



Низкочастотные пульсации на границе струи натурной дозвуковой аэродинамической трубы замкнутого типа

Босняков С.М., Ливерко Д.В., Михайлов С.В., Маленко В.А., Морозов А.Н.

ФГУП «ЦАГИ», Жуковский, МО



Маршрутная карта

- **Мотивация работы**
- Предшествующий опыт
- Экспериментальная установка и особенности эксперимента
- Актуаторы и результаты их применения
- Заключение

- При увеличении скорости потока в трубе усиливаются низкочастотные колебания в области диффузора с возникновением риска разрушения конструкции.
- Этот эффект исследовался в 40-х годах прошлого века и в контур трубы были внесены изменения - «окна перепуска» и вихрегенераторы на срезе сопла.
- Одной из причин возникновения низкочастотных колебаний назван «кольцевой вихрь», который, разрушаясь, образует «опрокидывающиеся волны» с возникновением сильных ударных нагрузок на диффузор.
- Предпринята попытка исследовать поля течения в АДТ и разрушить кольцевой вихрь при помощи актуатора

- **Объектом исследования** является дозвуковая аэродинамическая труба АДТ Т-104 с диаметром выходного сечения сопла 7 м, длиной открытой рабочей части 13 м.
- **Цель работы** – экспериментальное и численное исследование низкочастотных пульсаций давления на границе струи и способов их подавления.
- **Решенные задачи:**
 - – спроектированы и изготовлены актуаторы с завихрителями для подавления низкочастотных колебаний на границе струи;
 - – проведено численное исследование струи Т-104 методом LES
 - – проведено экспериментальное исследование полей течения и эффективности актуаторов;

Маршрутная карта

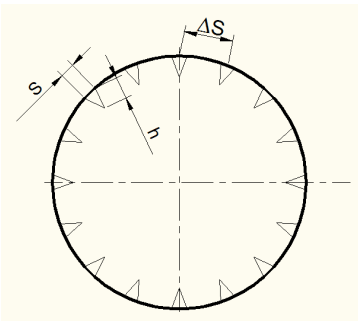
- Мотивация работы
- **Предшествующий опыт**
- Экспериментальная установка и особенности эксперимента
- Актуаторы и результаты их применения
- Заключение

Активные способы демпфирования

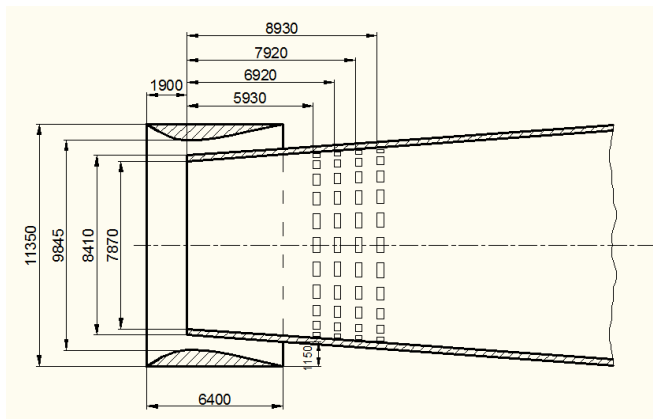
1. Колеблющиеся ленты из материи или резины;
2. Струи под углом к потоку;
3. Генераторы звуковых волн.

В настоящее время реализованы в Т-104

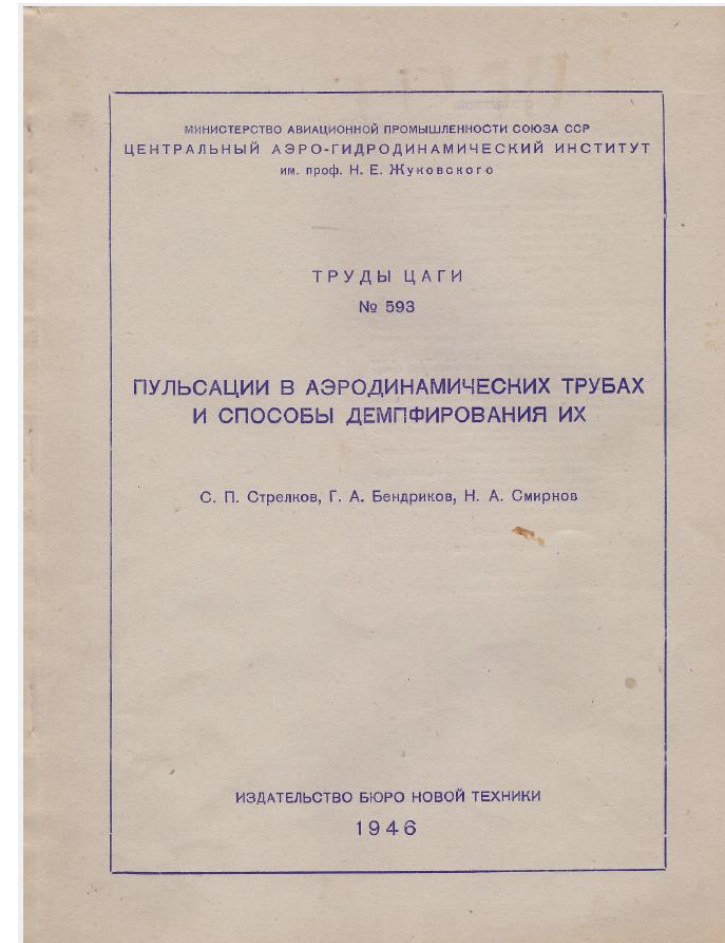
1. Отверстия в диффузоре;
2. Выступающие в поток пластины.

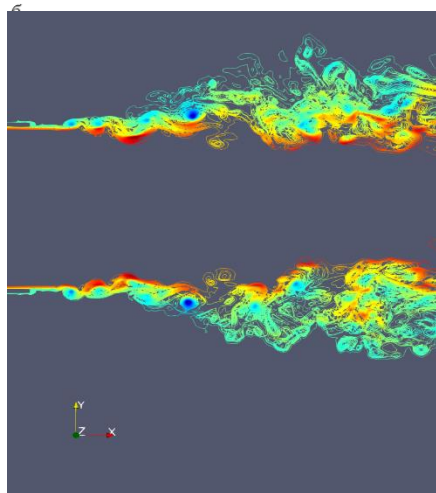
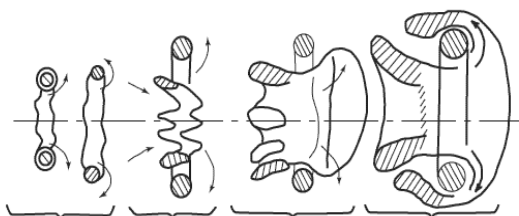
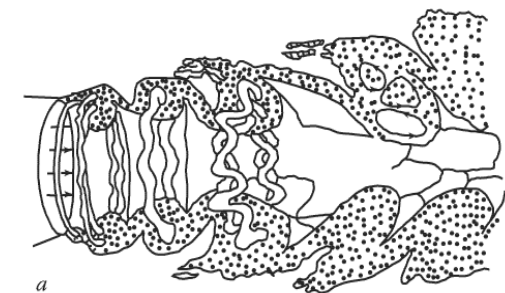


Срез сопла



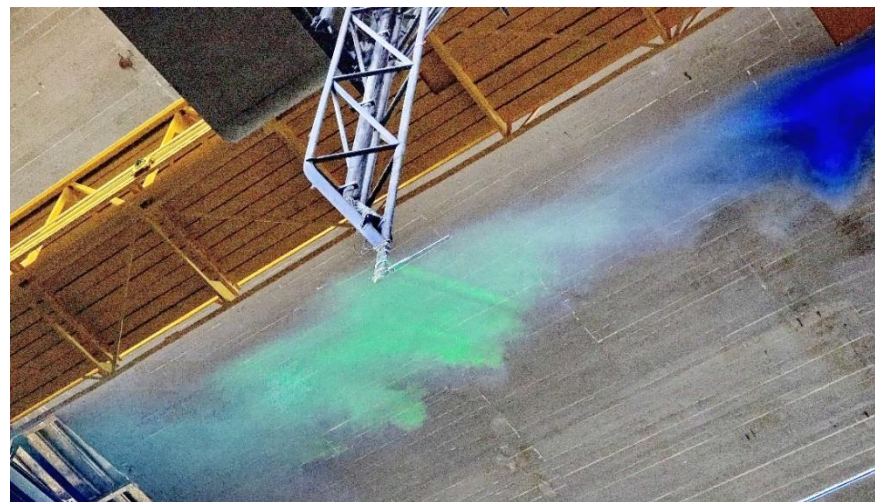
Диффузор (вид сбоку)





Кольцевой вихрь распадается с образованием опрокидывающихся волн.

