

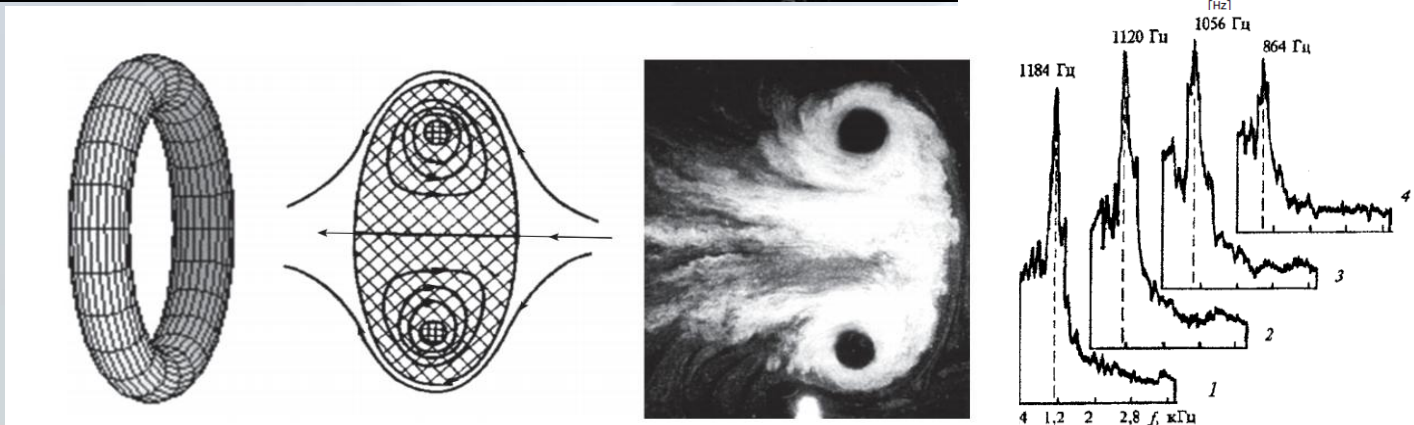
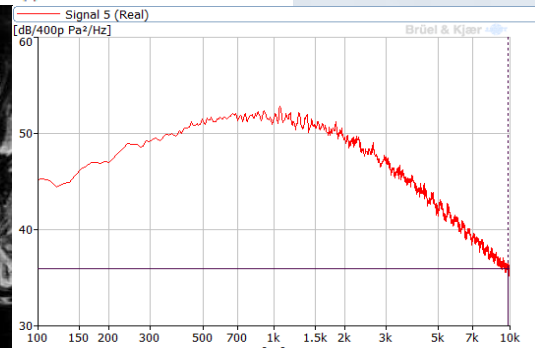
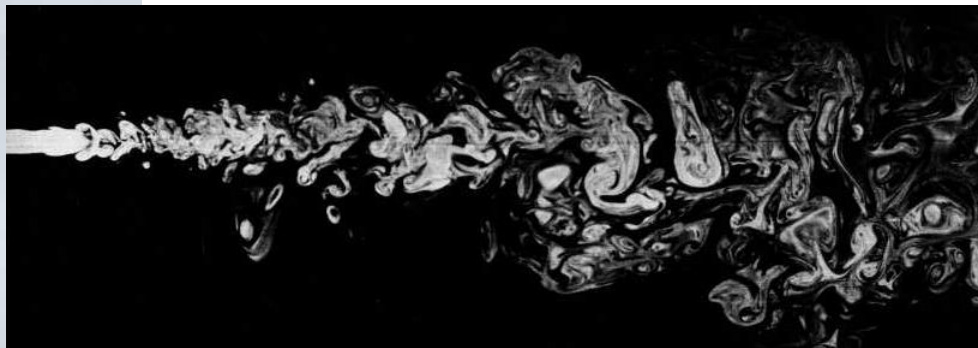
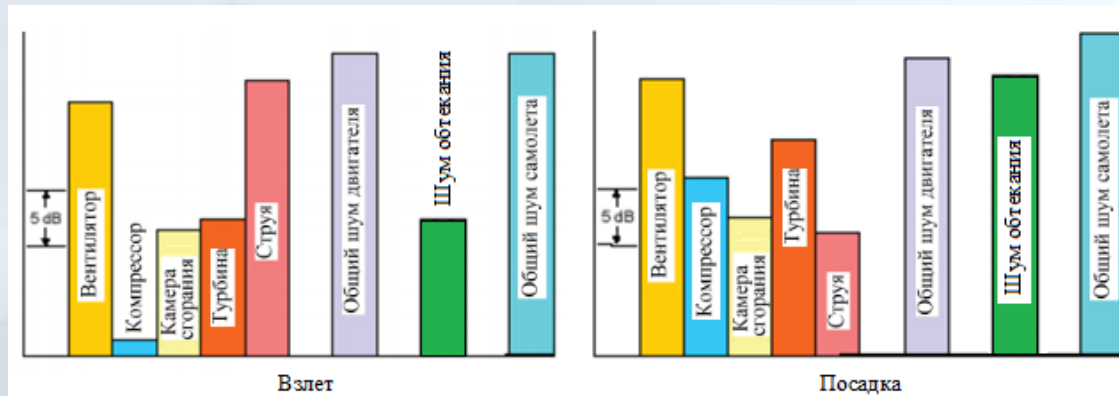


Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Лаборатория механизмов генерации шума и модального анализа

О РАСЧЕТНО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА

И.В. Храмцов
В.Ф. Копьев

Актуальность работы



Цель и задачи

Целью работы является исследование механизмов излучения шума турбулентными вихревыми кольцами.

Задачи работы:

1. Разработка генератора вихревых колец со сменными соплами.
2. Параметрическое исследование аэроакустических свойств вихревых колец с различными начальными скоростями и размерами.
3. Разработка методики численного моделирования формирования и динамики движения вихревого кольца на начальном участке траектории для оценки его размеров.
4. Сравнение частоты пика в шуме турбулентного вихревого кольца с автомоделным решением.

Проблемы исследования аэроакустических характеристик вихревого кольца

- Высокая скорость движения кольца;
- Малое время процесса (<1 с);
- Изменение характеристик вихря во время движения;
- Относительно высокий шум запуска;
- Разброс характеристик вихревых колец;
- Исследования проводятся на малом временном участке $T=31.25$ мс
- Характерный спектр удаётся выделить только с помощью усреднения по ансамблю реализаций.

