы установки с отраженной ударной волной канал 3 оканчивается заглушкой с профилированным отверстием, контур которого сопряжен с контуром сопла.

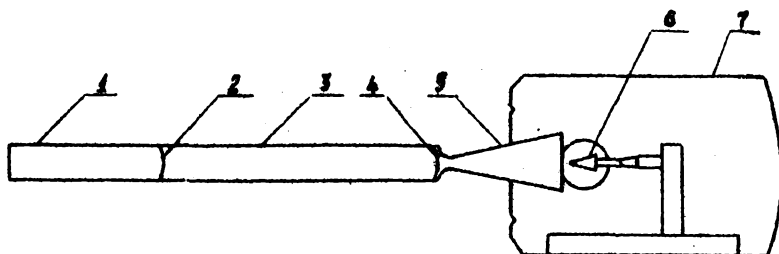


Рис.1. Основные элементы аэродинамической ударной трубы.

Установка работает следующим образом. Перед пуском установки канал заполняется рабочим газом, камера - толкающим газом. При разрыве основной диафрагмы 2, разделяющей камеру высокого давления и канал, образуется ударная волна, движущаяся по каналу, нагревающая и сжимающая рабочий газ, и волна разрежения. Подойдя к торцу канала, ударная волна разрывает тонкую диафрагму 4, разделяющую канал и сопло. Отразившаяся от торца заглушки ударная волна вторично нагревает и сжимает рабочий газ, причем одновременно с разрывом диафрагмы 4 начинается истечение рабочего газа в сопло. Голова волны разрежения распространяется к торцу камеры высокого давления с местной скоростью звука. Хвост волны разрежения смещается к торцу камеры или движется по каналу низкого давления в зависимости от величины отношения давлений на диафрагме. Волна разрежения, отразившись от торца камеры, движется по каналу к соплу, нарушая однородность параметров рабочего газа.

Аэродинамические модели 6 устанавливаются обычно у среза сопла против окна для наблюдения течения.

В рабочей камере создается предварительно значительное разрежение, чем достигается быстрое установление стационарного течения на выходе из сопла и предотвращается возникновение скачков уплотнения внутри сопла в течение рабочего времени. Хотя в общем течение в установке нестационарное, существует интервал времени после разрыва сопловой диафрагмы 4, когда параметры газа перед соплом и на выходе из сопла изменяются незначительно. Этот период (рабочее время) и используется для проведения аэродинамических экспериментов в сверхзвуковом потоке.

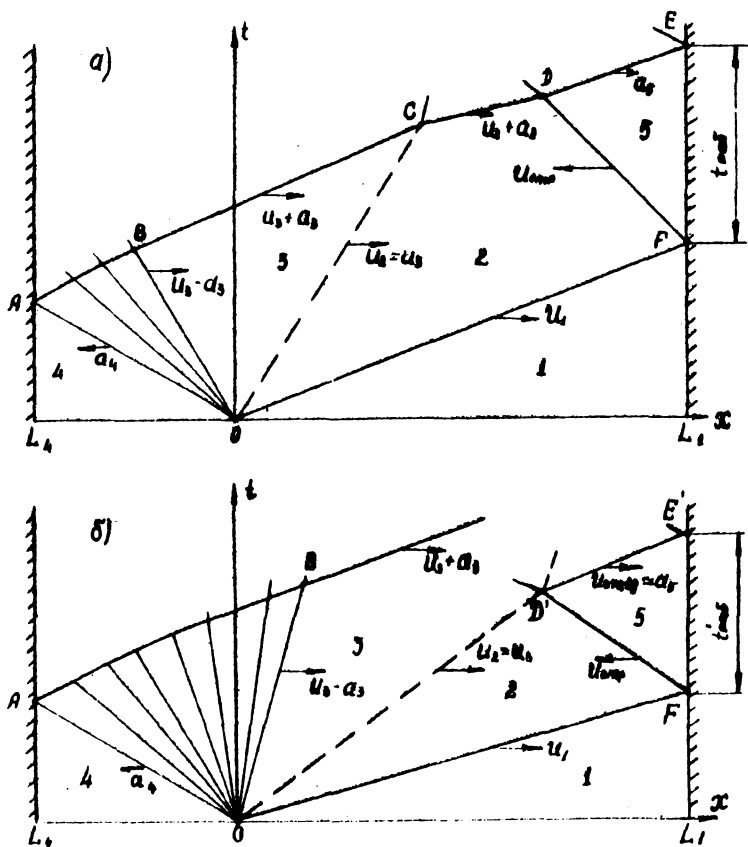
Ударную трубу, подсоединенную к соплу, можно считать газодинамическим волновым подогревателем рабочего газа, позволяющим при больших интенсивностях ударной волны в ударной трубе получать высокие температуры торможения, а при умеренных - избегать конденсации рабочего газа, которая может возникнуть в соплах при больших числах M сверхзвукового потока вследствие охлаждения рабочего газа при расширении.

В результате расчета течения газа в установке в конечном итоге должны быть определены параметры газа на выходе из сопла и оценено рабочее время. По теории ударной трубы могут быть вычислены параметры торможения перед соплом. Параметры потока на выходе из сопла определяются параметрами торможения и геометрией сопла.

Оценочный расчет параметров газа в ударной трубе может быть

выполнен по элементарной теории, изложенной кратко в работе [3, стр.154-157] и более полно - в работе [1, стр.19-189]. Необходимые для расчета формулы, пояснения и принятые в элементарной теории предположения о характере течения газа в ударной трубе содержатся в работе [4].

Рассмотрим в плоскости $x-t$ возмущения, возникающие в ударной трубе с заглушенным каналом (рис.2). В зависимости от начальных параметров газа и соотношения длин камеры и канала могут осуществиться два варианта течения.



8 Рис.2. $x-t$ диаграмма в режиме с отраженной ударной волной.

При малых интенсивностях ударной волны и достаточно большой длине канала реализуется вариант, показанный на рис.2,а, когда отраженная голова волны разрежения догоняет сначала контактную поверхность, а затем встречается с отраженной ударной волной.

При высокой интенсивности ударной волны и малой длине канала отраженная ударная волна взаимодействует с контактной поверхностью раньше, чем встречается с волной разрежения (рис.2,б).

На $x-t$ диаграммах цифрами 1-5 отмечены области с однородными параметрами газа. Области 1 и 4 заняты невозмущенными рабочим и толкающим газами, область 2 - горячая область, где движется рабочий газ, прошедший через падающую ударную волну, область 3 - холодная зона, где движется толкающий газ, охлажденный в волне разрежения, область 5 - область горячего поклающегося рабочего газа, нагретого в падающей и отраженной ударной волне. Линия OA на $x-t$ диаграммах называется головой волны разрежения, линия OB - хвостом волны разрежения, линия ABCDE - головой отраженной волны разрежения. Линии OF и FD представляют падающую и отраженную ударные волны, линия OC - контактную поверхность.

Для заданного числа M_1 можно подобрать оптимальное отношение $L_{1,огт} = L_1/L_2$ длины канала к длине камеры, когда точки C и D на рис.2,а совпадут.

Обычно исходными данными для расчета газодинамических параметров в ударной трубе являются следующие величины:

1. давление P_1 рабочего газа и давление P_2 толкающего газа,
2. отношение удельных теплоемкостей K_1 рабочего газа и K_2 толкающего газа,
3. длина камеры высокого давления L_2 и длина канала низкого давления L_1 ,
4. начальная температура T_1 рабочего газа и T_2 толкающего газа,
5. молекулярный вес M_1 рабочего газа и M_2 толкающего газа.

По исходным данным, используя формулы и пояснения, приведенные в работе [4], а также приложения 1-3, следует рассчитать параметры газа за падающей, за отраженной ударной волной, определить, какой из режимов течения (рис.2,а или рис.2б) реализуется в ударной трубе и найти рабочее время $t_{огт}$ ударной трубы.

Результаты газодинамических расчетов, выполненных по элемен-

тарной теории, необходимо уточнить, принимая во внимание существенное влияние на течение в ударной трубе некоторых факторов, не учитываемых элементарной теорией.

Во-первых, следует отметить влияние вязкости на течение в ударной трубе, приводящее к таким эффектам, как затухание ударной волны, нарушение однородности газа за падающей и отраженной ударной волной, сокращение рабочего времени.

Расчет затухания ударной волны может быть выполнен по теории Майрлса [1, стр.286-319]. Предварительно необходимо оценить характер пограничного слоя в области 2 за падающей ударной волной. Преимущественно турбулентный пограничный слой в области 2 в воздухе образуется для числа $M_1 = 1,5$ при $\rho_1 \cdot X \geq 3$, для $M_1 = 2,0$ при $\rho_1 \cdot X \geq 0,66$, для $M_1 = 3,0$ при $\rho_1 \cdot X \geq 0,27$, для $M_1 = 4$ при $\rho_1 \cdot X \geq 0,18$, где $X(M)$ - расстояние от диафрагмы до ударной волны, $\rho_1 (10^3 \text{ Па})$ - начальное давление в канале.

Для турбулентного пограничного слоя, реализующегося, как правило, в аэродинамической ударной трубе при относительно высоком начальном давлении ρ_1 , относительное уменьшение давления $\Delta \rho_{1d} / \rho_1$ на фронте ударной волны в случае "воздух-воздух" рассчитывается по формуле

$$\frac{\Delta \rho_{1d}}{\rho_1} = -0,0338 \cdot f_{\text{об}}(M_1) \cdot \left(\frac{u_2}{u_1}\right)^{3/5} \cdot \left(\frac{X}{d_m}\right)^{4/5} \cdot T_{21}^{1/4} \cdot \rho_{21}^{-1/2} \cdot (\bar{\rho}_1 \bar{d}_1)^{-1/2}, \quad (I)$$

где $\bar{\rho}_1 = \frac{\rho_1}{\rho_m}$, $\bar{d}_1 = \frac{d_1}{d_m}$ - относительное начальное давление и относительный гидравлический диаметр канала. Численный коэффициент получен для воздуха при $T_1 = 290\text{К}$, $\rho_m = 10^5 \text{ Па}$, $d_m = 1\text{м}$. Сдвоенный индекс здесь и далее обозначает отношение параметров газа в соответствующих областях течения, например, $\rho_{21} = \rho_2 / \rho_1$.

Функция $f_{\text{об}}(M_1)$ представлена графически в работе Майрлса [1] для случаев идеально теплопроводной и идеально теплоизолированной стенки. Учитывая небольшую продолжительность течения нагретого рабочего газа в ударной трубе и незначительное изменение температуры стенки канала за малое рабочее время, следует рассчитывать затухание ударной волны по данным, соответствующим случаю идеально теплопроводной стенки.

При умеренных числах M_1 ударной волны ($1,5 \leq M_1 \leq 3$) в формуле (I) можно положить $f_{\text{об}} \approx 0,13$.

Изменение ΔM_1 числа M_1 ударной волны связано с изменением $\Delta \rho_{1d}$ давления ρ_1 соотношением

$$\frac{\Delta M_1}{M_1} = \frac{\kappa_1 + 1}{4\kappa_1} \cdot \frac{\rho_{21}}{M_1^2} \cdot \frac{\Delta P_{21}}{P_2} \quad (2)$$

Второй фактор, который следует учесть в газодинамическом расчете, — наличие соплового отверстия в торце канала низкого давления. Параметры рабочего газа за отраженной ударной волной, рассчитанные для сплошного торца, можно принять равными параметрам для торца с соплом, если относительный диаметр критического сечения сопла, подсоединенного к торцу канала, не превышает 0,1 ($d_0/d_1 \leq 0,1$). В случае $d_0/d_1 > 0,1$ следует рассчитывать параметры газа за отраженной ударной волной с учетом соплового отверстия.

