

УДК: 532.529
OECD: 02.03.PU

Аэроакустика промышленной аэродинамической трубы АТ-11: методика измерения инфразвуковых пульсаций давления

Цветков А.И.*

Доцент, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Интерес к исследованию аэроакустики промышленных аэродинамических труб объясняется высокими требованиями по снижению шума в открытой рабочей части и в рабочих каналах аэродинамических труб. В данной работе рассматривается методика измерения инфразвуковых пульсаций давления в аэродинамической трубе АТ-11 СПбГУ и проводится сравнение подходов к измерению таких пульсаций для труб АТ-11 и Т-103 ЦАГИ.

Ключевые слова: аэроакустика, аэродинамическая труба, инфразвуковые пульсации давления.

Aeroacoustics of industrial wind tunnel AT-11: method of measurement of infrasound pressure pulsations

*Tsvetkov A.I.**

*Associate Professor, Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov,
Saint-Petersburg, Russia*

Abstract

The interest in the study of aeroacoustics of industrial wind tunnel is explained by the high requirements for noise reduction in the open working section and in the working channels of wind tunnels. This paper considers the method of measurement of infrasound pressure pulsations in wind tunnel AT-11 (SPbSU) and compares approaches to measurement of such pulsations for AT-11 and T-103 (TsAGI).

Keywords: *aeroacoustics, wind tunnel, infrasound pressure pulsations.*

Введение

Аэродинамические трубы должны обеспечивать в рабочих частях потоки с надёжно измеряемыми газодинамическими и аэроакустическими параметрами. Требования к параметрам потоков могут быть совершенно различными и зависят от назначения аэродинамических труб. Так, трубы могут быть предназначенными для проведения аэродинамических экспериментов в потоках с низкой степенью турбулентности и минимальной неравномерностью скорости по ядру потока. Трубы могут быть предназначенными для проведения аэродинамических экспериментов в моделируемых ветровых потоках с высокой степенью турбулентности последнего, в потоках с ветровыми порывами.

*E-mail: acvetkov@yandex.ru (Цветков А.И.)

Вместе с тем, существуют проблемы, связанные с качеством потока в открытой рабочей части дозвуковых аэродинамических труб замкнутого типа, которое в большей степени определяется наличием инфразвуковых пульсаций давления в аэродинамическом тракте, а также существованием и других источников шума. Существование инфразвуковых пульсаций давления в аэродинамическом тракте трубы делает невозможным безопасную эксплуатацию аэродинамических труб и может иметь следствием разрушений узлов трубы и здания.

Исследование механизма инфразвуковых пульсаций, источников шума может способствовать поиску решений по демпфированию и управлению инфразвуковыми пульсациями, пульсациями скорости и давления в открытой рабочей части аэродинамических труб, управлению степенью турбулентности и аэроакустическими параметрами труб, внедрению этих решений в практику исследований на существующих аэродинамических трубах.

Данная работа представляет интерес в плане необходимости совершенствования и развития экспериментальной базы промышленных аэродинамических труб, в плане постановки экспериментального исследования инфразвуковых пульсаций давления в трубах для решения последующей задачи демпфирования инфразвуковых пульсаций давления. В работе, на примере введённой в 2010 - 2012 гг. в эксплуатацию аэродинамической трубы АТ-11, рассмотрена постановка экспериментального исследования инфразвуковых пульсаций давления.

1. О моделирования пульсаций в аэродинамических трубах

В аэродинамических трубах вход в диффузор делается или в виде коллектора или с дефлектором, охватывающим диффузор и выступающим навстречу соплу. Схемы контуров на АТ на входе в диффузор приведены на рисунке 1.

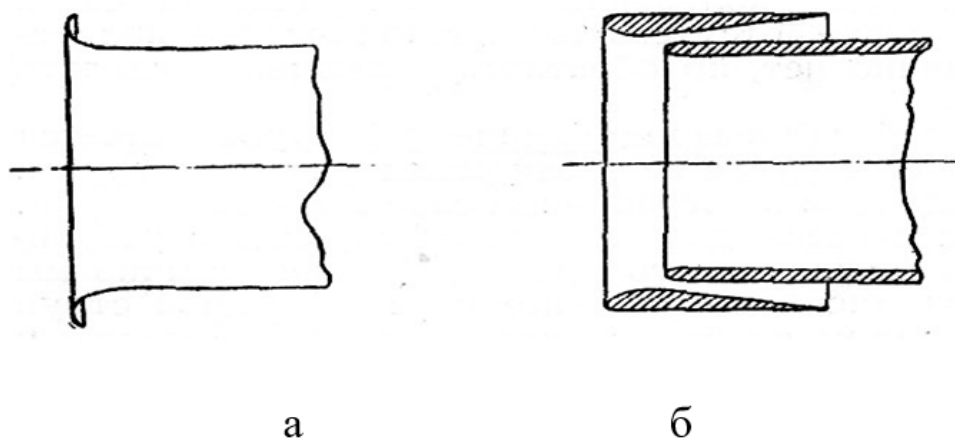


Рис. 1. Схемы контуров а) с коллектором и б) дефлектором

На рисунке 2 приведена схема, иллюстрирующая открытую рабочую часть, сопло, диффузор и дефлектор аэродинамической трубы.

