

Всероссийский Аэроакустический Форум
20-25 сентября 2021 г. | Геленджик

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШУМА ГОРЕНИЯ В СОПЛЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕШАТЕЛЯ АСТРАН DGM

Жарков Александр
технический специалист
MSC Software

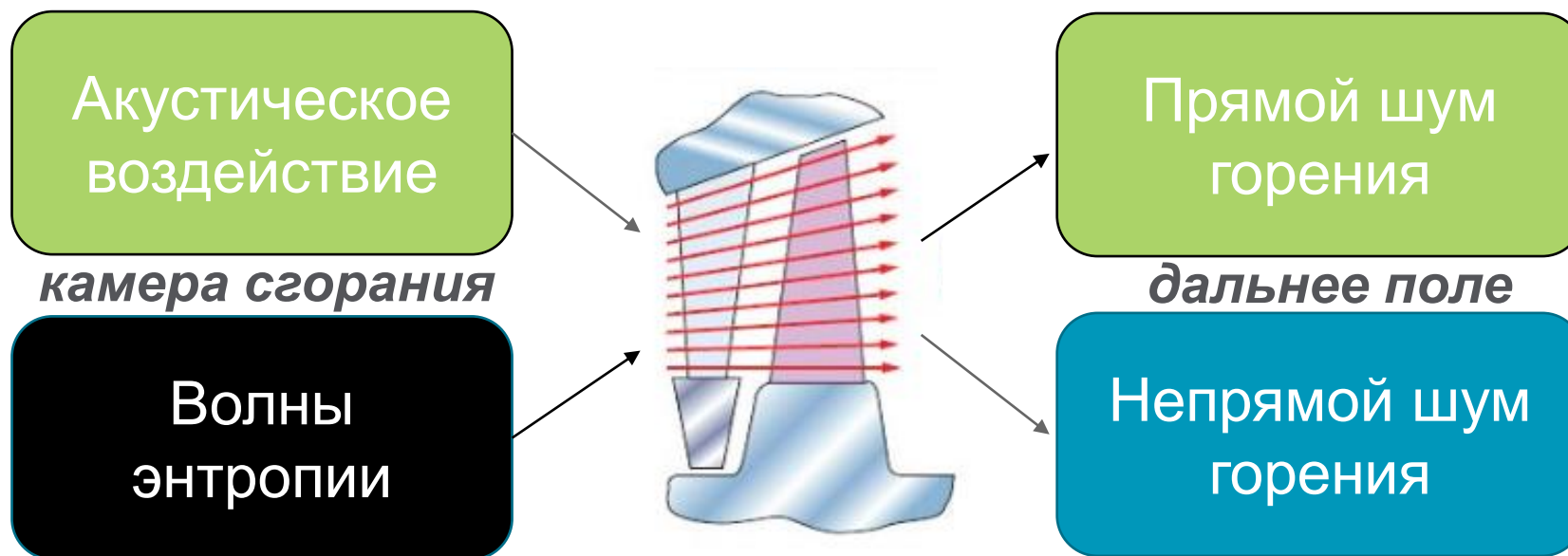
Оглавление

- 1 Постановка задачи, область применения методов
- 2 Теоретическая основа реализации в анализе частотного отклика в Actran
- 3 Реализация в Actran TM и пример расчётной модели
- 4 Реализация в Actran DGM: граничные условия Томпсона
- 5 Расчётная модель сопла в Actran DGM

