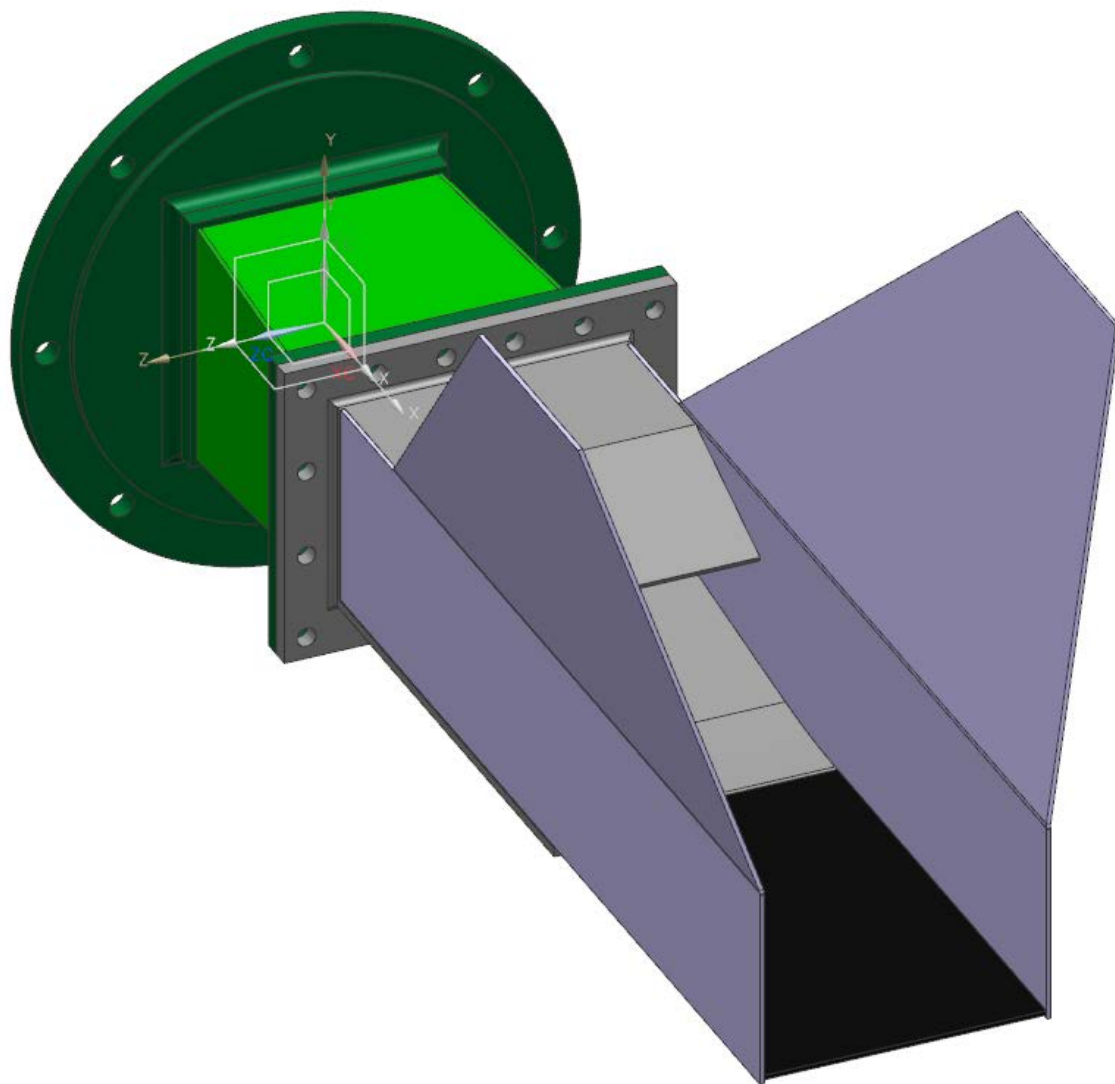


# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМА МОДЕЛИ ВЫХОДНОГО УСТРОЙСТВА ПЕРСПЕКТИВНОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ГРАЖДАНСКОГО САМОЛЕТА

С.А. Карабасов<sup>1</sup>, В.Е. Макаров<sup>2</sup>, А.К. Миронов<sup>2</sup>, В.А. Шорстов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Queen Mary University of London, London, [s.karabasov@qmul.ac.uk](mailto:s.karabasov@qmul.ac.uk) и НЦМУ ЦАГИ

<sup>2</sup>ЦИАМ им. П.И.Баранова, Москва, [vmakarov@ciam.ru](mailto:vmakarov@ciam.ru)



Режим	NPR	T*, К	U, м/с (скорость полного расширения)
№ 1	1.68	505	375.8
№ 2	1.80	550	415.7
№ 3	2.20	635	511.2

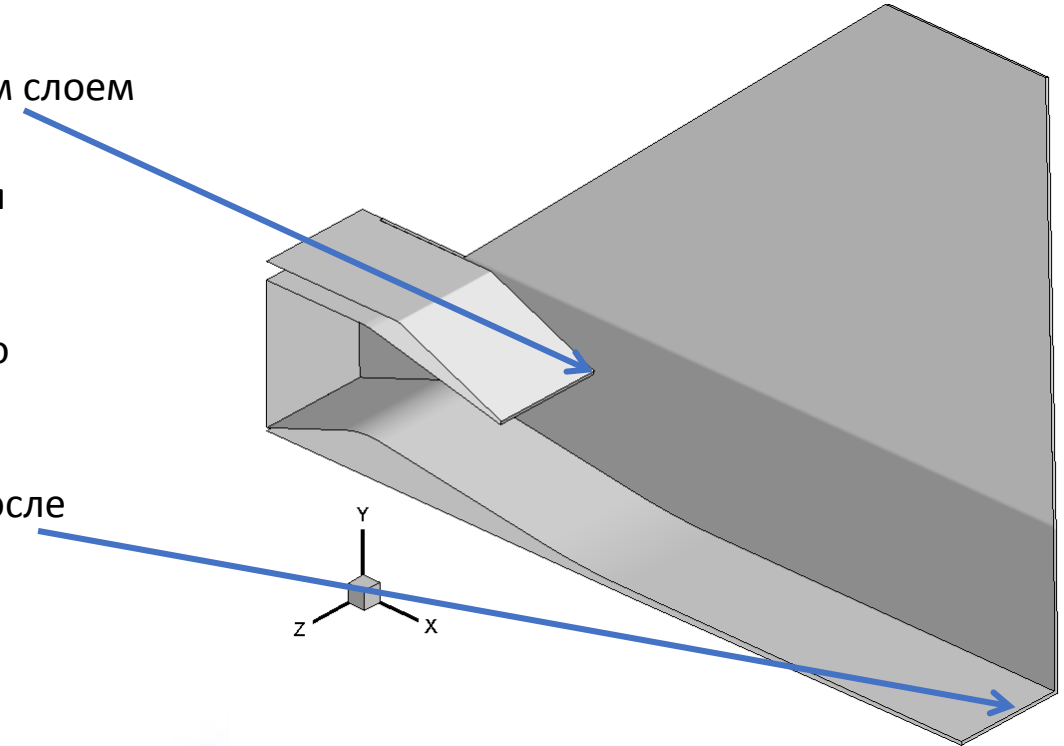
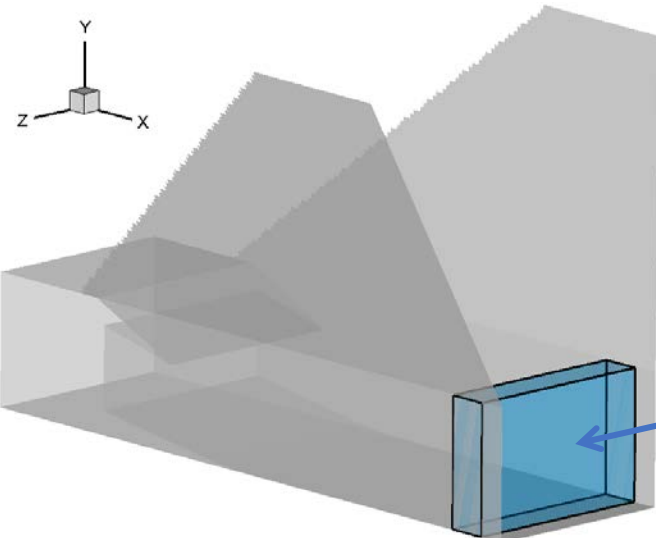
# Предположительные особенности течения и постановка как их следствие, зонная модель 1

- После среза верхней губы течение происходит в «канале», ограниченном с трёх сторон стенками а с четвертой нарастающим слоем смешения

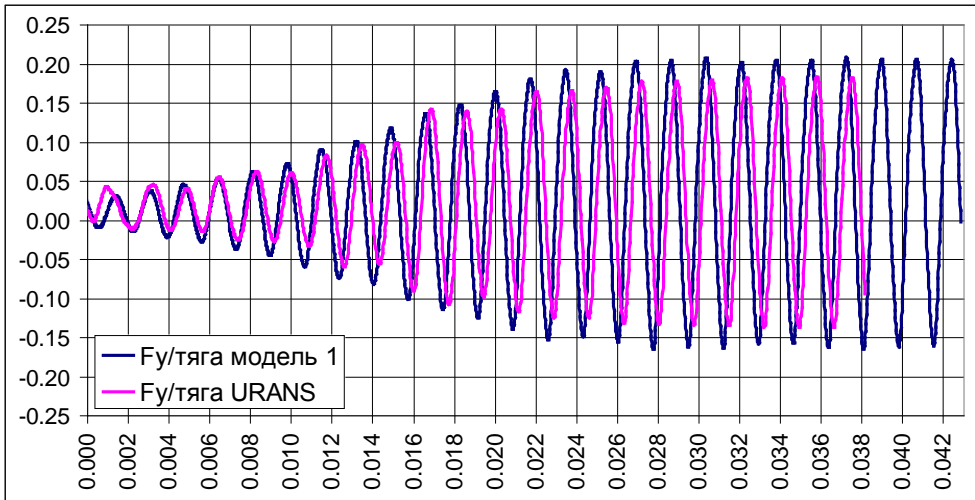
- Численная турбулизация ( $\Delta_{SLA}$ , ILES) возможна для слоя смешения но вихреразрешение в тонких ПС на этом X неприемлемо затратное

- К окончанию «канала», второму срезу имеются ПС многократно превосходящие типичные для сопел, после этого среза будет развиваться течение в струе

- Из за нетипично толстого пограничного слоя течение после второго среза должно сильно от него зависеть



Зонный подход с началом зоны LES около второго среза и VSTG генератором



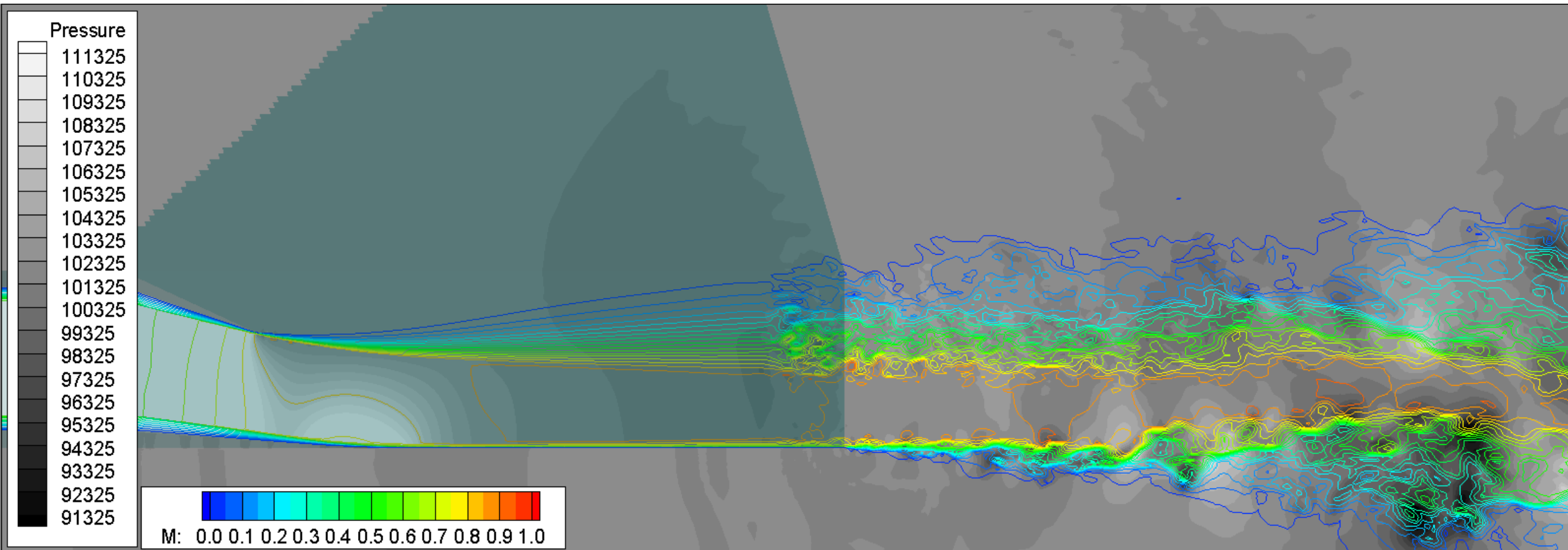
• Развитие процесса оказалось катастрофическим

• URANS расчетом было подтверждено что колебания определяются течением в “канале”, зоне URANS

• URANS нельзя считать достоверным в этом случае

• При построении модели предполагалось что течение там почти стационарное

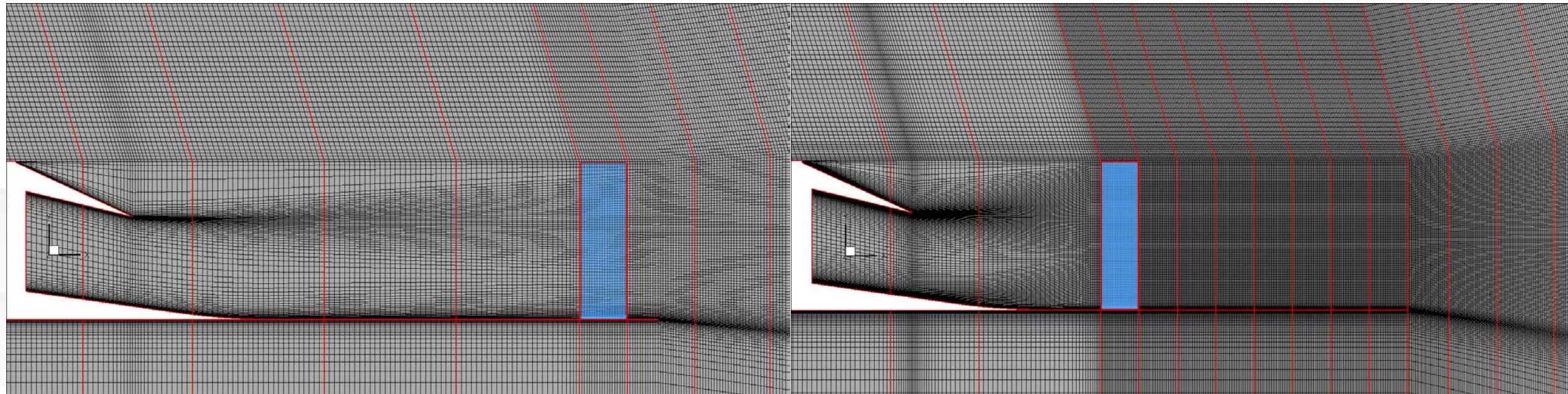
• Модель не удовлетворительная, нужна другая



