



ЦИАМ

Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ШИРОКОПОЛОСНОГО ШУМА РОТОР-СТАТОРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД С ИС- ПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОННОГО RANS-LES ПОДХОДА

В.Е. Макаров, В.А. Шорстов



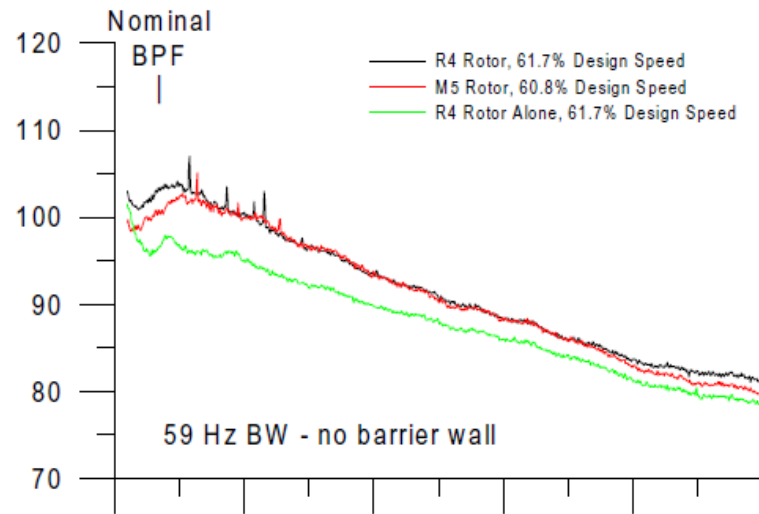
Экспериментальная модель и данные используемые в работе (FAN NOISE SOURCE DIAGNOSTIC TEST)

R4 (22 лопатки)
статор baseline (54 лопатки)

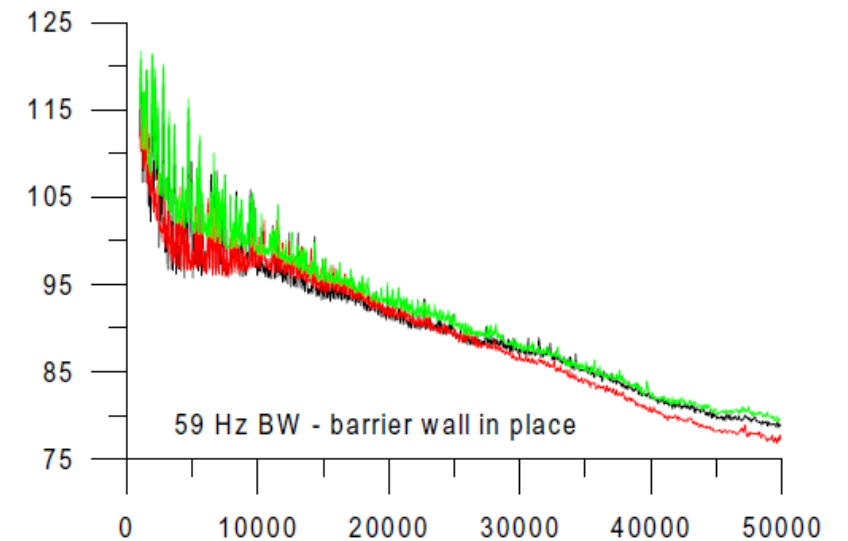
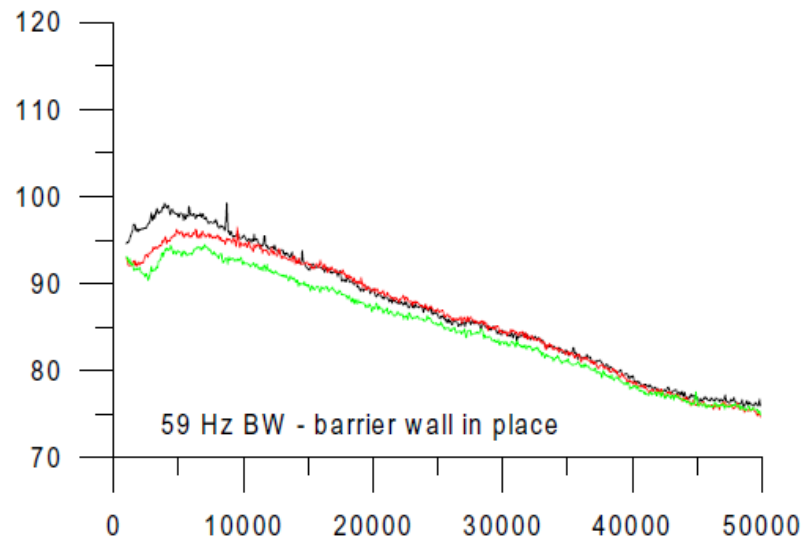
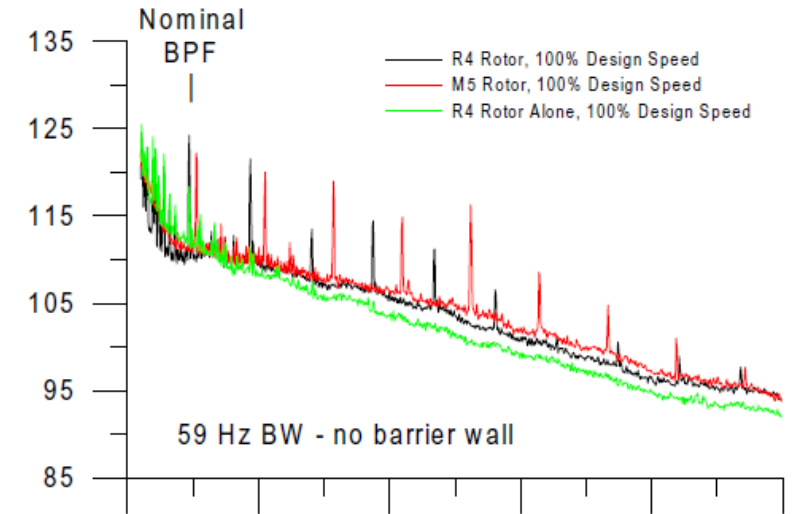


Восстановленные экспериментаторами (по шуму в дальнем поле) спектры акустической мощности излучаемой из канала для ступени и изолированного ротора в полосе 59Гц в dB относительно уровня 10^{-12} ватт

Approach 61.7% дозвуковой



100% design speed сверхзвуковой

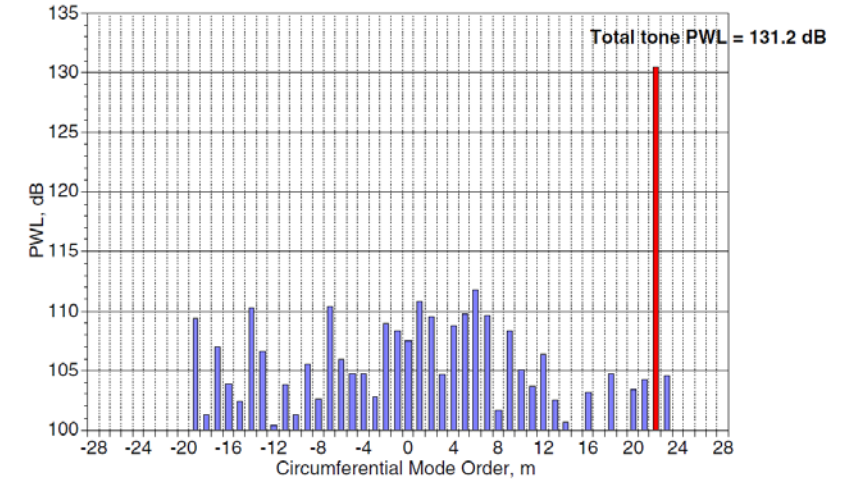
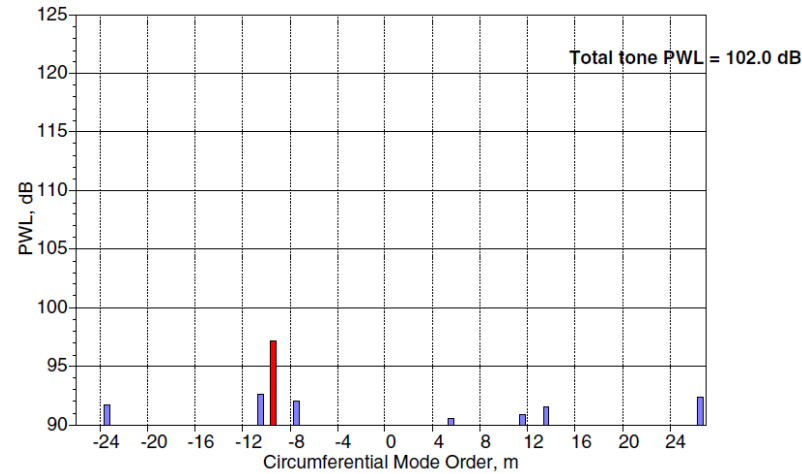
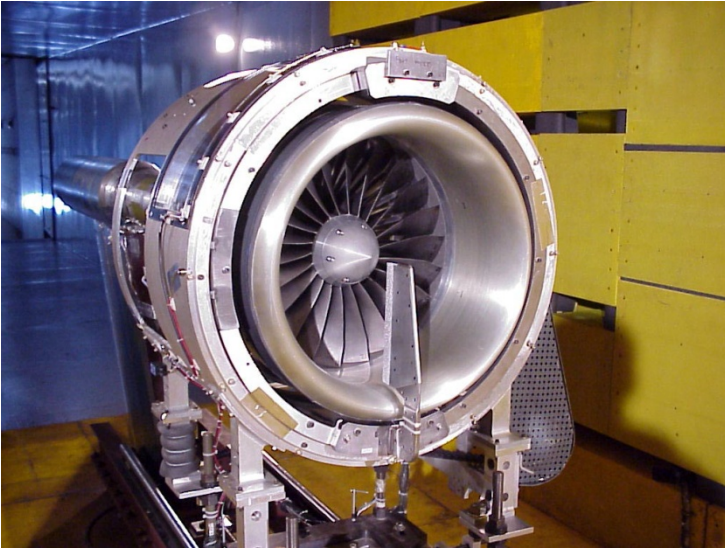


Экспериментальная модель и данные используемые в работе (FAN NOISE SOURCE DIAGNOSTIC TEST)

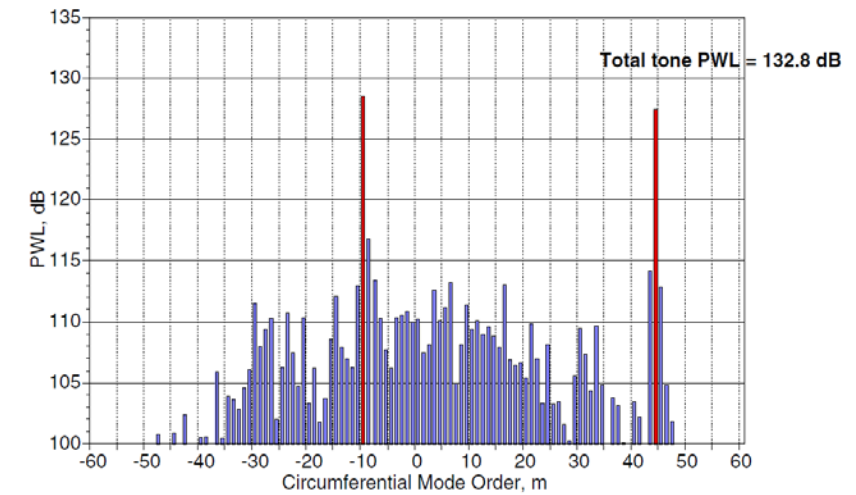
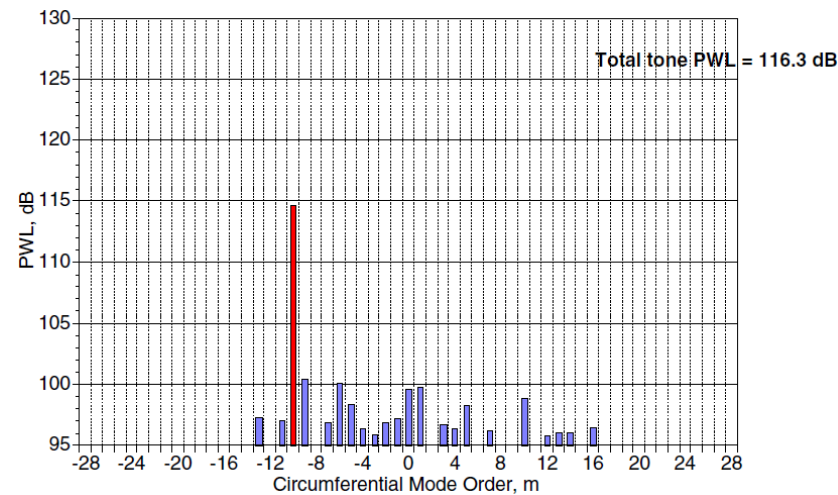
R4 (22 лопатки)
статор baseline (54 лопатки)

Approach 61.7% дозвуковой
Вперед и назад для первой и
второй частот следования

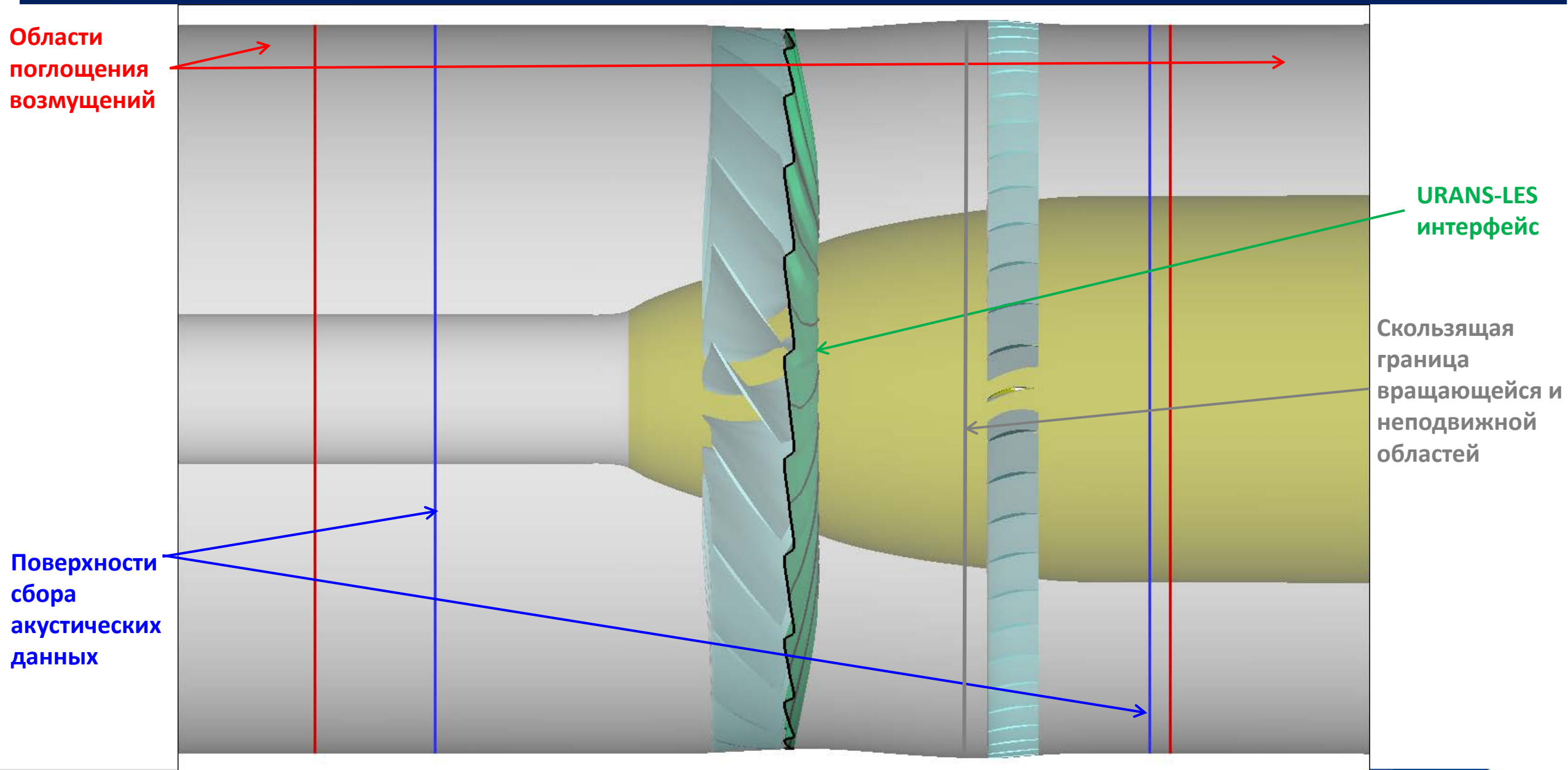
100% design speed сверхзвуковой
назад для первой и второй частот
следования



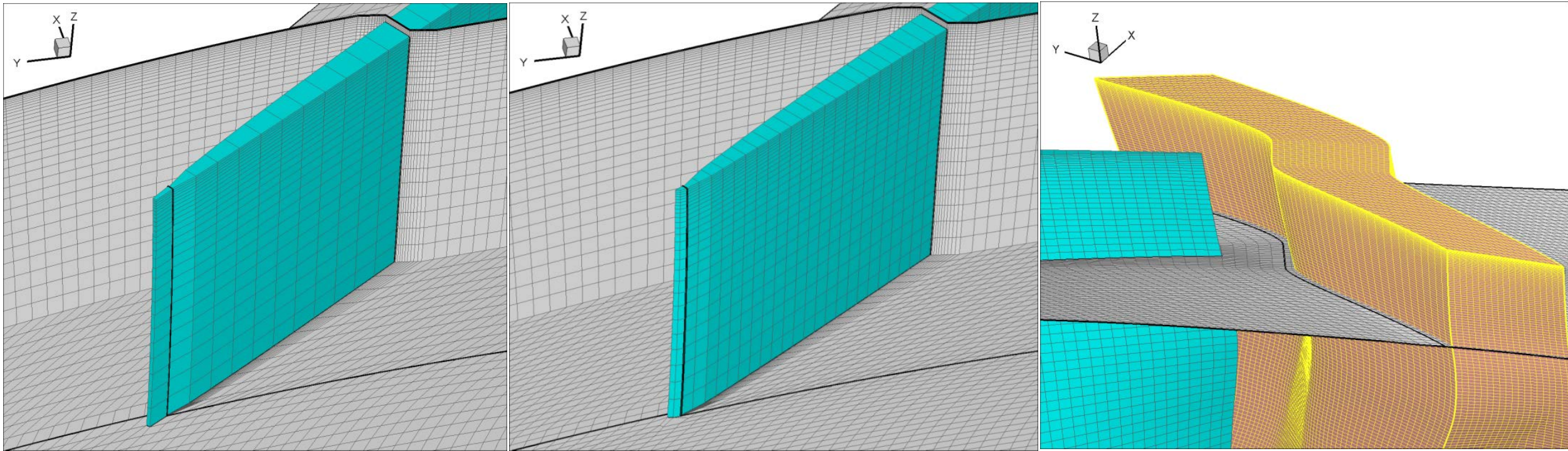
Измеренные с помощью
синхронизированных с ротором
подвижных микрофонов
азимутальные моды тонов в виде
диаграммы акустической
мощности в dB относительно
уровня 10^{-12} ватт



Расчетная модель, схема разбиения на области



Расчетная модель, сетка и расчетные случаи



Параметры расчетных сеток

	Параметры расчетных сеток						Всего ячеек	61.7% $\Omega 817.8$ рад/с			
	1 канал			22 канала		54 канала		Fm кг/с	π	τ	
	URANS ротор	IDDES ротор	IDDES статор	URANS ротор	IDDES ротор	IDDES статор					
Сетка 1	150x81x12 0	150x81x240	170x43x240	150x1782x120	150x1782x240	170x2322x240	191M	Эксперимент	26.44	1.159	1.049
								Расчет	26.32	1.147	1.047
Сетка 2	300x81x12 0	150x81x240	170x43x240	300x1782x120	150x1782x240	170x2322x240	223M	Эксперимент	44.08	1.509	1.139
								Расчет	43.52	1.443	1.131

Проблема VSTG генератора

В работе 1 предполагается поток вдоль оси X с характерной скоростью U_0

$$v_i'(\vec{r}, t) = 2 \cdot \sqrt{3/2} \cdot \sum_{n=1}^N \sqrt{q^n} \cdot [\sigma_i^n \cdot \cos(d_j^n \cdot r_j' + \varphi^n)]$$

$x' = 2 \cdot \pi \cdot (x - U \cdot t) / l_e^{\max}$

$y' = k^n \cdot y$

$z' = k^n \cdot z$

Во вращающейся системе координат ротора постоянной U_0 (вдоль оси x) соответствуют спирали, но формулировка не допускает отступления от глобальной U_x иначе масштабы в момент t_0