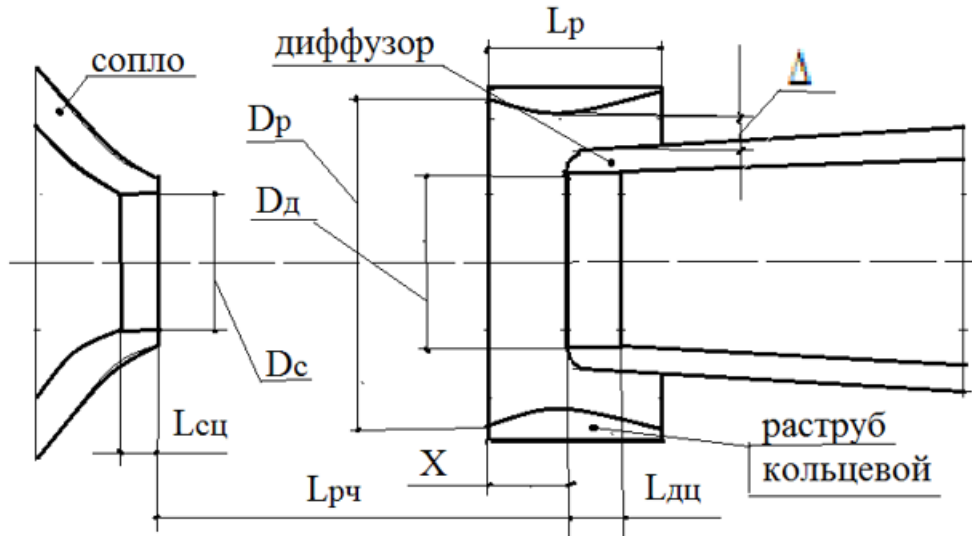


Рис. 2. Открытая рабочая часть и сопряжённые с ней устройства

Диаметр $D_д$ входного сечения диффузора, диаметр D_c выходного сечения сопла, длина открытой рабочей части $L_{рч}$, при отсутствии модели в открытой рабочей части, в соответствии с теорией турбулентных струй, [1-3], связаны между собой следующим соотношением:

$$D_д = D_c + \alpha_1 L_{рч}; \quad (1.1)$$

где α_1 - безразмерный коэффициент, учитывающий расширение струи по длине рабочей части.

Значения относительных диаметров диффузора $\bar{D}_д = D_д/D_c$ в зависимости от относительной длины рабочей части $\bar{L}_{рч} = L_{рч}/D_c$ показаны на рисунке 3.

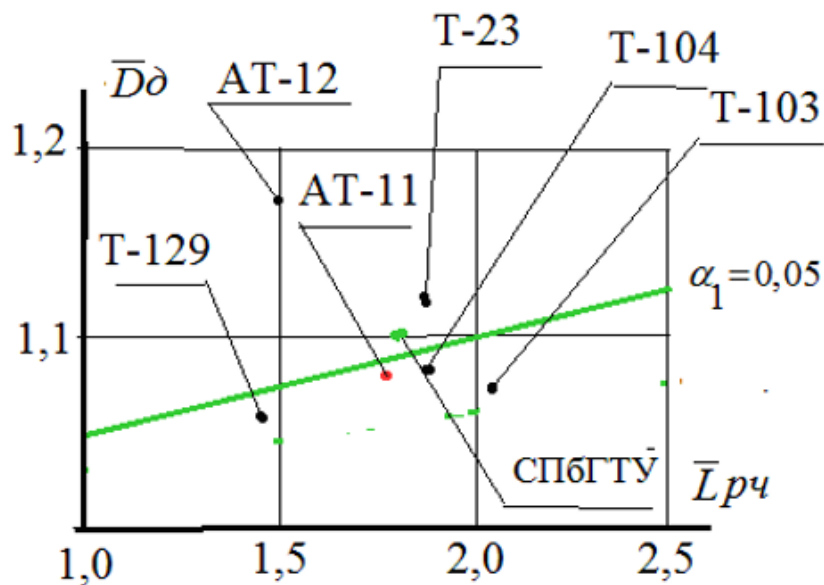


Рис. 3. Иллюстрация к определению диаметра диффузора

Диаметр D_p проходного сечения дефлектора рассчитывается по соотношению, [1]:

$$D_{\partial} = D_c + \alpha_2 \overline{L_{pc}}; \quad (1.2)$$

где $\alpha_2 = 0,37$.

Соотношение (1.2) определено в работе [1] из условия сохранения массы втекающего в аэродинамическую трубу и вытекающего из неё газа. Соотношения (1.1) и (1.2) справедливы при условии расположения входных сечений дефлектора и диффузора в одной плоскости.

Результат сравнения труб по диаметрам проходных сечений дефлекторов существующих аэродинамических труб приведен на рисунке 4.

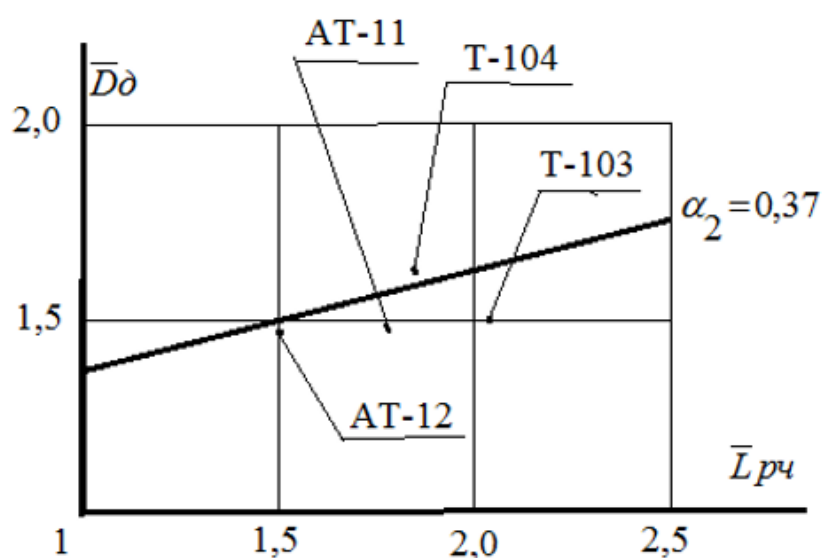


Рис. 4. Диаметры дефлекторов аэродинамических труб
(Аэродинамическая труба AT-12 - труба СПбГУ)

В отношении размеров рабочих частей и сопряжённых с ней устройств, с учётом размеров длин диффузоров, можно утверждать, что любая аэродинамическая труба представляет собой оригинальную конструкцию. Трудно в этих условиях соблюдать геометрическое подобие при моделировании пульсаций в аэродинамических трубах.

