

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Жариков Артём Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование акустических пульсаций потока в сопле
пьезоэлектрическими датчиками**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19308

Научный руководитель:

С.О. Морозов

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

А.Г. Харламов

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Оглавление

1. Введение	4
2. Описание эксперимента	6
3. Анализ результатов измерений	9
4. Заключение	11

Аннотация

Целью работы являлось измерение акустических пульсаций потока в сопле гиперзвуковой аэродинамической трубы Транзит-М. В рамках данной работы было изучено устройство и принцип работы пьезоэлектрических датчиков давления. С использованием разработанной программы, рассчитаны пульсации потока в разных точках сопла. Также было изучено, что установка хонейкомба перед критическим сечением сопла уменьшает акустические пульсации в 1,8 раз. Изучение данной темы поможет точнее применять результаты экспериментов, проведённых в аэродинамических трубах, в условиях реального полёта.

Ключевые слова: пьезодатчик, акустические пульсации, хонейкомб, полное давление

1. Введение

В данной работе необходимо было измерять пульсации давления в сопле гиперзвуковой трубы. Для этого применяются пьезодатчики. Принцип действия этих преобразователей основан на пьезоэлектрическом эффекте, который присущ некоторым диэлектрическим кристаллам: кварцу, турмалину, титанату бария и др. Кристаллический кварц является одним из наиболее чувствительных и стабильных пьезоэлектрических материалов [1].

Такие кристаллы распиливают в определенном направлении, формируя пластины датчика. Если такую пластину подвергнуть сжатию, то на ее гранях появится заряд q . Заряд q , появляющийся под воздействием механической силы F определяется соотношением $q = kF$, где k – пьезоэлектрическая постоянная кристалла. Из-за утечки заряда с кварцевых пластин пьезодатчики не используются для измерения статических давлений.

На рис. 1 показано устройство пьезоэлектрического датчика давления с двумя кварцевыми пластинами.

Измеряемое давление действует на мембрану (1), представляющую собой дно корпуса датчика. Кварцевые пластины (2) зажаты между металлическими прокладками. Средняя прокладка (3) соединена с выводом (4), проходящим через экранированную втулку (5) из изоляционного материала. Крышка (6) соединяется с корпусом и через шарик (7) передает давление пластинам, благодаря чему измеряемое давление распределяется по поверхности кварцевых пластин более равномерно. Кварцевые пластины обычно расположены таким образом, что в измерительную схему подается отрицательный потенциал. Положительный потенциал подается на корпус датчика. Использование двух (и более) пластин повышает выходную ЭДС, поскольку выходные сигналы пластин складываются.

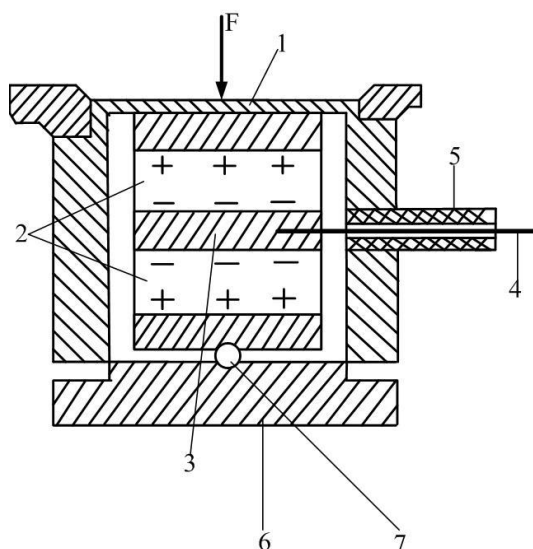


Рис. 1. Устройство пьезоэлектрического датчика давления с двумя пластинами. 1 мембрана; 2 – кварцевые пластины; 3 – средняя прокладка; 4 – вывод; 5 – экранированная втулка; 6 – крышка; 7 – шарик