распадутся

При этом осевая средняя скорость на входе сильно неоднородна

$$x' = 2 \cdot \pi \cdot (x_0 - U_{xGlobal} \cdot (t - \frac{x - x_0}{U_{xLocal}})) / l_e^{\max}$$

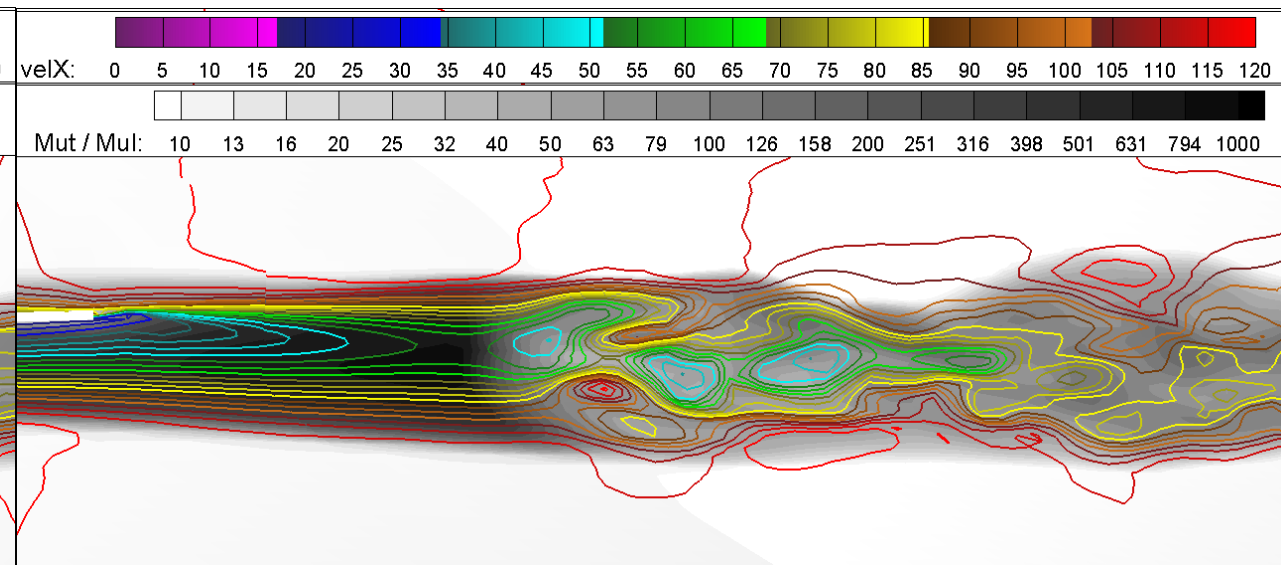
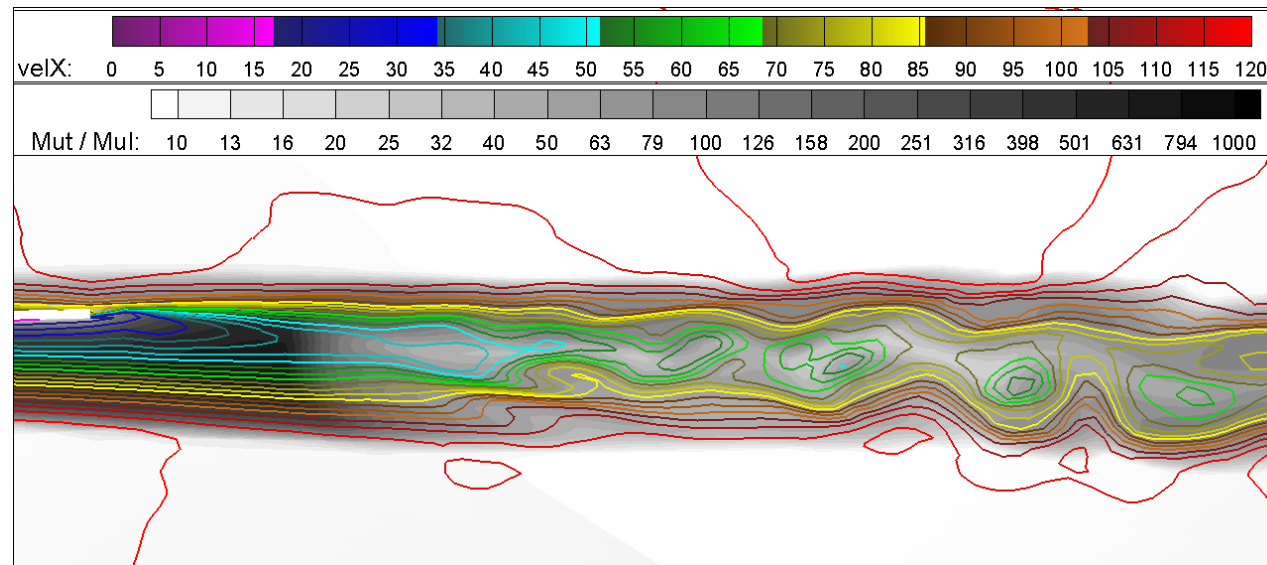
$$y' = k^n \cdot y_0$$

$$z' = k^n \cdot z_0$$

Где $X_0 Y_0 Z_0$ - координата входа в зону источника при движении по спирали

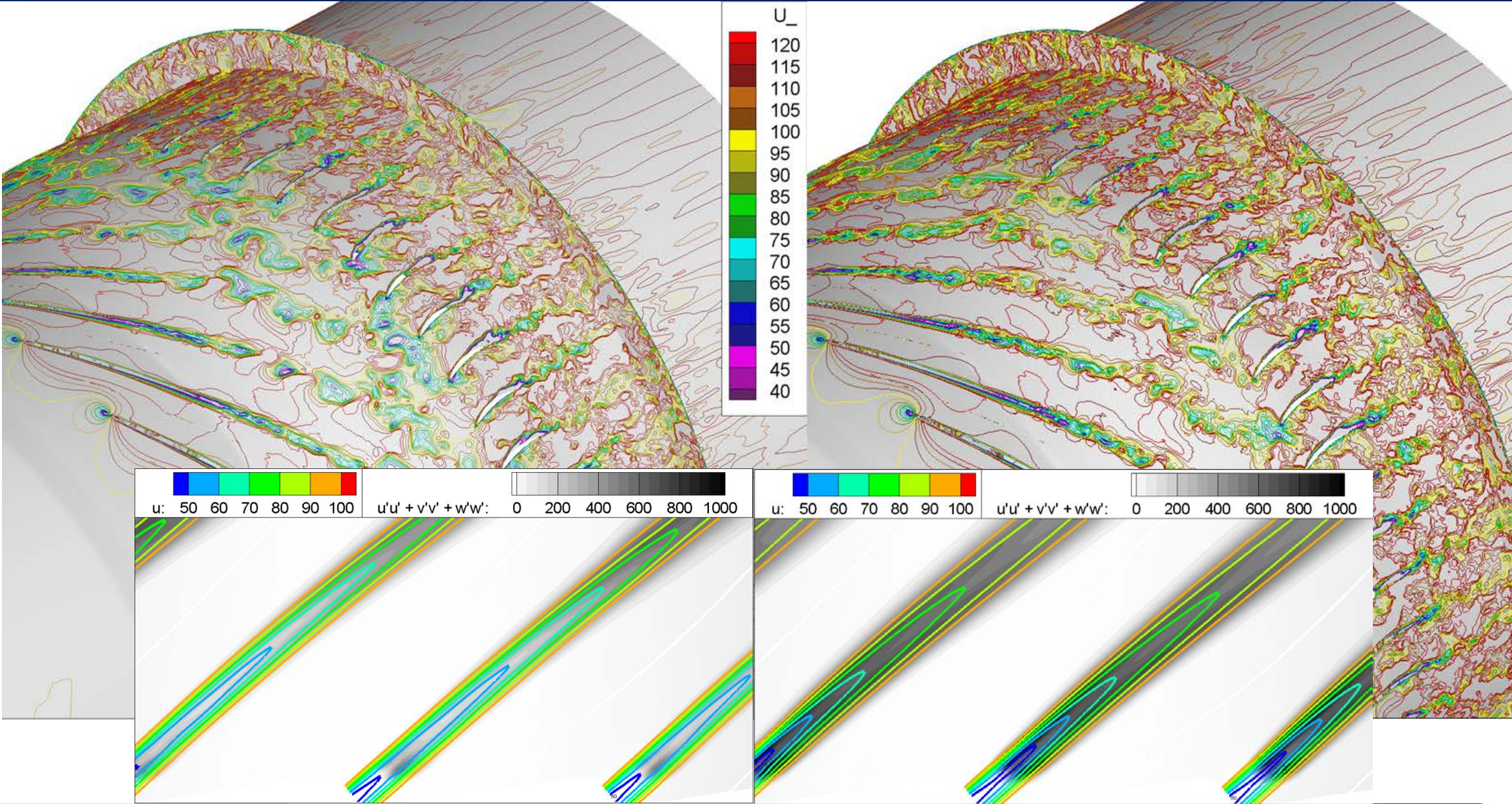
$U_{xGlobal}$ – глобальный масштаб скорости

U_{xLocal} – осредненная по времени скорость на выходе из RANS области в точке $X_0 Y_0 Z_0$

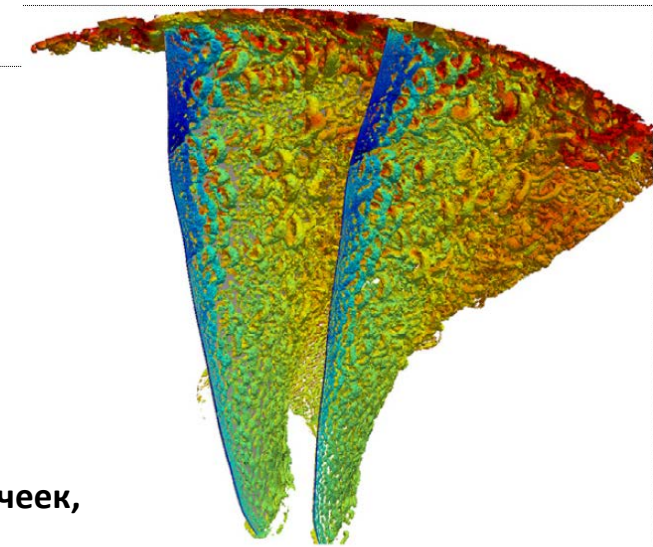
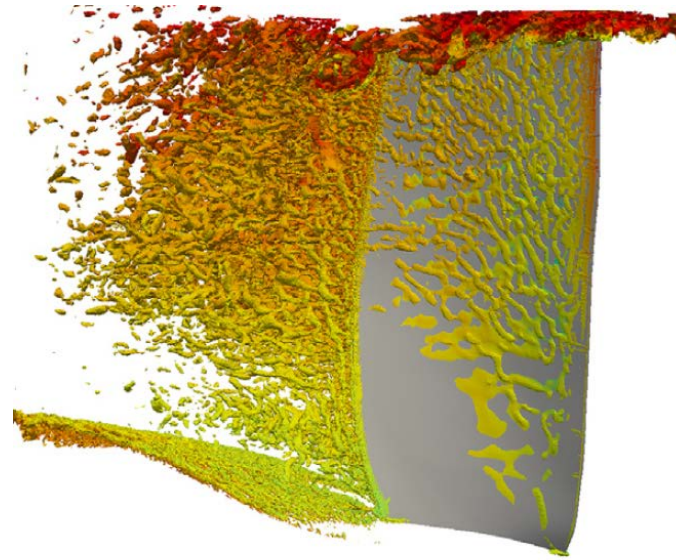
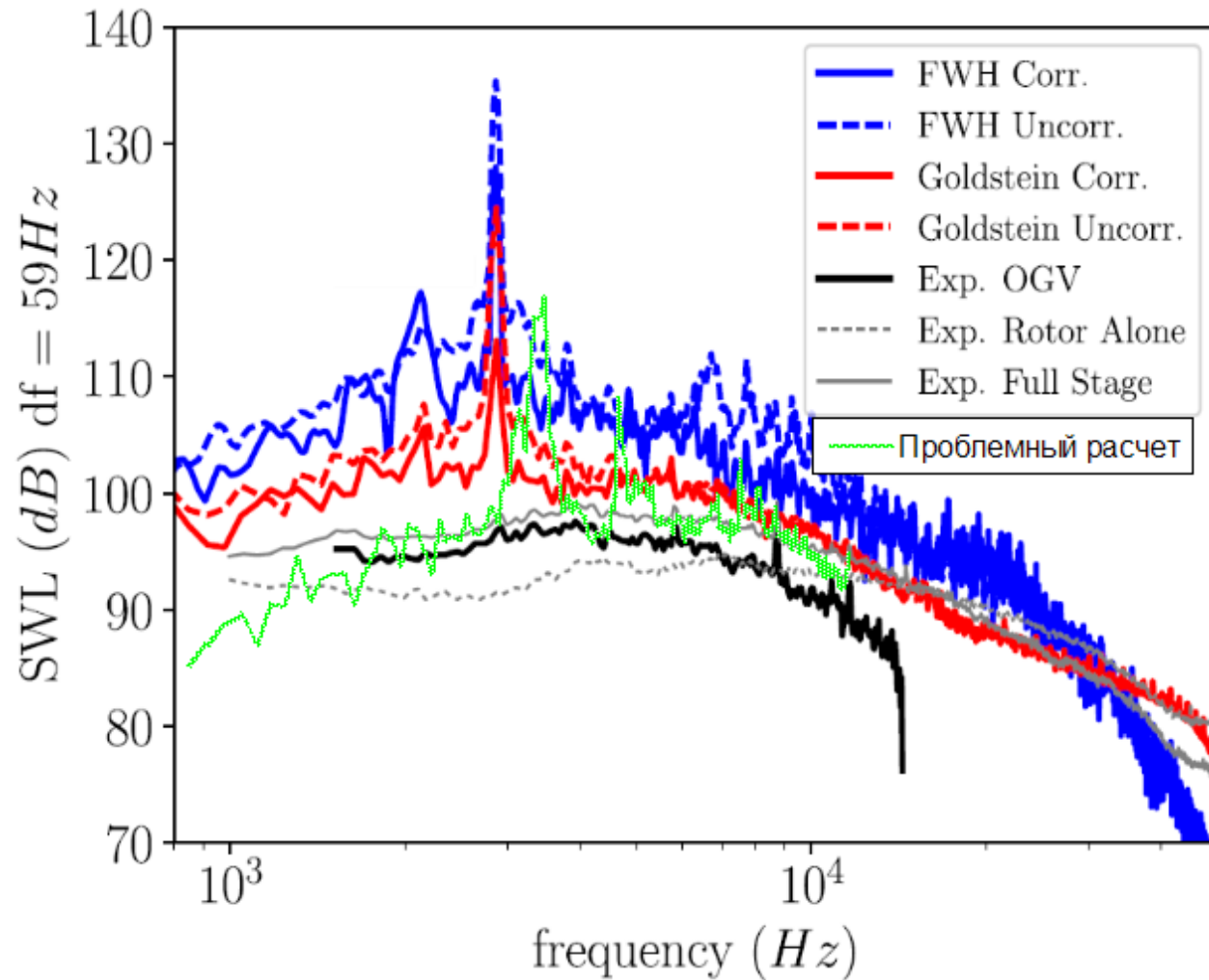


¹ M. Shur, M. Strelets, A. Travin, A. Probst, S. Probst, D. Schwamborn, S. Deck, A. Skillen, J. Holgate and A. Revell // Improved Embedded Approaches Springer International Publishing AG 2018, C. Mockett et al. (eds.), Go4Hybrid: Grey Area Mitigation for Hybrid, RANS-LES Methods, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary, Design 134, DOI 10.1007/978-3-319-52995-0_3.

Проблема VSTG генератора



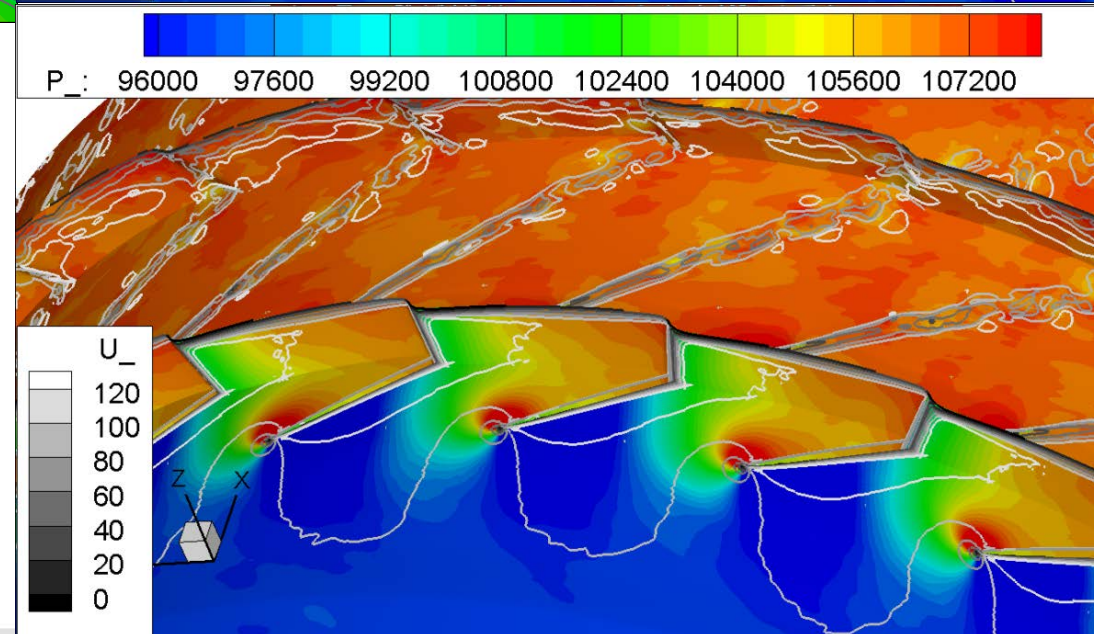
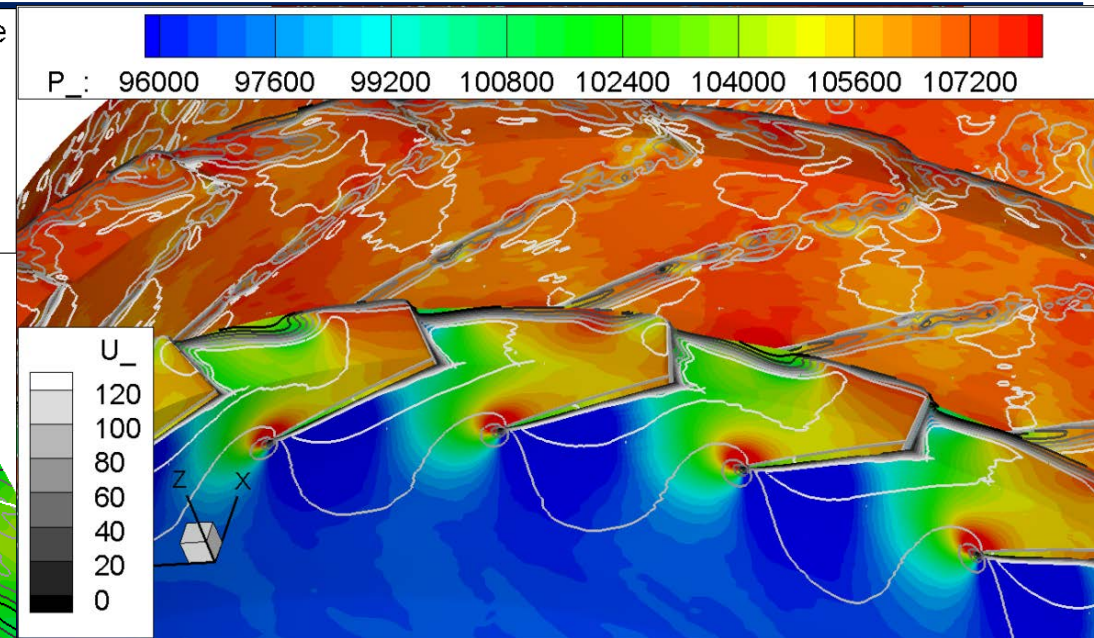
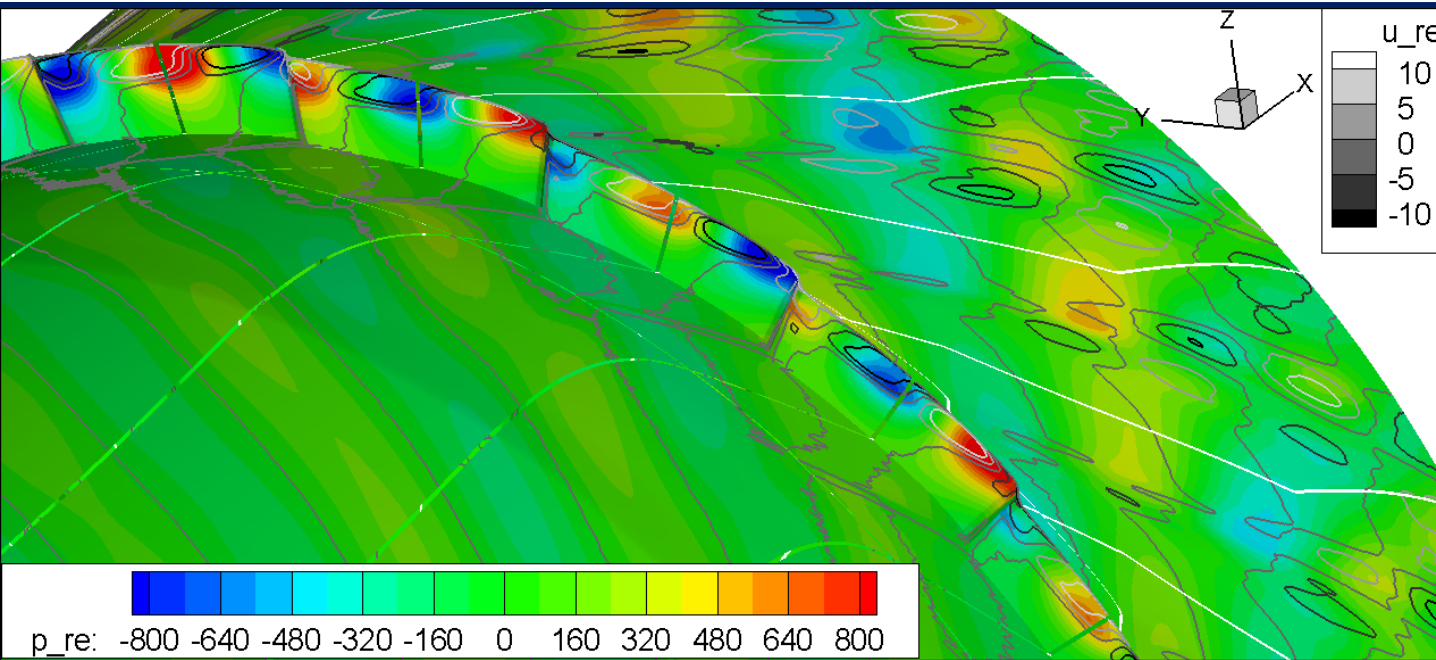
Проблема сильного ложного шума $f \approx 1.2\text{brpf}$



