УДК 534-13 ОЕСD 01.03.AA

Обзор материалов исследования аэроакустических параметров в дозвуковых аэродинамических трубах

Цветков А.И.¹, Ефремов А.В.²

¹Кандидат технических наук, доцент кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника», ²Аспирант кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника», ^{1,2}Балтийский государственный технический университет «BOEHMEX» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1

Аннотация

В работе представлен обзор экспериментальных исследований параметров пульсаций воздушного потока в дозвуковых аэродинамических трубах замкнутого типа, в моделях этих труб и в аэродинамических трубах малых размеров. Анализу подвергались результаты исследований пульсаций давления и скорости инфразвуковой и низкой частоты. При этом рассматривалось также влияние элементов конструкций внутреннего канала аэродинамических труб на акустические параметры потока. Анализ существующих конструкций и схем промышленных дозвуковых аэродинамических труб, мер по снижению инфразвуковых и низкочастотных пульсаций потока позволяет успешно модернизировать и создавать отвечающую перспективным требованиям научно-экспериментальную базу проектируемых и модернизируемых аэродинамических труб и обеспечить проведение исследований в интересах создания высокоэффективной и конкурентоспособной продукции.

Ключевые слова: аэроакустика, аэродинамическая труба, пульсации, спектральные характеристики, эксперименты.

Review of the research data for the study of aeroacoustic parameters in subsonic wind tunnels

Tsvetkov A.I.¹, Efremov A.V.²

¹Ph.D. in Engineering Science, Senior Lecturer of the 'Plasma and Gas Dynamics and Heat Engineering' Department,

²Postgraduate student of the 'Plasma and Gas Dynamics and Heat Engineering' Department,

^{1,2}Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F.Ustinov, 1 1st Krasnoarmeyskaya street, Saint-Petersburg

Abstract

The paper presents a review of experimental studies of the air flow pulsation parameters in the subsonic wind tunnels of closed type, in the models of these tunnels and small-sized wind tunnels. The findings of the research on pressure and velocity infrasonic and low-frequency pulsations were analyzed. In addition to the above, the influence of structural elements of the wind tunnel inner channel on the acoustic parameters of the flow was also considered. Analysis of the existing industrial subsonic wind tunnel designs and schemes, measures to reduce infrasonic and low-frequency pulsations of the flow allows to successfully upgrade and create a promising scientific and experimental base of designed and upgraded wind tunnels and facilitate research in response to the need for creating highly efficient and competitive products.

Key words: aeroacoustics, wind tunnel, pulsations, spectral characteristics, experiments.

Введение

Возрастающие требования к испытаниям привели к строительству больших дозвуковых аэродинамических труб с превосходным качеством потока, таких как труба DNW в Европе. Но эксплуатационные расходы таких больших аэродинамических труб настолько высоки, что главная часть испытательных работ должна проводиться в меньших и более старых комплексах аэродинамических труб.

При этом часто сталкиваются с проблемой, что качество потока в меньших по размеру и более старых трубах не отвечает современным требованиям к проведению испытаний в аэродинамических трубах. Следовательно, для испытаний с оптимальным качеством потока требуется улучшить качество потока таких аэродинамических труб.

Особенности течения в трубах с открытой рабочей частью заключаются в наличии в потоке значительных инфразвуковых (в промышленных трубах) и низкочастотных пульсаций давления и скорости, что приводит к не поддающимся анализу и расчёту погрешностям измерения параметров потока и делает, при больших размерах труб, невозможным эксплуатацию аэродинамических труб из-за вибраций элементов конструкций труб и здания, иногда вплоть до их разрушения. Качество потока в аэродинамических трубах при наличии таких пульсаций ставит под сомнение целесообразность проведения в них аэродинамических экспериментов. Требуются разработка методов и способов демпфирования инфразвуковых и низкочастотных пульсаций давления и, в дальнейшем, разработка и совершенствование конструктивных узлов аэродинамического тракта трубы как меры по снижению интенсивности турбулентности потока в открытой рабочей части.

1. Пульсации в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью и пассивные методы их демпфирования

Работы по исследованию пульсаций потока в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью и способам их демпфирования велись в ЦАГИ в предвоенные и военные годы. Основные результаты исследования кратко изложены в Трудах ЦАГИ за №593 за 1946 г. [1]. Данная публикация по происшествию времени стала библиографической редкостью и сохранилась к настоящему времени в ЦАГИ в единственном экземпляре.