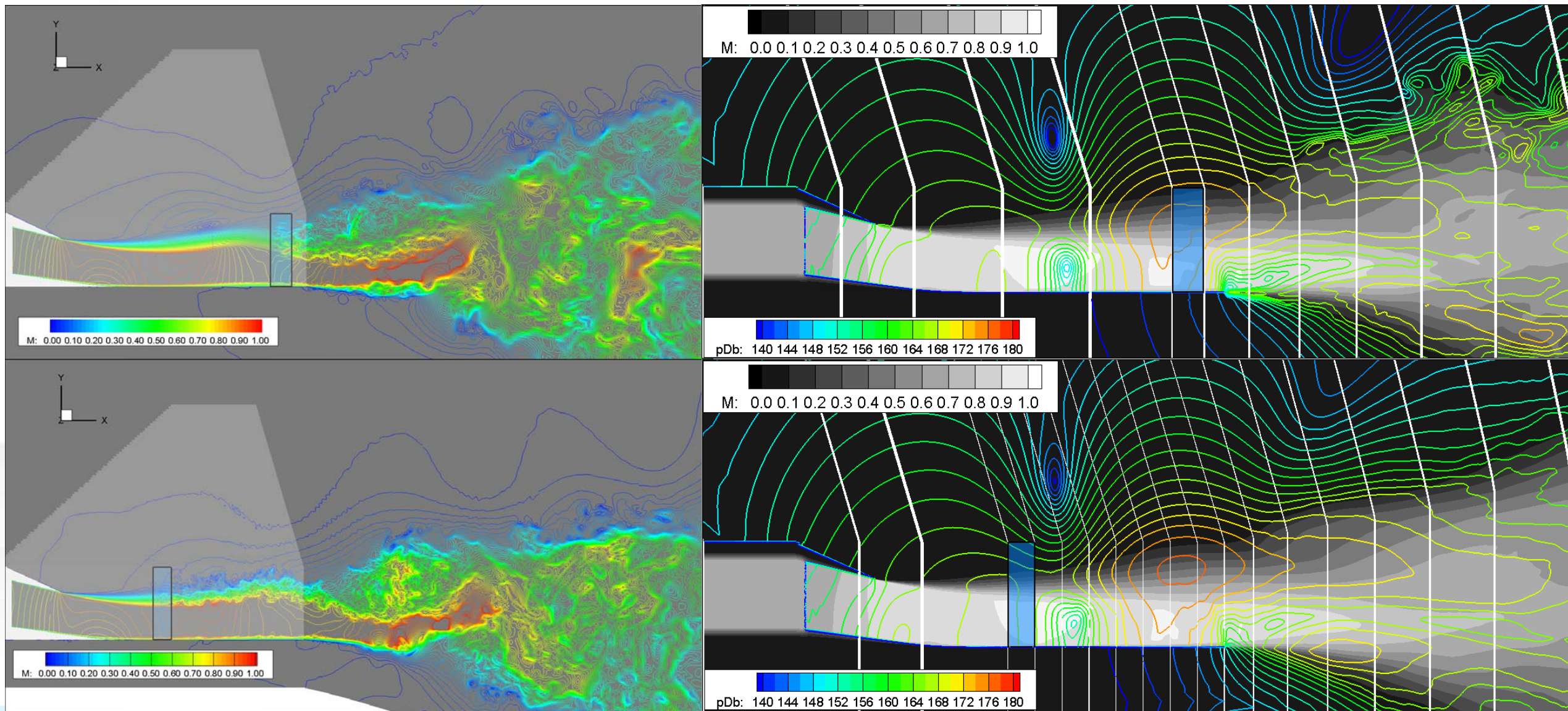
- Предпочтительна постановка с LES от среза
- Из соображений резкого роста вычислительных затрат и того что максимальные колебания были в конце канала решили не менять структуру но установить границу на  $2/5$  длины канала от среза
- Для работы с более мелкими структурами ПС и слоя смещения основной шаг был уменьшен в 2 раза до 0.7mm
- Для пограничного слоя на границе  $\Delta X = \Delta Z = \delta/6$ , в работе\* этого было достаточно для WMLES в пограничном слое
- Сетка выросла до 60M

Сетка и зона VSTG модель 1 (20M)

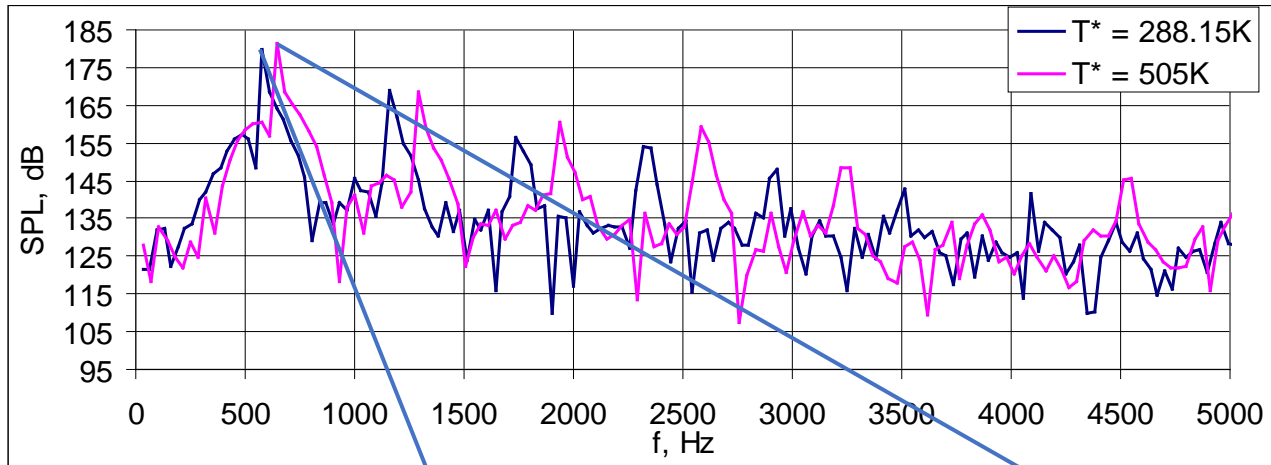
Сетка и зона VSTG модель 2 (60M)



# Сопоставление результатов моделей 1 и 2 в пульсациях давления доминирует тон 580Hz



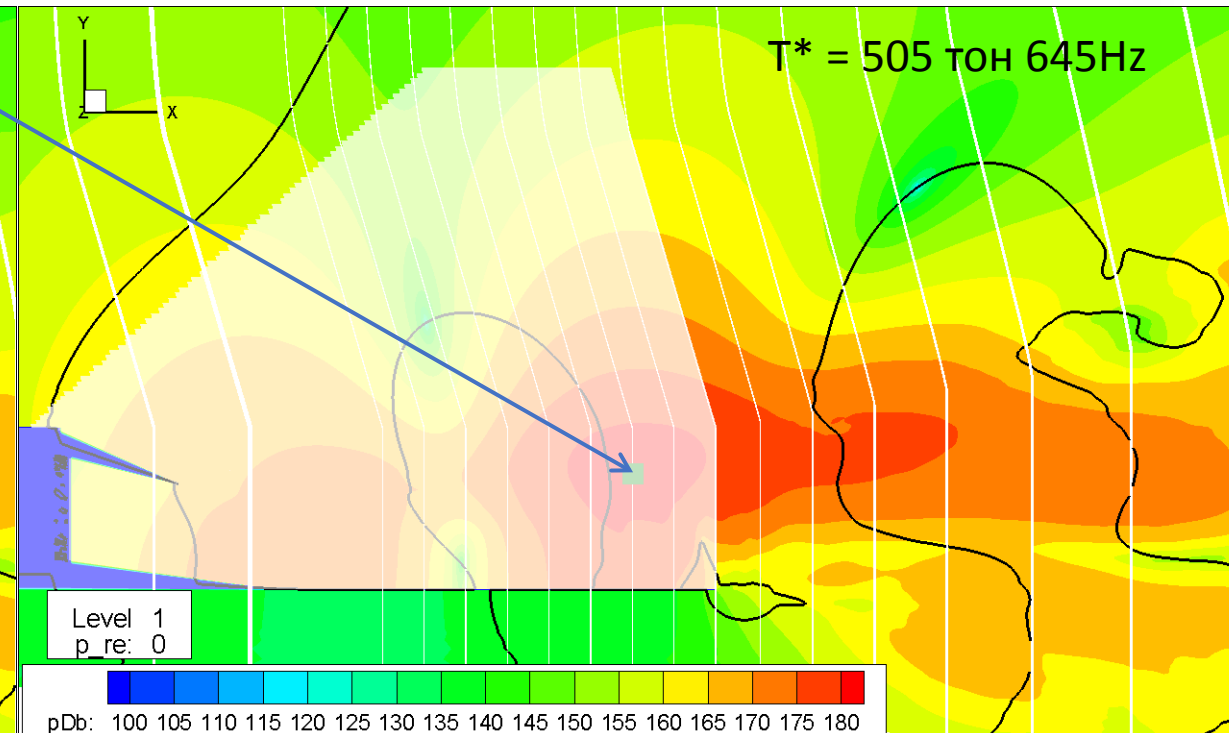
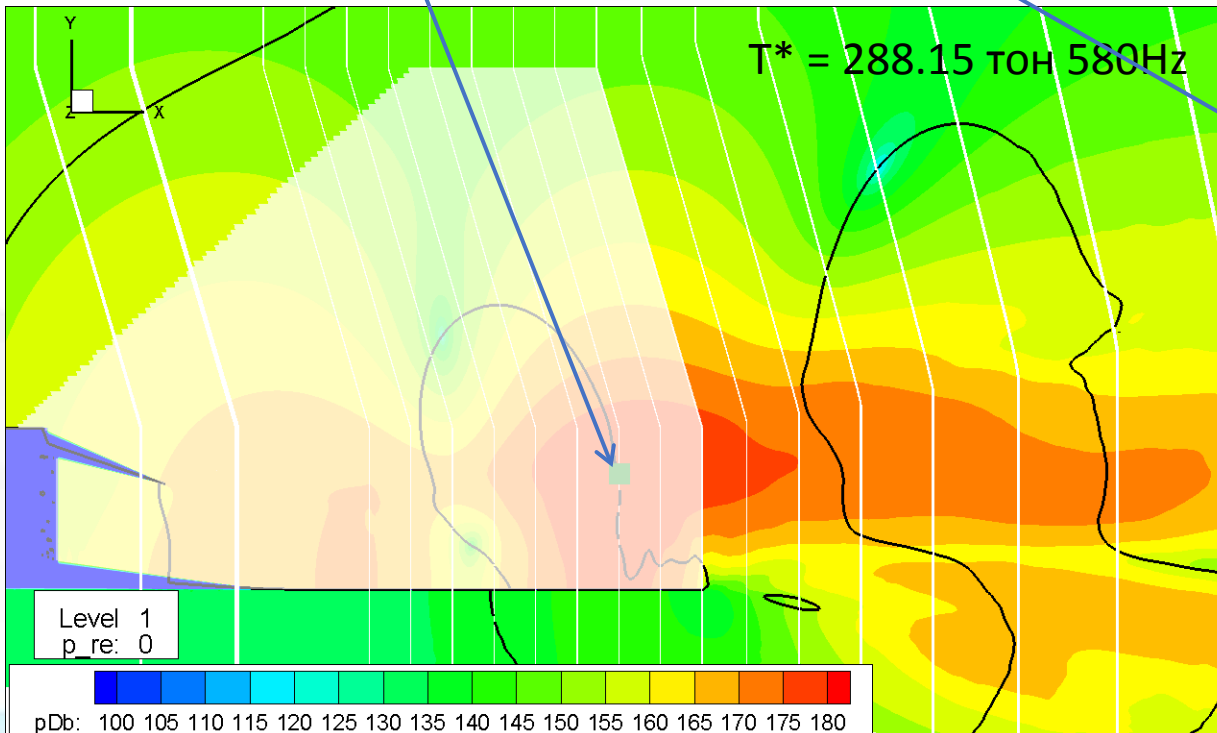
# Сопоставление результатов модели 2 для холодной и горячей струй



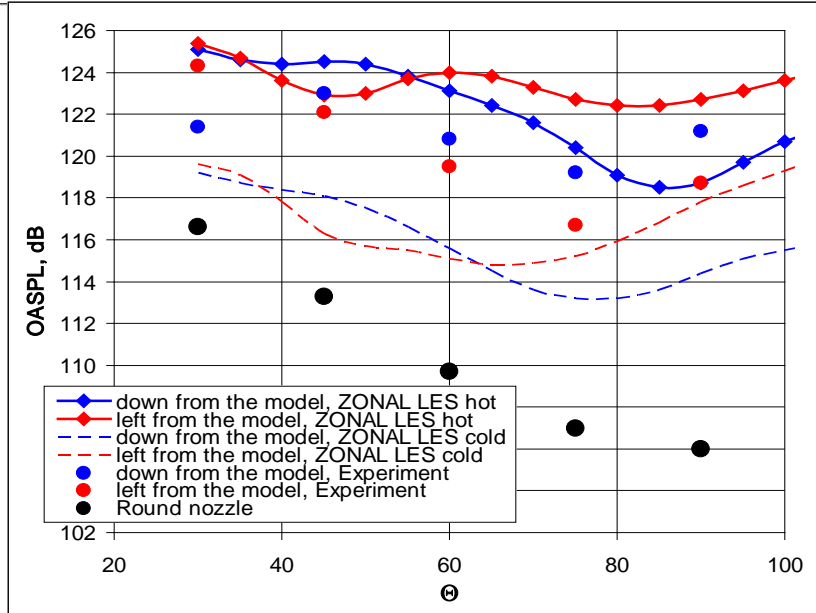
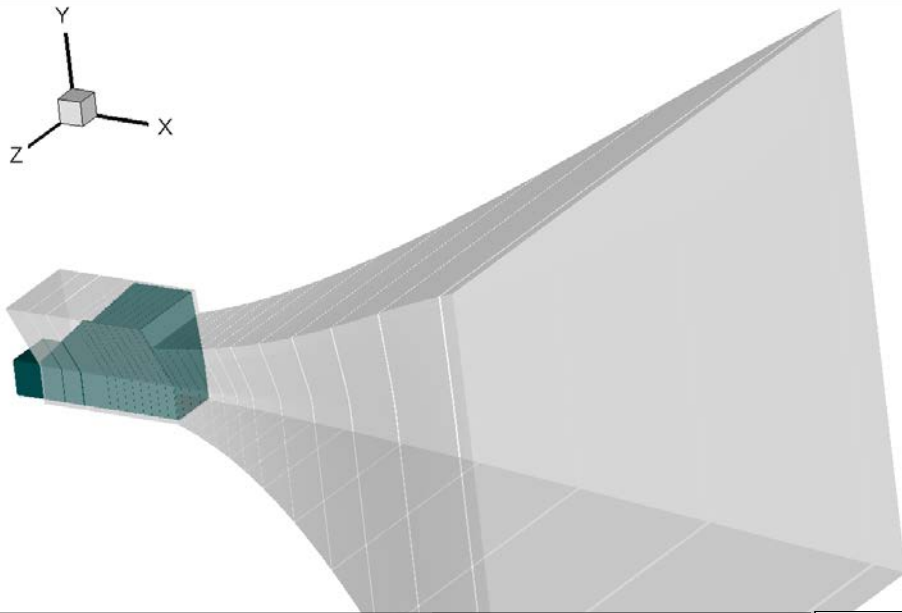
Нет подобия по числу Струхала