Возбудителями колебаний являются импульсы от периодических ударов «кольцевых» вихрей по диффузору.



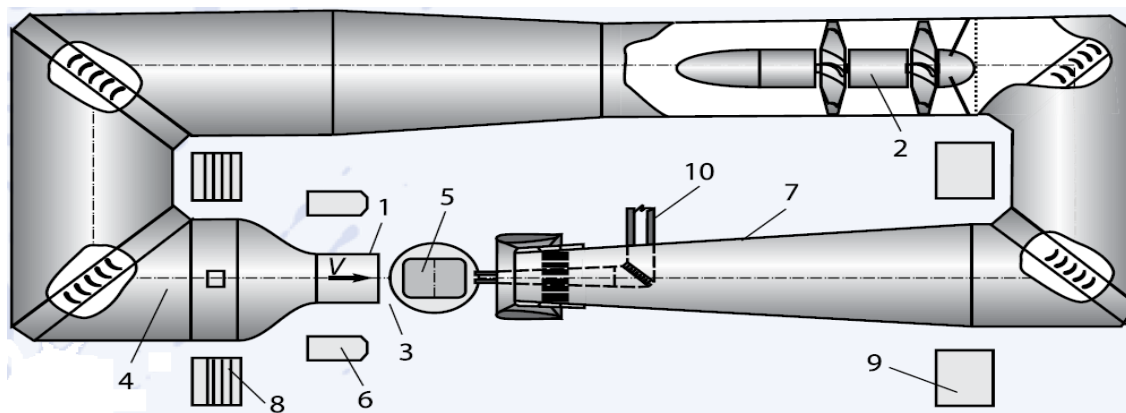
T-104 - лазерный нож

Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. -240стр- ISBN 5-9221-0161-7

Маршрутная карта

- Мотивация работы
- Предшествующий опыт
- **Экспериментальная установка и особенности эксперимента**
- Актуаторы и результаты их применения
- Заключение

Экспериментальная установка



АДТ Т-104 ЦАГИ является аэродинамической трубой замкнутого типа с открытой рабочей частью и обратным каналом.

Скорость потока – 10...100 м/с

Число Re на 1 м – до $8 \cdot 10^6$

Статическое давление – атмосферное

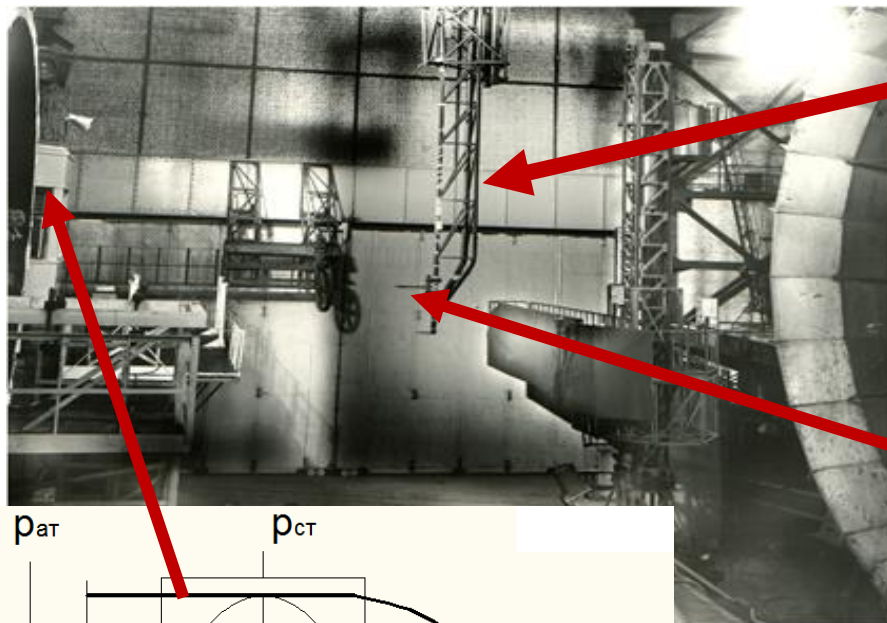
Скоростной напор – до 8.8 кПа

Температура – окружающей среды

Размеры РЧ: диаметр сопла – 7 м, длина – 13 м

Особенности эксперимента

Измерительная схема на основе манометра



Штатное координатное устройство
 Мостовой кран в здании трубы
 Подвижность в трех плоскостях

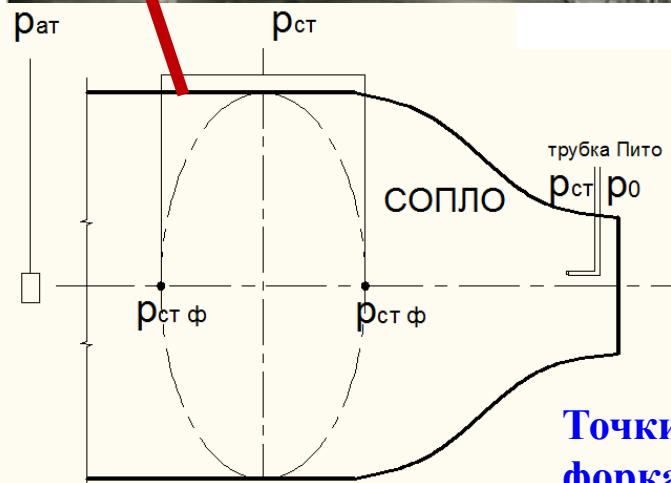
Длина трассы – 2м



Трубка Пито



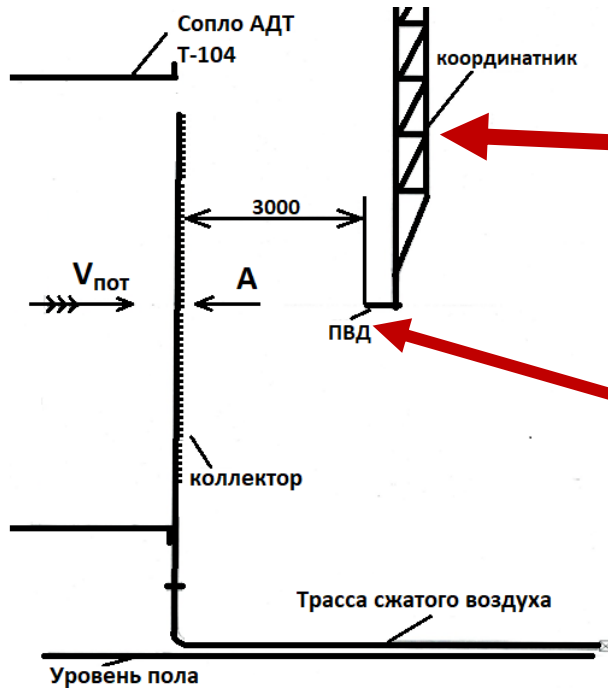
Мини-манометр
 Расположен на кране



Точки измерения давления в
 форкамере и на срезе сопла

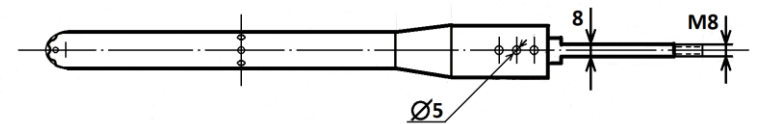
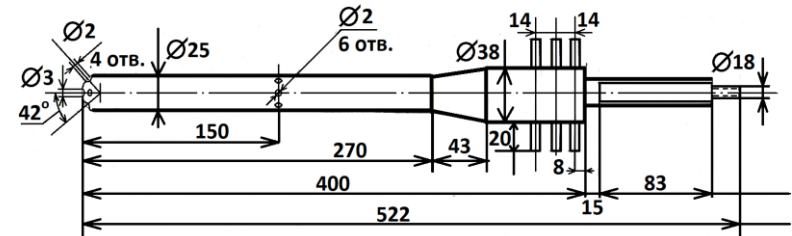
Особенности эксперимента

