



Актуальные проблемы аэроакустики

В.Ф. Копьев

ФАУ «ЦАГИ», Акустическое отделение
Московский комплекс

ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК РАН
СЕССИЯ НАУЧНОГО СОВЕТА РАН ПО АКУСТИКЕ
ИКИ РАН, Москва, 18 сентября 2025 г.

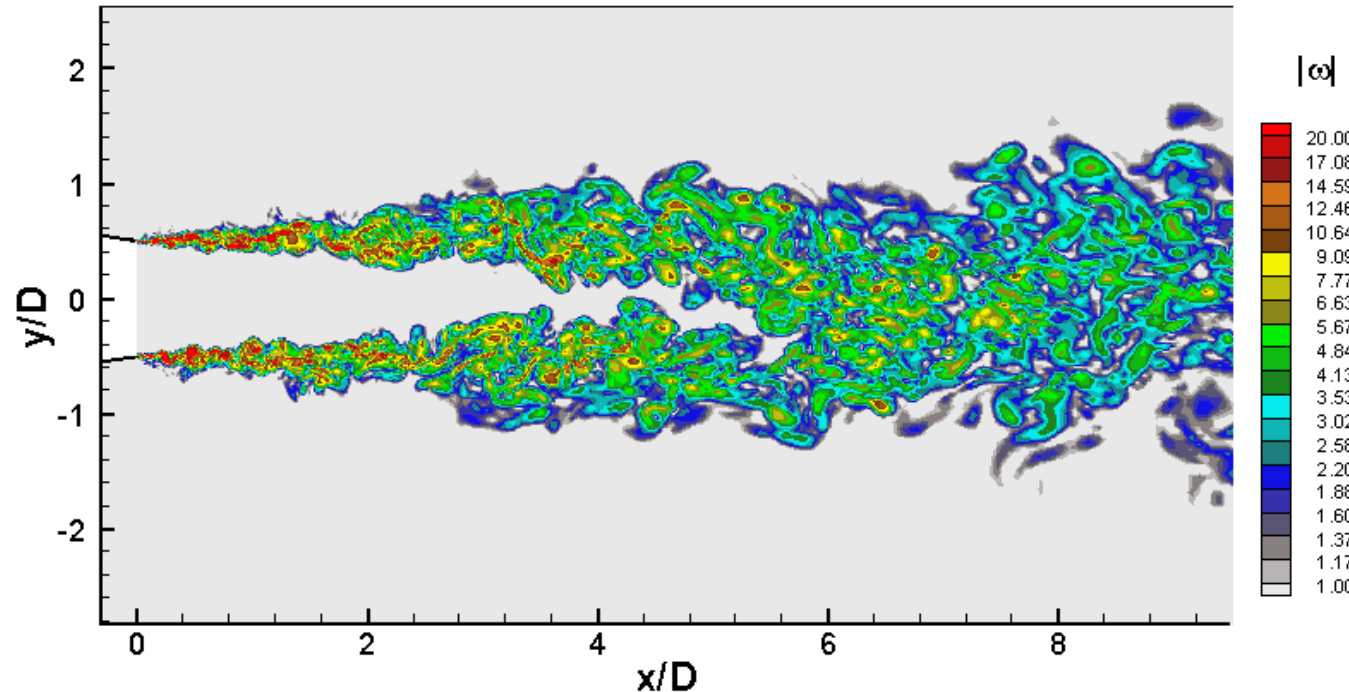
Снижение авиационного шума современного самолета требует решения проблем, находящихся **на переднем крае** фундаментальной науки и связанных с проблемами турбулентности.

Разнообразие и сложность аэроакустических процессов не позволяет на современном уровне создать единую цифровую модель и требует тщательной **валидации** численных методов в каждом из направлений.

Отсюда сосредоточение усилий на отдельных ключевых направлениях аэроакустики и попытки создания решающих продвижений на каждом направлении с целью их объединения в перспективе.

Структура турбулентности в струе

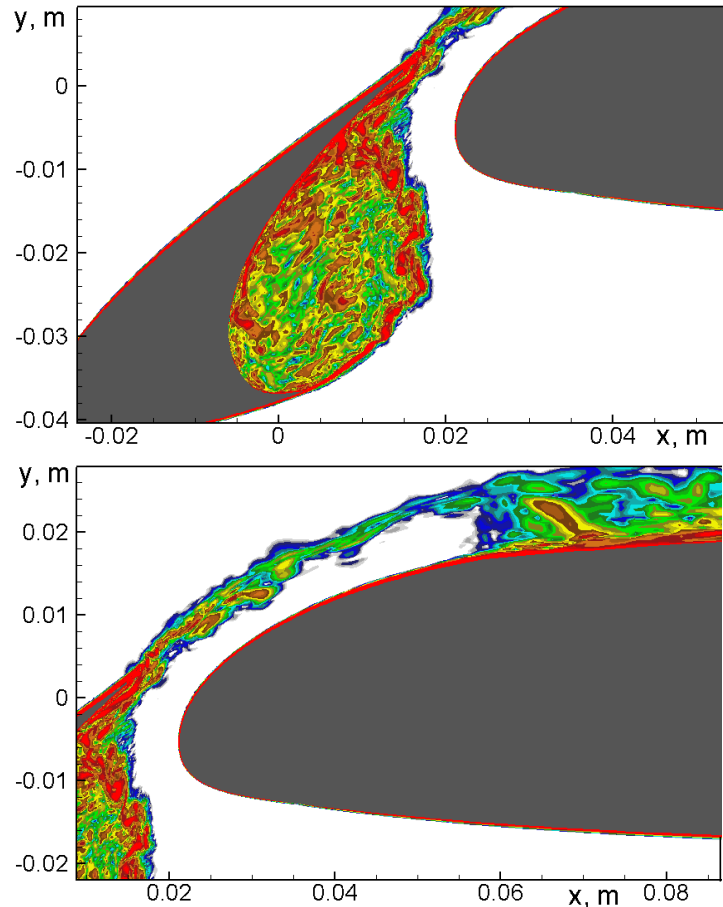
Анимация поля завихренности в холодной струе $M=0.9$ (сетка $\sim 4.5M$ узлов)



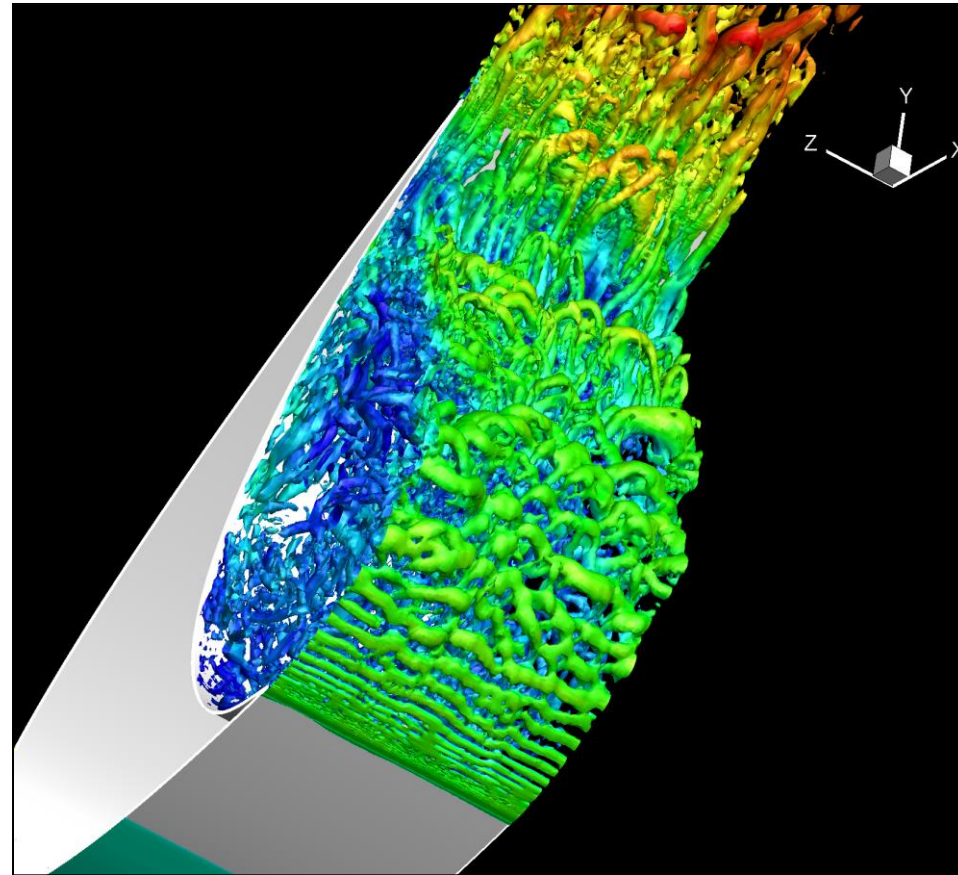
Обеспечен быстрый “спонтанный” переход к турбулентности в слоях смешения и качественно верная эволюция вихревых структур далее вниз по потоку:

- Потеря устойчивости слоя смешения
- Генерация и “спаривание” вихрей; хаотизация слоя смешения
- Увеличение размера структур по мере движения вниз по потоку

Структура турбулентности в окрестности предкрылка



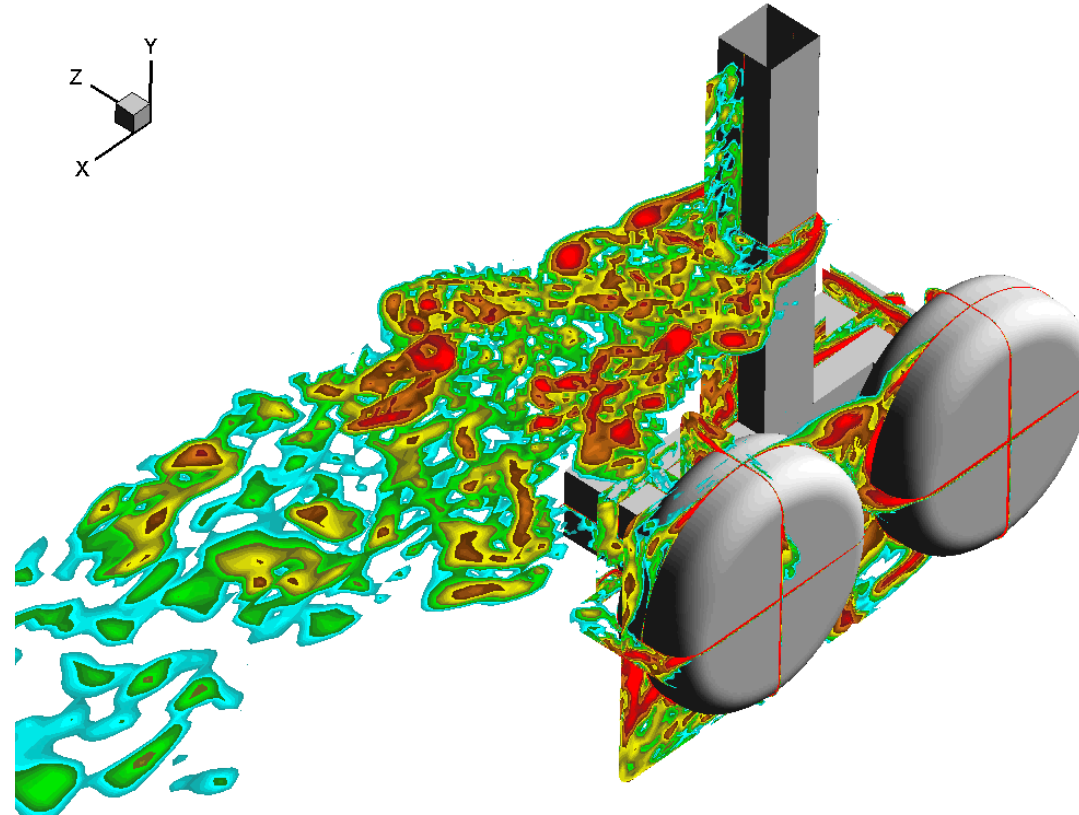
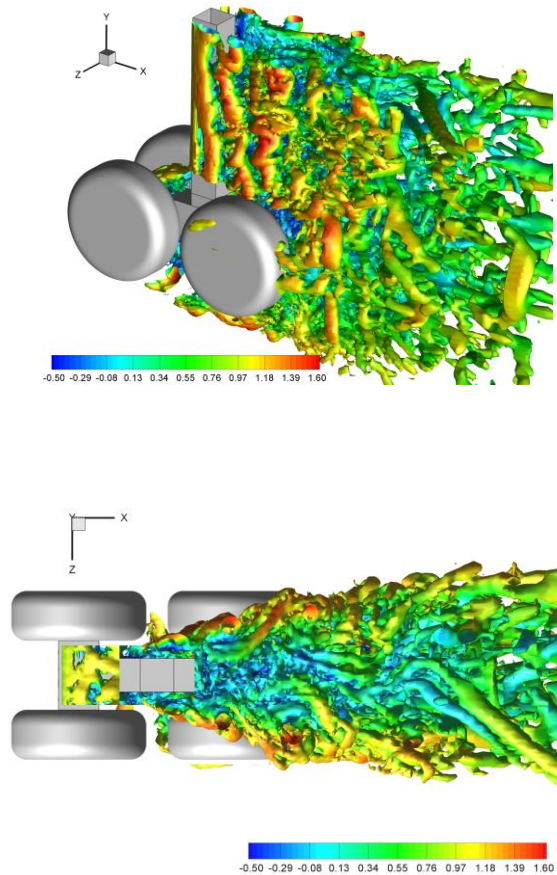
Мгновенные поля завихренности



