

VIII Российская конференция
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
В АЭРОАКУСТИКЕ И АЭРОДИНАМИКЕ



20—25 сентября 2021 г., ГЕЛЕНДЖИК



КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА ШУМА ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ



Бойчук Игорь Петрович, Гринек Анна Владимировна,

*Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова,
Новороссийск,*

Руднев Юрий Ильич,

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

Решение гидродинамической задачи - вихревой метод

$$\vec{v} = \nabla \varphi, \quad (1)$$

$$\Delta \varphi = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{(\nabla \varphi)^2}{2} \right) + p = \rho \frac{v_\infty^2}{2} + p_0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = v_{n0}(t) \quad (4)$$

$$\vec{v}_{r \rightarrow \infty} = \vec{v}_\infty \quad (5)$$

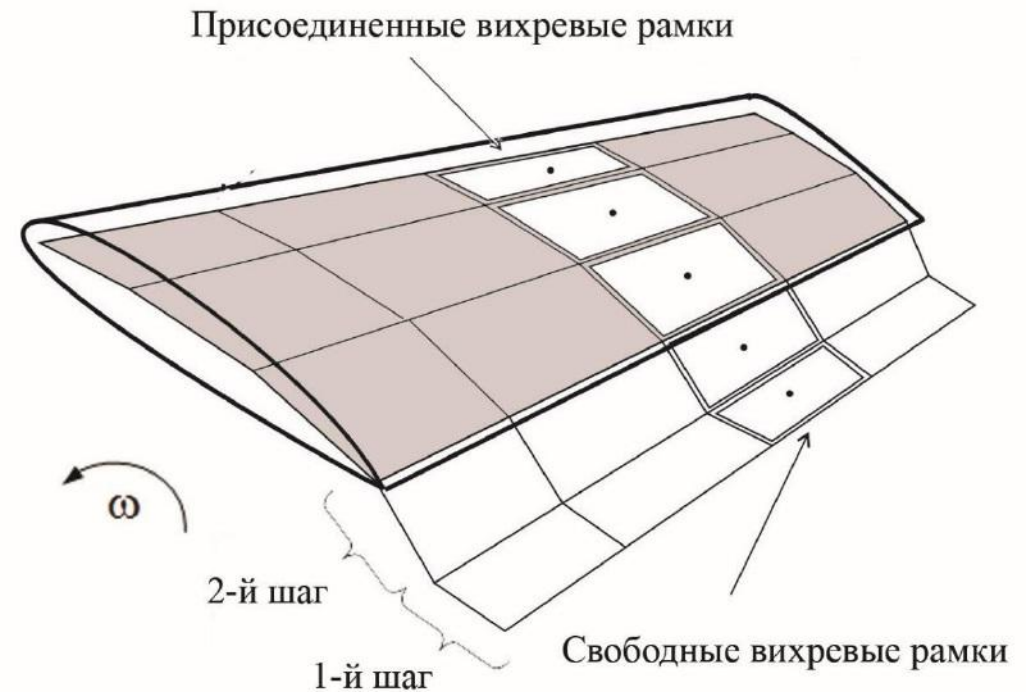
$$p_+ = p_- \quad (6)$$

$$\vec{v} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\vec{r}_0 \times \vec{r}_1}{|\vec{r}_0 \times \vec{r}_1|^2} \left[\frac{\vec{r} \cdot \vec{r}_0}{r_0} - \frac{\vec{r} \cdot \vec{r}_1}{r_1} \right], \quad (\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_0) \quad (7)$$

$$v_{n0i} = \sum_{k=1}^N a_{ik} \Gamma_k + (\vec{v}_\infty, \vec{n}), \quad i = \overline{1, N}. \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^N a_{ik} \Gamma_k = v_{n0i} - (\vec{v}_\infty, \vec{n}) - \sum_{k=1}^N b_{ik} \Gamma_k^*, \quad i = \overline{1, N}, \quad (9)$$

$$F_i = \rho v_i \Gamma_i h_i \quad (10)$$



Решение акустической задачи – явные формулы Фарассата

$$p(\vec{x}) = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\partial\Omega} \left[\frac{\rho_0 v_n c + (\vec{L}, \vec{e}_r)}{cr(1-M_r)} \right]_{ret} dS + \frac{1}{4\pi} \int_{\partial\Omega} \left[\frac{(\vec{L}, \vec{e}_r)}{r^2(1-M_r)} \right]_{ret} dS,$$