В приложении 7 приведены результаты расчета параметров двухатомного газа ($\kappa = 1,4$) за отраженной ударной волной, отнесенные к данным, полученным для сплошного торца. Задача рассматривалась в одномерной постановке без учета дифракции падающей ударной волны на сопловое отверстие. Как следует из приведенных графиков, сопловое отверстие в наибольшей степени уменьшает скорость отраженной ударной волны и давление за отраженной ударной волной.

Параметры газа за отраженной ударной волной, найденные с учетом соплового отверстия, можно считать параметрами торможения, так как для $\kappa = 1,4$ даже при $d_0/d_1 = 0,5$ будет $M_2 \leq 0,15$ и параметры у торца канала будут отличаться от параметров торможения менее чем на 15%.

При больших интенсивностях ударной волны ($M_1 \geq 3$), рассчитывая параметры газа за отраженной ударной волной, следует отказаться от предположения $\kappa = \text{const}$. В этом случае необходимо учитывать реальные термодинамические свойства рабочего газа [5].

Параметры газа за отраженной ударной волной, найденные с учетом вязкости и соплового отверстия, можно считать параметрами торможения при расчете параметров сверхзвукового потока на выходе из сопла (рис. I).

Ориентировочный газодинамический расчет сверхзвукового потока в коническом и профилированном соплах может быть выполнен по одномерной теории в предположении $\kappa = \text{const}$. Относительные параметры в сверхзвуковом потоке рассчитывают по изэнтропическим формулам [3, стр. 106–110]. Отношение A/A_* площади сечения сопла к площади критического сечения связано с числом M потока известной зависимостью [3, стр. 113], отношение P_0'/P полного давления за прямым скачком уплотнения к давлению в потоке рассчитывается по формуле Рэлея [3, стр. 143], скоростной напор равен $q_0 = \rho u^2/2 = \kappa P M^2/2$. II

Отметим, что с увеличением числа M наиболее резко изменяются отношения ρ/ρ_{00} , q/q_{00} , A/A_0 , P^*/ρ_{00} , q/ρ_{00} . Напротив, при больших числах M потока отношения u/a_{00} , P^*/a изменяются незначительно, причем для $K = 1,4$ $(P^*/a)_{M \rightarrow \infty} = 1,84$, $(u/a_{00})_{M \rightarrow \infty} = 2,24$.

Отметим также, что в сверхзвуковом потоке в любом сечении сопла сохраняется полная энергия и температура торможения, т.е. $T_0' = T_{00}$, в то время как потери полной механической энергии (полного давления P^*) газа при переходе через прямой скачок уплотнения резко возрастают с увеличением числа M потока, что связано с необратимым преобразованием механической энергии в тепловую на скачке уплотнения.

Результаты расчета одномерного азентровического течения для случая $K = 1,4$ приведены в приложении 4.

Оценивая параметры сверхзвукового потока, необходимо учитывать, что при расширении рабочий газ заметно охлаждается, так что возможна конденсация газа. Появления двухфазного потока в аэродинамическом эксперименте следует избегать.

Найти допустимую температуру воздушного потока при заданном давлении можно по формуле [6]

$$\lg p_{p,k} = - \frac{3363}{T_{p,k}} + 4,114, \quad (3)$$

связывающей температуру $T_{p,k}$, K равновесной конденсации с давлением $p_{p,k}$, атм в потоке.

При оценке рабочего времени установки, т.е. времени существования неизменных параметров сверхзвукового потока в рабочем сечении сопла, определении момента фотографирования обтекания модели следует учесть время установления течения на выходе из сопла, сокращающее полезное рабочее время.

Оценка времени установления $t_{уст. сопла}$ потока двухатомного идеального газа на выходе из конического сопла может быть сделана по формуле

$$t_{уст. сопла} = \frac{0,76 \cdot r_n}{\lg \theta_c \cdot a_m} \left[M^{1/2} \left(1 - \frac{1}{M}\right) + \frac{1}{15} (M^{1/2} - 1) + \frac{1}{25} (M^{1/2} - 1) \right], \quad (4)$$

где θ_c - угол полураствора сопла,

r_n - радиус критического сечения сопла.

При температуре торможения $T_0 \geq 1000$ К следует учитывать влияние реальных термодинамических свойств рабочего газа на параметры сверхзвукового потока [5], [6]. Заметное влияние на параметры га-

за в рабочей зоне может оказать также пограничный слой, образующийся на стенках сопла [7].

5. Описание аэродинамической ударной трубы ЛПИ

Аэродинамическая ударная труба ЛПИ позволяет получать кратковременные квазистационарные потоки газа с числом M порядка 9.

Температура газа в сверхзвуковом потоке и соответственно температура торможения рабочего газа перед соплом должна быть сравнительно высокой, чтобы и при больших числах M потока предотвратить конденсацию газа на выходе из сопла. Кроме того, давление и плотность сверхзвукового потока должны быть достаточными для применения оптических и других малоинерционных методов регистрации параметров потока. Одновременное выполнение обоих условий требует повышения абсолютного уровня давлений в камере ударной трубы.

Особенности конструкции, основные узлы,
вспомогательное оборудование установки

В конструкции аэродинамической ударной трубы (рис.3) можно выделить следующие основные элементы:

- а) камеру высокого давления 1,
- б) канал низкого давления 2,
- в) сопло 7,
- г) рабочую камеру 6,
- д) основание 8 и узел упора установки 5,
- е) ресиверы,
- ж) цилиндры гидравлической 4 и пневматической 3 систем.

Поясним кратко конструктивные особенности основных элементов ударной трубы.

а) Камера высокого давления 1 представляет собой круглую гладкостенную трубу длиной 3,5 м с внутренним диаметром $d_1 = 59$ мм, изготовленную из стали ОХНЗМФА. Наименьшая толщина стенки 9,5 мм. Длина камеры L_1 может изменяться в пределах от 3,5 м до 0,8 м с помощью пяти цилиндрических вставок. Один торец камеры заглушен, другой с помощью внешней упорной резьбы ввернут в диафрагменный гидравлический цилиндр. Камера рассчитана на максимальное рабочее давление $P_1 = 5 \cdot 10^6$ Па.

б) Канал низкого давления 2 может быть набран с помощью фланцевых соединений из труб длиной 3,5, 2,5, 1,5 м и вставки длиной 0,6 м с тем же диаметром внутреннего отверстия, что и у камеры вы-

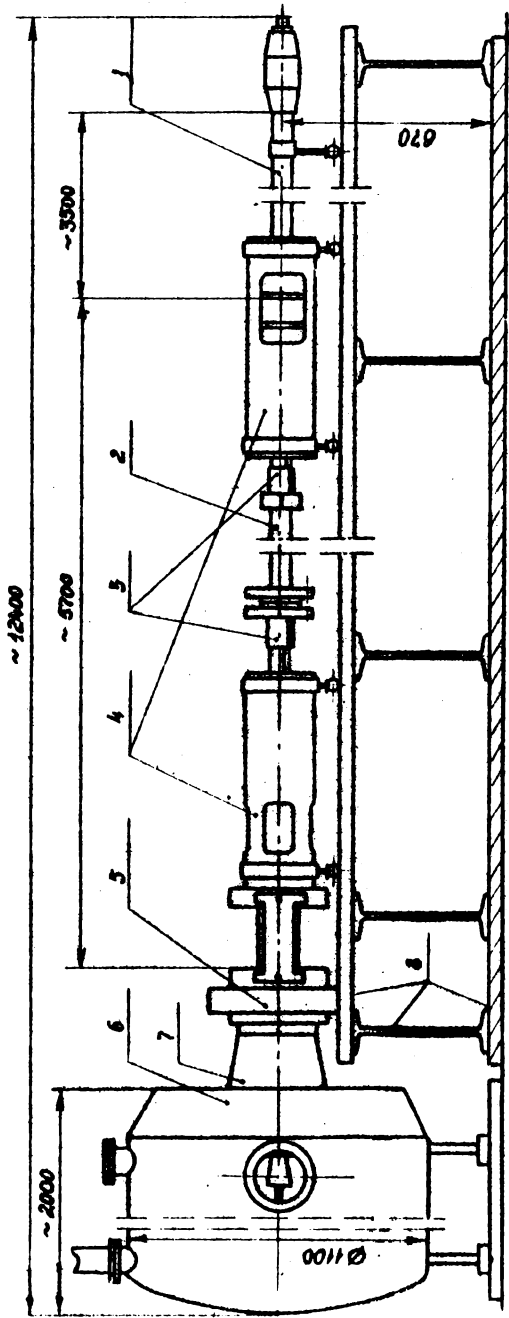


Рис. 3. Основные элементы конструкции пневматической ударной трубы с соплом.

- Обозначения: 1 - камера высокого давления, 2 - канал низкого давления, 3 - цилиндр пневматической системы отката, 4 - цилиндр гидравлической системы, 5 - узел упора, 6 - рабочая камера, 7 - сопло, 8 - основание.

окого давления ($d_1 = d_2 = 59$ мм). Вставка позволяет легко отсоединить канал от сопла.

в) Коническое сопло 7 Лавала с углом раствора $2\theta_0 = 30^\circ$ жестко связано с сопловым гидравлическим цилиндром с помощью двух тяг. Диаметр выходного сечения сопла $D_{\text{вых}} = 0,505$ м. Внутри сопла закреплена сопловая вставка с углом раствора 20° и диаметром выходного сечения $0,317$ м. Критическое сечение сопла имеет диаметр $d_* = 20$ мм.

г) Рабочая камера 6 выполнена в виде бака из нержавеющей стали, состоящего из трех секций, соединенных с помощью фланцев. Камера имеет окна для наблюдения, где установлены оптические защитные стекла диаметром $0,220$ м, и лаз диаметром $0,4$ м, позволяющий работать внутри камеры. В рабочей камере находится координатное устройство с регулировкой перемещения в трех направлениях, позволяющее устанавливать модели и датчики в нужной точке рабочей зоны сопла.

В рабочей камере может быть создан вакуум не хуже 10^{-1} мм рт.ст.

д) Основанием 8 установки служит бетонная подушка с заложеными в ней швеллерами, к которым крепятся дугтавры № 55. На дугтавры горизонтально уложены рельсы. Каретки с колесами, катящиеся по рельсам, поддерживают камеру высокого давления, канал низкого давления, гидравлические цилиндры, так что возможно продольное перемещение всей установки или её секций при обороте.

Усилия, возникающие при разрыве диафрагмы, воспринимаются узлом упора 5, связывающим основание с корпусом сопла.

е) Ресиверы. С установкой связаны четыре ресивера общим объемом 24 м³, расположенные вне помещения ударной трубы. Они могут подсоединяться к рабочей камере для понижения уровня давления после пуска установки при использовании больших объемов толкающего газа. Ресиверы служат также для хранения гелия при атмосферном давлении, используемого в качестве толкающего газа в режимах с высокой температурой торможения и большим рабочим временем (режим "синтой" контактной поверхности).

ж) Цилиндры гидравлической и пневматической систем. Продольные усилия, сжимающие и уплотняющие диафрагму у сопла и диафрагму

или быстродействующий клапан, разделяющие камеру и канал, создаются двумя одинаковыми гидравлическими цилиндрами 4, в которые с помощью масляного насоса закачивается масло под давлением до $3 \cdot 10^7$ Па. Для смены диафрагм применяется пневматическая система отката 3, состоящая из двух пар пневмоцилиндров, в которые подается воздух под рабочим давлением до $1,5 \cdot 10^7$ Па.

Кроме вышеперечисленных основных элементов установки, имеется еще ряд устройств, необходимых для её нормальной работы. К ним относятся: диафрагменный блок, позволяющий устанавливать одну или несколько диафрагм между камерой и каналом; быстродействующий клапан, который по мере надобности устанавливается вместо диафрагменного блока; система очистки, служащая для очистки гелия от примесей других газов; фильтры высокого давления, очищающие сжатый компрессором газ от масла.