Изоповерхность завихренности

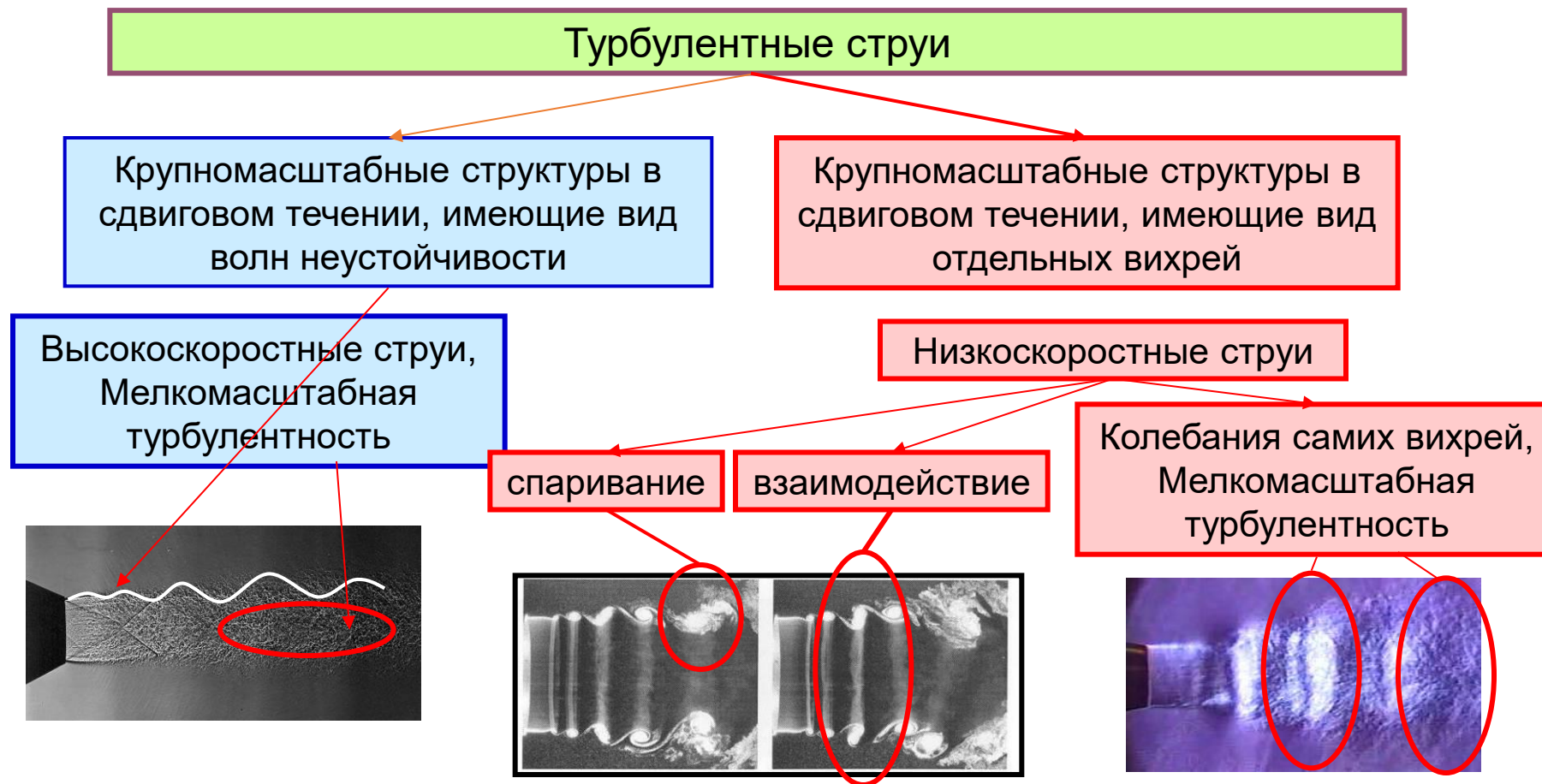
- Быстрый переход в сдвиговом слое, срывающемся с нижней кромки предкрылка
- Взаимодействие вихревых структур с вогнутой поверхностью предкрылка
- Картина течения похожа на обтекание полости

Структура турбулентности при обтекании шасси



- Множественные отрывные зоны
- Интенсивное взаимодействие структур, образовавшихся при обтекании отдельных элементов шасси

Основная проблема в аэроакустике: построение моделей генерации шума турбулентностью

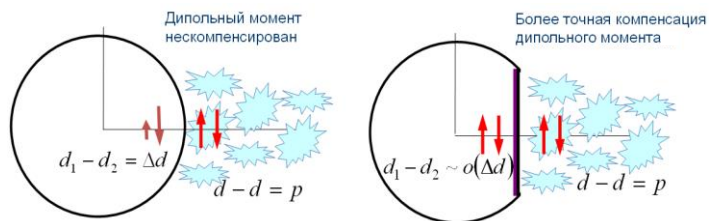
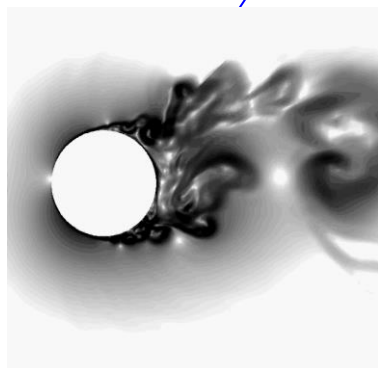


Определение конкретного механизма (механизмов) генерации шума и их надежное подтверждение в эксперименте необходимы для развития методов управления шумом, численного моделирования и для развития новых технологий шумоглушения.

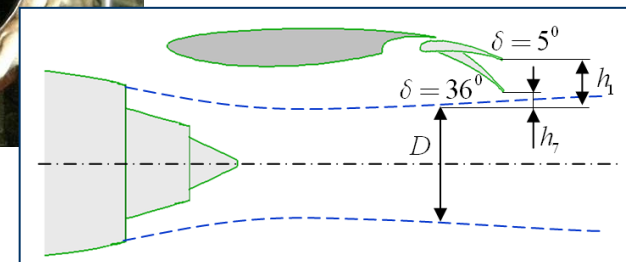
Основная проблема в аэроакустике: построение моделей генерации шума турбулентностью

Турбулентные источники около твердых/импедансных поверхностей:
роль условия отражения в области взаимодействия

След за плохообтекаемым телом



Взаимодействие турбулентного потока и крыла



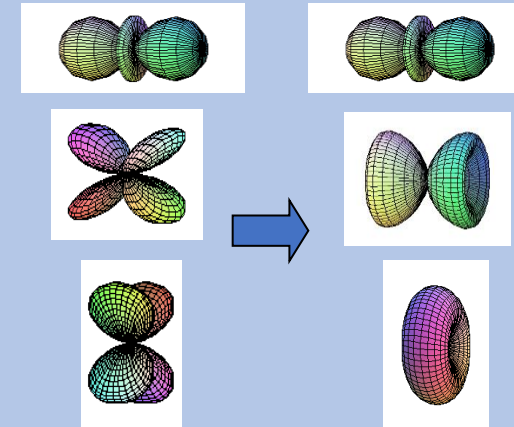
Определение конкретного механизма (механизмов) генерации шума и их надежное подтверждение в эксперименте необходимы для развития методов управления шумом, численного моделирования и для развития новых технологий шумоглушения.

Квадрупольные источники звука в турбулентном течении

**Акустическая аналогия
Лайтхилла**

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T^{ij}}{\partial x^i \partial x^j}$$

$$T^{ij} = \rho v^j v^i + \delta^{ij} (p - c_0^2 \rho)$$

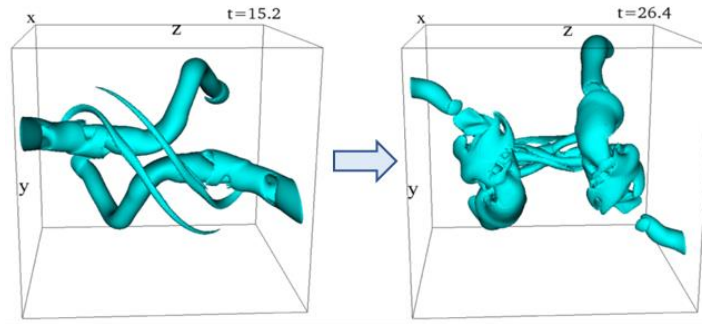
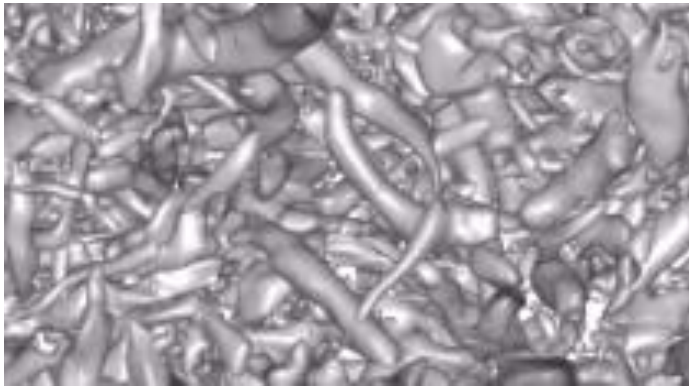


Моделирование правой части и сравнение с данными акустического эксперимента:

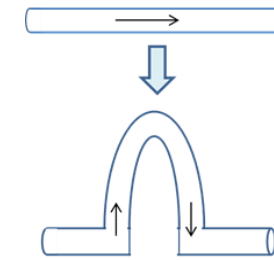
- Позволяет связать корреляционные характеристики поля скорости и ее производных с источником акустического шума
- Опираясь на свойства акустического излучения, позволяет установить корреляционные характеристики турбулентности
- Позволяет подтвердить квадрупольный характер источников шума

Какова связь квадрупольных источников звука с вихревой динамикой?

Возможные механизмы

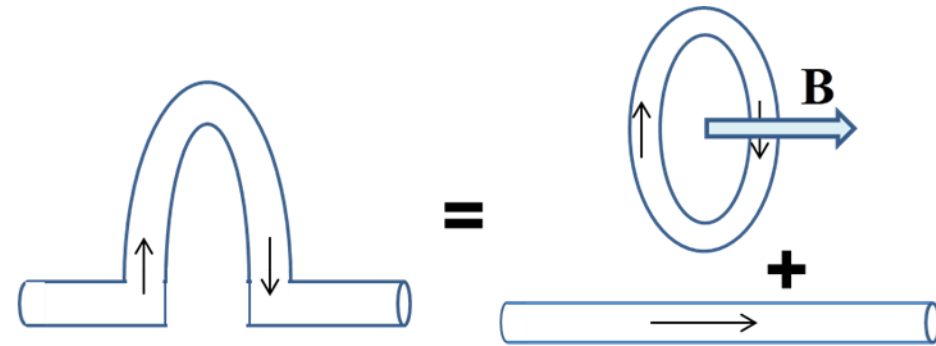


Ostilla-Mónico, R., et al. Physical review fluids, 2021



Локальная деформация
вихревых нитей с
растяжением и
образованием петель

Звуковые источники ассоциируются
с локальными событиями в вихревой
динамике турбулентного потока



Деформация вихревой нити эквивалентна
локальному возмущению импульса

Идентификация основных механизмов шумоизлучения упирается непосредственно в проблему турбулентности, главную проблему аэродинамики, не решенную до настоящего времени.