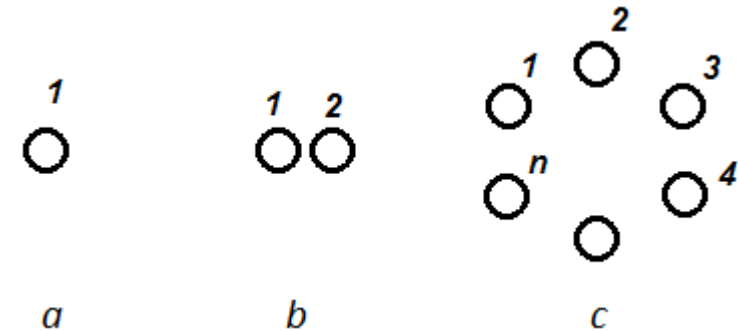
$$\vec{L} = p\vec{n} + \rho_0(v_n - u_n)\vec{v}, \vec{r} = \vec{x} - \vec{y}, \vec{e}_r = \vec{r}/r, M_r = (\vec{u}, \vec{e}_r)/c.$$

Определение шума, генерируемого системой точечных монополей

В качестве тестовых источников шума выбирались системы точечных монополей, каждый из которых создает акустическое поле в соответствии с формулой:

$$p(t,r) = \frac{a}{r} \cos \left(\omega \left(t - t_0 - \frac{r}{c} \right) \right)$$

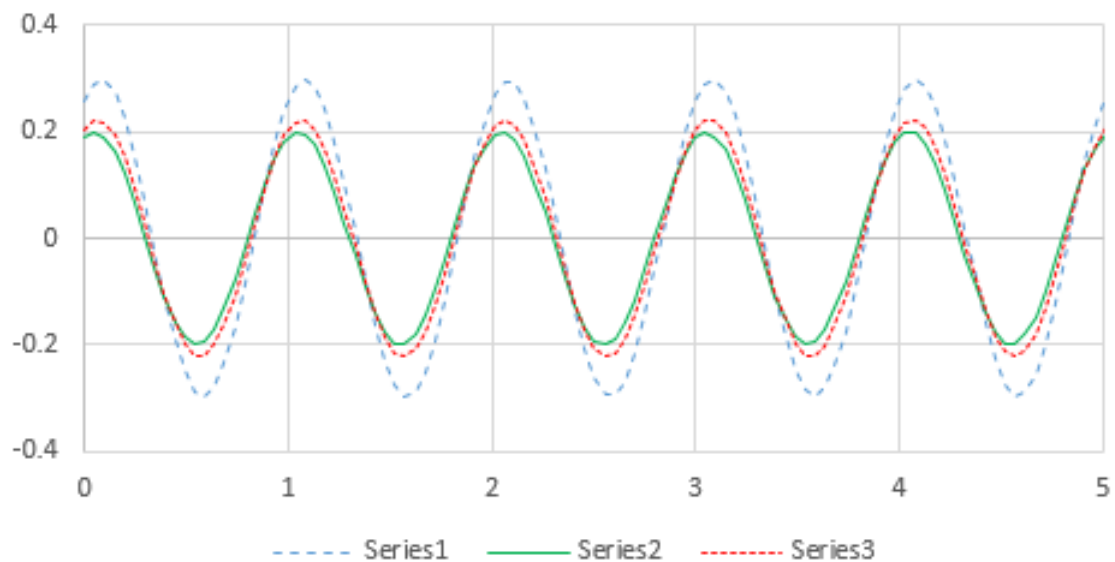
где r – расстояние от монополя до контрольной точки,
 a – амплитудный множитель,
 ω – частота колебаний монополя,
 c – скорость звука.