Здесь следует также отметить, что в существующих публикациях практически не приводится информация о геометрических размерах сопряженных с рабочей частью узлов.

Общепризнанным в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью считается механизм пульсаций, рассматриваемый как автоколебательный процесс, основным элементом которого является периодическое вихреобразование на границе струи в открытой рабочей части и удары вихрей о кромку диффузора, [4]. Акустические колебания в закрытой части трубы регулируют периодическое вихреобразование, тем самым колебания поддерживаются незатухающими.

Из теории подобия следует, что явление пульсаций в аэродинамических трубах можно считать подобным, если сохраняется равенство по числам Струхалья Sh и Маха M потока. Связь между числами Струхалья Sh и Маха M имеет практическое значение, если опыты проводятся на модели аэродинамической трубы в том же диапазоне

скоростей, в котором работает аэродинамическая труба. В механизме развития пульсаций существенную роль играет также вязкость, т.е. механизм пульсаций и характер явления зависят от числа Рейнольдса Re . Таким образом, при моделировании явления пульсаций необходимо рассматривать числа:

$$Sh = \frac{l}{vt}; M = \frac{v}{a}; Re = \frac{\rho vl}{\mu} = \frac{vl}{\nu}$$

здесь v - скорость потока в м/с; t - характерное время в с, например, период пульсаций T ; l - характерная длина в м, например, длина рабочей части аэродинамической трубы; a - скорость звука в м/с; ρ - плотность воздуха кг/м³; μ - коэффициент динамической вязкости в Н·м⁻²; ν - коэффициент кинематической вязкости в м²/с.

В таблице 1 приведены данные из [4] по геометрическим размерам и скорости потока аэродинамических труб Т-103 (ЦАГИ) и АТ-11. Сравнительный анализ по числам Рейнольдса Re показывает, что трубы АТ-11 и Т-103 близки друг другу.

Таблица 1

№ п/п	Труба	Сопло	Длина раб. части	Скорость потока
1	Т - 103	Эллипс 4000 x 2350, мм ²	4740 мм	10 - 100, м/с
2	АТ - 11	∅ 2250 мм	4000 мм	10 - 75, м/с

Рисунок 5 иллюстрирует сравнительные данные по числам Re , вычисленным по длине рабочей части для труб Т-103 и АТ-11. Можно полагать, что явления пульсаций в этих трубах, при близких числах Рейнольдса Re , будут идентичными. По крайней мере, появляется возможность сравнивать получаемые результаты по трубе АТ-11 с результатами работы [4] по трубе Т-103.

В диапазоне по числам Маха M от 0,08 до 0,18 и по числу Re можно ожидать подобия автоколебательных процессов в двух аэродинамических трубах: АТ-11 и Т-103. Из равенства по числам Струхала Sh следует соотношение $l_1 f_1 = l_2 f_2$, справедливое при одинаковых скоростях потока в открытой рабочей части.

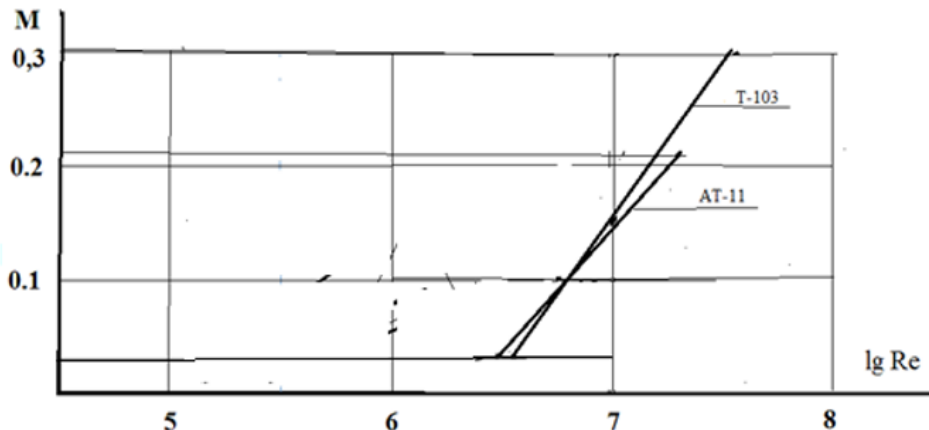


Рис. 5. Диаграмма-иллюстрация к подобию явлений в трубах Т-103 и АТ-11

Длины рабочих частей аэродинамических труб: АТ-11 – 4000 мм; Т-103 – 4740 мм. Следовательно, частота пульсаций в аэродинамической трубе АТ – 11 может превышать частоту пульсаций в Т – 103 в 1,18 раза в диапазоне по числу Маха M от 0,08 до 0,18.

Схемы аэродинамической трубы Т-103 и АТ-11 приведены на рисунках 6, 7.