Незонный гибридный подход модель WALE, сектор 1/11 статор подогнан под сектор 55 лопаток, на сектор 75M ячеек, шаг по времени $2.5e-8$ с Пик создают когерентные структуры на периферии ротора с угловым размеров 1/11
Угловой размер автор объясняет секторной постановкой

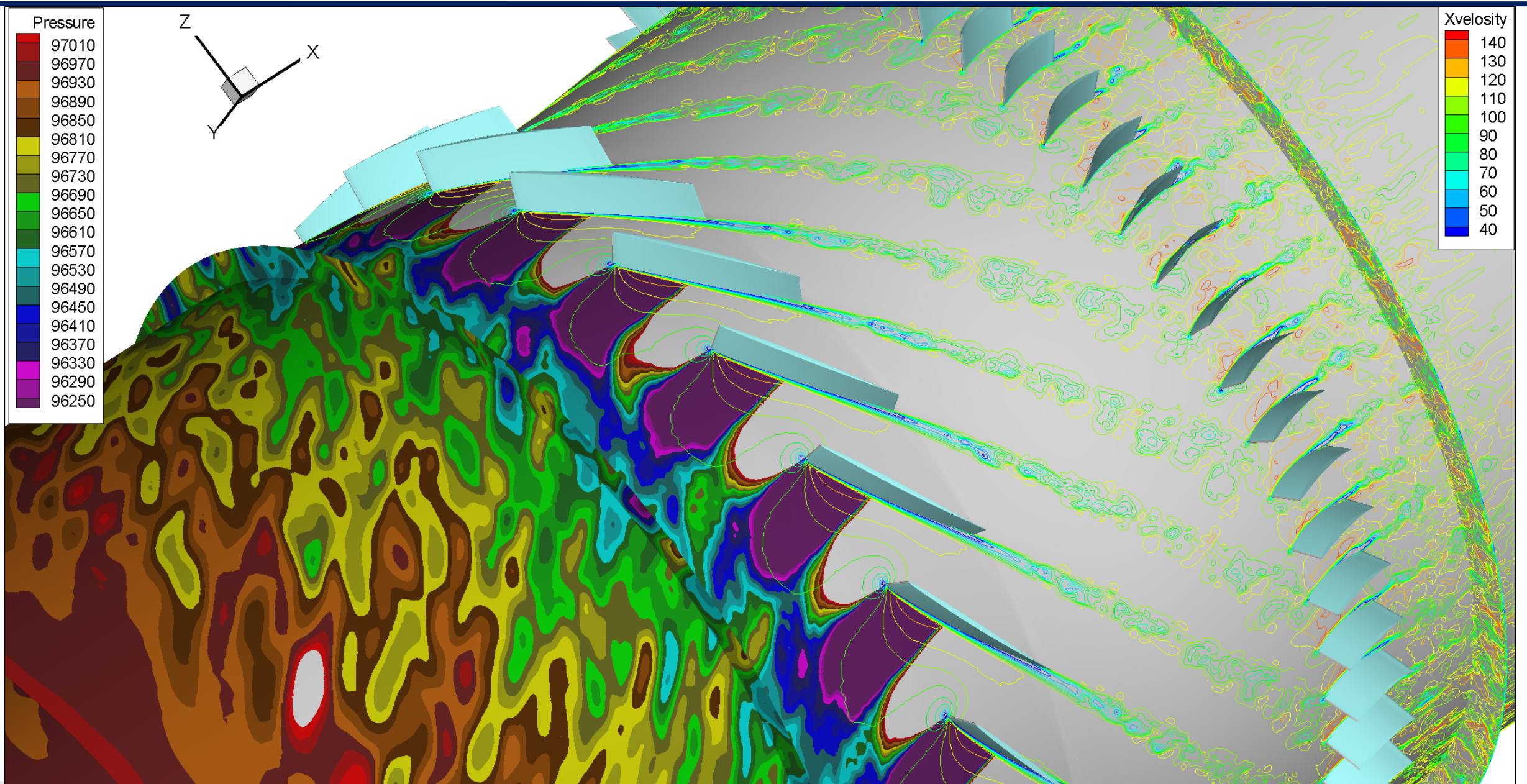
¹ Stéphane Moreau Turbomachinery Noise Predictions: Present and Future

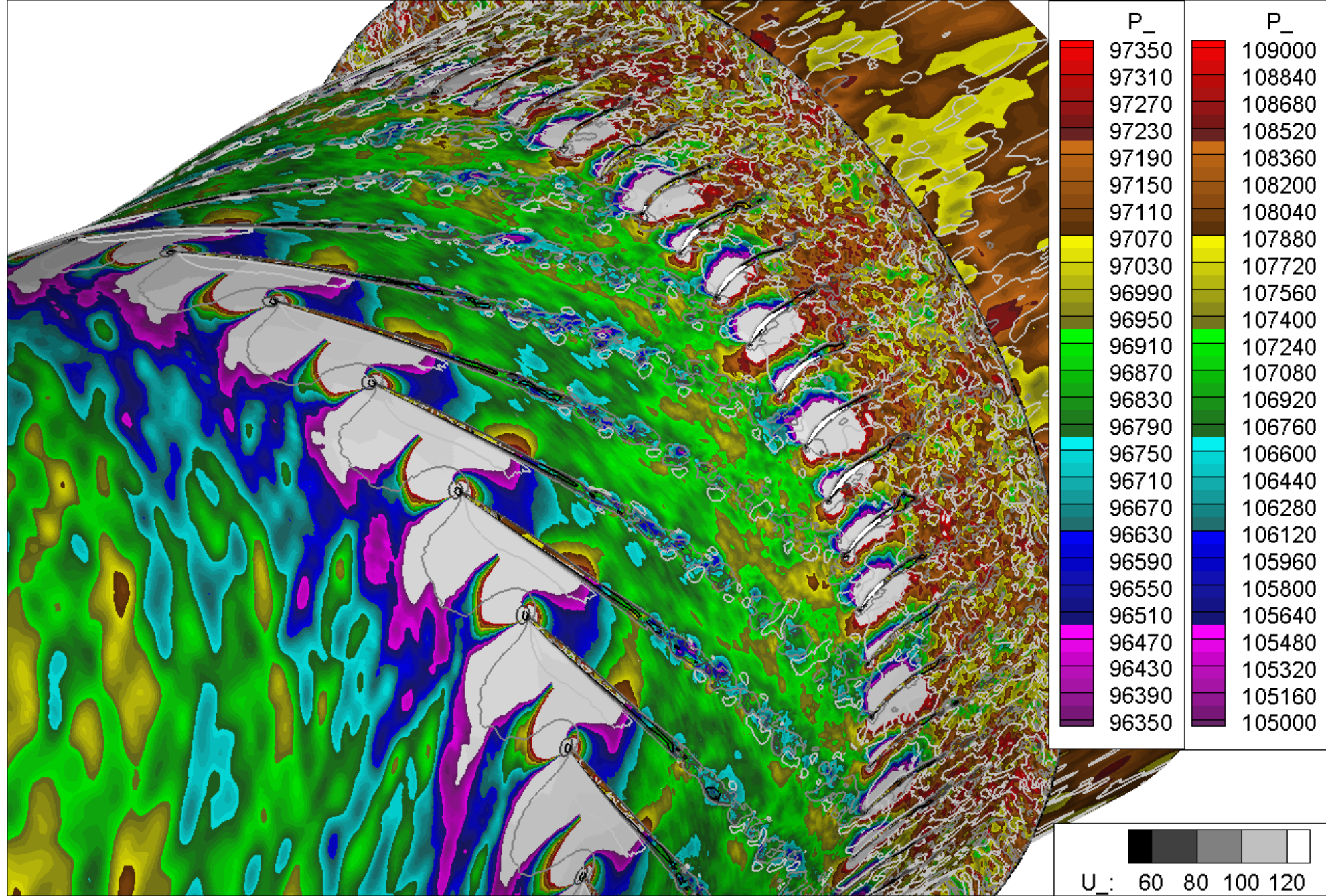
Проблема сильного ложного шума $f \approx 1.2b_{prf}$ обороты 61.7%



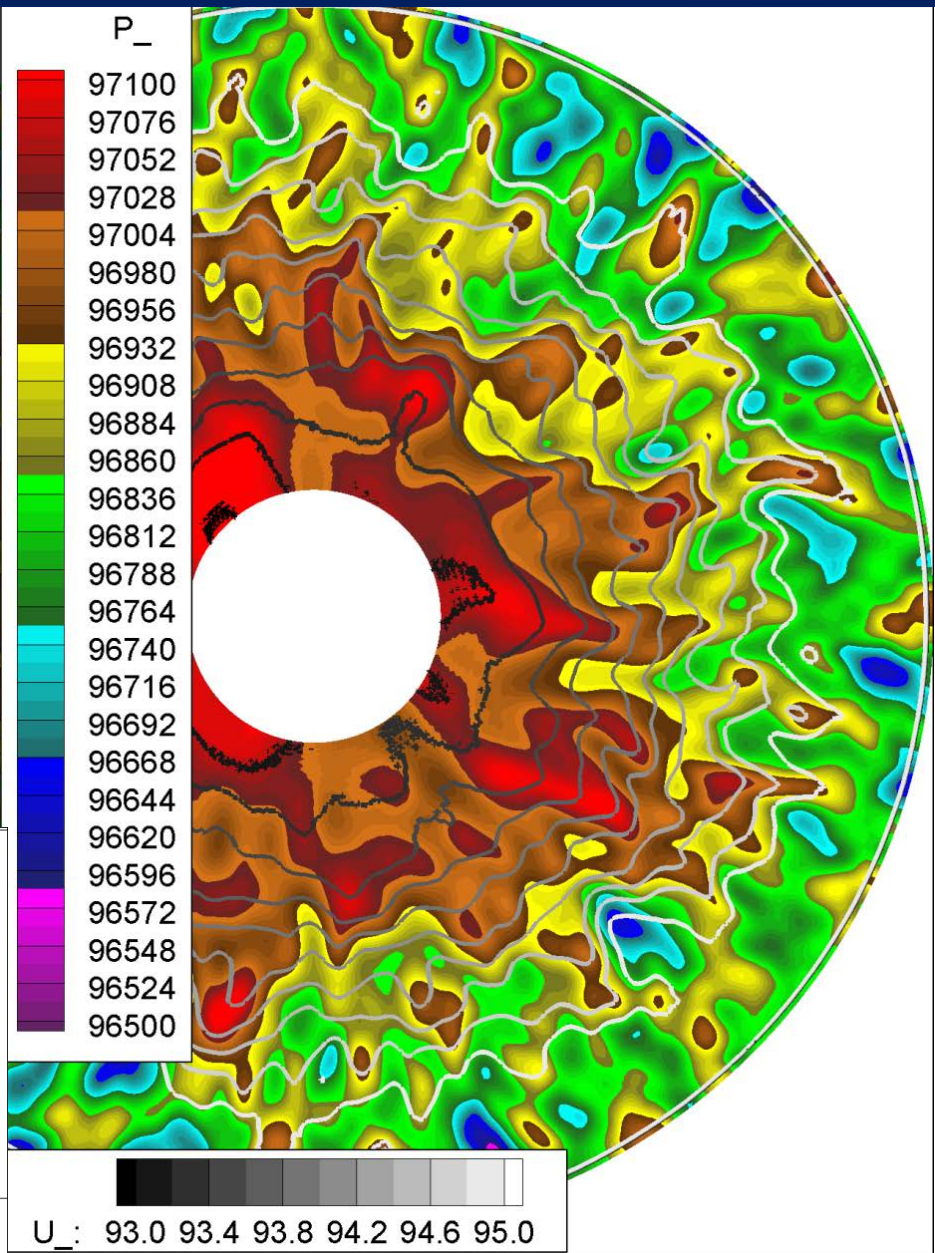
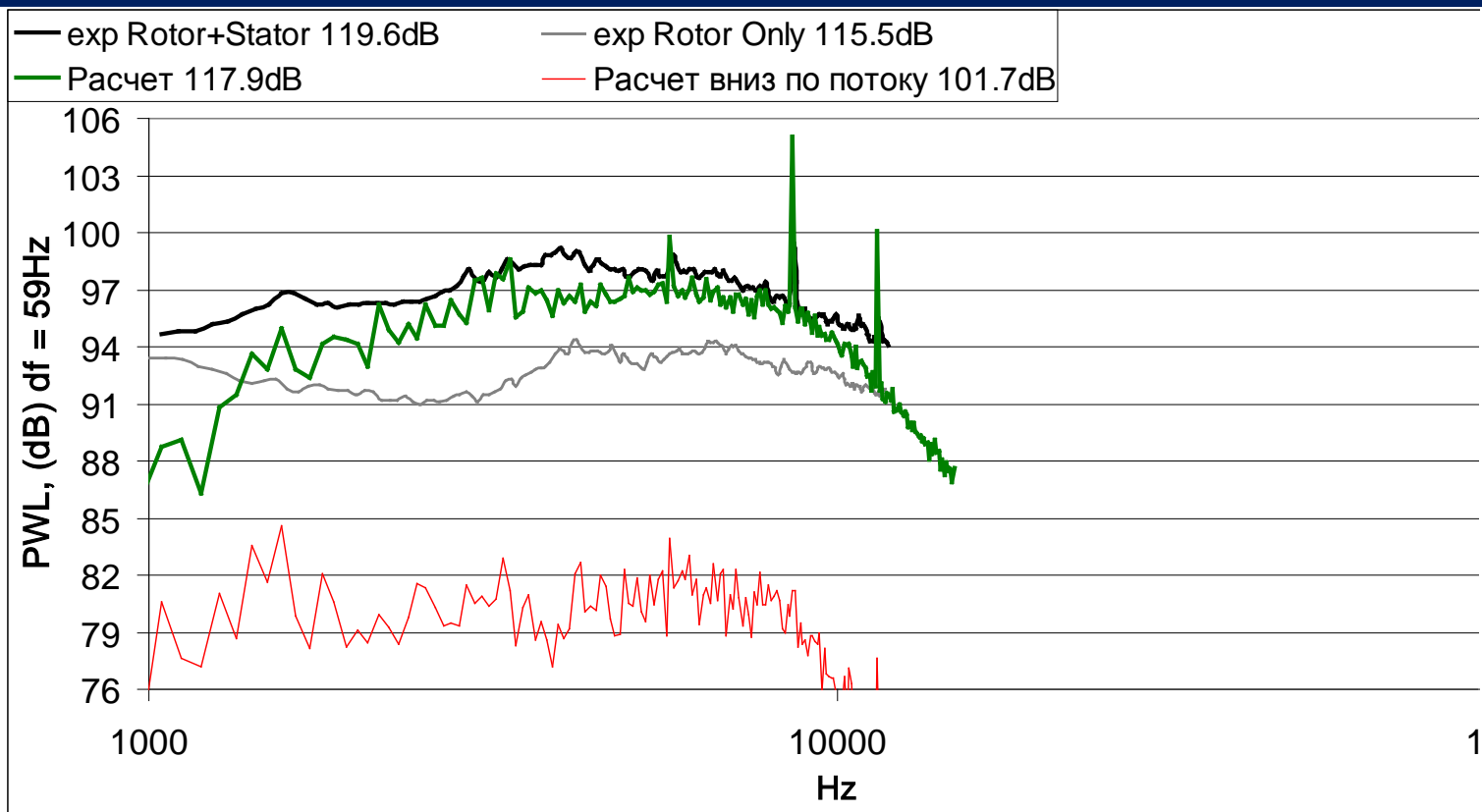
- От когерентных структур удалось избавиться за счет перехода к сетке 2
- В зоне STG в следе максимум энергии при $L \approx 3.5$ mm
- Если перенести начало LES на $\frac{3}{4}$ хорды ротора $L \approx 1$ mm сетка вырастет более чем на порядок