- 6 Валидационные расчёты
- 7 Комплексное применение Actran

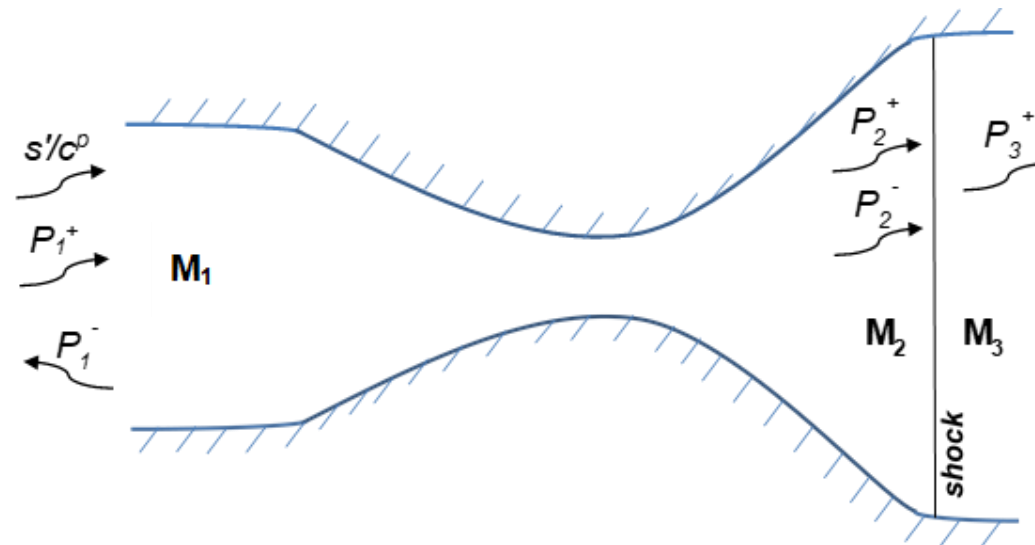
Постановка задачи

- Рассматривается не прямой механизм возникновения шума горения
- Принято, что длина волны возникающего шума существенно больше, чем размеры сопла
- Анализ проводится путём комплексного применения методов конечных элементов и аналитических методов



Теоретическая основа реализации в анализе частотного отклика в Actran Компактная модель – Marble & Candel (1977)

- Законы сохранения реализуются для входа и выхода из сопла
- Аналитические зависимости связывают флуктуации энтропии (s'/c^p) с шумом в прямом (P^+) и обратном (P^-) направлении распространения, относительно потока
- Реализован учёт наличия скачка уплотнения в сверхзвуковой части сопла



Marble F.E. and Candel S.M. Acoustic disturbance from gas nonuniformities convected through a nozzle.
Journal of Sound and Vibration, 55:225–243, 1977

Теоретическая основа реализации в анализе частотного отклика в Actran Компактная модель – Cumpsty & Marble (1977)

- Расширение предыдущей модели, дополнительный учёт средней скорости течения
- Вычислительно быстрая процедура анализа
- Законы сохранения при прохождении звуком ступени ГТД



$$[\epsilon_u^i] \begin{pmatrix} s'/C_p \\ w'/c \\ p'/\gamma p \\ \theta' \end{pmatrix}_u = [\epsilon_d^i] \begin{pmatrix} s'/C_p \\ w'/c \\ p'/\gamma p \\ \theta' \end{pmatrix}_d$$

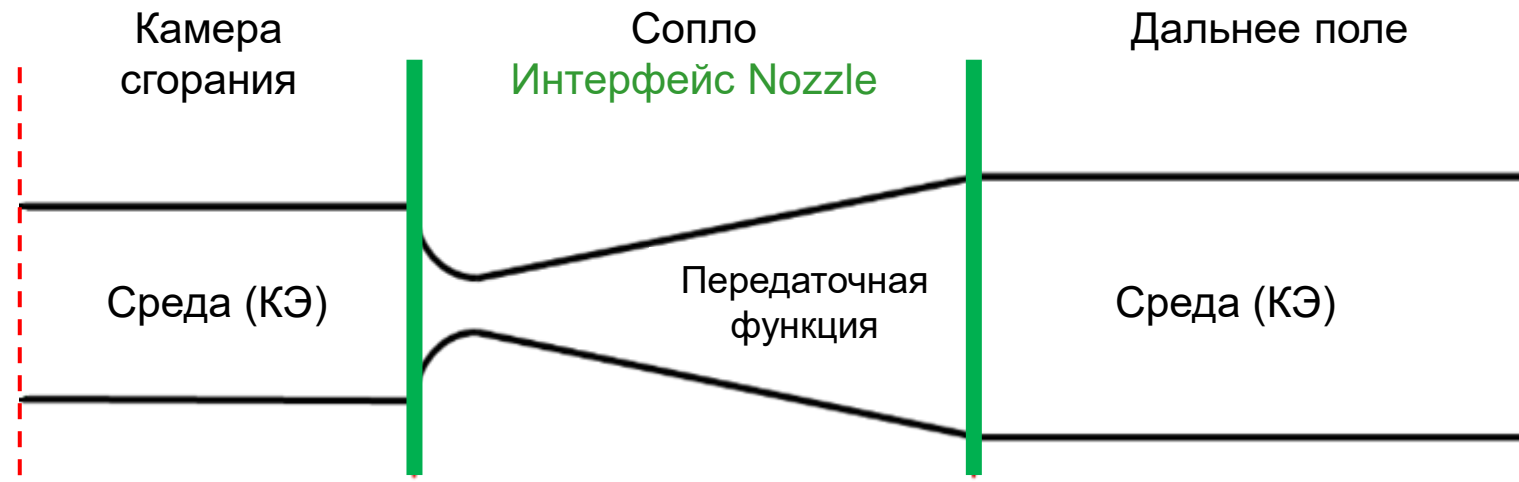
$$[\epsilon^i] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & \frac{1}{M_i} & 1 & -\tan \theta_i \\ \frac{\mu_i}{\gamma-1} & \mu_i M_i & \mu_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_i \end{pmatrix}$$