Измерительная схема на основе датчика ИКД



Длина трассы – 6 м
Диаметр трубки – 4 мм

Штатное координатное устройство
Мостовой кран в здании трубы
Подвижность в трех плоскостях



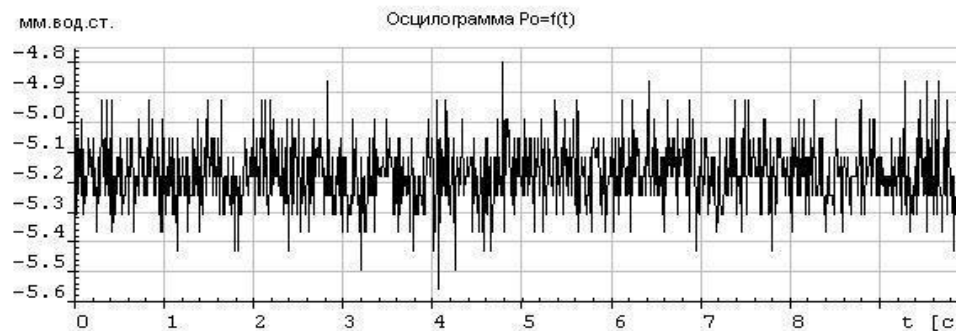
Трубка Пито

Измерения уровня фона стенда с ИКД

Время – 10 сек

Частота – 100 гц

Уровень фона - 5 мм рт столба



Датчик ИКД



Измерительно вычислительный комплекс ИВК-М2

Стабильность работы стенда с ИКД

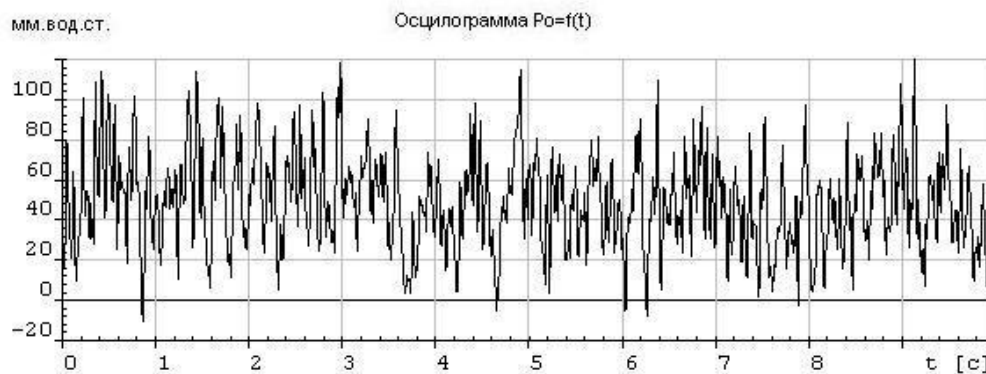
Миллиметры водяного столба

Отсчет	P_0 средн мм	СКО мм	P_0 макс мм	f макс Гц
2	49.6	23.2	120	2
3	49.6	23.6	120	3
4	49.8	22.5	104	3
5	44.5	21.5	120	2.4

Максимальная случайная погрешность – 10%

Без «выколотых» точек – 1%

Пиковое значение при частоте порядка 3 Гц равнялось 120 мм вод столба

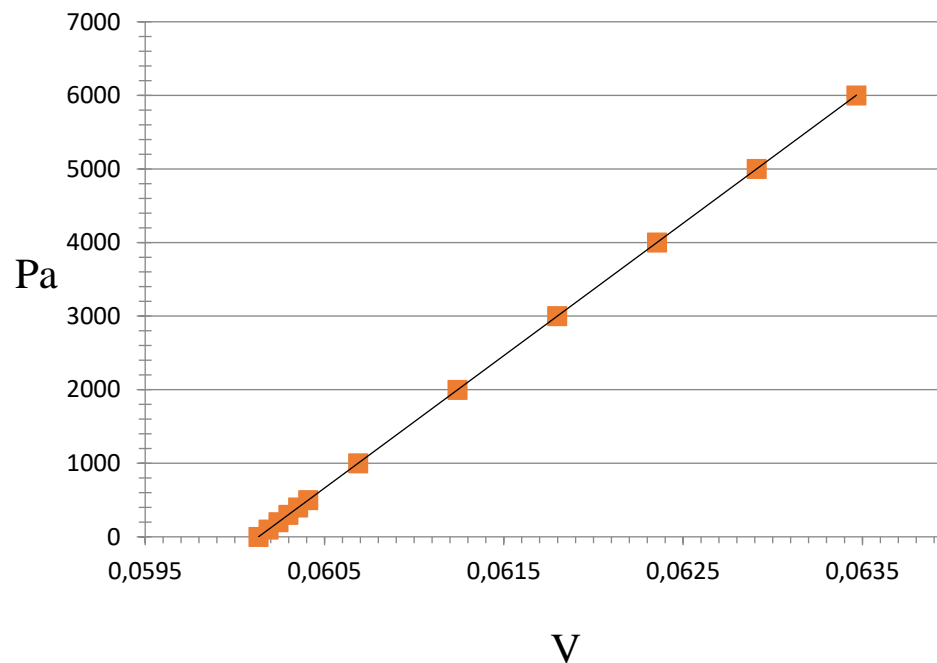


Измерительная система на основе датчика Kulite

Измерительный комплекс МІС-355m

Частотный диапазон до 100 КГц

Калибровка датчика Kulite



Kulite XT-190



Калибровка датчика Kulite в составе измерительной системы

Комбинированный насадок T-23

Рабочий диапазон, м/с	До 100 м/с	
Коэффициент приёмника по скоростному напору		0.992

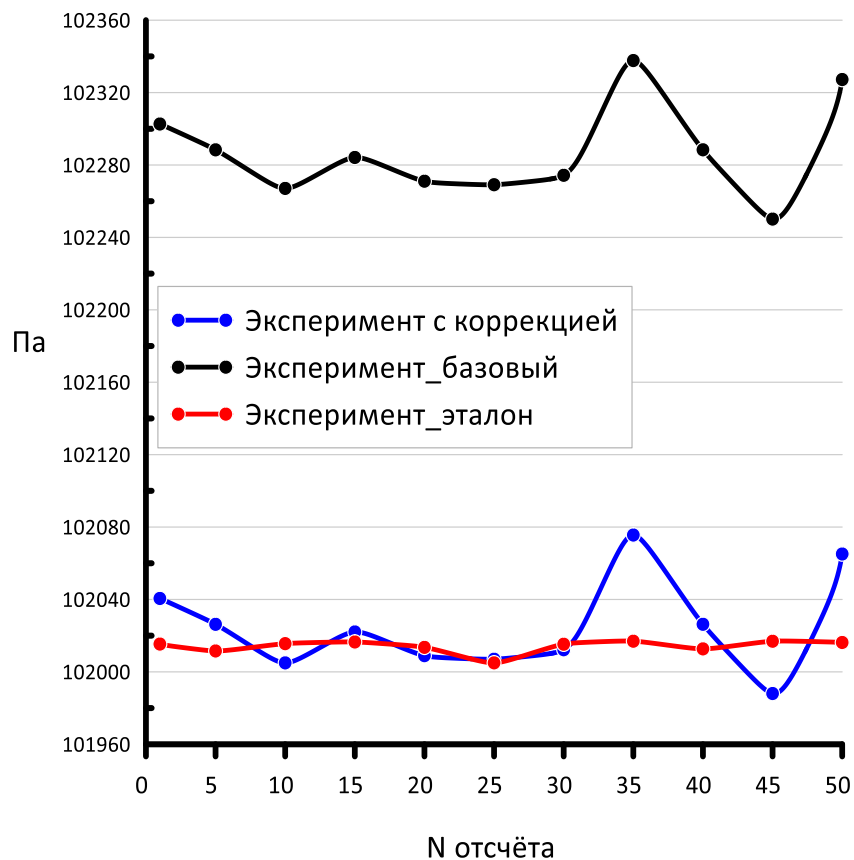
Метран-150CD0

Диапазон измерений, Па	0...600	
Значение выходного сигнала, мА	4-20	
Предел допускаемой основной погрешности, %		±0.315
Тип датчика	дифференциальный	