Результаты расчета, картина течения 61.7%

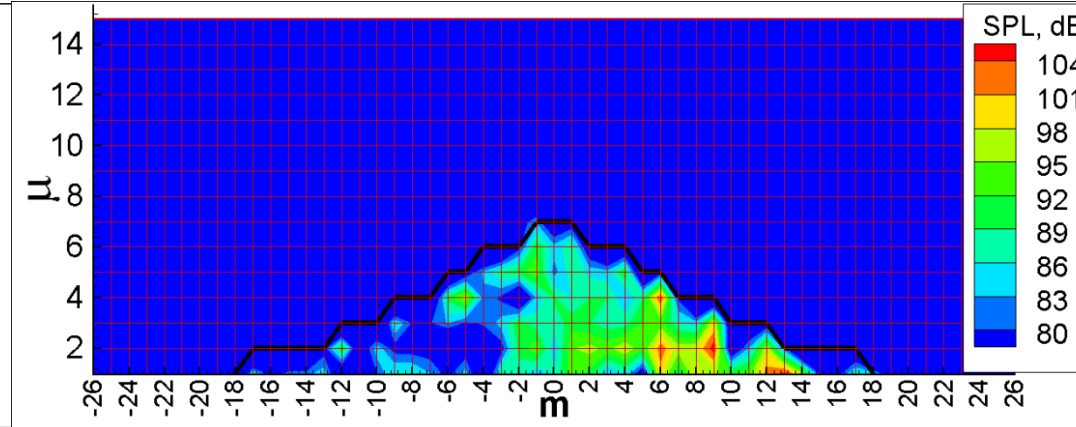




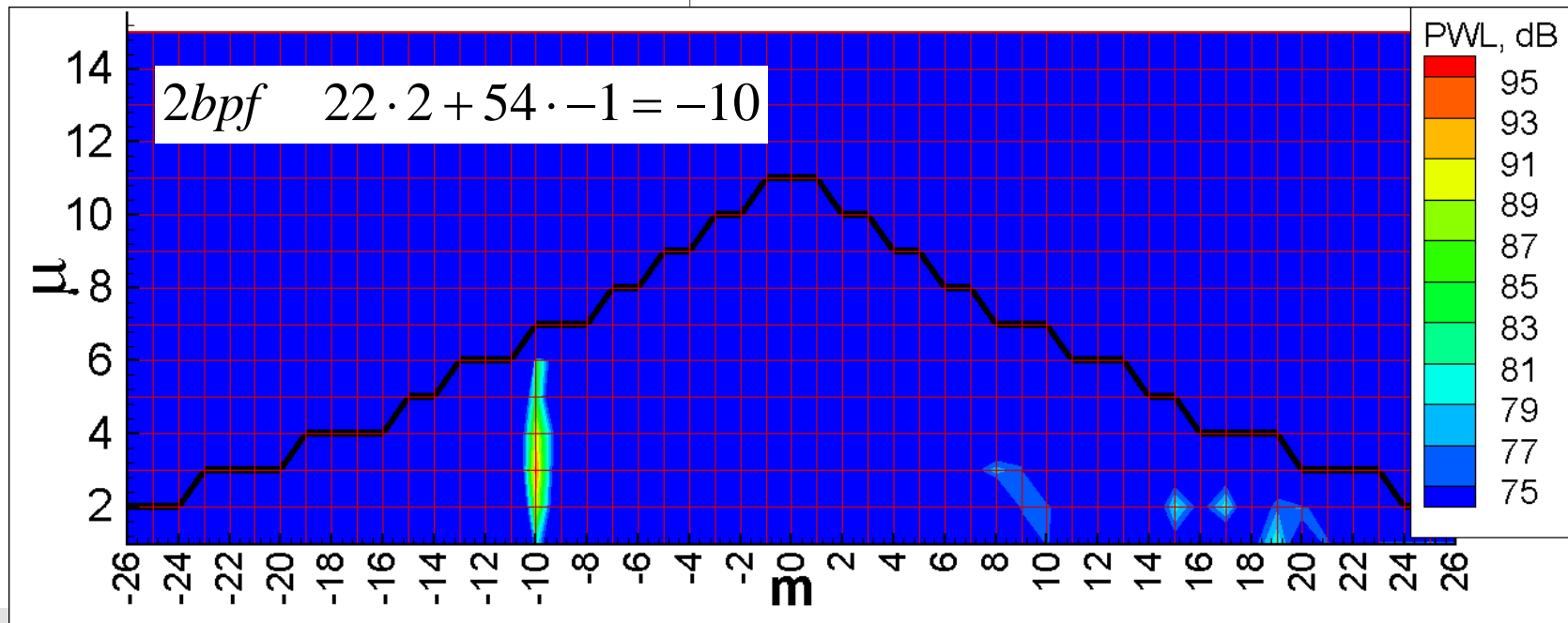
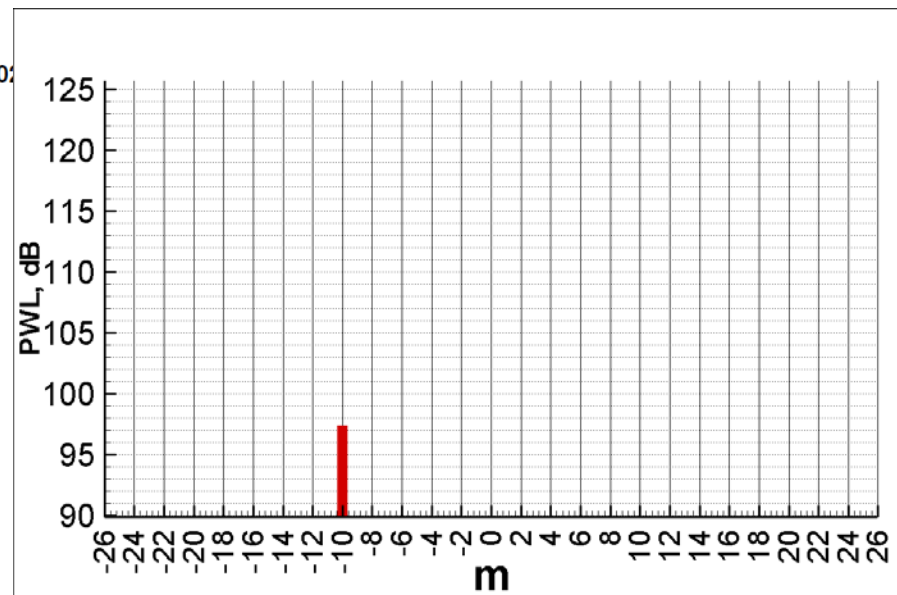
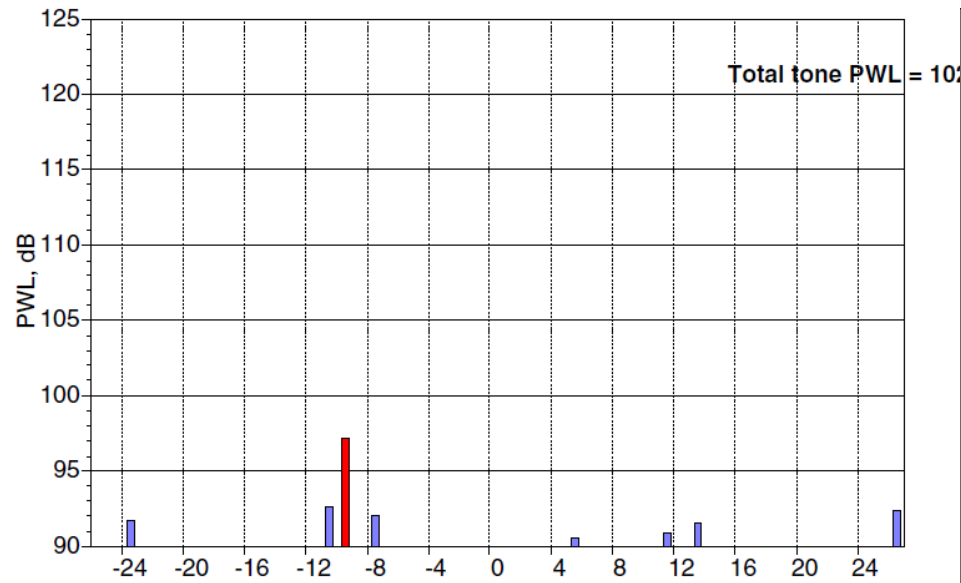
Результаты расчета, обороты 61.7%, спектр акустической мощности «вперед»



Модальный состав SPL в полосе 3579-3644Hz



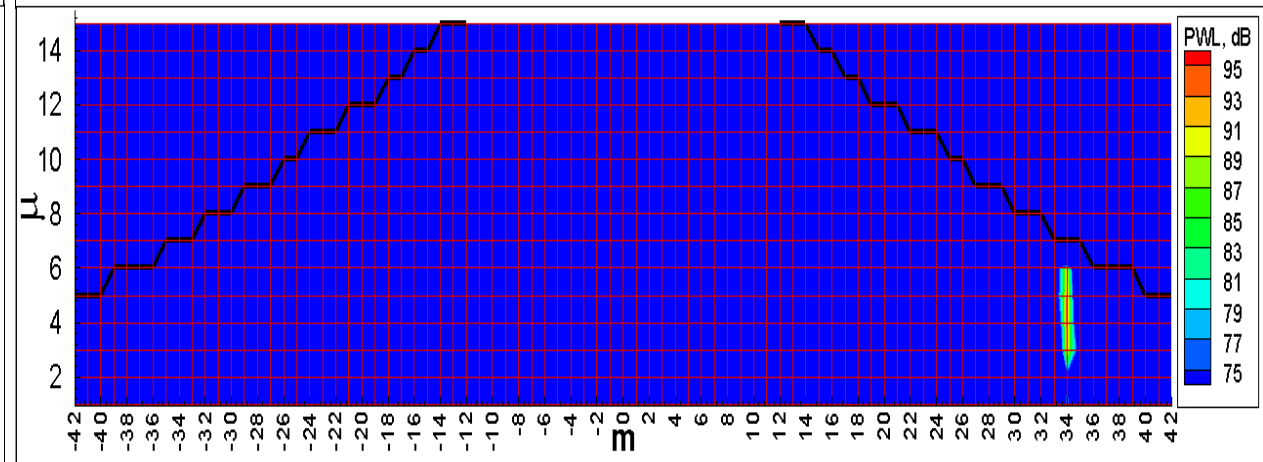
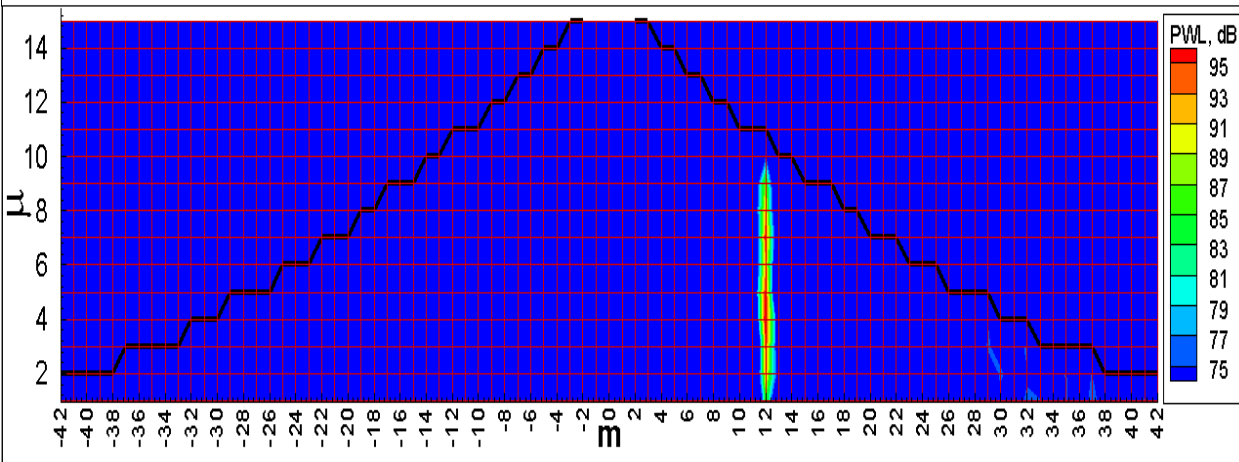
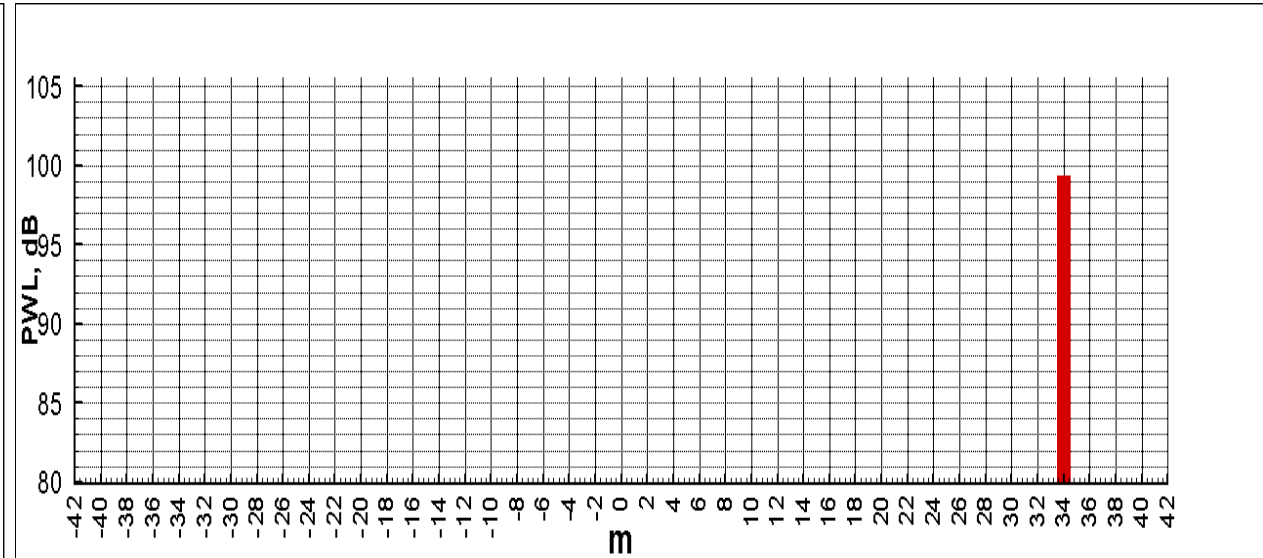
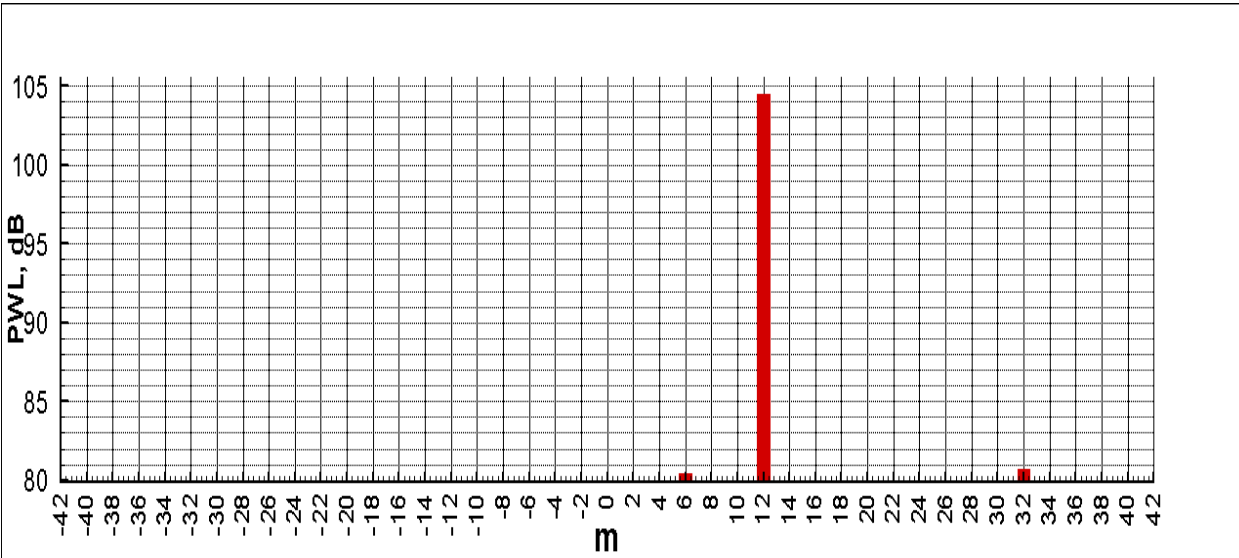
Результаты расчета , обороты 61.7%, тональные составляющие 2bpf «вперед»



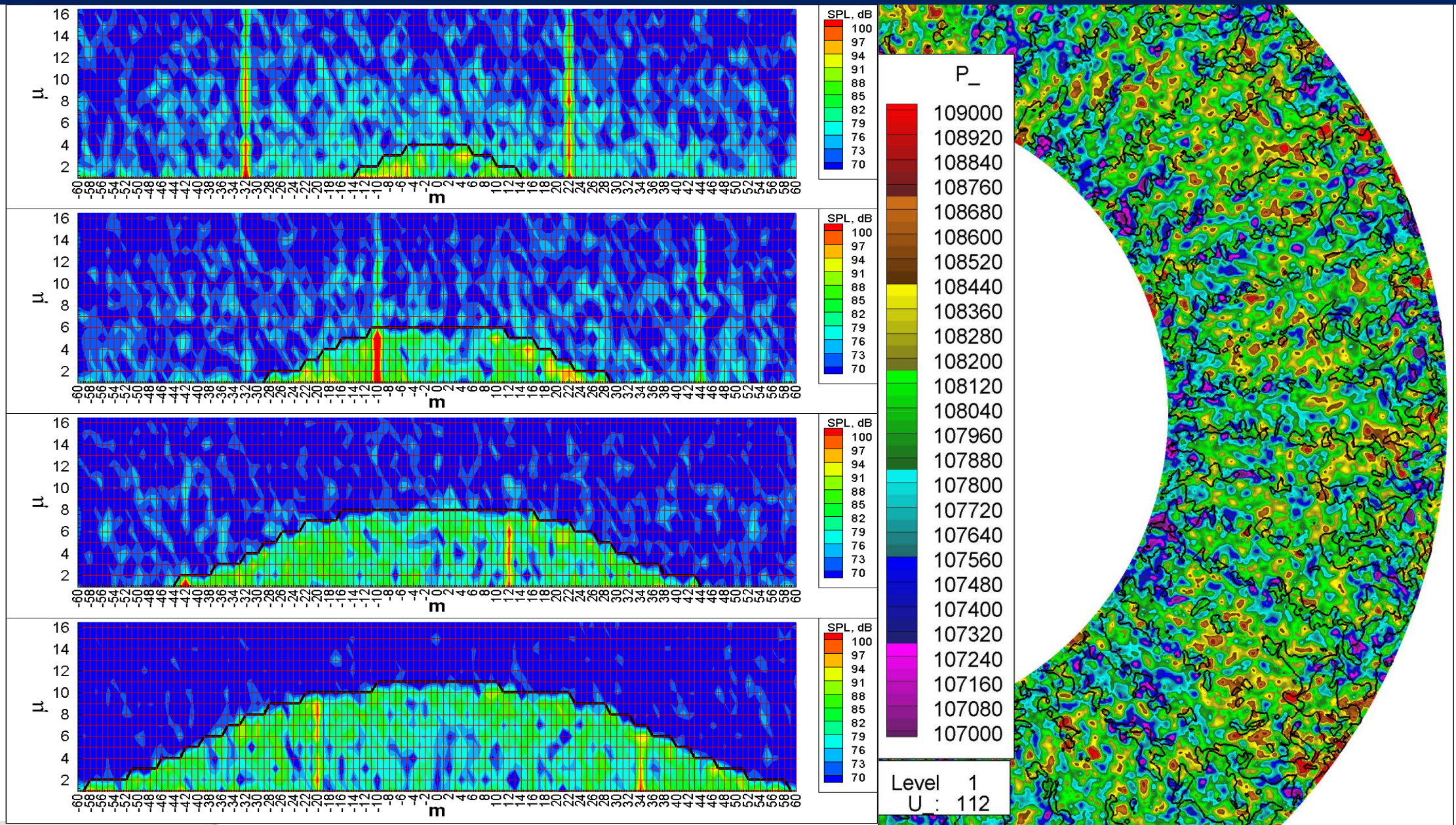
Результаты расчета, обороты 61.7%, тональные составляющие 3bpf, 4bpf «вперед»

3bpf $22 \cdot 3 + 54 \cdot -1 = +12$

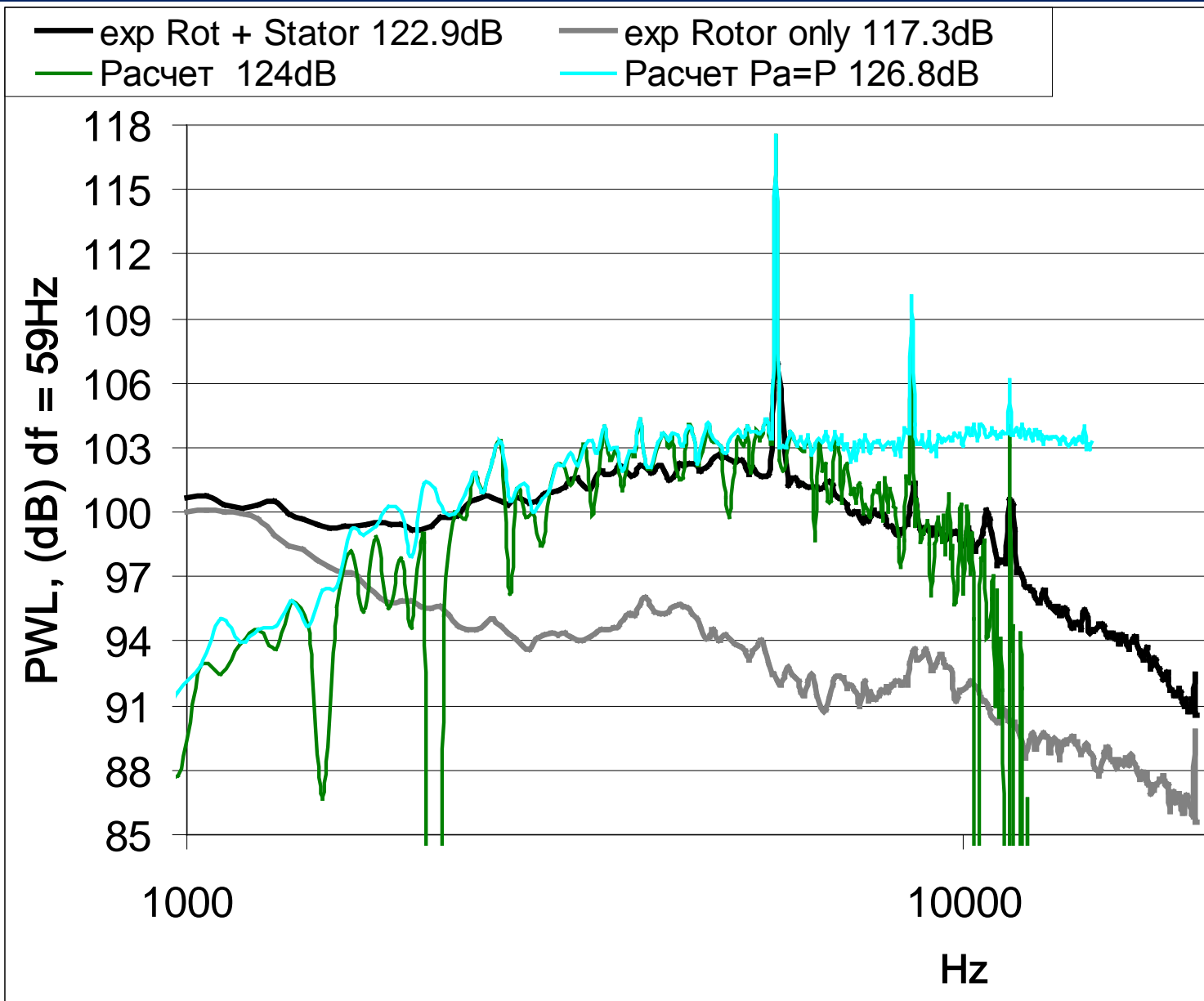
4bpf $22 \cdot 4 + 54 \cdot -1 = +34$



Результаты расчета, обороты 61.7%, особенности потока за статором



Результаты расчета, обороты 61.7%, спектр акустической мощности «назад»



