

VII ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ
ЭКСПЕРИМЕНТ
В АЭРОАКУСТИКЕ

17-22 сентября 2018 года, г. Светлогорск Калининградской области



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ СОПЛА НА ПАРАМЕТРЫ ТЕЧЕНИЯ В СЛОЕ СМЕШЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ТРАНСЗВУКОВОЙ СТРУИ

В.И. Запрягаев¹, И.Н. Кавун¹, Д.А. Губанов¹, А.А. Дядькин²,
С.П. Рыбак

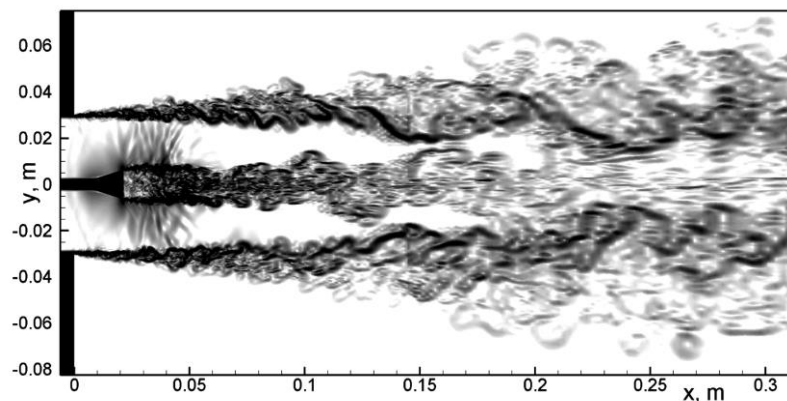
¹ ИТПМ СО АН РАН, Новосибирск, Россия, zapr@itam.nsc.ru

² ПАО «РКК "Энергия", Королев, Московская обл., Россия, Sergey.Rybak@rsce.ru

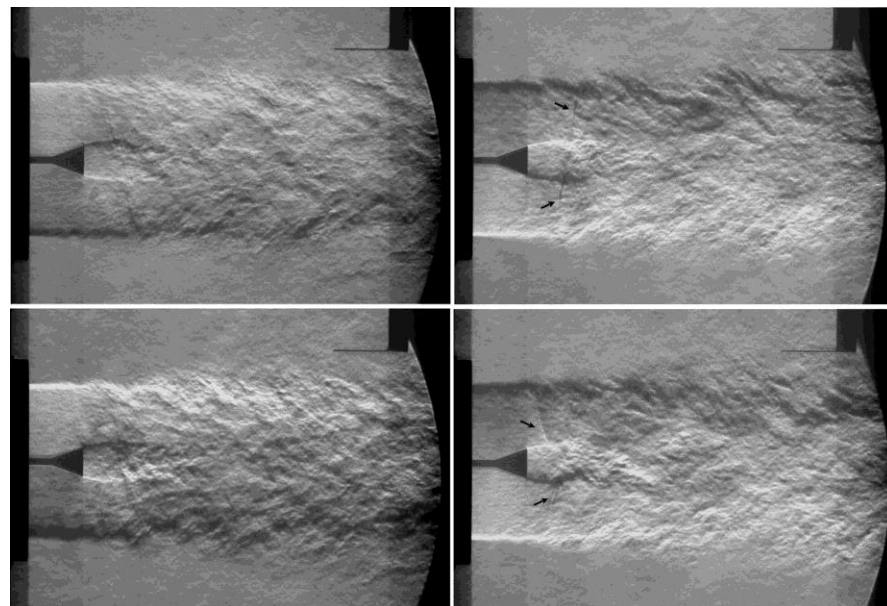
Актуальность
исследования обусловлена
необходимостью определения
значения силовых тепловых и
пульсационных нагрузок,
действующих на обтекатель
головной части за счет следа от
сопл блока РБАС.
Получение экспериментальных
данных для валидации
результатов численных расчетов.
Определение влияния уровня
начальных возмущений на срезе
сопла на развитие слоя смешения
струи.



Сравнение расчетных (СПБПУ) и экспериментальных (ИТПМ СО РАН) шлирен-картин обтекания конуса



Мгновенное поле $\text{grad}(\rho)$ из
расчета СПБПУ по модели 1
(DDES с Δ_{SLA})

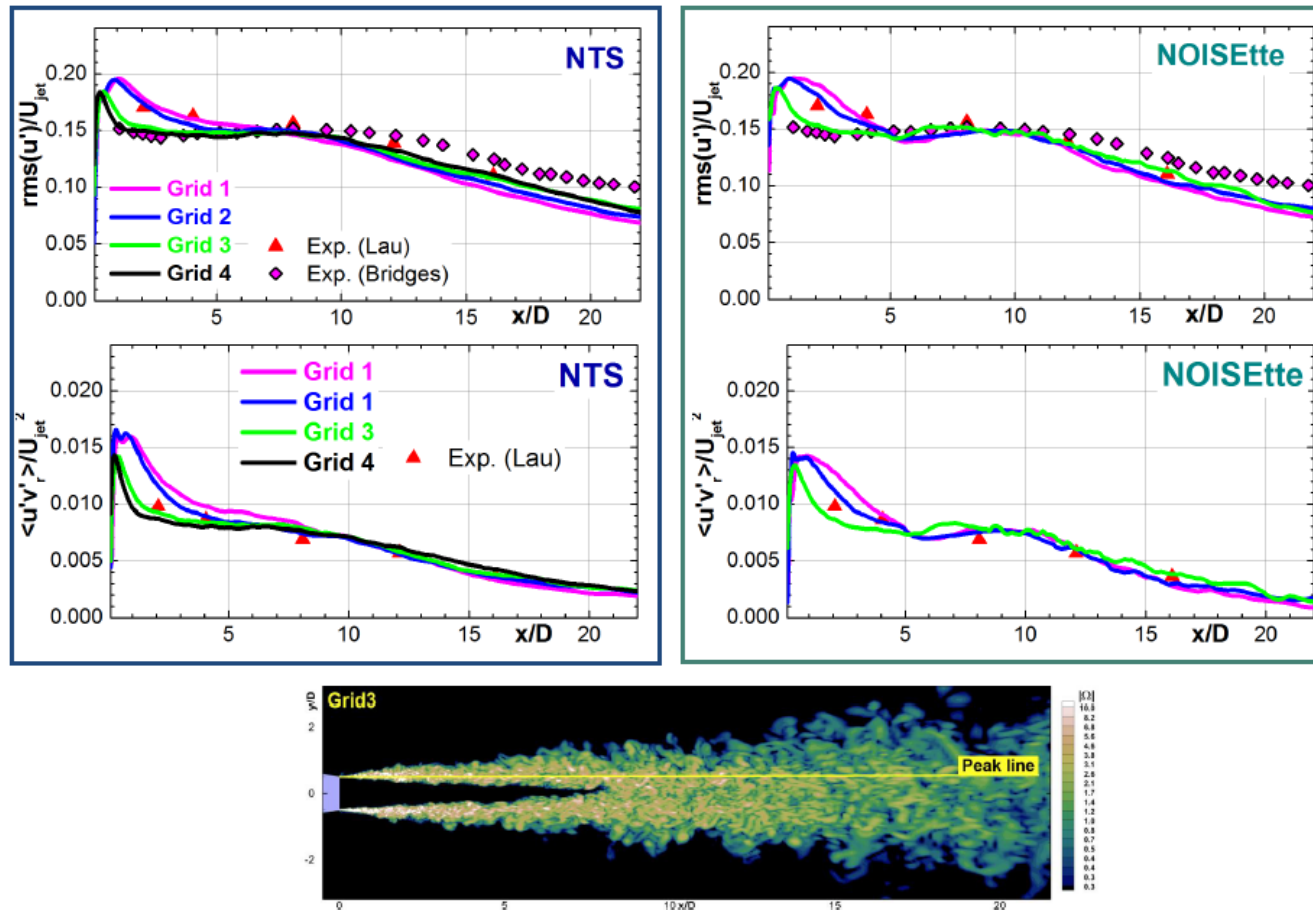


Шлирен фотографии ИТПМ

Переход к развитой 3D турбулентности в “сходящем” со стенок сопла слое смешения в расчете происходит быстрее, чем в эксперименте