Ударная труба оснащена лабораторным компрессором выского давления, вакуумным насосом типа ВН-6 для откачки газа из рабочей камеры и при необходимости из ресиверов, двумя вакуумными насосами типа РВН-20 для откачки газа из канала и камеры высокого давления.

Пульт управления установкой

С целью обеспечения безопасности обслуживаемого персонала и студентов при проведении научно-исследовательских и учебных работ пульт управления аэродинамической ударной трубой вынесен в соседнее с установкой помещение. Схема газовых соединений пульта управления представлена на рис. 4. На пульте управления смонтированы основные вентили I-9, I2, I4, контрольные манометры I-6, 8, I4 и кнопки включения и выключения вспомогательного оборудования (насосов, компрессоров, электропневмоклапанов и т.д.). В том же помещении расположена регистрирующая аппаратура систем измерения скорости ударной волны и давления.

Газовая система и рабочий цикл установки

На рис. 5 приведена упрощенная схема газовой системы установки, соответствующая режиму типа "воздух-воздух", когда после пуска установки смесь рабочего и толкающего газа выбрасывается в атмосферу.

Рабочий цикл, порядок подготовки и проведения эксперимента на установке подробно рассмотрены в "Инструкции по эксплуатации и технике безопасности при работе на гиперзвуковой ударной трубе."

Поясним кратко рабочий цикл установки в режиме "воздух-воздух"

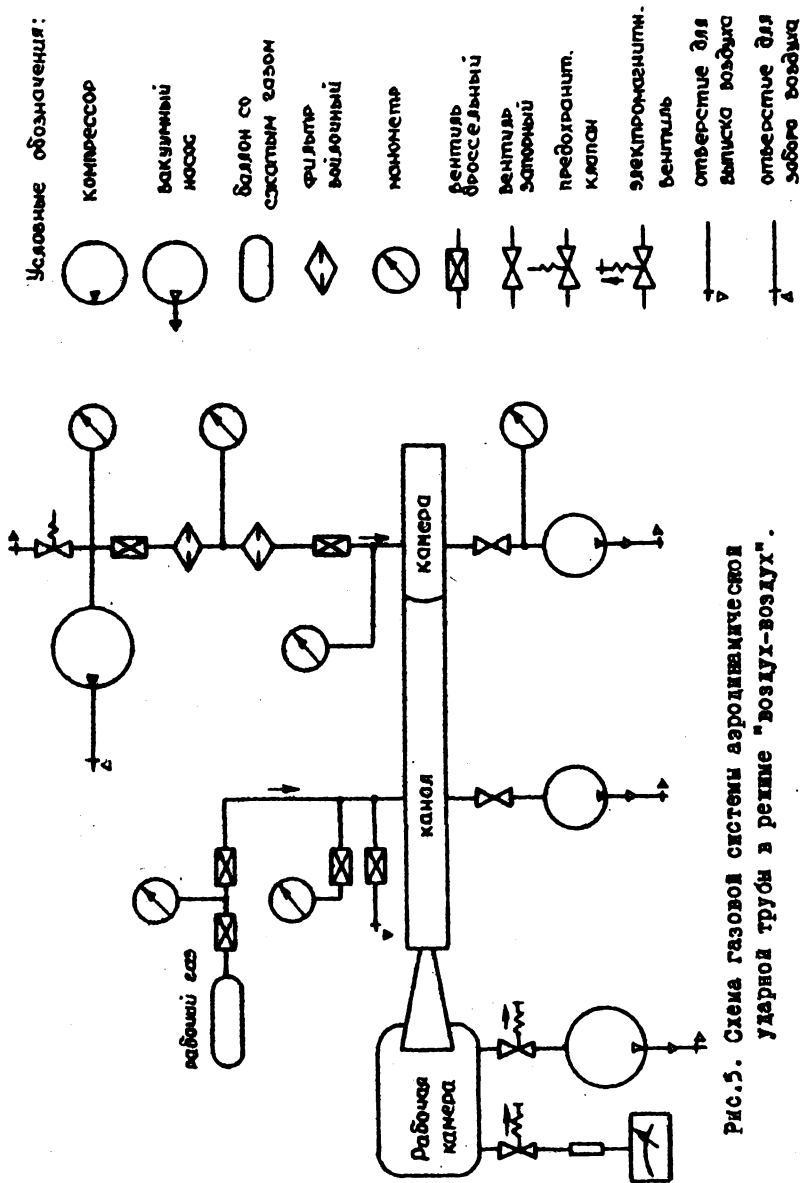


Рис.5. Схема газовой системы аэродинамической ударной трубы в режиме "воздух-воздух".

с использованием воздуха в качестве рабочего и толкающего газа.

1. Устанавливают модель, включают и подготавливают, калибруют системы измерения.
2. Включают пневмосистему отката, освобождают использованные диафрагмы, устанавливают и сжимают гидравликой основную и сопловую диафрагмы.
3. Заполняют канал низкого давления до заданного уровня давления P_1 , откачивают рабочую камеру, создавая вакуум менее 0,1 мм рт.ст.
4. Подготавливают к пуску радиотехнические и оптические системы измерения.
5. Включают компрессор, подсоединяют фильтры компрессора к камере высокого давления, заполняют камеру сжатым толкающим газом, отмечают давление P_2 разрыва диафрагмы.
6. Регистрируют показания приборов, выключают приборы и вспомогательное оборудование, освобождают диафрагмы.

При использовании вместо основной диафрагмы быстродействующего клапана давление в камере высокого давления устанавливается равным заданному давлению P_2 . Пуск клапана производят, открывая вентиль 7 управления клапаном на пульте управления. Применение быстродействующего клапана упрощает эксперимент и позволяет существенно улучшить воспроизводимость режимов работы ударной трубы.

Системы измерения газодинамических параметров установки

Аэродинамическая ударная труба оснащена следующими системами измерений: системой измерения скорости падающей ударной волны, системой измерения давления за падающей, за отраженной ударной волной и полного давления в сверхзвуковом потоке на выходе из сопла, теневой оптической системой регистрации картин обтекания моделей.

Кратко охарактеризуем каждую из перечисленных систем.

Система измерения скорости ударной волны в ударной трубе

При умеренных интенсивностях ударной волны широкое применение получили пьезоэлектрические системы измерения скорости, использующие базовый метод, основанный на измерении времени прохождения ударной волной известного расстояния между пьезоэлектрическими датчиками, регистрирующими изменение давления на фронте ударной волны [4].

Канал ударной трубы оснащен тремя станциями измерения скорости ударной волны (рис.6). Каждая станция включает пьезоэлектрические

датчики, усилители электрических сигналов и регистратор интервала времени прохождения ударной волны базового расстояния. Средние сечения скоростных станций отстоят от диафрагмы на 17,2; 48,7 и 82,6 калибра трубы или соответственно на 1,01 м, 2,87 и 5,47 м. Пьезоэлектрические датчики генерируют электрические сигналы ΔU , пропорциональные перепаду давления на фронте ударной волны Δp : $\Delta U = K_{\text{дат}} \cdot \Delta p [4]$. Эти сигналы поступают на входы трехканального усилителя с истоковыми повторителями на входе. На выходе усилителя формируется сигнал отрицательной полярности и ограниченной амплитуды (не более 3 вольт). Этот сигнал поступает на регистраторы, в качестве которых используются частотомеры типа ЧЗ-33 или ЧЗ-35. В каждой станции используются два "скоростных" датчика (1с-2с; 3с-4с, 5с-6с). В случае применения в качестве регистраторов осциллографов на каждой станции используется третий (запускающий) датчик (1з, 2з, 3з). Усиленный сигнал запускающего датчика инициирует развертку осциллографа, работающего в однократном режиме.

Основным преимуществом пьезоэлектрической системы при использовании её в импульсных установках с рабочим временем 10^{-4} - 10^{-2} с является её малая инерционность.

Кроме того, при использовании пьезоэффекта осуществляется прямое преобразование силового воздействия в электрический заряд, причем имеет место линейный характер зависимости заряда от приложенного усилия в достаточно широком диапазоне механических нагрузок.

Система измерения давления в ударной трубе с соплом

Рабочее время аэродинамической ударной трубы в зависимости от режима работы изменяется в пределах $(1,5 - 5,5) \cdot 10^{-3}$ с, а диапазон измеряемых давлений - в пределах $10^2 - 10^7$ Па. Следовательно, система измерения давления должна обладать малой инерционностью и широким динамическим диапазоном.

Применительно к условиям работы установки была разработана специальная система с пьезокерамическими датчиками в качестве чувствительных элементов [4]. Электрические сигналы, генерируемые такими датчиками (1д, 2д, 3д), поступают на катодные или истоковые повторители. Для правильной передачи сигналов пьезодатчиков в течение рабочего времени входное сопротивление катодного или истокового повторителя должно быть достаточно большим (порядка $1 + 2$ Гом для датчика емкостью 150-250 пф) [4]. Электрический сигнал с выхода катодного повторителя поступает на вход запоминающего осциллографа.

фа (типа С8-9А, С8-7, С8-2). Запуск развертки осциллографа для регистрации давления за фронтом падающей ударной волны осуществляется сигналом датчика 23 со II скоростной станции, а развертки осциллографа для записи сигнала давления за отраженной ударной волной и давления в сверхзвуковом потоке - датчиком 43, установленным на стенке канала ударной трубы непосредственно перед соплом.

Система измерения давлений в сверхзвуковом потоке и на моделях аналогична системе измерения давления в ударной трубе (рис.6). Пьезодатчики, регистрирующие полное давление P_0 за прямым скачком уплотнения в сверхзвуковом потоке, монтируются в цилиндрических корпусах с плоским торцом диаметром 8 мм. Датчики ориентируются по направлению линий тока конического течения. Для регистрации давления на поверхности моделей используются, в основном, датчики двух типов: датчики, разработанные на кафедре гидроаэродинамики [4] и датчики ВНИИ [8].

Оптическая система установки

Установка оснащена теневым прибором ИАБ-45I с двумя поворотными зеркалами (рис.6). В качестве источника света используется искровой разрядник, работающий в идушем режиме. Типовая конструкция разрядника описана в работе [9]. Запуск разрядника осуществляется электрическим сигналом пьезодатчика 43 (рис.6), который запускает электронную линию задержки. Это устройство с регулируемой задержкой электрического сигнала позволяет получить импульс света в заданный момент времени.

Используемый теневой прибор типа ИАБ-45I позволяет применять как прямой теневой метод, так и теневой метод с ножом Фуко для повышения чувствительности прибора. Ход лучей в теневом приборе ИАБ-45I показан на рис.7. Источником света служит щель конденсора, расположенная в фокусе сферического зеркала. Идущие из щели лучи света поворачиваются небольшим диагональным зеркалом и падают на сферическое зеркало коллиматора. Расходящийся пучок света после отражения от зеркала становится параллельным. Параллельный пучок света проходит через мениск, исправляющий аберрации оптической системы, отражается от поворотного зеркала, идет в рабочую зону, ограниченную защитными стеклами, и попадает на второе поворотное зеркало. Пройдя через второй мениск и отразившись от сферического зеркала приемной части, лучи света отклоняются вторым малым диагональным зеркалом и попадают через окуляр на фотоприставку.