При этом механизмы генерации шума турбулентными течениями существенно зависят от типа турбулентного течения, скорости, близости границ и т.п.

Поэтому первой принципиальной задачей аэроакустики является **построение адекватных физических и математических моделей отдельных явлений**, составляющих проблему шума летательных аппаратов.

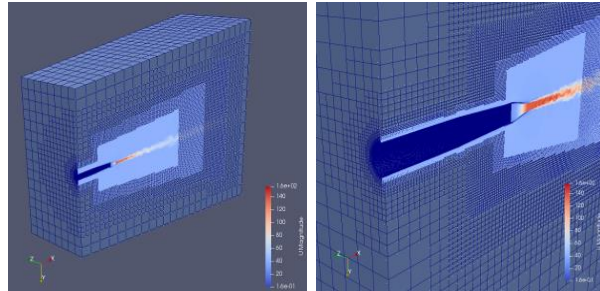
В качестве примера мы рассмотрим такой важный источник шума как турбулентная струя, в том числе применительно к проблеме шума в салоне.

Численное моделирование поля турбулентных пульсаций и акустического излучения струи

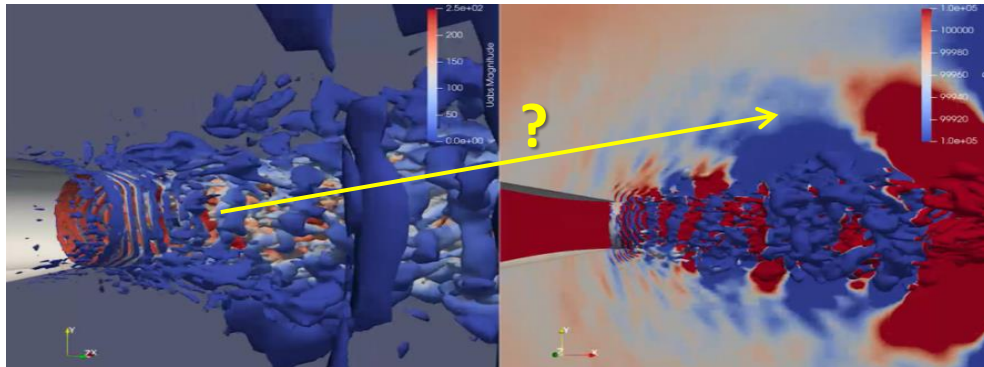
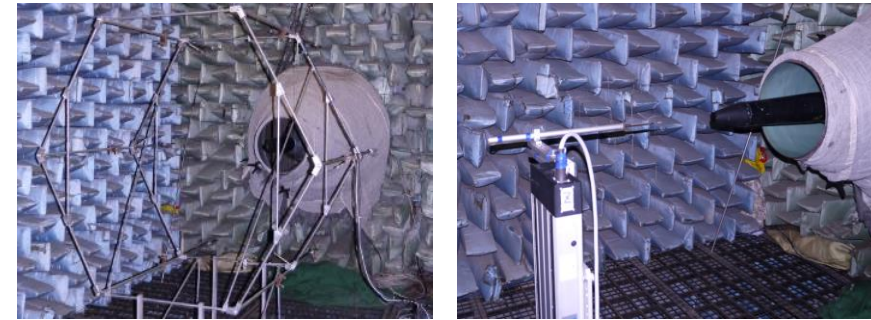
Разработка теоретических моделей и численных кодов для расчета звукового излучения турбулентных струйных течений и их валидация на основе экспериментальных измерений акустических и гидродинамических характеристик

Метод LES, решатель на основе схемы
CABARET, GPU-версия

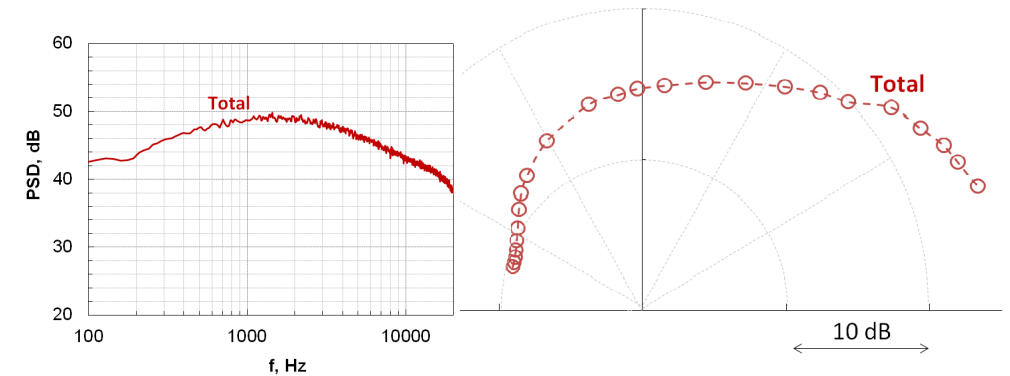
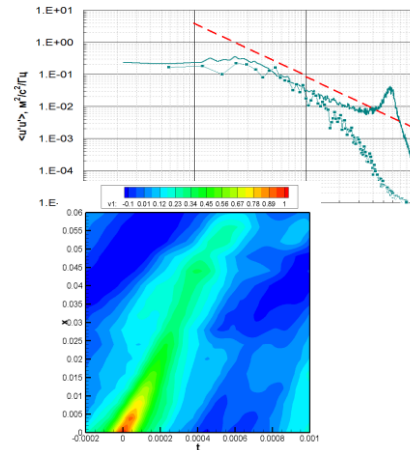
Расчетные сетки ~10-30 млн.



Валидационная база – измерения в АК-2



Спектры пульсаций скорости



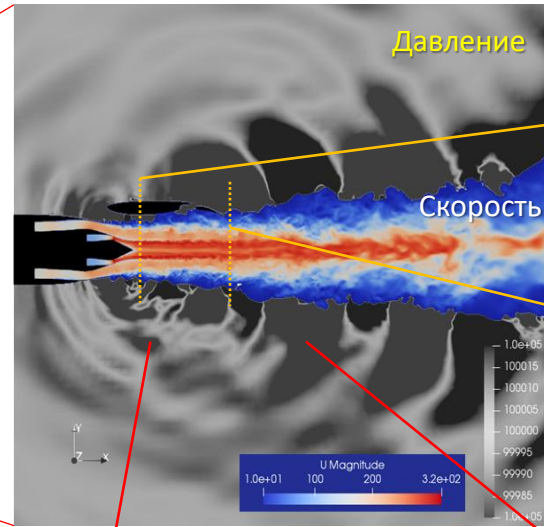
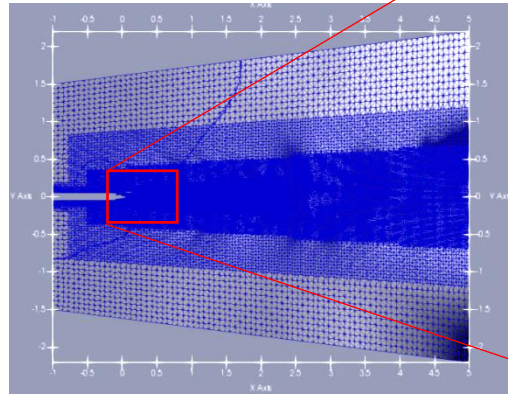
Численные методы (LES + FWH) позволяют достаточно «правдоподобно» воспроизводить динамику турбулентного движения в струе, включая процессы генерации шума.

Основной проблемой является поиск взаимосвязи между вихревой динамикой и акустическим излучением.

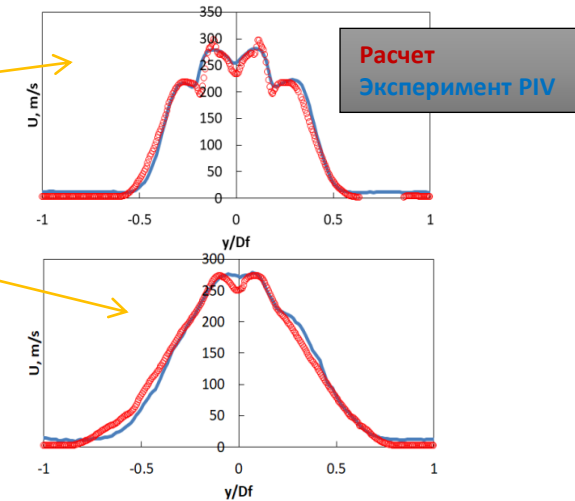
Расчет шума взаимодействия крыла и соосной струи и его валидация

Метод LES, решатель на основе
схемы CABARET, GPU-версия

Расчетная сетка ~25 млн.



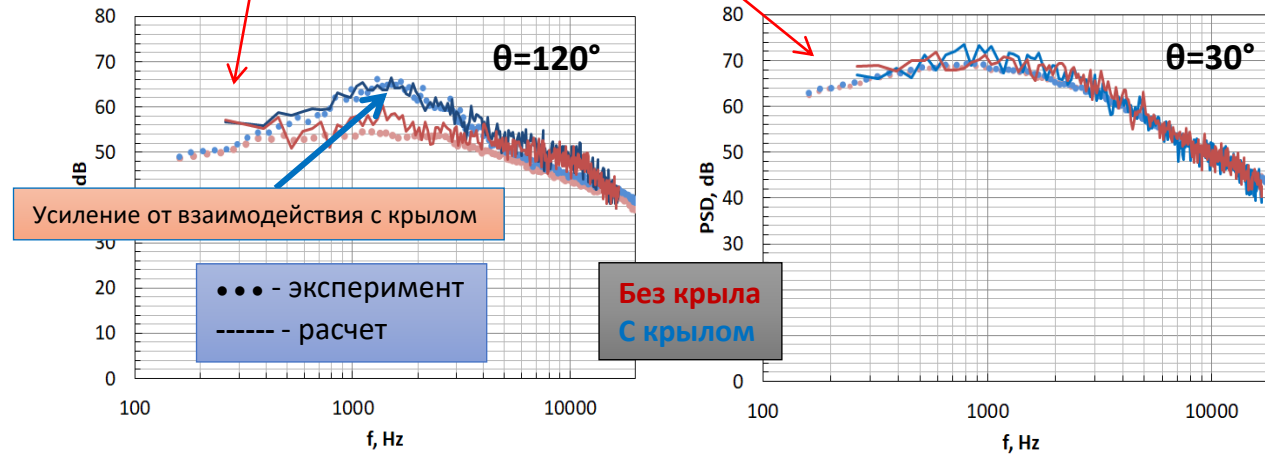
Поперечные профили скорости



Условия истечения

	Внутренняя	Внешняя
π_c	1.65	1.33
T^* , К	295 К	295 К
U , м/с	280 м/с	215 м/с

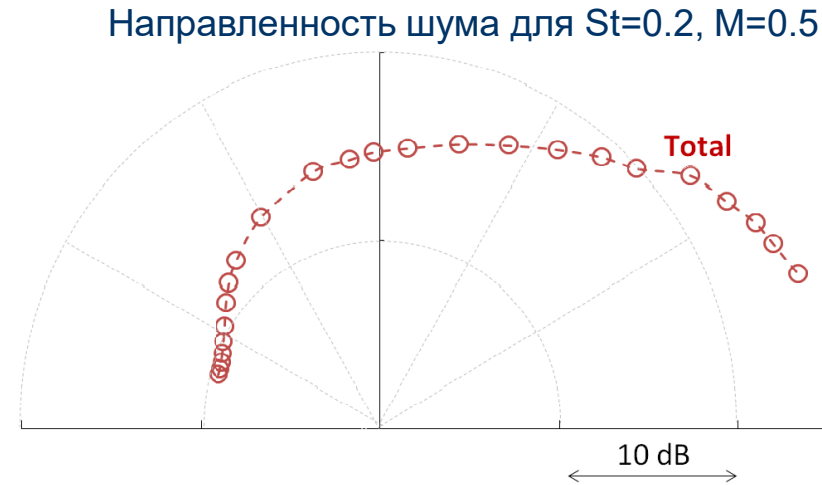
Шум в дальнем поле



- Численное моделирование шума двухконтурной струи вблизи крыла с механизацией на режиме набора высоты.
- Валидация расчета с использованием экспериментальных данных, полученных в заглушенной камере АК-2.
- Используемый расчетный метод позволяет смоделировать эффект аэроакустического взаимодействия струи и механизированного крыла.