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ СОПЛА РАКЕТНОГО БЛОКА АВАРИЙНОГО СПАСЕНИЯ

А.К. Травин, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур, В.И. Запрыгаев, И.Н. Кавун, Д.А. Губанов,
А.А. Дядькин, С.П. Рыбак



A.P. Duben, T.K. Kozubskaya

KIAM RAS, Moscow, Russia

Computational AeroAcoustics Laboratory

M.L. Shur, M.Kh. Strelets

SPbPU, Saint-Petersburg, Russia

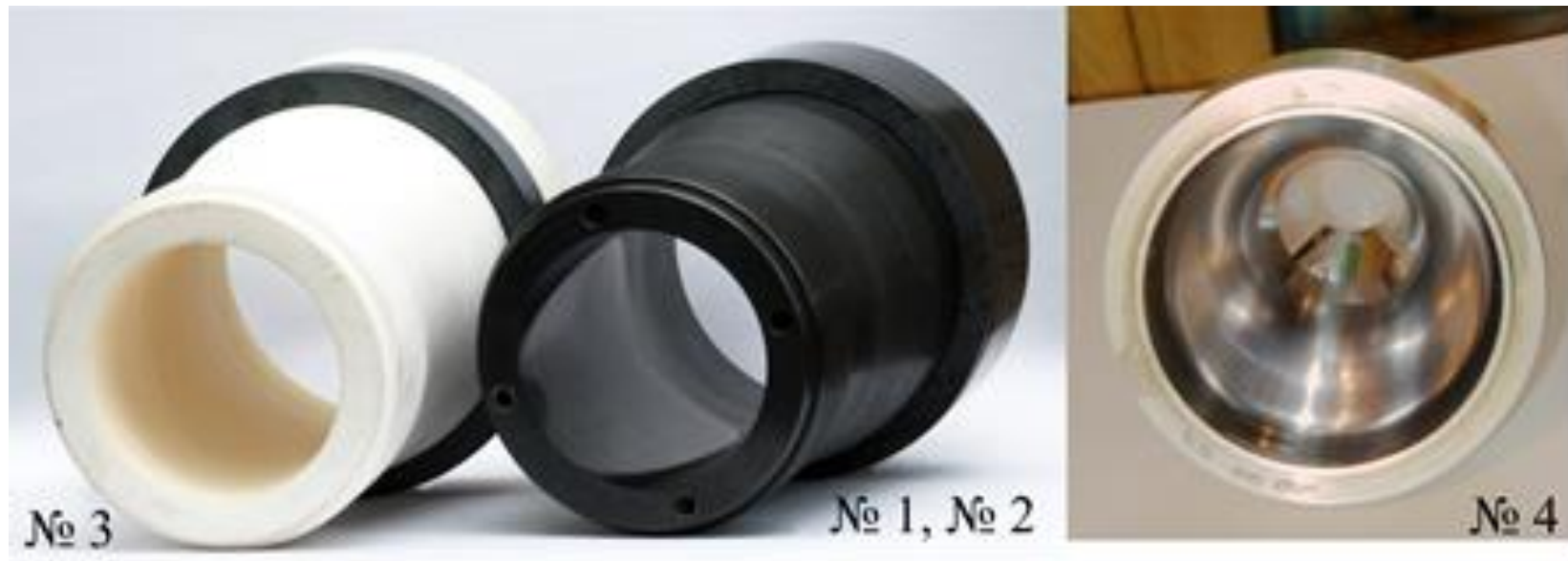
Цель работы

- Исследование структуры и характеристик пульсаций слоя смешения дозвуковой струи $M_a=0.85$
- Выявление влияния пограничного слоя сопла на параметры слоя смешения

Содержание

1. Введение
2. Экспериментальное оборудование
3. Характеристики пограничного слоя на срезе сопла
4. Радиальные и продольные профили уровня пульсаций полного давления
5. Характерные спектры пульсаций полного давления
6. Выводы

Исследуемые сопла



№	Материал	Диаметр на выходе сопла, D_a (мм)	Степень сжатия, s	Степень шероховатости, Δ (мкм)
1	сталь	60	2.15	~5
2	сталь	60	2.15	Турб. - 50÷63
3	Полимерный материал	60	2.15	122÷180
4	сталь	30	8.6	0.5

Сопла имеют профиль Витошинского, диаметр входа сопла $D_{in}=88$ мм, $L=150$ мм

Внутренняя поверхность пластмассового сопла (№ 3)



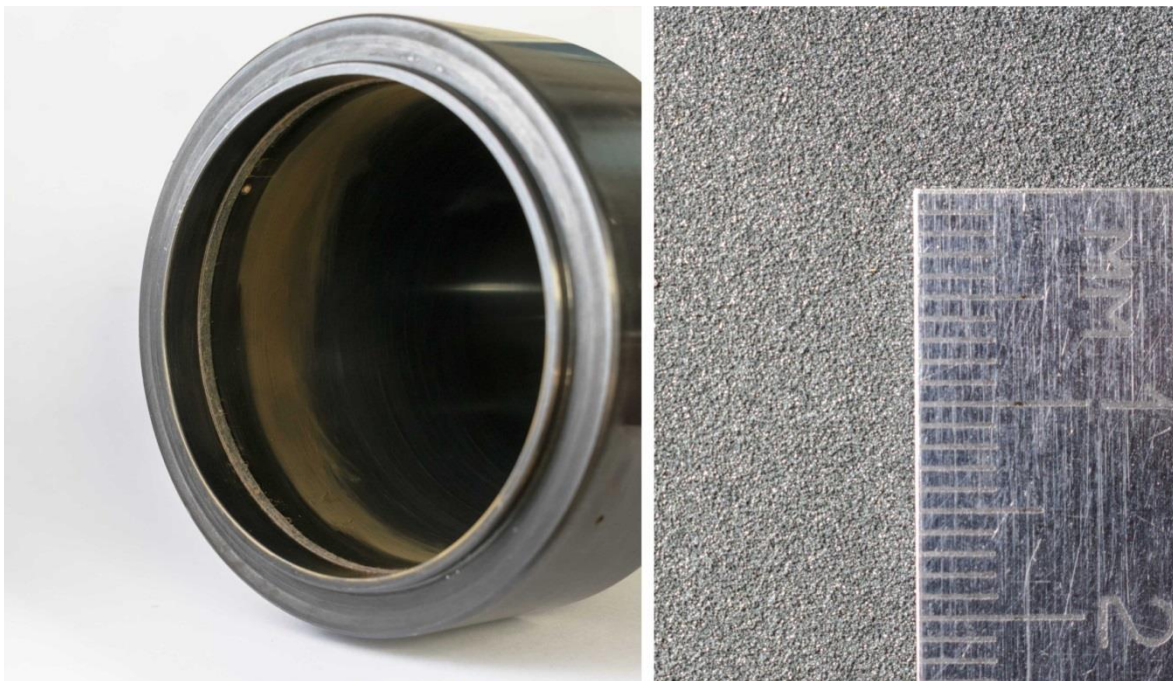
Вход в сопло



Выход из сопла

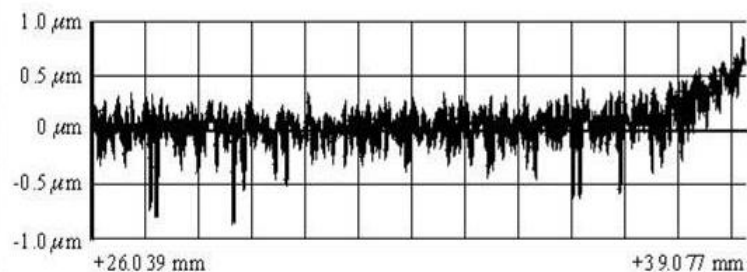
При изготовлении выдержать длину сопла не удалось (сопло № 3 короче сопла № 1, входная часть профиля не известна). Поверхность сопла шероховатая волнистая.