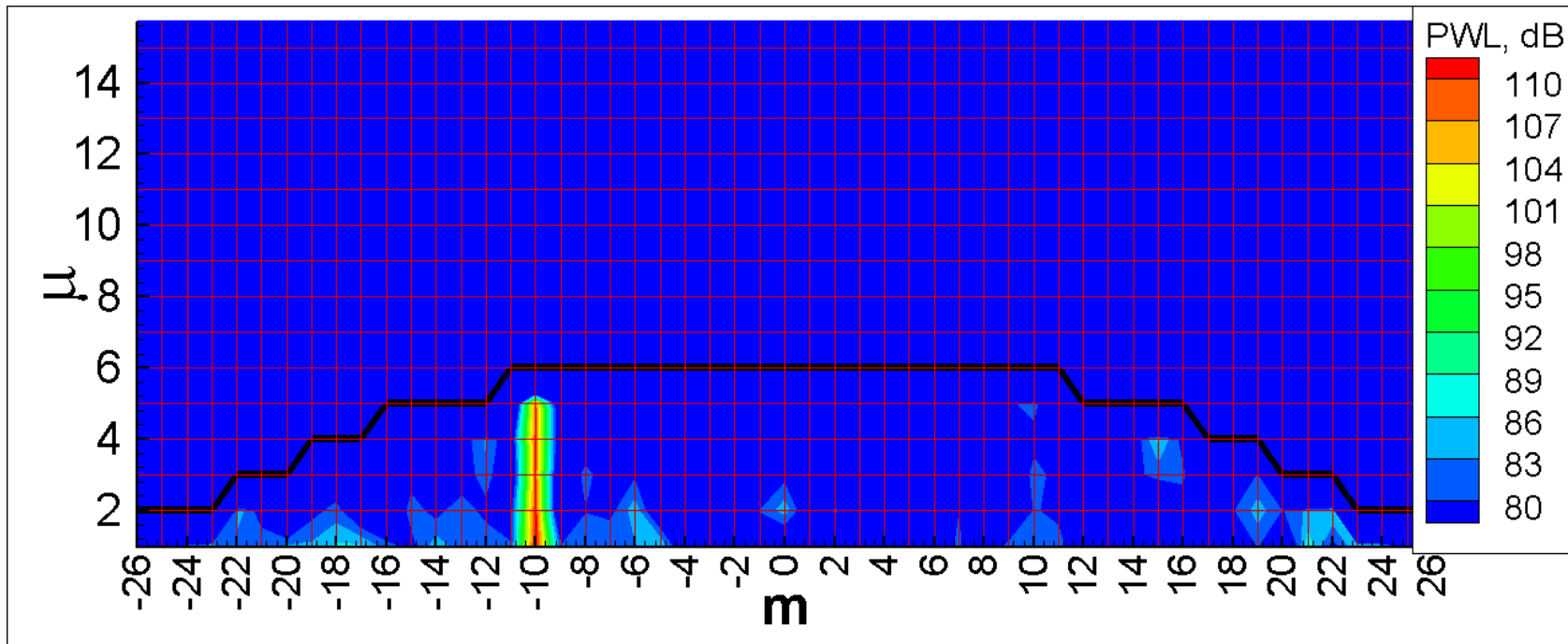
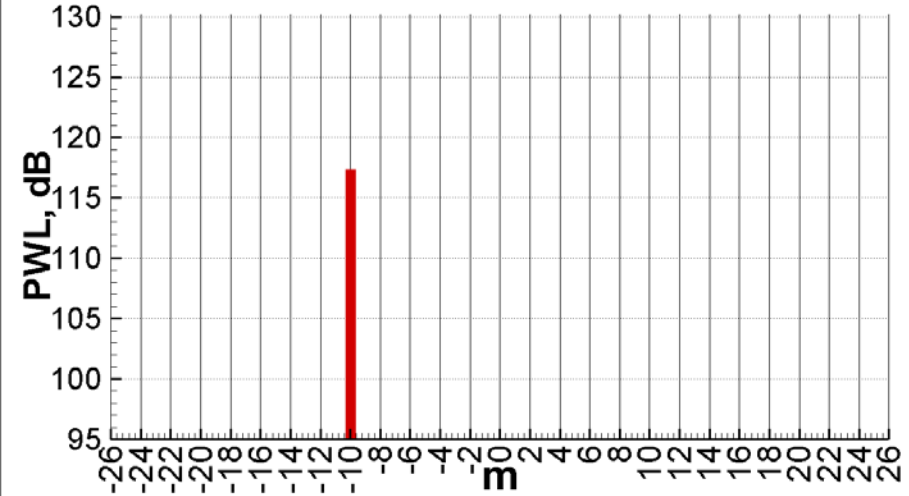
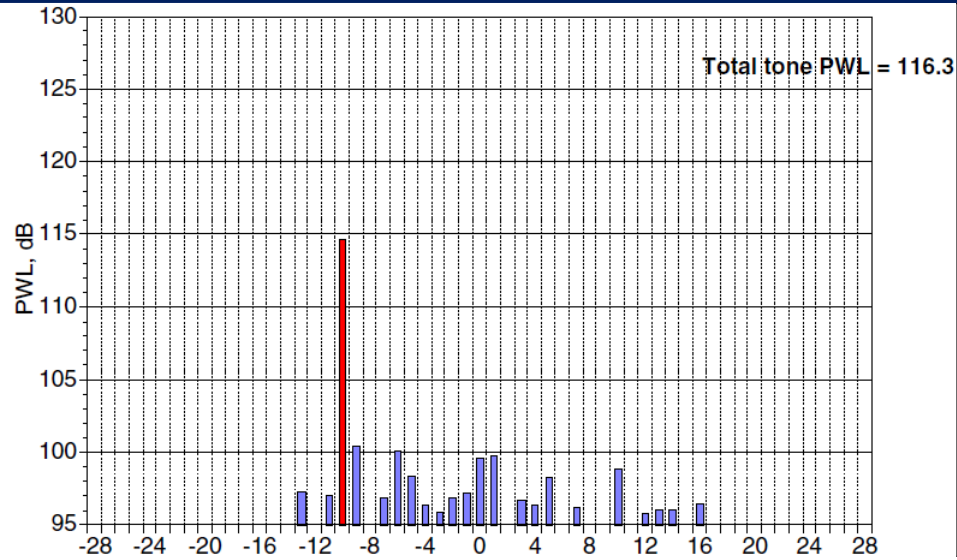
$$\langle I_x \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \left[(1 + M^2) p \bar{u} + M |p|^2 + M |u|^2 \right]$$

$$\sum_{m,\mu} (p_{m,\mu}^a + p_{m,\mu}^t) \cdot \overline{(u_{m,\mu}^a + u_{m,\mu}^t)} = \sum_{m,\mu} p_{m,\mu}^a \cdot \overline{u_{m,\mu}^a} + \sim 0$$

$$\sum_{m,\mu} (p_{m,\mu}^a + p_{m,\mu}^t) \cdot \overline{(u_{m,\mu}^a + u_{m,\mu}^t)} \cdot \frac{\delta_{m,\mu} - M}{1 - M\delta_{m,\mu}} = \sum_{m,\mu} |u_{m,\mu}^a|^2 + \sim 0$$

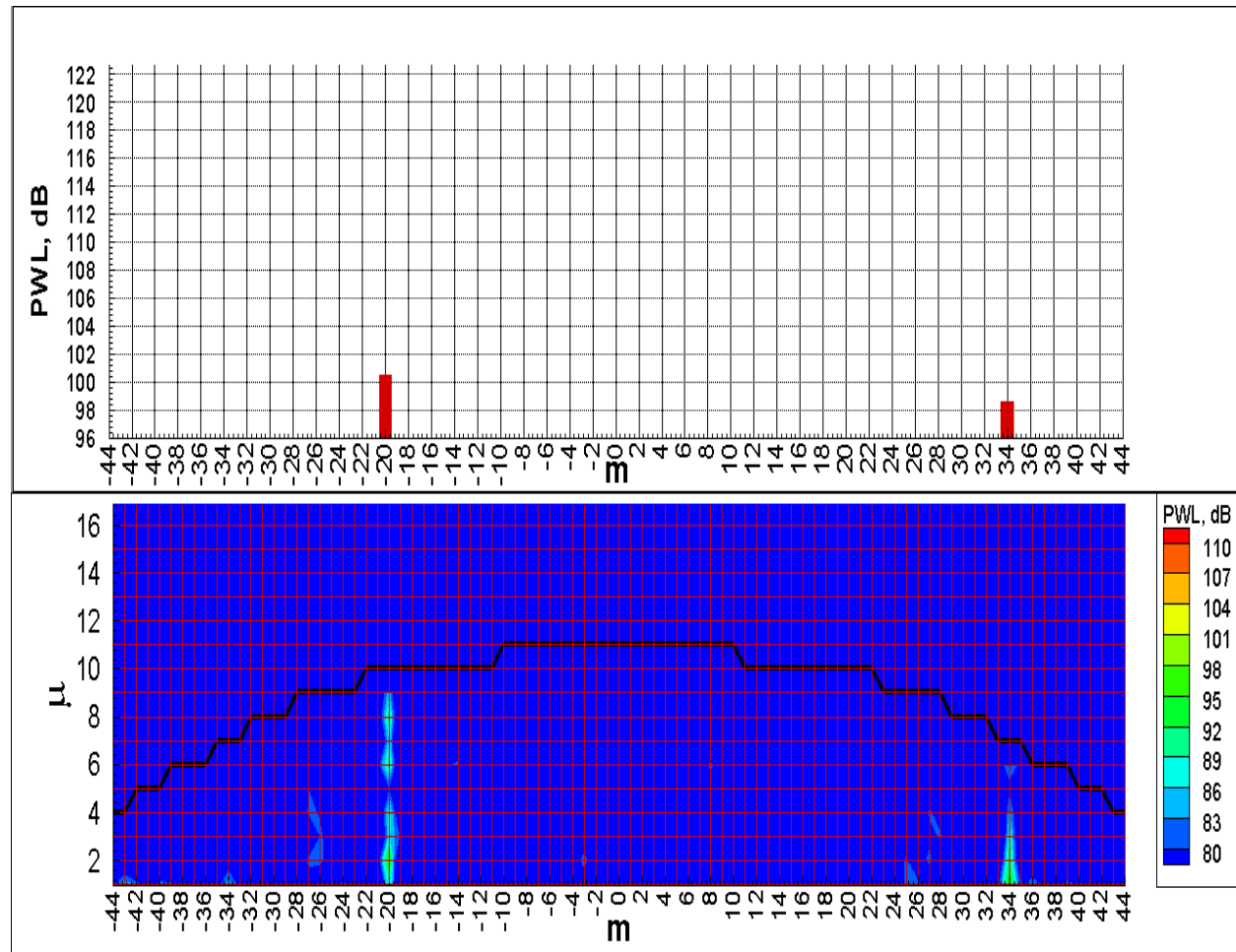
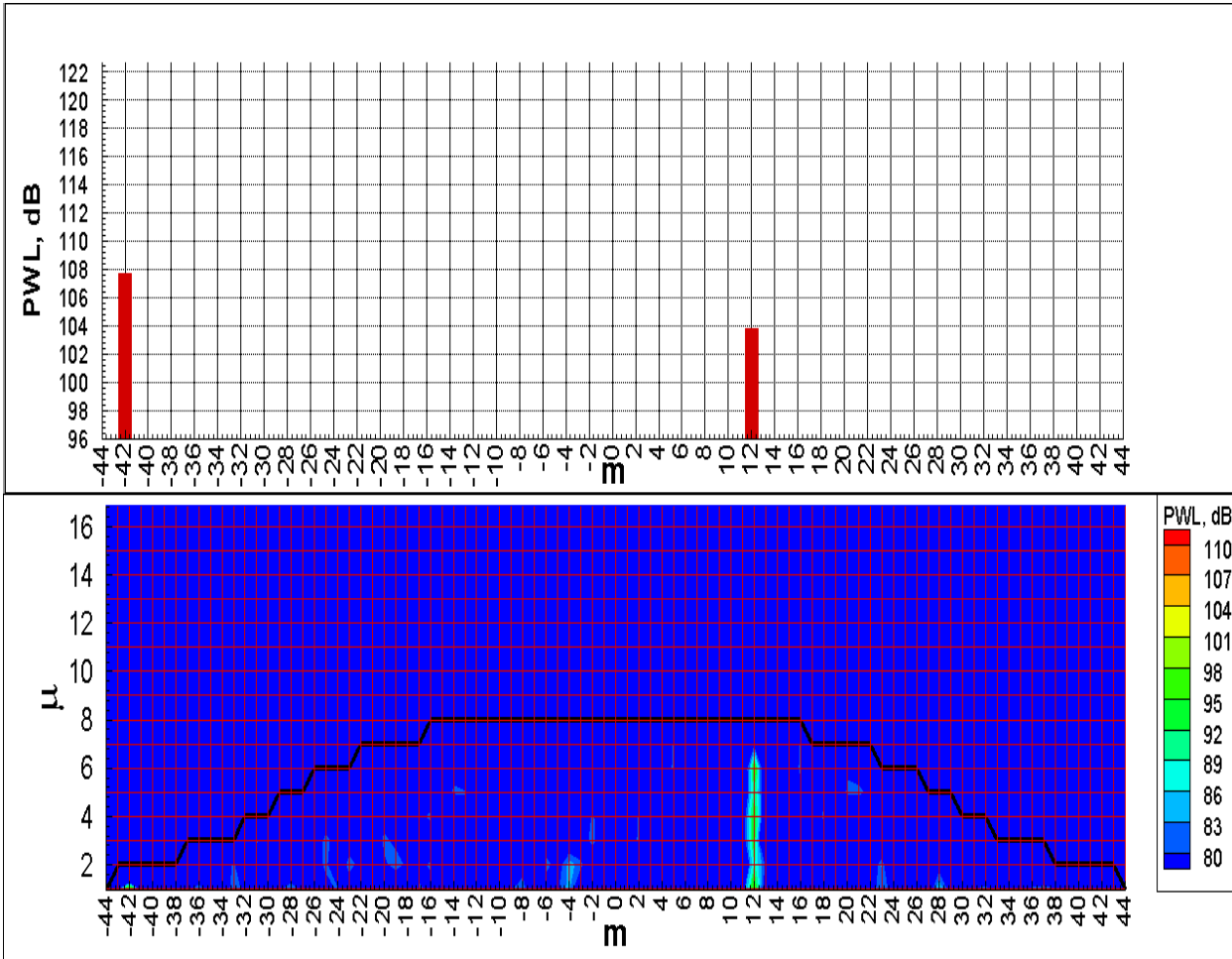
$$\sum_{m,\mu} (p_{m,\mu}^a + p_{m,\mu}^t) \cdot \overline{(u_{m,\mu}^a + u_{m,\mu}^t)} / \frac{\delta_{m,\mu} - M}{1 - M\delta_{m,\mu}} = \sum_{m,\mu} |p_{m,\mu}^a|^2 + \sim 0$$

Результаты расчета, обороты 61.7%, тональные составляющие 2brpf «назад»

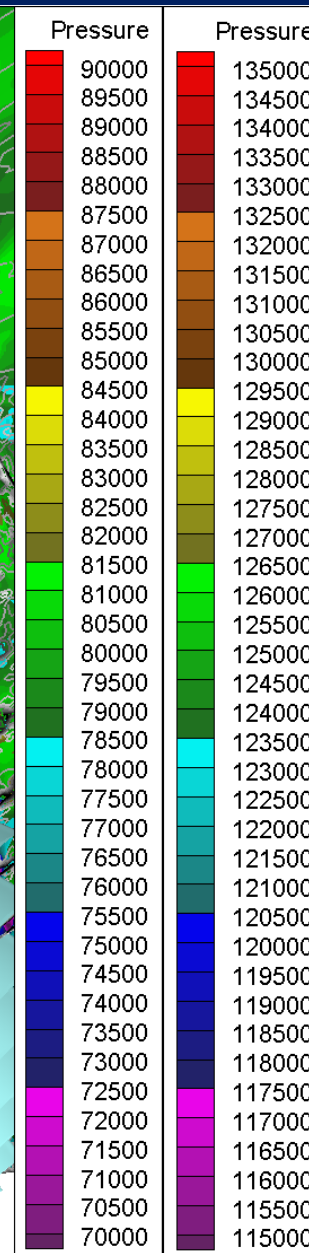
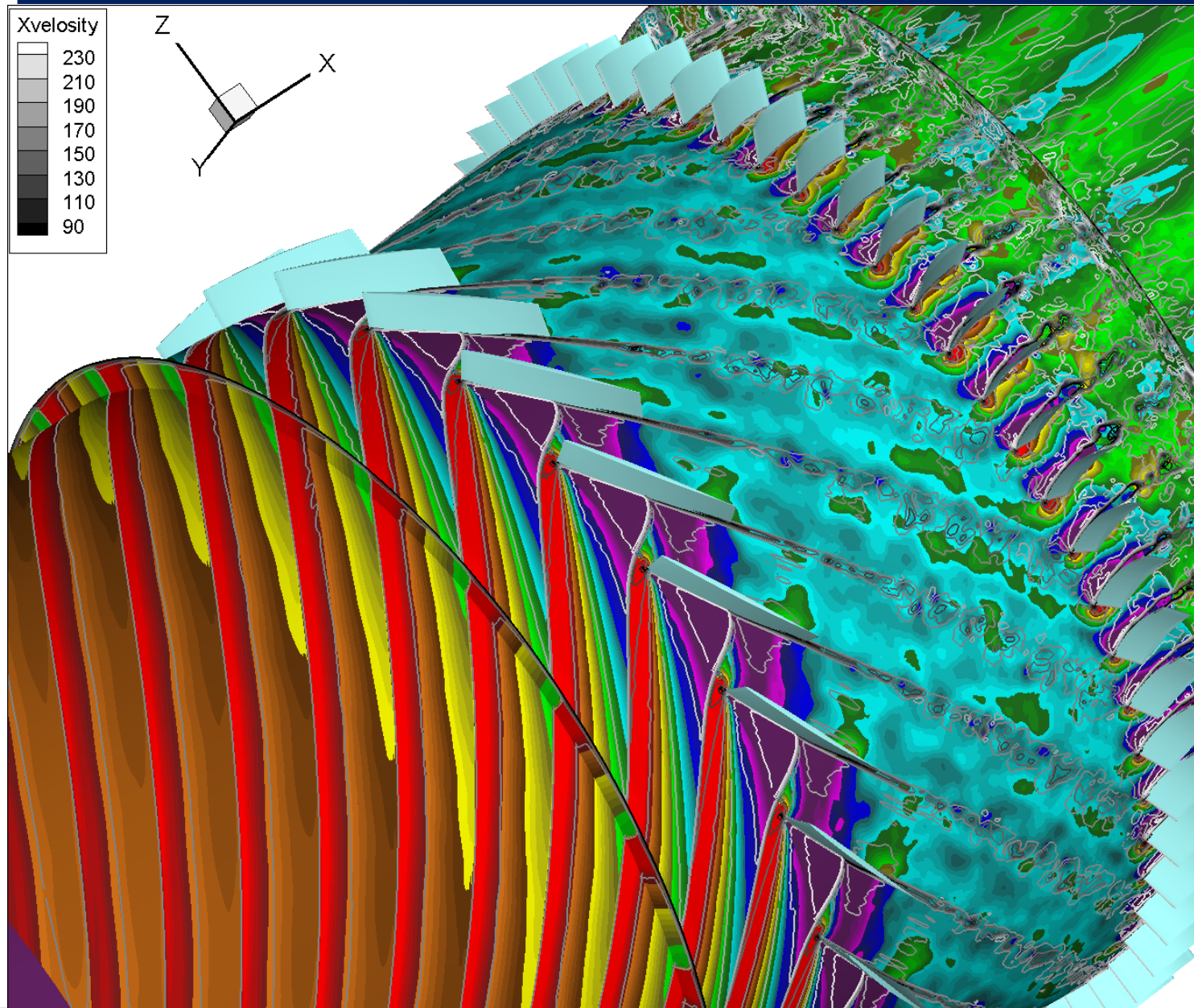