В потоке газа, формирующемся в гиперзвуковых аэродинамических трубах, присутствуют различные фоновые возмущения. Эксперименты показали [2], что в таких трубах фон определяется в основном звуком, который излучает турбулентный пограничный слой, образующийся на стенках сопла рабочей части. Влияние этого трубного фона на некоторые исследуемые характеристики создает трудности при попытках использования результатов экспериментов, проведённых в аэродинамических трубах, в условиях полёта, при котором фоновые возмущения либо отсутствуют, либо имеют другие характеристики. Так же это не позволяет переносить экспериментальные данные, полученные в одной аэродинамической трубе, в другую трубу.

Проблема так же состоит в том, что данных о пульсациях потока в аэродинамических трубах явно недостаточно. В частности, мало данных для аэродинамических труб кратковременного (импульсного) действия. В тоже время такие трубы интенсивно используются в последнее время для проведения различных аэродинамических и тепловых экспериментов благодаря малым эксплуатационным расходам.

Целью работы являлось изучение акустических пульсаций в потоке гиперзвукового сопла. Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Ознакомиться с принципом нахождения полного давления за скачком.
2. Провести измерения, перемещая датчик в разные точки сопла.
3. Разработать программу расчета среднеквадратичного отклонения пульсаций и их частотных спектров.
4. Используя разработанный алгоритм и экспериментальные данные, рассчитать акустические пульсации в разных точках сопла.
5. Проанализировать спектр пульсаций.

2. Описание эксперимента

2.1. Описание установки

Гиперзвуковая аэродинамическая труба кратковременного действия Транзит-М ИТПМ СО РАН позволяет проводить аэродинамические испытания при следующих параметрах набегающего потока: числах Маха $M = 4 \dots 8$, числах Рейнольдса $Re = (2 \cdot 10^6 \dots 1 \cdot 10^7) \text{ м}^{-1}$. Основные технические характеристики аэродинамической трубы Транзит-М приведены в таблице 1. Схема установки показана на рис. 2.

Давление рабочего газа	до 200 бар
Температура газа	до 650 К
Мощность подогревателей	4 x 25 кВт
Напряжение подогревателей	380 В
Суммарный объем форкамеры	0,11 м ³
Диаметр среза сопла	0,3 м
Диаметр рабочей части	0,5 м
Диаметр диффузора	0,4 м

Диапазон чисел Маха	4...8
Диапазон чисел Рейнольдса, 1/м (по диаметру среза сопла).	2·10 ⁶ ...2·10 ⁸ (при М = 4) 7·10 ⁶ ...10 ⁷ (при М = 8)
Продолжительность рабочего режима	0,3...0,6 с
Габариты	870 x 1470 x 7600мм

Таблица 2. Технические параметры аэродинамической трубы Транзит-М

В качестве источника рабочего газа установки используется первая форкамера (3), состоящая из трех ёмкостей: основной и двух дополнительных. Суммарный объем первой форкамеры составляет 110 дм³, давление запасаемого газа до 200 бар. В двух дополнительных ёмкостях первой форкамеры установлены четыре омических подогревателя (1) суммарной мощностью 100 кВт. На выходе из первой форкамеры установлен быстродействующий пневматический затвор, который в момент пуска осуществляет подачу рабочего газа во вторую форкамеру (4) и дальше в сопло (6). Время открытия затвора составляет 5...8 мс. При помощи дросселирования во второй форкамере уменьшается полное давление потока и происходит его выравнивание перед входом в сопло.

В гиперзвуковой аэродинамической трубе Транзит-М применяются профилированные осесимметричные сопла, диаметр среза сопла составляет 300 мм. Сопла создают равномерный поток рабочего газа с числом М = 4...8, который используется для исследования сверх и гиперзвукового обтекания моделей. Модели устанавливаются в рабочую часть (7), которая представляет собой осесимметричную камеру Эйфеля. Для визуализации картины течения во время эксперимента рабочая часть оборудована оптическими окнами (8).