Сопло с турбулизатором (№ 2)



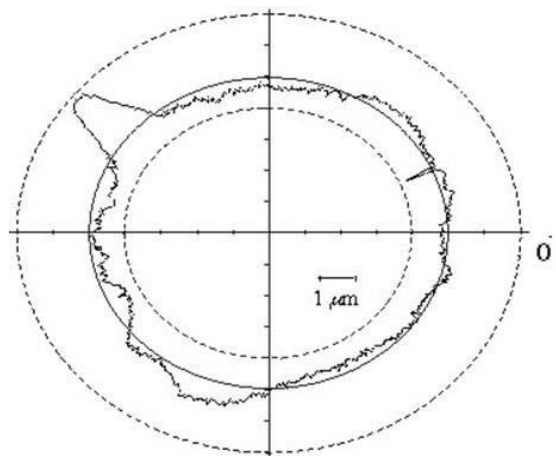
Турбулизатор имеет вид кольца высотой $\Delta \sim 330 \dots 350$ мкм, шириной 2.5 мм. Турбулизатор изготовлен из шлифовальной бумаги “Der Maler” (маркировка по ISO-6344: P240, маркировка по ГОСТ 3647-80: 5-Н, М63; размер зерна 50 ... 63 мкм) и приклеен автомобильным фиксатором резьбы MANNOL Fix-Gewinde hochfest 9926. В соответствии с рекомендациями сотрудников СПбПУ.

Сопло с высоким качеством поверхности (№ 4)



а) Профилированное сопло $Ma = 1.0$; $Da = 30$ мм.

$\Delta = 0.0005$ mm –
roughness (ISO),
 $\Delta/Ra = 3.33 \cdot 10^{-5}$,
(Form Talyserf 120L)



а) Сопло $Ma=1.0$; $Da=30$ мм, $l=3,0$ мм,
некруглость $e = 2.65 \mu m$.

$k_n = 0.0025$ mm -
unroundness,
 $k_n/Ra = 1.67 \cdot 10^{-4}$,
(Talyround 73 PC)



Методика эксперимента

Выполнены:

- Шлирен-визуализация течения.
- Зондирование потока трубкой Пито.
- Измерение пограничного слоя вблизи выходного среза сопла.
- Измерение пульсаций полного давления.
- Измерение ближнего акустического поля струи в камере установки (для контроля достоверности измерения пульсаций полного давления).

Струйный модуль Т-326 ИТПМ СО РАН



Параметры эксперимента:

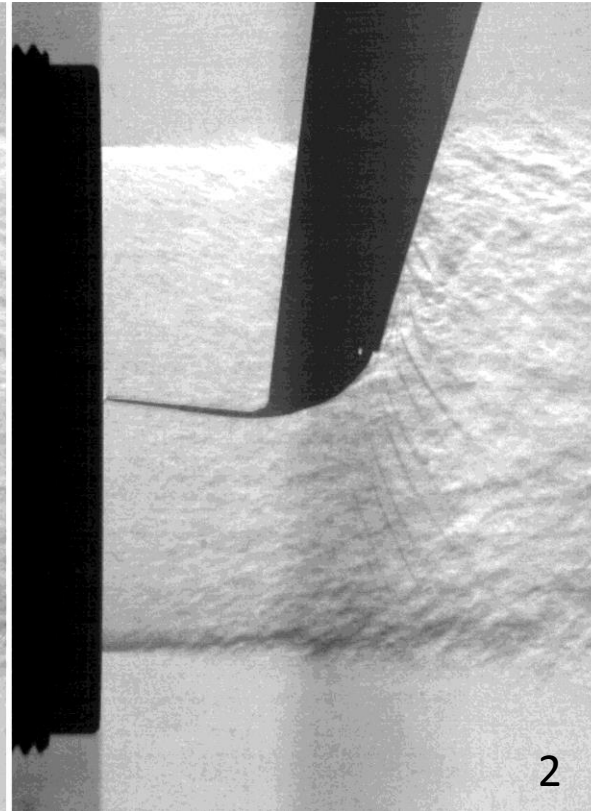
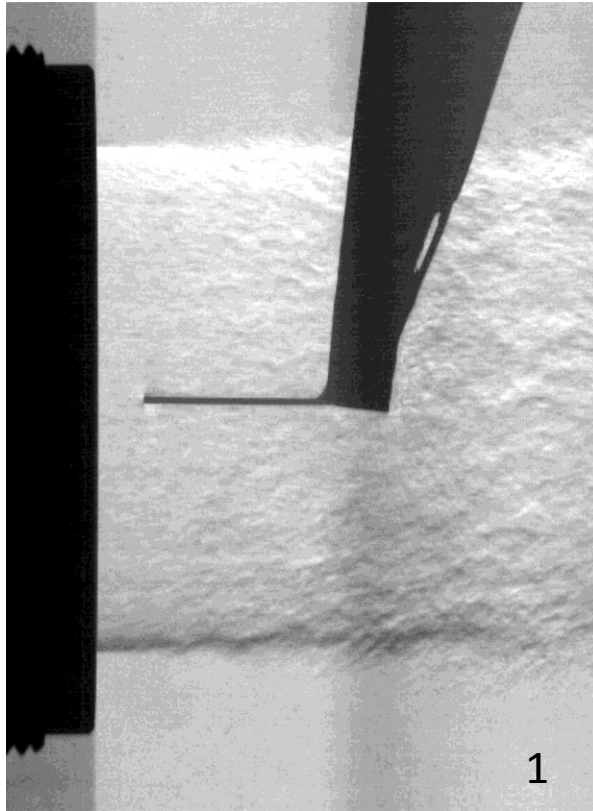
Число Маха на выходе из сопла $M_a=0.85$;

$N_{pr}=1.6$;

$Re_D=9.5 \cdot 10^5$ (для сопел $D_a=60$ мм) и $Re_D=4.75 \cdot 10^5$ (для сопла $D_a=30$ мм);

Давление в камере Эйфеля $p_e=0.91 \dots 0.93$ атм для сопел № 1 – № 3 ($D_a=60$ мм) и 0.97 атм для сопла № 4 ($D_a=30$ мм)

Зондовые измерения в струе и пограничном слое



1. Измерение полного давления в струе проведено трубкой Пито длиной 21 мм и диаметром 0.8 мм.

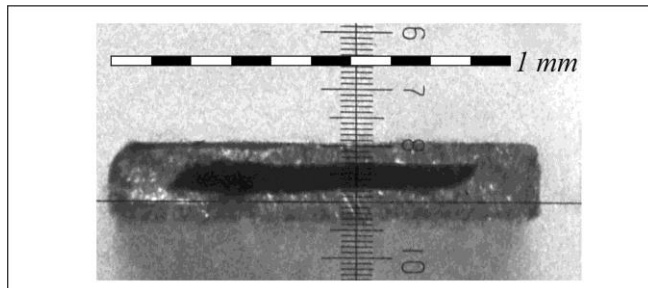
2. Измерение профиля пограничного слоя внутри сопла на его верхней поверхности стенки проведено на расстоянии 1.5 мм от среза зондом измерения полного давления.

3. Торцевая измерительная часть зонда имела высоту 200 мкм и ширину 1100 мкм.

При измерении полного давления и давления в камере Эйфеля использовались датчики ТДМ-А-0.16 (диапазон измерений $0 - 1.6 \cdot 10^5$ Па, погрешность датчика не более 0.2 % от диапазона измерений).

Давление в форкамере установки измерялось датчиком Метран-150-ТАЗ (диапазон измерений $0 - 25 \cdot 10^5$ Па, погрешность датчика не более 0.1 % от диапазона измерений).

Поддерживался режим в диапазоне $N_{pr}=1.597 \dots 1.606$ (за исключением сопла $D_a=30$ мм, где из-за сложности регулировки дросселя установки было $N_{pr}=1.59 \dots 1.66$).