Метран-150CD1

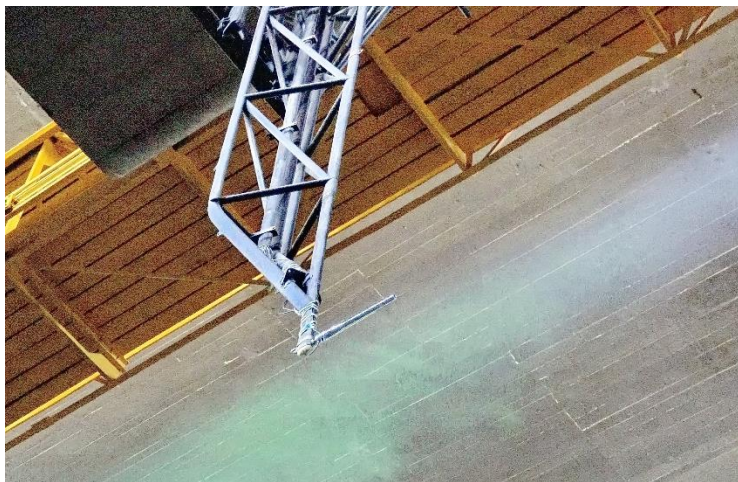
Диапазон измерений, Па	0...6000	
Значение выходного сигнала, мА	4-20	
Предел допускаемой основной погрешности, %		±0.315
Тип датчика	дифференциальный	

Калибровка датчика Kulite в составе измерительной системы



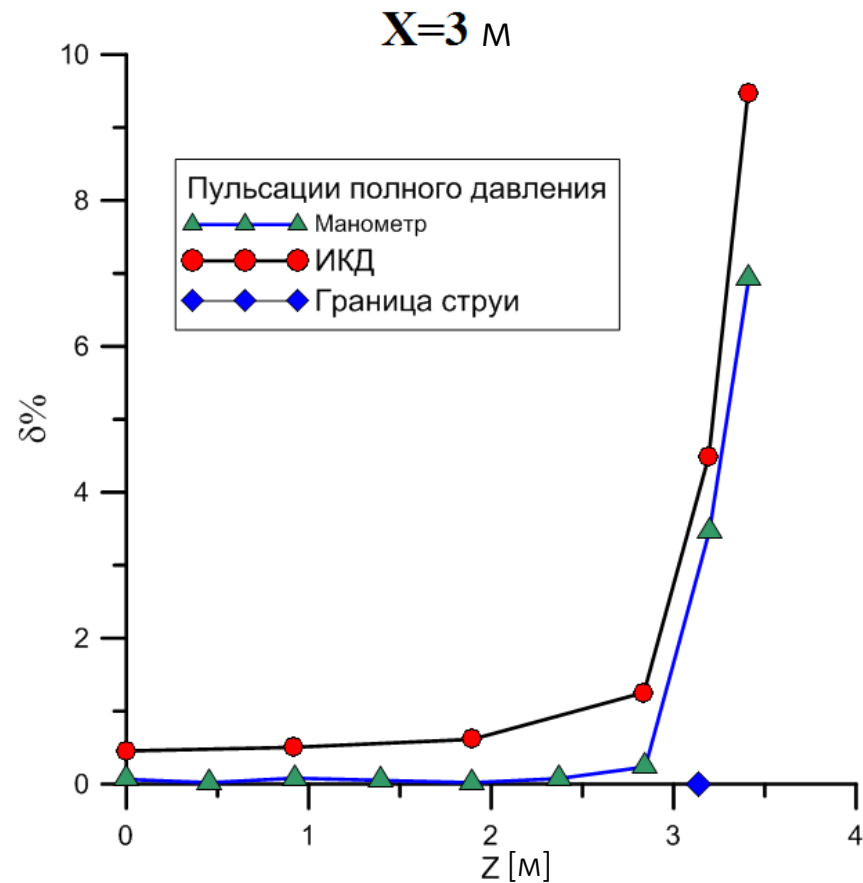
Скорость потока (м/с)	Показания датчика Kulite (Па)	Максимальная абсолютная погрешность (Па)
20	101599	338
40	102276	336
60	103513	378

Сопоставление результатов измерения поля полного давления при помощи Манометра и ИКД

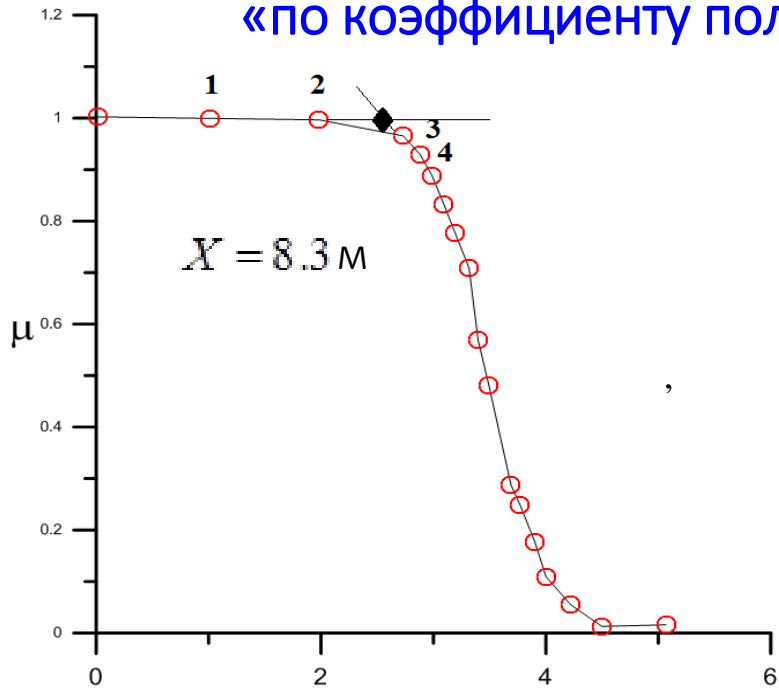


ИКД в слое смешения дает 9.6%
Манометр – 8%

Заметные колебания насадка Пито при попадании в слой смешения

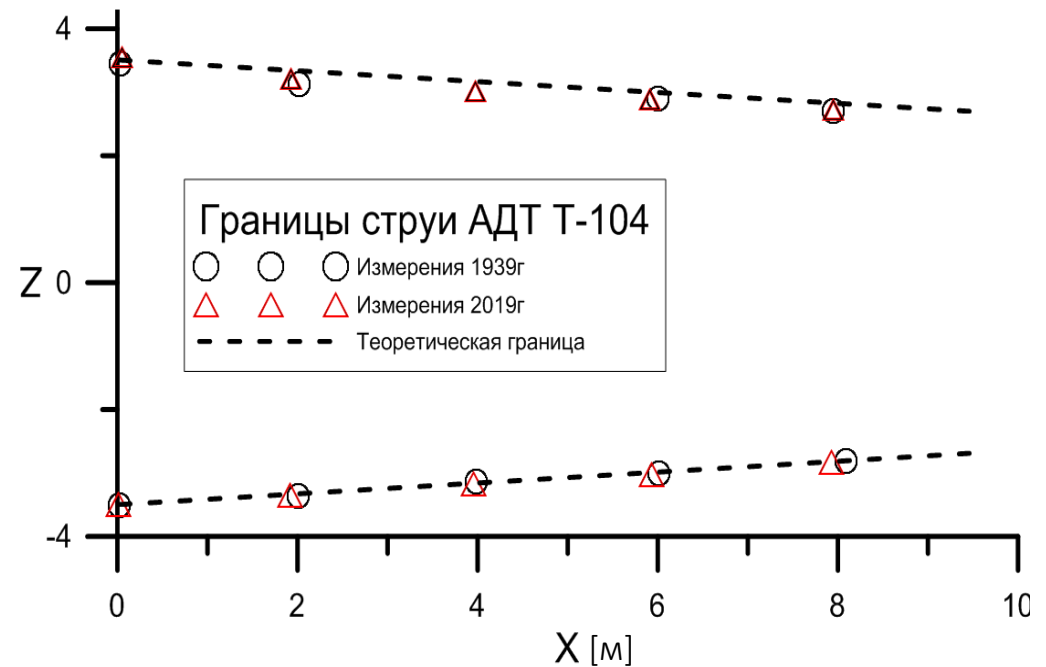


Исследование границ невозмущенного поля потока «по коэффициенту поля»