Выбранные решения по способам (пассивным способам) демпфирования пульсаций и устройствам для реализации способов позволили значительно уменьшить пульсации в диапазоне скоростей потока до 40 м/с, но не помогли демпфировать и уничтожить пульсации при более высоких скоростях потока в открытой рабочей части аэродинамических труб.

Работы и исследования пульсаций потока продолжались и в последующие годы, что отмечено публикациями [2, 3, 4]. В исследованиях наметился и активный способ (акустический способ) подавления пульсаций давления.

Обратимся к работе [1]. В ней механизм пульсаций давления в аэродинамической трубе рассматривается как автоколебательный процесс, основным элементом которого является периодическое вихреобразование на границе струи в открытой рабочей части и удары вихрей о кромку диффузора. Акустические колебания в закрытой части трубы регулируют периодическое вихреобразование, тем самым колебания поддерживаются незатухающими.

Из этой картины намечены и пути устранения автоколебаний:

1. Ослабление возмущений, создаваемых ударами вихрей в закрытых участках трубы; здесь необходимо размещать у входа в диффузор устройства (дефлектор или коллектор) или выполнить сквозные отверстия в стенке диффузора; 2. Создание препятствий периодическому образованию кольцевых вихрей на границе свободной струи; здесь необходимо устанавливать специальные устройства у кромки сопла;

3. Внесение большого затухания в среду, совершающую колебания; здесь необходимы устройства в закрытых участках трубы.

Мероприятия, относящиеся к первой группе, были изучены в первую очередь. Оказалось, что этих мер недостаточно для полного устранения пульсаций. Мероприятия по второму пути приводят к нежелательному вмешательству в пограничный слой струи. Третий путь приводит к неудовлетворительным результатам, поскольку необходимо коренным образом менять конструкцию аэродинамической трубы.

В таблице 1 приведены параметры аэродинамических труб ЦАГИ, на которых решалась задача демпфирования пульсаций давления [1]. В 3, 4 и 5 столбцах указаны диаметр сопла, длина открытой рабочей части и достигнутая безопасная скорость потока в открытой рабочей части. В столбцах 6 и 7 отмечены устройства (дефлектор или коллектор) на входе в диффузор аэродинамической трубы. В столбцах 8 и 9 отмечается наличие демпфирующих отверстий в диффузоре и демпфирующих пластин у кромки сопла.

На рисунках 1-4 показаны схемы аэродинамических труб, на которых проводились экспериментальные опыты.

Здесь важно отметить, что схемы аэродинамических труб к настоящему времени могли быть модернизированными, особенно трубы малых размеров.

Таблица 1

N п/п	Труба	D_c , MM	L^{pq}	ν	Раструб		Демпф. устройства		Литра
					Деф.	Колл.	Отв.	Плас.	ј лит-ра
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	T-4	600	800	40		•	•	•	$[1]^1$
2	T-5	2250	3150	55	•		•	•	[5]
3	T-23	500	650	50	•				[1]
4	T-102	2330	4000	55		•			[1]
5	T-103	2350	4740	80	•				[1]

Параметры аэродинамических труб ЦАГИ

Экспериментальные опыты в аэродинамических трубах проводились с измерением пульсаций давления при установке специально разработанных грубых микрофонов на стенке сопла (1 микрофон) и на середине слоя смешения струи (1 микрофон) в открытой рабочей части аэродинамической трубы [1].

В [1] приведены основные выводы, сделанные авторами (Баулин К.К., Астабатян С.Г., Крашенинников Ф.Н.), и они сводятся к следующему:

1. Пластинки, установленные в потоке на выходе из сопла (4 шт., высотой 120 мм и шириной 60 мм) уничтожают пульсации в трубе Т-5, но недопустимо искажают однородность поля в рабочей части.

2. Демпфирующие отверстия в диффузоре ослабляют пульсации и делают вполне возможной эксплуатацию трубы T-5; величина и расположение отверстий следующие:

• для Т-4 (модель Т-5) – два ряда отверстий на расстоянии $0,68D_c$ и $0,91D_c$ с площадью 0,16S (S – площадь выходного сечения сопла);

• для Т-5 два ряда отверстий на расстояни
и $0,56 D_c$ и $0,79 D_c$ с площадью0,17 S

выходного сечения сопла, причём первый ряд в два раза больше по площади и числу отверстий второго.