Cumpsty N.A. and Marble F.E. The interaction of entropy fluctuations with turbine blade rows; a mechanism of turbojet engine noise. Proc. Roy. Soc., A 357, 1977

Применение Acran TM

Реализация в Actran TM (частотный отклик) и пример расчётной модели

- В Actran указанные выше модели представлены в виде интерфейса между поверхностями связи
- Задаются величина энтропии, углы входа и выхода среднего течения, число Маха среднего потока в критическом сечении и число Маха перед скачком уплотнения (если его нужно учитывать)



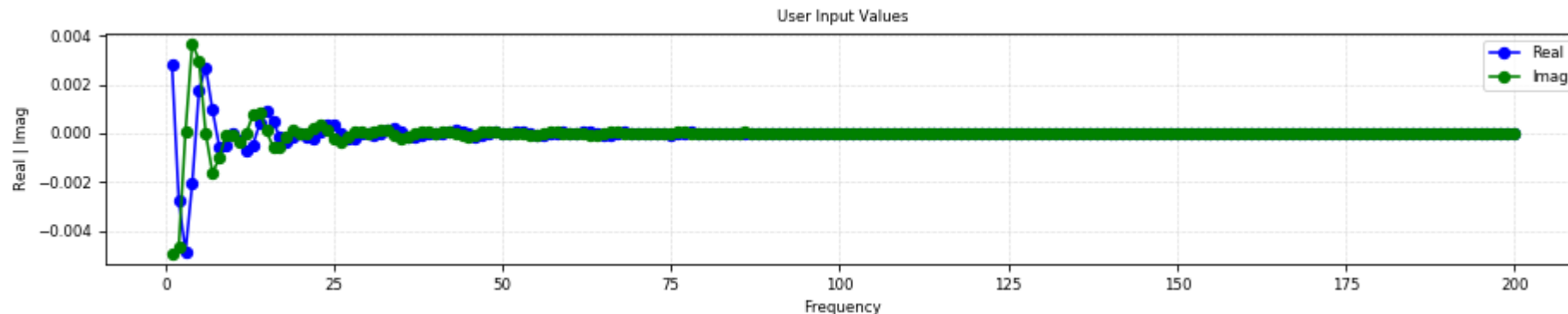
Реализация в Actran TM (частотный отклик) и пример расчётной модели (продолжение)

- Осесимметричная расчётная модель для моделирования эксперимента EWG3 (описан далее)
- Модельное сопло и камера сгорания
- Критическая часть сопла заменена передаточной функцией
- Комплексная величина энтропии задана в форме графика от частоты
- Отклонение потока не рассматривается, поле средней скорости учитывается в канальных модах и среде

Камера сгорания

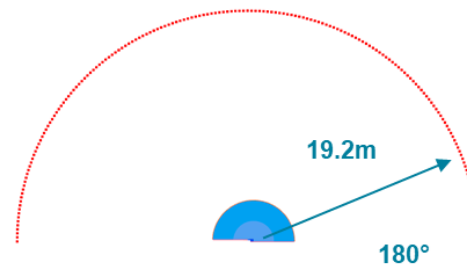
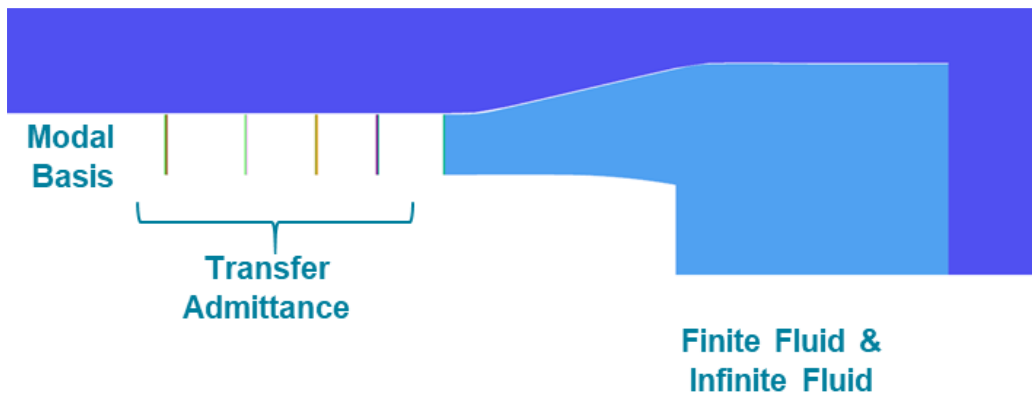
Сопло
Интерфейс Nozzle