3

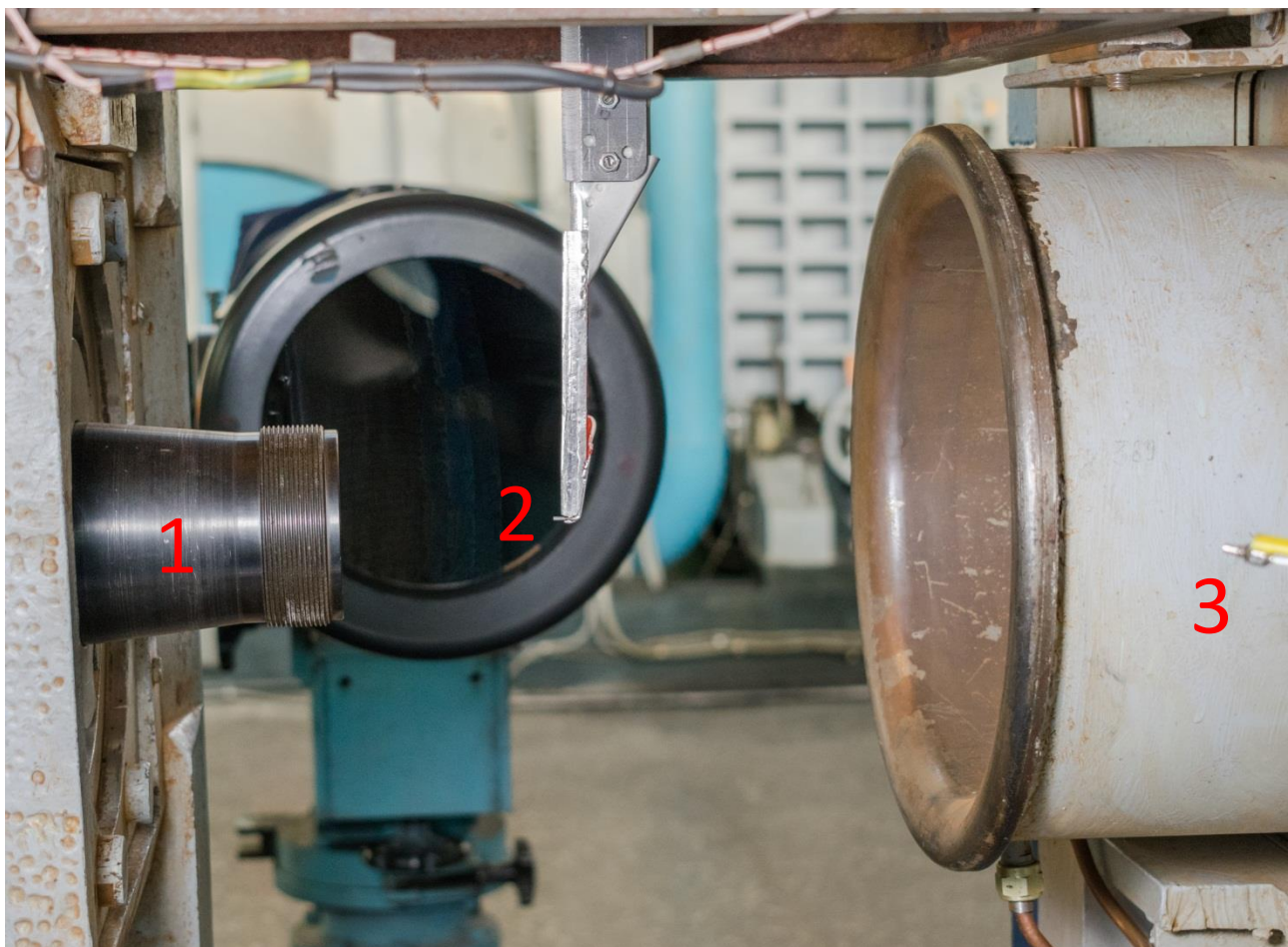
Измерение пульсаций полного давления датчиком А-СЕНС



Датчик абсолютного давления PS-micro SD 0.2 МПа U (-4+4) L2 PC4 0.2. Внешний диаметр корпуса датчика $d_{tr}=3$ мм. Диапазон измерений 0 ... 2 ата. В работе уровень пульсаций определён в диапазоне частот 20 Гц – 20 кГц. Соотношение сигнал/шум порядка $10^1 \dots 10^2$.