Рис. 1. Схема аэродинамической трубы Т-4 [1]



Рис. 2. Схема аэродинамической трубы Т-5 [5]



Рис. 3. Схема аэродинамической трубы T-23 [1]



Рис. 4. Схема аэродинамической трубы Т-102 [1]



Рис. 5. Схема аэродинамической трубы Т-103 [1]

1.1. Устройства на входе в диффузор

В [1] изучалось действие дефлектора на пульсации потока в аэродинамической трубе. Устройство дефлекторов считается полезным для демпфирования пульсаций, но недостаточным. Вместе с тем, остаётся неопределённость в схеме аэродинамической трубы расположение дефлектора по отношению к входному сечению диффузора, т.е. смещением дефлектора навстречу потоку. В дальнейшем, при анализе потока в аэродинамических трубах с рабочей камерой, более подробно рассмотрено влияние дефлектора и коллектора на пульсации давления в канале аэродинамической трубы.

1.2. Отверстия в диффузоре

Отверстия в диффузоре применяются почти во всех аэродинамических трубах с открытой рабочей частью. В диффузоре, на некотором расстоянии от его входного сечения и до сечения с вентилятором устраивают несколько рядов отверстий. С точки зрения анализа колебаний местоположение отверстий в диффузоре выбрано до известной степени случайно. О демпфирующем действии отверстий в [1] сделаны следующие заключения:

1. Отверстия уничтожают отдельные режимы автоколебаний, расширяют области между режимами, ослабляют интенсивность колебаний, но не уничтожают автоколебания во всём интервале скоростей.

2. Оптимальное значение параметров отверстий для каждой трубы определяется опытным путём, и эти данные приведены в таблице 2.

Таблица 2

Оптимальные значения параметров демпфирующих отверстий

$N_{\rm P}\pi/\pi$	Труба	Площадь отверстий	Расстояние до отверстий
1	T-4	0,16 S	$0,68 \ D_c$ - $0,91 \ D_c$
2	T-5	0,17 S	$0,56 \ D_c$ - 0,79 D_c
3	T-23	$0,52~\mathrm{S}$	$0,58 \ D_c$ - 1,04 D_c
4	T-102	0,36 S - 0,47 S	0,58 D_c - 0,77 D_c
5	T-103	0,44 S	$0,57 \ D_c$ - 0,78 D_c

1.3. Устройства, уничтожающие регулярное вихреобразование на свободной струе

В работе [1] отмечается, что данные устройства являются наиболее надёжными в плане демпфирования пульсаций в аэродинамической трубе.

Подвижная кромка из материала или резины у края сопла. Мягкие, подвижные кромки у края сопла нарушают пограничный слой и демпфируют периодические пульсации давления. Непрочность такого материала при больших скоростях потока делает невозможным их практическое применение.

Пластинки, входящие в поток у среза сопла. Опыты с пластинками позволили сделать следующие выводы:

1. Пластинки уничтожают периодические режимы во всём диапазоне скоростей и уменьшают амплитуду колебаний в 3-4 раза в свободной струе и закрытых участках трубы; особенно эффективно действие таких пластинок при больших скоростях потока.

2. Пластинки эффективны для больших размеров аэродинамических труб.

Пластинки с обтекателями (обтекатели пристроены к пластинкам изнутри сопла). Опыты с пластинками позволили сделать следующие выводы:

1. Пластинки с обтекателями можно рекомендовать в качестве демпфирующего устройства для большой скорости потока.

2. Пластинки следует применять при наличии отверстий в диффузоре.

Пластинки, установленные вдоль потока. Опыты позволили сделать следующие выводы:

1. Пластинки, установленные вдоль потока под углом $\alpha = 20^{\circ}$ в сочетании с отверстиями в диффузоре дают уничтожение периодических колебаний.

2. Значение имеет угол наклона пластинок к потоку: оптимальный угол находится в диапазоне от 15° до 20°.

3. Длина пластинок: 1,5 - 2,5% от длины рабочей части; ширина пластинок $\sim 0,5$ длины пластинок.

Конический раструб у среза сопла. Конический раструб сильно возмущает поток.

1.4. Достигнутые результаты по демпфированию пульсаций

На рисунке 6 приведены для трубы T-103 промежуточные результаты (выполнены отверстия в диффузоре) по измерению амплитуд пульсаций давления в зависимости от скорости потока в открытой рабочей части с помощью микрофонов, установленных в сопле и в середине слоя смешения в открытой рабочей части.

На рисунках 7 и 8 приведены результаты (наилучшие) по измерению амплитуд пульсаций давления в зависимости от скорости потока в открытой рабочей части в середине слоя смешения. Амплитуда пульсаций давления по оси ординат дана в см водяного столба.

Амплитуды пульсаций давления в струе значительно превышают амплитуды пульсаций давления в сопле.