Конфигурации монополей



Верификация



Звуковые колебания, генерируемые точечным монополем

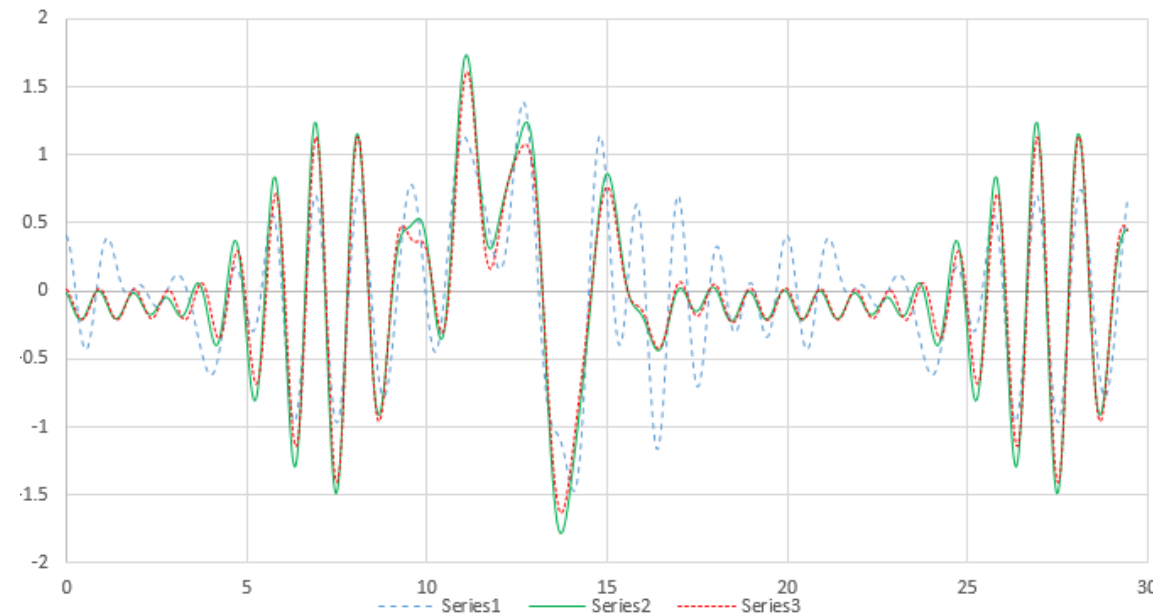
$$a = 1 \text{ Па} \cdot \text{м}$$

$$\omega = 1 \text{ кГц}$$

$$r = 5 \text{ м}$$

Series1 – 10x10

Series3 – 20x20



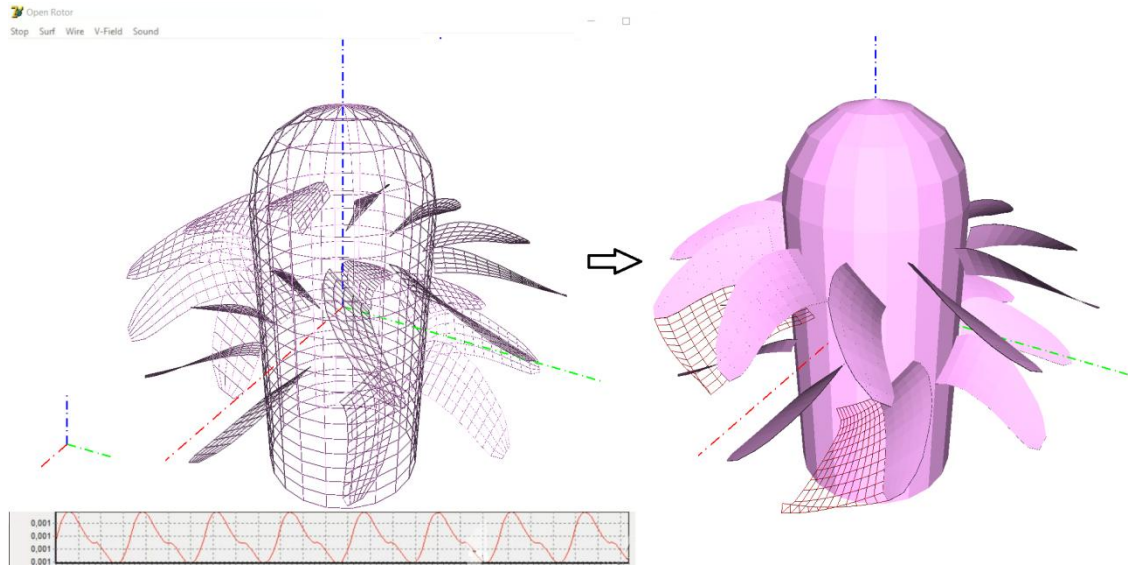
Звуковые колебания, генерируемые системой точечных монополей