Угол сужения струи оценивается величиной

$$\Theta \approx 7^\circ$$



$$\mu = \frac{\rho w_0^2}{\rho w_{00}^2}$$

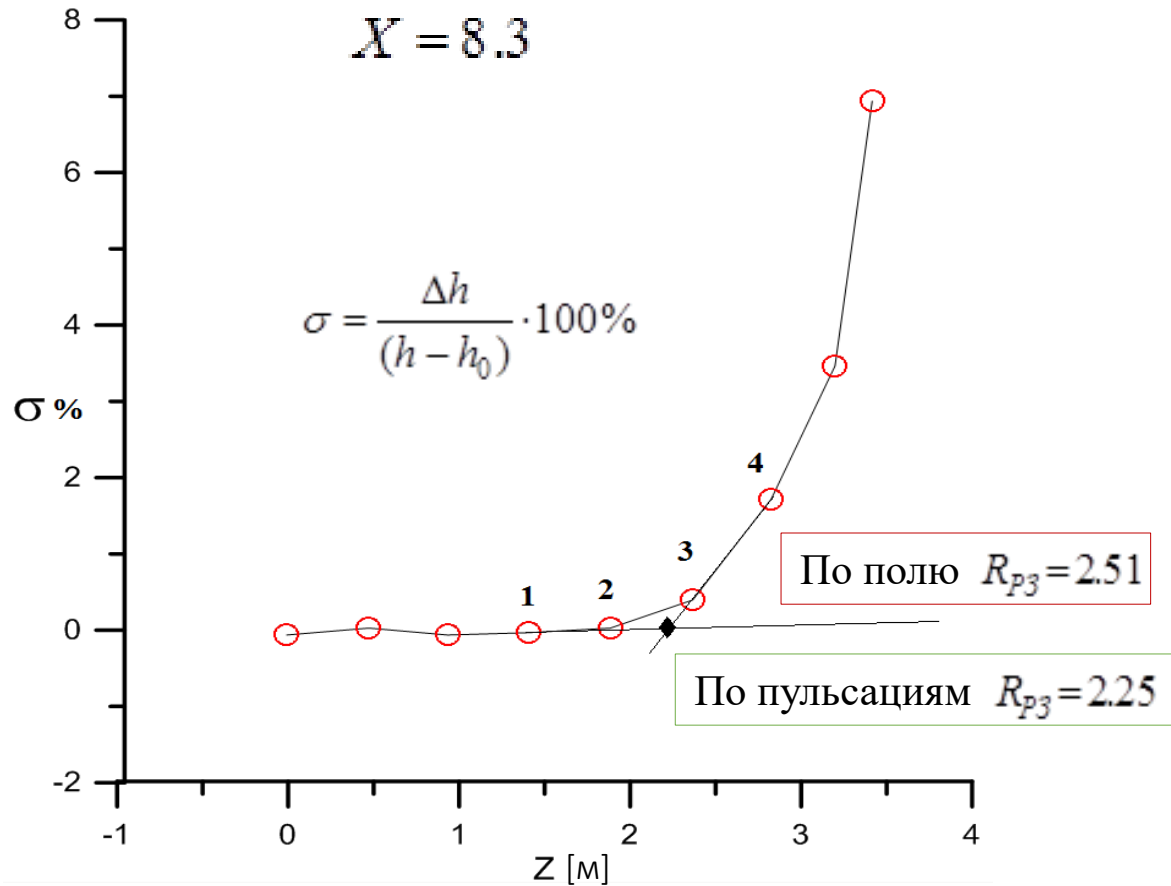
$$\frac{\rho w_0^2}{2} = p_0 - p_{ат}$$

$$\frac{\rho w_{00}^2}{2} = p_\phi - p_{ат}$$

$$p + \frac{\rho w^2}{2} = p_0$$

Ядро потока $\mu = 1$

Исследование границ невозмущенного поля потока «по пульсациям»



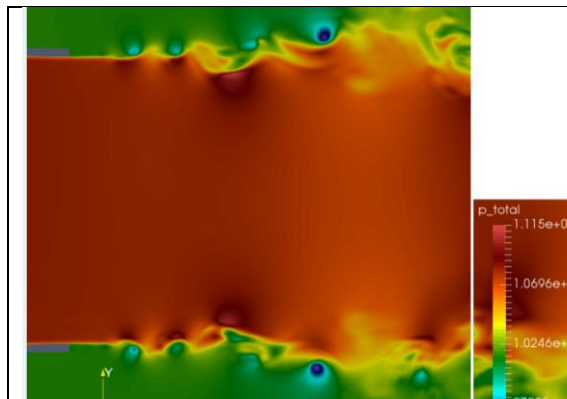
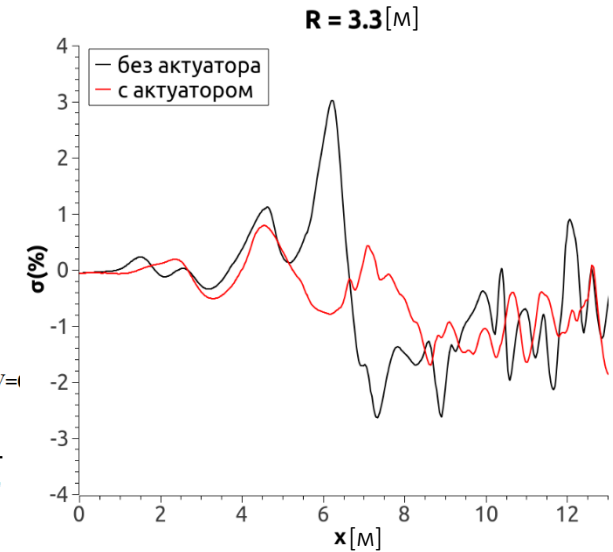
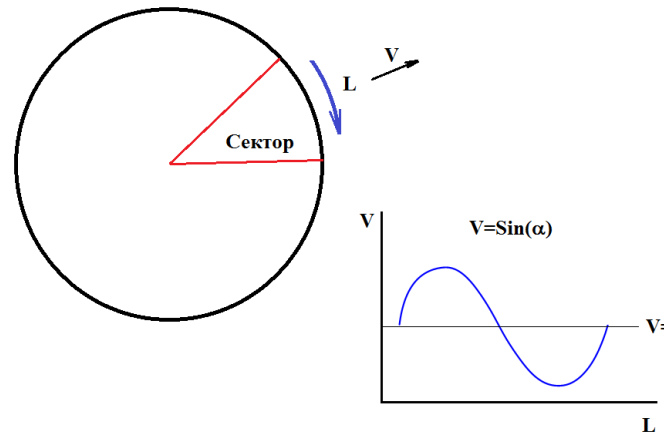
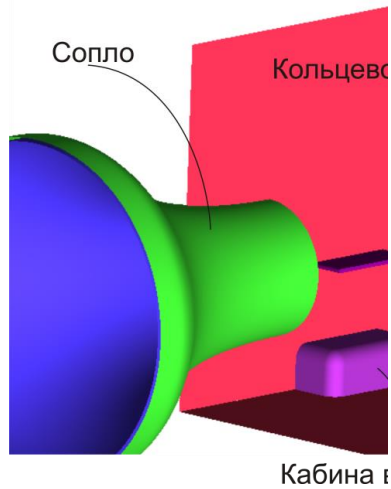
Колебательный процесс захватывает большее пространство, чем предсказывает осредненный параметр «коэффициент поля»

Маршрутная карта

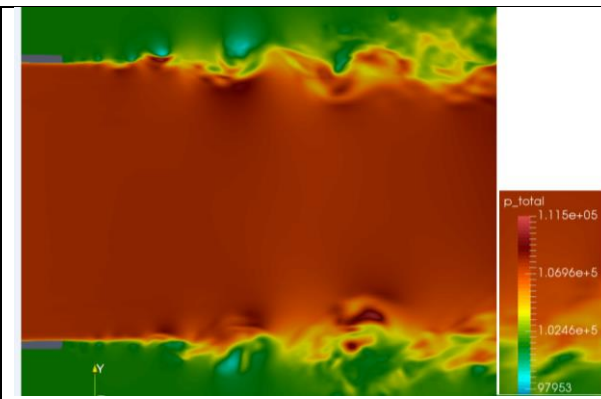
- Мотивация работы
- Предшествующий опыт
- Экспериментальная установка и особенности эксперимента
- **Актуаторы и результаты их применения**
- Заключение