Труба

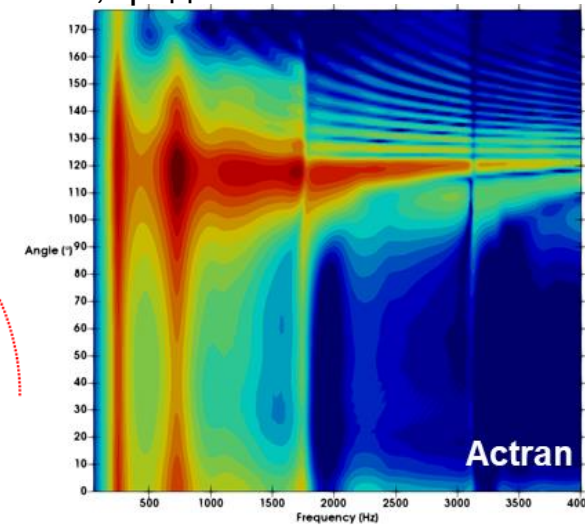


Пример расчётной модели для ГТД

- Осесимметричная модель турбины и выходного устройства ГТД
- 4 ступени, выходное устройство, излучение шума в пространство
- Для каждой ступени применена аналитическая модель, сформированы передаточные функции, как описано ранее
- Поля средней скорости и др. параметров предварительно рассчитаны в CFD системе
- Изменение энтропии на выходе из камеры сгорания рассчитано в CFD



Уровни звукового давления
Угол, град

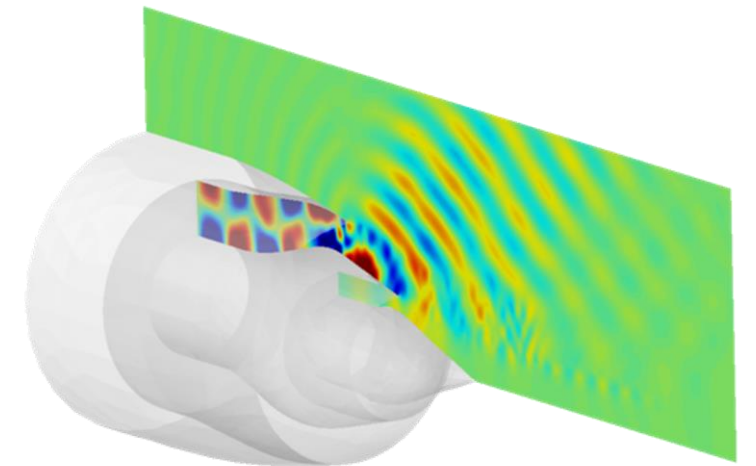
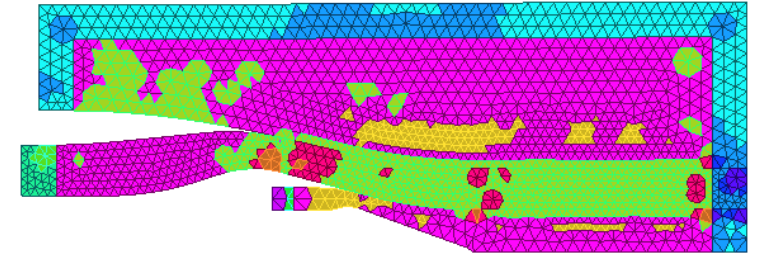