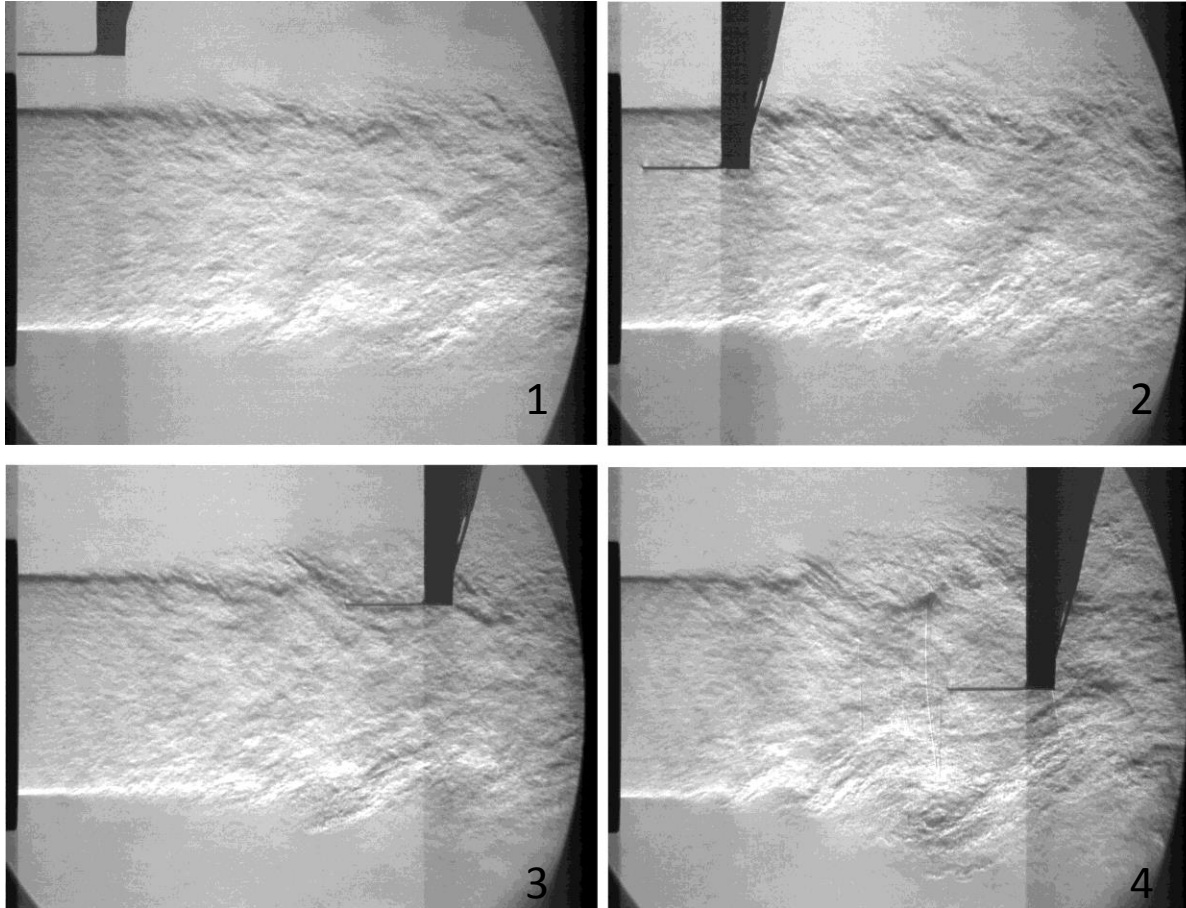


Установка датчика в рабочей части трубы



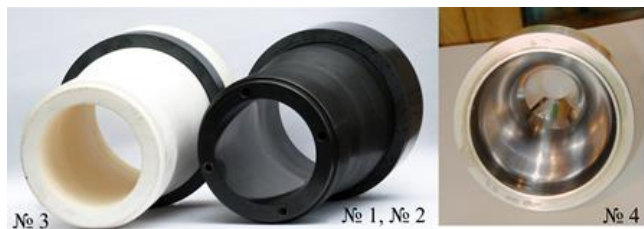
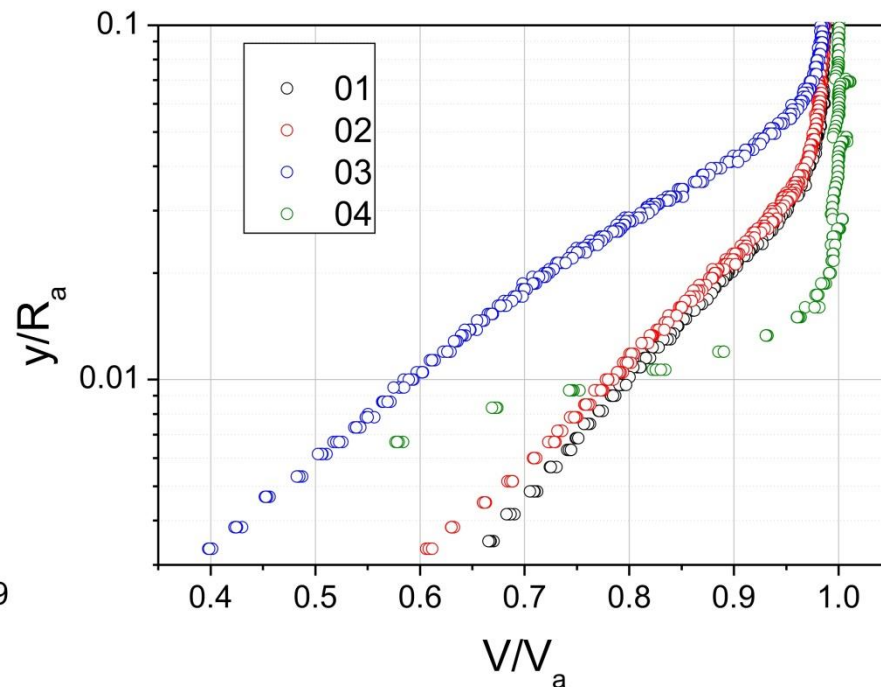
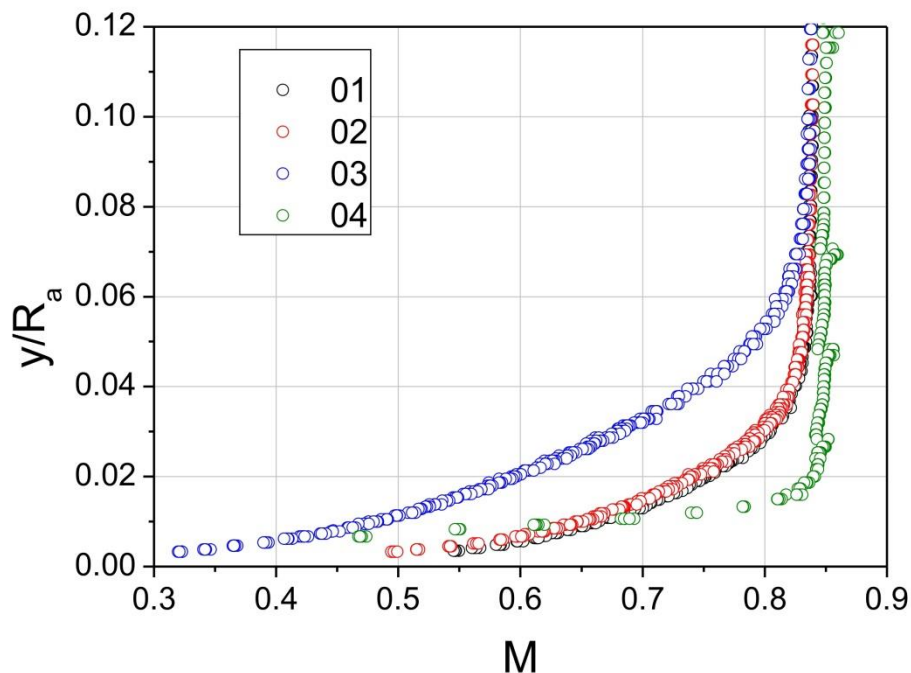
1 – сопло, 2 – подвижный пилон с датчиком измерения пульсаций полного давления в струе, 3 – датчик измерения акустических пульсаций в камере Эйфеля. Минимальный шаг пилона 20 мкм по любому направлению.

Особенности проведения зондовых измерений в высокоскоростной дозвуковой струе



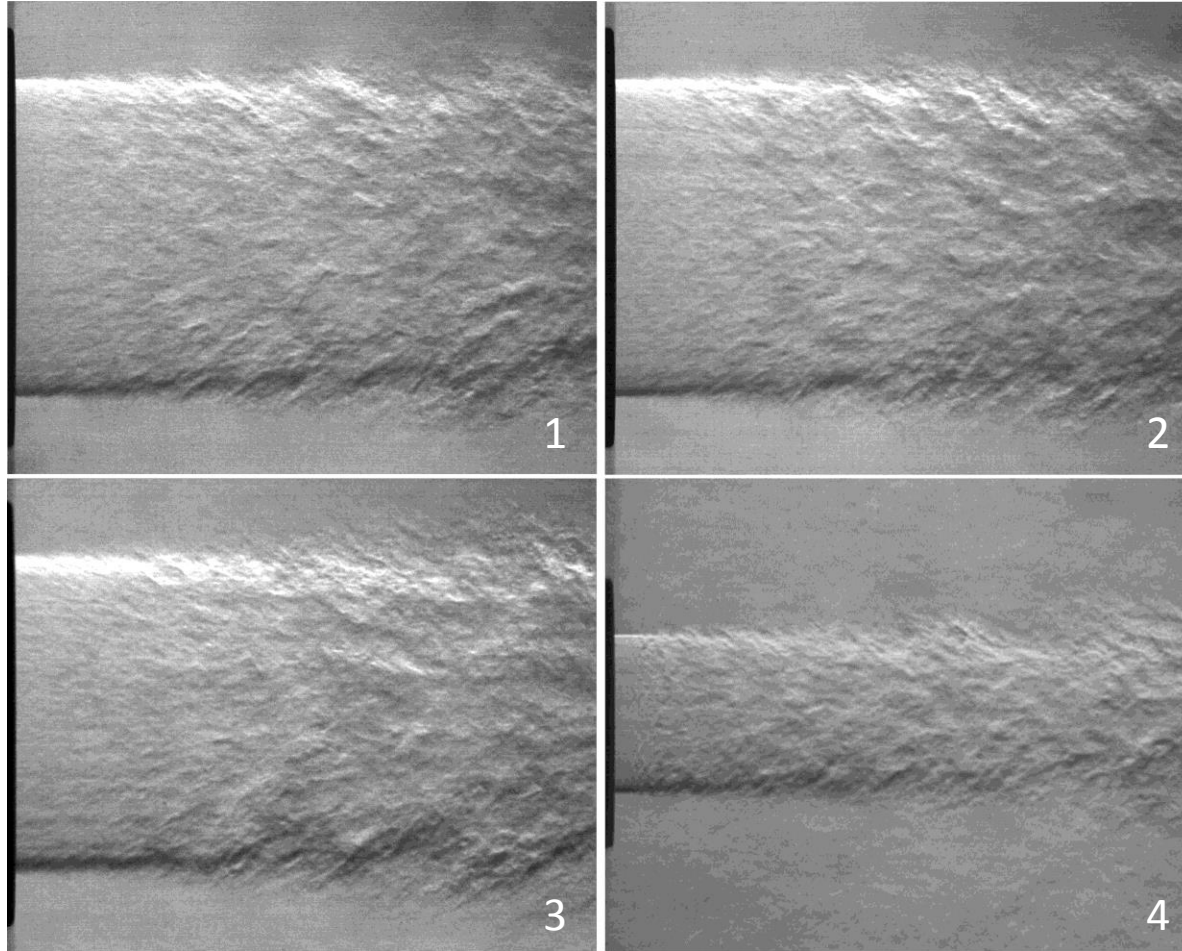
Ввод пилона в струю может привести к возбуждению аэроакустического резонанса (фото 4), что характеризуется дискретными составляющими в частотном спектре пульсаций давления. Наименьшие возмущения от пилонa отмечаются при проведении измерений в верхней части слоя смешения (фото 2, 3).