Почему важна прецизионная валидация:

Можно ли считать допустимой ошибку в 3 дБ при расчете шума струи на основе этих данных?

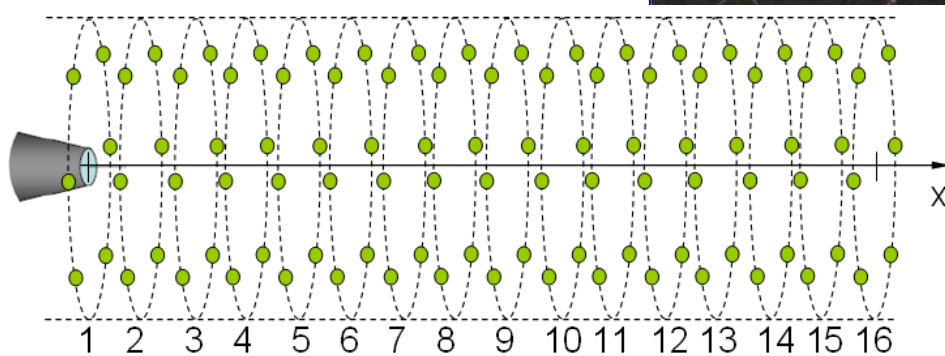
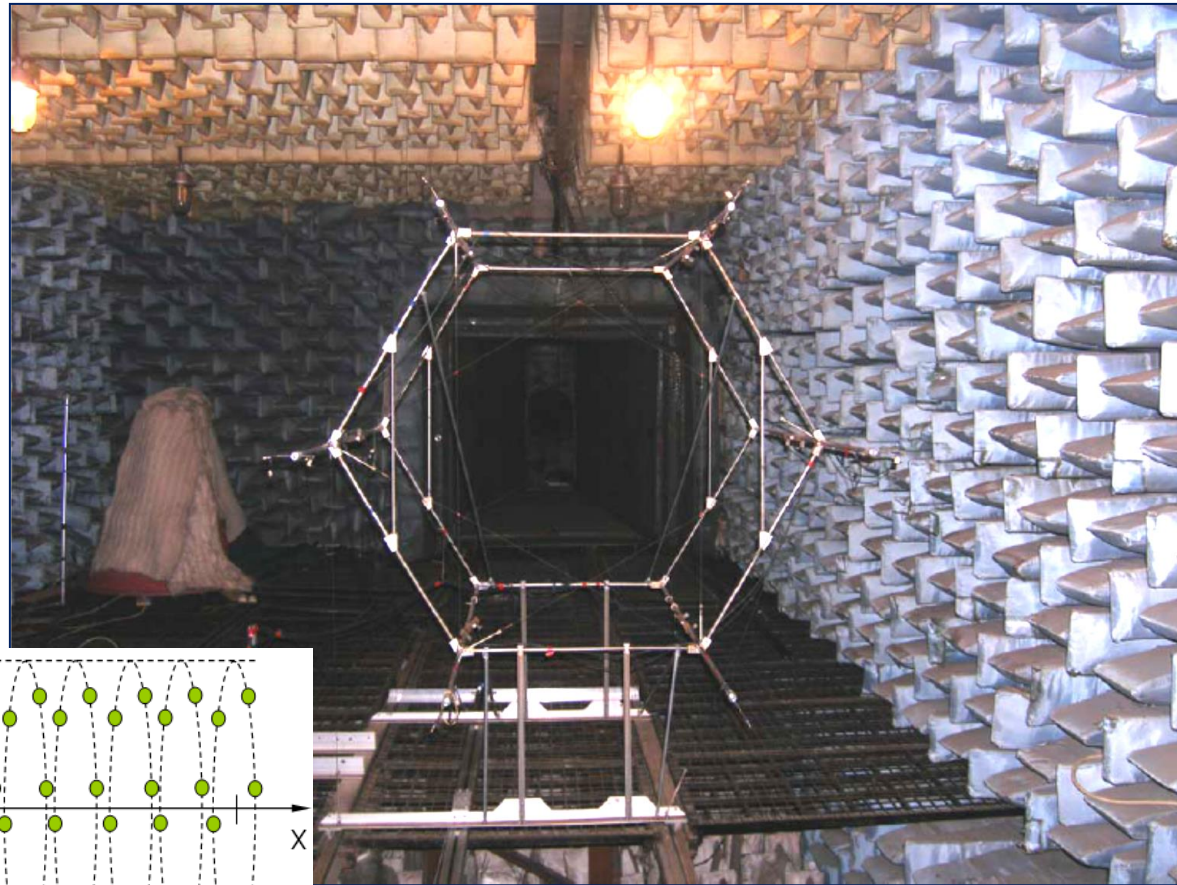


Характеристики шума струи (спектры и направленности) имеют простой вид без специфических особенностей

«Попадание» в такие характеристики с точностью в несколько дБ может иметь место даже при серьезных ошибках в моделировании механизмов генерации шума.

Так, например, подобные спектры и направленности могут быть смоделированы источниками различных типов (монополи, диполи, ...), не имеющих отношение к тому, что наблюдаются в реальных турбулентных течениях.

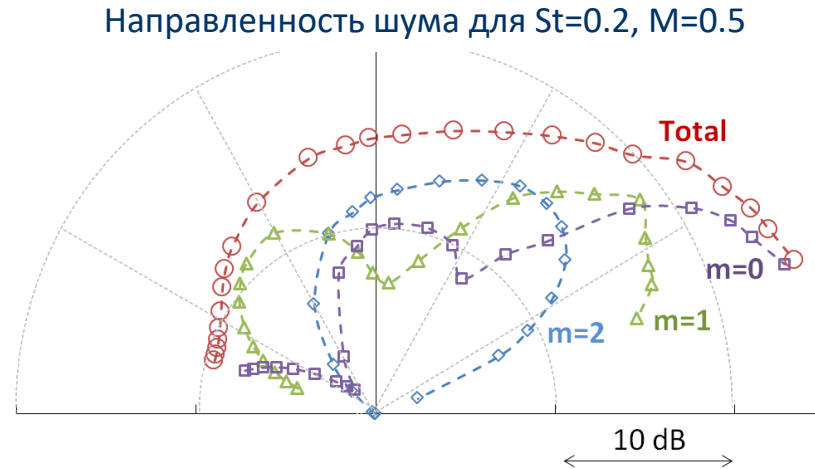
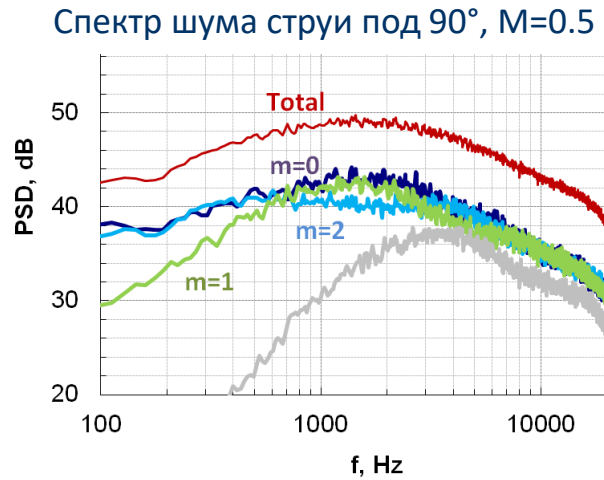
Валидация численного моделирование шума турбулентных затопленных струй по методу азимутальной декомпозиции шума



Численная реализация метода азимутальной декомпозиции дальнего звукового поля струи

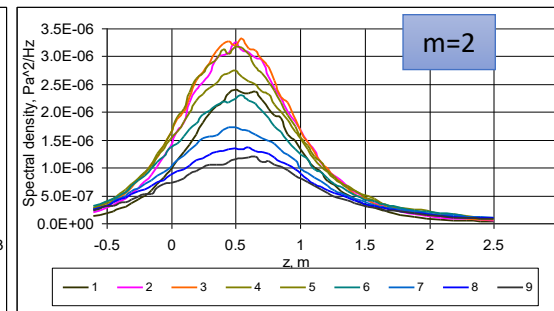
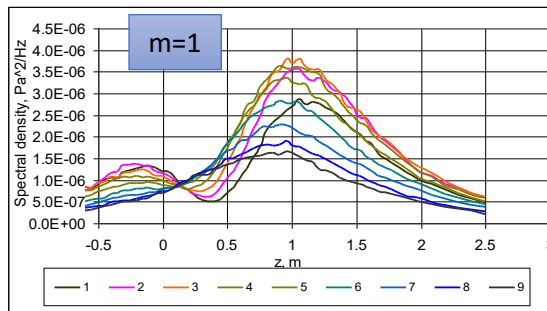
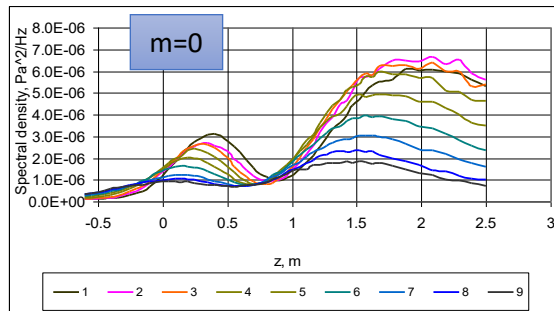
Почему важна прецизионная валидация:

Можно ли считать допустимой ошибку в 3 дБ при расчете шума струи на основе этих данных?



Применение метода АДТ позволяет расщепить «простые» данные суммарного шума на нетривиальные составляющие, отражающие «физику» источников шума реального течения.

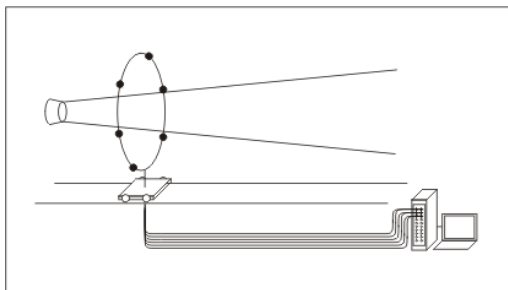
В таком случае даже ошибка расчета в 1-3 дБ, при условии моделирования структуры азимутальных мод, тем не менее дает основания считать его адекватно воспроизводящим основные физические механизмы, наблюдаемые в реальных течениях, а значит, пригодным для более глубокого анализа.