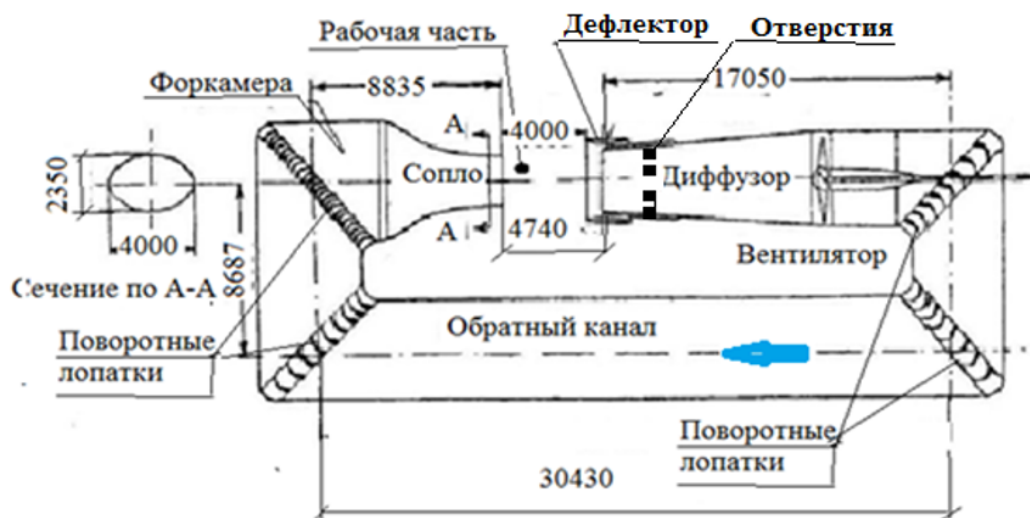


Рис. 6. Схема аэродинамической трубы Т-103 ЦАГИ, [4]

Основные элементы контура аэродинамической трубы Т-103 выделены на рисунке 7 надписями.

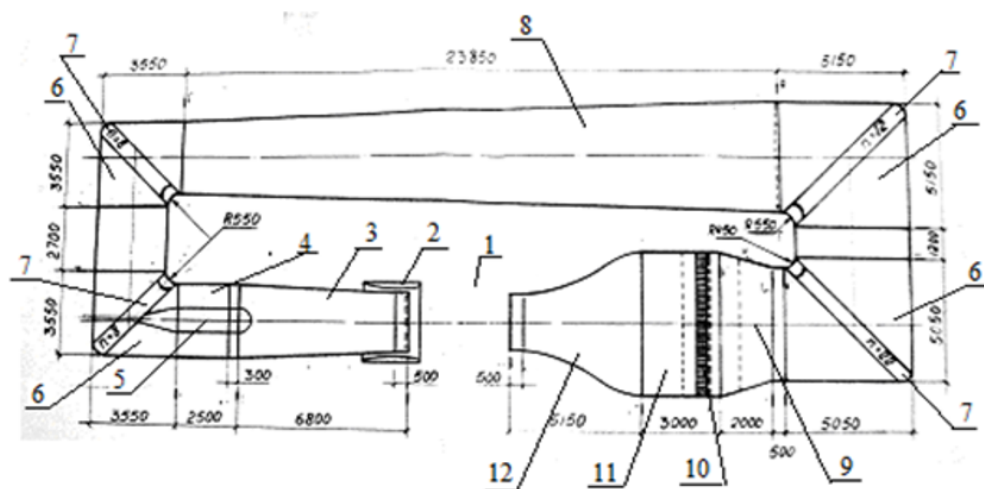


Рис. 7. Схема аэродинамической трубы АТ-11

Контур аэродинамической трубы АТ-11 состоит из следующих основных элементов: открытой рабочей части 1, дефлектора 2, диффузора 3, переходного участка 4, одноступенчатого осевого вентилятора 5, поворотных секций 6; поворотных лопаток 7 в поворотных секциях, возвратного канала 8, участка быстрого расширения потока 9, хонейкомба 10, форкамеры 11, коллектора (сопла) 12. Элементы контура трубы расположены в горизонтальной плоскости.

2. Методика измерения инфразвуковых пульсаций давления, на примерах аэродинамических труб Т-103 и АТ-11

Экспериментальные опыты в рассматриваемых аэродинамических трубах различались по своей постановке. Различие объяснимо временным лагом в развитии измерительных техник и технологий.

В работе [4] измерением пульсаций давления проводилось при установке специально разработанными грубыми микрофонами, установленными на стенке сопла (1 микрофон) и на середине слоя смешения струи (1 микрофон) в открытой рабочей части аэродинамической трубы, см. рисунок 8.

В настоящей работе для измерения пульсаций давления использовались индуктивные дифференциальные датчики давления ДМИ - 0,1. Технология измерения пульсаций давления такими датчиками, тарировка датчиков давления и устройство для тарировки датчиков изложены в работах [5, 6].

Схему установки датчиков Д1, Д2, Д3 и Д4 в аэродинамической трубе можно также видеть по рисунку 8. Блок- схема системы измерений показана на рисунке 9. Датчики Д1, Д2, Д3 и Д4 (датчики типа ДМИ - 0,1) подключены к индуктивным высокочастотным преобразователям ИВП - 2. Выходы измерительных каналов ИВП - 2 соединены с измерительно-вычислительным комплексом PULSE посредством системы сбора информации LAN - XI (аппаратура Брюль и Кьер) и с цифровым осциллографом (с 4-х лучевым осциллографом LECROY WaveSurfer 24Xs - А).

Цифровой осциллограф позволяет производить регистрацию временных реализаций сигналов датчиков по открытому или закрытому входам У-усилителей, а также может работать как 2-D плоттер, в режиме регистрации X-Y сигналов. В режиме регистрации X-Y сигналов можно получить отклики сигналов на пульсации давления в точках установки датчиков в функции скоростного напора, измеряемого с помощью трубки Пито-Прандтля и датчика Д3 и регистрируемого цифровым осциллографом.