$$n = 20$$

$$\omega_k = 2\pi \cdot 50 \cdot k, \text{ с}^{-1}$$

$$a = 1 \text{ Па} \cdot \text{м}$$

Программный комплекс



Внешний вид программного комплекса

Preliminary results.

```
#ATMOSPHERIC CONDITION
Air density(kg/m3)
1.25
Air pressure(Pa)
10100.0
Flow velocity (Vx, Vy, Vz)
0.0 0.0 -100.0
```

```
#GENERAL ROTOR PARAMETERS
Number of rotors (1,2)
2
Gap between rotors
0.3
Hub radius
0.16
```

```
#FRONT ROTOR PARAMETERS
Number of Blades
4
Tip radius
0.55
Rotation direction
CW
Rotational speed (Rev/min)
4500
Number of stations for chord data
8
```

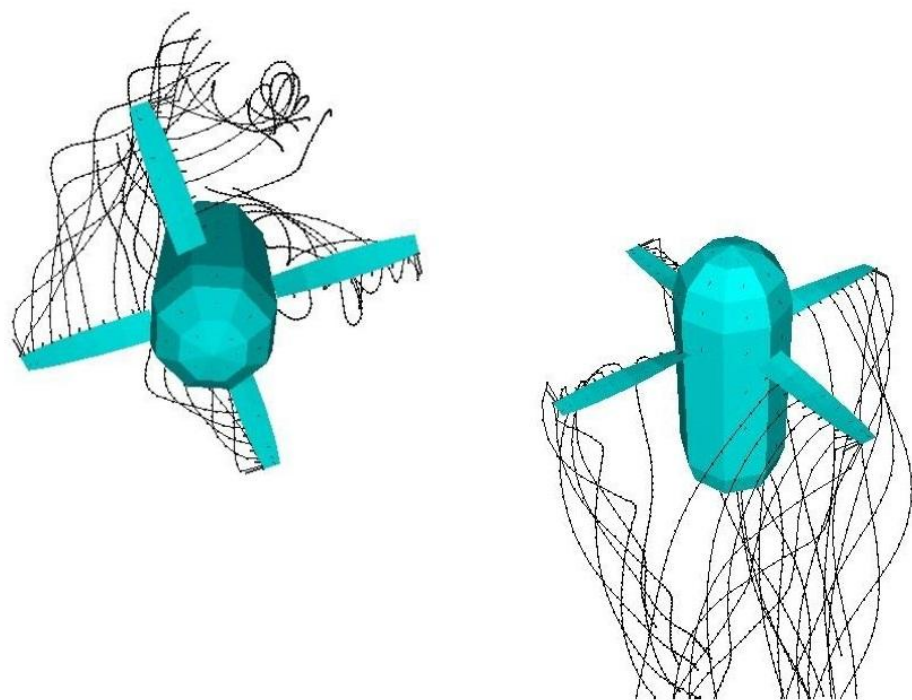
No. :	Station radius(m)	Chord(m)	Blade angle (deg)
1	0.165	0.161	27.5
2	0.248	0.161	18.2
3	0.330	0.161	9.5
4	0.385	0.151	6.2
5	0.440	0.143	3.8
6	0.495	0.121	1.6
7	0.522	0.105	0.5
8	0.526	0.100	0.0

```
#REAR ROTOR PARAMETERS
Number of Blades
4
Tip radius
0.55
Rotation direction
CCW
Rotational speed (Rev/min)
4500
```