2. Пульсации потока в аэродинамических трубах с рабочей или безэховой камерой

Дозвуковые аэродинамические трубы за рубежом, в основном, выполнены с коллектором на входе в диффузор. При такой конструкции проще разместить открытую рабочую часть в рабочей или безэховой камере, что позволяет увеличить скорость потока и проводить измерения акустических параметров обтекания аэродинамических моделей.



Рис. 6. Амплитуды пульсаций давления в сопле (слева) и свободной струе (справа), труба Т-103 [1]



Рис. 7. Амплитуды пульсаций давления в свободной струе (T-23 – слева; T-102 – справа) [1]

Анализ существующих схем дозвуковых аэродинамических труб с открытой рабочей частью показывает, что практически во всех трубах существуют **демпфирующие** отверстия, выполненные в диффузорах, или зазоры (Slot) в сечении сопряжения коллектора с первым диффузором, в сечении сопряжения первого и второго диффузоров, а также и в других сечениях аэродинамического тракта до расположения вентилятора. Организация таким образом рабочей части приводит к появлению резонансных явлений, типа явлений в резонаторе Гельмгольца, что затрудняет и искажает результаты акустических измерений.

На рисунке 9 приведена схема аэродинамической трубы NASA, Langley, 4-bu 7-Meter Tunnel. Исследования [6] показали существование периодических пульсаций потока на дискретных частотах в рабочей камере трубы. Для этой трубы на 1/24масштабной её модели были проведены эксперименты по влиянию геометрии коллектора на уровень турбулентности потока в рабочей части [3]. Для каждого из шести вариантов



Рис. 8. Амплитуды пульсаций давления в свободной струе (Т-103) [1]



Рис. 9. Схема аэродинамической трубы с безэховой камерой [6] в вариантах с открытой и закрытой рабочими частями; NASA, Langley, 4-bu 7-Meter Tunnel

геометрии коллектора фиксировался уровень турбулентности в открытой рабочей части трубы. В результате экспериментов выбрана конфигурация коллектора и размер **зазора** между коллектором и первым диффузором, обеспечивающие наиболее низкий уровень интенсивности турбулентности. В дальнейшем, рекомендации по конфигурации диффузора и размеру зазора были реализованы в натурной конструкции трубы. **Зазор** (Slot) показан на рисунке 9.

На рисунке 10 приведены схемы (вид сбоку и вид в плане) модельной установки. Пульсации скорости измерялись термоанемометром с однониточным зондом.

На последующих рисунках 11-13 показаны схемы исследуемых коллекторов. Размеры моделей коллекторов на рисунках 11-16 даны в дюймах. На рисунках 14 и 15 приведены результаты по измерению интенсивности турбулентности в открытой рабочей части при двух наиболее приемлемых конфигурациях коллекторов. Скорость потока варьировалась в диапазоне до 56,5 м/с для конфигурации №2 и до 40 м/с для конфигурации №4.

На рисунке 16 показана схема открытой рабочей части аэродинамической трубы с







Рис. 11. Конфигурации коллекторов №1(слева) и №2 (справа) [3]



Рис. 12. Конфигурация коллектора №3 (слева) и №4 (справа) [3]



Рис. 13. Конфигурация коллектора №5 (слева) и №6 (справа) [3]



Рис. 14. Интенсивность турбулентности в открытой рабочей части (конфигурация коллектора №2) [3]



Рис. 15. Интенсивность турбулентности в открытой рабочей части (конфигурация коллектора №4) [3]

безэховой камерой, NASA, Langley, 4-bu 7-Meter Tunnel. Коллектор и зазор выполнены по рекомендациям модельного эксперимента, тем не менее видны и некоторые отличия. Зазор выполнен большим, чем зазор в модельном эксперименте (зазор в последнем варьировался в диапазоне от 1 до 3 дюймов), и в зазоре размещены тонкие пластины.

На рисунке 17 приведена схема открытой рабочей части аэродинамической трубы DNW с безэховой камерой. Безэховая камера оборудована звукопоглощающими клиньями и звукопоглощающим покрытием. Размеры камеры: 47,1×28,2×18,7 м. Это одна из самых больших безэховых камер в мире. Размеры коллектора: 9,5×9,5 м. Комбинации сопел: 8×6 м и 6×6 м. Длина открытой рабочей части: 19 м. Длина коллектора: ~ 14 м. Между коллектором и началом диффузора выполнен зазор размером 0,25 м. Варианты исполнения коллекторов проверялись в экспериментах на модельной аэродинамической трубе.

Рассматривая схемы аэродинамических труб, следует понимать, что любая из труб оригинальна в конструкции, и требуется индивидуальный подход к демпфированию пульсаций давления в открытой рабочей части. Модельный эксперимент помогает отчасти найти подход к задаче демпфирования пульсаций потока, модельный эксперимент полезен для анализа процессов в промышленных аэродинамических трубах с открытой рабочей частью.