Принцип работы математического актуатора

Выдуваются струи поперек струи

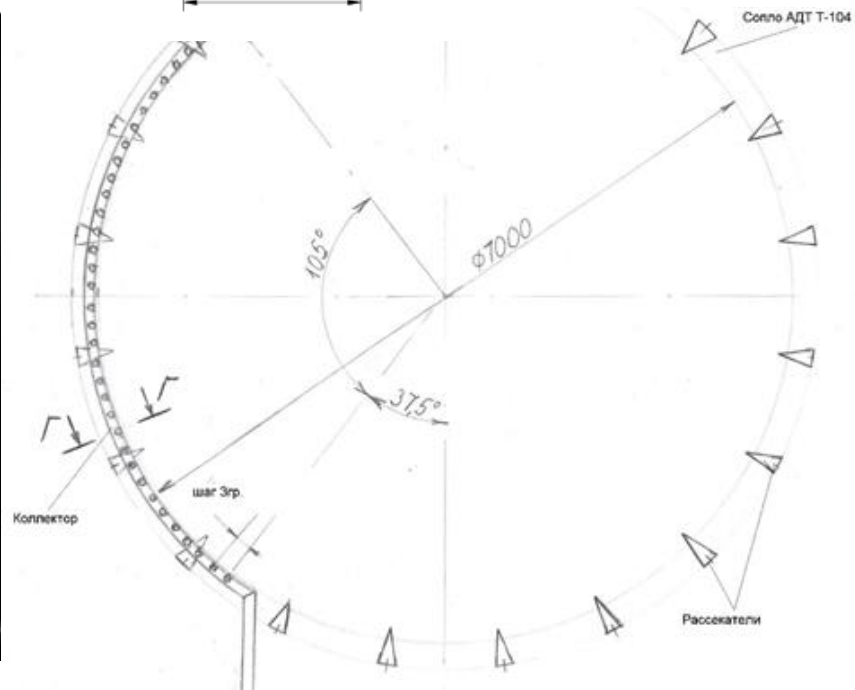
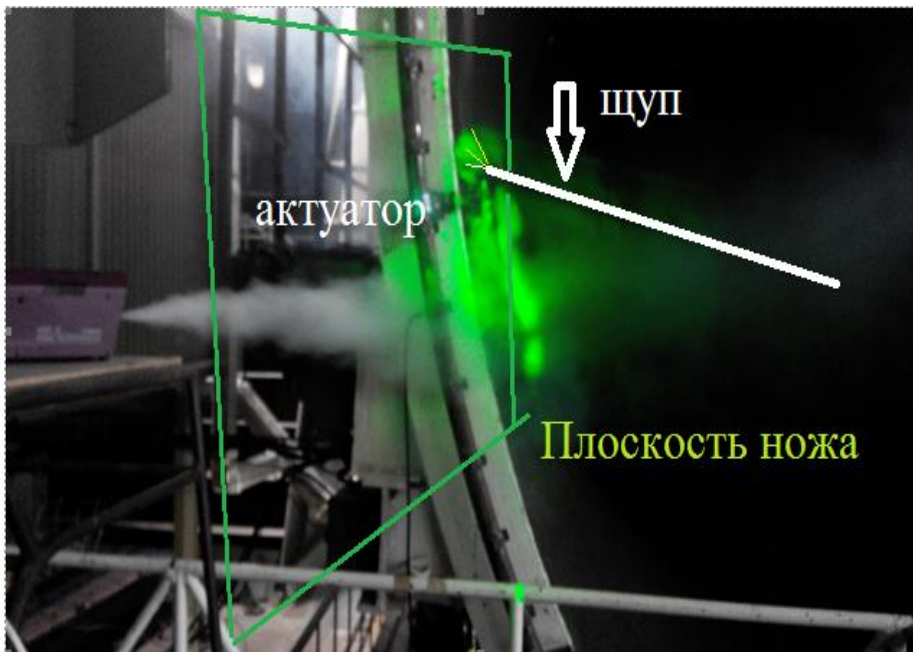
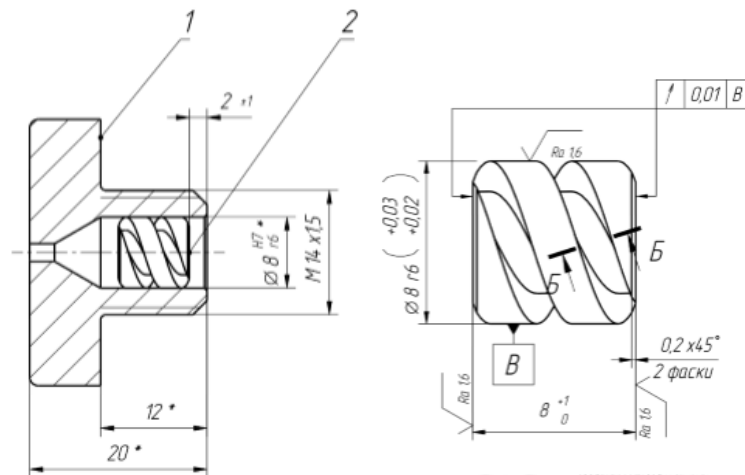
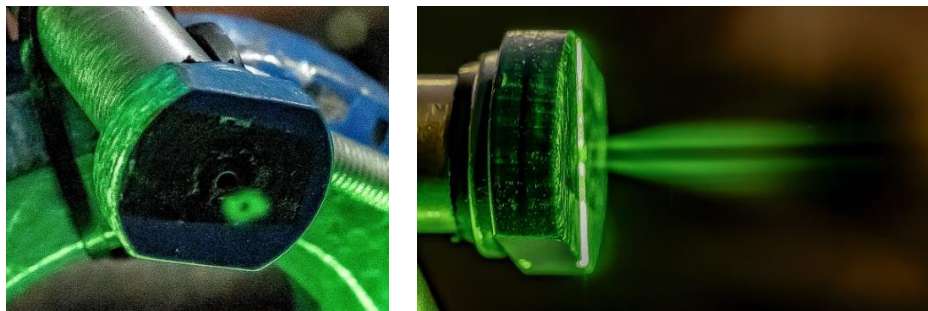


а) мгновенное поле без актуатора

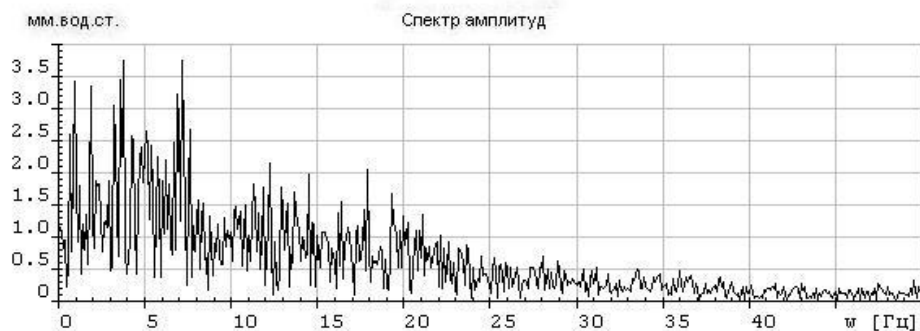
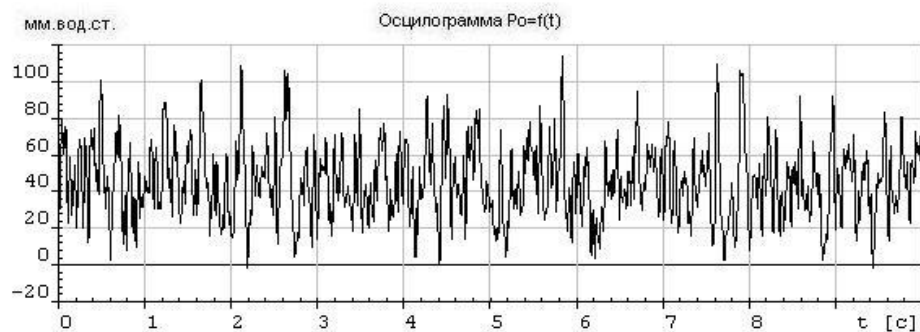