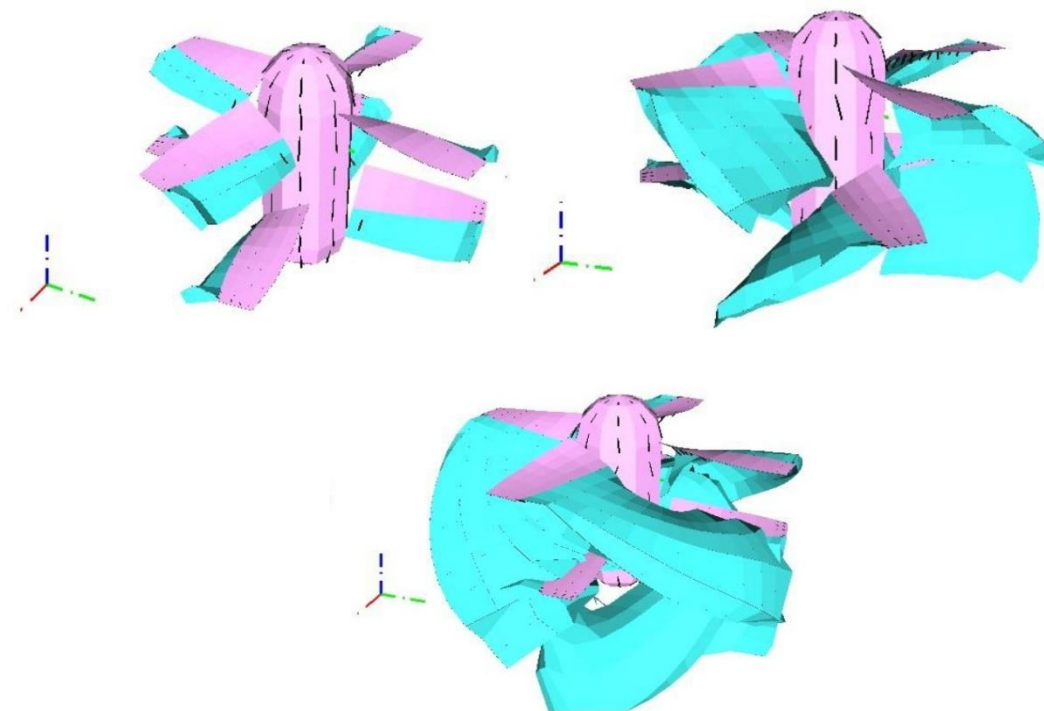
```
number of stations for chord data
8
```

No. :	Station radius(m)	Chord(m)	Blade angle (deg)
1	0.165	0.161	27.5
2	0.248	0.161	18.2
3	0.330	0.161	9.5
4	0.385	0.151	6.2
5	0.440	0.143	3.8
6	0.495	0.121	1.6
7	0.522	0.105	0.5
8	0.526	0.100	0.0