Рис. 16. Новый коллектор в аэродинамической трубе, NASA, Langley, 4-bu 7-Meter Tunnel [4]



Рис. 17. Схема открытой рабочей части аэродинамической трубы DNW с безэховой камерой, справа – вход в коллектор [4]

3. Активные методы демпфирования пульсаций в аэродинамических трубах

В работах ЦАГИ [5,7,8,9] предлагается активный метод демпфирования низкочастотных пульсаций в дозвуковых аэродинамических трубах **с открытой**

рабочей частью - метод акустического подавления пульсаций. При использовании этого метода регулярные низкочастотные пульсации на начальном участке струи ослабляются при воздействии на струю высокочастотных акустических колебаний.

Акустический метод подавления пульсаций заключается в том, что поток в аэродинамической трубе облучается генератором звука с частотой дискретного тона, соответствующей числам Струхаля *Sh* в диапазоне от 0,2 до 0,5.

$$Sh = \frac{f_k \cdot v}{D_c} \tag{1}$$

где f_{κ} – частота дискретного тона, Гц; D_c – диаметр сопла, м; v – скорость потока на оси открытой рабочей части, м/с.

Акустический метод был опробован на модельных аэродинамических трубах с диаметрами сопел $D_c=0,15$ и 0,44 м и послужил хорошим дополнением к пассивным методам демпфирования пульсаций. В некоторых случаях акустическим методом удалось полностью подавить пульсации давления в аэродинамической трубе. Применение акустического метода подавления пульсаций с диаметрами сопел $D_c=1-2$ м связано с большими трудностями. С ростом диаметральных размеров и размеров трубы падает частота дискретного тона вплоть до инфразвуковой, а потребная мощность генератора звука существенно возрастает.

Требования по уменьшению уровней шума в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью привели к размещению этой части в безэховой камере или в рабочей камере. Возросшие требования также привели к необходимости акустической обработки безэховой камеры и элементов аэродинамического тракта трубы, к исполнению некоторых элементов конструкции трубы с улучшенными в отношении акустики параметрами.

В последние годы наметился ещё один метод – активный метод (ARC – активный резонансный контроль) подавления резонансных пульсаций в камере и потоке. Метод ARC получил широкое освещение в публикациях, в частности, в работах [10-15]. Акустический метод, метод ARC, новые технологии по измерению параметров потока в аэродинамических трубах, запросы промышленности на аэродинамические исследования высоко скоростного транспорта способствовали появлению большого количества новых модельных и промышленных аэродинамических труб, и модернизации старых труб.

Существование низкочастотных пульсаций в потоке может быть связано с различными механизмами их возбуждения: механизм вынужденного возбуждения колебаний, механизм автоколебательный, и резонансные механизмы, природа которых определяется существованием резонаторов в аэродинамическом канале трубы и возбуждением в потоке пульсаций по первым двум механизмам.

Механизм вынужденного возбуждения низкочастотных пульсаций может быть связан с вращением вентилятора трубы. При этом возникают периодические пульсации давления, которые распространяются по всему контуру трубы. Частота вращения вентилятора описывается уравнением (2):

$$f_{\scriptscriptstyle \rm B} = \frac{N \cdot n}{60} [\Gamma \,\mathrm{II}],\tag{2}$$

где N – число лопастей вентилятора; n – обороты вентилятора в минуту, 1/мин.

Другой специфичный механизм (механизм автоколебаний) возбуждения низкочастотных пульсаций в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью – это образование вихрей Кармана на выходе из сопла. Частота этого процесса для осесимметричных сопел в [13] определяется из следующего соотношения (3):

$$f_{\kappa} = \frac{0.48v}{D_c} [\Gamma \mathbf{u}],\tag{3}$$

где D_c – диаметр сопла, м; v – скорость потока на оси открытой рабочей части, м/с, число Струхаля Sh = 0,48 (число определено в исследованиях на трубе DNW).

В предположении упрощенных моделей акустических резонансов, в аэродинамической трубе можно рассматривать несколько типов резонанса: резонанс аэродинамического тракта как резонанс в открытой с двух сторон трубе, резонанс в объёме рабочей камеры и резонанс типа резонанса Гельмгольца в объёме трубы от форкамеры до коллектора или диффузора.