Через диффузор (10) рабочий газ истекает в вакуумную ёмкость (11) объемом 6,5 м³. В зависимости от полного давления в первой форкамере время режима работы трубы составляет 300...350 мс для числа Маха М = 6.

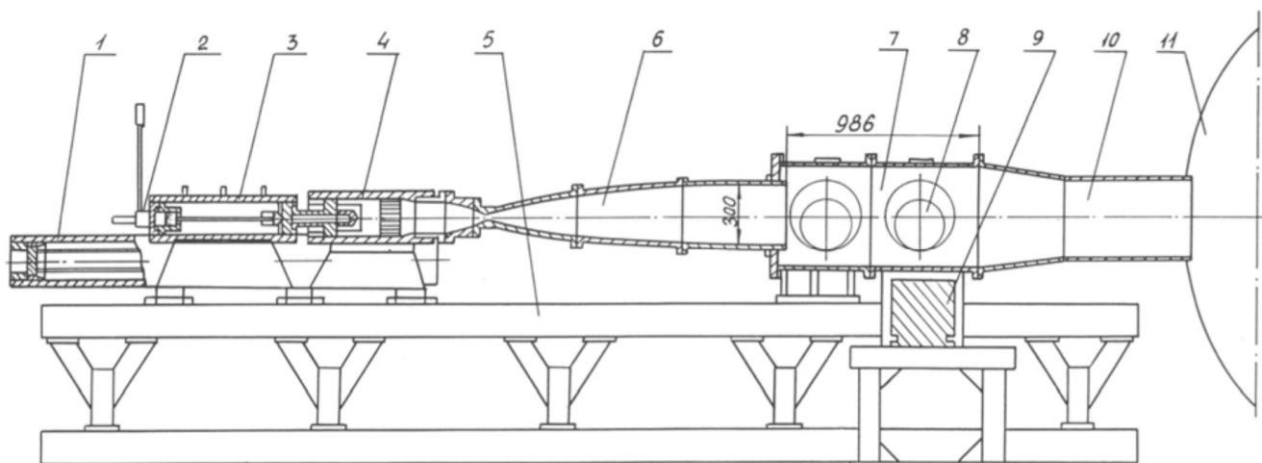


Рис. 2. Гиперзвуковая аэродинамическая труба Транзит-М. 1 – омический подогреватель; 2 – быстродействующий затвор; 3 – первая форкамера; 4 – вторая форкамера; 5 – рама; 6 – сопло; 7 – рабочая часть; 8 – оптические окна; 9 – изолированный фундамент; 10 – диффузор; 11 – вакуумная емкость.

2.2. Методика измерений

Измерения пульсаций давления производились в сопле гиперзвуковой аэродинамической трубы Транзит-М. Для проведения исследований использовалось гиперзвуковое сопло, рассчитанное на число Маха $M = 6$. Измерения пульсаций давления производились дифференциальным высокочастотным датчиком давления модели 113В38 фирмы РСВ. Также был использован датчик избыточного давления РПД-И фирмы Росма для измерения полного давления P_0 .

Регистрация сигналов двух датчиков производилась одновременно по двум каналам с частотой дискретизации 1 МГц. Время записи выбиралось достаточным для регистрации предыстории процесса и установившегося режима.

Пульсации давления измерялись за ударной волной, образованной в сверхзвуковом потоке на обтекаемом насадке с датчиком. На ударной волне происходит скачкообразное изменение давления. Перепад давления на скачке увеличивается при увеличении расстояния от критического сечения сопла, из-за изменения числа Маха потока. Для определения изменения уровня пульсаций давления вдоль сопла, измеренные пульсации давления необходимо

нормировать на значения полного давления за скачком P_0' . Для определения P_0' использовалась следующая газодинамическая формула [3]

$$\frac{P_0'}{P_0} = \left(\frac{k+1}{2kM^2 - (k-1)} \right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{(k+1)M^2}{2 + (k-1)M^2} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

где $k = 1,4$ – показатель адиабаты для воздуха, M – число Маха. Число Маха определено по расчетам течения в сопле.