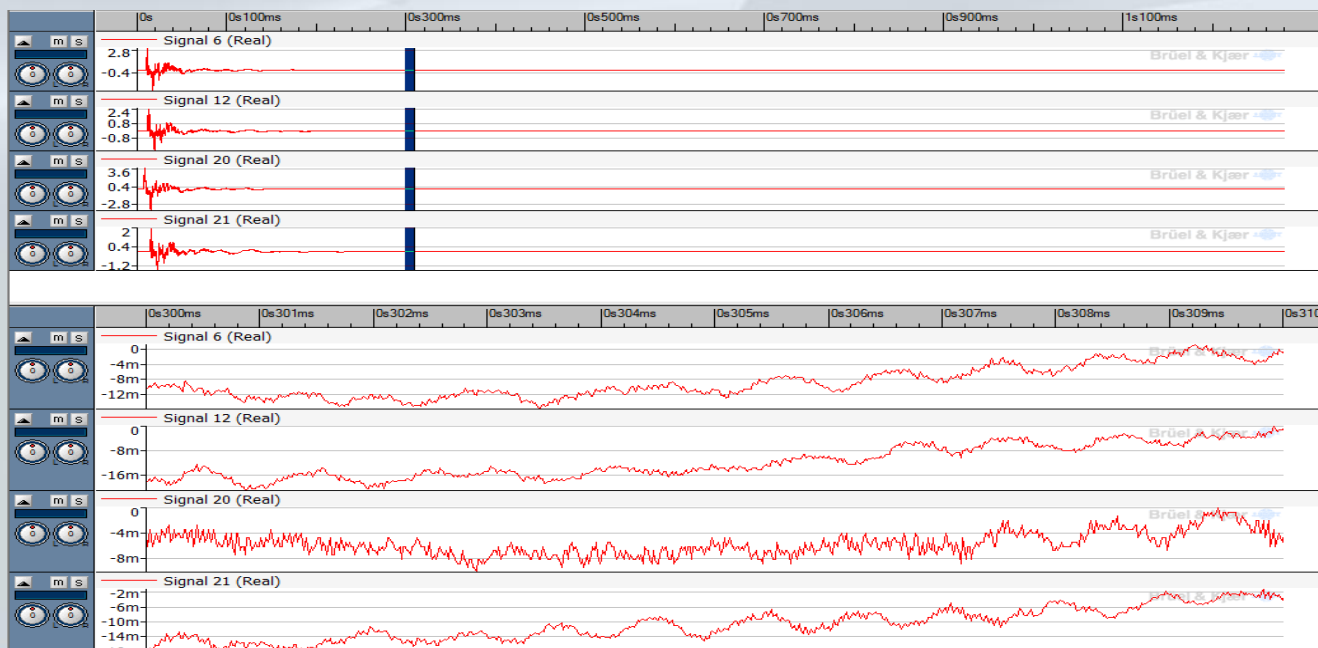
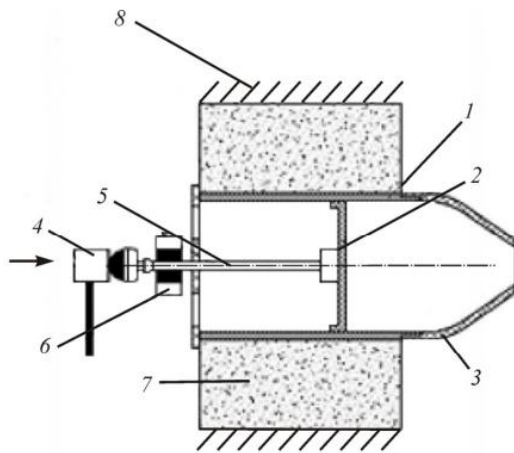
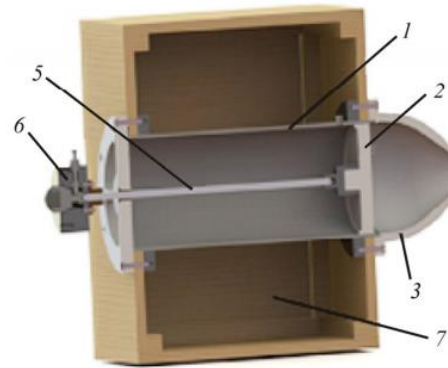


Схема установки формирования вихревых колец

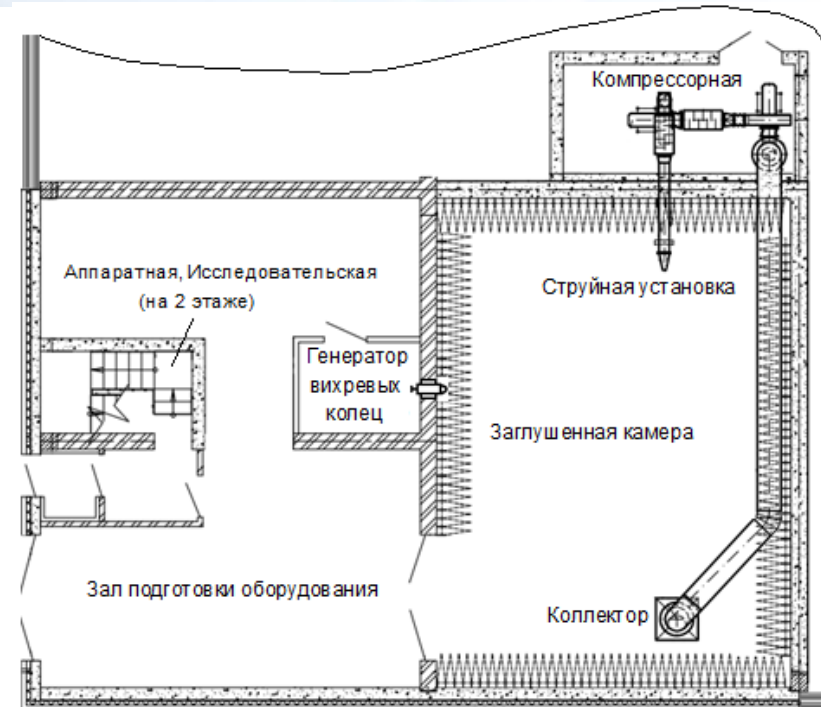


a



б

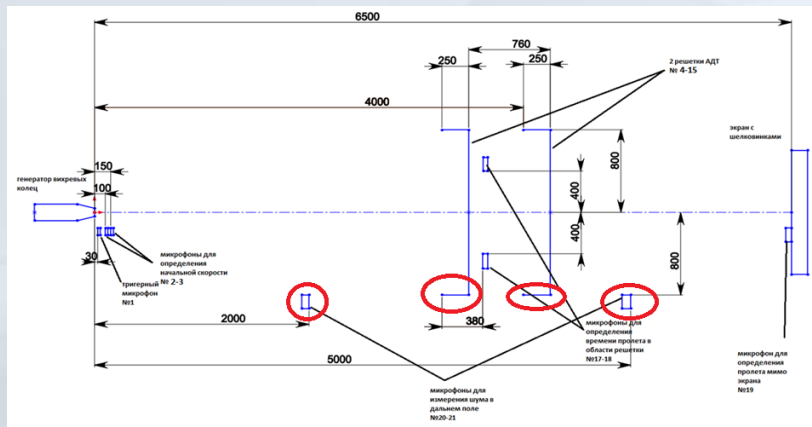
Генератор вихревых колец: *a* – схема; *б* – 3D-модель; 1 – корпус; 2 – поршень; 3 – сопло; 4 – молот; 5 – шток; 6 – замок-ловушка штока; 7 – контейнер с звукопоглощающим материалом; 8 – стена



Сборка генератора вихревых колец: 1 – вибропоры; 2 – полый цилиндр; 3 – звукопоглощающий материал; 4 – фанерный кожух