$$\sqrt{\frac{505}{288.15}} \approx 1.32$$

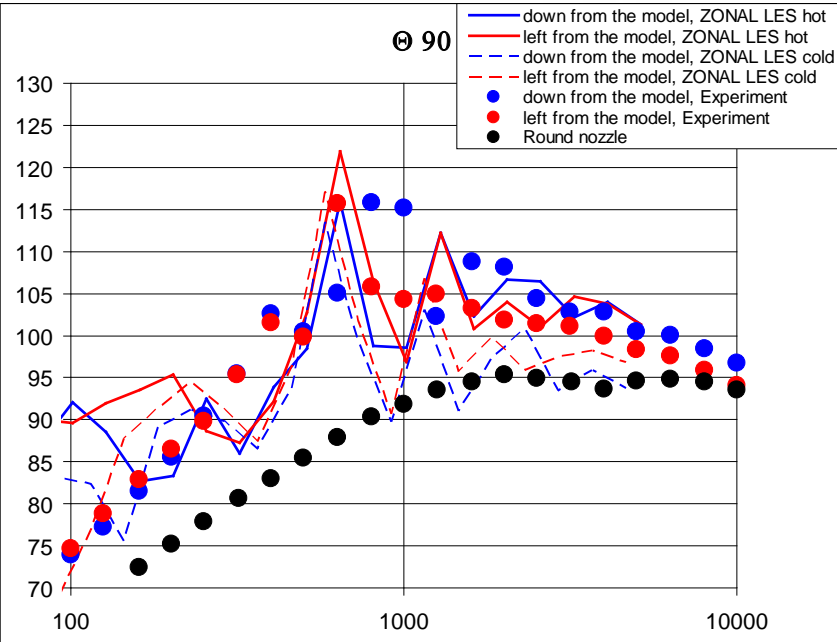
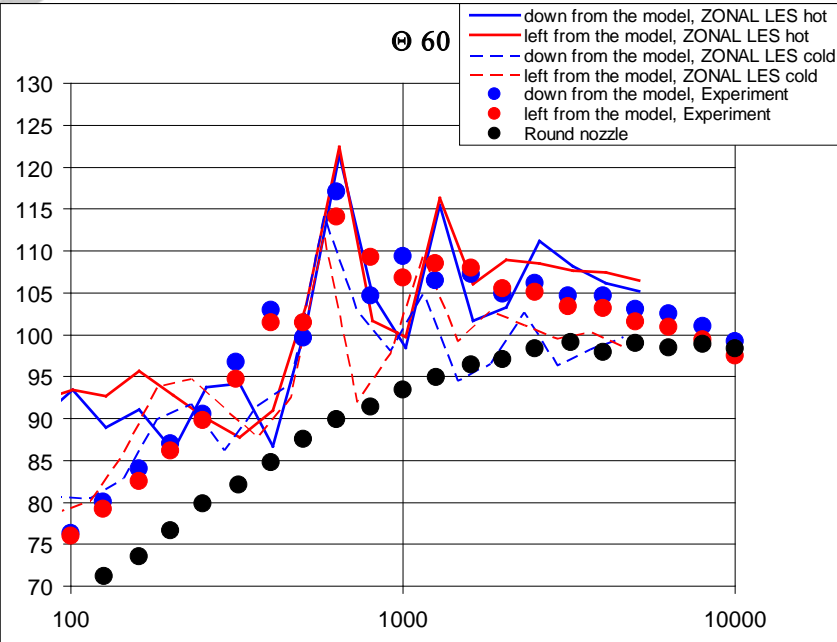
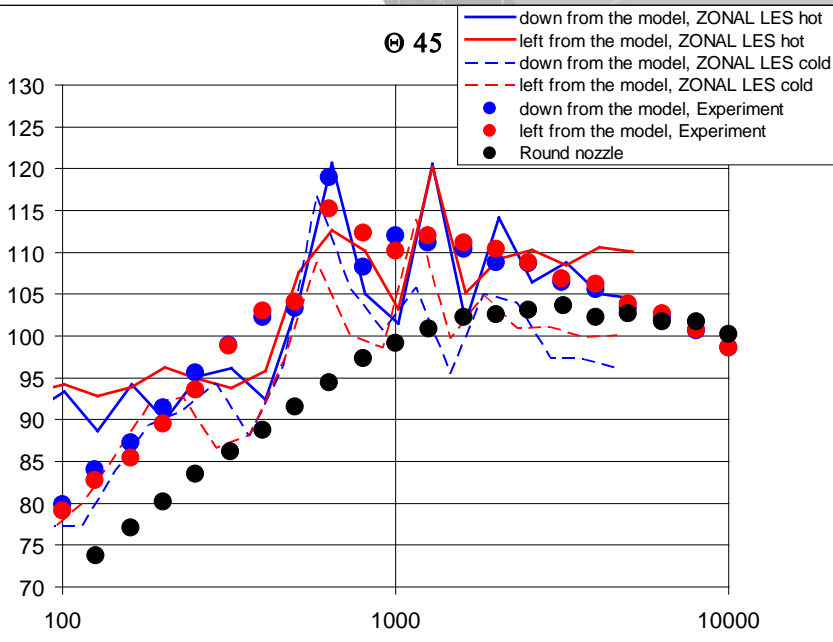
$$\frac{645}{580} \approx 1.11$$



# Сопоставление шума в дальнем поле с экспериментом



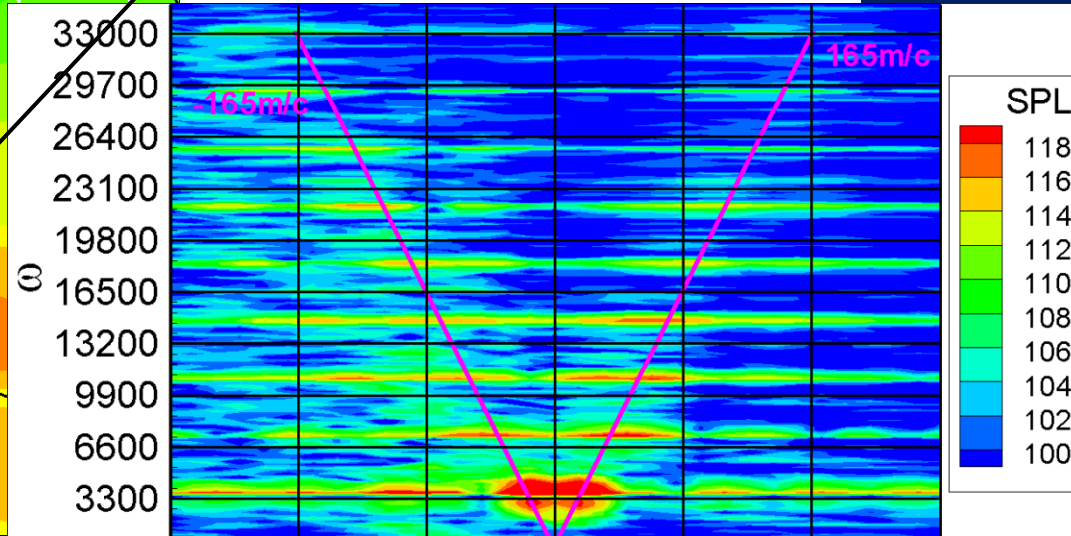
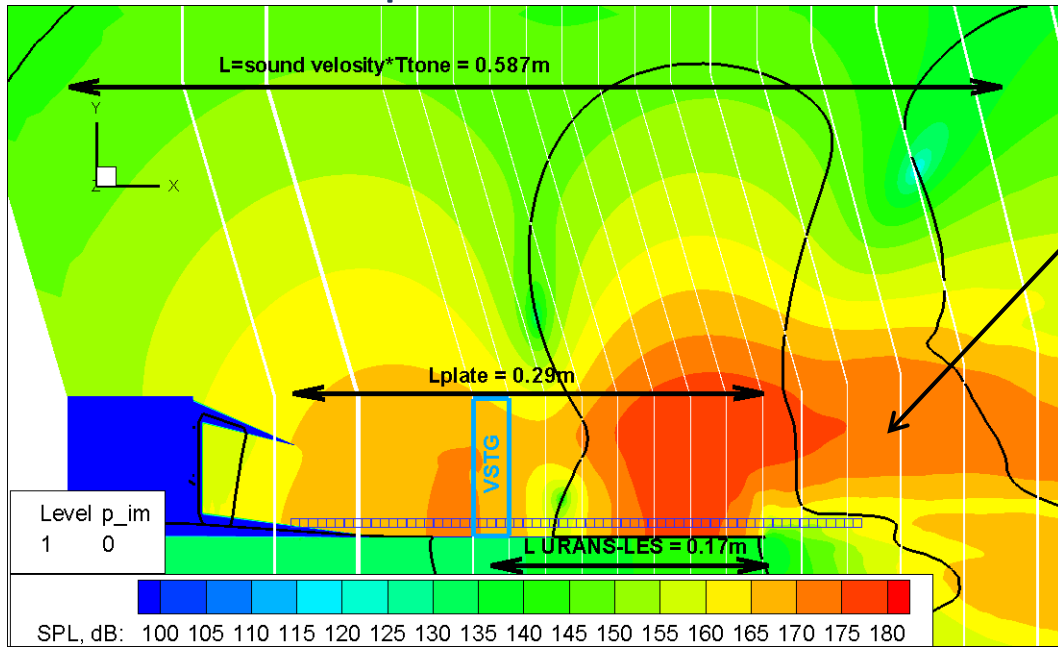
Частота основного тона  
 Эксперимент      Расчет  
 670Hz              645Hz  
 Разница 3.7%





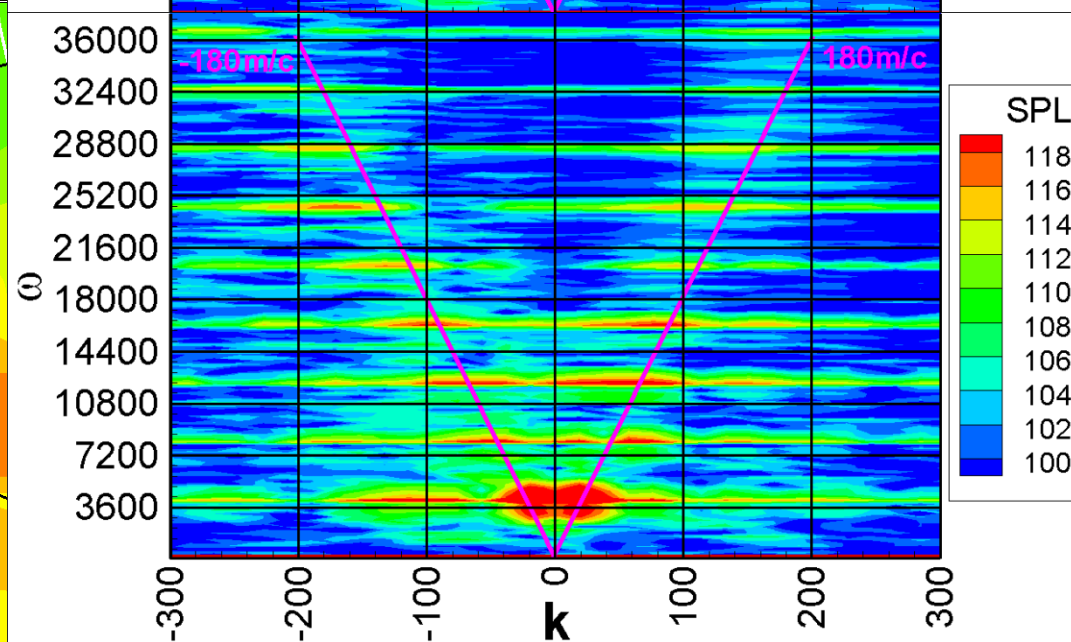
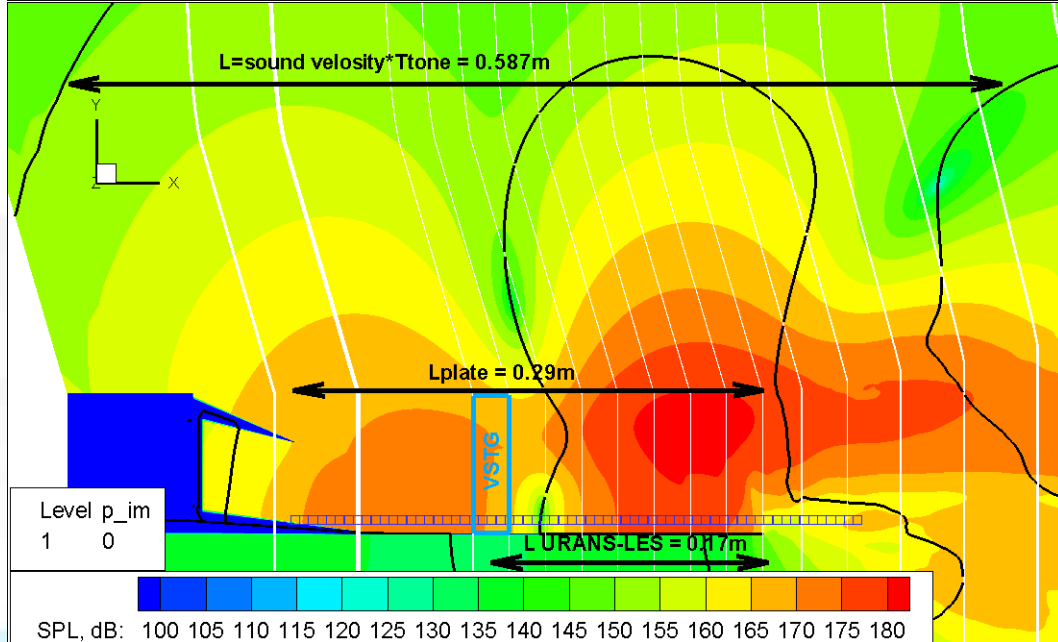
# Фазовые скорости и поиск возможных точек резонанса

Стоячая волна отражение от свободной границы



$$T = x/u_l + x/u_r$$

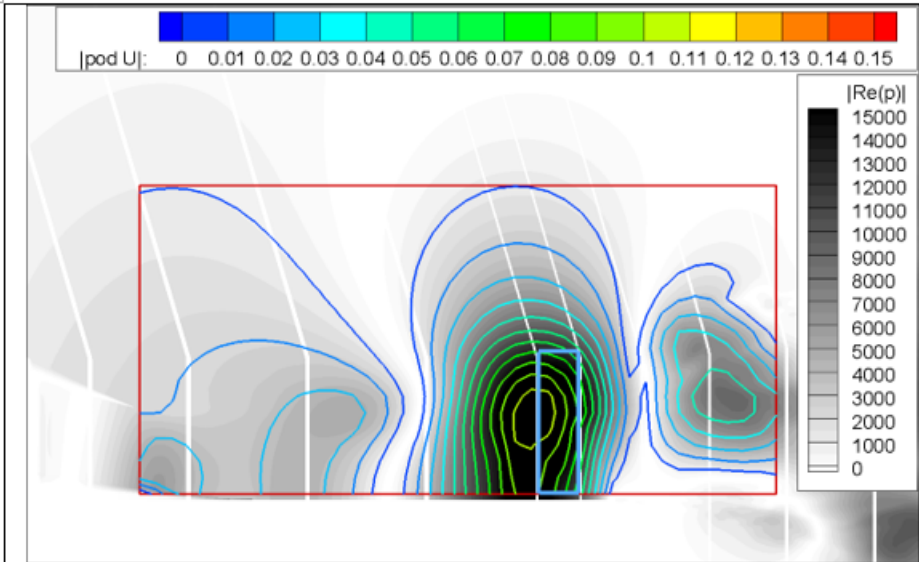
$$x = \left( \frac{1}{u_l T} + \frac{1}{u_r T} \right)^{-1} = \left( \frac{580}{165} + \frac{580}{165} \right)^{-1} = 0.142m$$



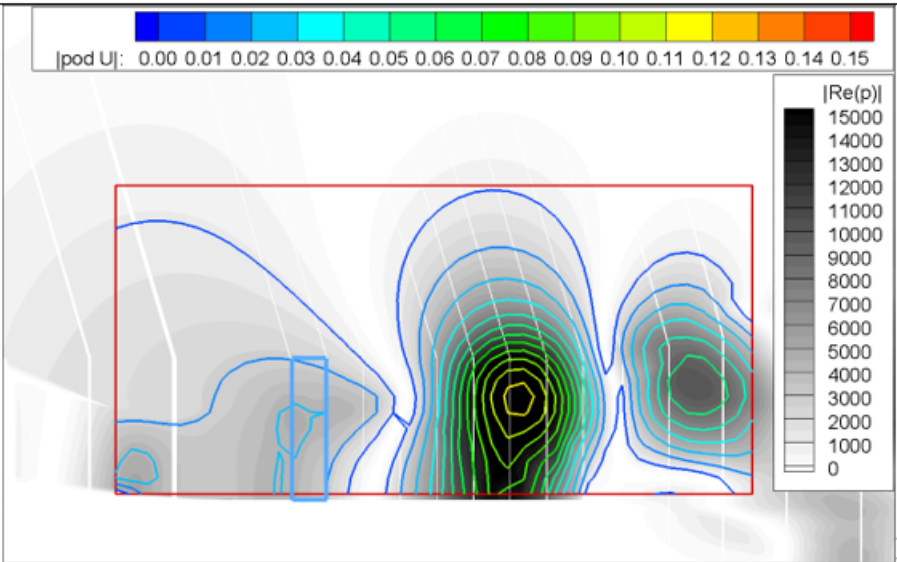
$$T = x/u_l + x/u_r$$

$$x = \left( \frac{1}{u_l T} + \frac{1}{u_r T} \right)^{-1} = \left( \frac{645}{180} + \frac{645}{180} \right)^{-1} = 0.140m$$