Весь контур трубы или отдельные элементы контура могут действовать как органная труба. Резонансная частота такого органа fopr может быть вычислена по уравнению (4) [16]:

$$f_{\rm opr} = \frac{a}{\frac{2L_{\rm opr}}{m} \left[1 - \frac{(d_n - d_k)^2}{\pi^2 m^2 d_n d_k}\right]} [\Gamma \mathbf{I}],\tag{4}$$

где $L_{\rm opr}$ – длина органной трубы, м; m – мода (число), целое $m \ge 1$; d_n – параметр для концевого условия в начале трубы, м; d_k – параметр для концевого условия в конце трубы, м.

Резонансная частота акустического тракта может быть оценена по следующей формуле (5):

$$f_{\rm p1} = \frac{m \cdot a}{2L} [\Gamma \mathbf{I}],\tag{5}$$

где m = 1, 2, 3, 4; a – скорость звука, м/с; L – длина аэродинамического тракта, м.

Для оценки собственных частот рабочей камеры $f_{\rm p2}$ можно воспользоваться следующим соотношением: (6):

$$f_{p2} = \frac{a}{2\sqrt{\left(\frac{l_x}{n_1}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{n_2}\right)^2 + \left(\frac{l_z}{n_3}\right)^2}} [\Gamma \mathbf{u}],\tag{6}$$

где a – скорость звука в воздухе, a = 340 м/с; l_x, l_y, l_z – геометрические размеры рабочей камеры, м; n_1, n_2, n_3 – моды естественной частоты, целые величины ≥ 1 .

Сопло (сопло + форкамера) и открытую рабочую часть можно рассматривать как генератор Гельмгольца. Для такого генератора резонансная частота оценивается по следующему соотношению (7) [13, 14]:

$$f_{\Gamma} = \frac{a \cdot D_{\Gamma \mathfrak{u}\mathfrak{A}}}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{V\left(L_c + \pi \frac{D_{\Gamma \mathfrak{u}\mathfrak{A}}}{4}\right)}} [\Gamma \mathfrak{u}], \tag{7}$$

где a – скорость звука в воздухе, a = 340 м/с; $D_{\rm гид}$ – гидравлический диаметр, м; L_c – длина сопла, м; V – объем рабочей части, м³.

Схема ARC – системы показана на рисунке 18. В состав системы входят микрофон, установленный в рабочей камере, динамик, размещённый в канале аэродинамической трубы и комплект аппаратуры для спектрального анализа пульсаций давления и управления генератором звука (динамиком).

За более подробными комментариями и разъяснениями по методу ARC можно обратиться к работе [15]. В работе рассмотрены испытания метода ARC на масштабной модели IVK 1:4 аэродинамической труба в Штутгарте (IVK-MWT), см. рисунок 19.



Рис. 18. Схема ARC- системы [15]



Рис. 19. Схема аэродинамической трубы IVK-MWT [15]

Аэродинамическая труба IVK-MWT:

- сопло 1,565 м шириной и 1,055 м высотой, гидравлический диаметр 1,26 м;
- длина рабочей части 2,585 м;

• длина обратного канала (от плоскости входа коллектора через вентилятор к выходному сечению сопла) L = 47,4 м;

• длина обратного канала (от плоскости входа коллектора через вентилятор к выходному сечению сопла) L = 47,4 м;

- размеры рабочей камеры: lx- 8,75 м; ly 6,85 м; lz 4,37 м;
- скорость потока 280 км/ч (77,8 м/с).

Для испытаний метода ARC аэродинамическая труба IVK-MWT была подготовлена с максимально возможным уровнем пульсаций давления: убраны пластины на срезе сопла и закрыты демпфирующие отверстия между коллектором и диффузором.

На первом этапе измерялись амплитуды пульсаций в камере без установленной в ней модели при скорости потока от 120 до 280 км/ч с шагом 10 км/ч (от 33,3 м/с до 77,8 м/с с шагом 2,78 м/с). Микрофон располагался вне потока в углу камеры.

На рисунке 20 показана 3-d картина частотных спектров в яркостном представлении в зависимости от скорости потока. Уровни звукового давления дискретных тонов закодированы в серые и темные цвета. Тёмный цвет указывает на высокий уровень звукового давления, об этом свидетельствуют четыре тёмные полосы 18 Гц, 22 Гц, 39 Гц и 42 Гц. Протяжённость этих полос значительна по ординате скоростей.

На этом же рисунке 20 нанесены линии Sh = 0,3, Sh = 0,4 и Sh = 0,5, а также параллельно оси абсцисс показаны частоты мод, которые рассчитывались по формуле (6).



Рис. 20. 3-d картина частотных спектров в яркостном представлении [15]

Из картины частотных спектров рисунка 20 можно сделать вывод, что резонансные частоты не связаны с образованием вихрей Кармана на выходе из сопла.