Результаты расчета, обороты 61.7%, тональные составляющие 3bpf, 4bpf «назад»

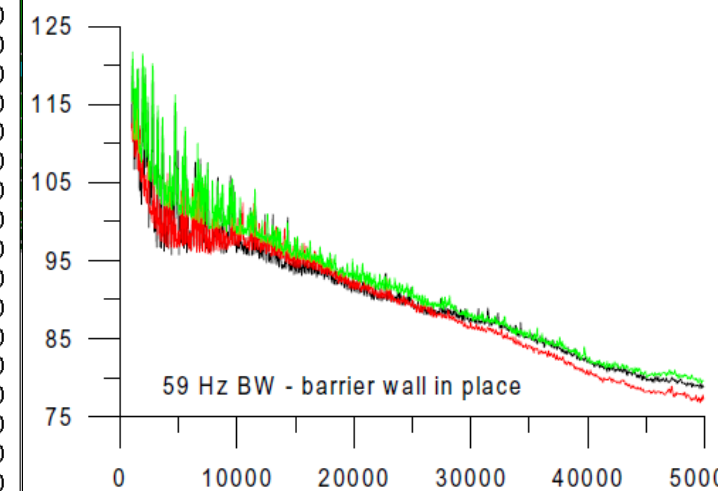
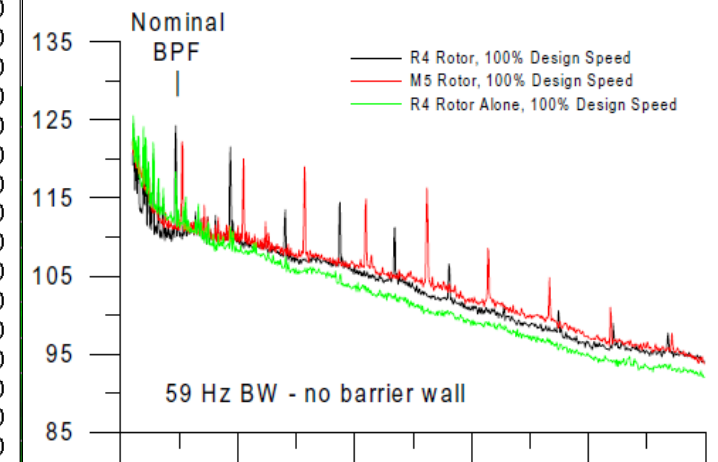
$3bpf \quad 22 \cdot 3 + 54 \cdot -1 = +12 \quad 22 \cdot 3 + 54 \cdot -2 = -42 \quad 4bpf \quad 22 \cdot 4 + 54 \cdot -1 = +34 \quad 22 \cdot 4 + 54 \cdot -2 = -20$



Результаты расчета, мгновенная картина течения в канале 100%



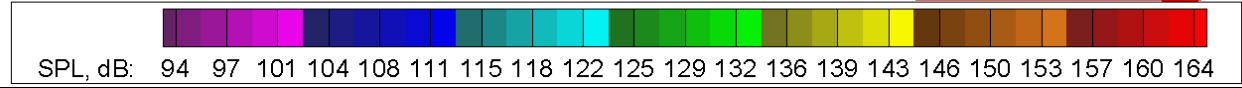
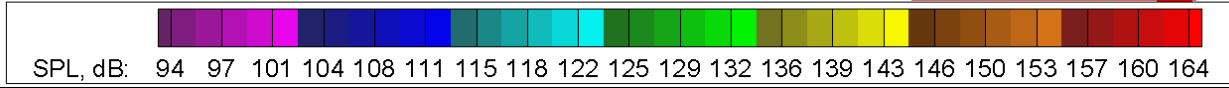
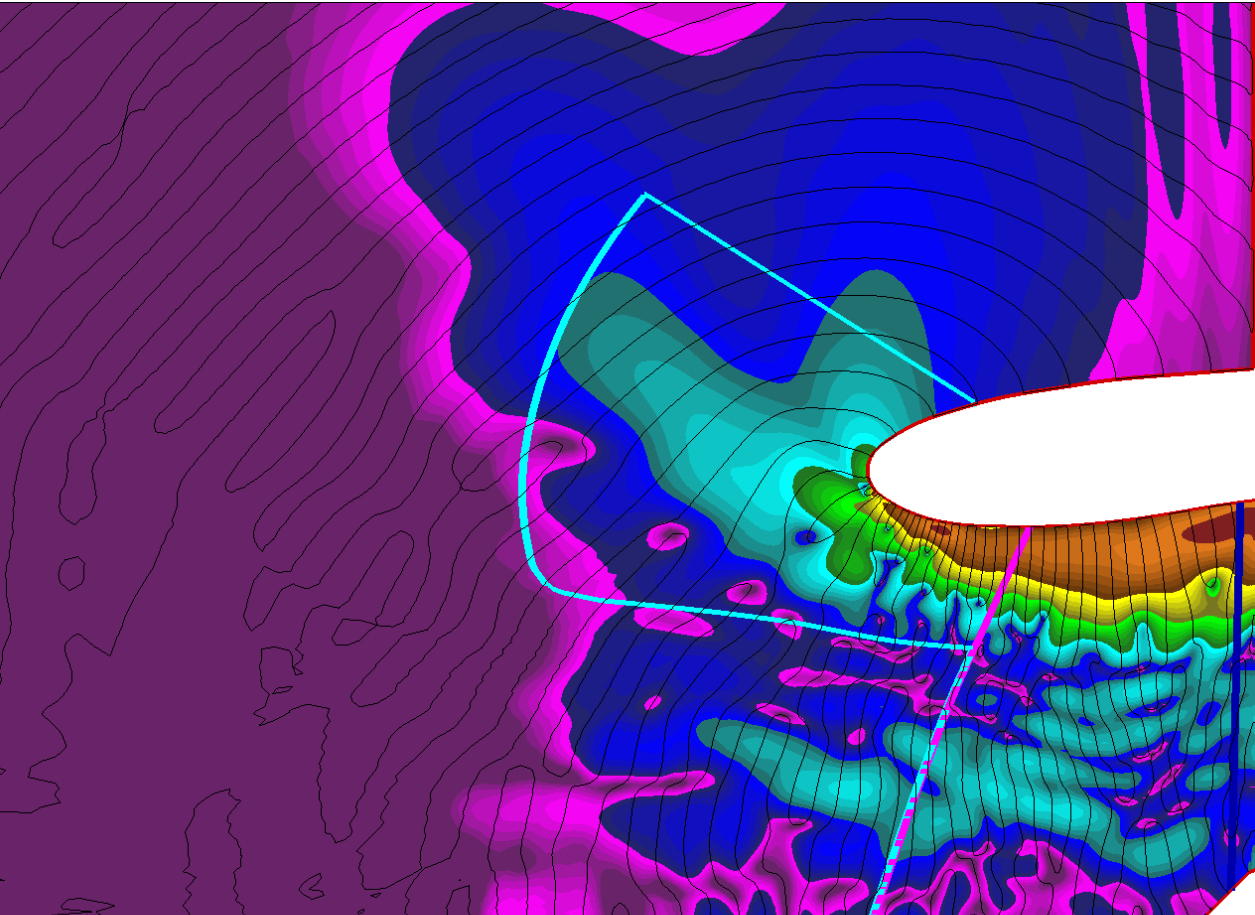
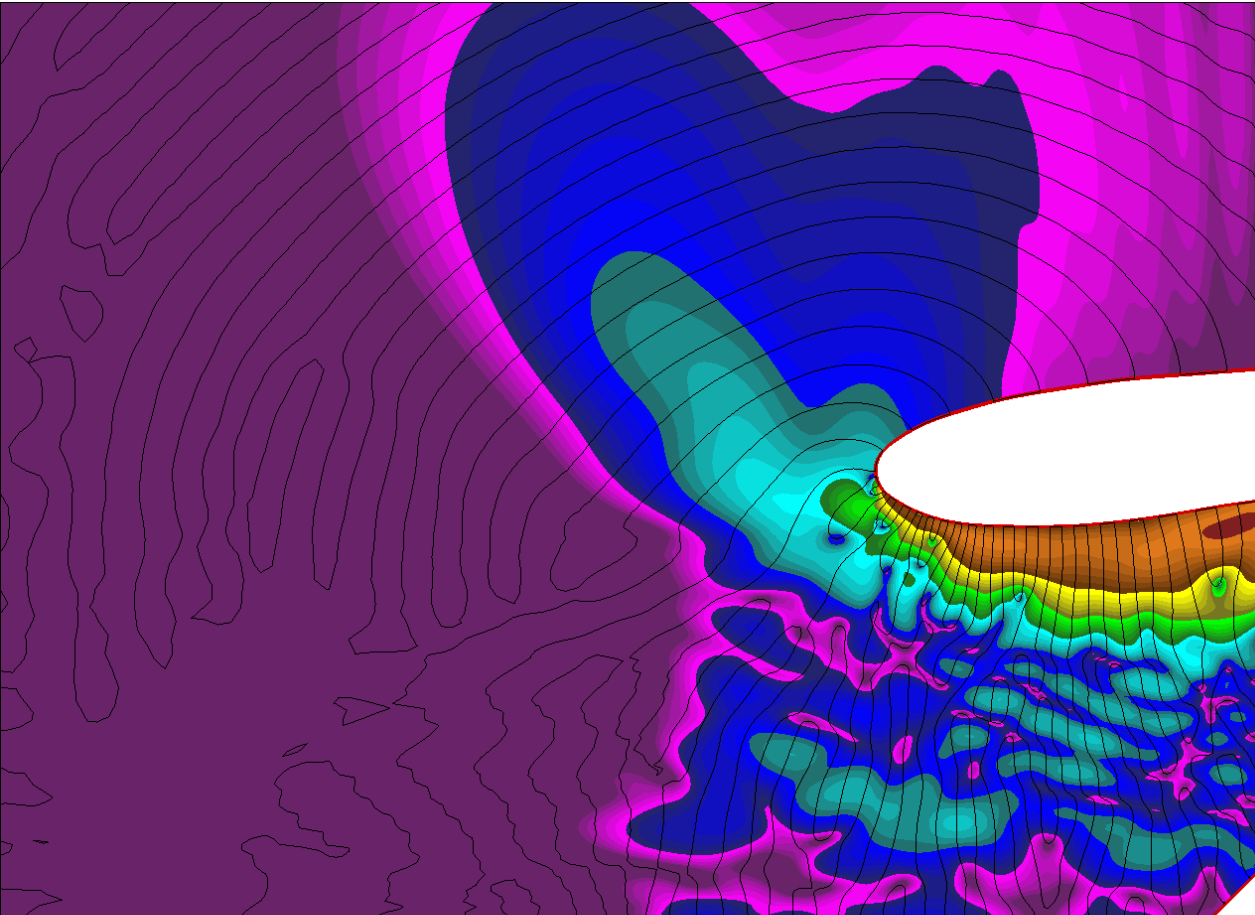
100% design speed сверхзвуковой



Результаты расчета, излучение их мотогондолы вперед 2bpf 100%

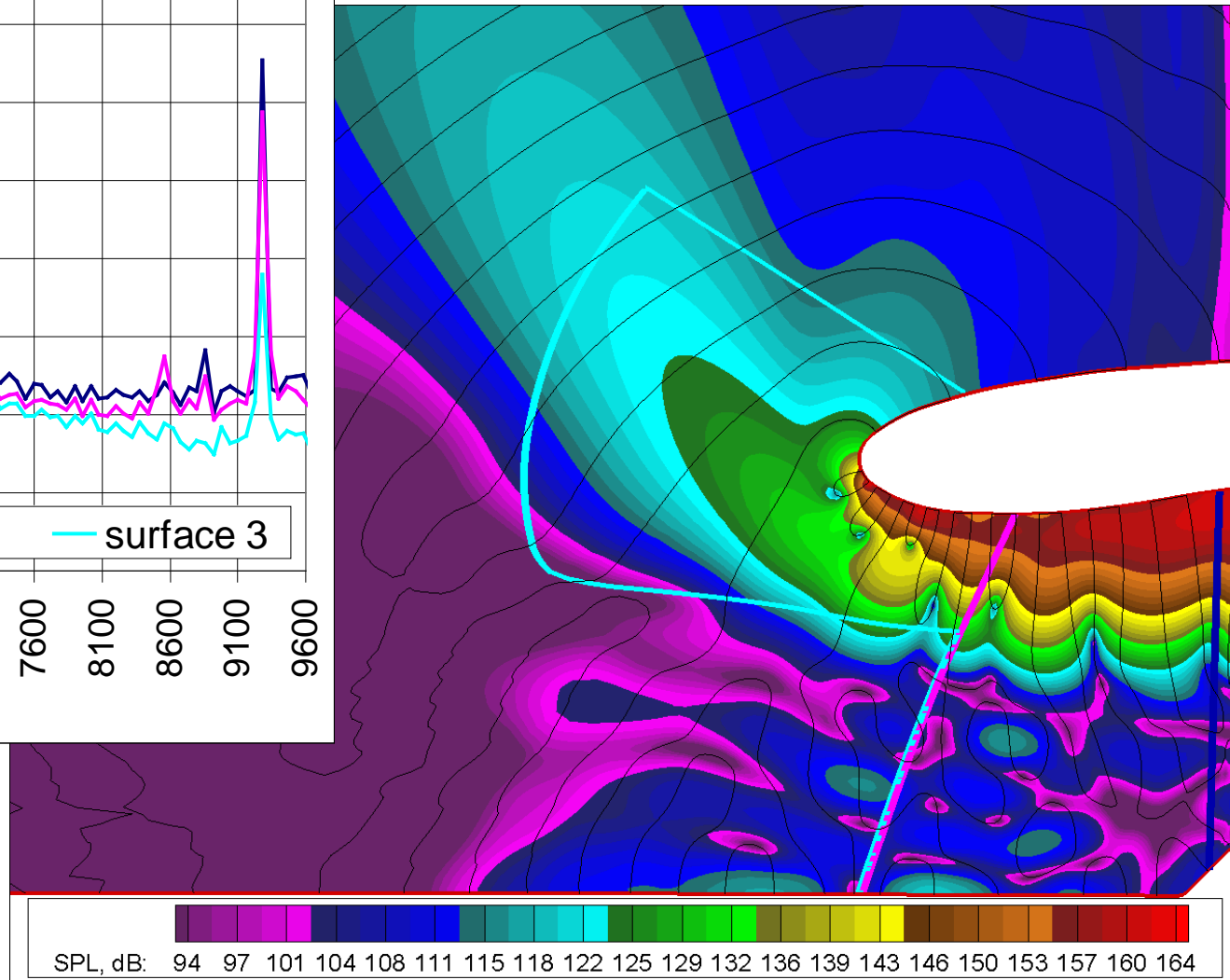
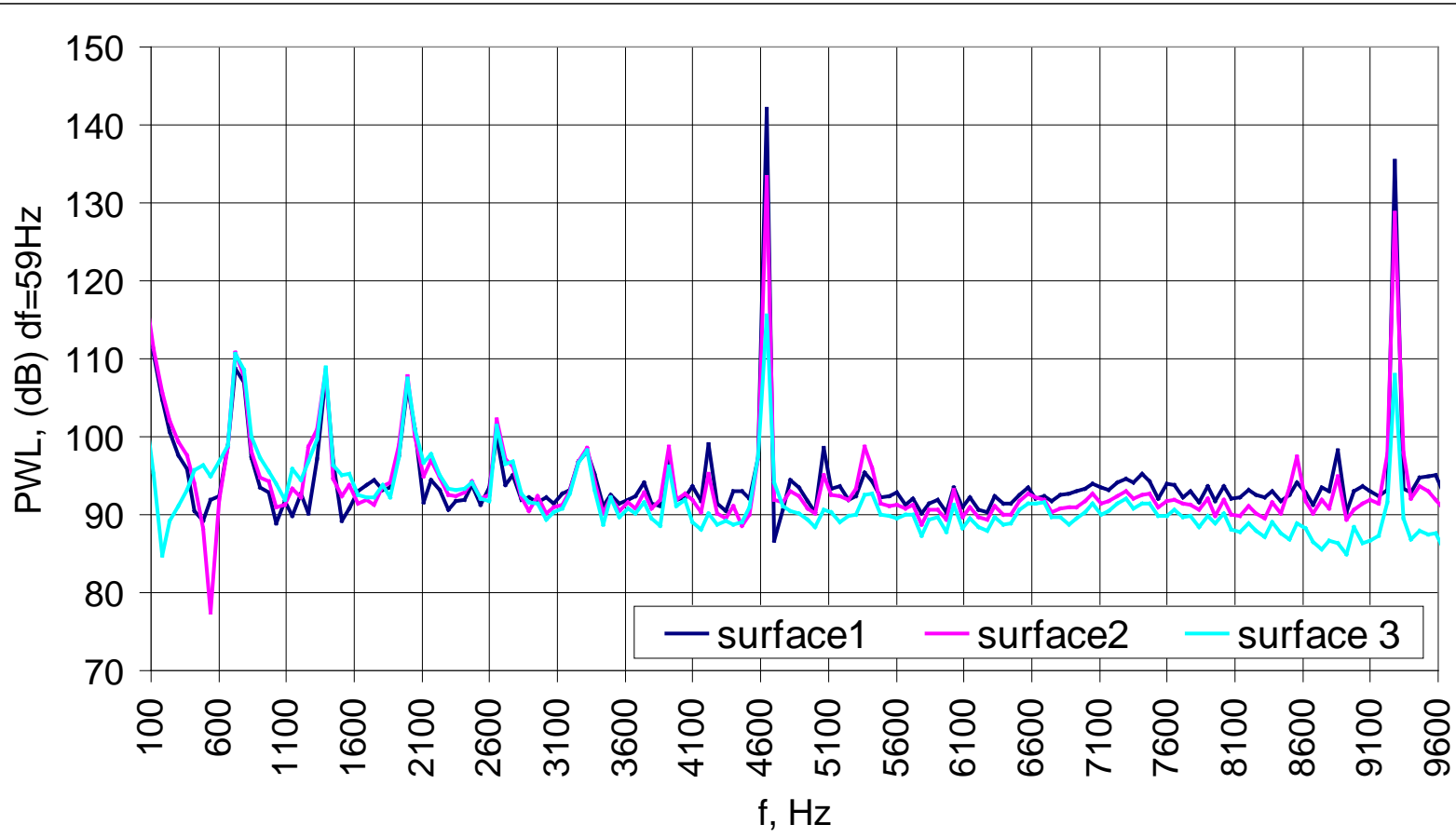
Сетка x350 f1342 r 121