Методика исследования шума вихревых колец

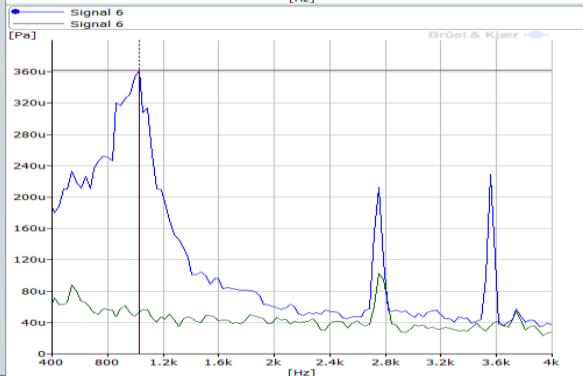
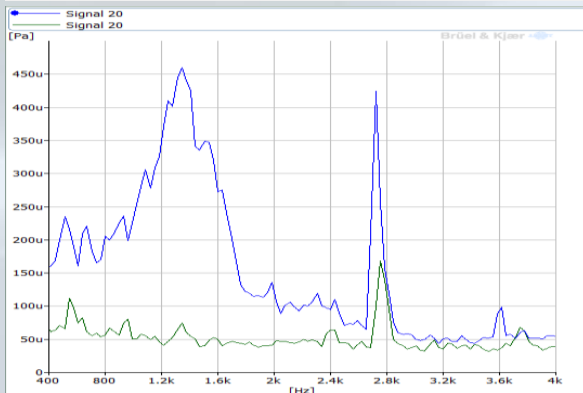
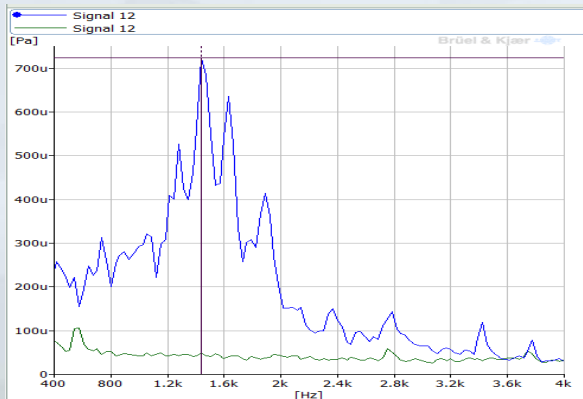


1. Предварительный отбор реализаций для анализа;
2. Дополнительная разбраковка реализаций (по начальной скорости);
3. Для выбранных реализаций выбирается участок времени $T = 31,2$ мс с задержкой от триггерного сигнала $\tau = 120$ мс. На данном участке для каждой реализации проводится преобразование Фурье и получаются спектры;
4. Полученные спектры усредняются по ансамблю реализаций;
5. Проводится сравнение спектров «с кольцом» и фонового шума;
6. Пункты 3-5 повторяются для следующего участка времени $\tau + 31,2$ мс.

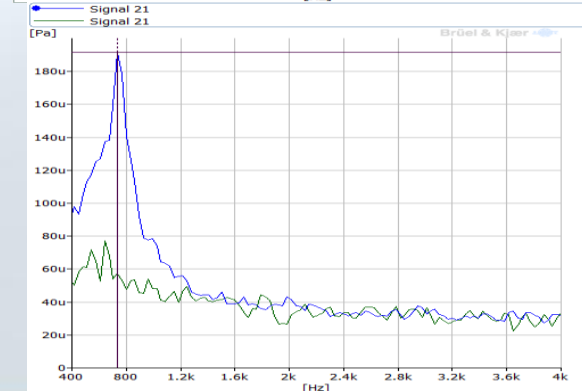
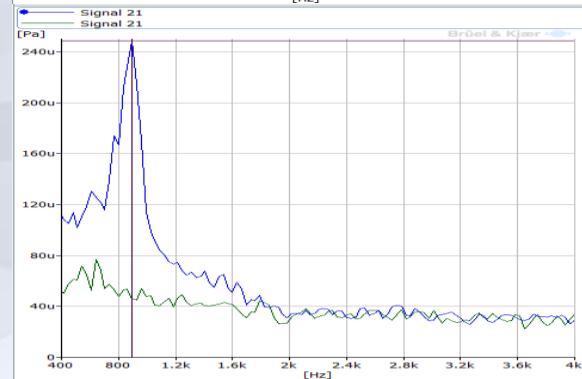
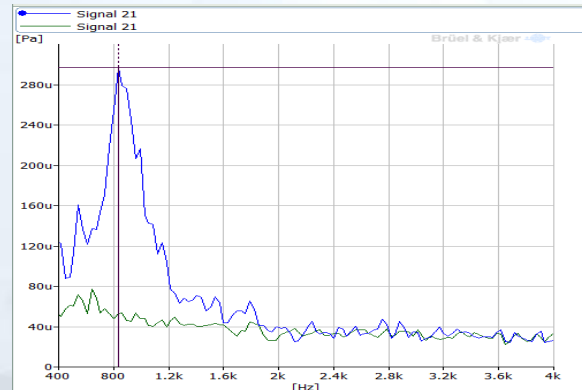
Название сопла	Общее число запусков	Реализаций для дальнейшего анализа
Сопло 30	222	35
Сопло 40	141	110
Сопло 50	113	105

Спектры шума вихревого кольца на основном участке

Задержка 0.21 с



Задержка 0.42 с

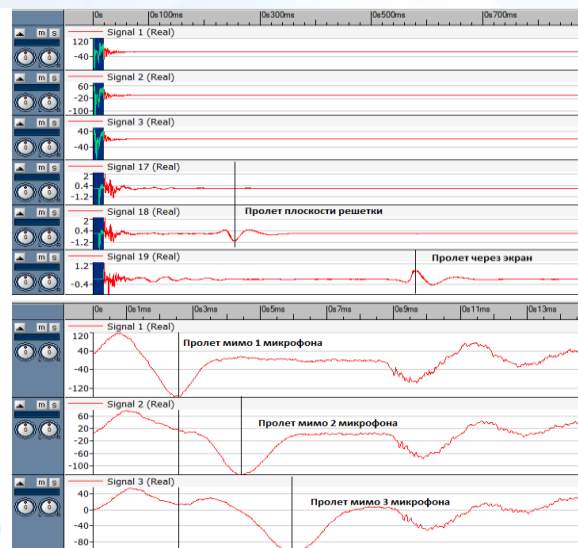
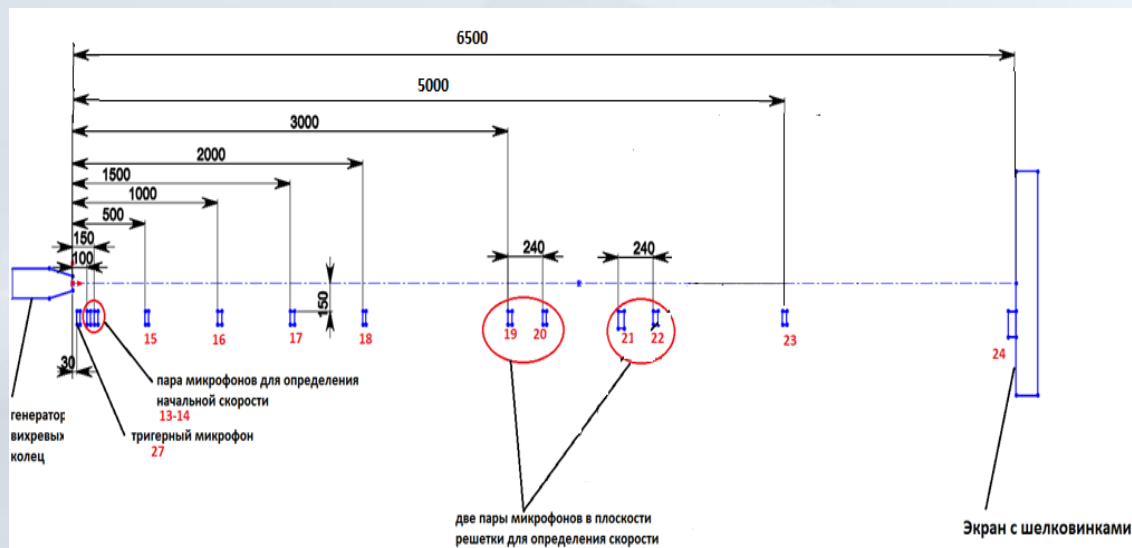