б) мгновенное поле с актуатором

Принцип работы реального актуатора



Результат работы актуатора

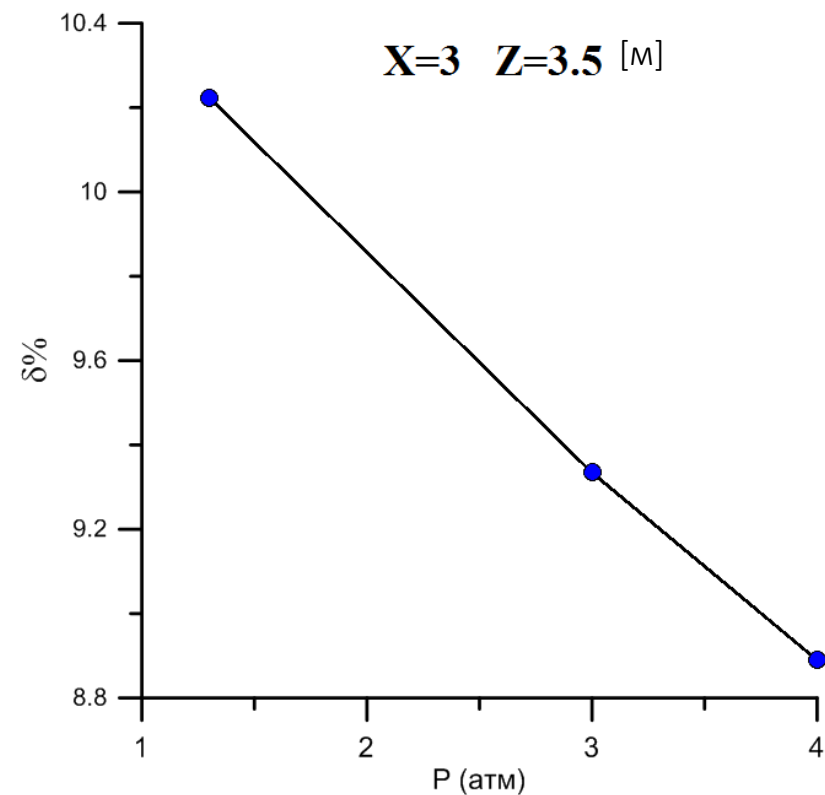


Протокол 45, эксп. №6 Вариант актуаторов №1 (направление струй вдоль среза сопла)
 $P_{\text{акт}}=3.0$ атм, $Z_{\text{взд}}=3.5$ м, $V=60$ м/с, $P_{0\text{ср}}=45.9$ мм.вод.ст., $СКО=20.8$ мм.вод.ст.

$V=60$ м/сек $P=3$ атм

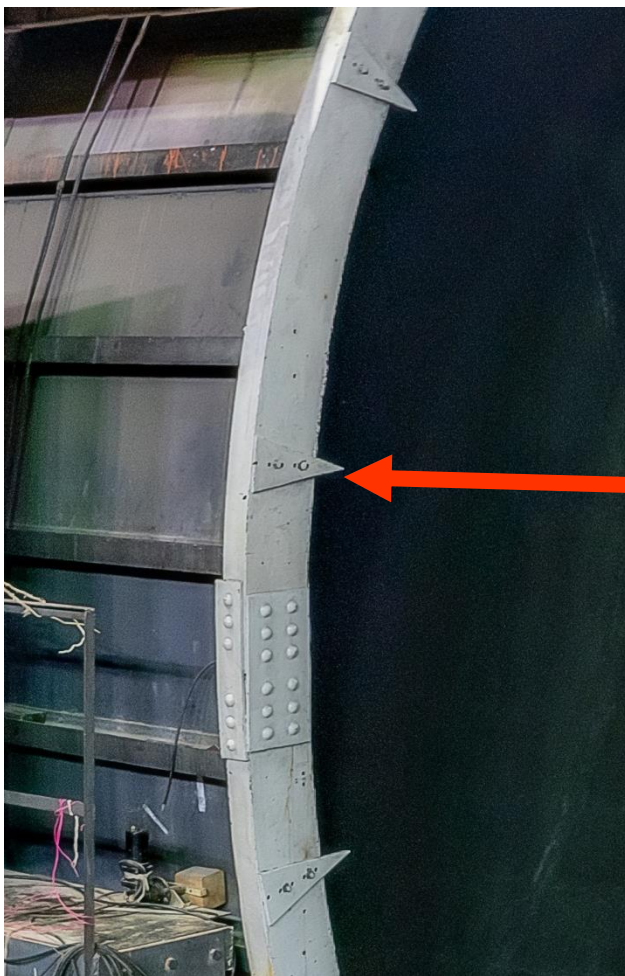
Перепады полного давления

$P_{\text{ср}}=46$ мм в.с. $P_{\text{ско}}=21$ мм в.с.

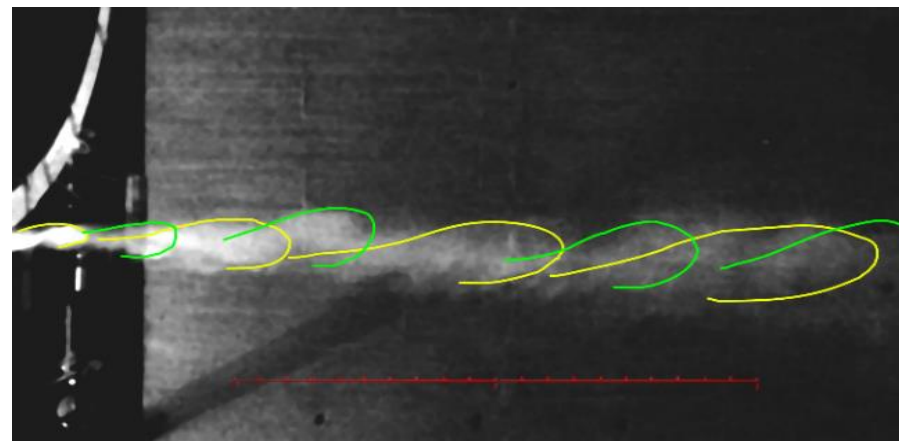
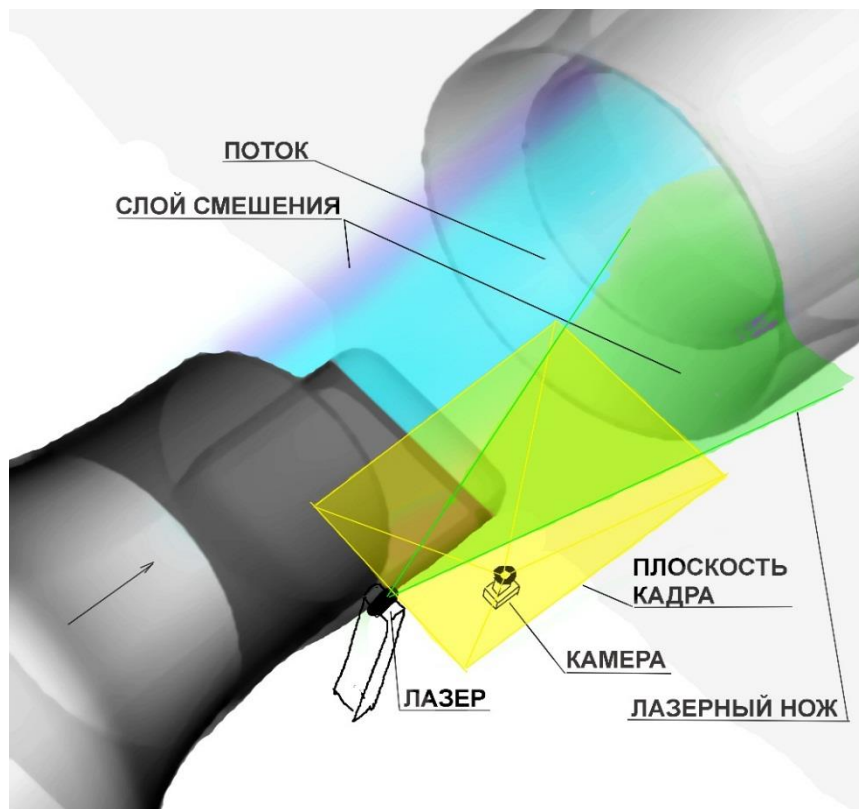