Пограничный слой на выходе из сопла



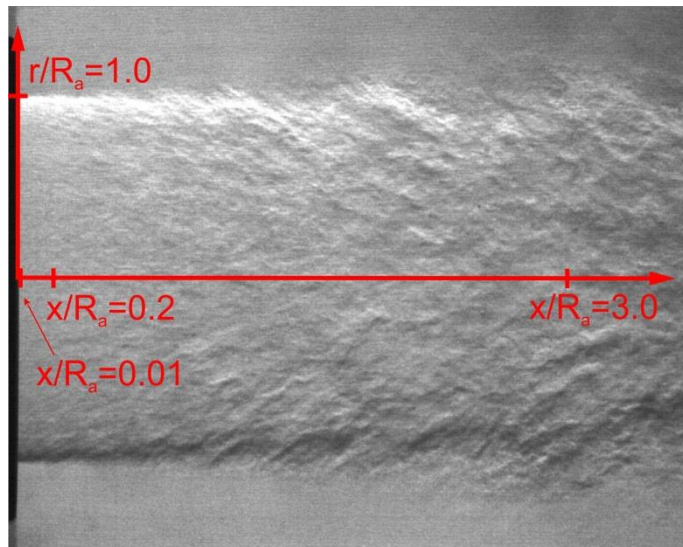
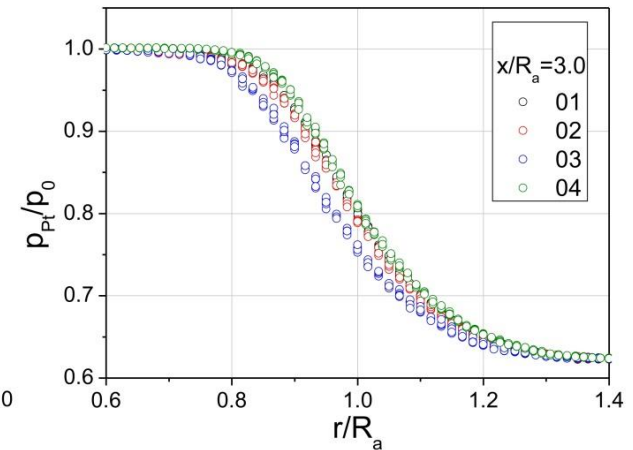
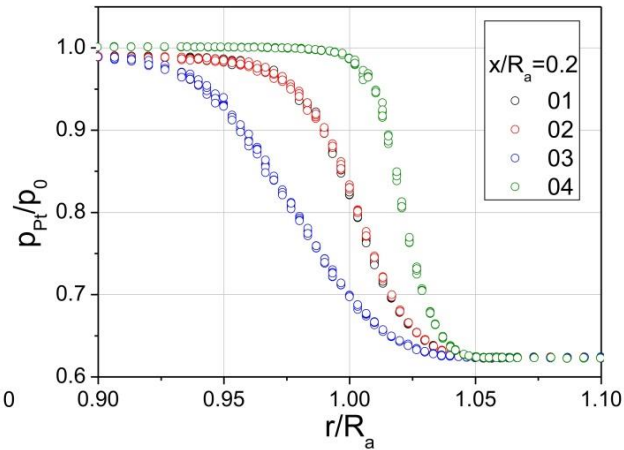
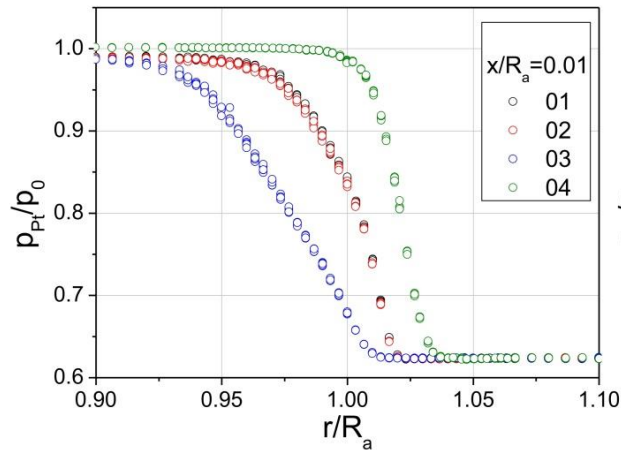
Во все случаях (за исключением сопла $D_a = 30$ мм) профиль турбулентный (имеется хорошо заметный логарифмический подслой турбулентного пограничного слоя). На профиле сопла 04 ($D_a = 30$ мм, зелёный) виден процесс регулирования давления в форкамере.

Шлирен-фотографии течения

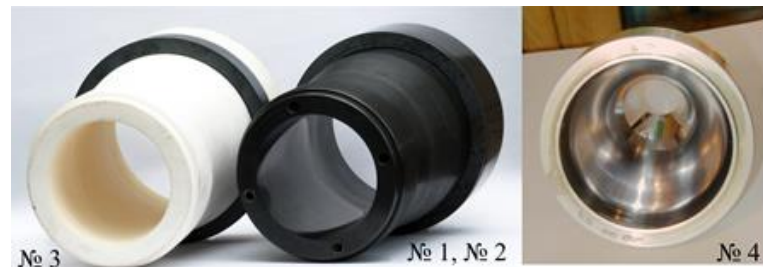


1 – Стальное сопло $D_a = 60$ мм; 2 – Стальное сопло $D_a = 60$ мм с турбулизатором (визуальных отличий от сопла № 1 нет); 3 – Пластмассовое сопло $D_a = 60$ мм (слабое отличие от сопла № 1 в толщине слоя смешения вблизи выходного среза); 4 – Стальное сопло $D_a = 30$ мм.

Радиальные профили полного давления

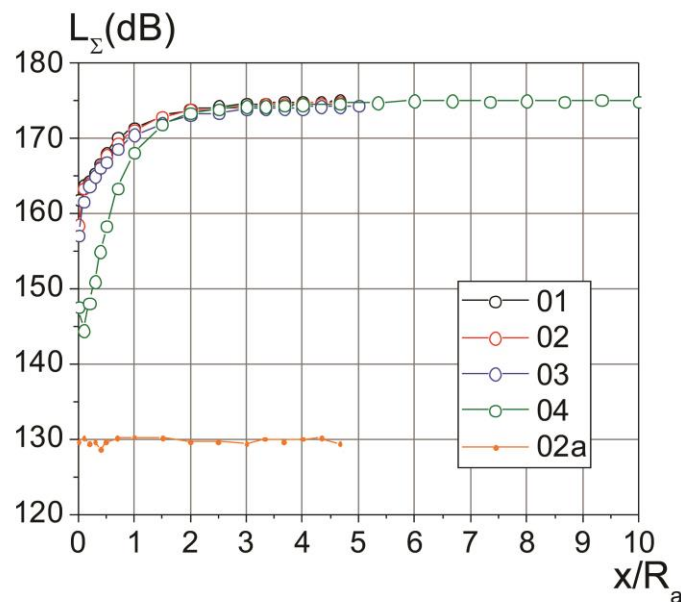
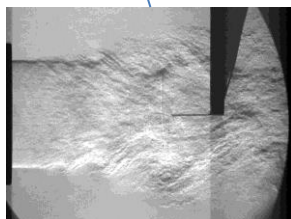
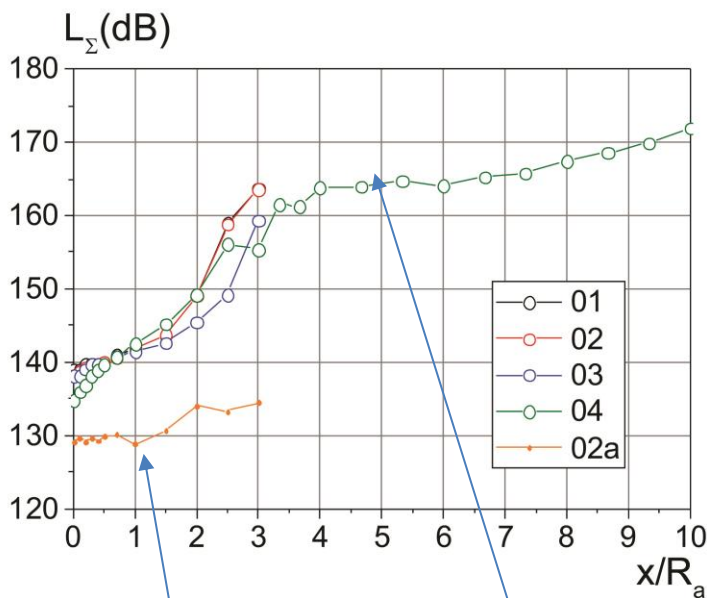


$x/R_a = 0.01$ – вблизи среза сопла;
 $x/R_a = 0.2$ – в слаботурбулентной части слоя смешения;
 $x/R_a = 3.0$ – в развитой турбулентной части слоя смешения.