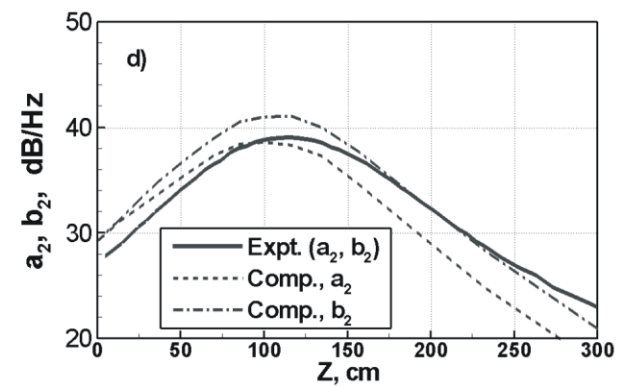
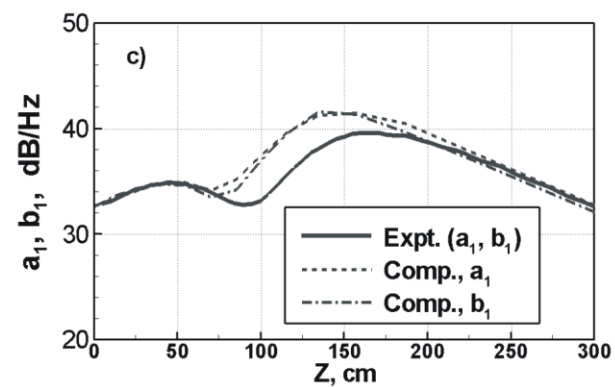
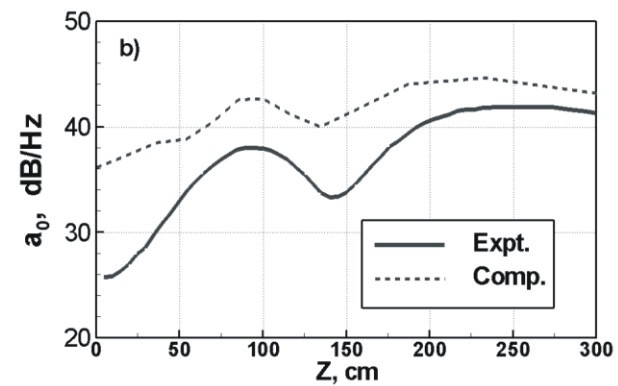
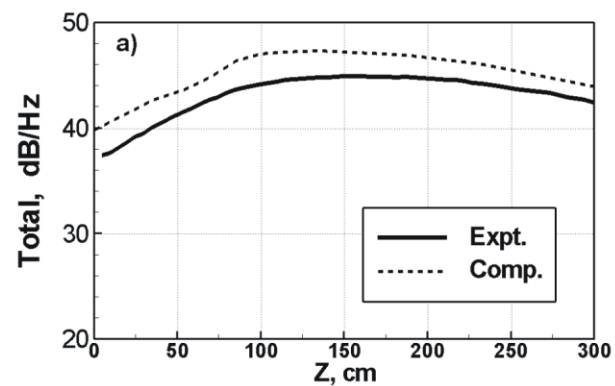


Копьев, Шур, Уч. зап. ЦАГИ 2010

$M=0.4$, $St=0.28$



LES струи с $M=0.4$

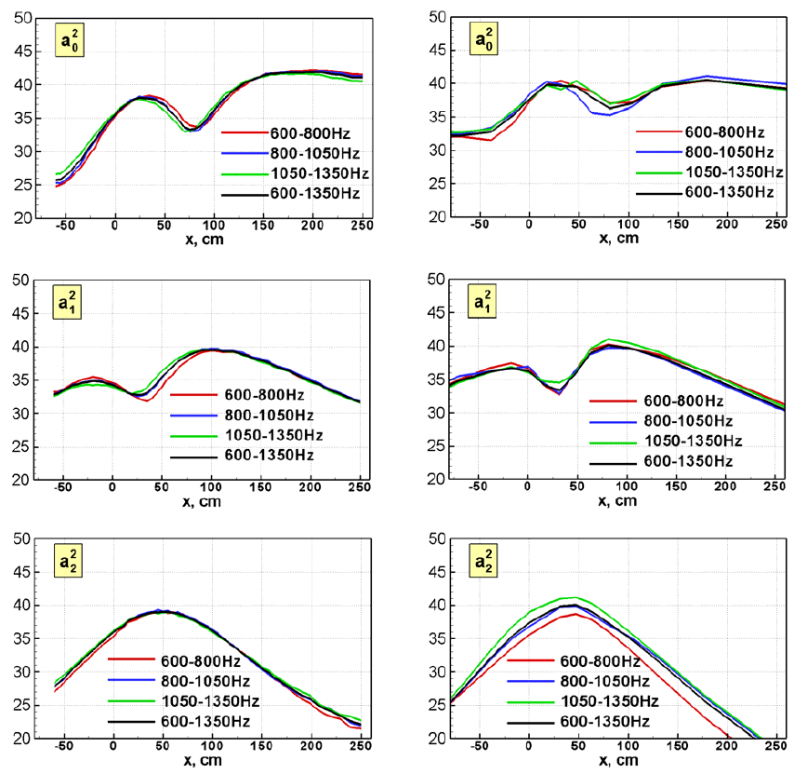




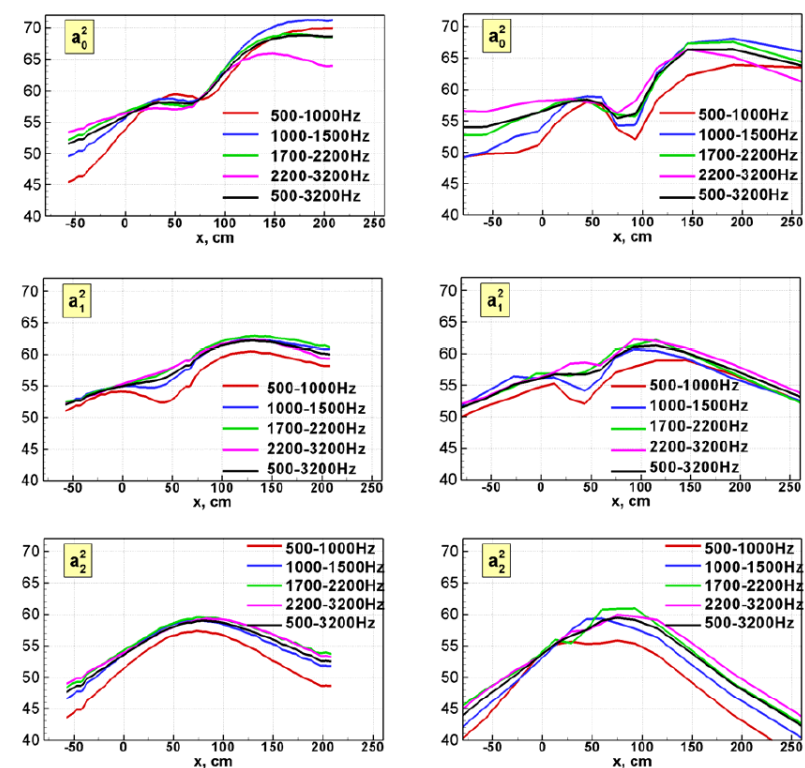
Korpiev, Shur et al., 2015

LES струй с $M=0.4$ и $M=0.83$

$M=0.4$



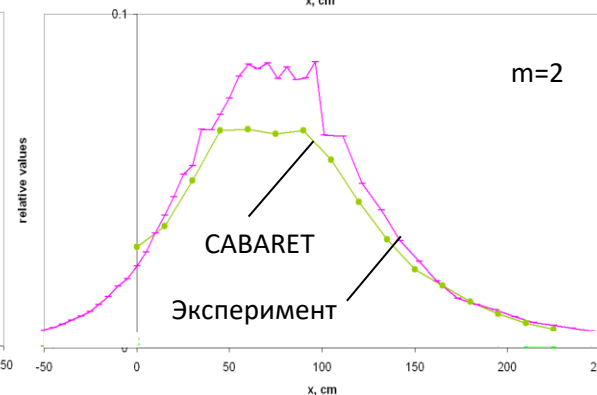
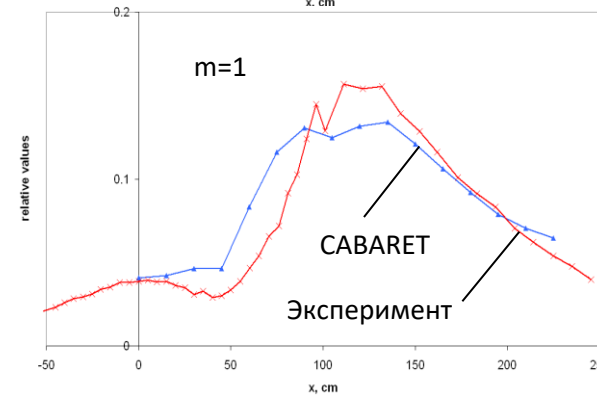
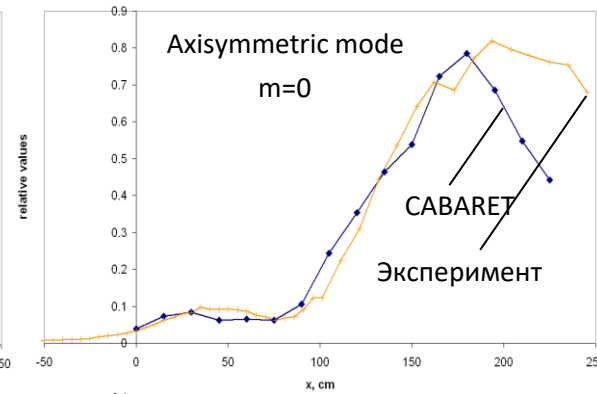
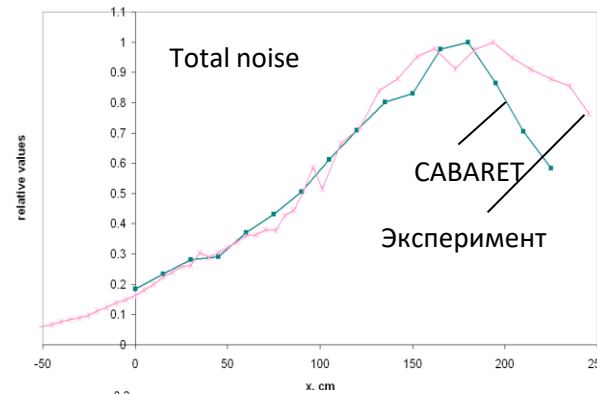
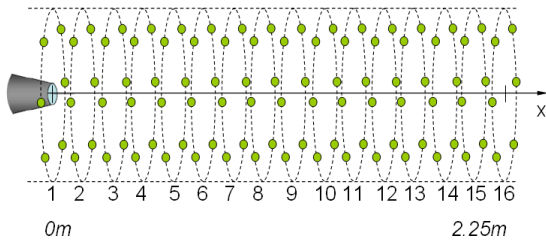
$M=0.83$





Faranosov, Karabasov et al., 2013

CABARET MILES струи $M=0.75$ (JEAN)

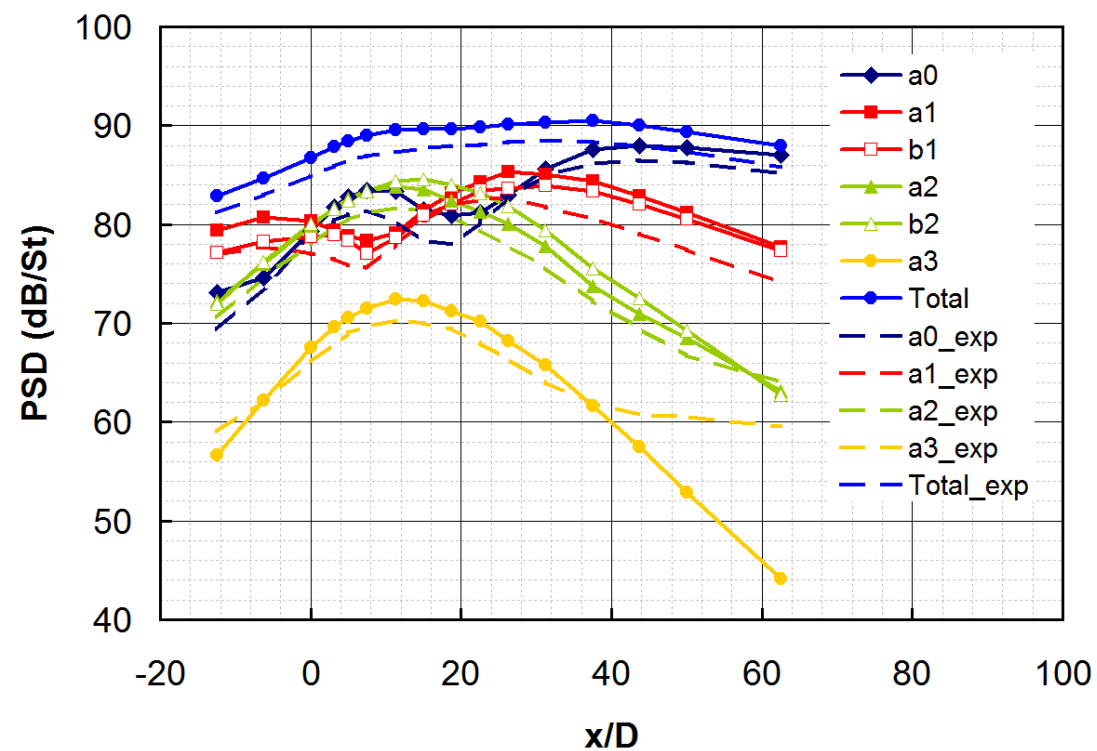
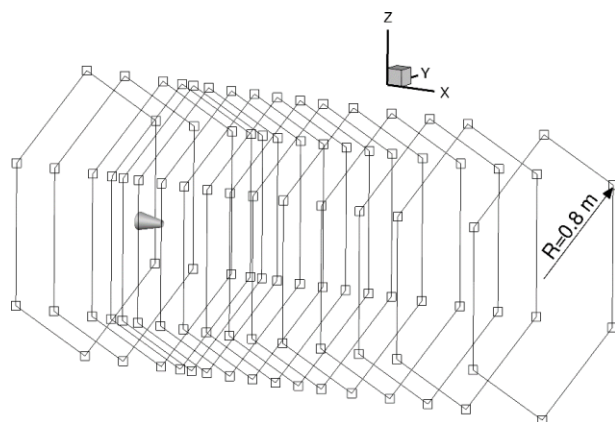