Сопло 30

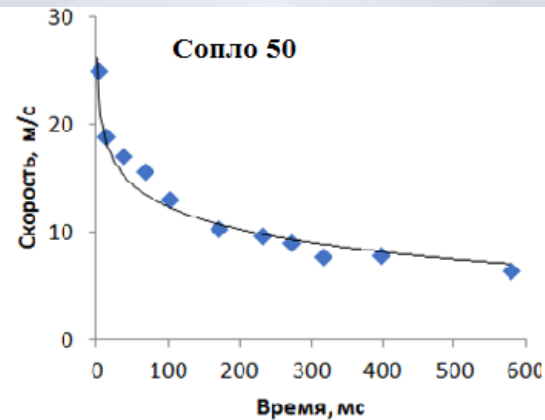
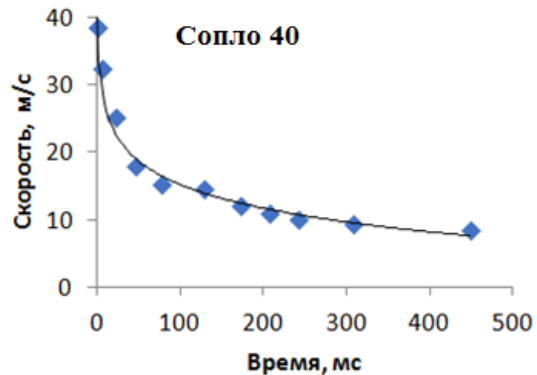
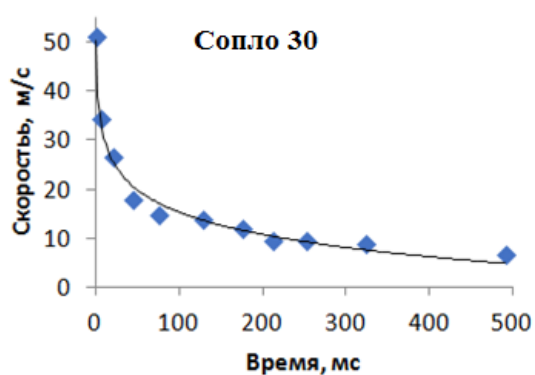
Сопло 40

Сопло 50

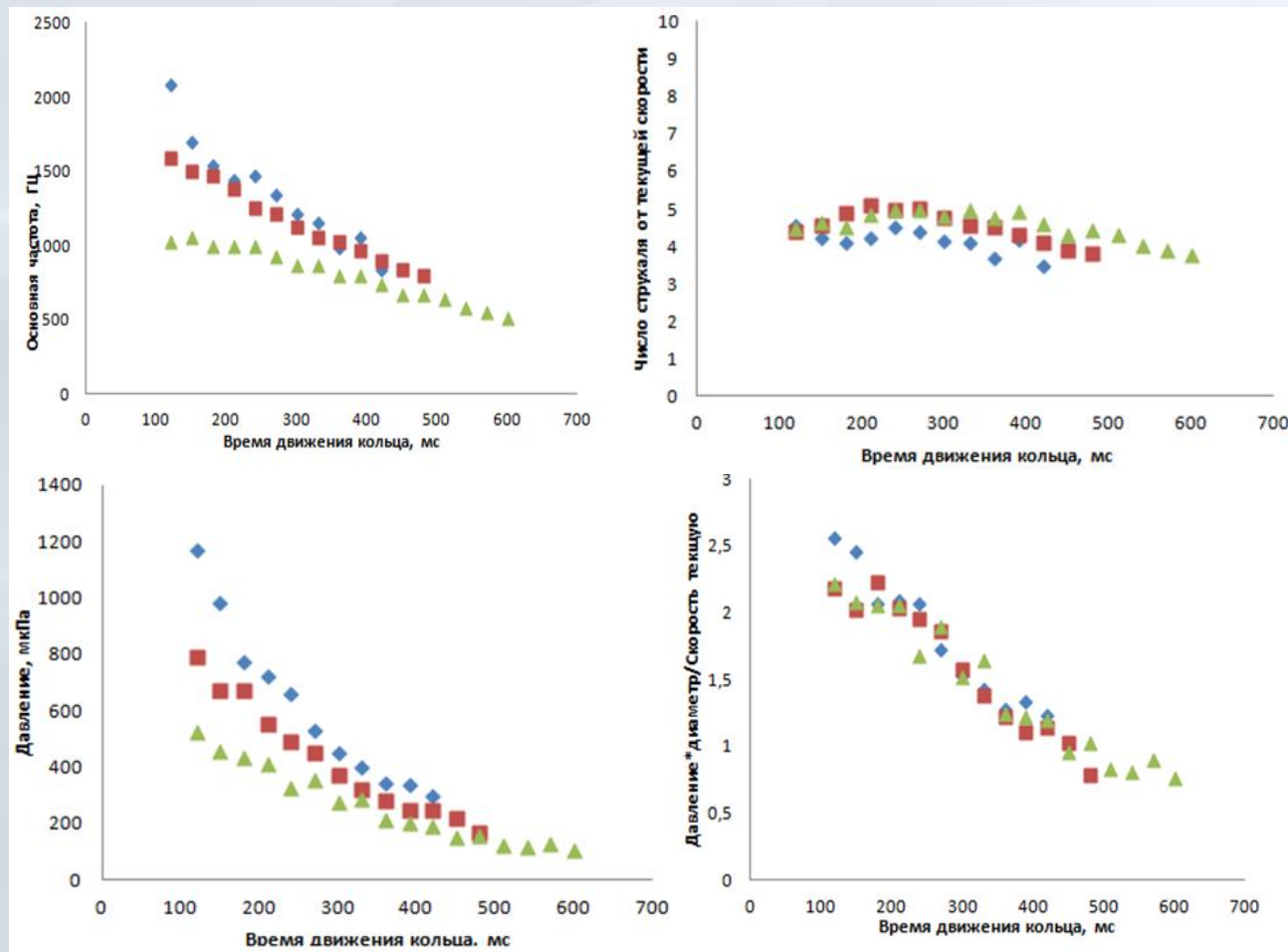
Схема эксперимента по траекторным измерениям