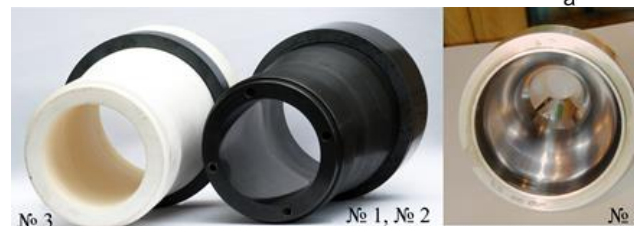


Продольные профили уровня пульсаций полного давления

Осевой профиль



Продольный профиль в слое смешения струи

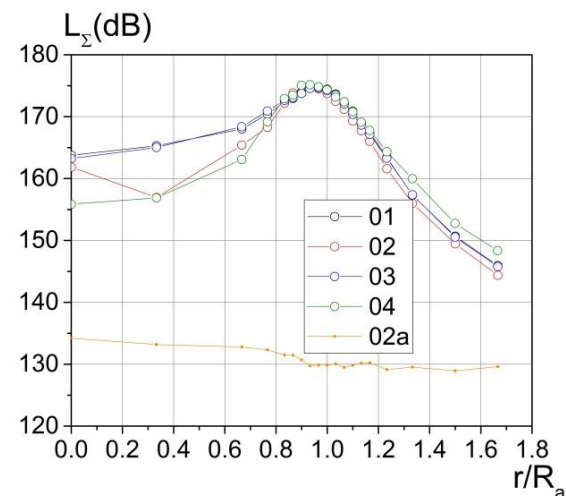
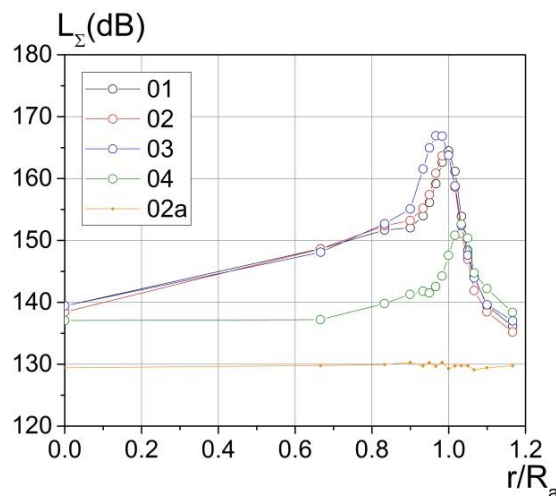
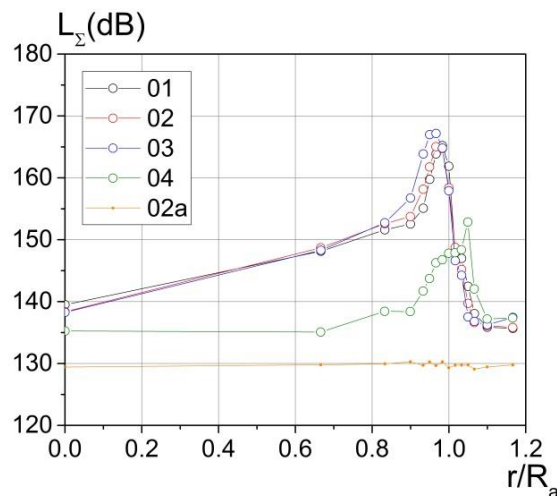


Кружки – измерения пульсаций полного давления в струе датчиком “А-СЕНС”. Маленькие точки – измерения акустического давления в камере Эйфеля датчиком “Inser”.

01 – стальное сопло $D_a=60$ мм; 02 – оно же с турбулизатором; 03 – пластмассовое сопло $D_a=60$ мм; 04 – стальное сопло $D_a=30$ мм; 02а – показания датчика “Inser”.

В тех положениях пилона, при которых измеренное датчиком “Inser” звуковое давление превышает 130 дБ, регистрируется аэроакустический резонанс.

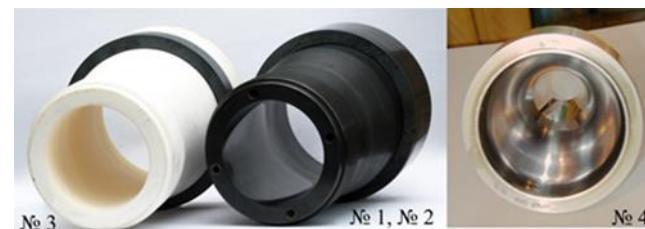
Радиальные профили уровней пульсаций полного давления



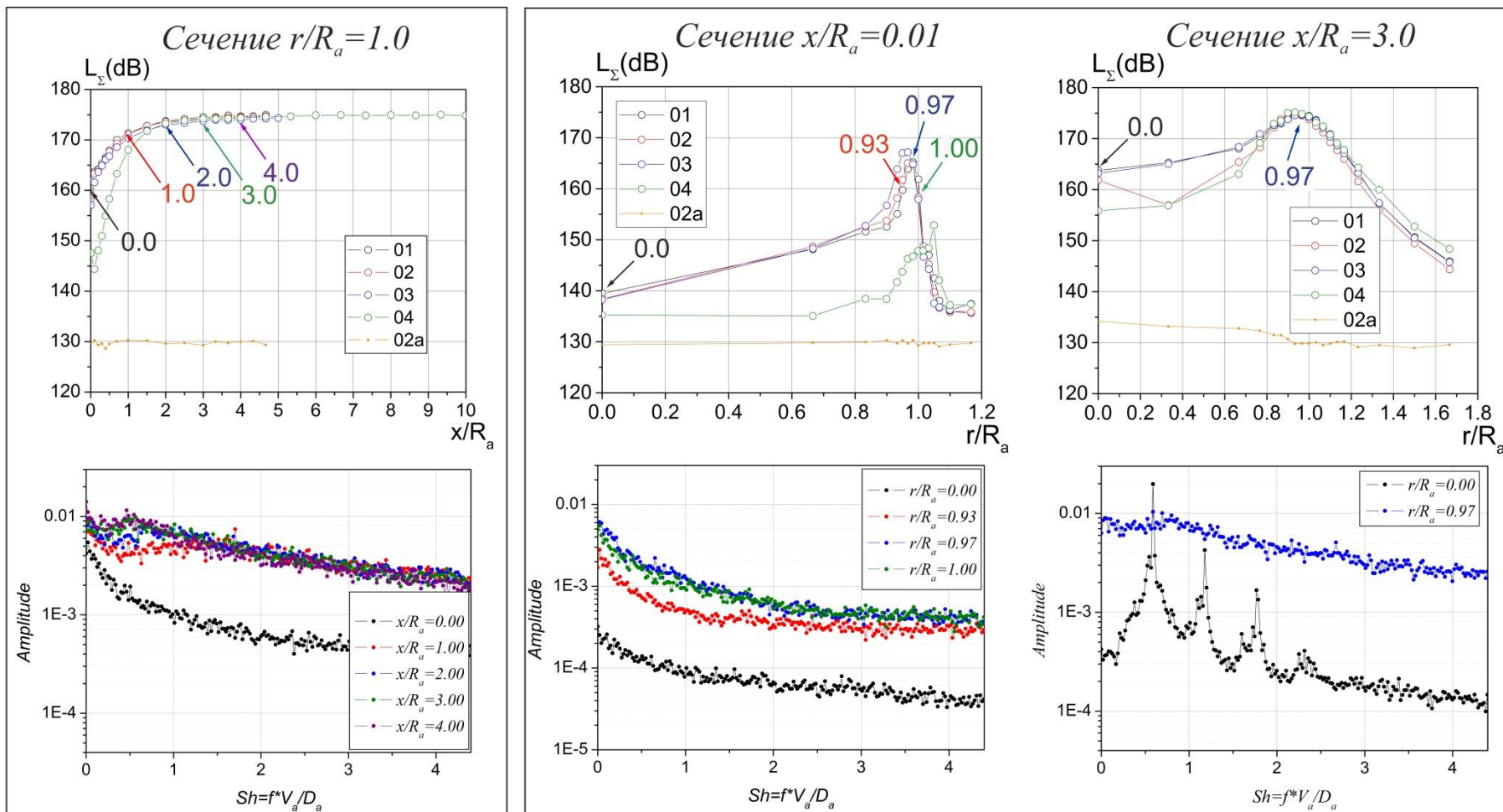
$x/R_a = 0.01$ – вблизи среза сопла;
 $x/R_a = 0.2$ – в слаботурбулентной части слоя смешения;
 $x/R_a = 3.0$ – в развитой турбулентной части слоя смешения.