Подавление пульсаций в зависимости
от давления в системе

Штатные вихрегенераторы



Исследование штатных вихрегенераторов АДТ Т-104



С вихрегенераторами

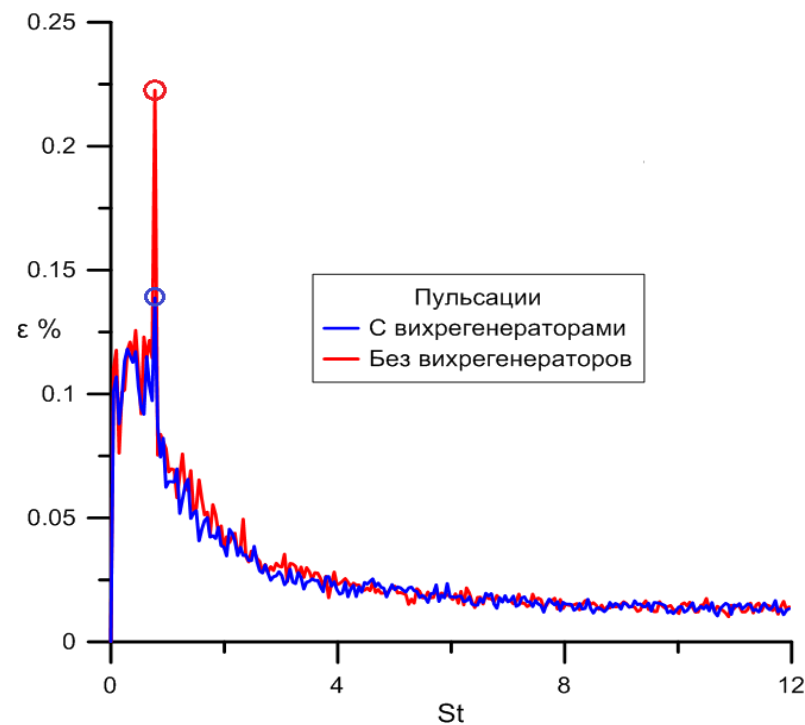


Без вихрегенераторов

Влияние вихрегенераторов на спектр (Точка А)



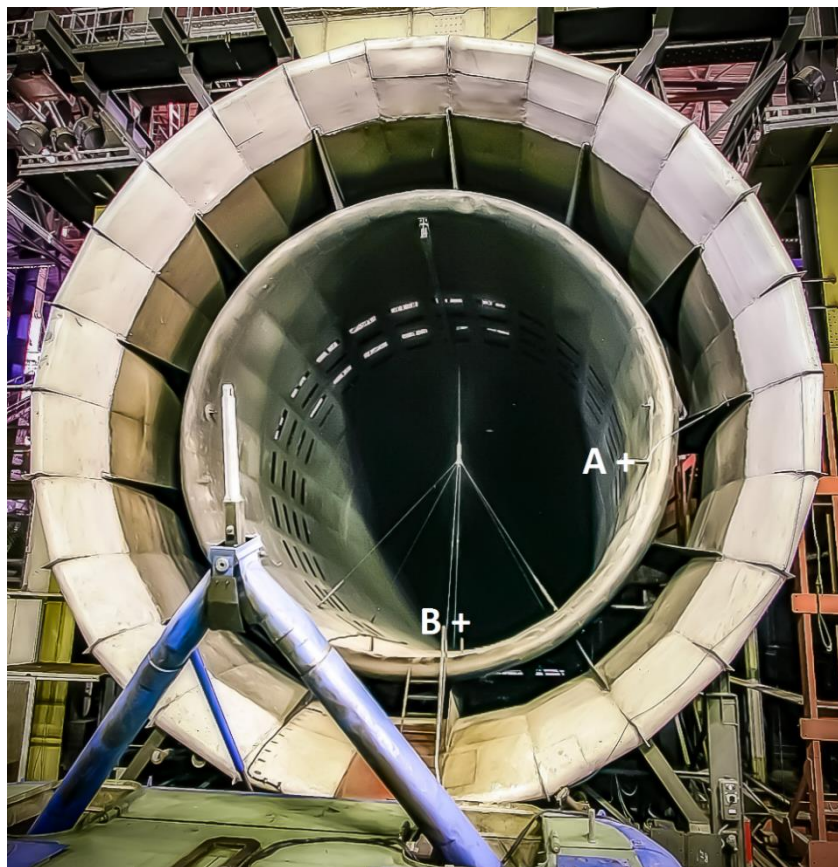
	P_{0cp}	$\varepsilon_{cp} \%$	$\sigma \%$
С вихрегенераторами	102001Па	0.446%	20.6%
Без вихрегенераторов	102151Па	0.482%	22.3%



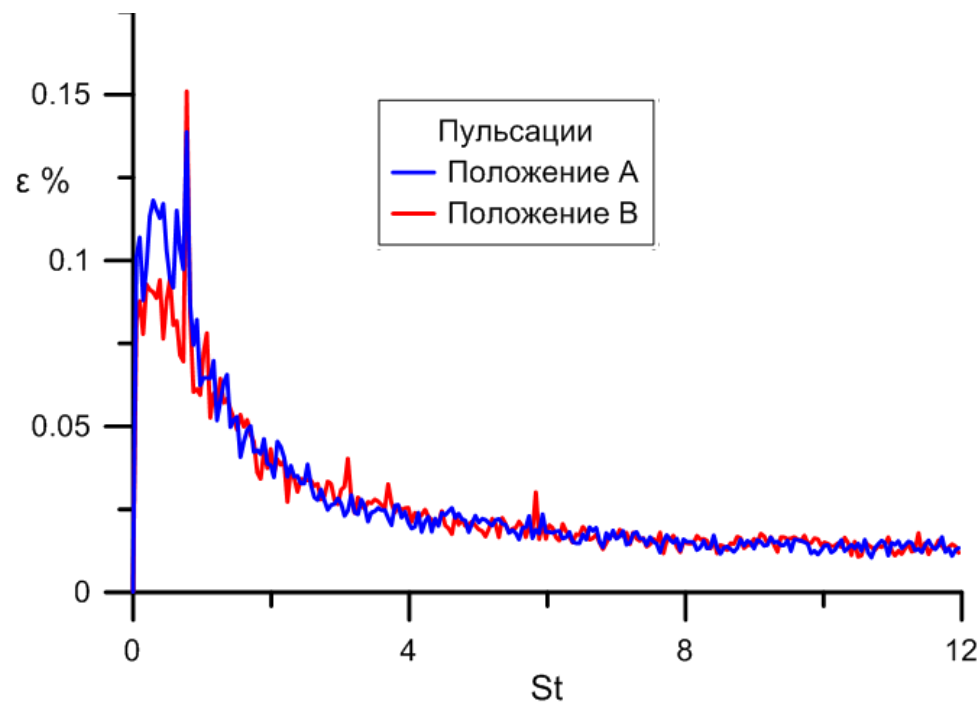
$$P_{0cp} = \frac{\sum P_{0i}}{n}$$

$$\varepsilon_{cp} = \sqrt{\sum \left(\frac{P_{0i} - 1}{P_{0cp}} \right)^2} / n \cdot 100\%$$

Влияние положения датчиков на спектр (Точки А и В)



	P_{0cp}	$\varepsilon_{cp} \%$	$\sigma \%$
A	102001Па	0.446%	20,6%
B	104666Па	0.440%	20,3%



Маршрутная карта

- Мотивация работы
- Предшествующий опыт
- Экспериментальная установка и особенности эксперимента
- Актуаторы и результаты их применения
- **Заключение**

- Измерения коэффициента поля струи подтвердили стабильность характеристик АДТ Т-104 по сравнению с измерениями 1939 года.
- Подтверждено, что образующиеся на начальном участке слоя смешения струи кольцевые вихри достаточно быстро разрушаются с образованием укрупненных структур.
- Струя из актуатора, выдуваемая перпендикулярно слою смешения основного потока, приводит к уменьшению пульсаций в этом слое. Величина эффекта зависит от давления в актуаторе.
- Вихрегенераторы в виде треугольных пластин на срезе сопла приводят к уменьшению интенсивности кольцевых вихрей и увеличению частоты их схода с кромки сопла, но не влияют на положение пиков возмущений в спектре, построенном по результатам измерений пульсаций полного давления в окрестности диффузора АДТ Т-104.