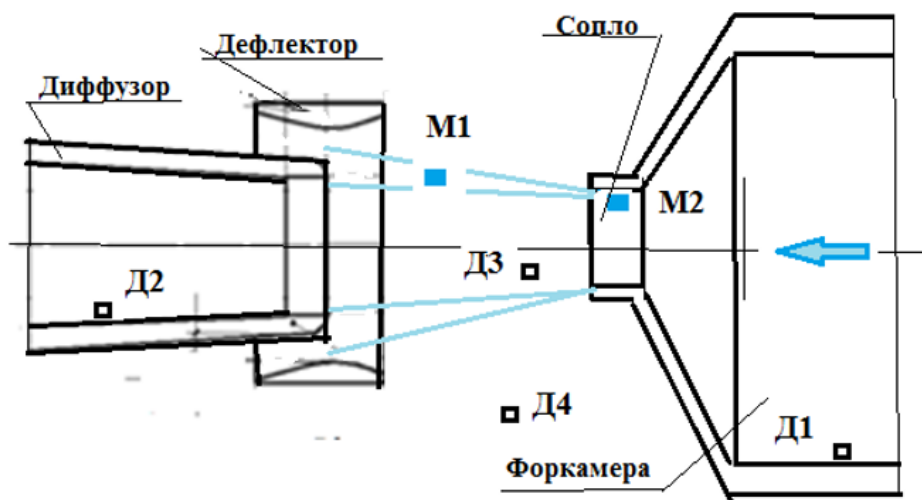


Рис. 8. Схемы расположения микрофонов на трубе Т-103, [4], и датчиков Д1, Д2, Д3, Д4 на трубе АТ - 11

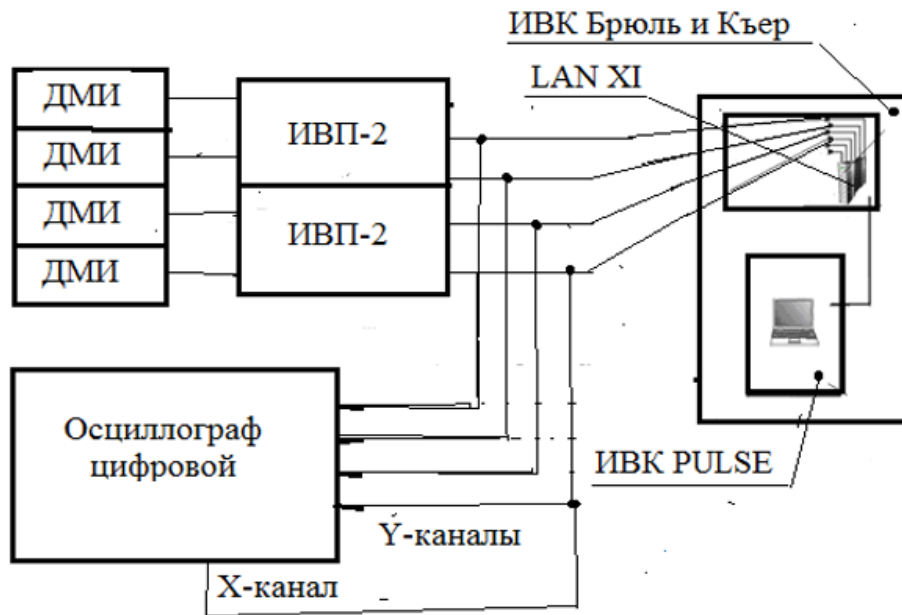


Рис. 9. Блок - схема системы измерений

В трубке Пито - Прандтля и в соединительном шланге от трубки до датчика ДЗ наблюдаются пульсации давления, вызванные вибрацией трубки Пито - Прандтля в потоке и пульсациями самого потока. Появляется необходимость в демпфировании пульсаций давления в трубке Пито -Прандтля и в соединительном шланге. Для удовлетворительного демпфирования достаточно жестко закрепить трубку Пито - Прандтля к конструкции аэродинамической трубы и выполнить длинным соединительный шланг от трубки до датчика ДЗ.

Организованные таким образом измерения позволяют при исследовании пульсаций давления в аэродинамической трубе АТ-11 определить длину соединительного шланга от трубки Пито - Прандтля до датчика ДЗ (длина ~ 6 м).

Влияние длины соединительного шланга от трубы Пито - Прандтля до датчика ДЗ иллюстрируется рисунке 10.

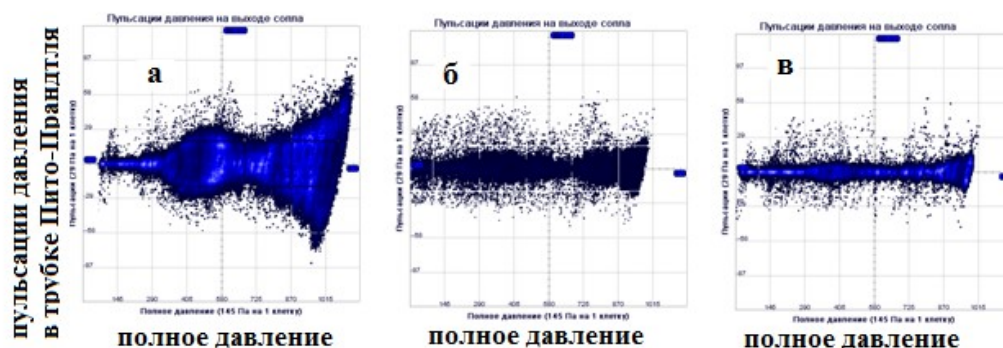


Рис. 10. Пульсации давления в трубке Пито - Прандтля.

Длина трубки Пито - Пандтля - 1м; длина соединительных шлангов: а) 1м; б) 4м; в) 6м

Ось X на рисунке 10 – скоростной напор или полное давление на оси потока, регистрируемое по открытому входу X - усилителя цифрового осциллографа. Цена деления по оси X - 145 Па. Ось Y на рисунке 10 – пульсации давления в соединительном шланге, регистрируемые датчиком и передаваемые на закрытый вход Y-усилителя

(регистрируется динамическая составляющая пульсаций). Цена деления по оси Y – 29 Па.

Проверка правильности точек размещения датчиков в диффузоре и в форкамере иллюстрируется следующим рисунком, см. рисунок 11.