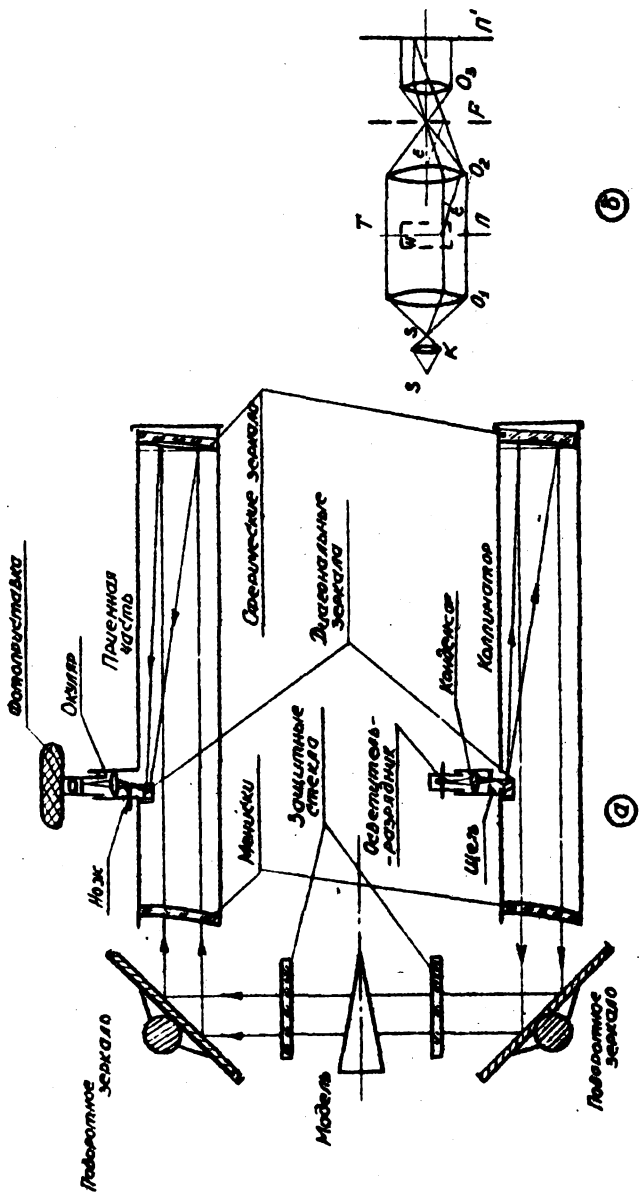


Рис. 7. Оптическая схема теневого прибора НАБ-451.

Прибор ИАБ-45I имеет световой диаметр 0,23 м. Фокусные расстояния сферических зеркал одинаковы и равны 1,917 м. Осветительная щель прибора имеет пределы раскрытия от 0 до 3 мм с точностью отсчета 0,01 мм. Максимальная длина щели 25 мм. Щель может поворачиваться на 360° . Каретки на обеих частях прибора могут перемещаться в пределах ± 25 мм для фокусировки осветительной щели.

Фокусировка приемной части оптической системы на определенную плоскость (модель) в рабочей зоне осуществляется окуляром.

Установив оптический нож в фокальной плоскости приемной части прибора, можно многократно повысить чувствительность оптической системы [9]. На рис.7б приведена упрощенная оптическая схема теневого прибора, поясняющая действие ножа, установленного в фокальной плоскости F. При подводе кромки ножа к фокальной точке снизу на экран, расположенный в плоскости Π' , сопряженной с плоскостью Π , не попадут лучи света, отклоненные оптической неоднородностью книзу. Такая оптическая система с ножом наиболее чувствительна к отклонению лучей света в направлении, перпендикулярном кромке ножа.

6. Р а б о т а I. Определение геометрических характеристик скачка уплотнения при обтекании осесимметричных затупленных тел сверхзвуковым потоком

Исследование спектров обтекания различных тел, в частности, определение величины отхода скачка уплотнения при обтекании затупленных тел сверхзвуковым потоком позволяет выявить интересные газодинамические и физико-химические особенности сверхзвуковых течений. Сопоставление данных экспериментов с результатами расчетов формы скачка уплотнения даёт возможность оценить эффективность численных методов решения сложных задач газовой динамики.

В лабораторной работе исследуется установившееся обтекание затупленных тел сверхзвуковым потоком, что обеспечивается выбором режима работы установки с достаточно большим рабочим временем, а также правильным выбором момента фотографирования.

Последовательность подготовки и выполнения лабораторной работы такова.

а) Для заданных начальных параметров ρ_1 , ρ_4 , T_1 , T_4 , K_1 , K_4 , M_1 , M_4 рабочего и толкающего газа, известных длин L_1 , L_4 канала и камеры высокого давления рассчитывают по элементарной теории газодинамические параметры в ударной трубе за падающей и отраженной ударной волной. Строят $x-t$ диаграмму в безразмерных ко-

ординатах с указанием масштабов длины и времени, коэффициентов, перехода от безразмерных к размерным величинам и основных параметров ($P_1, P_{41}, K_1, K_4, T_{41}, M_1$), характеризующих заданный режим.

Режим "воздух-воздух" рассчитывается по таблицам, приведенным в приложениях 1-3.

Результаты расчета заносит в таблицу I.

б) Определяют параметры торможения рабочего газа перед соплом с учетом затухания ударной волны и соплового отверстия.

Затухание ударной волны в режиме "воздух-воздух" рассчитывается по формулам (1), (2). Сначала определяется характер пограничного слоя в рабочем и толкающем газе, затем находят относительное и абсолютное уменьшение скорости ударной волны у торца канала ($X_T = L_1$) и в сечениях с координатами $X_I = 1 \text{ м}$, $X_E = 2,9 \text{ м}$, $X_D = 5,5 \text{ м}$, соответствующими расстояниями от диафрагмы до середины базовых интервалов, на которых измеряется скорость ударной волны.

По числу M_{1T} ударной волны, найденному с учетом затухания, рассчитывают параметры газа за отраженной ударной волной для случая глухого торца. Затем по параметрам за отраженной ударной волной находят с учетом соплового отверстия параметры торможения рабочего газа для заданных диаметра канала $d_1 = 59 \text{ мм}$ и диаметра критического сечения $d_* = 20 \text{ мм}$ (приложение 7).

Результаты расчета параметров газа в ударной трубе с учетом влияния вязкости и соплового отверстия заносит в таблицу 2.

в) По одномерной теории для конического сопла с углом раствора $2\theta_c = 20^\circ$ и диаметром критического сечения $d_* = 20 \text{ мм}$ рассчитывают параметры рабочего газа в сечении, отстоящем от геометрической вершины конического сопла на заданное расстояние $X_{\text{рас. сеч}}$. Параметры воздушного потока находят по таблице (приложение 4), составленной для двухатомного газа ($K = 1,4$).

Результаты расчета параметров сверхзвукового потока заносит в таблицу 2.

Далее следует указания к выполнению экспериментальной части лабораторной работы.

г) Установка подготавливается к эксперименту с учетом заданных начальных параметров газа в ударной трубе и в соответствии с правилами эксплуатации гидравлической системы, газовых систем высокого и низкого давления и указаниями по технике безопасности (п.3, "Инструкция по эксплуатации и технике безопасности при работе на гиперзвуковой ударной трубе").

Таблица I. Результаты расчета параметров газа в ударной трубе по элементарной теории.

L_1 x_1	L_n	K_1	K_n	a_1	a_n	ρ_1	ρ_n	$\frac{\rho_1}{\rho_2}$	M_1
M	M	Умножить на 3	Умножить на 3	M/C	M/C	Па	Па		
u_1	$\frac{A_1}{P_1}$	P_2	$\frac{T_2}{T_1}$	T_2	$\frac{\rho_2}{\rho_1}$	ρ_2	$\frac{a_2}{a_1}$	a_2	$\frac{u_2}{a_1}$
M/C		Па		°K		кг/м ³		M/C	
u_2	M_2	$\frac{a_3}{a_n}$	a_3	M_3	\bar{x}_3	x_3	\bar{t}_3	t_3	\bar{x}_c
M/C			M/C			M		C	
$\frac{u_{\text{оп}}}{u_1}$	$u_{\text{оп}}$	$\frac{\rho_2}{\rho_1}$	ρ_1	$\frac{T_2}{T_1}$	T_2	$\frac{\rho_2}{\rho_1}$	ρ_2	$\frac{a_2}{a_1}$	a_1
	M/C		Па		°K		кг/м ³		M/C
$\frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1}$	x_3 x_1	$\frac{\bar{t}_3}{\bar{t}_1}$	t_3 t_1	$\frac{\bar{t}_c}{\bar{t}_1}$	t_c t_1	\bar{t}_1	t_1	$\bar{t}_{\text{оп}}$	$t_{\text{оп}}$
	M		C		C		C		C

Таблица 2. Параметры газа за отраженной ударной волной с учетом вязкости и соплового отверстия.
 Параметры изэнтропического сверхзвукового потока.

$L_1 = L_T$	d_1	K_1	K_0	a_1	a_0	p_1	$\frac{p_1}{p_0}$	M_1 звук. скорость
м	мм	кг/м ² ·с	кг/м ² ·с	м/с	м/с	Па		
M_{1T} взрж	$\frac{M_{1T}}{M_{12A}}$	$\left(\frac{p_1}{p_1'}\right)_{1/2A}$	$\left(\frac{p_2}{p_2'}\right)_{1/2A}$	$\left(\frac{p_2}{p_1'}\right)_{1/2A}$	p_2 взрж отб	$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{1/2A}$	$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{1/2A}$	$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{1/2A}$
					Па			
p_2 взрж отб	$\left(\frac{p_2}{p_1'}\right)_{1/2A}$	$\left(\frac{p_2}{p_1'}\right)_{1/2A}$	$\left(\frac{p_2}{p_1'}\right)_{1/2A}$	p_2 взрж отб	2Возраст	$\rho_{\text{взрж. сев.}}$	$\rho_{\text{взрж. сев.}}$	$\rho_{\text{взрж. сев.}}$
град К				кг/м ³	град	м	м ²	м ²
$\frac{A}{A_n}$	м	$\frac{p}{p_0}$	p	$\frac{T}{T_0}$	T	$T_{\text{конд.}}$ (Форм. 2)	$\frac{p}{p_0}$	ρ
			Па		град К			кг/м ³
$\frac{D_1'}{p_0}$	p_0'	$\frac{a}{a_0}$	a	u	M (Форм. 2)	$Re_1 = \frac{u \rho}{\mu}$	$\frac{g}{p_0'}$	g
	Па		м/с	м/с	м·с/м ²	1/м		Па

Составляют схему измерений согласно рис.6.

По данным газодинамических расчетов с учетом коэффициентов усиления преусилителей и заданной чувствительности пьезодатчиков систем измерения скорости ударной волны, давления в канале ударной трубы, давления в сверхзвуковом потоке на выходе из сопла и давления на моделях настраивается регистрирующая аппаратура.

Задают длительность задержки сигнала фотографирования такую, чтобы к моменту фотографирования, во-первых, устанавливалось течение рабочего газа на выходе из сопла и, во-вторых, устанавливалась картина обтекания модели сверхзвуковым потоком.

Устанавливают длительность разверток осциллографов, исходя из расчета рабочего времени с учетом задержки появления потока на выходе из сопла. Выбирают коэффициенты усиления усилителей вертикального отклонения дуга так, чтобы иметь достаточно большие амплитуды регистрируемых сигналов на экране осциллографа, но не превышать границ линейного участка амплитудной характеристики, указанных в паспорте осциллографа (30-40 мм).

д) Проводят пуск установки. В процессе эксперимента фотографируется обтекание модели сверхзвуковым потоком.

Регистрируется изменение скорости ударной волны по длине канала, фотографируются осциллограммы сигналов датчиков давления $p_{стб}$ за отраженной ударной волной, полного давления p' за прямым скачком уплотнения в сверхзвуковом потоке, давления $p_{мод}$ на поверхности модели.

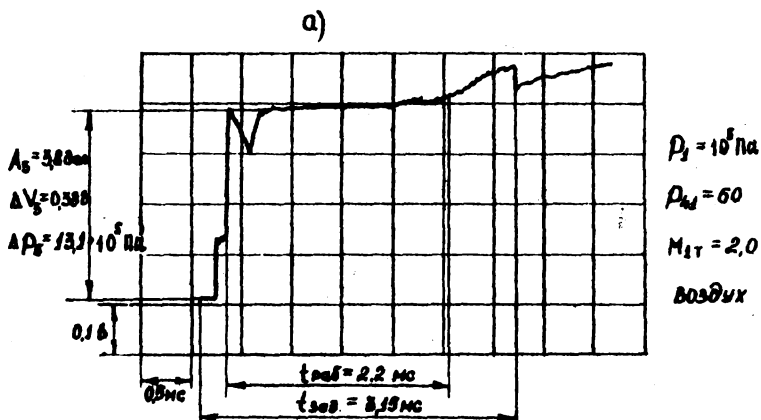
е) Выполняют обработку экспериментальных данных.