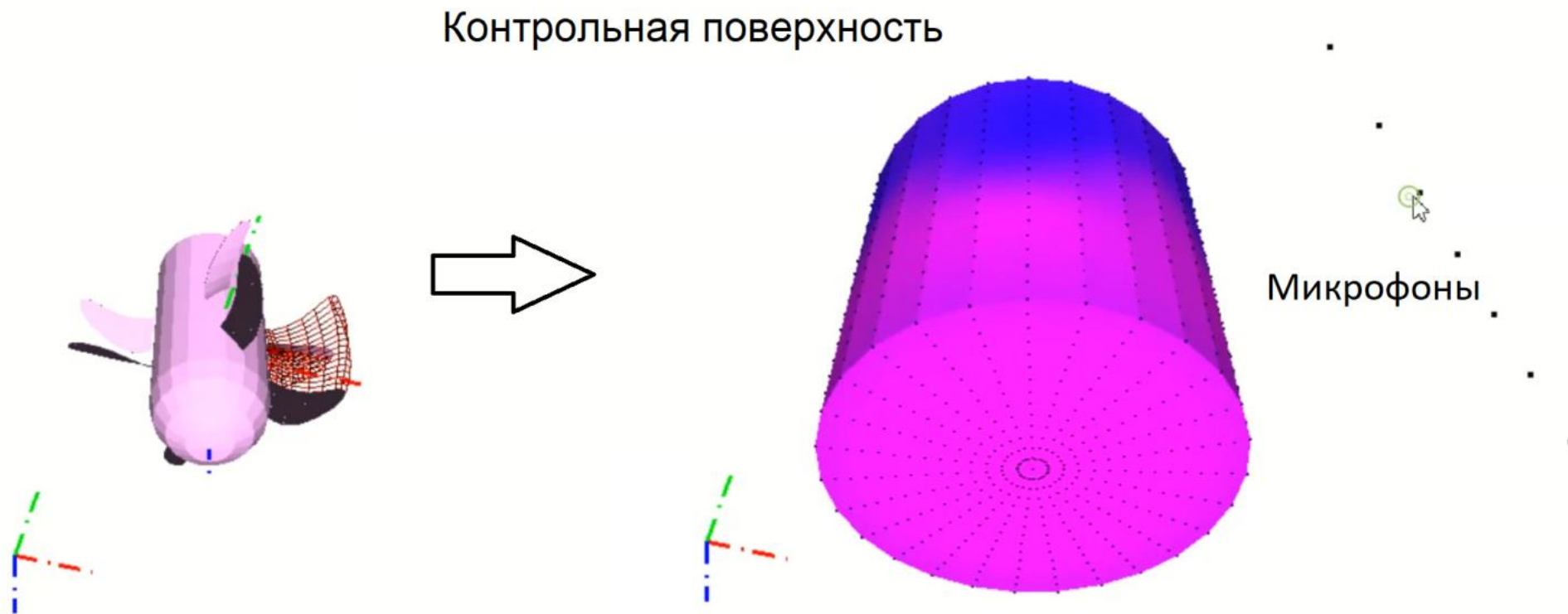
```
#CALCULATION POINTS (along the radius)
Number of point
20
Step (m)
0.05
Distance from rear rotor
0.1
```