На рисунке 21 показаны спектральные характеристики пульсаций давления, соответственно рисунку 20. Полоса пропускания f = 0,156 Гц.



Рис. 21. Спектральные характеристики пульсаций давления [15]

В зависимости от скорости потока в рабочей камере наблюдаются дискретные

тона значительной амплитуды. Метод ARC направлен на снижение амплитуд данных дискретных тонов.

В условиях отсутствия потока в аэродинамической трубе метод ARC нагрузкой аэродинамического тракта широкополосным шумом позволяет определить резонансные частоты рабочей камеры и сравнить получаемые значения частот с расчётом частот по соотношению (6). Пример оценки резонансных частот показан на рисунке 22.



Рис. 22. Уровни звукового давления вдоль оси трубы без подачи. Горизонтальные линии: положение сопла (N) и коллектора (C) [15]

Метод ARC требует индивидуального подхода для оригинальных в своём исполнении аэродинамических труб. В частности, для испытаний метода ARC в аэродинамической трубе IVK-MWT были установлены вертикально тонкие щитки за выходным сечением сопла по обе его стороны. Щитки были соединены с помощью приводов с мембранами динамиков. Таким образом, обеспечено почти плоское смещение щитков в вертикальной плоскости под воздействием мембраны динамиков. Тем самым обеспечено воздействие на образование вихревых структур на срезе сопла.

Результаты по измерению уровней звукового давления в рабочей камере при различном возбуждении щитков показаны на рисунке 23 для скорости потока 200 км/ч.



Рис. 23. Уровни звукового давления с различным возбуждением щитков [15]

«Inactive»: щитки установлены, но сигнал на приводы не подается; «синусоид»: шум с частотой 21,5 Гц, амплитуда щитка 12 мм; «band-limited random» полосный случайный шум, центральная частота 21,5 Гц, полоса пропускания 10 Гц.

Таким образом, показана эффективность активного метода ARC в подавлении низкочастотных пульсаций давления в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью в рабочей камере.

Заключение

Выполненный обзор работ по демпфированию пульсаций давления в дозвуковых аэродинамических трубах с открытой рабочей частью позволяет определить механизм пульсаций давления в аэродинамической трубе. В работах механизм пульсаций рассматривается как автоколебательный процесс, основным элементом которого является периодическое вихреобразование на границе струи в открытой рабочей части и удары вихрей о кромку диффузора. Акустические колебания в закрытой части трубы регулируют периодическое вихреобразование, тем самым колебания поддерживаются незатухающими.

Из этой картины, как следует из работ, были намечены пути устранения автоколебаний:

1. Ослабление возмущений, создаваемых ударами вихрей в закрытых участках трубы; здесь необходимо размещать у входа в диффузор устройства (дефлектор или коллектор) и выполнить сквозные отверстия в стенке диффузора.

2. Создание препятствий периодическому образованию кольцевых вихрей на границе свободной струи; здесь необходимо устанавливать специальные устройства у кромки сопла.

3. Внесение большого затухания в среду, совершающую колебания; здесь необходимы устройства в закрытых участках трубы.

К сожалению, намеченные и реализованные пути устранения пульсаций способствуют устранению пульсаций в диапазоне скоростей потока до 40 м/с и снижают амплитуды пульсаций давления при превышении скорости потока в 40 м/с. Кроме того, анализ экспериментальных результатов не позволяет определить положение дефлектора по отношению к входному сечению диффузора.

Нам представляется, что механизм пульсаций давления в аэродинамической трубе может также определяться развитием автоколебательного процесса в полости диффузора от его входного сечения до сечения с лопастями вентилятора. Полость диффузора можно рассматривать как полость четверть – волнового генератора Гартмана. В связи с предположением о существовании данного механизма в развитии инфразвуковых пульсаций давления в аэродинамической трубе требуется расширить объём исследований и сформулировать новую задачу.

1. Исследование газодинамики и акустики генераторов Гартмановского типа в режимах взаимодействия с полостью генератора как дозвуковых, так и сверхзвуковых струй.

Выполнение исследований по п. 1 позволит перейти к решению следующей задачи:

2. Исследование инфразвуковых пульсаций давления в аэродинамических трубах; разработка пассивных методов демпфирования этих пульсаций.

Демпфирование пульсаций давления инфразвукового диапазона не является конечной задачей настоящего исследования. Конечной задачей является снижение турбулентности потока в открытой рабочей части до значений, соответствующих превосходному качеству потока в аэродинамических трубах, таких как DNW в Европе. Достижимые уровни турбулентности потока в дозвуковых аэродинамических трубах иллюстрируются рисунком 24.