Для построения спектров использовалась область длиной отчётов $N=8192$, соответствующая промежутку времени 6,5 мс. Этой длины было достаточно, чтобы получить удовлетворительное разрешение по частоте.

3. Анализ результатов измерений

3.1. Описание программы для обработки данных

Программа была написана на языке python. На вход она получала массив значений с датчиков P_0 и dP . Ниже представлен алгоритм обработки данных.

1. P_0 сглаживалось фильтром Савицкого - Голея
2. Строится график P_0 по которому находится временной интервал квазистационарного потока
3. Во временном интервале находится P_0' , среднеквадратичное значение пульсаций давления dP и вычисляется соответствующий спектр пульсаций давления
4. Производится нормировка
5. Строятся графики спектров

3.2. Обработка результатов

С помощью написанной мной программы были вычислены пульсации давления в разных точках сопла. Приведу пример сглаживания данных фильтром Савицкого – Голея. На рис. 3 изображены исходные и сглаженные данные с датчика P_0 .

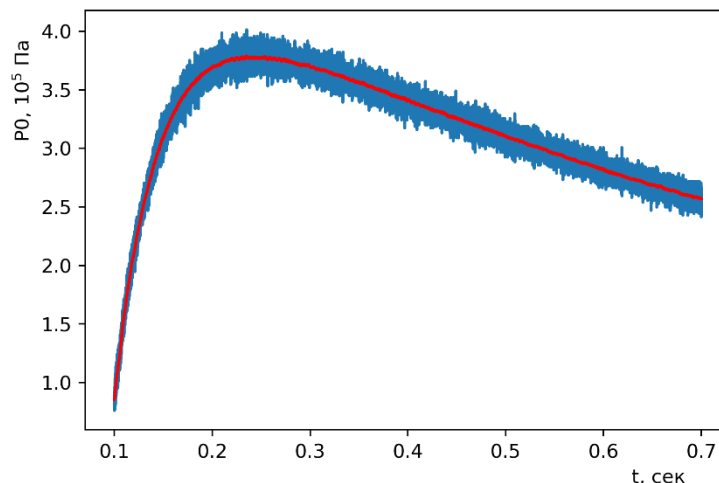


Рис. 3. График P_0 при расстоянии от критического сечения 200 мм. Красным выделены сглаженные данные.

На рис. 4 нанесены рассчитанные относительные уровни акустических пульсаций при различных расстояниях от критического сечения сопла. Как видно из рис. 4, с увеличением расстояния от критического сечения пульсации давления возрастают, но затем уменьшаются до определённого значения. При установке хонейкомба перед соплом акустические пульсации уменьшились в 1,8 раза. Значения случайных погрешностей рассчитаны с помощью коэффициентов Стьюдента со значением надёжности 0,95. Полученные значения случайных ошибок больше суммарных погрешностей приборов (погрешность датчика РСВ 113В38 равна 7 Па, класс точности датчика Росма РПД-И – 1 при $\max P_0=16$ МПа), поэтому последние были отброшены. На рис. 4 изображены только случайные погрешности.