¹Goloviznin & Samarskii, 1998
Karabasov & Goloviznin, 2009



Huet, Faranosov et al., 2020

LES струи $M=0.53$ (решатель ONERA), проект ЦАГИ-ONERA AMADEUS



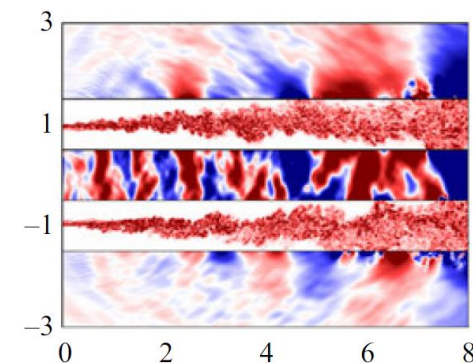


Bogey, 2021

Christophe Bogey†

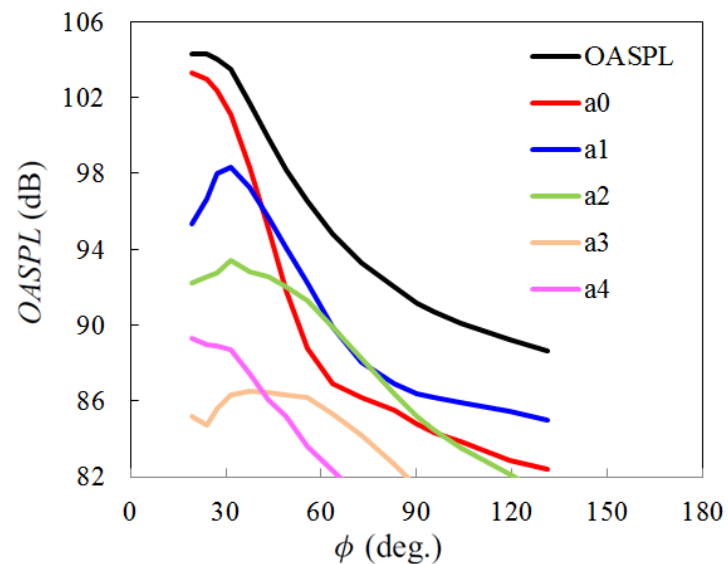
Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, Univ Lyon, CNRS, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, Univ Claude Bernard Lyon I, UMR 5509, 69130 Ecully, France

(Received 21 August 2020; revised 26 March 2021; accepted 12 May 2021)

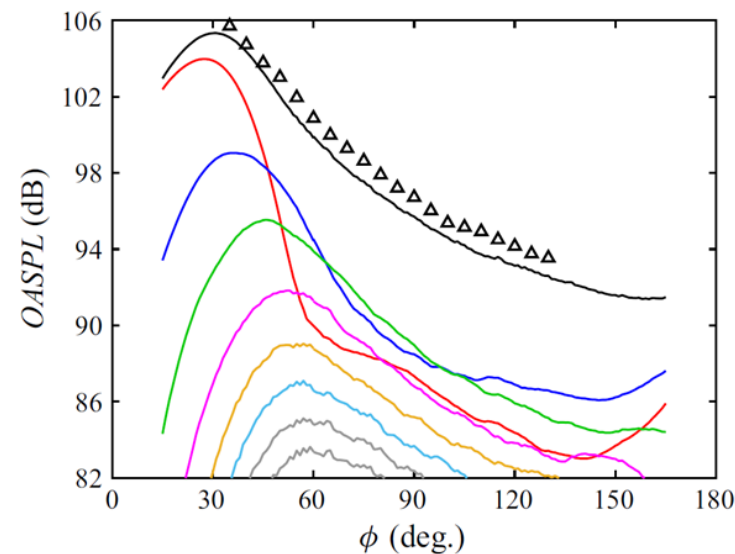


$M=0.9$, OASPL

Эксперимент

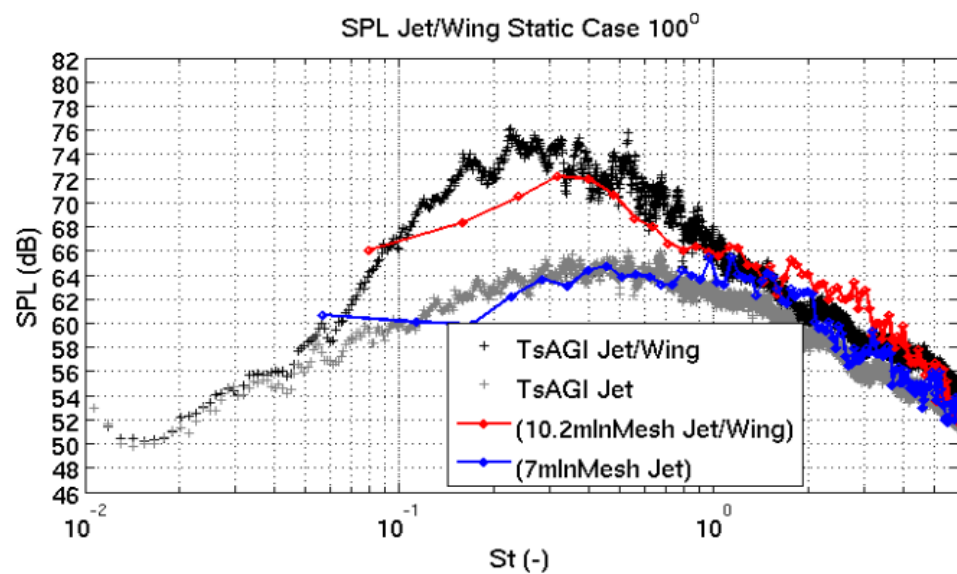
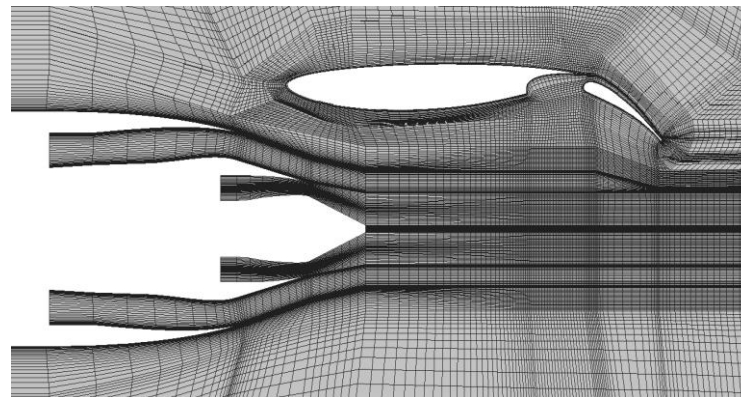
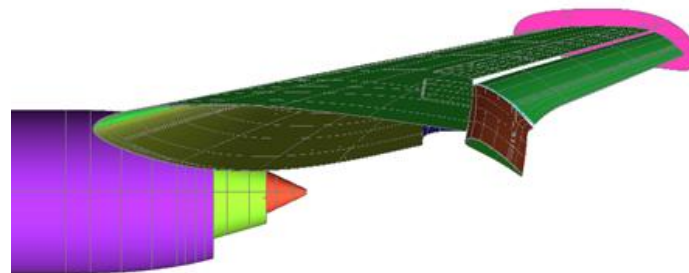
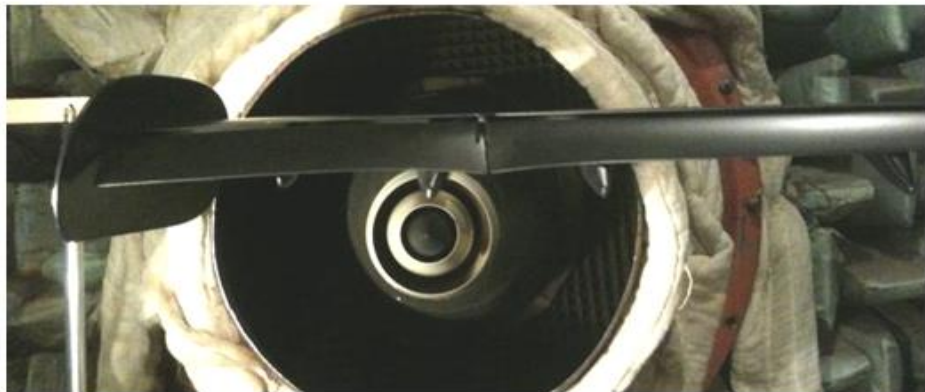


Расчет

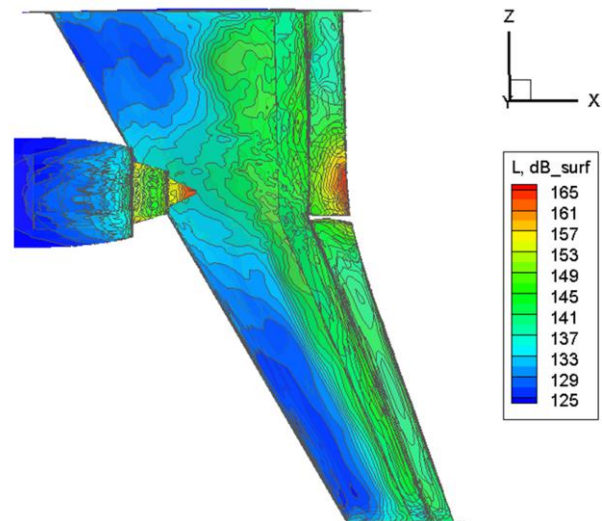
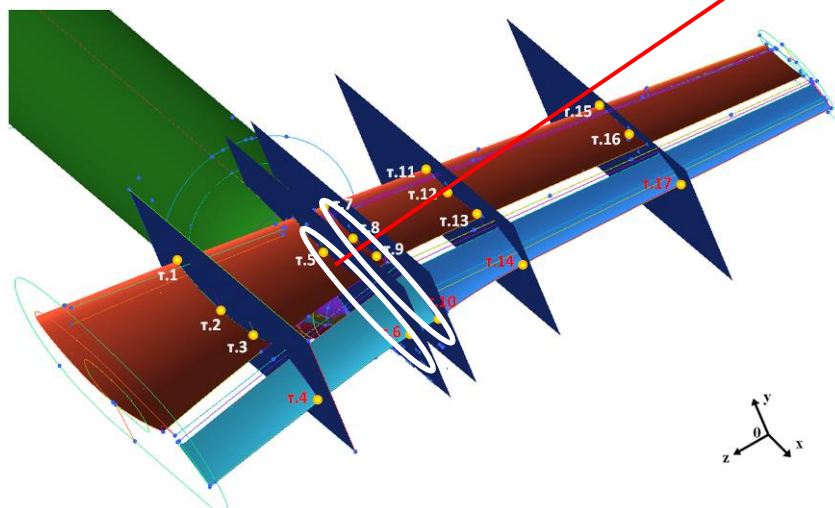
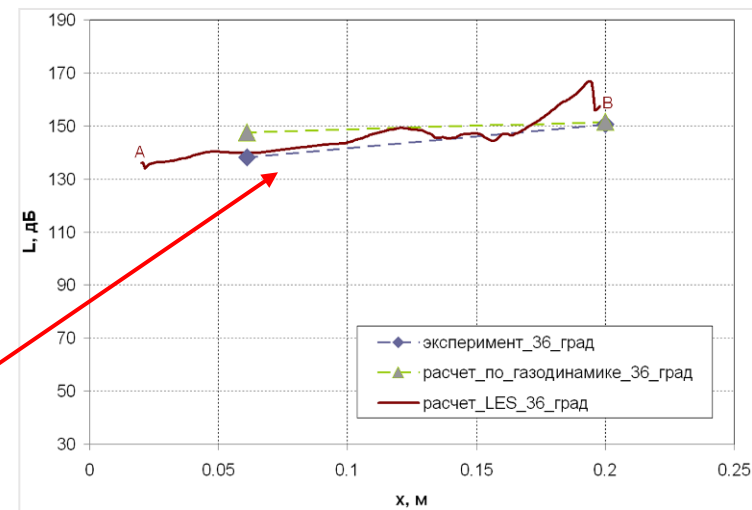
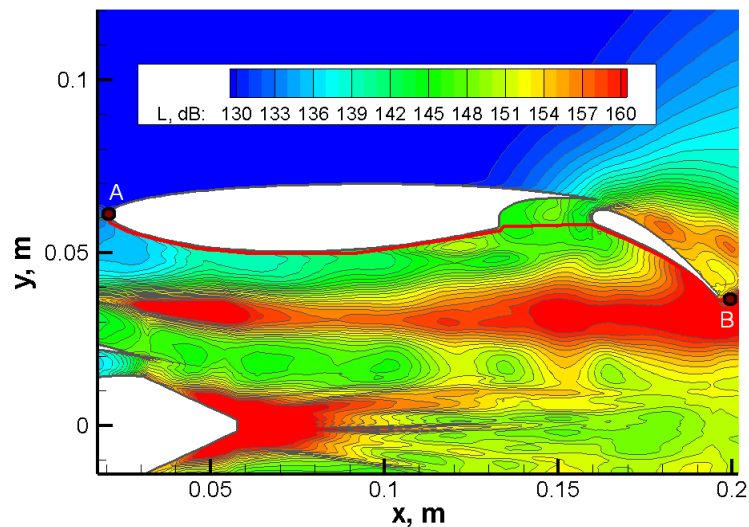