Кружки – измерения пульсаций полного давления в струе датчиком “А-СЕНС”. Маленькие точки – измерения акустического давления в камере Эйфеля датчиком “Inser”.

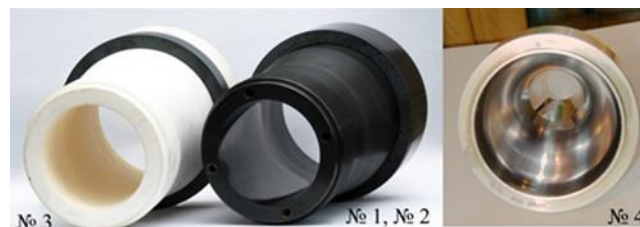
02a – показания датчика “Inser”.



Спектры пульсаций (стальное сопло $D_a=60$ мм № 1)

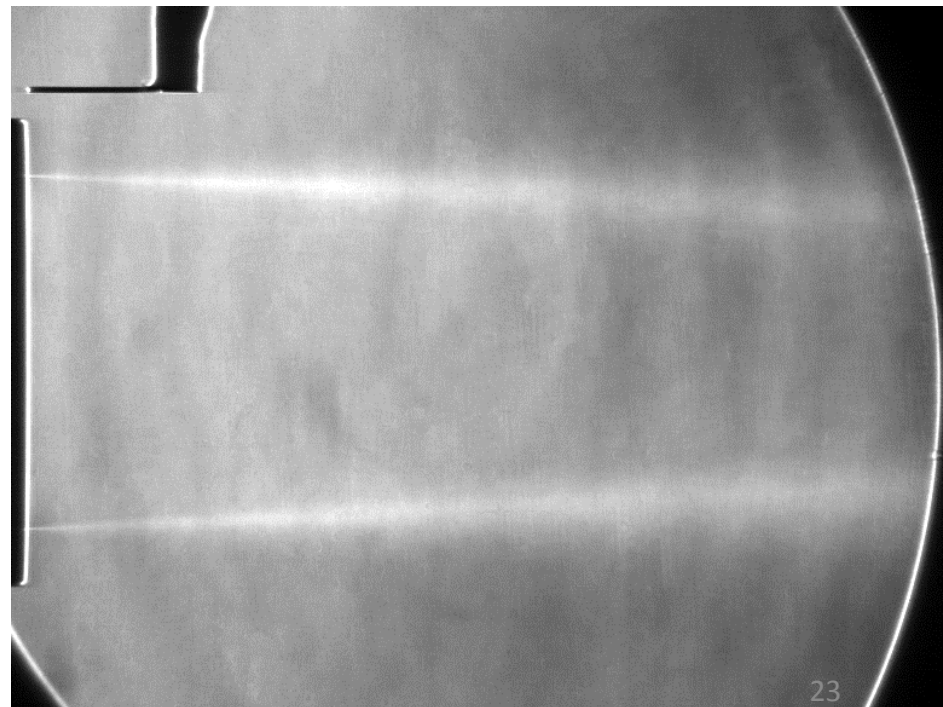
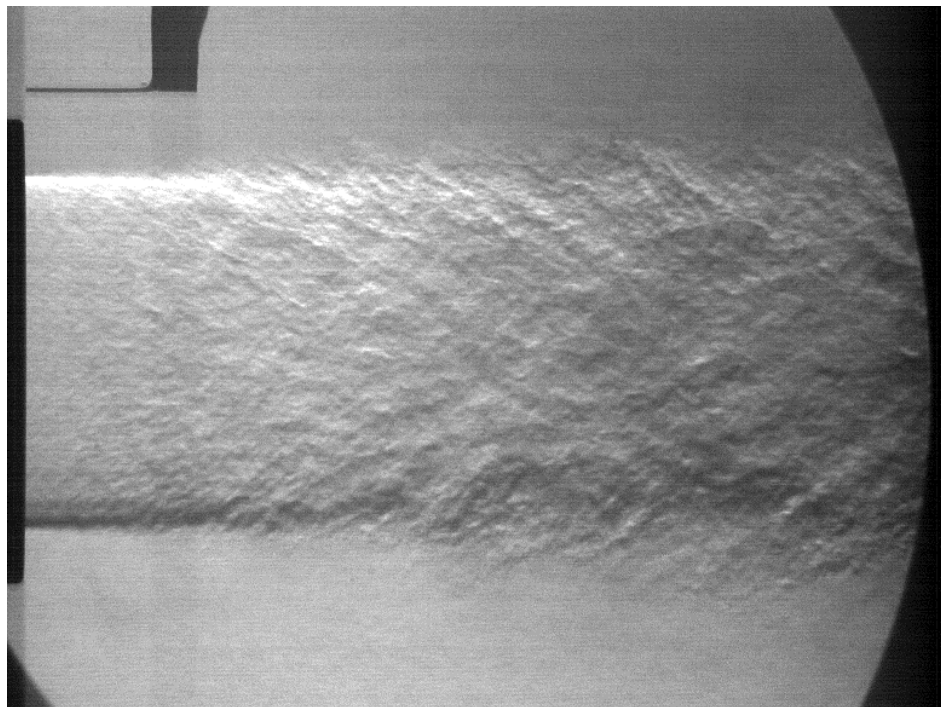


На графике $x/R_a = 3.0$ в точке $r/R_a = 0.0$ (рис. справа внизу, чёрная линия) спектр пульсаций имеет пики, являющиеся следствием возмущений, вносимых опущенным в струю пилоном.



Особенности восприятия теневых фотографий

- Слева шлирен-фотография при горизонтальном положении ножа. Диафрагма 3 мм, экспозиция 4 мкс. Визуализация показывает, что вблизи среза есть слаботурбулентный участок слоя смешения, который далее вниз по потоку увеличивается по толщине.
- Справа шлирен-фотография при вертикальном положении ножа. Диафрагма 1 мм, экспозиция 10 мс. Слой смешения расширяется вниз по потоку равномерно.



Выводы

Пограничный слой в сопле:

- Пограничный слой в соплах $D_a=60$ мм турбулентный.
- Влияние **турбулизатора** на состояние пограничного слоя не замечено.
- Толщина пограничного слоя на выходе из стального сопла $D_a=60$ мм равна $\delta_{1,2} \sim 0.06R_a$, пластмассового сопла $D_a=60$ мм $\delta_{1,2} \sim 0.1R_a$, стального сопла $D_a=30$ мм равна $\delta_4 \sim 0.03R_a$.
- Вероятно, что пограничный слой в сопле $D_a=30$ мм ламинарный.
- Уровень пульсаций полного давления в **ядре потока** для сопел $D_a=60$ мм равен $L_s = 138.2 - 139.1$ дБ (162 – 180 Па), для сопла $D_a=30$ мм - $L_s = 134.9$ (111 Па)

Слой смешения струи:

- Влияние состояния пограничного слоя сопла на толщину слоя смешения и уровень пульсаций в нём почти исчезает на расстоянии двух калибров.
- Уровень пульсаций полного давления в слое смешения струи ($r = R_a$) в развитой турбулентной части равен $L_s = 174 - 175$ дБ (10 – 11 кПа).