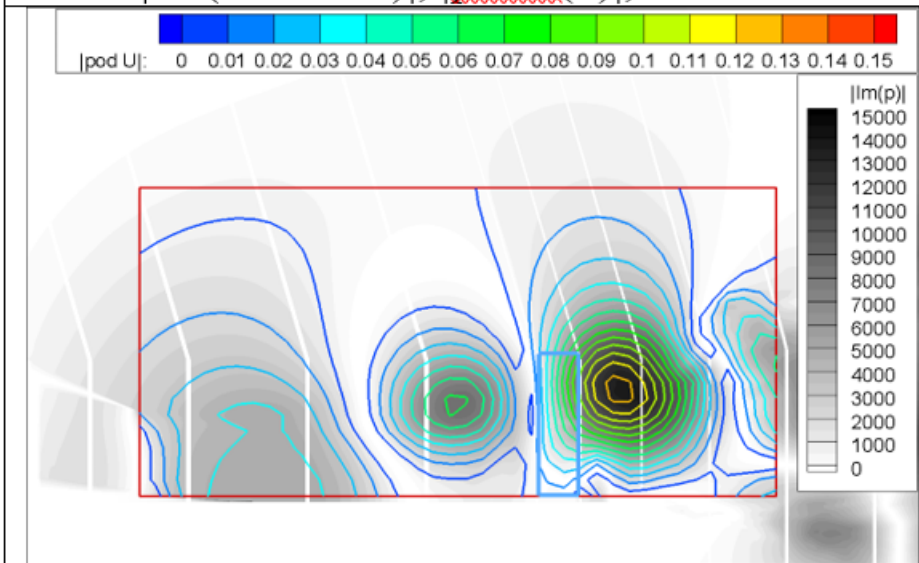
# POD, $j=1,2$



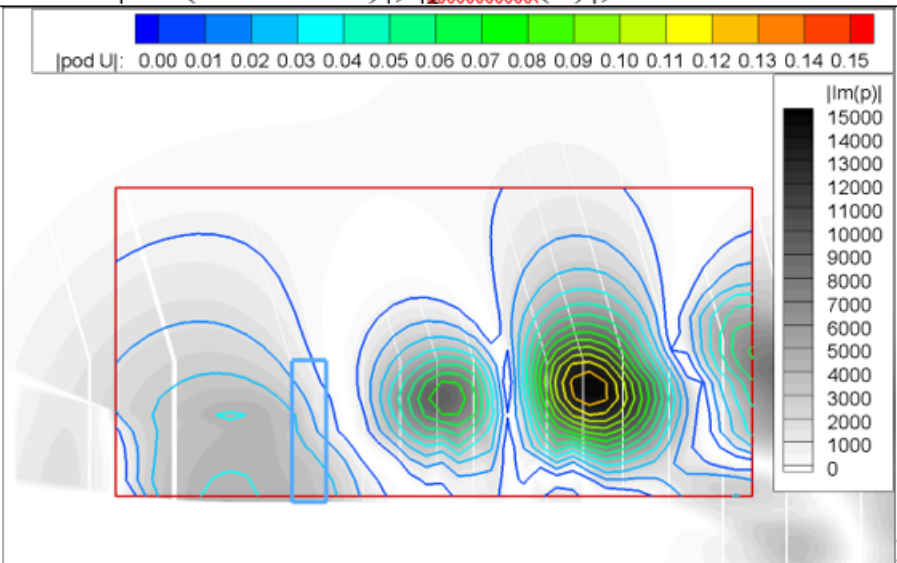
$|\text{Re}(\text{first tone})|, |\text{pod } U(1)|, \text{model } 1 \alpha$



$|\text{Re}(\text{first tone})|, |\text{pod } U(1)|, \text{model } 2 \alpha$



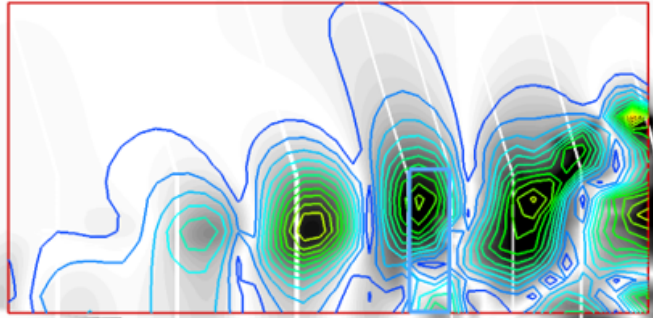
$|\text{Im}(\text{first tone})|, |\text{pod } U(2)|, \text{model } 1 \alpha$



$|\text{Im}(\text{first tone})|, |\text{pod } U(2)|, \text{model } 2 \alpha$

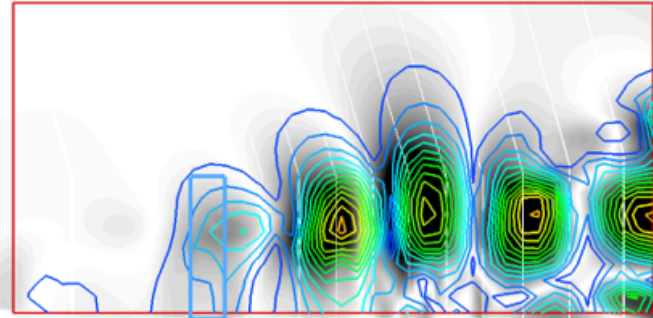
# POD, $j=3,4$

|pod U|: 0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 0.11 0.12 0.13 0.14 0.15



|Re(p)|  
3000  
2800  
2600  
2400  
2200  
2000  
1800  
1600  
1400  
1200  
1000  
800  
600  
400  
200  
0

|pod U|: 0.00 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.10 0.11 0.12 0.13 0.14 0.15

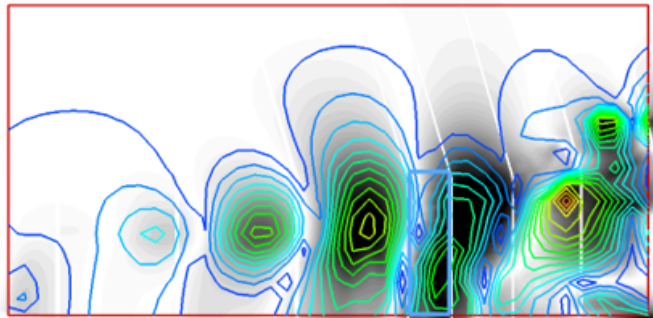


|Re(p)|  
3000  
2800  
2600  
2400  
2200  
2000  
1800  
1600  
1400  
1200  
1000  
800  
600  
400  
200  
0

$|\text{Re}(\text{second tone})|, |\text{podU}(3)|, \text{model} \cdot 1$

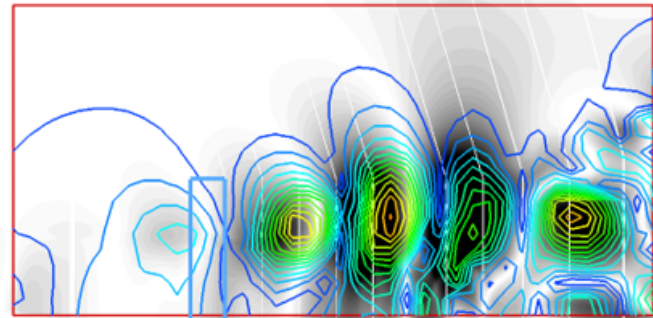
$|\text{Re}(\text{second tone})|, |\text{podU}(3)|, \text{model} \cdot 2$

|pod U|: 0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 0.11 0.12 0.13 0.14 0.15



|Im(p)|  
3000  
2800  
2600  
2400  
2200  
2000  
1800  
1600  
1400  
1200  
1000  
800  
600  
400  
200  
0

|pod U|: 0.00 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.10 0.11 0.12 0.13 0.14 0.15



|Im(p)|  
3000  
2800  
2600  
2400  
2200  
2000  
1800  
1600  
1400  
1200  
1000  
800  
600  
400  
200  
0

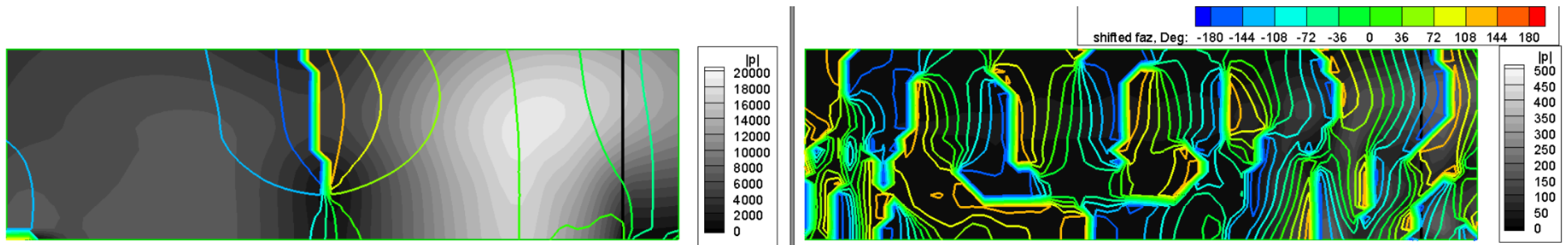
$|\text{Im}(\text{second tone})|, |\text{podU}(4)|, \text{model} \cdot 1$

$|\text{Im}(\text{second tone})|, |\text{podU}(4)|, \text{model} \cdot 2$

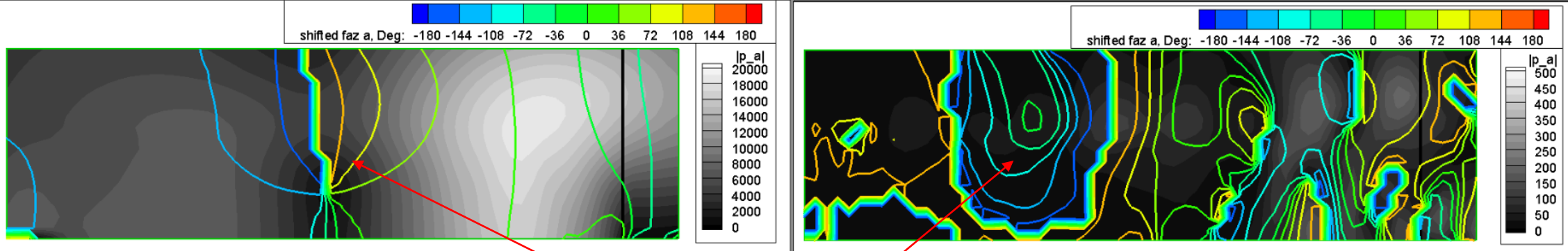
# Linear Stochastic Estimation

W=control, U= original signal; LSE:  $U \Rightarrow (U*W)$

Original



LSE

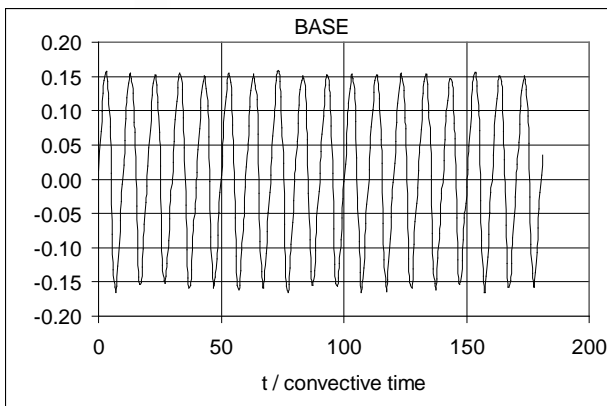


reflections

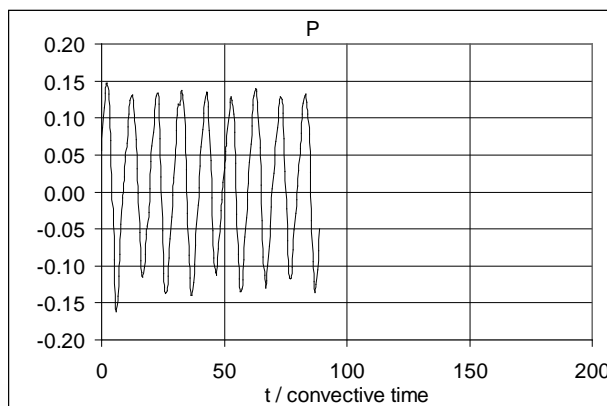
# Влияние геометрии в окрестности точки отражения

Добавление полукруга к нижней пластине слабо влияет на частоту и амплитуду

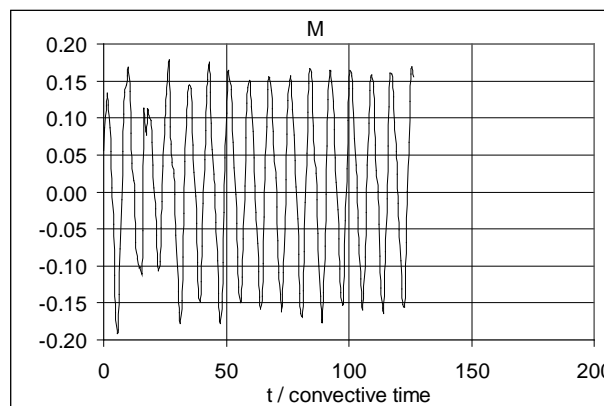
Вырез в боковых стенках ведет к росту частоты



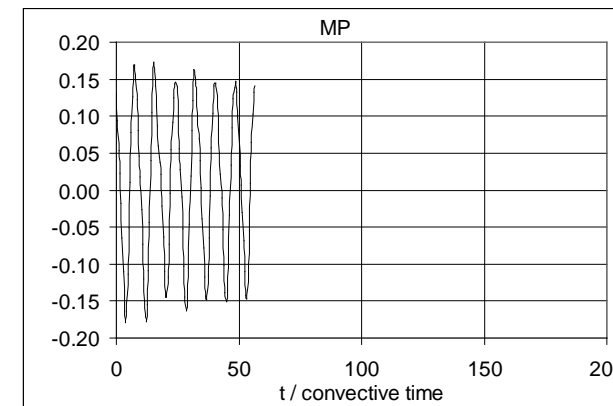
645Hz



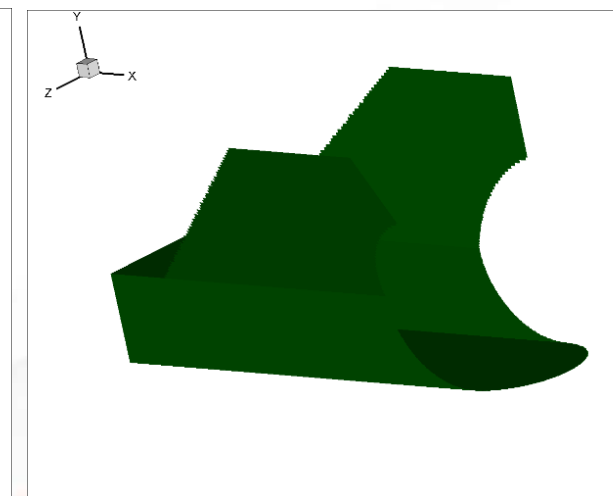
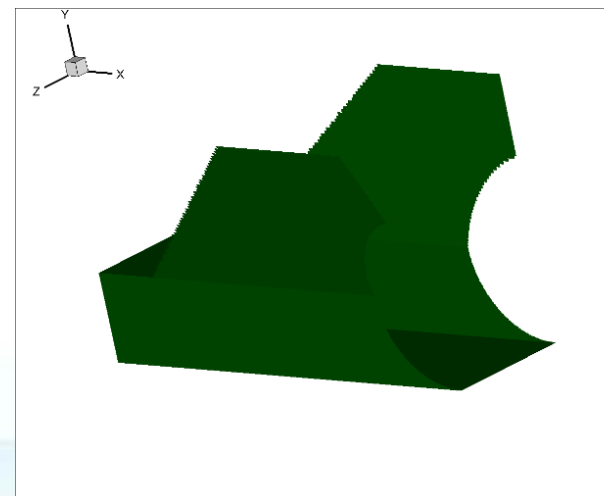
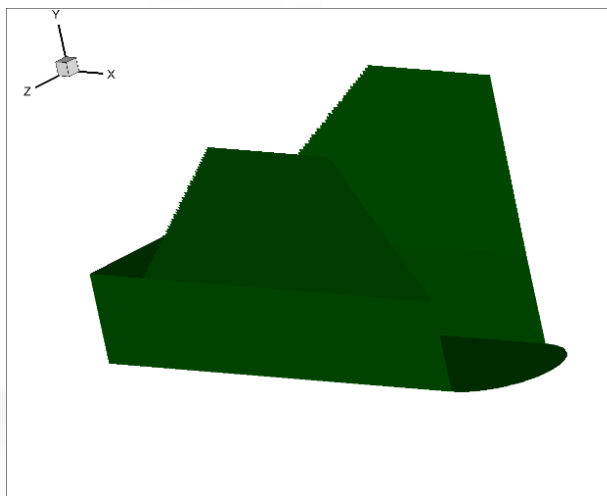
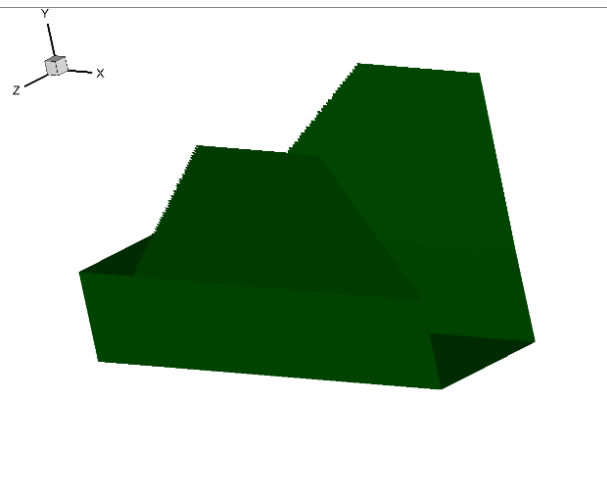
645Hz