$$V_i = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$



Зависимости частоты и амплитуды в спектре вихревого кольца от времени



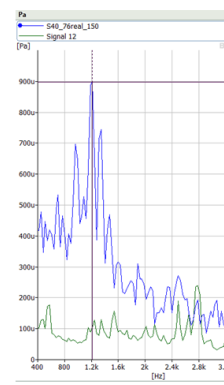
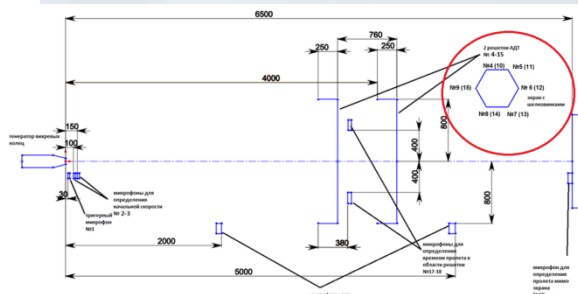
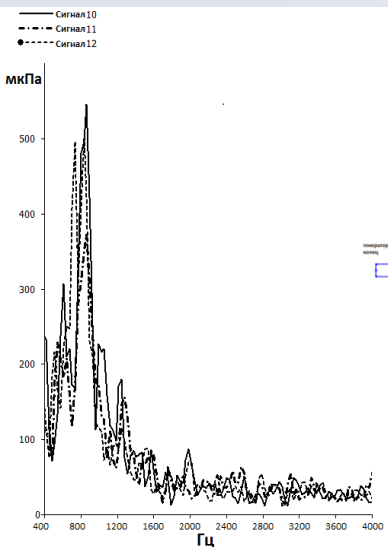
$$St = \frac{f d_c}{V_m}$$

f - частота излучения;
 d_c - диаметр сопла;
 V_t - текущая скорость движения кольца.

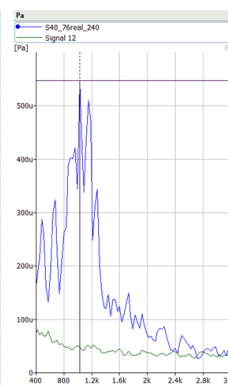
$$P_n = \frac{P d_c}{V_t}$$

P_n – нормированная амплитуда пика в спектре излучения;
 P – амплитуда пика в микропаскалях

Исследование шума одиночного вихревого кольца



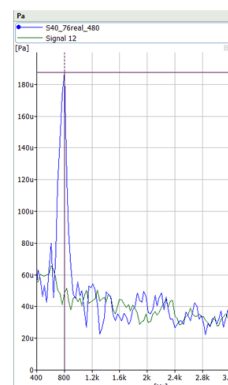
а)



б)

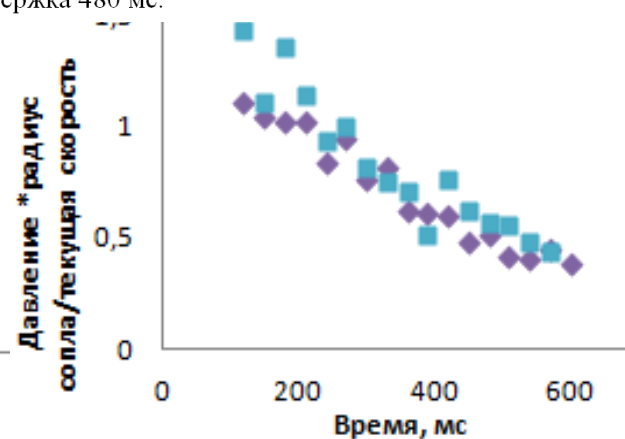
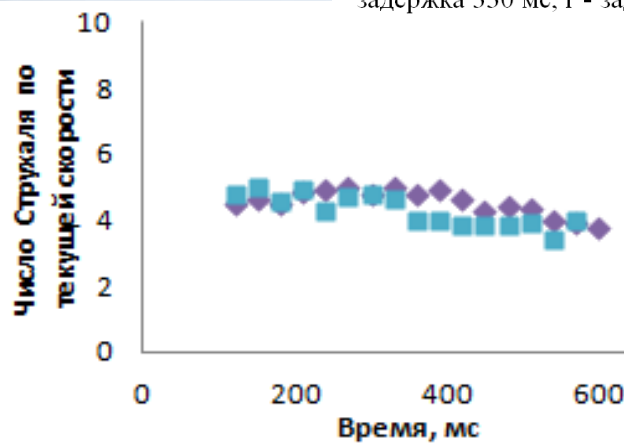
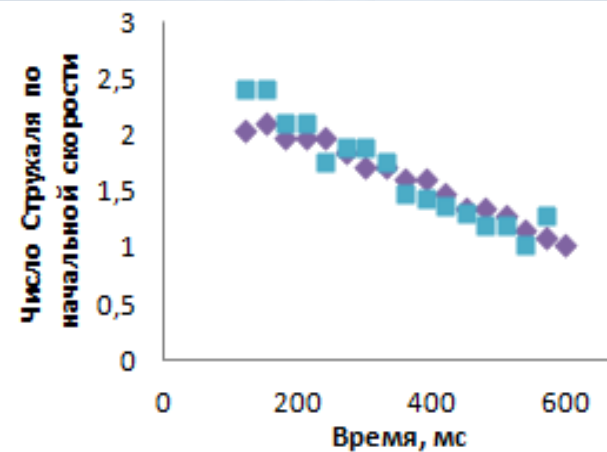


в)



г)

Усредненные спектры шума вихревых колец для одной временной реализации по микрофонам решетки АДТ «с кольцом» (синяя кривая) и фонового шума (зеленая кривая): а - задержка 150 мс; б - задержка 240 мс; в - задержка 330 мс; г - задержка 480 мс.



■ – одиночное вихревое кольцо; ♦ – усредненные значения по ансамблю реализаций

РАССЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ПИКА В ШУМЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА

Для исследуемых тонких вихревых колец ($\mu = a/R \approx 0,12$) звукообразующими пульсациями являются колебания ядра с частотой:

$$\omega_m = \frac{\Omega_0}{2} \quad (1)$$

где m – номер моды;

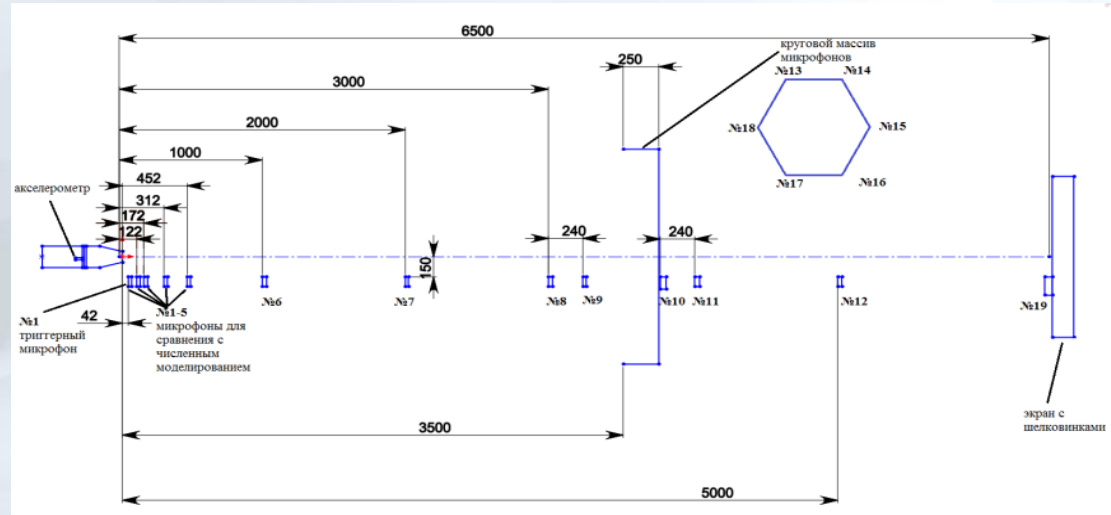
Ω_0 – значение завихренности в ядре

Если выразить собственную частоту таких колебаний через измеряемые в эксперименте величины скорости движения кольца V , радиуса кольца R и относительного размера ядра вихря $\mu = a/R$, где a – радиус ядра вихревого кольца, то используя известное выражение для скорости кольца:

$$V = \frac{\Omega_0 a \mu}{4} \left(\ln \frac{8}{\mu} - \frac{1}{4} \right)$$

выражение (1) приводится к виду:

$$\omega_m = \frac{2}{\mu^2 c(\mu)} \frac{V}{R} \quad \text{где} \quad c(\mu) = \ln \frac{8}{\mu} - \frac{1}{4}$$



При этом, V , R и μ – неизвестны.