Вихревые следы, сходящиеся с лопаток винтов



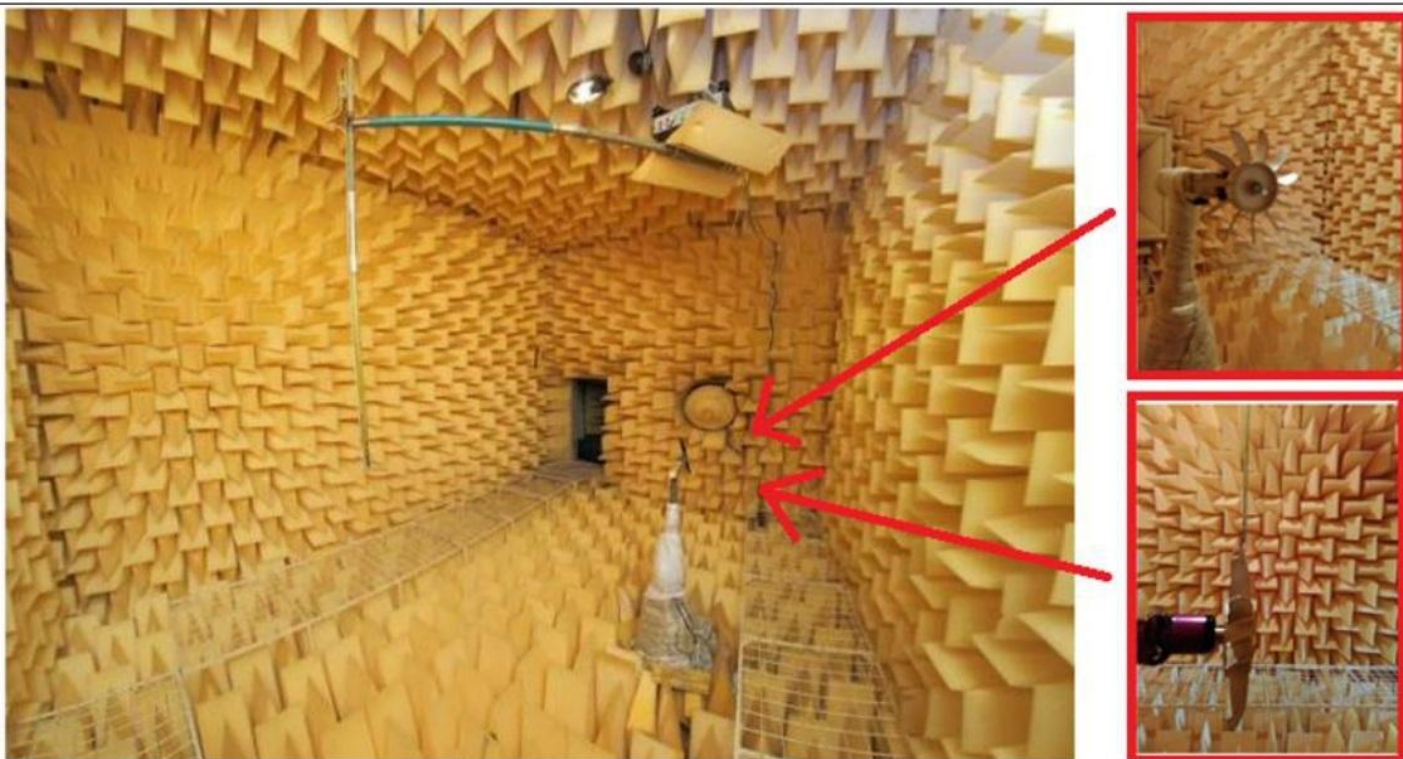
Вихревая пелена



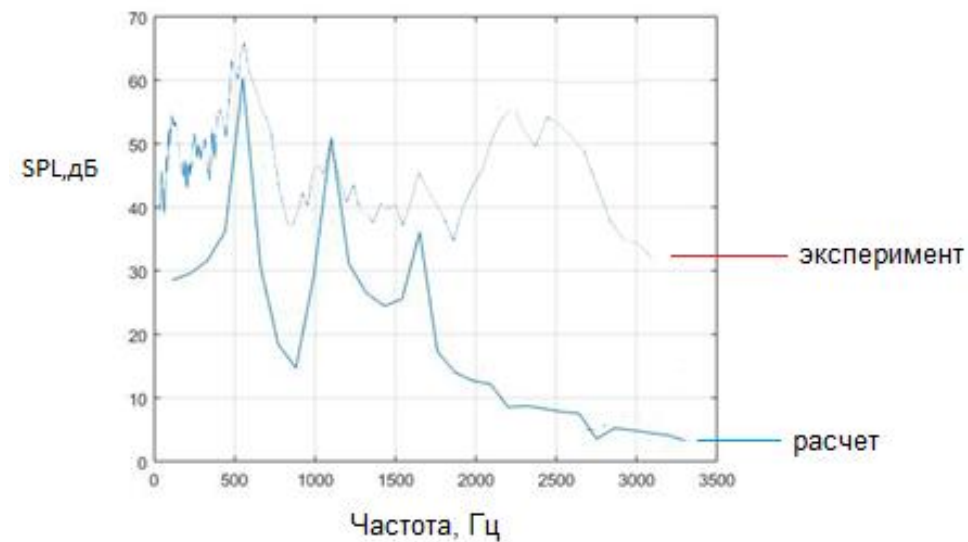
Геометрия расчетной области для вычисления акустики