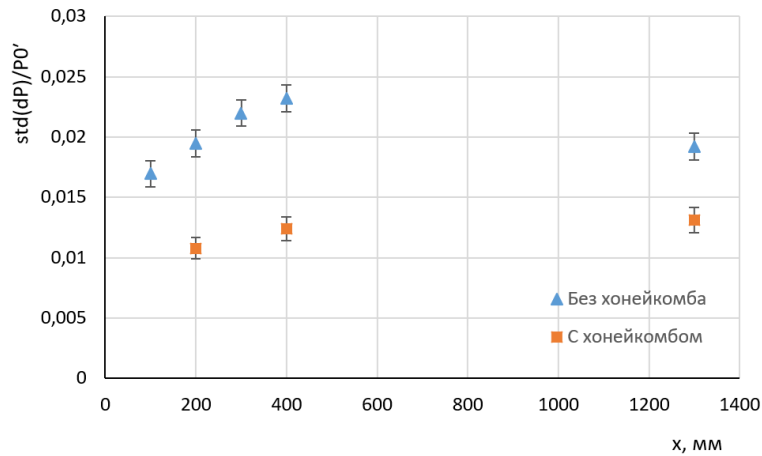


Рис. 4. Амплитуды пульсаций давления в сопле

На рис. 5 изображены спектры пульсаций квазистатического потока на расстоянии от критики 200 и 400 мм соответственно. Очевидно, что использование хонейкомба привело к уменьшению пульсаций потока на всех частотах.

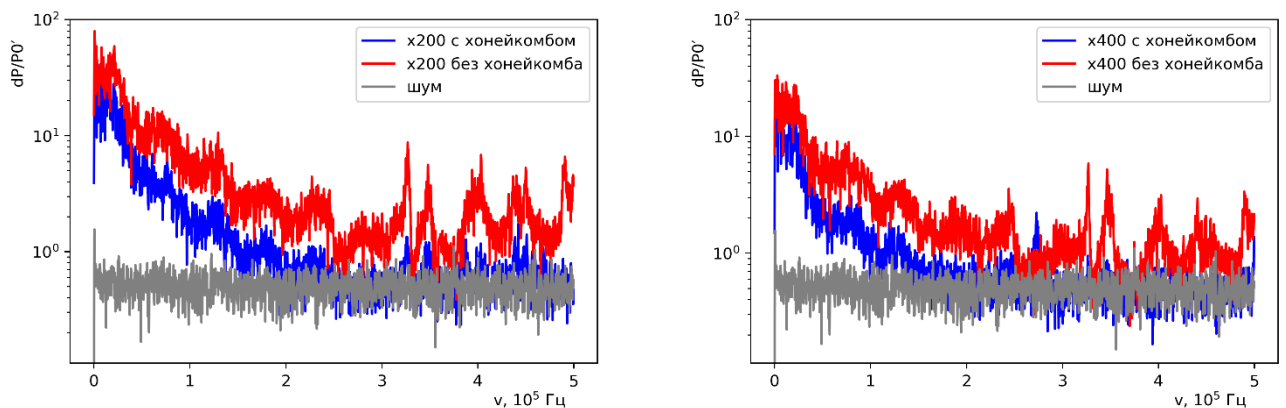


Рис. 5. Спектры пульсаций давления в точках $x = 200$ мм и $x=400$ мм

4. Заключение

В ходе данной работы был изучен принцип работы пьезодатчиков. При помощи пьезодатчиков исследованы пульсации потока в гиперзвуковом сопле аэродинамической трубы Транзит-М, рассчитанном на число Маха $M = 6$. Получена зависимость уровня пульсаций потока от расстояния от критического сечения сопла. Показано, что с увеличением расстояния от критического сечения сопла пульсации давления возрастают, но затем уменьшаются до определённого значения. Было измерено, что при установке хонейкомба перед

критическим сечением, пульсации уменьшаются в 1,8 раз. При исследовании спектрограммы пульсаций определено, что хонейкомб уменьшает пульсации на всех частотах.

Список литературы

1. Осадчий. Е.П. и др. Проектирование датчиков для измерения механических величин. –М.: Машиностроение, 1979.
2. Жигулев В.Н., Тумин А.М. Возникновение турбулентности (Динамическая теория возбуждения и развития неустойчивостей в пограничных слоях). –Новосибирск: Наука, 1987.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособие для вузов: В 10 т. Т.6. Гидродинамика. –4-е изд., стер. –М.: Наука. Физматлит, 1988. –736 с.