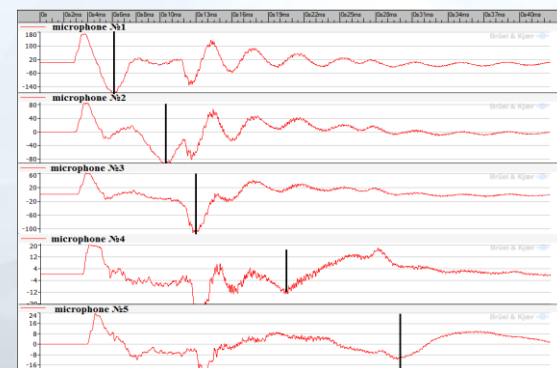
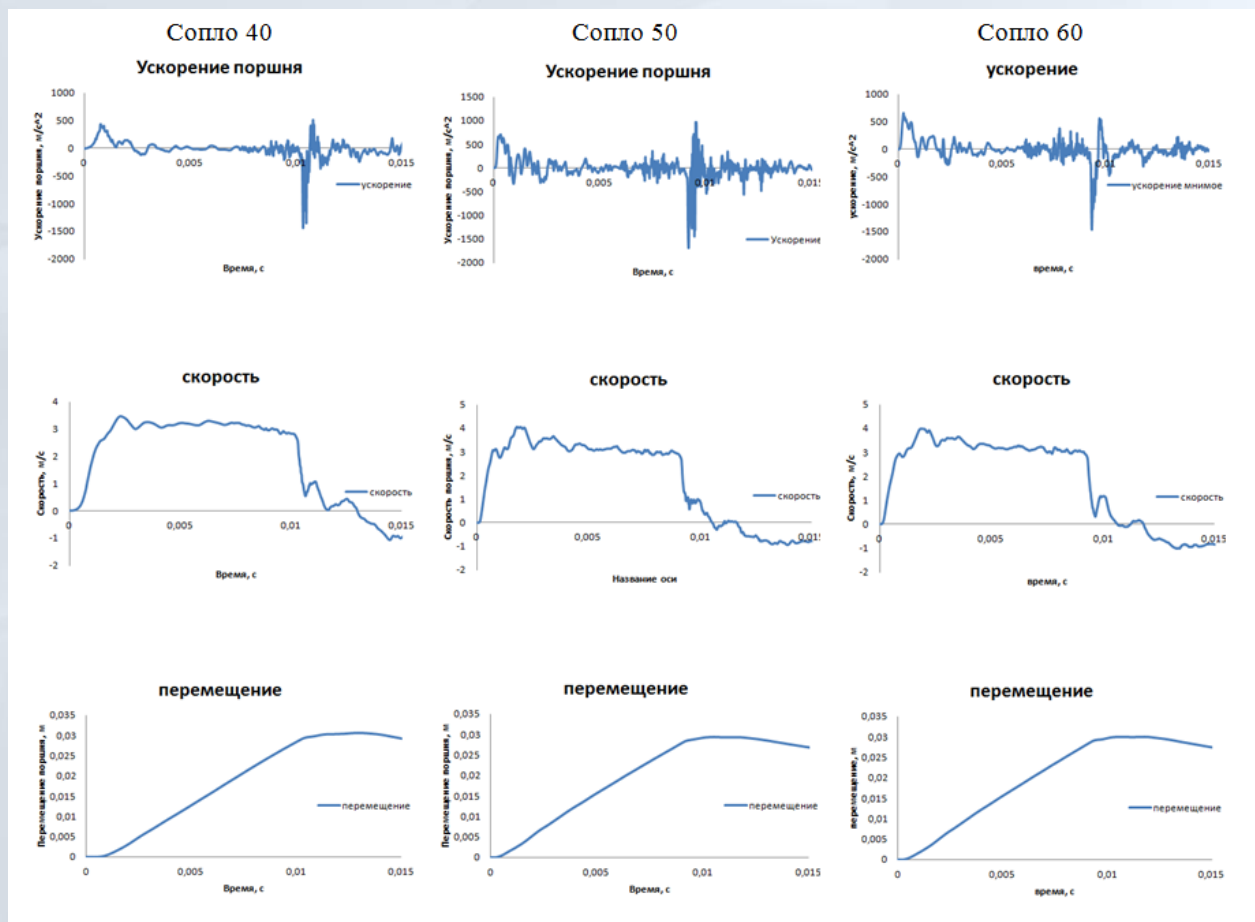
$$L(t) = \frac{R_0}{\alpha} \left[\left(1 + \frac{4\alpha V_0}{R_0} t \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right];$$

$$V(t) = V_0 \left(\alpha \frac{L(t)}{R_0} + 1 \right);$$

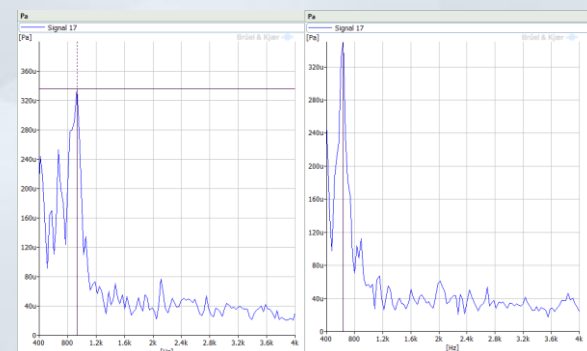
$$R(t) = R_0 + \alpha L(t),$$

R_0 , V_0 – начальный радиус и начальная скорость вихревого кольца соответственно; α – коэффициент скорости расширения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

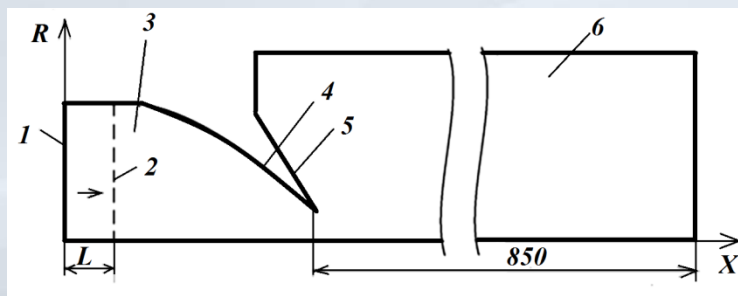


Зависимости давления от времени на траекторных микрофонах для кольца, образованного с помощью сопла 60 мм