780Hz

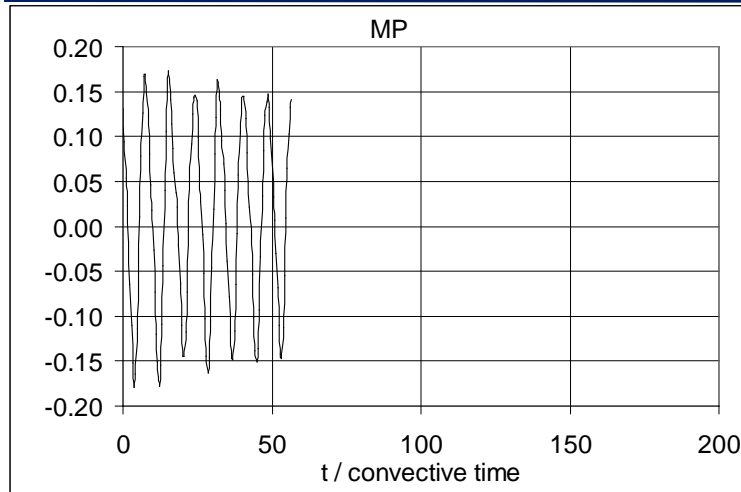


780Hz

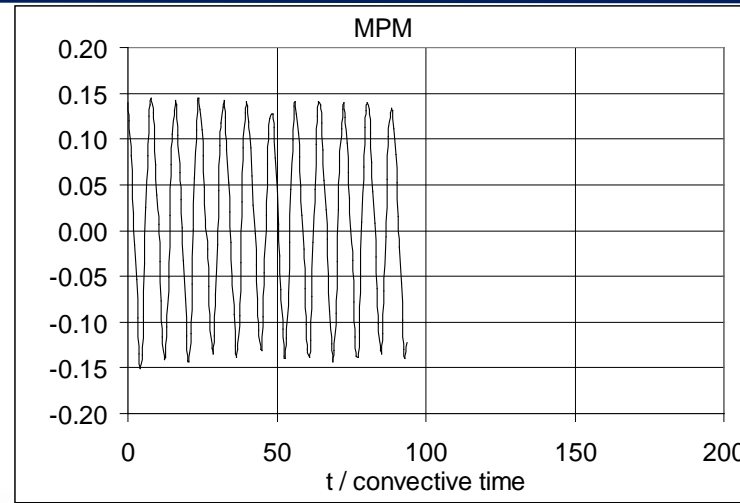


# Влияние геометрии в окрестности точки отражения

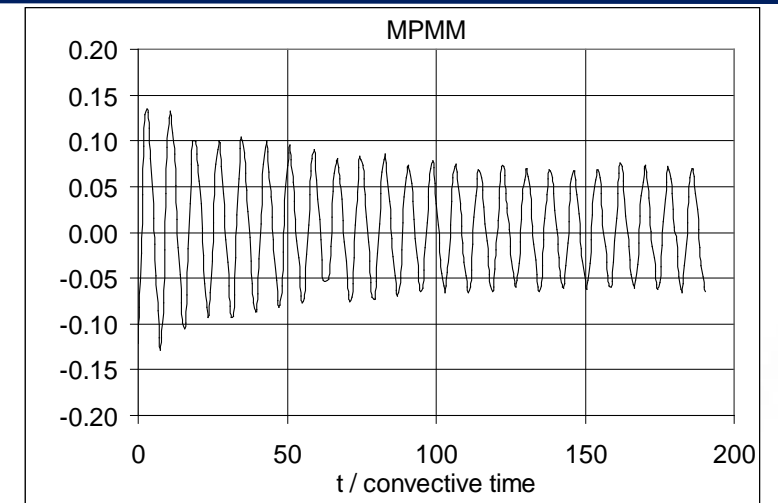
Конфигурации отличаются только областью с которой струя не взаимодействует но уменьшение стенок приводит к росту частоты а у варианта МРММ падает амплитуда



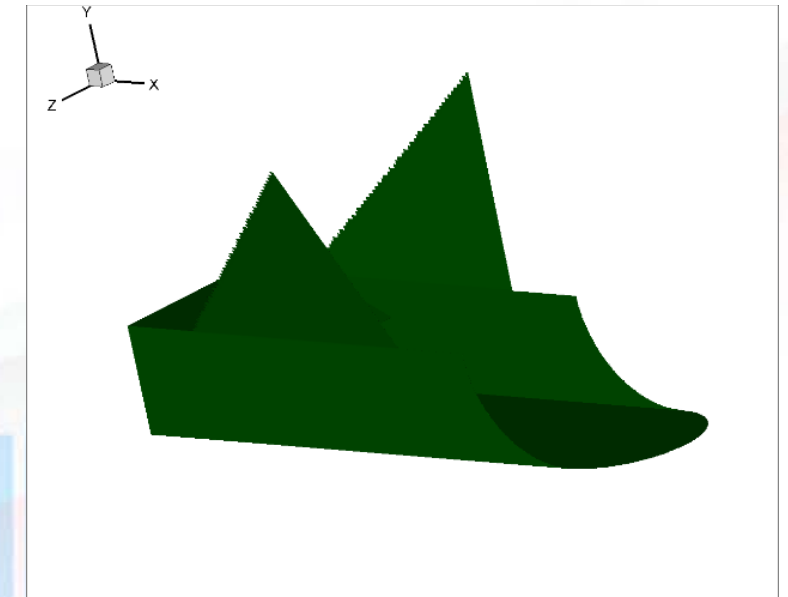
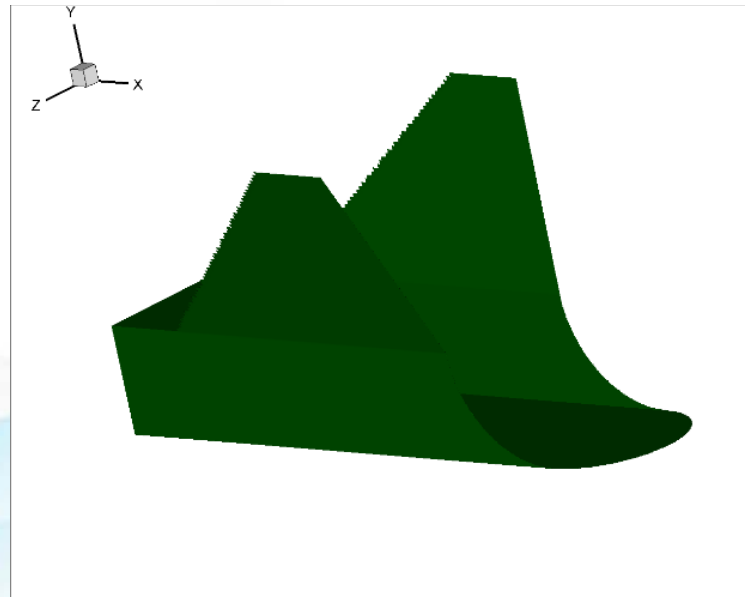
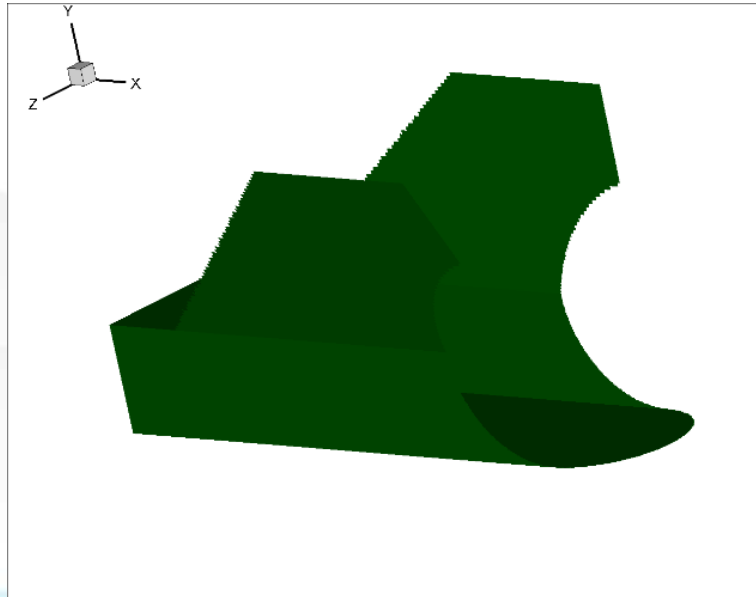
780Hz



795Hz



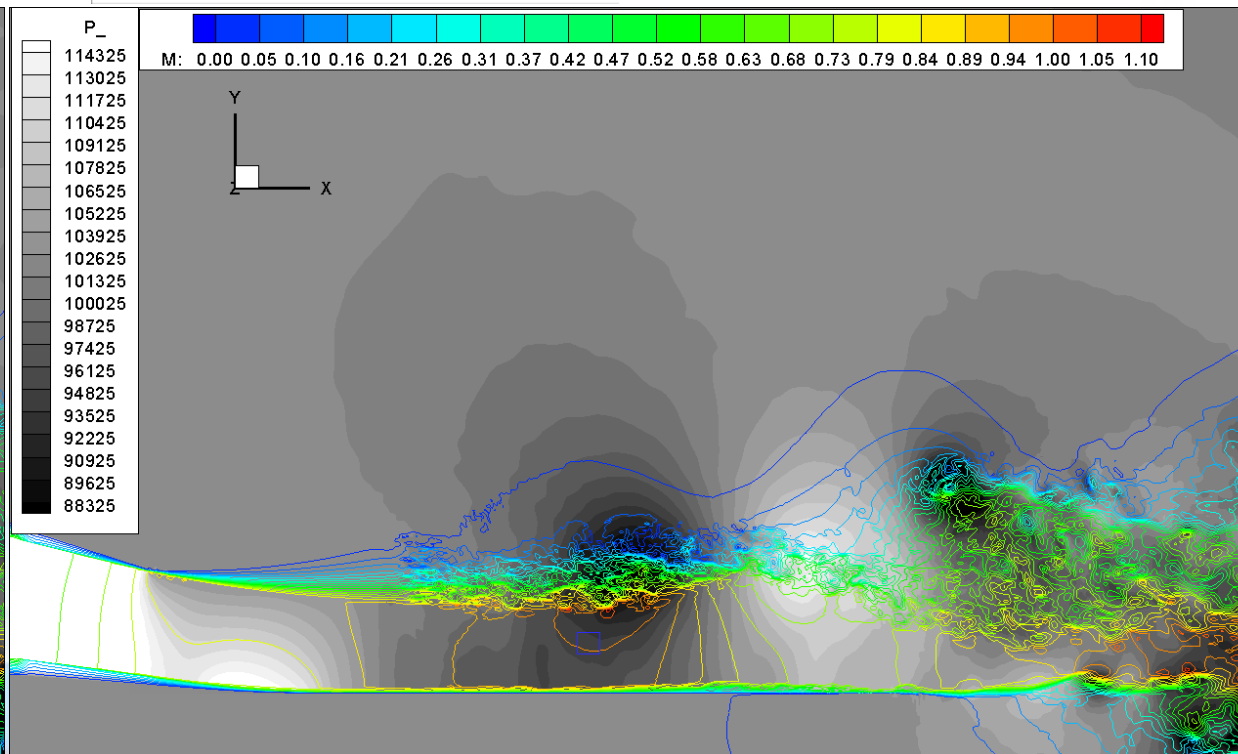
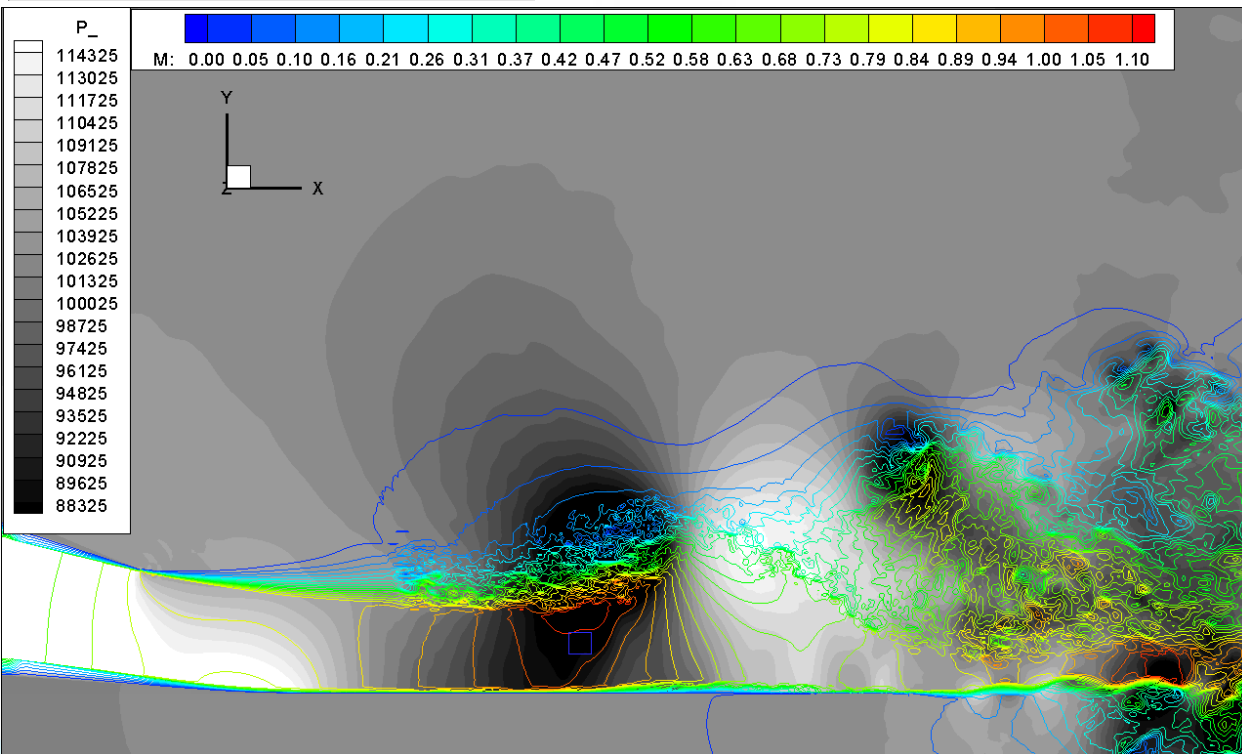
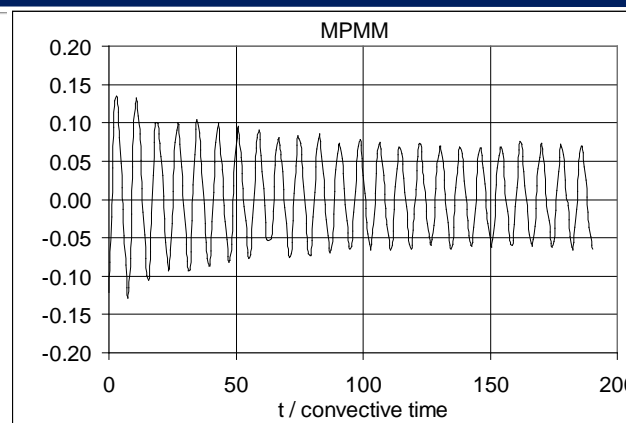
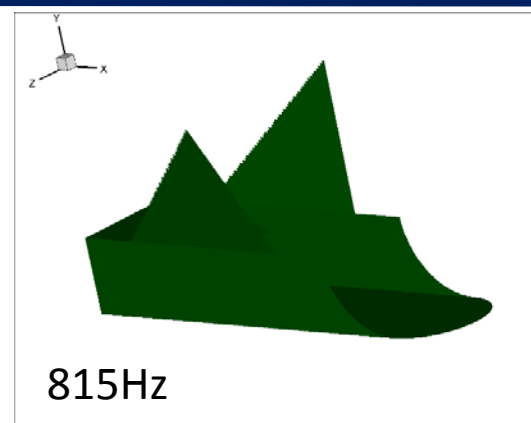
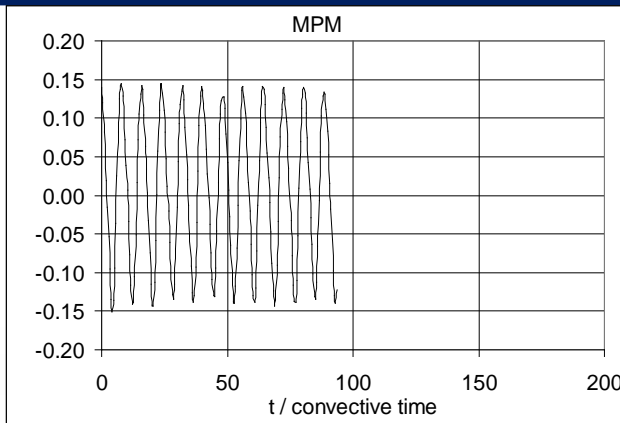
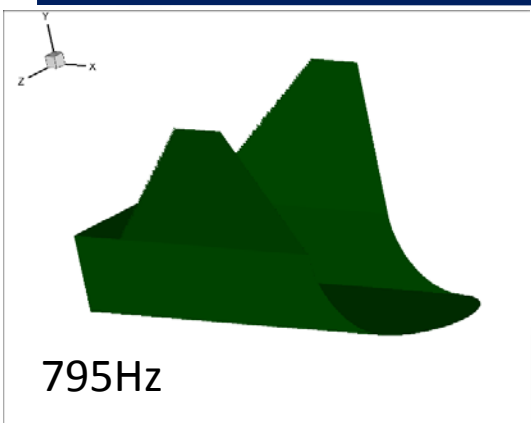
815Hz