Генерация шума турбулентными струями в высокотехнологических задачах

Численное моделирование аэроакустических характеристик турбулентных струй вблизи крыла и его валидация по эксперименту в АК-2



Численное моделирование распределения акустических нагрузок на крыле перспективного самолета от ближнего поля модельной реактивной струи двигателя

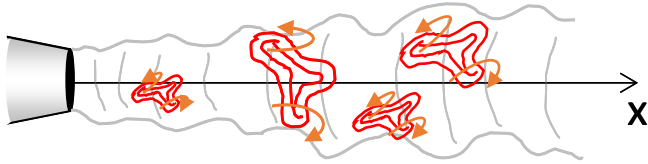


Валидированный расчет не дает ответа на вопрос - что является механизмом излучения в турбулентных струях.

Без ответа на этот вопрос трудно двигаться вперед в вопросах управления шумом, поэтому такое значение в аэроакустике принимает не только валидация расчета, но и **валидация идей о структуре источника**

Шум дозвуковой струи в дальнем поле

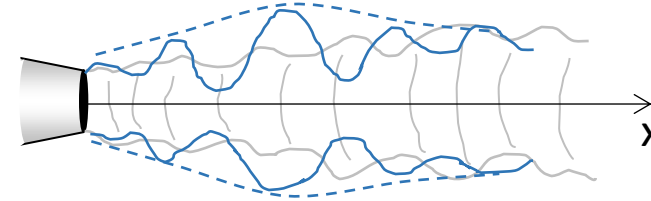
Альтернатива двух идей



Шум струи - суперпозиция излучения
компактными квадрупольями

Lighthill, 1952

...



Шум струи - результат излучения
волновыми пакетами

Sedel'nikov, 1967

Crow & Champagne, 1971

Tam, 1971

Morris, 1980

Tam & Burton, 1984, ...

Crighton & Huerre, 1990

Kopiev et al. 2004, 2006, 2009, 2013

Jordan et al., 2012

Cavalieri et al., 2012, ...

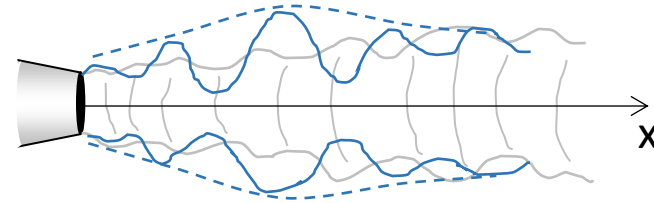
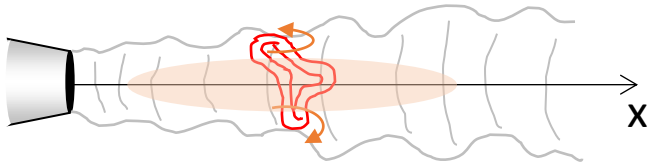
Jordan & Colonius, 2013



**Валидация
модели**

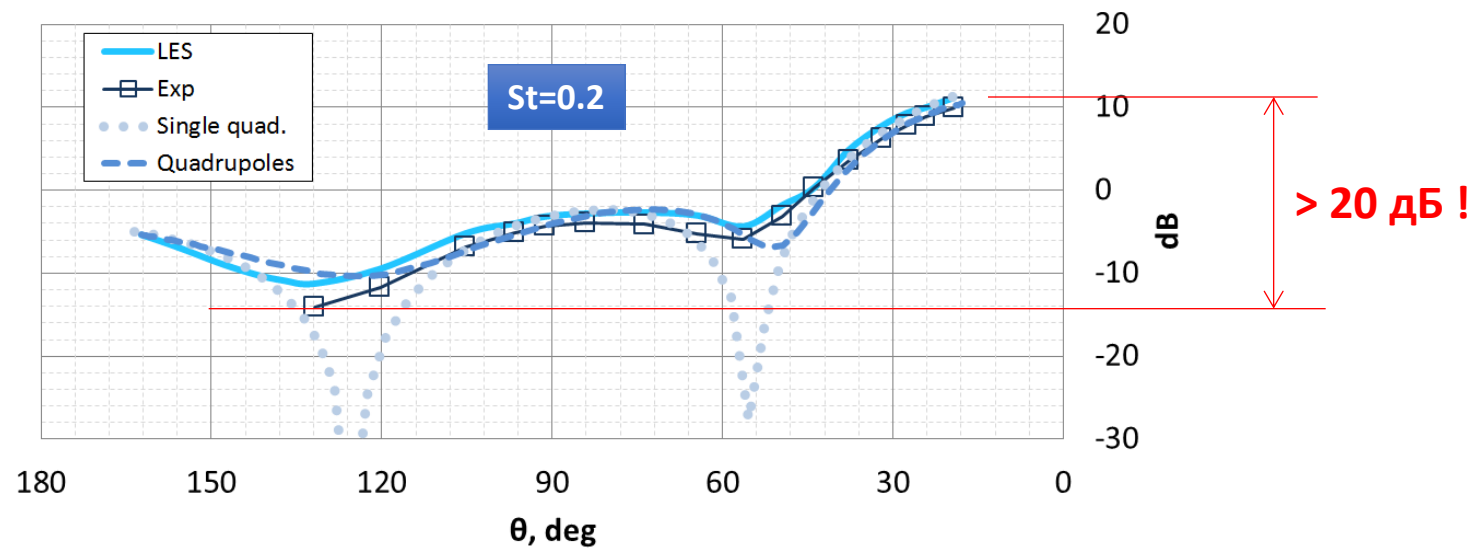
- ☐ **Линейные объекты с понятной динамикой**
- ☐ **Ясен механизм излучения**
- ☐ **Имеется набор методов анализа (POD, и т.п.)**
- ☐ **Подходят для активного управления**

Валидация двух идей о структуре источников шума дозвуковой струи

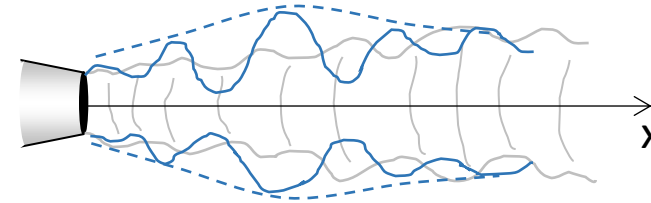
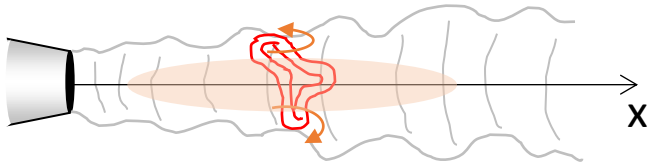


$$I_0 \sim \frac{1}{(1 - M_c \cos \theta)^2} \left(\frac{3 (\cos \theta)^2}{(1 - M_c \cos \theta)^2} - 1 \right)^2 \quad m=0$$

Kopiev et al., 2007, 2009, 2019



Валидация двух идей о структуре источников шума дозвуковой струи

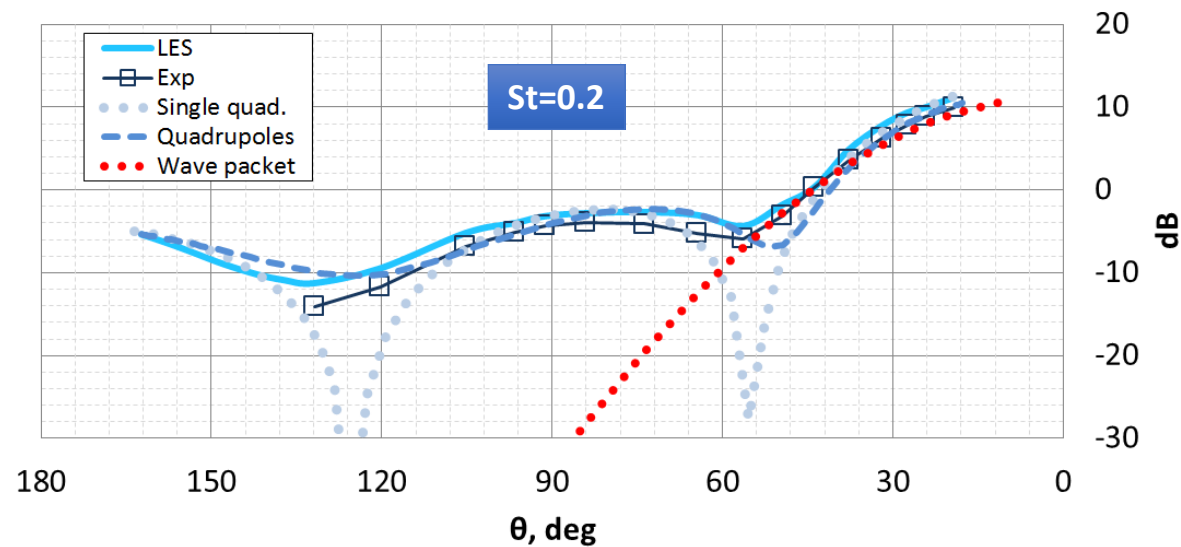


$$I_0 \sim \frac{1}{(1 - M_c \cos \theta)^2} \left(\frac{3 (\cos \theta)^2}{(1 - M_c \cos \theta)^2} - 1 \right)^2 \quad m=0$$

Kopiev et al., 2007, 2009, 2019

$$I_0 \sim \cos^4 \theta \cdot \exp[-k^2 L^2 (1 - M_c \cos \theta)^2 / 2]$$

Cavalieri et al., 2011, 2012



Роль турбулентной струи при оценке шума в салоне пассажирского самолета

Направление исследований для решения задач внутренней акустики самолетов



Направление исследований для решения задач внутренней акустики самолетов



Направление исследований для решения задач внутренней акустики самолетов

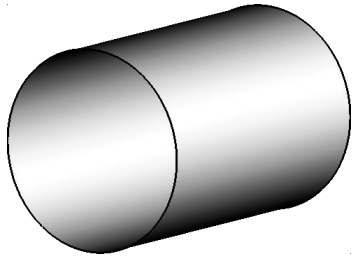
Исследования по созданию эффективной звукоизолирующей бортовой конструкции с применением новых вибро- и звукопоглощающих материалов, обеспечивающих высокую звукоизолирующую способность с учетом прямого и косвенного путей передачи звука