Рис. 24. Средний уровень турбулентности потока на оси некоторых аэродинамических труб с открытой рабочей частью [4]

Представляется, что пределом уровня турбулентности являются значения уровня, получаемые в эталонной дозвуковой струе, с правильно выполненными конструктивными элементами аэродинамического тракта.

При положительном решении поставленной 2-ой задачи возможно решение 3-ей задачи:

1. Исследование режимных параметров качества потока в открытой рабочей части, оценка влияния определяющих конструктивных параметров на режимные параметры.

В результате обзора исследовательских работ определены требования к экспериментальному и вспомогательному оборудованию.

Измерительный комплекс должен обеспечивать:

2. Многоточечное измерение датчиками пульсаций давления акустического диапазона в открытой рабочей части, в различных сечениях аэродинамического тракта, на поверхностях аэродинамических моделей; последующий спектральный анализ сигналов датчиков, тарировку датчиков давления.

3. Многоточечное измерение малых дифференциальных стационарных давлений в открытой рабочей части и на поверхностях аэродинамических моделей интеллектуальными преобразователями; тарировку интеллектуальных преобразователей давления.

4. Термоанемометрические измерения турбулентных пульсаций скорости потока в открытой рабочей части, а также за аэродинамическими моделями.

Список литературы

1. Баулин К.К., Астабатян С.Г., Крашенинников Ф.Н. Исследование аэродинамических труб с открытой рабочей частью // Труды ЦАГИ. – 1932. Вып. 140.

2. С.П. Стрелков, Г.А. Бендриков, Н.А. Смирнов. Пульсации в аэродинамических трубах и способы демпфирования их.- Тр. ЦАГИ. – 1946. - № 593. - 56с.

3. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. М. – Л., Гостехтеоретиздат, 1948. - 288с.

4. G.S. Manuel, John K. Molloy. Effect of Collector Configuration on Test Section Turbulence Levels in an Open-Jet Wind Tunnel. NASA Technical Menorandum. 4333, 1992. - 20p.

5. P.T. Soderman, L.E. Olsen. The Design of Test-Section Inserts for Higher Speed Aeroacoustic Testing in the Ames 80-bu 120 Foot Wind Tunnel. NASA Technical Menorandum 103915, 1992. - 11p.

6. Л.А. Белопольская, В.К. Брейтвет, А.В. Зосимов, Е.Б. Тимофеев. К акустическому подавлению автоколебаний в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью. Учёные записки ЦАГИ, т. XVI. -1985. - № 4. - с. 65-72.

7. James C.Yu. A. Louis Abrahamson. Acoustic Treatment of the NASA Langley 4-bu 7-meter Tunnel: A Feasibility Stdy. NASA Technical Paper 2563, 1986. - 36p.

8. В.А. Вишняков, А.Г. Прозоров. Исследование самовозбуждения колебаний в потоке в аэродинамической трубе и возможности его предотвращения. Учёные записки ЦАГИ, т. XXIII. - 1992. - № 4. - с. 17-69.

9. В.А. Вишняков, А.Г. Прозоров. Возбуждение пульсаций скорости и шума в аэродинамической трубе. МЖГ № 4, 1992. - с. 165-172.

10. Гиневский – Режим доступа. – URL: http://www.tsagi.ru/experimental_base/

11. R. Blumrich, J. Wiedemann. Design of Automotive Aeroacoustic Wind Tunnels. FKFS, PfaffenWaldring 12, 70569 Stutgart GERMANY

12. M. Rennie, M-S Kim, J-H Lee, J-D Lee. Suppression of Open-Jet Pressure Fluctuation in the Hyundai Aeroacoustic Wind Tunnel, 2004. - 16p.

13. F. Evert, H. Miehling. Active Control ft the Audi aero-acoustic wind tunnel (AAWT). CFA/DAGA04, 22-25/03/2004. - 2p.

14. G. Wickern, W. von Heesen, S. Wallmann. Wind Tunnel Pulsations and their Active Suppression. 2000-01-0869

15. P. Waudby-Smith, R. Ramakrishna Wind Tunnel Resonances and Helmholz Resonaters. Canadian Acoustic/Acoustique canadienne. Vol. No. 1 (2007). - p. 3-11.

16. W. von Heesen, M. Hopfer. Suppression of Wind Tunnel Buffeting by Active Flow Control, 2004-01-0805.11p.

17. Batchelor G.K. Sound in Wind Tunnels. ACA-18. - 1945.