Сетка x700 f1342 r 121

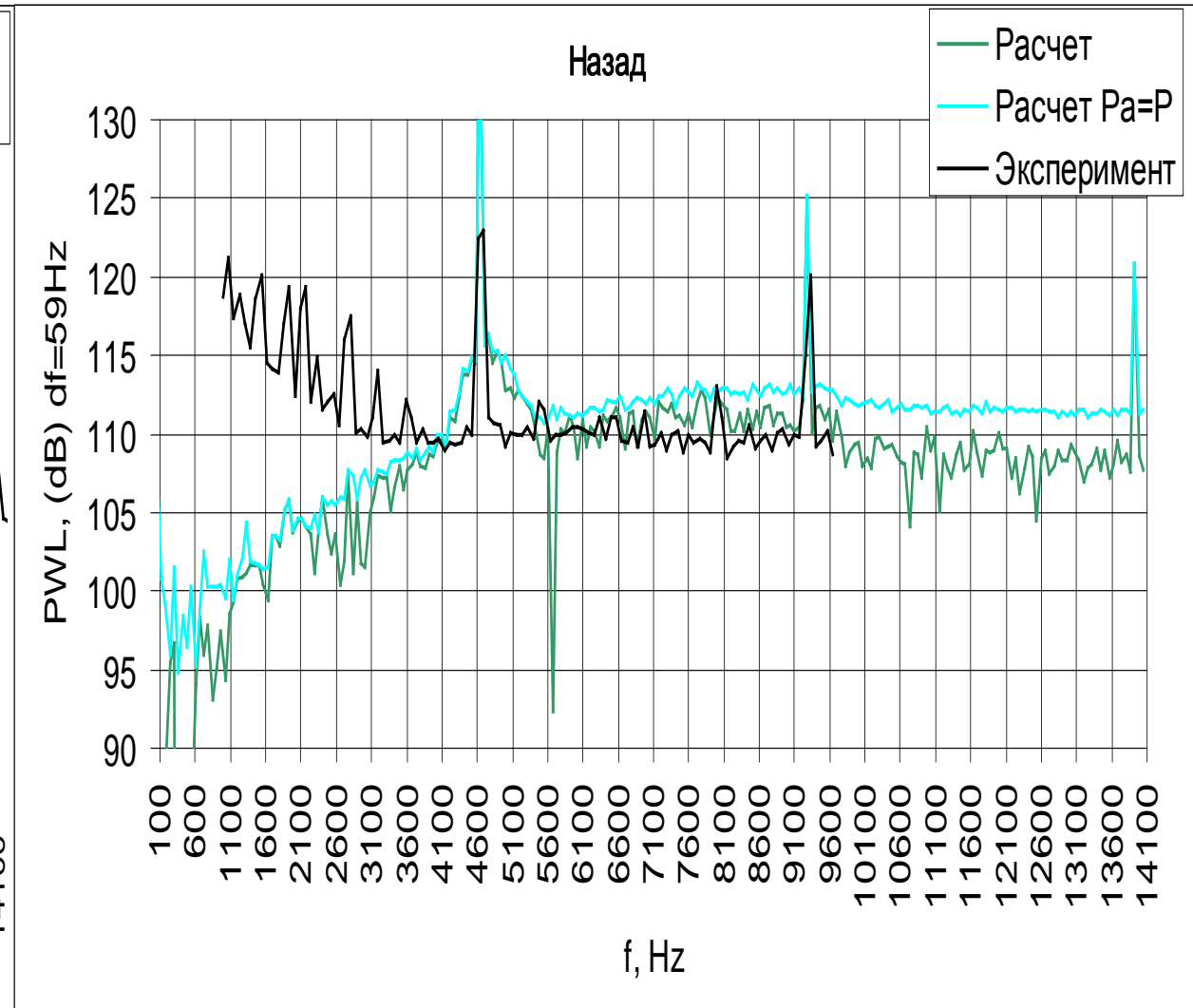
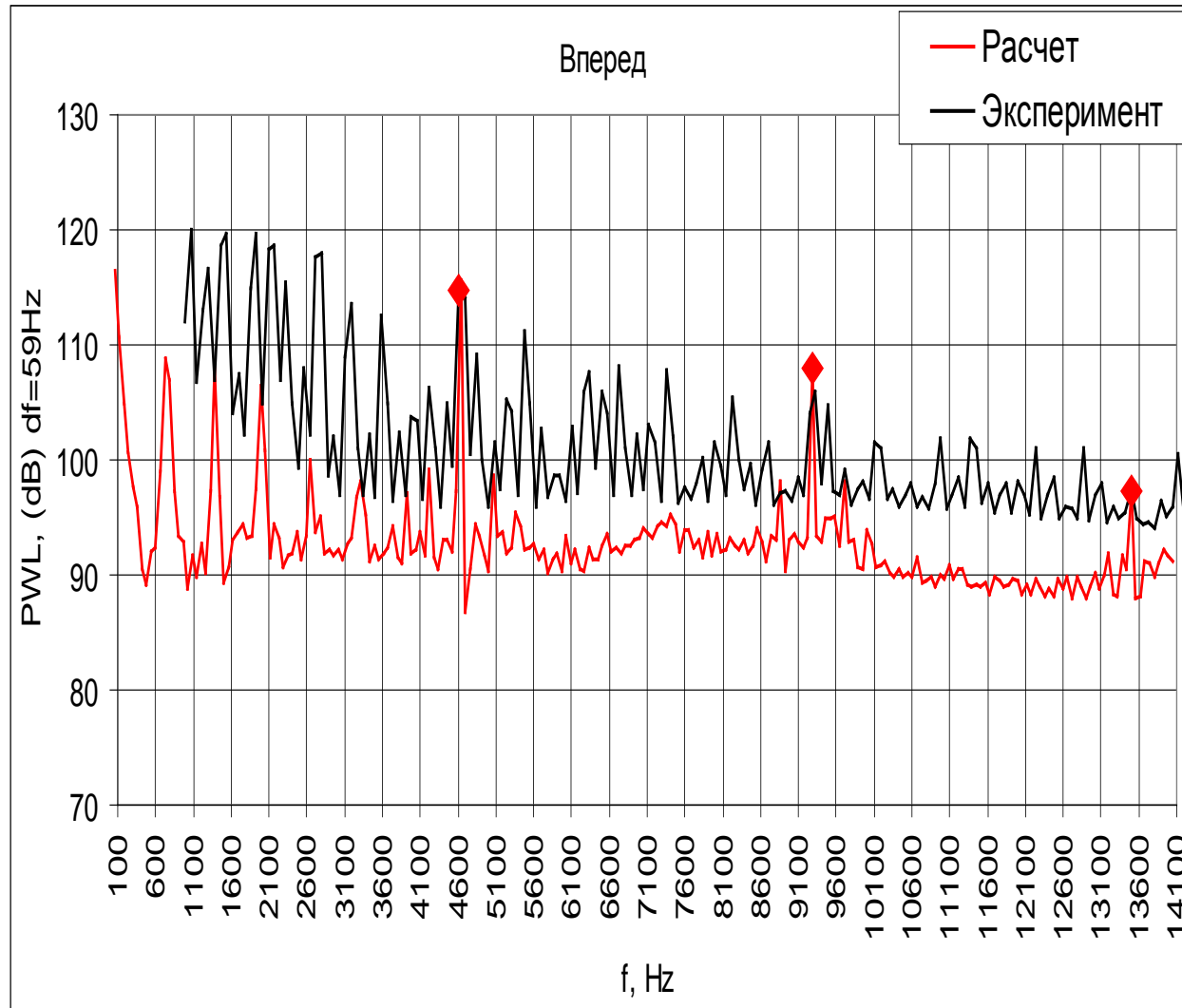


Результаты расчета, излучение их мотогондолы вперед 100%

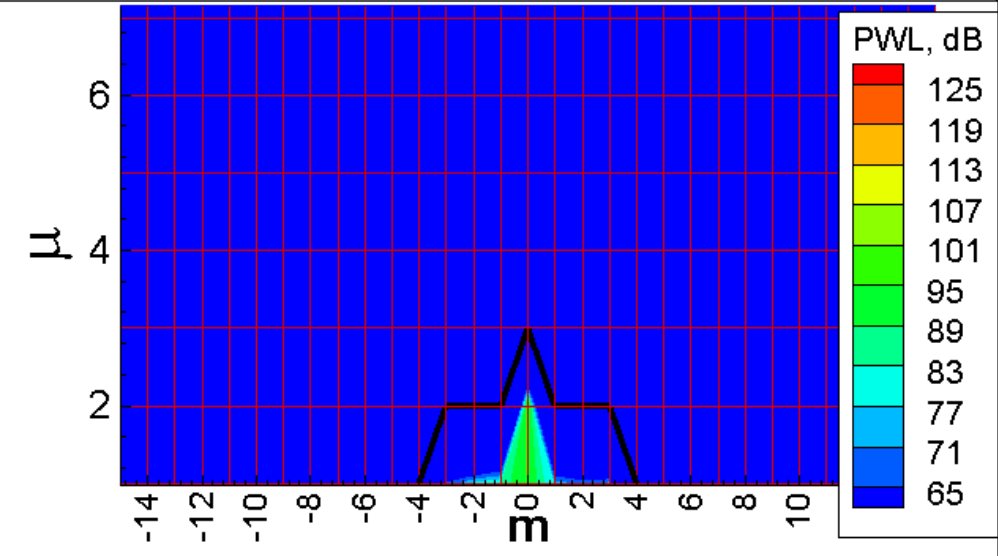
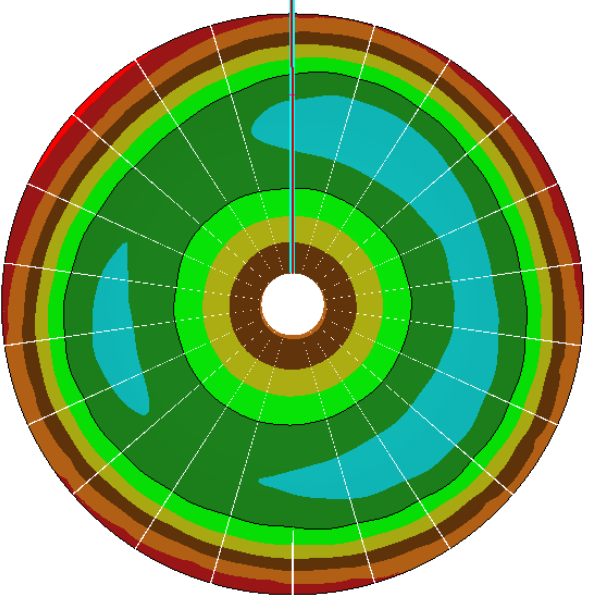
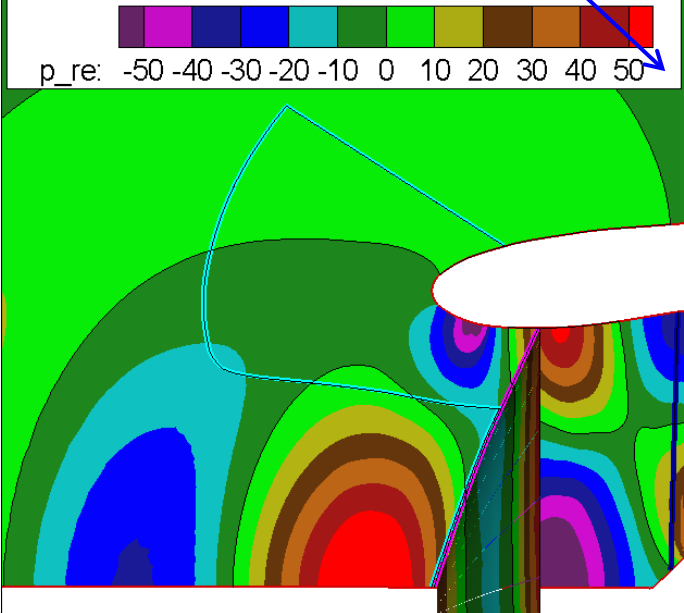
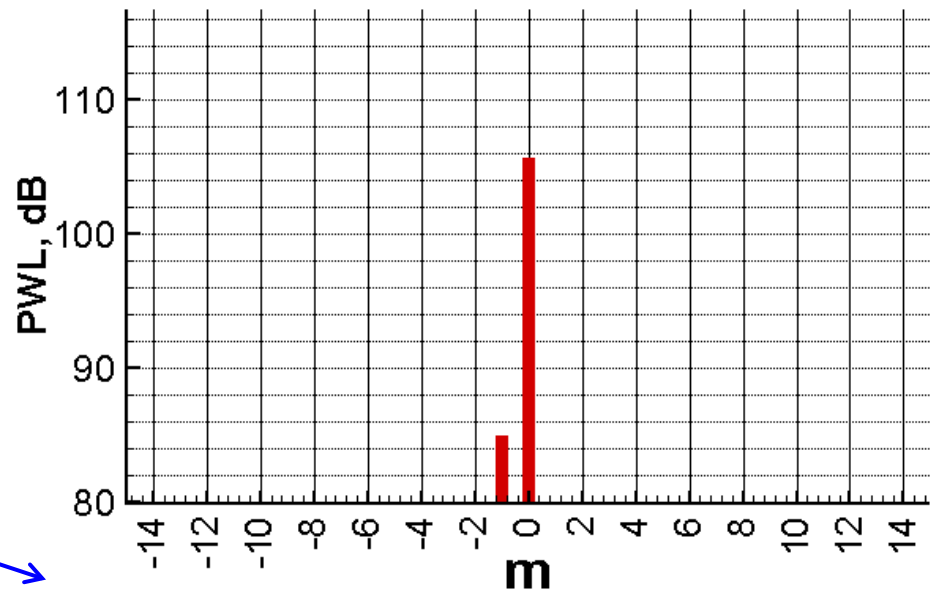
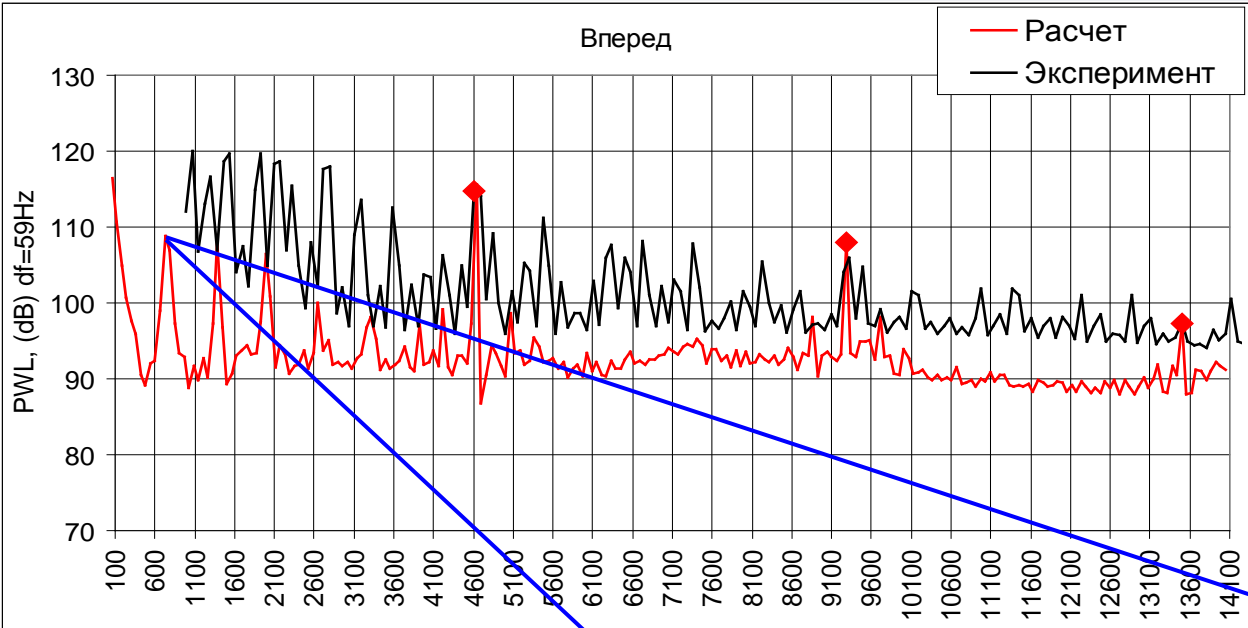
BPF Сетка x350 f1342 r 121



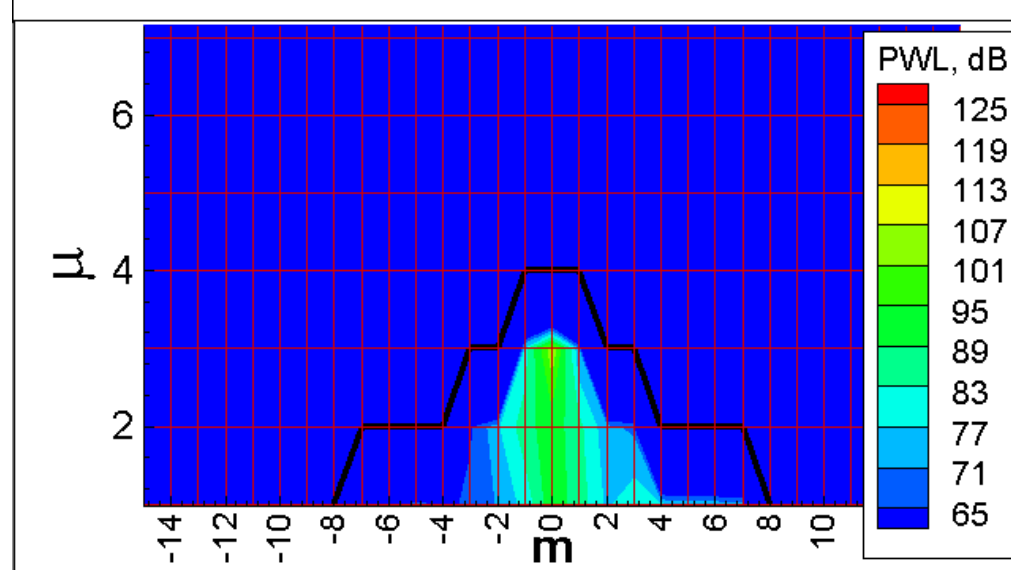
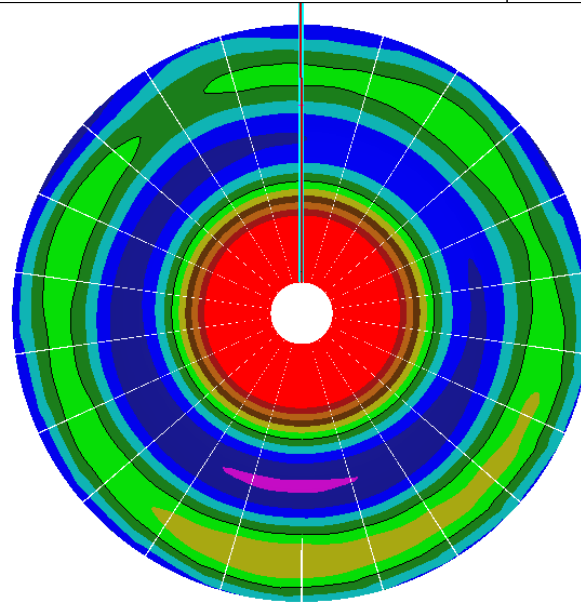
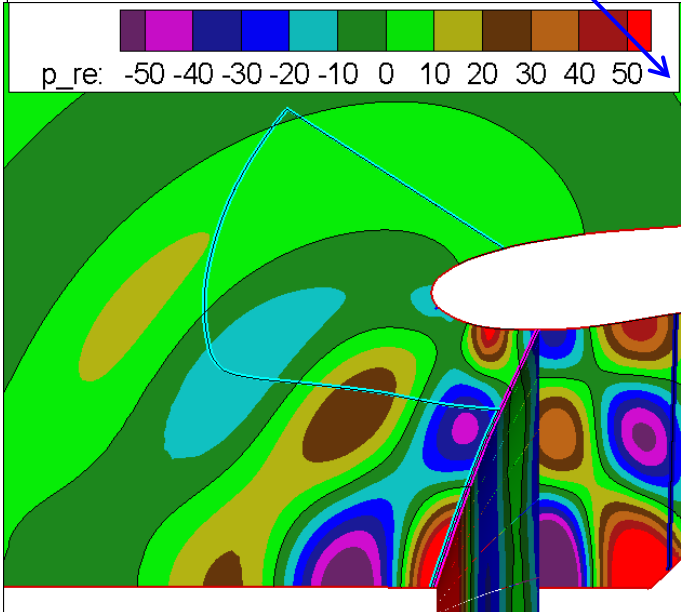
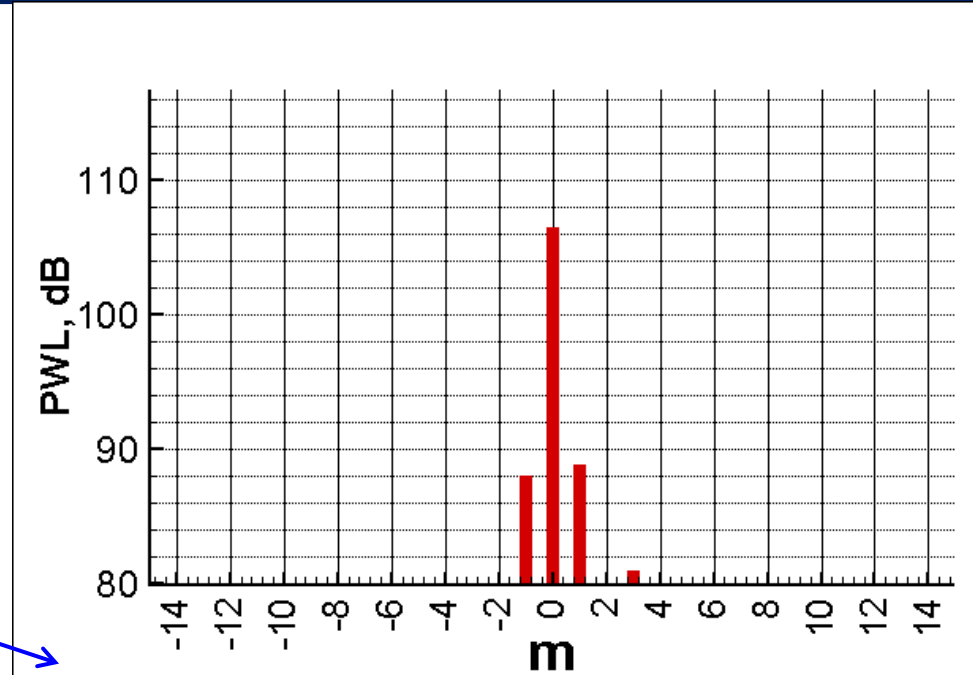
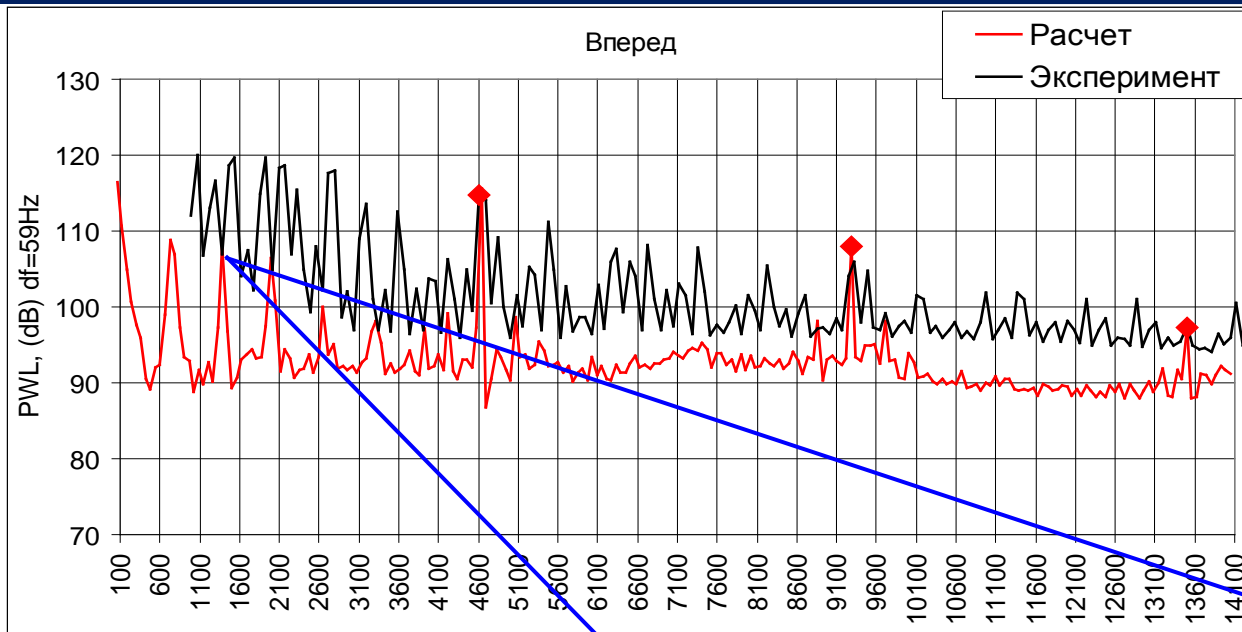
Результаты расчета, излучение их мотогондолы вперед 100% сопоставление с экспериментом