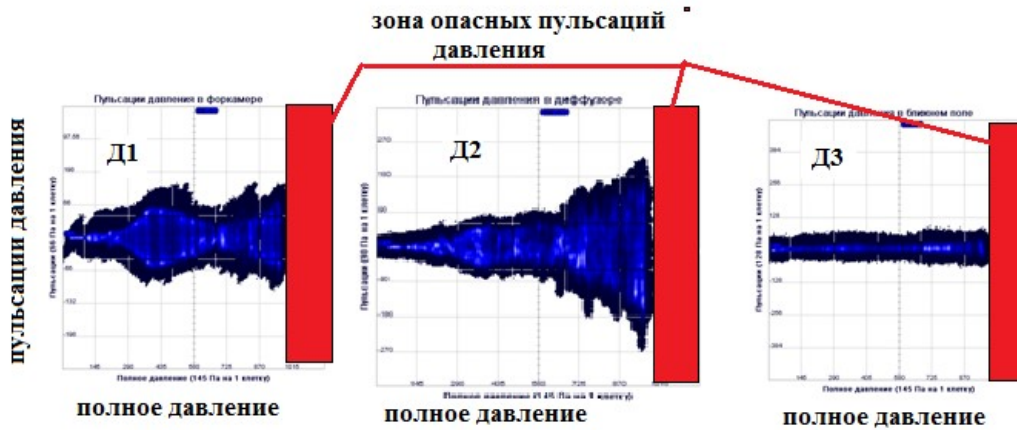


Рис. 11. Пульсации статического давления в форкамере (D1), в диффузоре(D2) и в ближнем поле (D3)

На рисунке 11 ось X – скоростной напор в потоке на выходе сопла; ось Y – динамические пульсации статического давления в точках установки датчиков. Как видно из представленных картин, в диффузоре и в форкамере, начиная с малых скоростей потока на выходе сопла, развивается в закрытом канале аэродинамической трубы автоколебательный процесс. О каких-либо характерных точках или зонах (режимах) в этом автоколебательном процессе по этим снимкам говорить не приходится. Процесс живет во всем диапазоне скоростей. Зона опасных пульсаций давления начинается с 420 об/мин вала вентилятора аэродинамической трубы.

В ближнем поле потока вне открытой рабочей части аэродинамической трубы отсутствуют интенсивные пульсации давления.

На рисунке 12 приведены спектрограммы пульсаций в диффузоре (слева) и форкамере (справа) АТ-11 для одного из промежуточных результатов при исследовании инфразвуковых пульсаций давления.

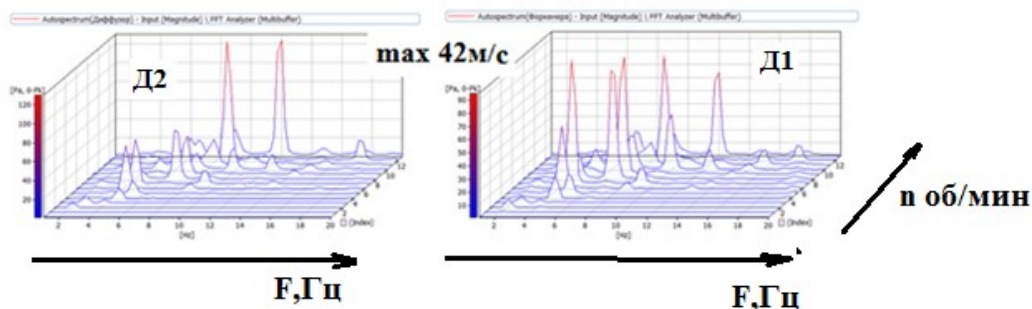


Рис. 12. Пульсации давления в диффузоре и форкамере. Демпфирующие отверстия отсутствуют; вылет дефлектора $l/D_c = 0,1$

На рисунке 13 показаны фотография датчика давления ДМИ 0,1 и заделка датчика в ламель из дерева при установке ламели на стенках форкамеры и диффузора.

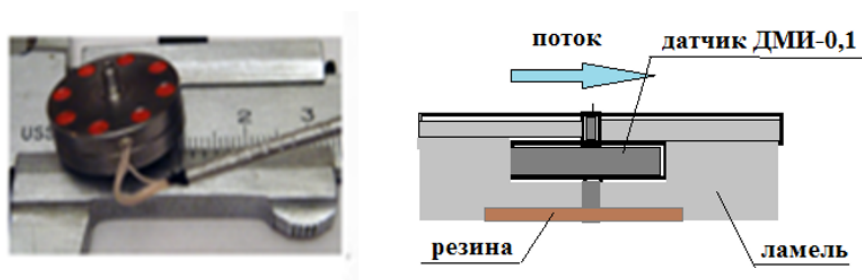


Рис. 13. Фотография датчика и заделка датчика в ламель

3. Достигнутые результаты по демпфированию инфразвуковых пульсаций давления в аэродинамических трубах Т-103 ЦАГИ и АТ-11 СПбГУ

Исследованию в дозвуковых аэродинамических трубах ЦАГИ инфразвуковых пульсаций давления и поиску устройств для их демпфирования посвящена работа [4]. По трубе Т-103 достигнуты следующие результаты:

1. Ослабление возмущений, создаваемых ударами вихрей о входную кромку диффузора достигается размещением у входа в диффузор дефлектора и выполнением сквозных отверстий в стенке диффузора;

2. Ослабление возмущений достигается размещением препятствий для периодического образования кольцевых вихрей на границе свободной струи, в частности, размещением демпфирующих пластин у кромки сопла.