Частота, Гц

Применение Acran DGM

Решатель Actran DGM

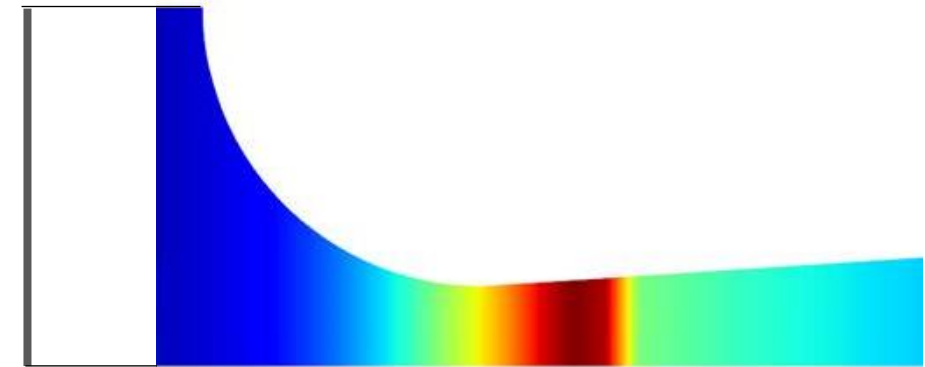
- Решение линеаризованных уравнений Эйлера
- Расчёт во времени
- Разрывный метод Галёркина, явная схема интегрирования по времени – Рунге-Кутта
- р-адаптивная сетка
- Широкий выбор реализованных источников шума и граничных условий
- Учёт средней скорости среды, в том числе сверхзвуковых течений и скачков уплотнения
- Неотражающие граничные условия



Реализация в Actran DGM: границные условия Томпсона

- Граничные условия Томпсона
- Накладываются на наружной поверхности элементов акустической среды
 - Неоднородное поле плотности, скорости или давления, или их комбинация
 - неконсервативная формулировка
 - Неоднородное поле плотности, энергии или момента движения
 - консервативная формулировка
- Главная особенность – неотражение волн, которые двигаются в направлении, противоположном воздействию
- Используются для моделирования воздействий от конструктивных элементов, которые в модели не описаны
 - например, шум воздушных винтов
- Применительно к задаче распространения шума горения в сопле Г.У. Томпсона могут быть использованы в качестве источника изменения энтропии

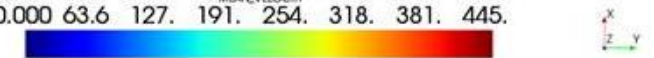
Осесимметричная модель сопла



Г.У.

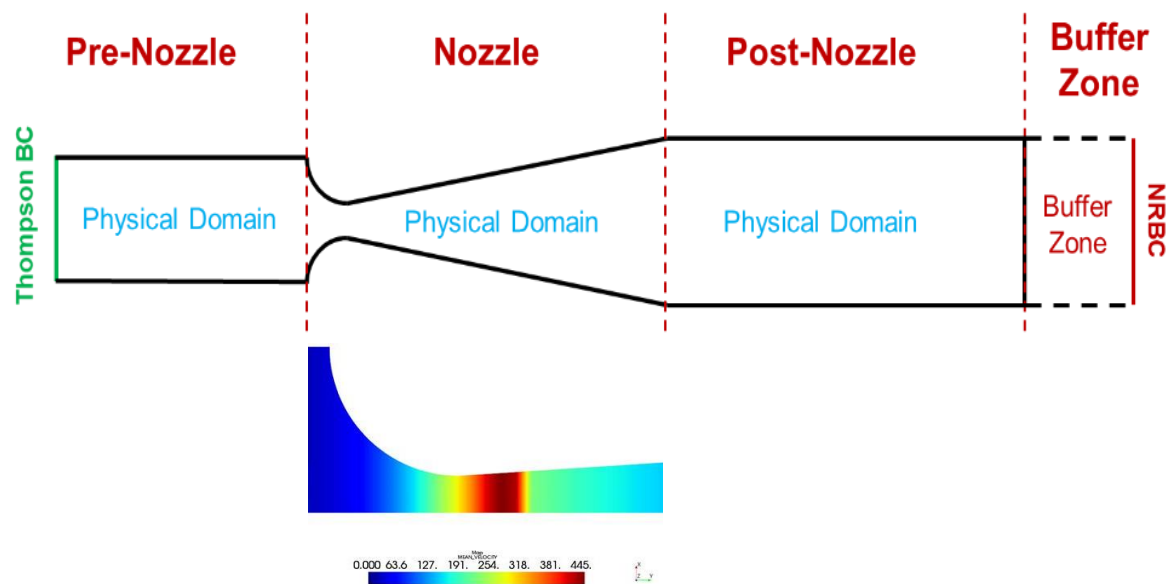
Томпсона

Map
MEAN VELOCITY
0.000 63.6 127. 191. 254. 318. 381. 445.