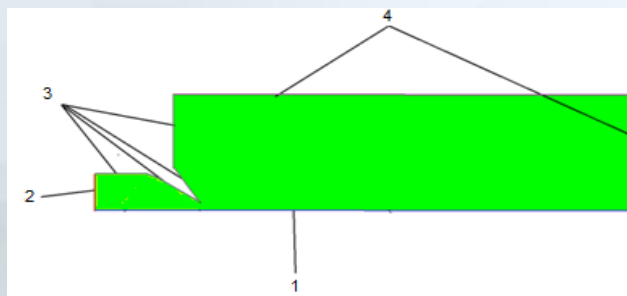


Спектры шума вихревого кольца, образованного с помощью сопла 60 мм: а) – задержка от момента запуска 210 мс; б) – задержка 420 мс

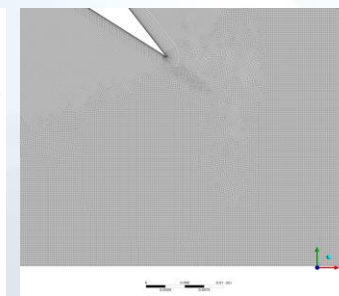
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА



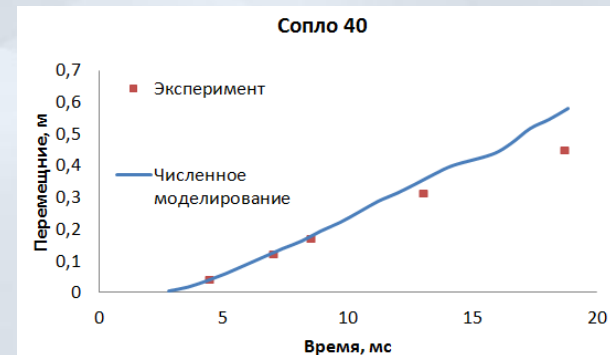
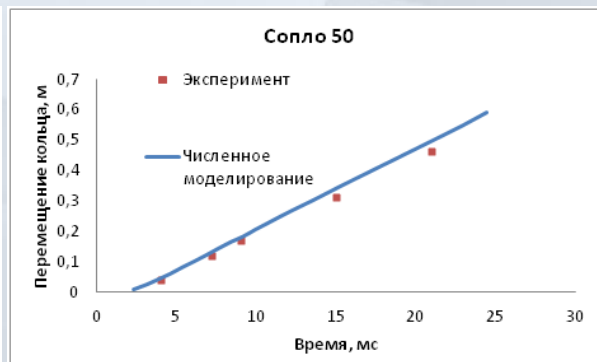
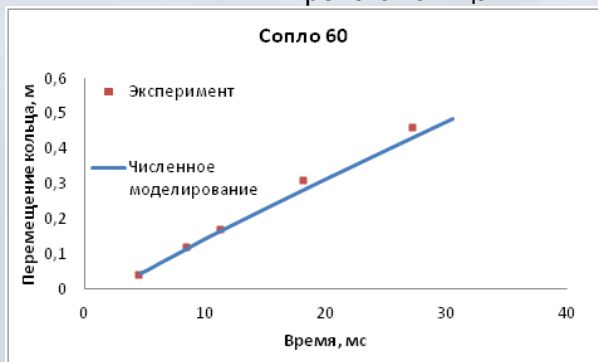
Геометрическая модель расчетной области:
 1 – стенка подвижного поршня; 2 – остановка поршня; 3 – внутренняя область генератора; 4 – внутренняя стенка сопла; 5 – внешняя стенка сопла; 6 – область движения вихревого кольца



Граничные условия: 1 – ось;
 2 – подвижная стенка; 3 – стенка;
 4 – выход

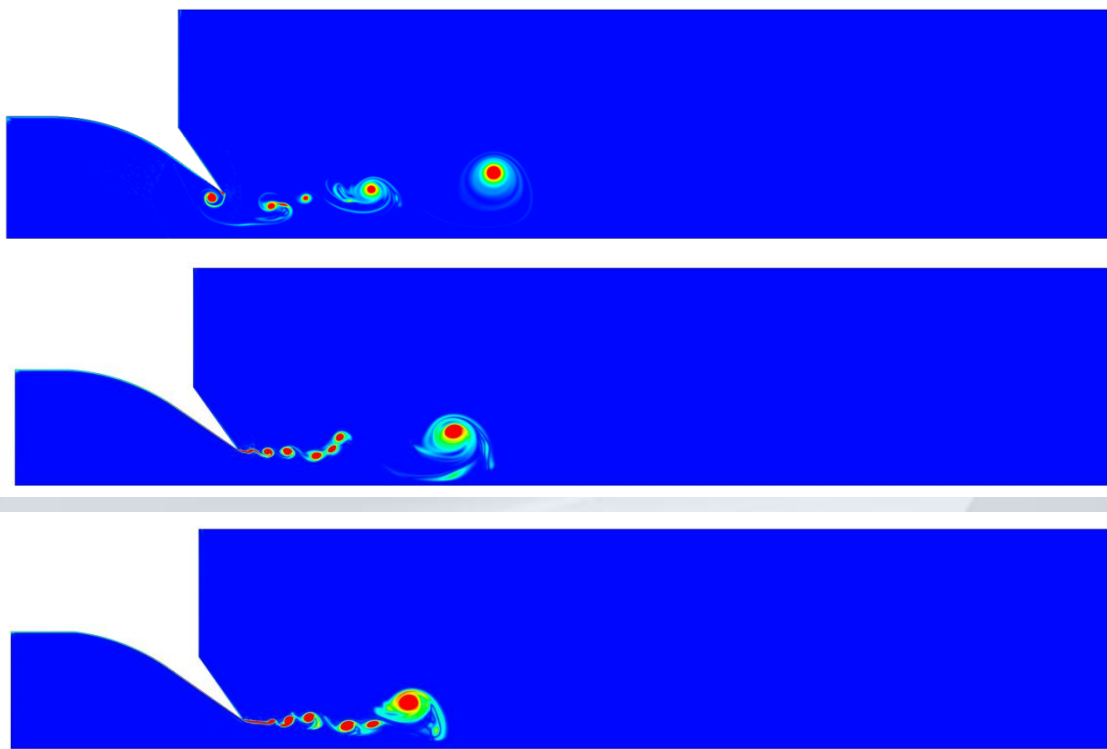


1 000 000 вычислительных ячеек
 $y^+ < 1$
 $\Delta h = 0,25$ мм

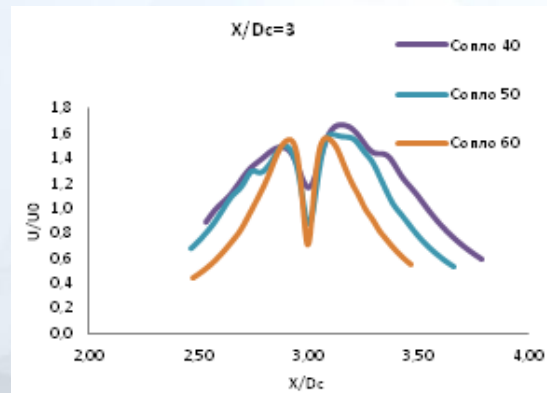
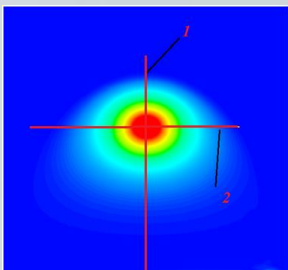