# Влияние геометрии в окрестности точки отражения

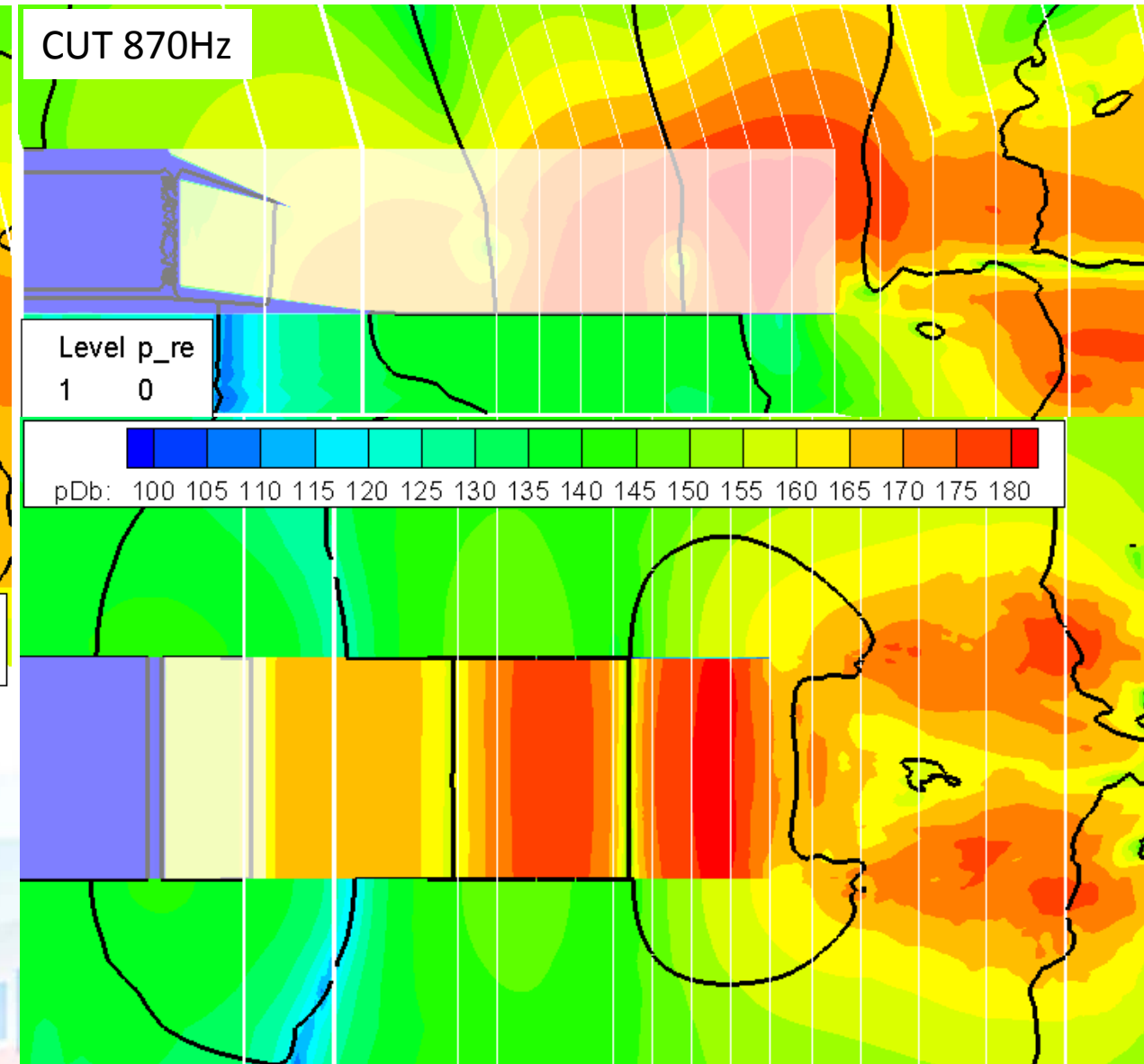
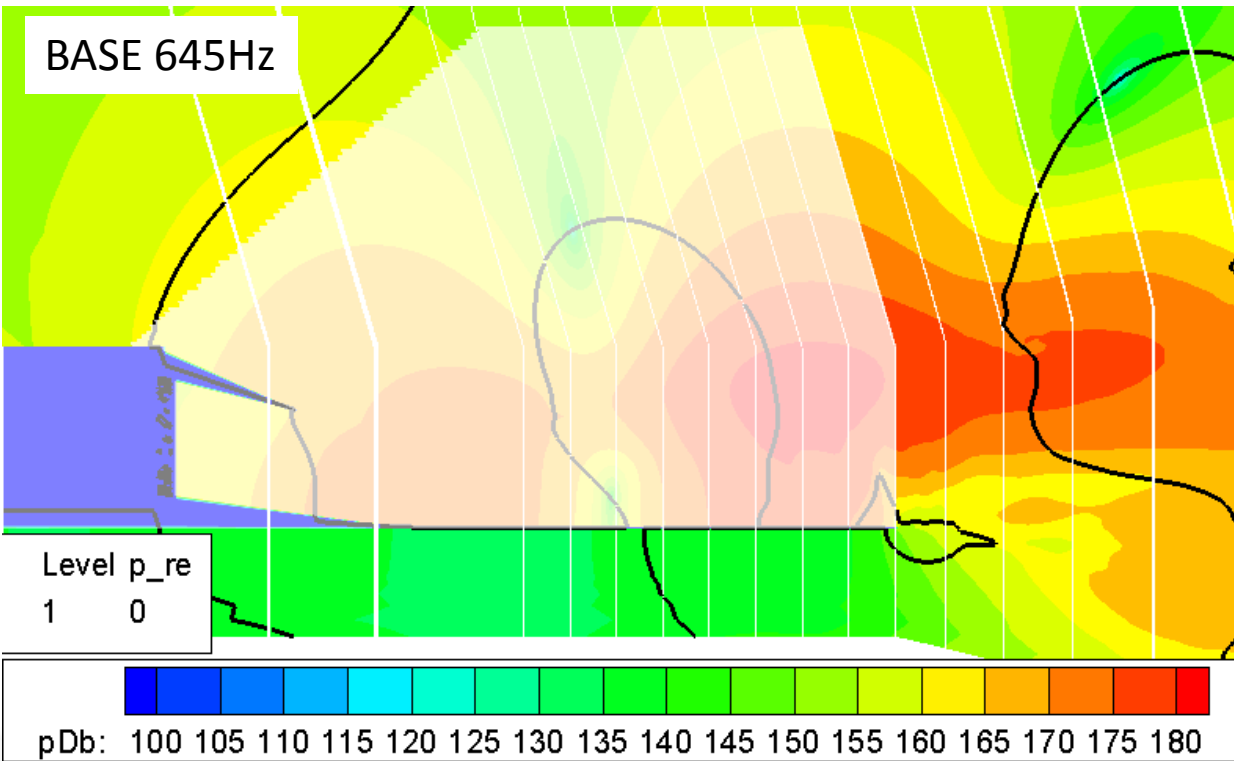
Стабилизация амплитуды происходит на уровне исчезновения сверхзвуковых зон

Предположительно сверхзвуковые зоны фактор рассеивающий энергию из цикла



# Влияние геометрии в окрестности точки отражения

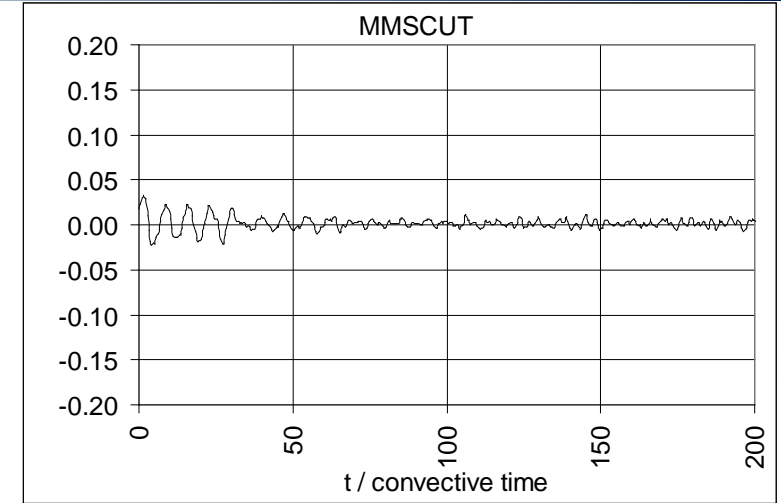
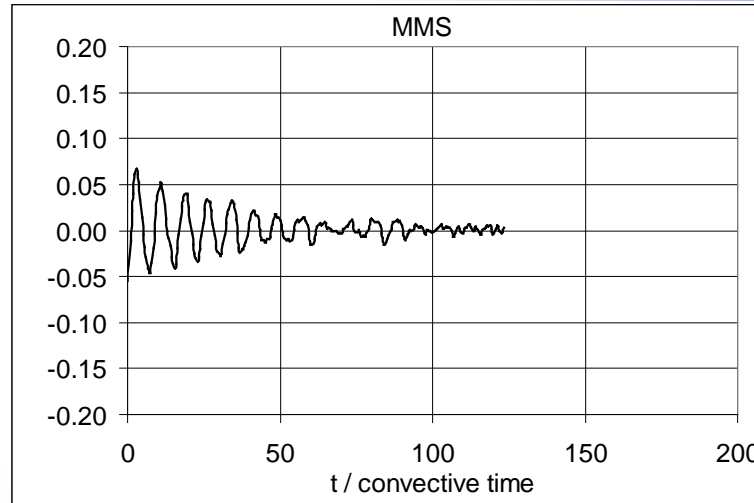
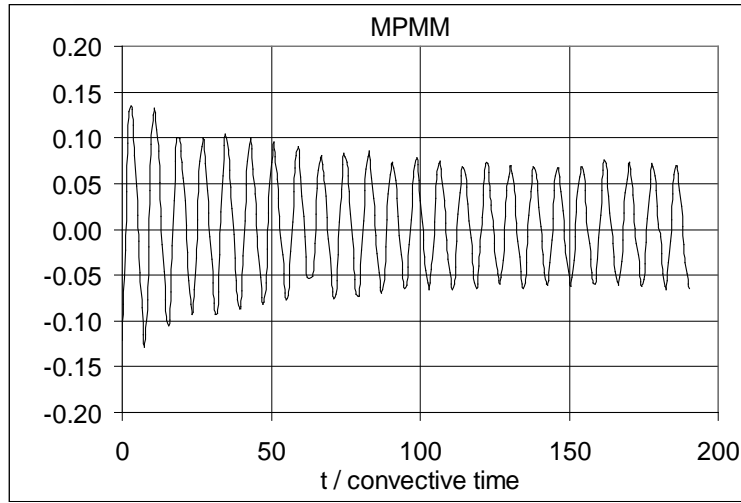
Процесс проявляется даже если убрать кили, он не определяется отражением от них, но длина волны на которой он может развиваться ограничена высотой канала



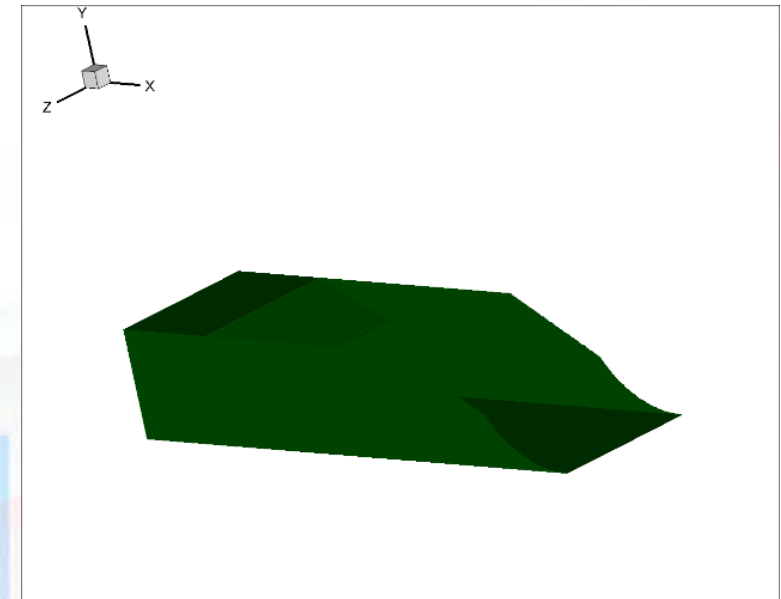
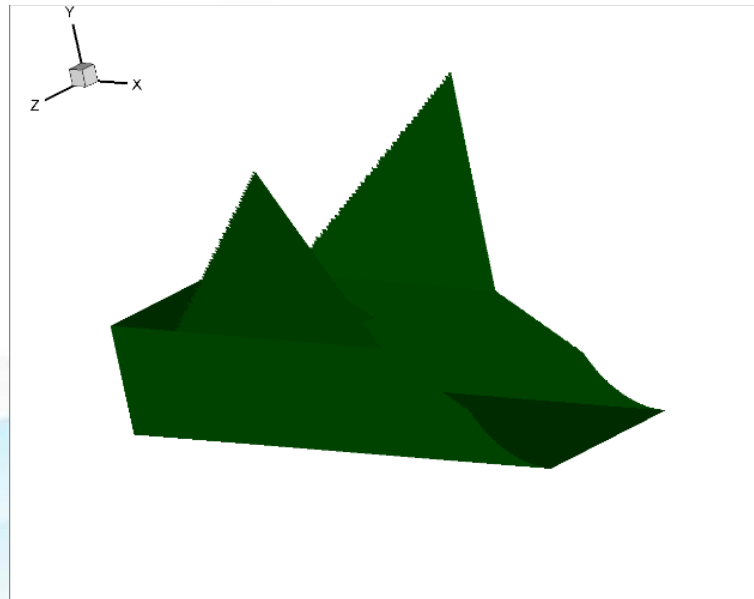
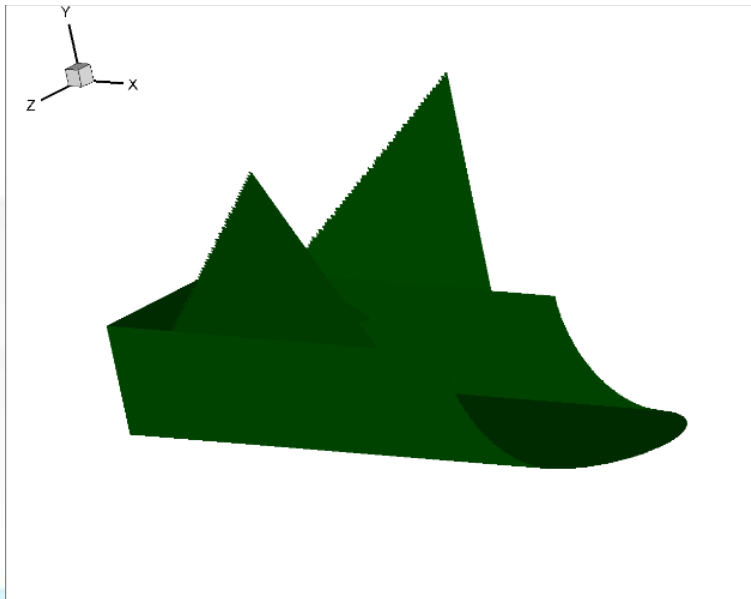