По известным базовым расстояниям S_x , S_z , $S_{\text{д}}$ на трех станциях измерения скорости ударной волны и измеренным интервалам времени τ_x , τ_z , $\tau_{\text{д}}$ рассчитывается скорость и определяется затухание ударной волны.

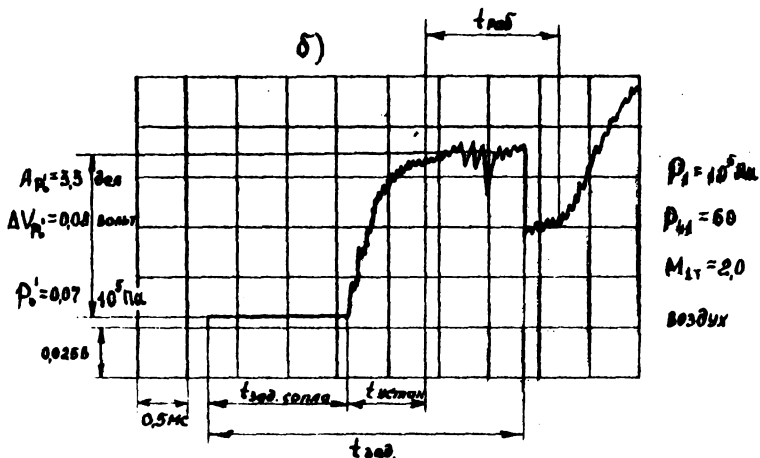
С негативов с помощью фотоувеличителя на бумагу переносят осциллограммы вместе с координатной сеткой. При обработке осциллограммы на ней отмечают все измеряемые величины, масштабы времени и амплитуды, как показано на рис.8. На осциллограмме указывают основные данные, характеризующие режим работы ударной трубы (p_1 , p_{41} , M_1 т.эксп, рабочий газ).

В результате обработки осциллограмм измеряют давления $p_{стб}$, p' , $p_{мод}$ и находят рабочее время $t_{\text{раб. чп}}$ у торца канала и в рабочем сечении $t_{\text{раб. лет}}$ на выходе из сопла.

Кратковременное уменьшение амплитуды сигнала датчика, реги -



Осциллограмма сигнала датчика, регистрирующего давление $P_{\text{заб}}$ за отраженной ударной волной.



Осциллограмма сигнала датчика, регистрирующего полное давление P'_b за прямым скачком уплотнения.

Рис. 8.

стрирующего давление $p_{стб}$ в начале осциллограммы, связано с разрывом сопловой диафрагмы, отстоящей от торца канала на расстоянии около калибра. Резкий спад амплитуды сигнала в конце осциллограммы (рис.8,а,б) вызван электрической наводкой, сопровождающей разряд искрового источника света.

Результаты обработки экспериментальных данных сопоставляют с данными расчетов и заносят в сводную таблицу результатов эксперимента (табл.3), где давления $p_{ст, M_{эксп}} = p_0$ рассчитывают по числу $M_{ст, эксп}$ с учетом отверстия.

По известному из эксперимента отношению $p_0/p_{ст, эксп} = p_0'/p_0'$ или отношению p_0'/p_0 уточняют число $M = M_{эксп}$ сверхзвукового потока.

ж) Порядок обработки картины обтекания затупленного тела сверхзвуковым потоком поясним на примере осесимметричного обтекания эллипсоида вращения (рис.9).

Поместив полученный в эксперименте негатив в фотоувеличитель, получают на белом плотном листе бумаги изображение тела с отощедшим скачком уплотнения в масштабе примерно 1:1. Далее аккуратно обводят контур тела и внешнюю границу изображения скачка уплотнения хорошо заточенным твердым карандашом. Затем строят полярную координатную сетку с началом координат, совпадающим с геометрическим центром изображения тела, который находят следующим образом. Проводят продольную ось симметрии и на оси симметрии от критической точки откладывают расстояние, рассчитанное с учетом величины малой полуоси эллипсоида и масштаба изображения.

Обработка картины обтекания, представленной на рис.9, состоит в определении расстояний от центра до границы изображения тела r_0 и до внешней границы изображения скачка уплотнения $r_{сж}$ в зависимости от полярного угла ψ . Результаты обработки заносят в таблицу (табл.4). При наличии расчетных данных о форме скачка уплотнения дается сопоставление результатов экспериментов с расчетом.

Расчетные данные о форме скачка уплотнения для сферы и эллипсоида вращения при осесимметричном обтекании однородным потоком в случае $K = 1,4$ приведены в приложениях 5,6, составленных по данным работы [10].

Распределение давления по поверхности затупленного тела, обрешенной к набегающему потоку, рассчитывается по модифицированной формуле Ньютона

$$\frac{p - p_{\infty}}{p_0 - p_{\infty}} = \cos^2 \theta, \quad (5)$$

Таблица 3. Сводная таблица результатов эксперимента.

P_1 расчет	P_4 расчет	P_1 эксп.	P_4 эксп.	$\frac{P_{41} \text{ экс.}}{P_{41} \text{ расч.}}$	α_1 шкалы ЭЭ	$M_{1, X=0}$ расчет	$M_{1, X1}$ расчет
Па	Па	Па	Па		м/с		
$M_{1, X1}$ расчет	$M_{1, X2}$ расчет	$S_{1 \text{ балы}}$	$S_{2 \text{ балы}}$	$S_{3 \text{ балы}}$	τ_I	τ_{II}	τ_{III}
		м	м	м	с	с	с
$M_{1, X1}$ эксп.	$M_{1, X2}$ эксп.	$M_{1, X3}$ эксп.	$\frac{M_{1, X1 \text{ экс.}}}{M_{1, X1 \text{ расч.}}}$	$\frac{M_{1, X2 \text{ экс.}}}{M_{1, X2 \text{ расч.}}}$	$\frac{M_{1, X3 \text{ экс.}}}{M_{1, X3 \text{ расч.}}}$	$\frac{\Delta M_1}{M_{1, X=0 \text{ расч.}}}$	P_5 влк к к с отб.
							Па
A_5	$K_{P_5} = \frac{\Delta V}{\Delta P}$	$K_{\text{вкл } P_5}$	ΔV_5	ΔP_5	P_5	$\frac{P_5 \text{ экс.}}{P_5 \text{ расч.}}$ <small>влк.</small>	$\frac{P_5 \text{ экс.}}{P_5 \text{ расч.}}$ <small>МВ влк.</small>
делен.	вольт/Па	вольт/дел.	вольт	Па	Па		
A_{P_5}	$K_{P_5} = \frac{\Delta V}{\Delta P}$	$K_{\text{осц } P_5}$	ΔV_{P_5}	P_5	$\frac{P_5 \text{ экс.}}{P_5 \text{ расч.}}$ <small>МВ экс.</small>	$M_{\text{экс.}}$	$t_{\text{задерж.}}$ фотоп.
делен.	вольт/Па	вольт/дел.	вольт	Па			с
$t_{\text{роб. уд. тр.}}$ расчет	метка времени осцилл. P_5	$t_{\text{роб. уд. тр.}}$ эксп.	$t_{\text{роб. экс.}}$ $t_{\text{роб. расч.}}$	метка времени осцилл. P_5	$t_{\text{задерж.}}$ сигла	$t_{\text{установка}}$ сигла	$t_{\text{роб. сигла}}$
с	с/дел	с		с/дел	с	с	с

где θ - угол между вектором скорости набегающего потока и ортом нормали к поверхности.

Измеренное давление сравнивают с рассчитанным по формуле (5). Форма отшедшего скачка уплотнения в расходящемся потоке на выходе конического сопла будет отличаться от формы скачка в однородном потоке: отход скачка в однородном потоке при $\varphi = 0$ (рис.9) будет больше, а при $\varphi > \frac{\pi}{2}$ меньше, чем в расходящемся потоке.

Относительный отход скачка уплотнения в расходящемся коническом потоке при $\varphi = 0$ может быть рассчитан по формуле

$$\frac{(z_{ск} - z_r)_{\text{расход}}}{(z_{ск} - z_r)_{\text{однород}}} = \frac{1}{1 + R_{кр}/x_{крит}}$$

где $R_{кр}$ - радиус кривизны поверхности модели в критической точке, $x_{крит}$ - расстояние от вершины конического сопла до критической точки.

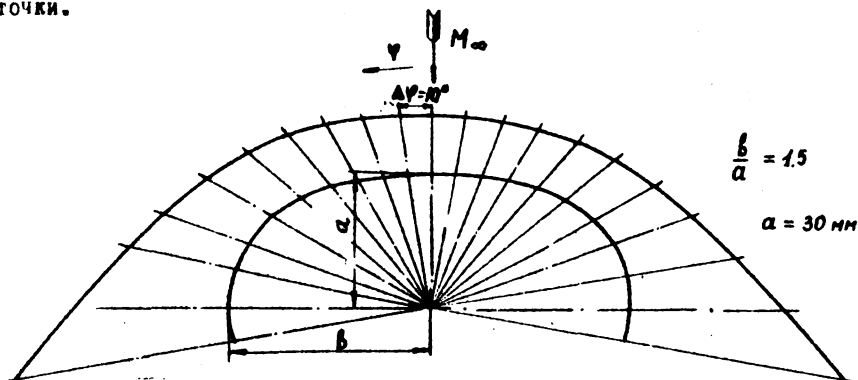


Рис.9. Картина осесимметричного обтекания эллипсоида вращения сверхзвуковым потоком.

Таблица 4. Результаты обработки картины обтекания затупленного тела сверхзвуковым потоком.

φ	z_r	$z_{ск}$	$\left(\frac{z_{ск}}{z_r}\right)$	$\frac{z_{ск} - z_r}{z_r}$	$\frac{z_{ск} - z_r}{z_r}$	$\frac{z_{ск} - z_r}{z_r}$	$\frac{z_{ск} - z_r}{z_r}$
град	мм	мм		экспер	расч. однород	расч. неоднород	расч. неоднород
+100							
0							
-100							

Работа 2. Определение условий отрыва пограничного слоя в сверхзвуковом потоке

Отрывные течения, возникающие при наличии двух факторов: положительного градиента давления и вязкости - весьма распространенные и сложные явления, оказывающие существенное как благоприятное, так и неблагоприятное влияние на газодинамические и теплофизические характеристики объектов авиационной и космической техники, энергетики, химической технологии и т.д.

В лабораторной работе определяются условия отрыва пограничного слоя на пластине с выступом, обтекаемой сверхзвуковым потоком. Представленные в безразмерной форме результаты экспериментов на пластине могут быть применены к расчету широкого класса отрывных течений [11].

Пластина длиной $L_{пл} \leq 250$ мм, шириной 100 мм, с выступом высотой h устанавливается под углом атаки α в рабочей зоне на выходе из сопла, как показано на рис.10. Штрих-пунктиром здесь показана ось симметрии конического сопла, проходящая через среднее сечение рабочей поверхности пластины. Параметры набегающего потока приводятся к среднему сечению пластины. Цифрами на рис.10 отмечены области с постоянными параметрами газа, для конического течения рассчитанными по приведенным параметрам набегающего потока.

При обтекании пластины, установленной под углом атаки $\alpha < \alpha_{крит}$, возникает присоединенный косой скачок уплотнения. На пластине образуется пограничный слой, отрывающийся от поверхности пластины вследствие того, что обтекание выступа приводит к появлению положительного по направлению движения потока градиента давления.