	Сопло 60	Сопло 50	Сопло 40
$V_{орасч}, \text{ м/с}$	17,62	28,11	32,7
$V_{оэсп}, \text{ м/с}$	17,85	27,77	33,33

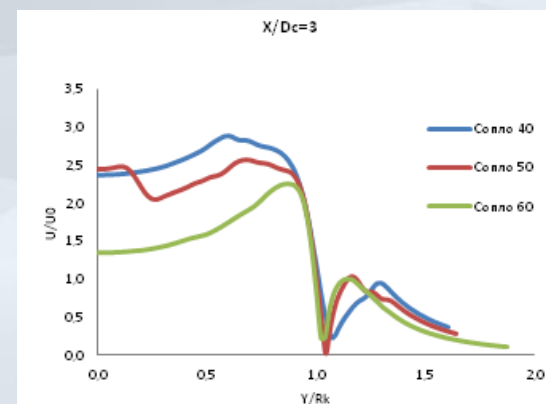
ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ЯДРА ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА



Распределение завихренности при прохождении вихревым кольцом точки с координатами $X/D_c=3$

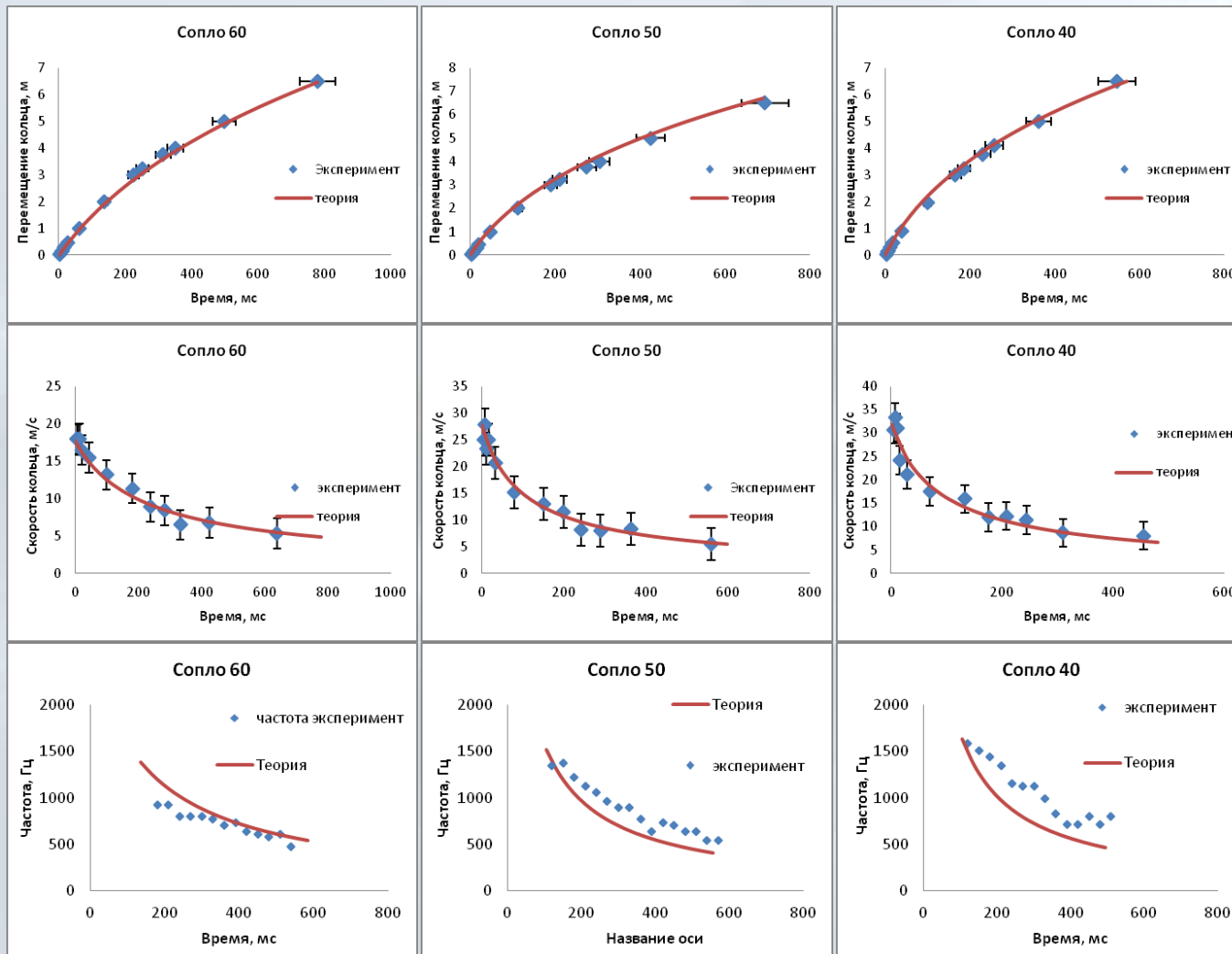


Распределение модуля скорости в ядре вихревого кольца вдоль оси движения



Распределение модуля скорости в ядре вихревого кольца поперек оси движения

СРАВНЕНИЕ С АВТОМОДЕЛЬНЫМИ ТЕОРИЯМИ



$$L(t) = \frac{R_0}{\alpha} \left[\left(1 + \frac{4\alpha V_0}{R_0} t \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right];$$

$$V(t) = V_0 \left(\alpha \frac{L(t)}{R_0} + 1 \right);$$

$$\omega_m = \frac{2}{\mu^2 c(\mu)} \frac{V}{R}$$

$$R(t) = R_0 + \alpha L(t),$$

	V_0	R_0	α	μ
Сопло 40	33,33	0,032	0,0037	0,15
Сопло 50	27,77	0,0365	0,0042	0,14
Сопло 60	17,85	0,042	0,0035	0,12

Заключение

- Вихревые кольца с различными начальными скоростями и размерами имеют одинаковый механизм излучения шума, при этом значение основной частоты в спектре излучения сосредоточено в области числа Струхала 4-5 для всех вихрей.
- Проведен совместный эксперимент по регистрации движения поршня генератора вихревых колец, перемещения кольца и излучения шума единичными вихрями, образованных с помощью сопел 40, 50 и 60 мм. Полученные в результате данного эксперимента законы движения поршня использовались в численном моделировании с целью повышения соответствия расчетной модели эксперименту. Перемещения вихревых колец, полученные в расчете, на начальном участке траектории совпадают с перемещениями в эксперименте. С помощью расчета получены размеры данных вихрей, которые затем использовались в автомоделных теориях для оценки свойств вихревых колец на большом удалении от среза сопла, где кольцо излучает шум. В результате проведена оценка собственной частоты излучения шума свободно летящими турбулентными вихревыми кольцами. Полученные значения собственной частоты хорошо совпадают с экспериментальными значениями на большом участке траектории.
- Полученные в данной работе результаты подтверждают механизм излучения шума вихревого кольца, представляющий собой колебания тонкого ядра для различных вихревых колец.

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**