Средняя скорость, м/с

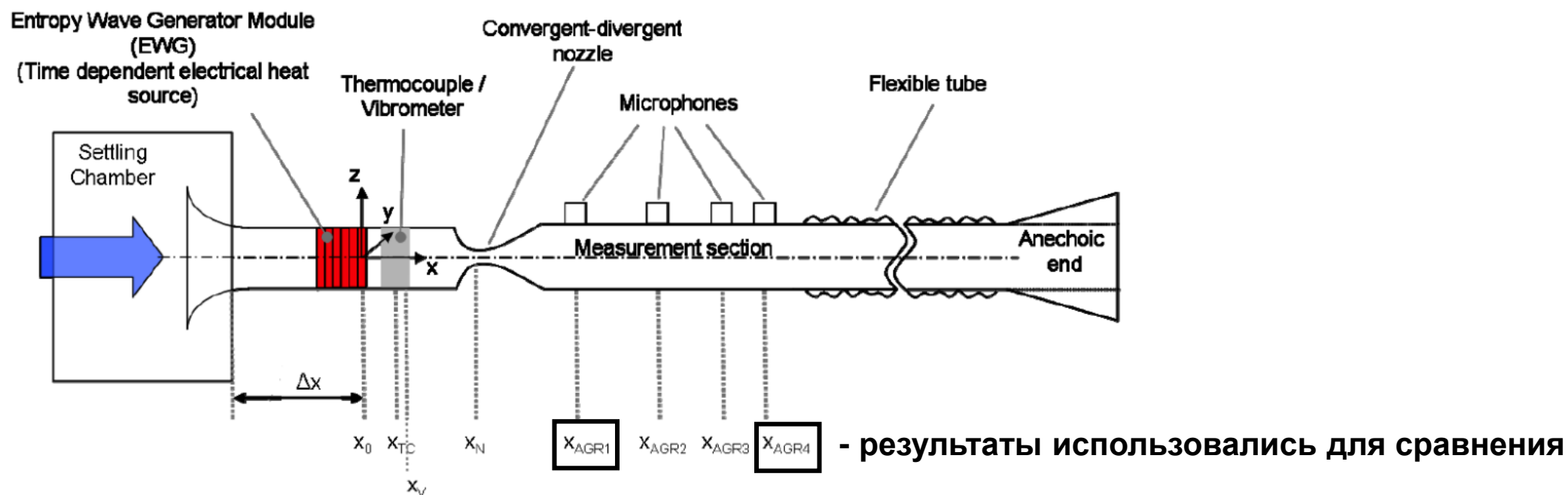
Расчётная модель сопла в Actran DGM



- Возможно построение как осесимметричных (на плоскости), так и трёхмерных моделей
- Представляет интерес моделирование области критического сечения сопла
- На выходе применяется буферная зона для обеспечения неотражения волн
- Поле средней скорости предварительно рассчитывается в CFD системе
- Возможно моделирование распространения звука в условиях сверхзвуковых течений и скачков уплотнения
 - эти условия задаются неоднородностью поля средней скорости потока
- В остальном применяются те же допущения, что и для предыдущей одномерной модели сопла

Валидационные расчёты

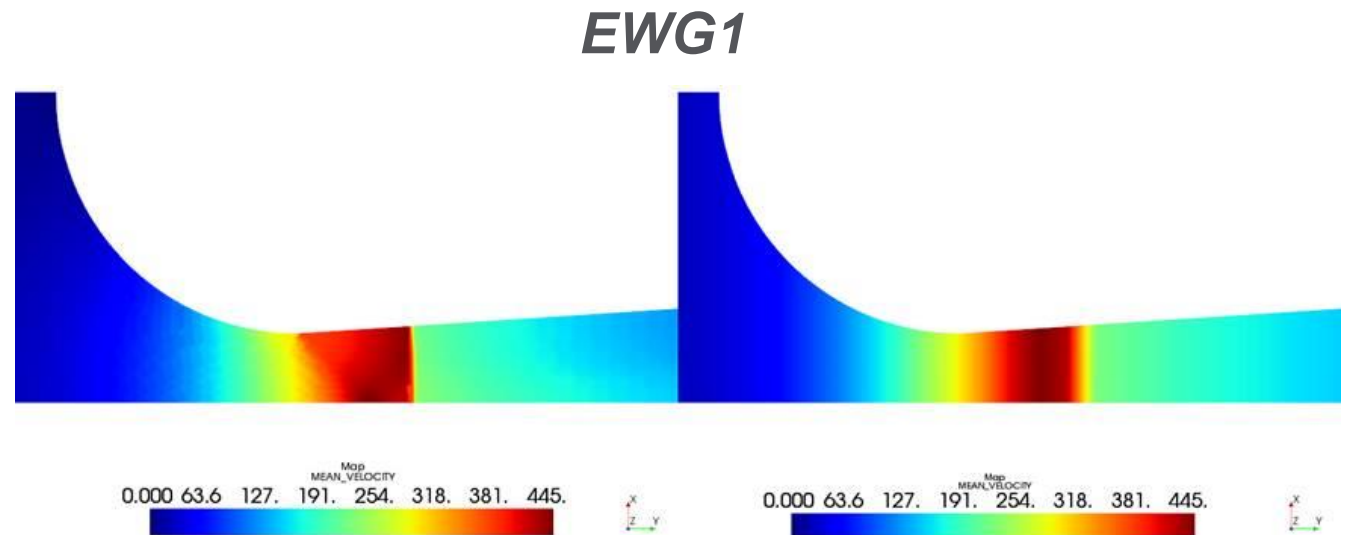
- Для валидации методик использовались результаты экспериментов на установке Entropy Wave Generator
- Задавались пульсации температуры длительностью 100 ms, с частотой следования в одну секунду