# Влияние геометрии в окрестности точки отражения

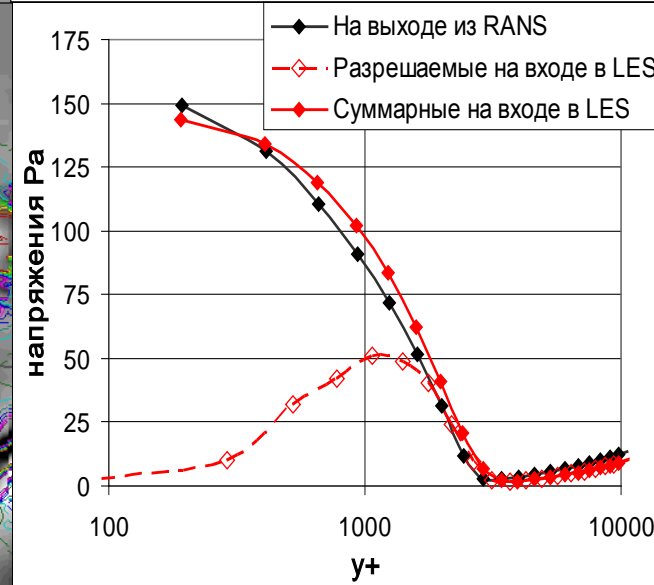
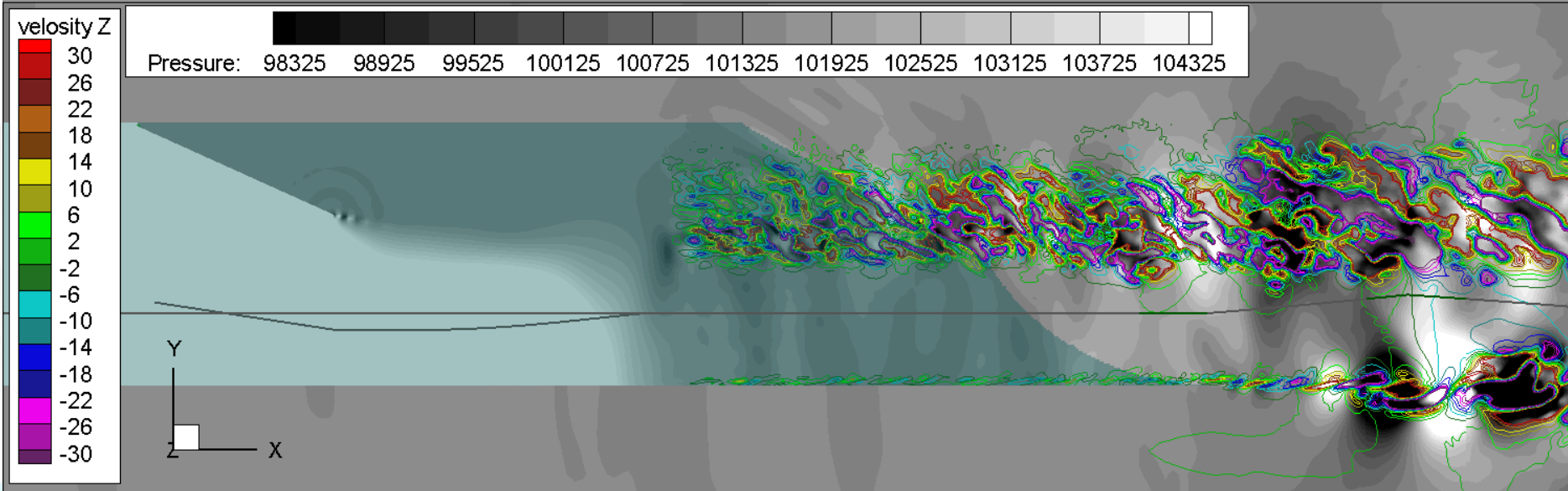
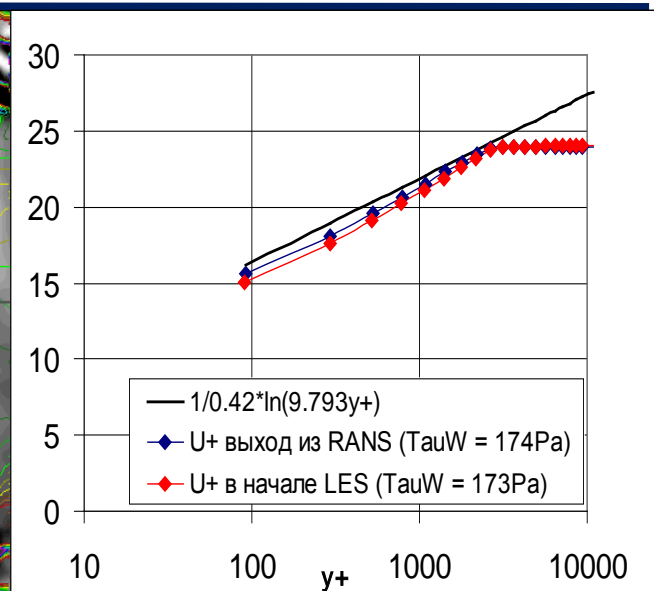
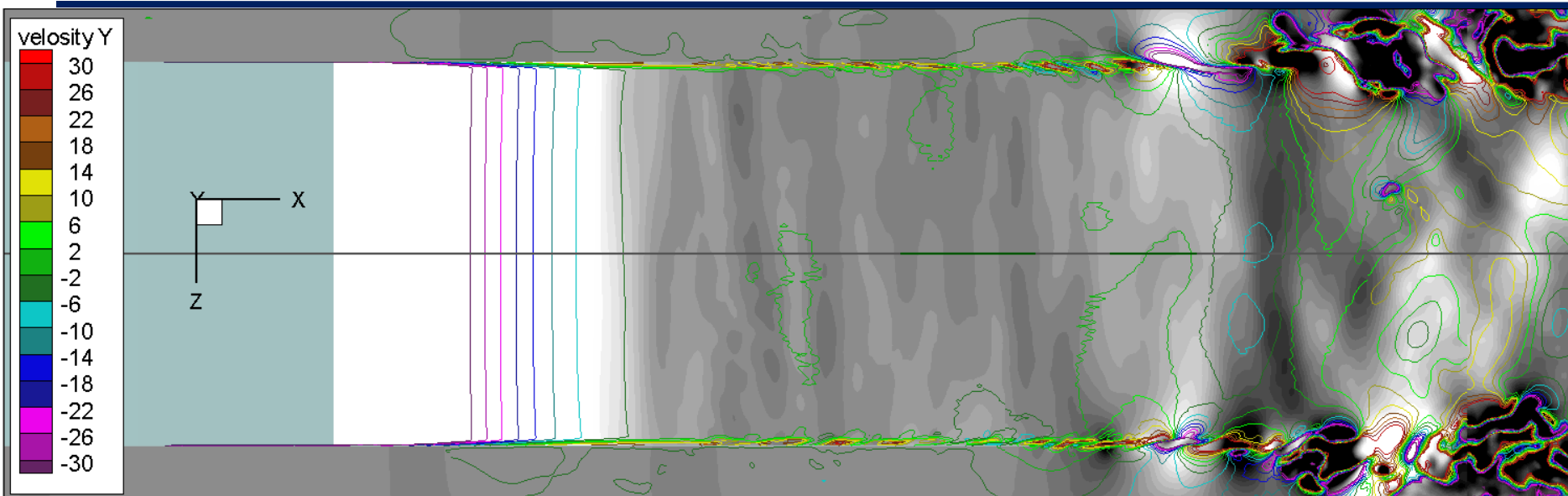
Конфигурации отличаются только областью с которой струя не взаимодействует но уменьшение стенок приводит к росту частоты а у варианта МРММ падает амплитуда



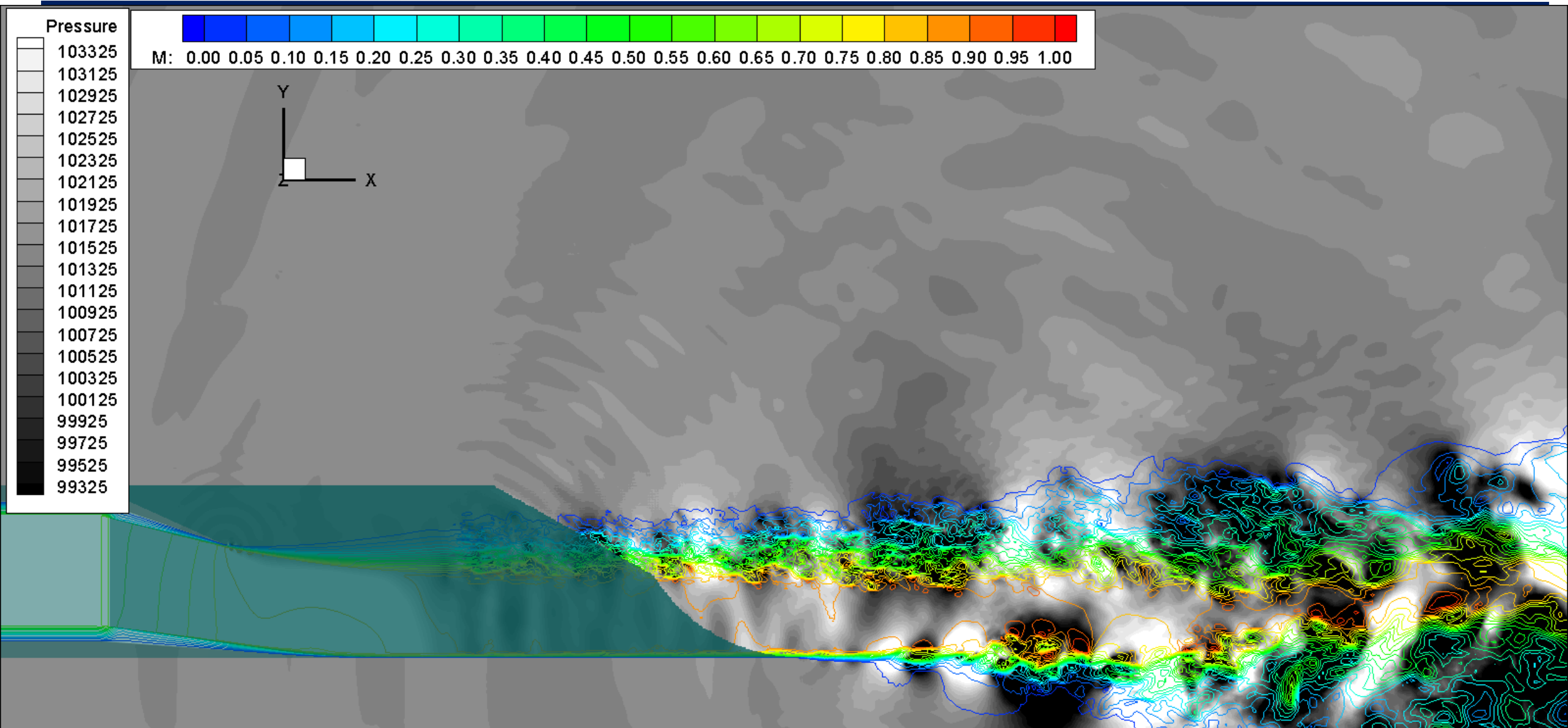
815Hz



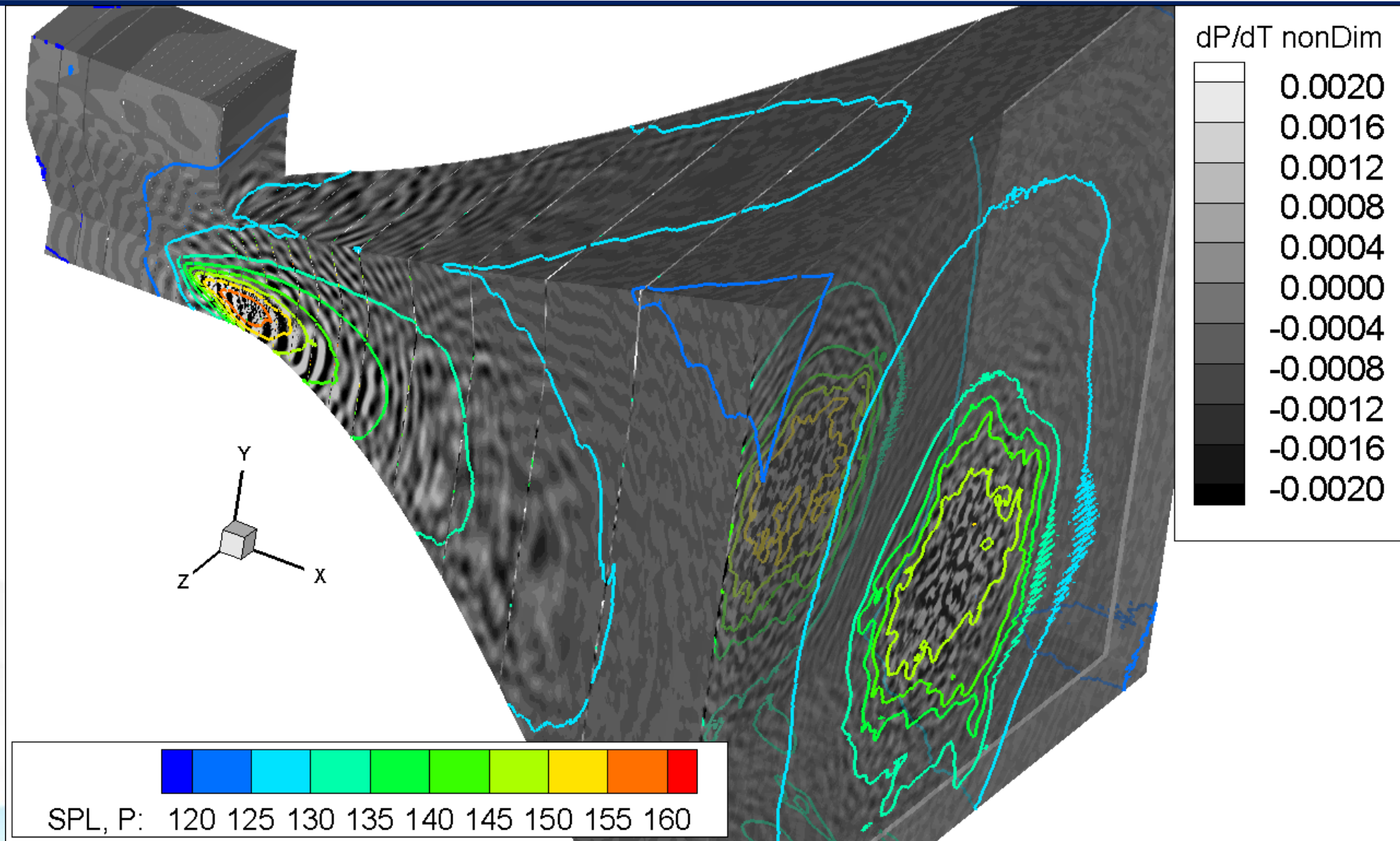
# Картина течения при отсутствии колебаний струи (MMSCUT)