Достигнутые результаты по демпфированию инфразвуковых пульсаций давления в аэродинамических трубах Т-103 и АТ-11 сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Демпфирующие устройства	Т-103	АТ-11
Дефлектор	вылет дефлектора по отношению к входному сечению диффузора не указан; $D_c = 2350$ - одна из осей эллипса	вылет дефлектора по отношению к входному сечению диффузора $-0,3D_c$; $D_c = 2250$.
Демпфирующие пластины	установлены трапецевидные пластины за выходным сечением сопла	установлены клиновидные пластины в выходном сечении сопла
Демпфирующие отверстия	1. суммарная площадь отверстий S_{Σ} до $0,6S$ (S - площадь эллипсовидного сопла); 4 ряда отверстий, отверстия м. быть защиты брезентом 2. расстояние от входа в диффузор до отверстий: ряды отверстий расположены в пределах по L_d от $0,55D_c$ до $0,9D_c$, L_d - длина диффузора	1. суммарная площадь отверстий $S_{\Sigma} = 0,77S$; 3-ряда отверстий зашитых тонкой резиной; 2. расстояние от входа в диффузор до отверстий: 1-ый ряд - $1/3L_d$, (S_1 до $0,52S$) 2-ой ряд - $2/3L_d$, (S_2 до $0,1S$) 3-ий ряд - вблизи лопастей вентилятора, (S_3 до $0,15S$)

Фотографии, приведенные на рисунке 14 с видом на сопло и диффузор аэродинамической трубы Т-103, дают представление о демпфирующих устройствах.

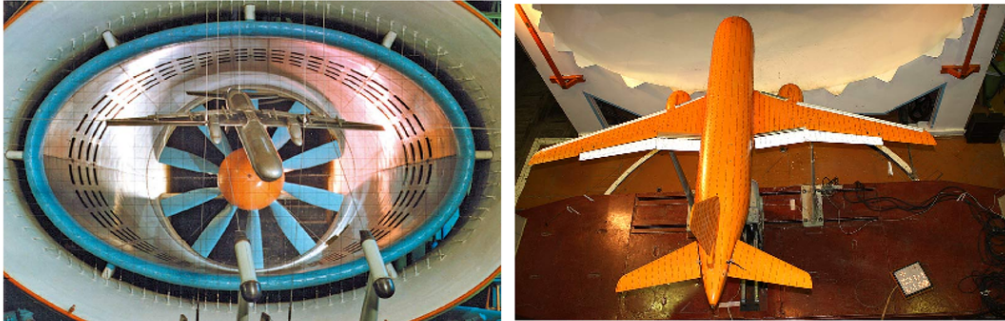


Рис. 14. Виды на диффузор и сопло аэродинамической трубы Т-103.

На рисунке 15 представлена схема исполнения открытой рабочей части аэродинамической трубы АТ-11, показывающая расположение выполненных по результатам экспериментальных исследований инфразвуковых пульсаций давления демпфирующих устройств.

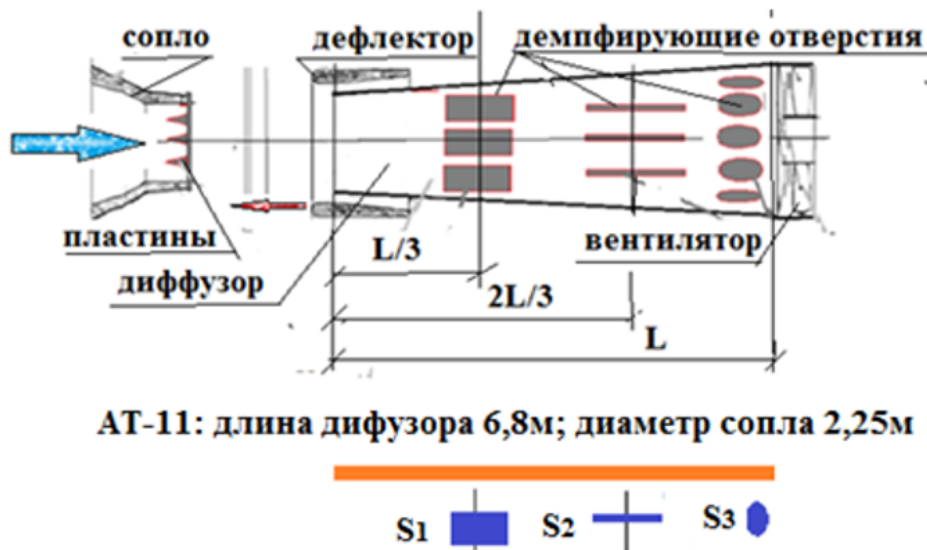


Рис. 15. Схема исполнения демпфирующих отверстий на трубе АТ-11

На рисунке 16 приведены спектрограммы пульсаций в диффузоре и форкамере для варианта АТ с исполнением 1-ого, 2-ого и 3-его рядов демпфирующих отверстий ($S1+S3+S2$) в диффузоре при вылете дефлектора в сторону сопла $1/D_c = 0,29$ и демпфирующими пластинами на выходе сопла. Достижимая скорость потока превысила 63 м/с. Дальнейшие эксперименты по снижению пульсаций давления на данном этапе были признаны нецелесообразными, поскольку пульсации давления составили величину, сравнимую с чувствительностью датчиков давления ДМИ - 0,1. Сравнение результатов измерения пульсаций давления в трубе Т-103 ЦАГИ и в АТ-11 показано на рисунке 17.