Отрывающийся пограничный слой присоединяется к поверхности модели в районе острой кромки выступа, так что образуется зона отрыва 9. Распределение давления по поверхности пластины в зоне отрыва для ламинарного пограничного слоя таково, что относительно резкое увеличение давления по сравнению с давлением P_0 наблюдается в только небольшой области $\Delta X_{от}$ отделения пограничного слоя от поверхности пластины. Далее к выступу давление P_0 может считаться постоянным, а верхняя граница зоны отрыва - прямолинейной. При отрыве турбулентного пограничного слоя допустимый перепад

давления, приводящий к отрыву, резко увеличивается по сравнению со случаем ламинарного пограничного слоя, длина области отрыва сокращается и относительная протяженность зоны постоянного давления уменьшается.

При обтекании зоны отрыва 9 сверхзвуковым потоком с параметрами газа за присоединенным косым скачком уплотнения возникает второй косой скачок уплотнения, наклоненный под углом β_2 к поверхности пластины.

Относительный перепад давления, приводящий к отрыву пограничного слоя, зависит от числа M потока на внешней границе пограничного слоя и числа $Re_{x_{отр}}$ потока, определенного по параметрам газа на внешней границе пограничного слоя и длине $x_{отр}$ пограничного слоя до зоны отрыва. Зависимость эту в обозначениях рис.10 для ламинарного пограничного слоя можно представить в виде

$$\frac{p_0 - p_1}{p_1} = \frac{p_2 - p_1}{p_1} = A_{отр} \cdot \frac{K_1 M_1^2}{(M_1^2 - 1)^{1/2} \cdot Re_{x_{отр}}^k}, \quad (6)$$

где

$$Re_{x_{отр}} = \frac{\rho_1 u_1 x_{отр}}{\mu_1}, \quad A_{отр} - \text{константа.}$$

Вязкость μ рассчитывается по формуле Саттерленда

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \frac{273 + C}{T + C}, \quad (7)$$

где для воздуха $\mu_0 = 1,72 \cdot 10^{-5}$; $\frac{M \cdot C}{M^2}$; $C = 122$, К.

Упрощенный анализ течения в области свободного взаимодействия пограничного слоя со сверхзвуковым потоком, позволяющий получить зависимость (6), приведен в работе [11].

Цель работы состоит в определении коэффициента отрыва $A_{отр}$. Последовательность выполнения работы такова.

а) По исходным данным (п.4) рассчитывают параметры газа в ударной трубе и в заданном сечении рабочей области сверхзвукового потока, как указано в пунктах а-в) описания работы I. Результаты расчета заносят в таблицы 1,2.

Для определения уровня давлений в областях 7 и 9 выполняют оценочный расчет обтекания пластины с выступом сверхзвуковым потоком с параметрами, найденными ранее (таблица 2).

По заданному углу атаки $\alpha_{\text{пласт}}$, рассчитав число M_{∞} и

давлению p_{∞} набегающего потока находят угол β_1 и давление p_1 , привлекая известные соотношения на косом скачке уплотнения [3, стр.231-242]. Зависимость $\beta - \alpha = f(\alpha, M_{\infty})$ для плоского косого скачка уплотнения при $K = 1,4$ приведена в приложении 8.

Положив ориентировочно $l_{отр} \approx 10 h$, $\theta_{отр} \approx 6^\circ$ и вторично используя формулы косого скачка, оценивают давление p_0 в отрывной зоне.

Предварительные оценки рабочего времени и параметров газа в ударной трубе и на пластине позволяют правильно настроить регистрирующую аппаратуру и определить момент фотографирования, соответствующий установившемуся обтеканию пластины.

Следует отметить, что время установления $t_{уст. пласт}$ течения в отрывной зоне ограниченных размеров невелико ($t_{уст. пласт} \approx l_{отр}/a_{s1}$) и выбор момента фотографирования определяется временем установления течения на выходе из сопла (см. осциллограмму полного давления p_0' на рис.8).

б) Порядок подготовки и выполнения эксперимента описан в п.п. г) д) указания к работе I. В эксперименте регистрируется затухание $\Delta M_2/M_1$ ударной волны, давление $p_{s,отв}$ перед торцом канала, полное давление p_0' в рабочем сечении, давление p_1 , p_0 на пластине, фотографируется картина обтекания пластины с выступом сверхзвуковым потоком.

в) Выполняют обработку экспериментальных данных. Методика измерения скорости ударной волны и давлений в ударной трубе, в сверхзвуковом потоке и на пластине не отличается от указанной в п.в) работы I.

При обработке картины обтекания пластины помещают полученный негатив картины течения в фотоувеличитель. На листе плотной бумаги изображают хорошо заточенным твердым карандашом в масштабе 1:1 картину обтекания пластины сверхзвуковым потоком, отмечая все характерные детали: вертикальную линию - тень отвеса, перпендикулярную к оси симметрии конического сверхзвукового потока, контур пластины, косые скачки уплотнения, границы пристеночного и оторвавшегося пограничного слоя, возмущения в различных областях течения и т.д.

Далее ведут обработку картины течения, измеряя линейные и угловые параметры и вводя обозначения в соответствии с рис.10. Результаты измерений заносят в таблицу 5.

По измеренным давлениям $p_{s,отв} = p_0$ и p_0' , составив отношение p_0'/p_0 и используя таблицу приложения 4, уточняют число M_{∞} и другие параметры в рабочем сечении сверхзвукового потока, совпадающем с

Таблица 5. Сводная таблица результатов исследования отрывного течения на пластине.

M_{∞} эксп	P_{T0} эксп	T_{50} эксп	P_{∞}	T_{∞}	ρ_{∞}	$Re_{L_{\infty}}$	$\Delta_{\text{пласт}}$ эксп
	Па	К	Па	К	кг/м ³	1/м	град
β_7 расч	β_7 эксп	$\frac{\beta_7 \text{ эксп}}{\beta_7 \text{ расч}}$	h	$l_{\text{отр}}$ эксп	$X_{\text{отр}}$ эксп	$\theta_{\text{отр}}$ эксп. геометр	$\Delta \theta_{\text{п.с}}$
град	град		мм	м	м	град	град
$\theta_{\text{отр}}$ эфф	β_0 расч. эфф	β_0 эксп. эфф	$\frac{\beta_0 \text{ эксп}}{\beta_0 \text{ расч}}$	$K = \frac{4U}{\beta_0 \beta}$ расч. эфф	A_{β_0}	$K_{\text{осц. в.}}$	P_0 эксп
град	град	град		вольт/па	десен	вольт/дес	Па
P_0 расч	$\frac{P_0 \text{ эксп}}{P_0 \text{ расч}}$	M_7 расч	M_7 эксп	$\frac{M_7 \text{ эксп}}{M_7 \text{ расч}}$	P_7 расч. уг.	T_7 расч. уг.	ρ_7 расч. уг.
Па					Па	К	кг/м ³
$\frac{P_7 \text{ вазк}}{P_7 \text{ уг}}$	$\frac{T_7 \text{ вазк}}{T_7 \text{ уг}}$	μ_7 расч. уг	ν_7 расч. уг	$Re_{X_{\text{отр}}}$	$A_{\text{отр}}^{(1)}$	$A_{\text{отр}}^{(2)}$	$\bar{A}_{\text{отр}}$
		н.с/м ²	м/с				

середины пластины. Окончательный расчет обтекания пластины ведут, используя уточненные параметры набегающего потока. Результаты расчета параметров газа на пластине заносят в таблицу 5.

Коэффициент $A_{отр}$ в формуле (6) рассчитывают двумя методами: привлекая экспериментальные значения давления в областях 7 и 9 или используя только геометрические характеристики течения.

В обоих вариантах задается углом атаки $\alpha_{на}$, измеренным по фотоснимку, и параметрами набегающего потока, приведенными к среднему сечению пластины. Находят по формулам косоугольного скачка параметры газа в области 7 и число $R_{х отр} = u_2 \rho_2 x_{отр} / \mu_2$.

Далее в первом варианте, зная давления p_2 и p_9 , рассчитывают согласно формуле (6) коэффициент $A_{отр}^{(1)}$.

Во втором варианте при расчете давления p_9 , равного давлению p_2 в отрывной зоне, необходимо учесть обратное влияние пограничного слоя на потенциальный поток [3, стр. 615-620], [12].

Влияние пограничного слоя на потенциальное течение сказывается не только в изменении абсолютных значений параметров газа в ударном слое, но и в изменении направления течения на границе пограничного слоя. Это изменение, характеризующееся углом $\Delta \theta_{погр. сл.}$, можно определить по фотоснимку (рис. 10), считая направление скорости внешнего потока совпадающим с видимой границей пограничного слоя.

Тогда эффективное значение угла $\theta_{отр. эфф}$ будет

$$\theta_{отр. эфф} = \theta_{отр. геом} - \Delta \theta_{погр. сл}.$$

Рассчитывая второй косой скачок уплотнения по углу $\theta_{отр. эфф}$, определяют давление $p_9 = p_2$ и находят коэффициент $A_{отр}^{(2)}$.

Промежуточные данные и результаты расчета коэффициента $A_{отр}$ заносят в таблицу 5.

Оценка ошибок измерений

При выполнении лабораторной работы в результате обработки экспериментальных данных находят ряд величин: скорость ударной волны, давление, форму скачка уплотнения, углы наклона скачков уплотнения и т.д. Определение погрешности измерения этих величин по результатам однократного эксперимента осложняется тем, что большинство величин находят в результате косвенных измерений.

Оценка погрешности измерения вышеперечисленных величин может быть выполнена с учетом рекомендаций, приведенных в работе [13].

При определении погрешности измерения скорости ударной волны

$u_1 = \frac{S}{t}$ с применением высокоточных цифровых приборов можно считать, что систематическая ошибка в определении интервалов времени t с учетом характеристик пьезодатчиков [4] и систематических ошибок измерения используемых приборов не превышает 10^{-6} с. Пренебрегая ускорением ударной волны и относительной ошибкой $\frac{\Delta S}{S}$ определения базового расстояния, при $S = 0,2$ м не превышающей $0,2\%$, будем считать относительную ошибку в определении скорости ударной волны равной относительной погрешности измерения интервала времени $t(t)$, так что $\Delta u_1/u_1 \approx 10^{-6}/t$.

Давление p рассчитывается в результате косвенных измерений по формуле $p = K_{датч} \cdot K_{осц} \cdot A$, где $K_{датч}, K_{осц}$ - чувствительность датчика и осциллографа, A - амплитуда сигнала датчика давления. Пусть среднеквадратичные погрешности $\epsilon_{K_{датч}}$ и $\epsilon_{K_{осц}}$ известны. Тогда считая приближенно случайной величиной ошибку $\Delta A = \sqrt{\epsilon_A^2 + 9\epsilon_A^2}$, содержащую систематическую приборную ошибку ϵ_A и среднеквадратичную ошибку ϵ_A , найдем относительную погрешность измерения давления по формуле $\epsilon_p/p = \sqrt{\epsilon_{K_{датч}}^2/K_{датч}^2 + \epsilon_{K_{осц}}^2/K_{осц}^2 + \frac{\epsilon_A^2}{A^2}}$. Здесь ϵ_A рассчитывает по результатам серии повторных измерений амплитуды сигнала, зарегистрированного на осциллограмме.

Относительные погрешности измерения линейных и угловых величин, характеризующих картину обтекания модели сверхзвуковым потоком, оценивают сравнительно просто, применяя стандартный метод обработки серии повторных измерений того или иного параметра.

Погрешность определения коэффициента $A_{отр}$ может быть оценена как для величины, рассчитываемой по результатам косвенных измерений параметров $\Delta x_{отр}, \theta_{отр}, p_7, p_9$ согласно формуле (6). При оценке погрешности $\Delta A_{отр}$ погрешность определения величин $Re_{x_{отр}}^{1/4}$ и M_7 можно пренебречь. Оценки относительных погрешностей измеренных величин следует занести в табл. 3, табл. 4, табл. 5.