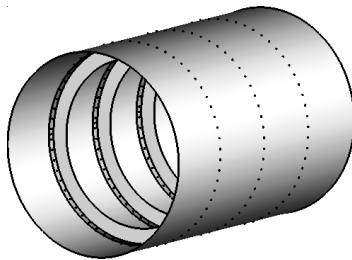
Опыт летных испытаний



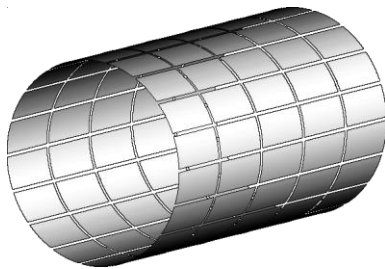
Направление исследований для решения задач внутренней акустики самолетов



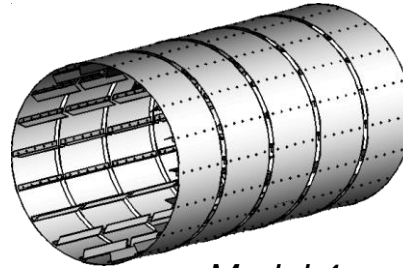
Model 1



Model 2

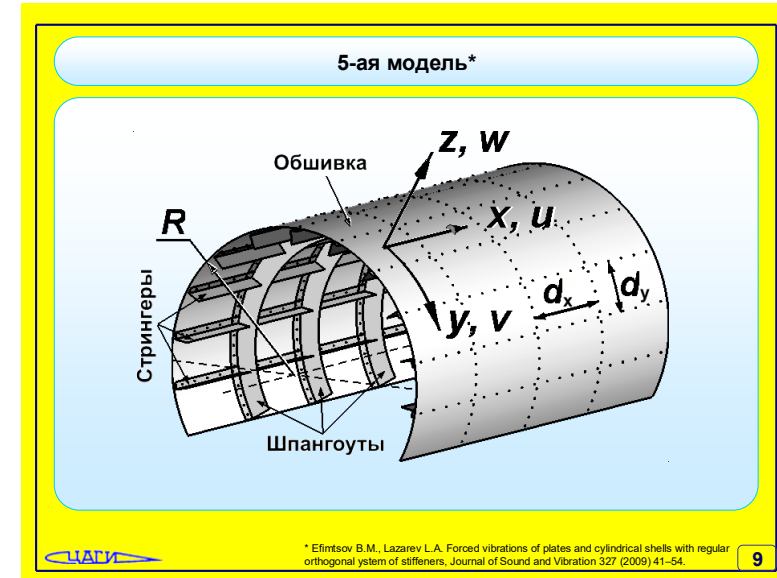
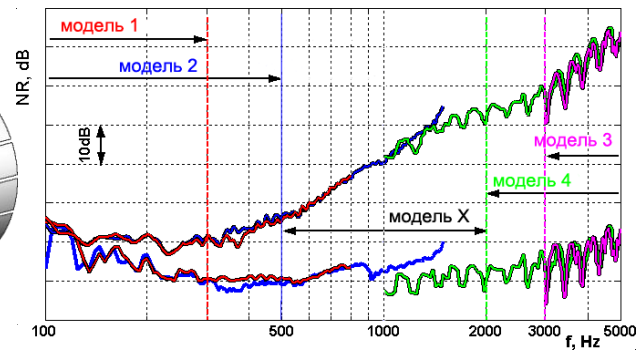


Model 3

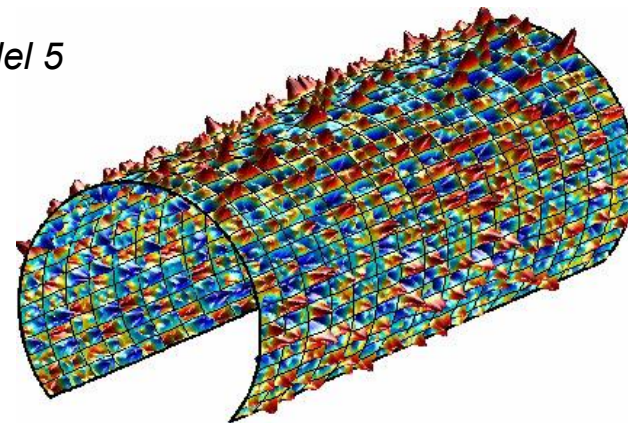


Model 4

Разработка различных моделей построения оболочек, которые применимы для различных частотных диапазонов

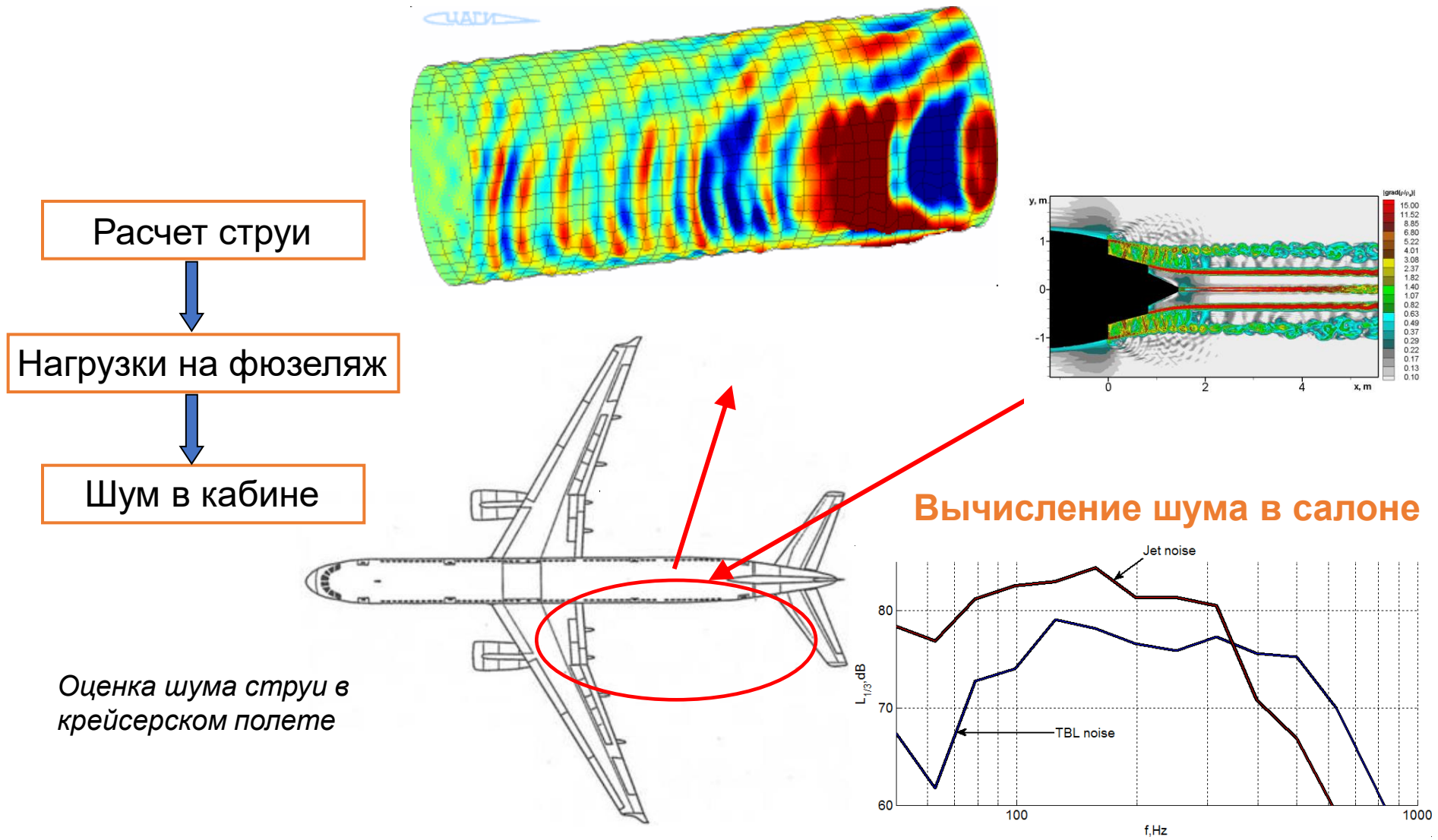


Model 5



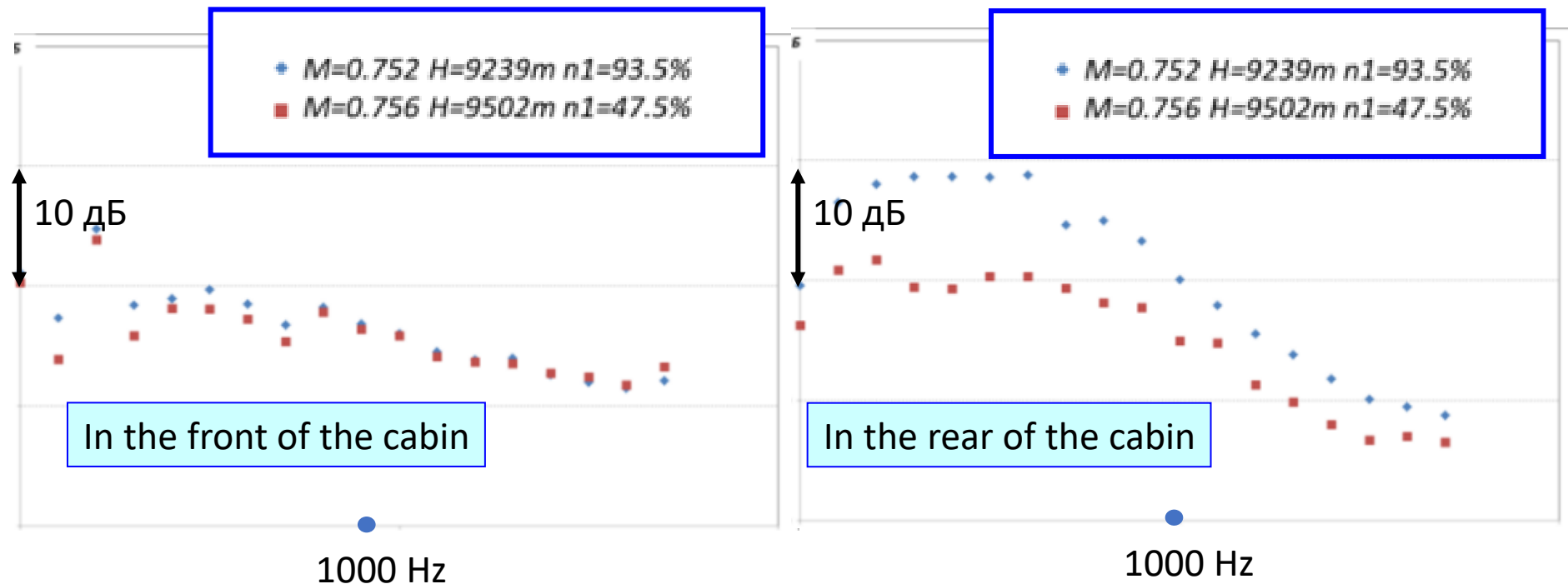
Направление исследований для решения задач внутренней акустики самолетов

Влияние струи на шум в салоне на крейсерском режиме



Летные испытания для выработки рекомендаций по снижению уровня шума в салоне регионального воздушного судна

Идентификация источников шума. Влияние реактивного шума во время полета



Комплексная задача получения прорывных решений в аэроакустике может состоять из трех составляющих:

(i) построение математической модели генерации шума элементами самолета и ее аналитическое/асимптотическое решение; валидация адекватности модели физике задачи;

(ii) построение высокоточной численной модели и нахождение ее решения (потребность выхода на лучшие суперкомпьютеры);

(iii-а) валидация полученного численного решения (создание экспериментальной базы нового уровня);

(iii-б) валидация численного решения, получаемого стандартными промышленными программами или собственными полуэмпирическими методами;

Валидация является неотъемлемым элементом независимо от того, используются ли стандартные промышленные пакеты программ расчета или новые собственные программы, разрабатываемые для решения тех или иных задач.

На настоящем уровне понимания проблемы ставить вопрос об одновременном численном моделировании шума от всех элементов самолета, а тем более его оптимизации в увязке с другими параметрами, по-видимому преждевременно.