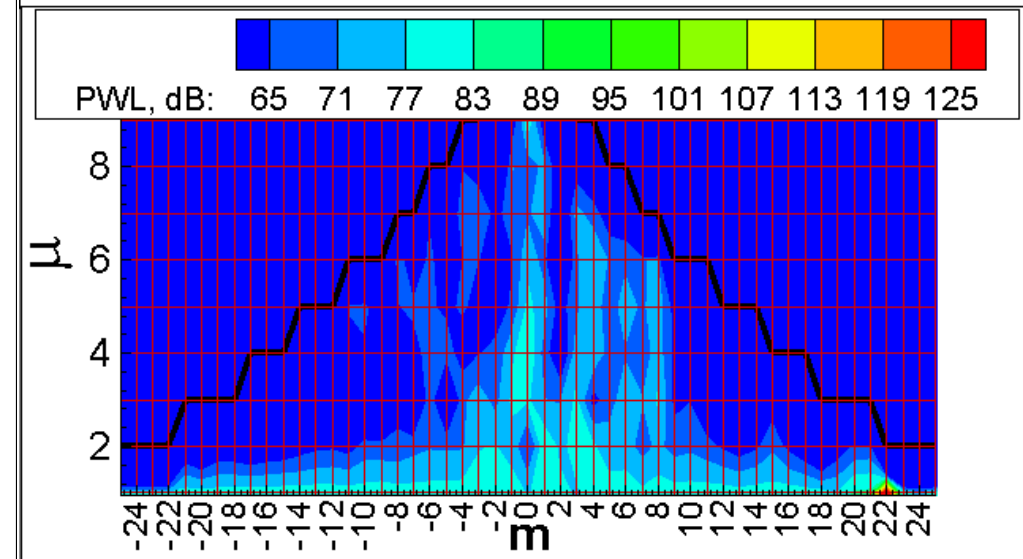
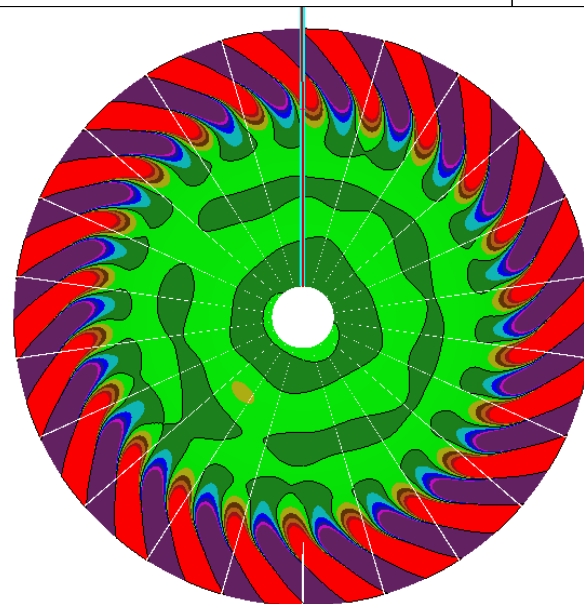
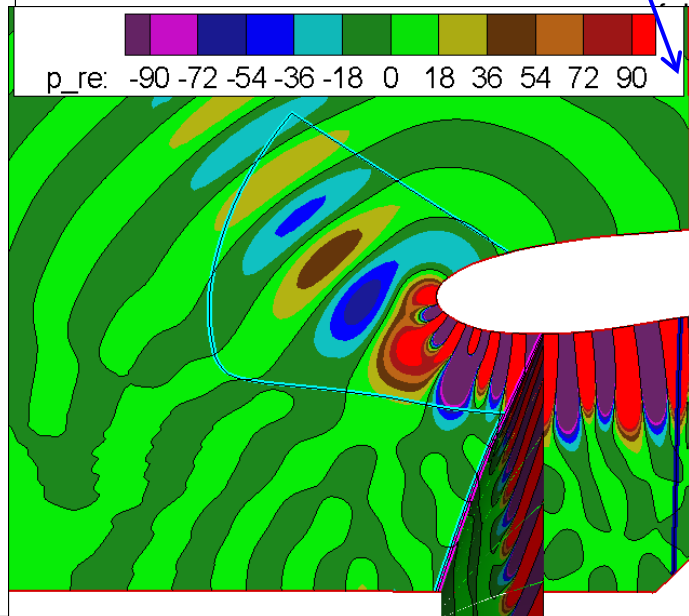
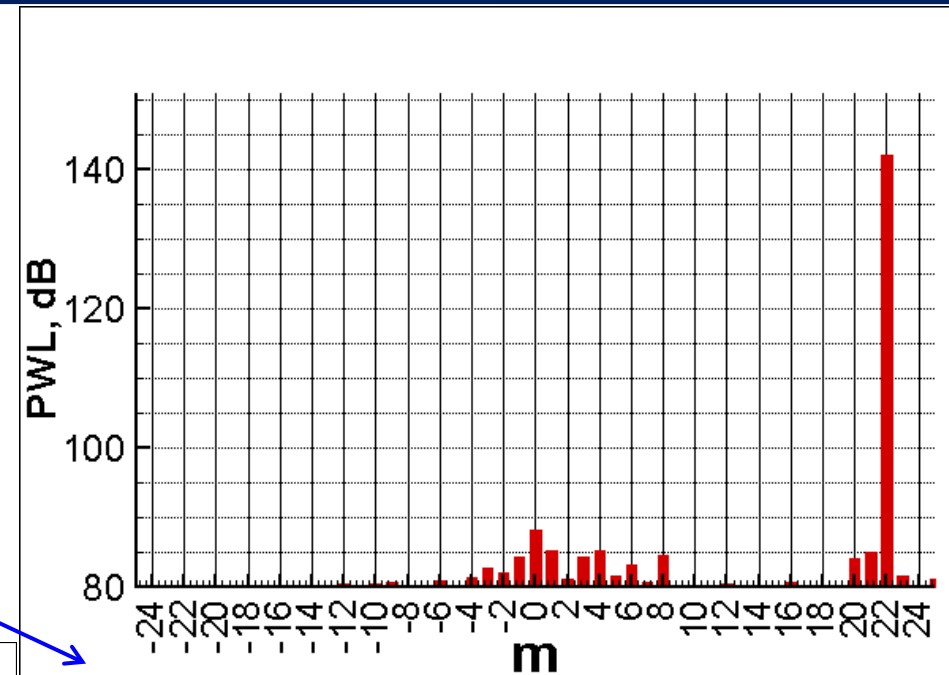
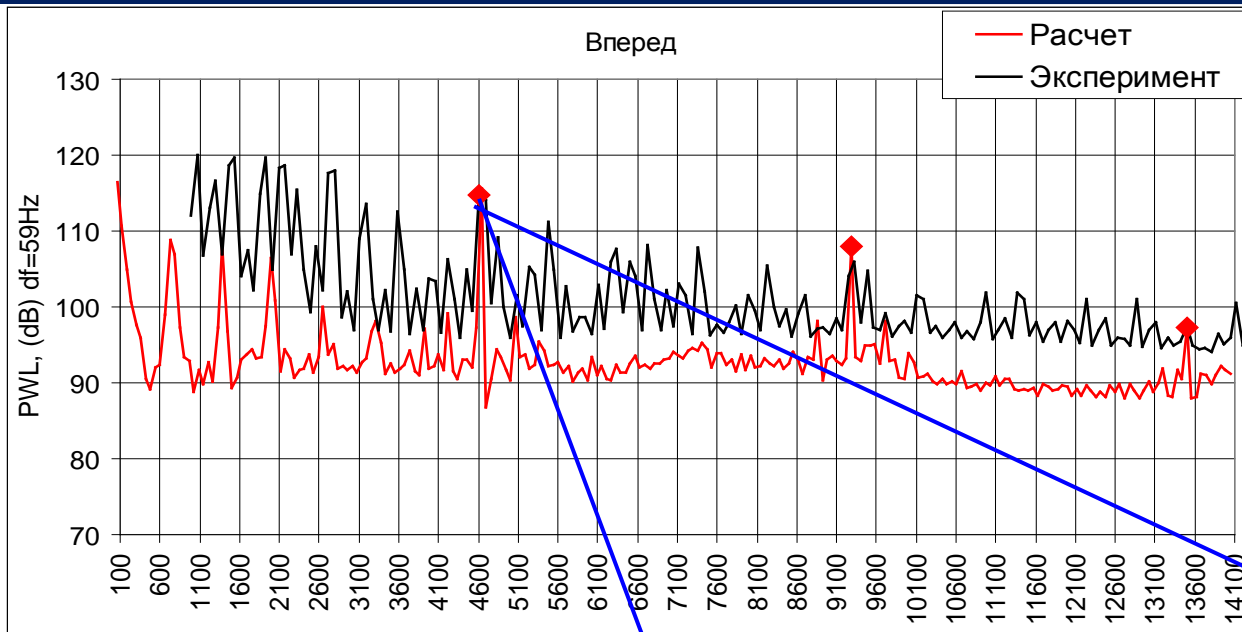
Результаты расчета, излучение их мотогондолы вперед 100% структура 784Hz, 0.169BPF



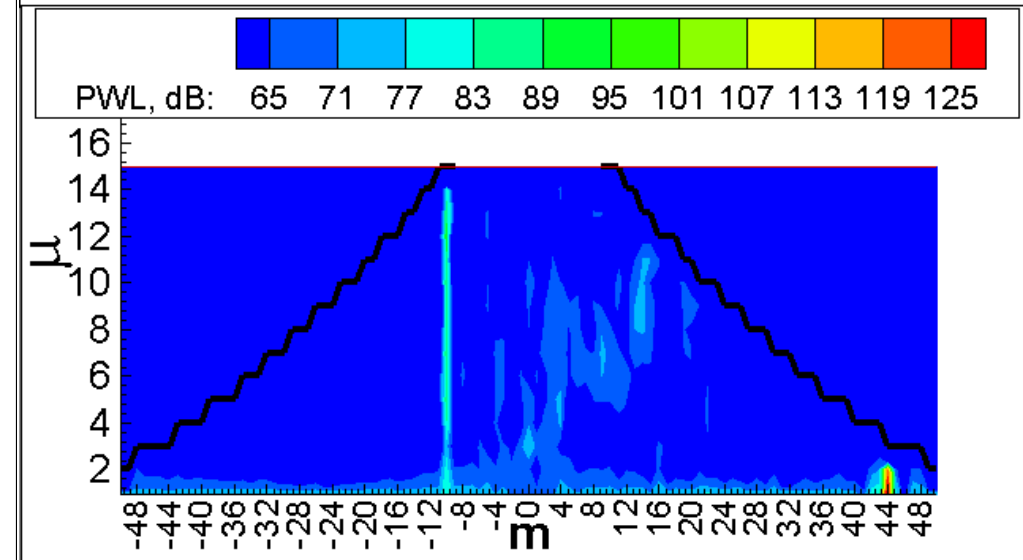
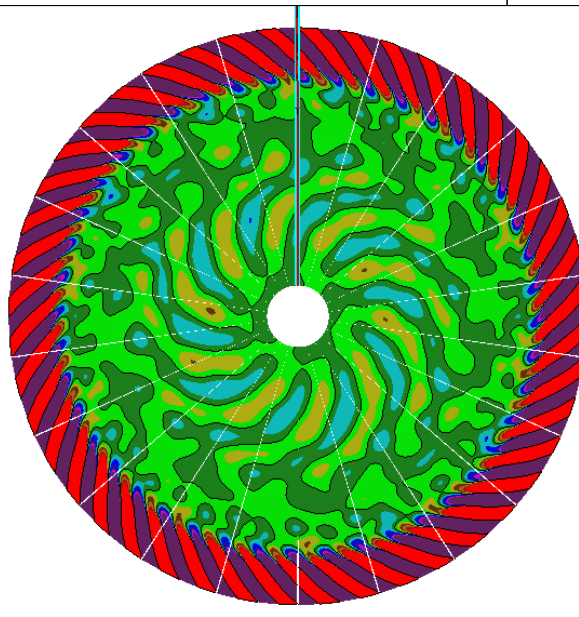
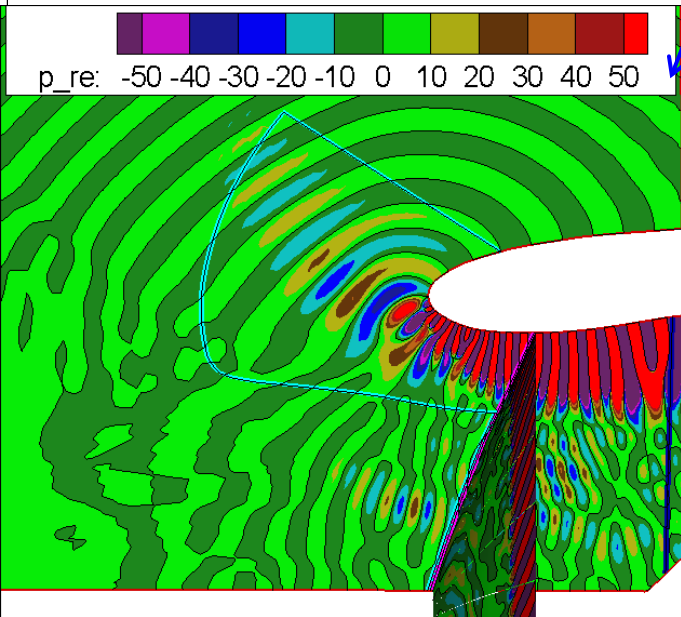
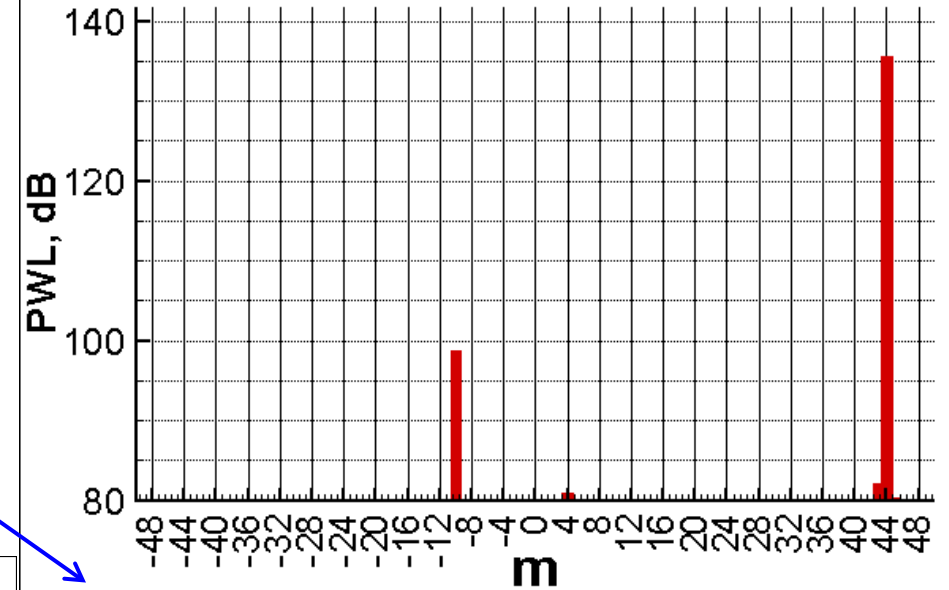
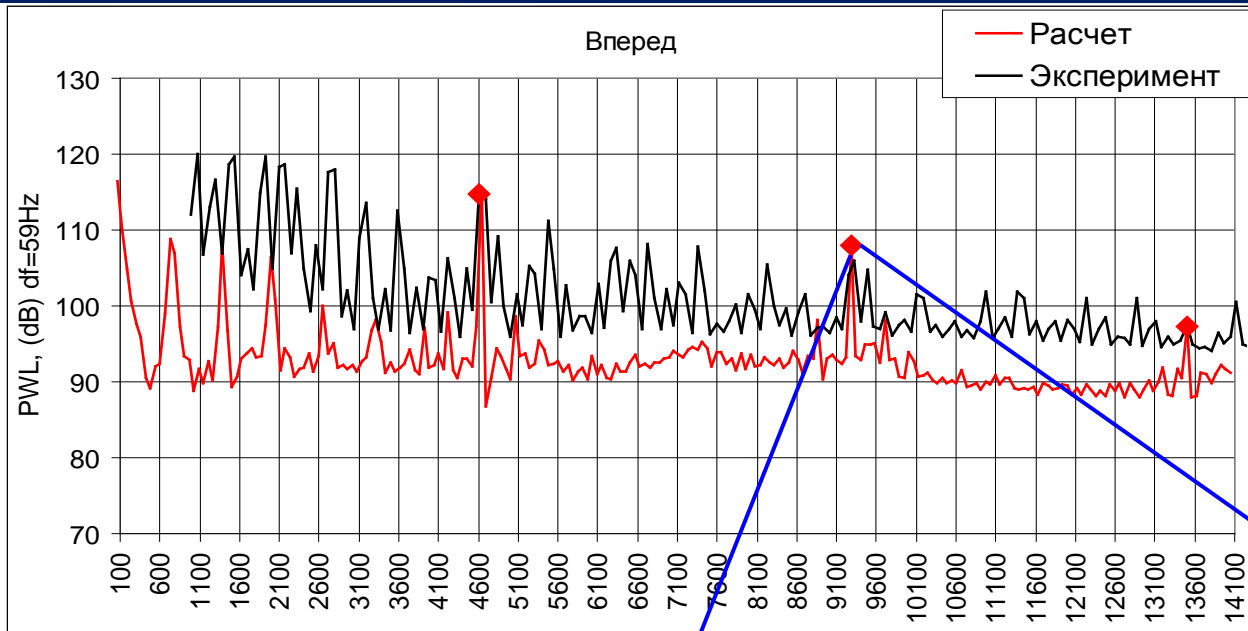
Результаты расчета, излучение их мотогондолы вперед 100% структура 1386Hz, 0.299BPF



Результаты расчета, излучение их мотогондолы вперед 100% структура 4641Hz, 1BPF



Результаты расчета, излучение их мотогондолы вперед 100% структура 9282Hz, 2BPF





Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова

Спасибо за внимание!

111116, Россия, Москва,
ул. Авиамоторная, 2
www.ciam.ru

Тел.: +7 (499) 763 57 47
E-mail: info@ciam.ru