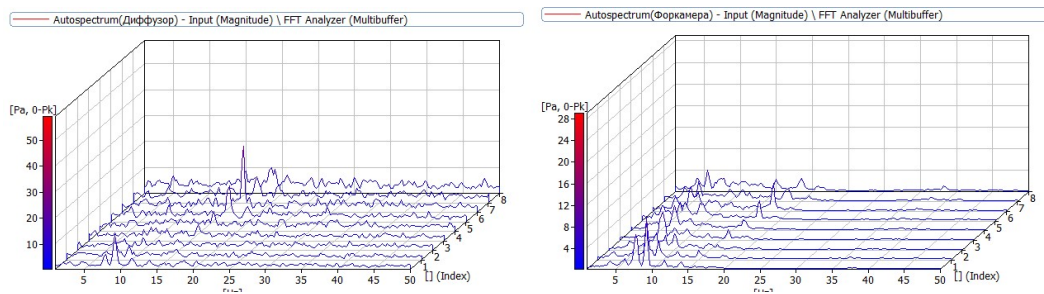


Рис. 16. Пульсации давления в диффузоре и форкамере. Демпфирующие отверстия: S1+S3+S2
+клинья в сопле; вылет дефлектора $l_{\partial} = 0,29$

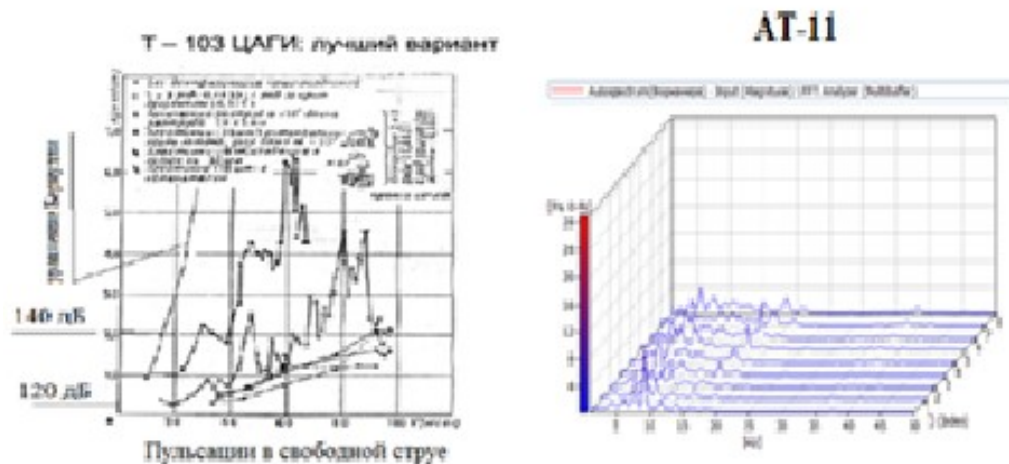


Рис. 17. Пульсации давления в трубах Т-103 и АТ-11: демпфирование отверстиями в диффузоре, клиньями в сопле и дефлектором

Заключение

Новая методика измерений **инфразвуковых пульсаций** давления в аэродинамической трубе заключается в том, что регистрация пульсаций давления производится в форкамере, в диффузоре, в открытой рабочей части и в ближнем поле потока индуктивными малогабаритными дифференциальными датчиками давления типа ДМИ-0,1, работающими в комплекте с индуктивными вторичными преобразователями давления. Датчики имеют амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) от 0 до 5 кГц и позволяют проводить измерения давления в диапазоне инфразвуковых частот.

В обсуждаемом варианте **новой методики** существовала необходимость в проверке правильности установки датчиков. Проверка заключается в том, что не оказались ли точки размещения датчиков в диффузоре и в форкамере в узле или в пучности акустической волны в закрытом канале аэродинамической трубы. Такая проверка легко выполняется по новой методике в процессе проведения измерений.

Новая методика измерения **инфразвуковых пульсаций** давления потребовала и новых подходов к метрологическому обеспечению систем измерения, что было обеспечено разработкой устройства для тарировки датчиков акустических пульсаций давления. В дальнейшем, предполагается публикация материалов по демпфированию

инфразвуковых пульсаций в диапазоне до 75 м/с по скорости потока в открытой рабочей части аэродинамической трубы АТ-11.

По результатам исследований намечается новый подход к проектированию дозвуковых аэродинамических труб для акустических исследований.

(75 м/с - ограничение по скорости потока обусловлено работой привода постоянного тока).

Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. М. – Л., Гостехтеоретиздат, 1948. 288с.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. - Книга по требованию. 2012 - 466 с.
3. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. Изд. 3-е, доп. исправл., Изд-во Машиностроение (Ленингр. отд-ние). 1974. 480 с.
4. Стрелков С.П., Бендриков Г.А., Смирнов Н.А. Пульсации в аэродинамических трубах и способы демпфирования их.- Тр. ЦАГИ, 1946, в.593, 56с.
5. Цветков А.И., Щепанюк Б.А. Аэродинамическая труба АТ-11 СПбГУ: Измерение дифференциальных быстропеременных давлений. Журнал „Молодой учёный” №6, 04.2016, с.340 - 346.
6. Цветков А.И., Леонов Г.А., Щепанюк Б.А. Устройство для динамической тарировки датчиков акустических пульсаций давления. Евразийский патент № 033337. Зарег. в Евразийской патентной организации, Евразийское патентное ведомство. 30.09.2019 г.

References

1. Abramovich G.N. Turbulent free jets of liquids and gases. M. - L., Gostekhtheoretisdat, 1948. 288 pages.
2. Idelchik I.E. Guide to Hydraulic Resistances. M. - Book on demand. 2012 - 466 p.
3. Poch I.L. Aerodynamic experiment in mechanical engineering. 3rd prod., rev., Mechanical Engineering. 1974. 480 pages.
4. Strelkov S.P., Bendrikov G.A., Smyrnov N.A. Pulsations in wind tunnels and methods of damping. TsAGI, 1946, № 593, 56 p.
5. Tsvetkov A.I., Schepanyuk B.A. Wind tunnel AT-11 SPbSU: Measurement of differential fast-change pressures. Journal Young Scientist, No. 6, 04.2016, p.340 - 346.
6. Tsvetkov A.I., Leonov G.A., Schepanyuk B.A. Device for dynamic calibration of sensors of acoustic pressure pulsations. Eurasian Patent No. 033337. Reg. in the Eurasian patent organization, Eurasian patent office. 30.09.2019.