Литература

1. Х.А. Рахматуллин, С.С. Семенов, ред. Ударные трубы. ИЛ, М., 1962.
2. В.Я. Безменов, Л.Б. Беляев, П.М. Ширманов. Развитие ударных труб для аэродинамических исследований. Обзор № 365, Изд.ЦАГИ, М., 1971.
3. Л.Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. Физматгиз, М., 1978.
4. Р.Л. Петров. Измерение скорости ударной волны и определение чувствительности пьезоэлектрических датчиков давления на малой ударной трубе. Описание лабораторной работы. Ротапринт ЛПИ, 1977.
5. М.Д. Здункевич, Р.М. Севастьянов, Н.А. Змков. Материалы к расчету газодинамических установок с высокими температурами торможения. "Труды ЦАГИ", 1969, вып. 1165.
6. А. Поуп, К. Гоян. Аэродинамические трубы больших скоростей "Мир", М., 1968.
7. Т.А. Тимофеева, Д.И. Чистов. Определение толщины вытеснения турбулентного пограничного слоя в осесимметричных гиперзвуковых соплах при постоянной температуре стенки. "Труды ЦАГИ", 1972, вып. 1403.
8. Н.А. Бойков, П.С. Звездин, А.Б. Резник. Измерения давлений при быстротекающих процессах. "Энергия", М., 1970.
9. Д.Холдер, Р.Норт. Теневые методы в аэродинамике. "Мир", М., 1966.
10. О.М. Белоцерковский. Расчет обтекания осесимметричных тел с отходящей ударной волной (Расчетные формулы и таблицы поля течения). - ВЦ АН СССР, М., 1961.
11. П. Чжен. Отрывные течения. т.2, стр.21-32, "Мир", М., 1973.
12. У.Д. Хевз, Р.Ф. Пробстни. Теория гиперзвуковых течений. ИЛ, М., 1962.
13. А.Н. Зайдель. Ошибки измерений физических величин. "Наука", Л., 1974.

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Параметры течения двухатомного газа в ударной трубе
при $K_1 = K_2 = 1,4$, $a_1 = a_2$, $d_1 = d_2$

M_1	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{T_2}{T_1}$	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{u_2}{a_1}$	$\frac{a_2}{a_1}$	M_2
1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	0	1,000	0
1,1	1,560	1,245	1,065	1,169	0,1591	1,032	0,1542
1,2	2,354	1,514	1,128	1,342	0,3055	1,062	0,2878
1,3	3,453	1,805	1,191	1,516	0,4423	1,091	0,4054
1,4	4,958	2,120	1,255	1,690	0,5715	1,120	0,5101
1,5	7,004	2,459	1,320	1,862	0,6945	1,149	0,6044
1,6	9,758	2,820	1,388	2,032	0,8125	1,178	0,6897
1,7	13,45	3,205	1,459	2,198	0,9265	1,208	0,7670
1,8	18,39	3,614	1,532	2,359	1,037	1,238	0,8383
1,9	24,99	4,045	1,607	2,515	1,145	1,268	0,9028
2,0	33,71	4,500	1,688	2,667	1,250	1,299	0,9622
2,1	45,30	4,979	1,770	2,812	1,353	1,330	1,017
2,2	60,80	5,480	1,857	2,951	1,455	1,363	1,068
2,3	81,38	6,005	1,947	3,085	1,554	1,395	1,114
2,4	108,8	6,554	2,040	3,212	1,653	1,428	1,158
2,5	145,4	7,125	2,138	3,333	1,750	1,462	1,197
2,6	198,5	7,720	2,238	3,449	1,846	1,496	1,234
2,7	260,3	8,338	2,343	3,559	1,942	1,531	1,268
2,8	349,1	8,980	2,452	3,664	2,036	1,566	1,300
2,9	469,1	9,645	2,563	3,763	2,129	1,601	1,330
3,0	633,2	10,33	2,679	3,862	2,222	1,637	1,358
3,1	854,6	11,05	2,799	3,947	2,314	1,673	1,383
3,2	1166	11,78	2,922	4,031	2,406	1,709	1,408
3,3	1593	12,54	3,049	4,112	2,497	1,747	1,430
3,4	2190	13,32	3,180	4,188	2,588	1,783	1,451
3,5	3037	14,13	3,315	4,261	2,679	1,820	1,471
3,6	4242	14,96	3,453	4,330	2,768	1,858	1,490
3,7	5970	15,81	3,596	4,395	2,858	1,897	1,507
3,8	8493	16,68	3,743	4,456	2,947	1,935	1,523
3,9	12190	17,58	3,893	4,516	3,036	1,973	1,538
4,0	17740	18,50	4,047	4,571	3,125	2,012	1,553

2. Параметры течения двухатомного газа в ударной трубе
при $K_2 = K_4 = 1,4$, $a_1 = a_4$, $d_1 = d_4$.

M_1	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{T_2}{T_1}$	$\frac{P_3}{P_1}$	$\frac{a_3}{a_1}$	$\frac{ U_{ср} }{U_1}$	$\bar{x}_0 = x_0/L_4$	$\bar{t}_0 = \frac{t_0 \cdot a_1}{L_4}$
1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	-1,0	1,0
1,1	1,540	1,132	1,360	1,064	0,8843	-0,8917	1,102
1,2	2,237	1,263	1,770	1,123	0,7963	-0,7650	1,208
3,1	3,108	1,397	2,224	1,182	0,7278	-0,6193	1,320
1,4	4,167	1,536	2,713	1,239	0,6735	-0,4524	1,439
1,5	5,425	1,679	3,231	1,295	0,6296	-0,2612	1,566
1,6	6,893	1,829	3,769	1,352	0,5937	-0,0425	1,702
1,7	8,579	1,985	4,321	1,409	0,5640	0,2064	1,849
1,8	10,49	2,149	4,880	1,466	0,5391	0,4903	2,008
1,9	12,63	2,321	5,441	1,523	0,5180	0,8158	2,182
2,0	15,00	2,500	6,000	1,581	0,5000	1,186	2,371
2,1	17,61	2,687	6,551	1,639	0,4845	1,607	2,577
2,2	20,45	2,883	7,093	1,698	0,4711	2,090	2,604
2,3	23,53	3,087	7,622	1,757	0,4604	2,645	3,056
2,4	24,85	3,299	8,137	1,816	0,4491	3,277	3,333
2,5	30,40	3,520	8,636	1,876	0,4400	4,005	3,641
2,6	34,19	3,749	9,118	1,936	0,4319	4,843	3,985
2,7	38,21	3,987	9,583	1,997	0,4248	5,816	4,369
2,8	42,47	4,234	10,03	2,058	0,4184	6,925	4,799
2,9	46,95	4,508	10,45	2,123	0,4126	8,219	5,284
3,0	51,67	4,753	10,87	2,180	0,4074	9,720	5,832
3,1	55,61	5,026	11,26	2,242	0,4027	11,47	6,454
3,2	61,78	5,307	11,63	2,304	0,3984	13,52	7,164
3,3	67,16	5,597	12,00	2,365	0,3945	15,92	7,975
3,4	72,78	5,896	12,34	2,428	0,3910	18,77	8,911
3,5	78,61	6,204	12,67	2,491	0,3877	22,12	9,991
3,6	84,60	6,521	12,98	2,553	0,3848	26,12	11,25
3,7	90,92	6,846	13,28	2,618	0,3820	30,90	12,72
3,8	97,40	7,180	13,56	2,680	0,3795	36,66	14,45
3,9	104,1	7,523	13,83	2,743	0,3771	43,64	16,50
4,0	111,0	7,875	14,09	2,808	0,3750	52,14	18,96

3. Параметры течения двухатомного газа в ударной трубе
при $K_1 = K_4 = 1,4$, $a_1 = a_4$, $d_1 = d_4$.

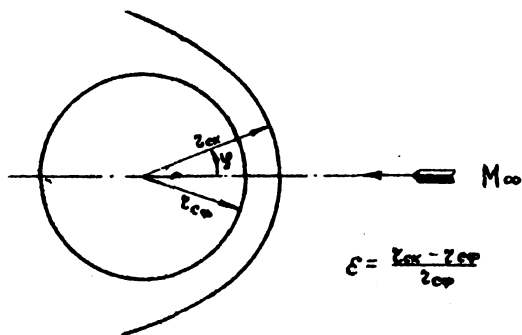
M_1	M_2	a_{34}	$L_{1, \text{отр. ст}}$	x_2/L_1	$t_{\text{раб. отстр}}$	$Re_2 = \frac{24 \cdot 10^3}{\mu} Re_3/Re_2$ воздух, $T_1 = 298 \text{ K}, \mu = \mu_{\text{в}}$	
1,0	0	1,000	1,000	0	2,000	0	1,000
1,1	0,1643	0,9681	1,323	0,2647	1,914	2,631	1,249
1,2	0,3254	0,9388	1,696	0,4350	1,855	3,685	1,537
1,3	0,4852	0,9115	2,121	0,5503	1,815	3,944	1,875
1,4	0,6452	0,8857	2,604	0,6314	1,792	3,803	2,276
1,5	0,8064	0,8611	3,150	0,6905	1,784	3,471	2,743
1,6	0,9702	0,8375	3,765	0,7346	1,790	3,063	3,301
1,7	1,137	0,8147	4,458	0,7680	1,808	2,640	3,965
1,8	1,308	0,7925	5,239	0,7951	1,838	2,237	4,745
1,9	1,485	0,7710	6,118	0,8162	1,880	1,870	5,708
2,0	1,667	0,7500	7,111	0,8333	1,934	1,546	6,845
2,1	1,855	0,7293	8,231	0,8473	2,001	1,266	8,196
2,2	2,051	0,7090	9,498	0,8591	2,080	1,027	9,815
2,3	2,256	0,6891	10,93	0,8689	2,173	0,828	11,82
2,4	2,469	0,6694	12,56	0,8771	2,282	0,662	15,04
2,5	2,692	0,6500	14,41	0,8842	2,406	0,526	17,06
2,6	2,927	0,6307	16,52	0,8903	2,549	0,414	20,55
2,7	3,174	0,6117	18,93	0,8956	2,712	0,325	24,81
2,8	3,434	0,5928	21,70	0,9003	2,898	0,253	29,96
2,9	3,709	0,5741	24,88	0,9043	3,110	0,195	36,22
3,0	4,000	0,5555	28,54	0,9080	3,353	0,150	43,86
3,1	4,309	0,5370	32,78	0,9112	3,630	0,114	53,32
3,2	4,639	0,5187	37,71	0,9160	3,947	0,0882	64,92
3,3	4,989	0,5005	43,46	0,9167	4,312	0,0647	79,32
3,4	5,366	0,4823	50,19	0,9190	4,733	0,0481	97,26
3,5	5,769	0,4642	58,11	0,9210	5,220	0,0354	119,4
3,6	6,203	0,4462	67,48	0,9230	5,788	0,0258	147,2
3,7	6,671	0,4283	78,63	0,9247	6,451	0,0186	182,5
3,8	7,179	0,4105	91,98	0,9263	7,232	0,0133	227,4
3,9	7,731	0,3927	108,0	0,9278	8,156	0,0094	284,1
4,0	8,333	0,3750	127,5	0,9290	9,258	0,0065	357,8

4. Параметры изэнтропического течения двухатомного газа,
 $\kappa = 1,4$.