# Картина течения при отсутствии колебаний струи (MMSCUT)

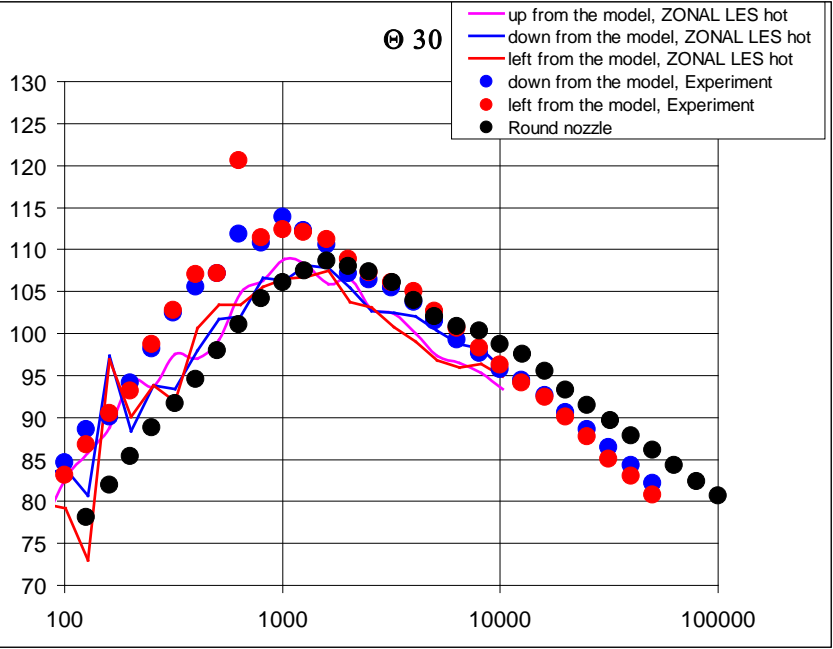


# Контрольная поверхность и шума в дальнем поле (MMSCUT)

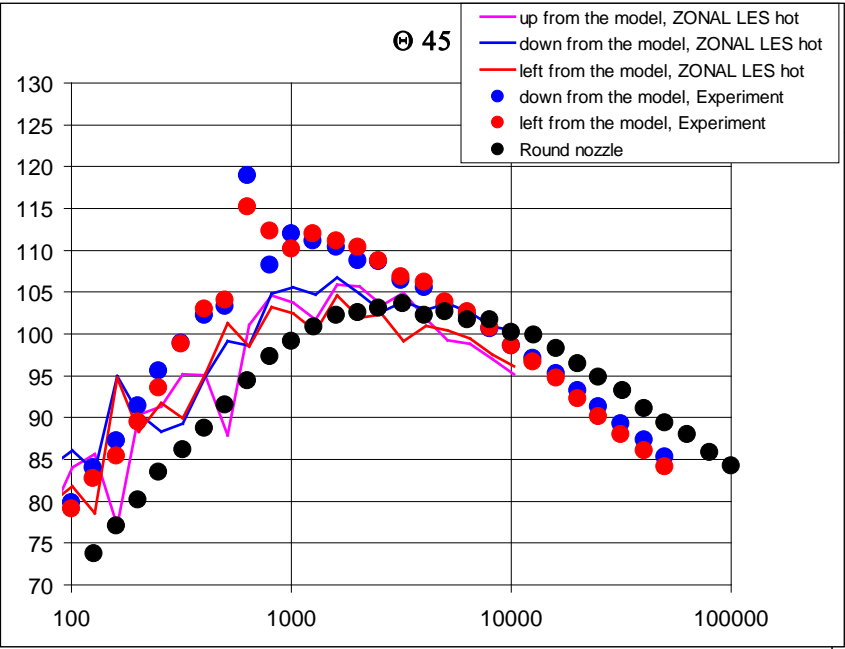


# Третьооктавные спектры шума в дальнем поле (MMSCUT)

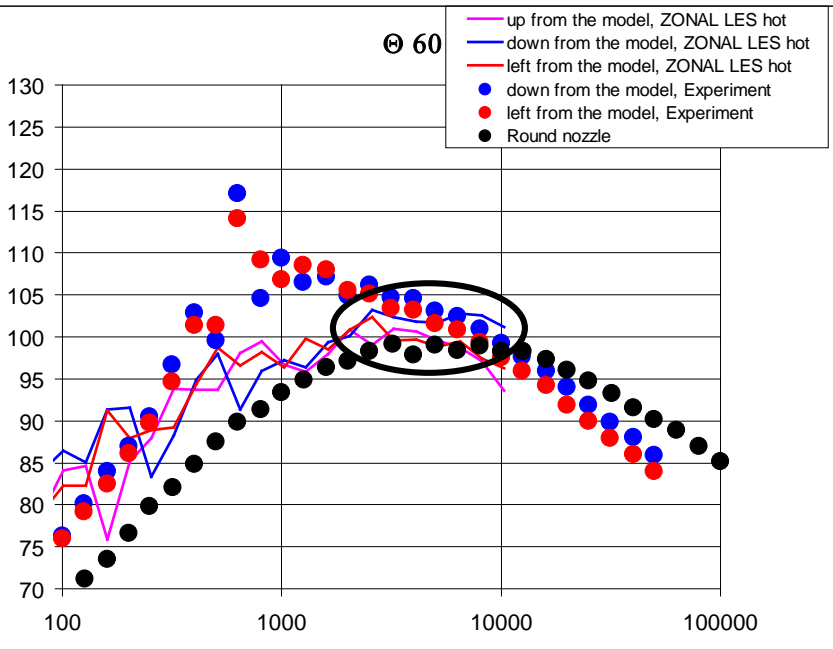
⊕ 30



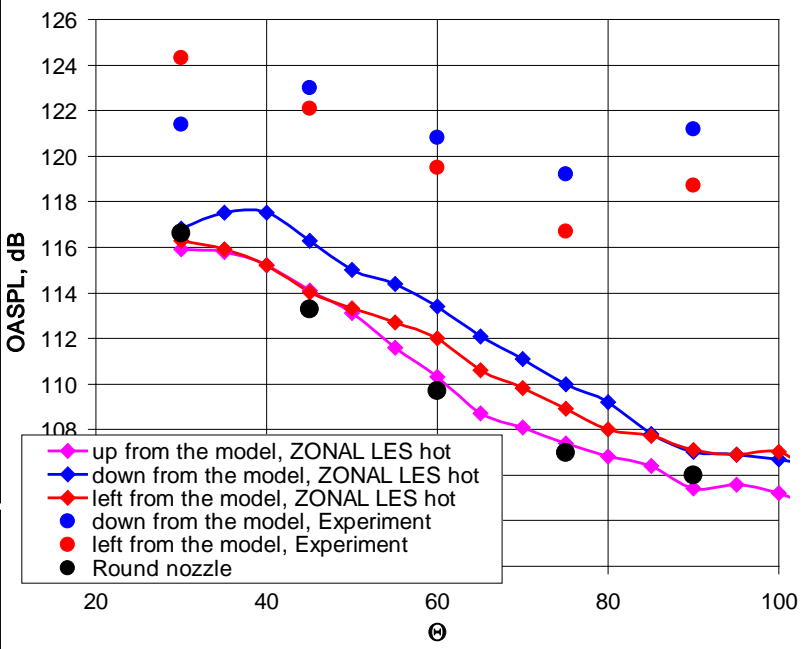
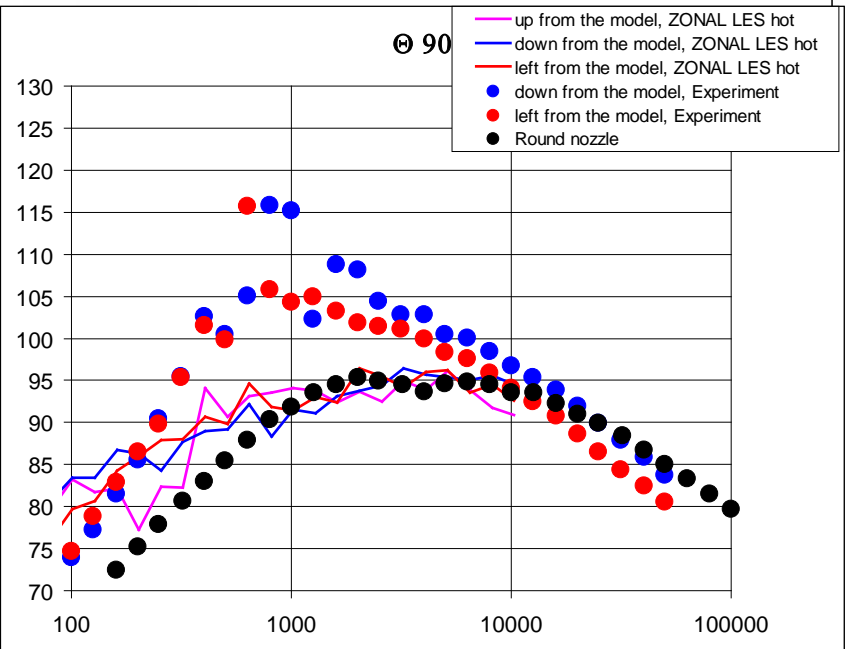
⊕ 45



⊕ 60

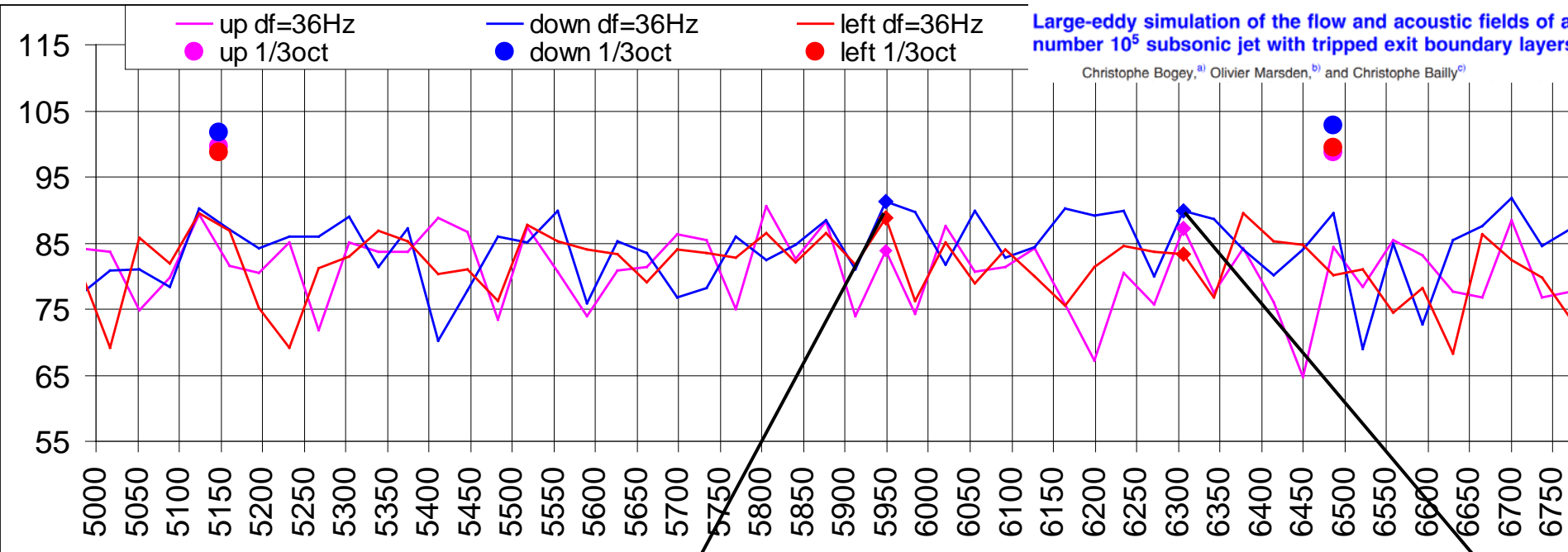


⊕ 90



- up from the model, ZONAL LES hot
- down from the model, ZONAL LES hot
- left from the model, ZONAL LES hot
- down from the model, Experiment
- left from the model, Experiment
- Round nozzle

# Структура шума направленного вниз для $\Theta=60^\circ$



Large-eddy simulation of the flow and acoustic fields of a Reynolds number  $10^5$  subsonic jet with tripped exit boundary layers

Christophe Bogey,<sup>(a)</sup> Olivier Marsden,<sup>(b)</sup> and Christophe Bailly<sup>(c)</sup>

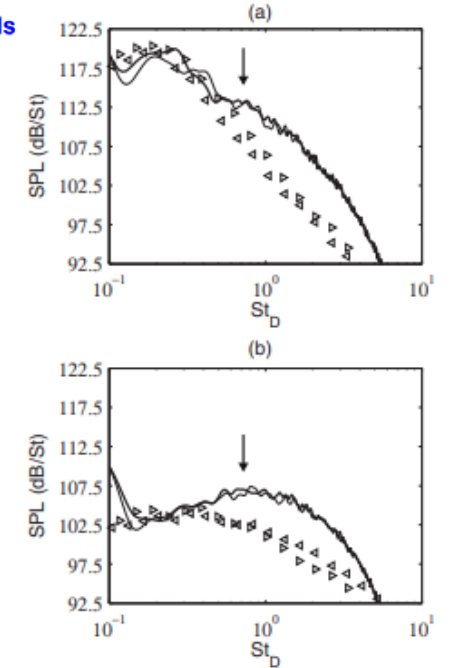
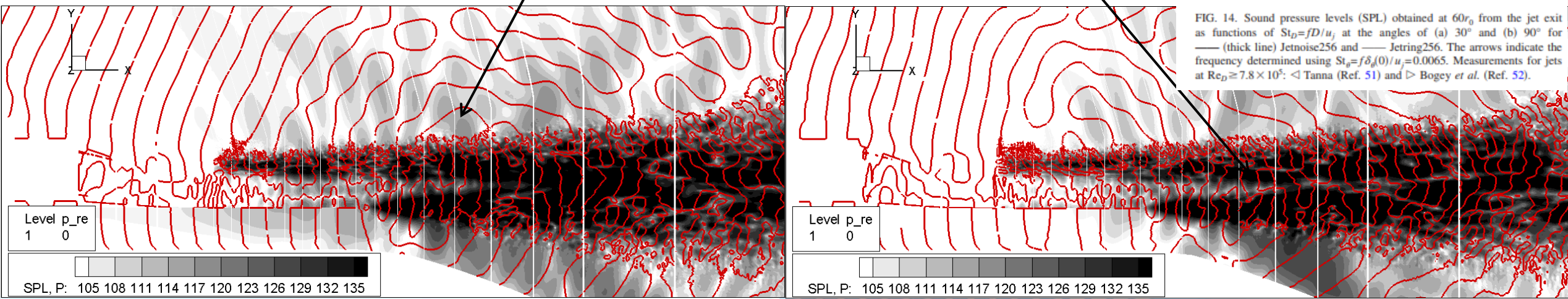


FIG. 14. Sound pressure levels (SPL) obtained at  $60r_0$  from the jet exit as functions of  $St_D = fD/u_j$  at the angles of (a)  $30^\circ$  and (b)  $90^\circ$  for — (thick line) Jetnoise256 and — (thin line) Jetring256. The arrows indicate the frequency determined using  $St_f = f\delta_f(0)/u_j = 0.0065$ . Measurements for jets at  $Re_D \approx 7.8 \times 10^5$ :  $\triangleleft$  Tanna (Ref. 51) and  $\triangleright$  Bogey *et al.* (Ref. 52).



Спасибо за внимание