F. Bake, C. Richter, B. Mühlbauer, N. Kings, I. Röhle, F. Thiele and B. Noll, The Entropy Wave Generator (EWG): A reference case on entropy noise, J. Sound Vib. 326 (2009) 574–598

Валидационные расчёты: вычисление поля средней скорости в сопле

- Использовалась CFD-система OpenFOAM
- Погранслоем не моделировался, но радиальная неоднородность скорости вызывала нестабильность счёта в Actran DGM
- Основным интересом представляет распространение волн в направлении течения среды, поперечную неоднородность целесообразно исключить из рассмотрения – это уменьшает нестабильность



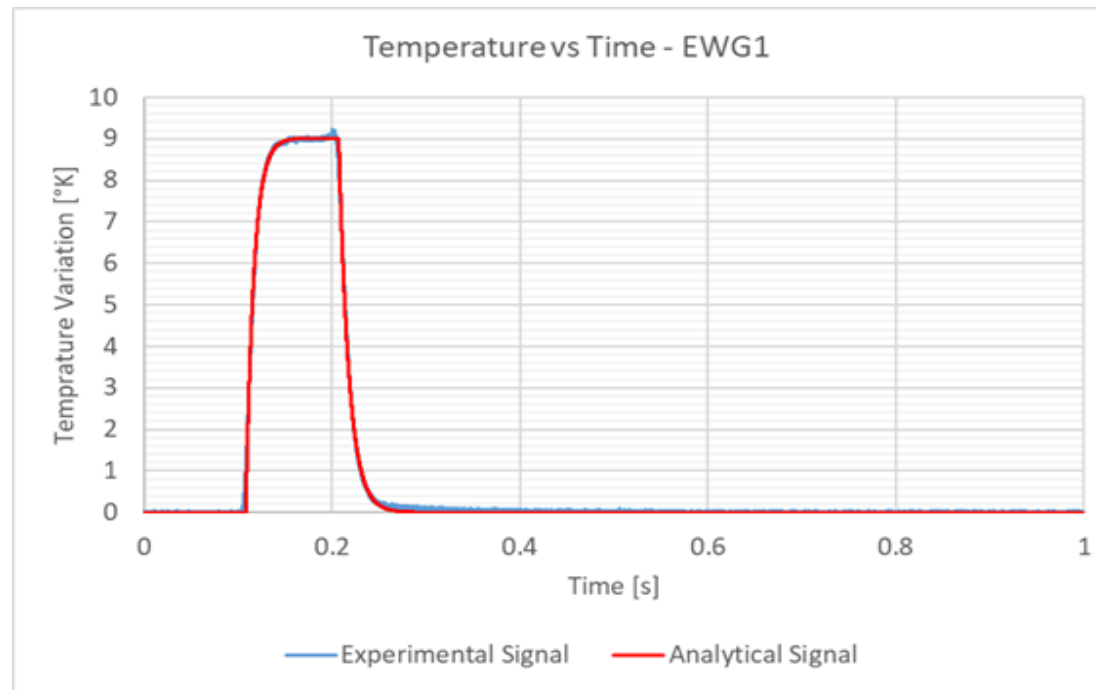
*Изначальное поле
средней скорости*

Модифицированное поле

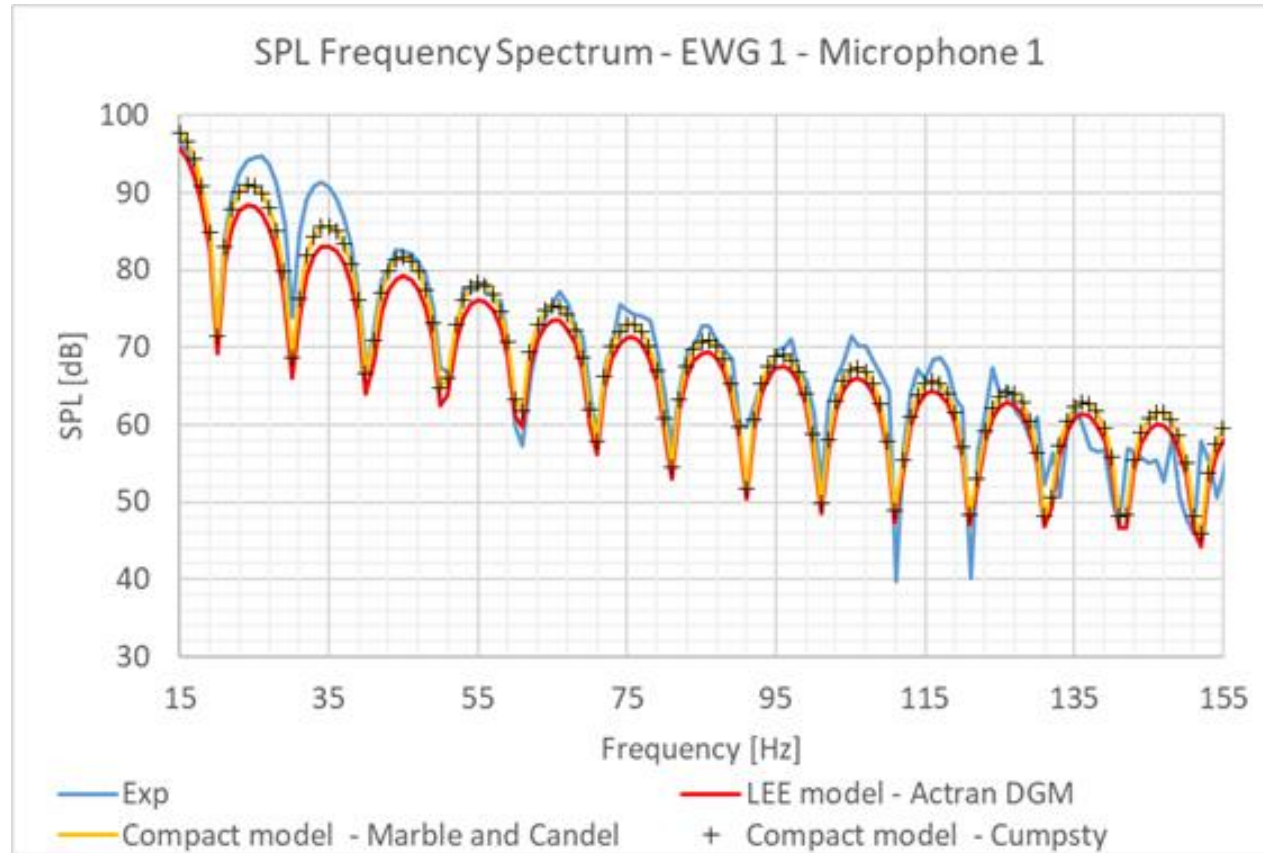
Валидационные расчёты: внешнее воздействие в Actran DGM

- Воздействие задаётся граничными условиями Томпсона
- Профиль изменения плотности по времени был подобран так, чтобы параметры совпадали с экспериментальными

$$\rho'_{exp} = -\frac{\rho_0}{T_0} * T'$$



Валидационные расчёты: вариант EWG1 – сверхзвук и скачок уплотнения



- Другие варианты: дозвуковое течение, трансзвуковое течение в критическом сечении

Deconinck T., Vallon A., et al, Numerical investigation of indirect combustion noise mechanisms in a nozzle, 23rd International Congress on Acoustics, Aachen 2019

Комплексное применение Actran

- Показаны возможности анализа шума горения в Actran и их валидация
- При решении задач в Actran DGM накладывается меньше ограничений, чем в одномерных моделях Cumpsty & Marble, что лучше подходит для задач промышленного уровня
- Система Actran поддерживает совместное применение указанных опций с базовыми методами анализа шума ГТД и других устройств
- Возможно комплексное применение Actran с другими системами анализа (CFD) для проведения рассмотренных расчётов

Спасибо за внимание