M	$\frac{A}{A^*}$	$\frac{P}{P_0}$	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$\frac{T}{T_0}$	$\frac{P'}{P_0}$	$\frac{q}{P_0}$
0,0		1,000	1,000	1,000	-	0,000
0,5	1,340	0,8430	0,8652	0,9524	-	0,1475
1,0	1,000	0,5283	0,6339	0,8333	1,000	0,3698
1,5	1,176	0,2724	0,3950	0,6697	0,9298	0,4290
2,0	1,667	0,1276	0,2300	0,5556	0,7209	0,3579
3,0	4,235	2,722-2	7,623-2	35,71-2	32,83-2	17,15-2
4,0	10,72	6,586-3	2,766-2	23,81-2	13,88-2	7,376-2
5,0	25,00	1,890-3	1,1134-2	16,67-2	6,172-2	3,308-2
6,0	53,18	6,334-4	5,194-3	12,20-2	2,965-2	1,596-2
7,0	104,1	2,416-4	2,609-3	9,259-2	1,535-2	8,285-3
8,0	190,1	1,024-4	1,414-3	7,246-2	8,488-3	4,589-3
8,1	201,2	9,449-5	1,334-3	7,081-2	8,025-3	4,339-3
8,2	212,8	8,723-5	1,260-3	6,921-2	7,592-3	4,106-3
8,3	225,0	8,060-5	1,191-3	6,767-2	7,187-3	3,887-3
8,4	237,8	7,454-5	1,126-3	6,617-2	6,806-3	3,682-3
8,5	251,1	6,898-5	1,066-3	6,472-2	6,449-3	3,489-3
8,6	265,0	6,390-5	1,009-3	6,332-2	6,114-3	3,308-3
8,7	279,6	5,923-5	9,558-4	6,197-2	5,799-3	3,138-3
8,8	294,8	5,494-5	9,059-4	6,065-2	5,504-3	2,978-3
8,9	310,6	5,101-5	8,590-4	5,938-2	5,226-3	2,828-3
9,0	327,2	4,739-5	8,150-4	5,814-2	4,964-3	2,687-3
9,1	344,5	4,405-5	7,737-4	5,694-2	4,718-3	2,554-3
9,2	362,5	4,099-5	7,348-4	5,578-2	4,486-3	2,428-3
9,3	381,2	3,816-5	6,982-4	5,465-2	4,267-3	2,310-3
9,4	400,8	3,555-5	6,638-4	5,356-2	4,061-3	2,199-3
9,5	421,1	3,314-5	6,313-4	5,249-2	3,866-3	2,094-3
9,6	442,3	3,092-5	6,008-4	5,146-2	3,683-3	1,994-3
9,7	464,4	2,886-5	5,719-4	5,046-2	3,510-3	1,901-3
9,8	487,3	2,696-5	5,447-4	4,949-2	3,346-3	1,812-3
9,9	511,1	2,520-5	5,191-4	4,854-2	3,191-3	1,729-3
10,0	535,9	2,356-5	4,948-4	4,762-2	3,045-3	1,649-3

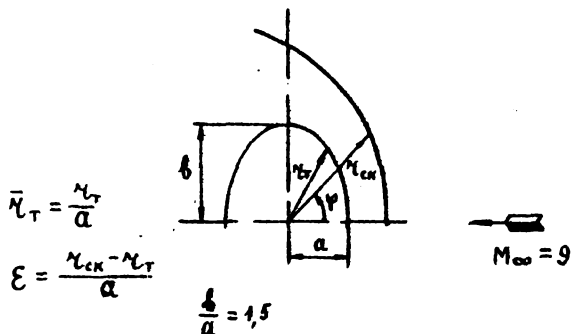
Пример: $M = 3$, $P/P_0 = 2,722 \cdot 10^{-2}$, $T/T_0 = 0,3571$.

5. Форма скачка уплотнения при обтекании сферы сверхзвуковым потоком двухатомного газа ($K = 1,4$).



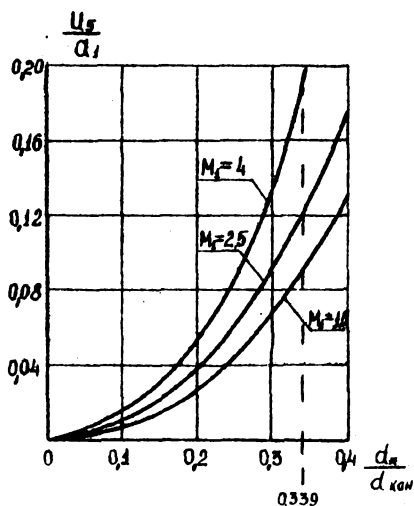
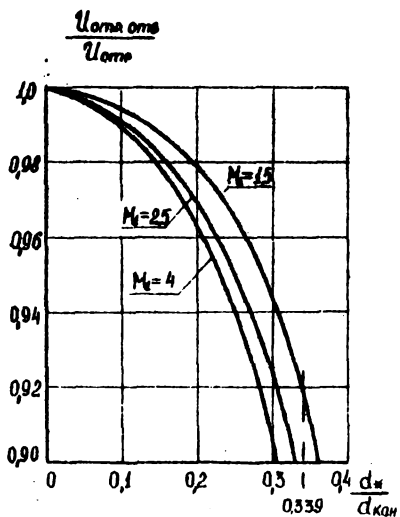
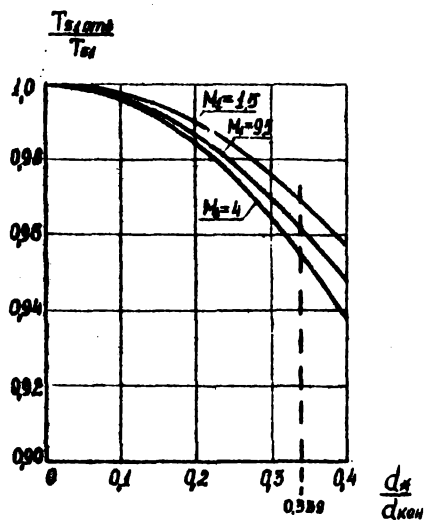
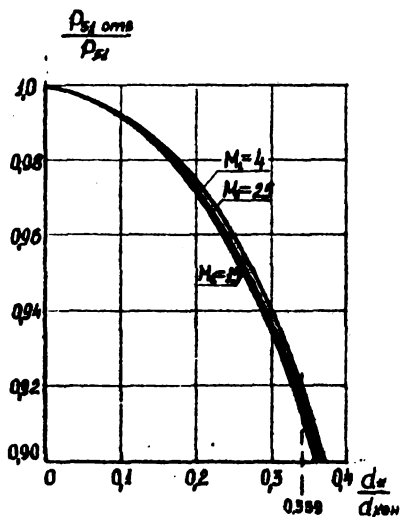
ψ	ψ	ϵ	ϵ	ψ	ψ	ϵ	ϵ
радиан	град	$M_\infty = 6$	$M_\infty = 10$	радиан	град	$M_\infty = 6$	$M_\infty = 10$
0,000	0,00	0,149	0,136	0,9375	53,70	0,256	0,232
0,0625	3,58	0,149	0,136	1,000	57,28	0,276	0,250
0,1250	7,16	0,150	0,137	0,625	60,86	0,299	0,271
0,1875	10,74	0,152	0,138	0,1250	64,44	0,324	0,294
0,2500	14,32	0,154	0,141	0,1875	68,02	0,353	0,320
0,3125	17,90	0,158	0,144	1,2500	71,60	0,385	0,349
0,3750	21,48	0,162	0,147	1,3125	75,18	0,422	0,382
0,4375	25,06	0,167	0,152	1,3750	78,76	0,463	0,419
0,5000	28,64	0,173	0,157	1,4375	82,34	0,509	0,460
0,5625	32,22	0,180	0,164	1,5000	85,92	0,562	0,506
0,6250	35,80	0,189	0,171	1,5625	89,50	0,621	0,558
0,6875	39,38	0,199	0,180	1,6250	93,08	0,688	0,616
0,7500	42,96	0,210	0,191				
0,8125	46,54	0,224	0,203				
0,8750	51,22	0,239	0,216				

6. Форма скачка уплотнения при осесимметричном обтекании эллипсоида вращения сверхзвуковым потоком двухатомного газа ($\kappa = 1,4$).

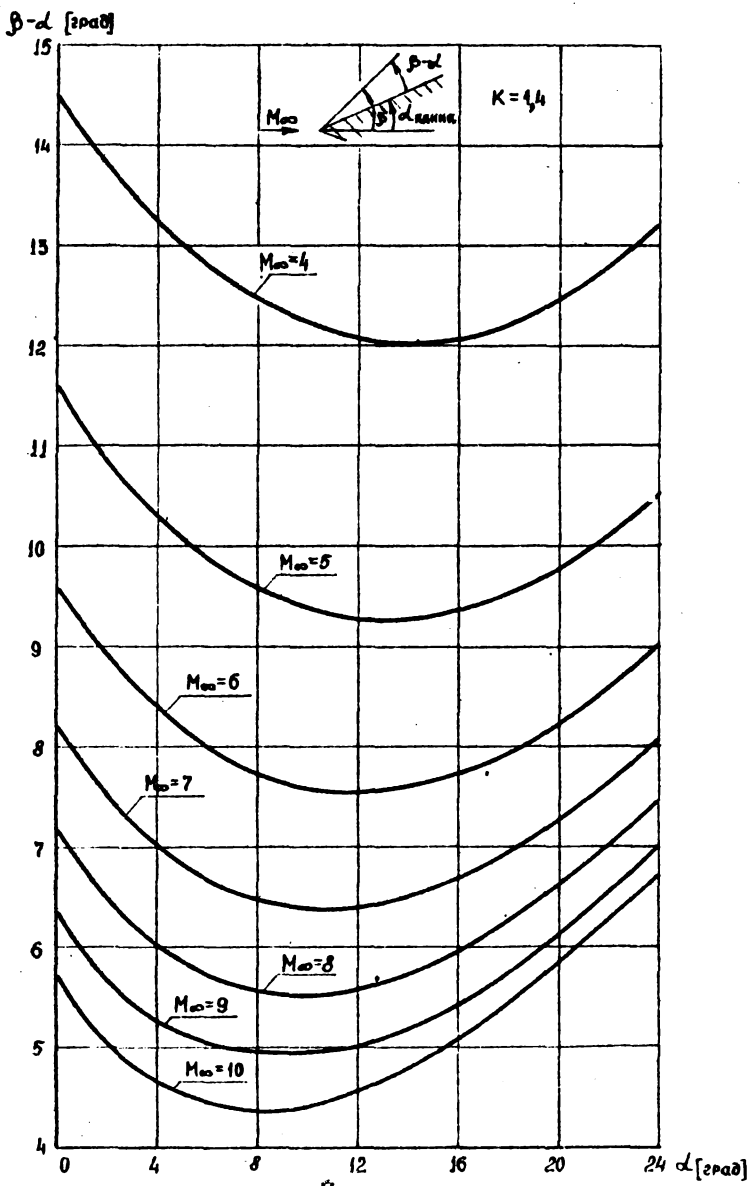


φ град	$\bar{\nu}_T$	$\nu_{ск}/\nu_T$	ε
0,00	1,000	1,283	0,283
5,00	1,002	1,282	0,283
8,71	1,006	1,282	0,284
13,18	1,015	1,281	0,285
17,56	1,026	1,281	0,289
22,07	1,042	1,281	0,294
26,50	1,060	1,281	0,298
31,09	1,083	1,280	0,304
35,69	1,110	1,278	0,308
40,32	1,141	1,274	0,313
44,97	1,176	1,274	0,322
49,59	1,215	1,274	0,332
60,00	1,309	1,227	0,297
64,97	1,335	1,230	0,312
70,00	1,401	1,235	0,330
75,00	1,440	1,251	0,361
80,00	1,472	1,270	0,397
85,00	1,493	1,300	0,447
90,00	1,500	1,343	0,515

7. Коэффициенты для расчета влияния соплового отверстия на параметры за отраженной ударной волной в двухатомном газе ($\kappa_1 = 1,4$).



8. Геометрические характеристики косо́го скачка уплотнения
 ($\kappa = 1,4$).



БЕСПЛАТНО