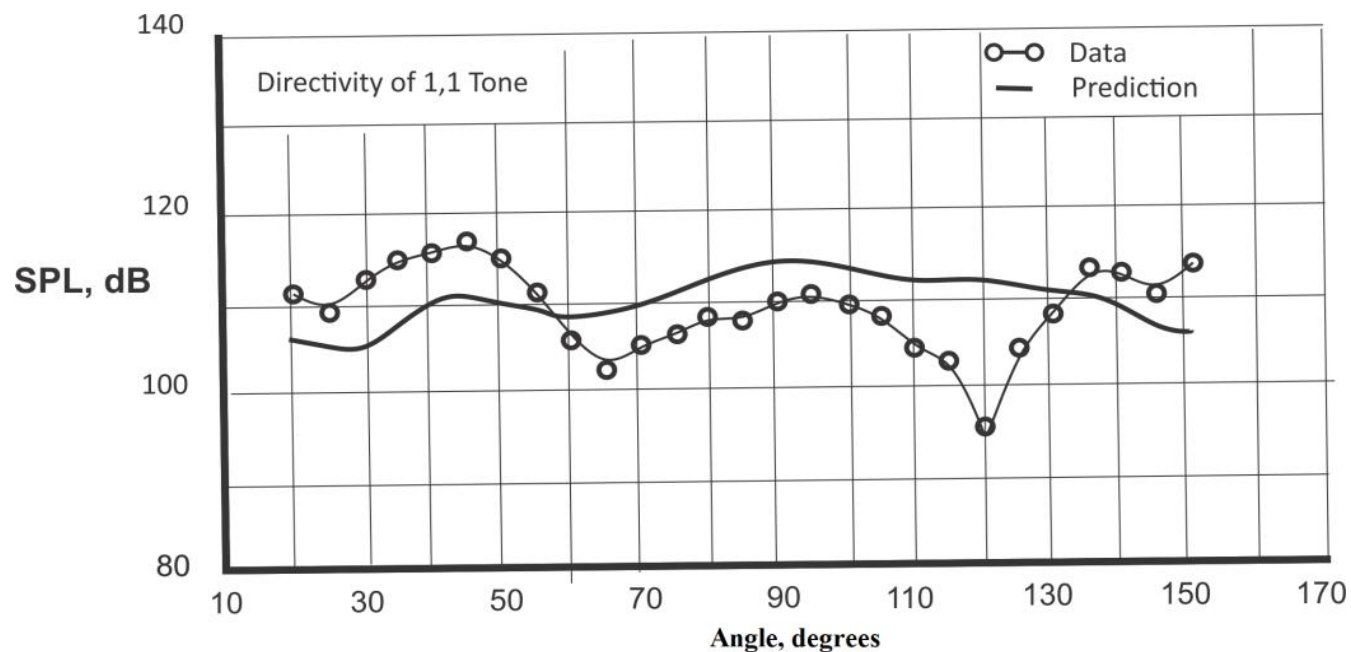
Акустические исследования шума винтов



Шумозаглушенная камера ХАИ



Сравнение с экспериментом, одиночный винт, 11 лопастей



Сравнение с экспериментом для модельных противовращающихся винтов дизайна F7/A7 (11 + 9 лопаток)

Whitfield, C. E., Manl, R., Gllebe, P.R. (1990) High Speed Turboprop Aeroacoustic Study (Counterrotation). Volume I - Model Development. NASA Contractor Report 185241

Выводы

- Представлен подход для расчета шума открытого ротора, сочетающий разумную точность вычислений шума с приемлемой скоростью проведения расчетов.
- Для решения аэродинамической задачи используется вихревой (панельный) метод. Для решения акустической задачи используется метод Фокс Вильямса Хоукинга, в частности – явные формулы Фарассата.
- Данный подход дал возможность применять панельный метод для решения задач аэроакустики.
- Выполнены тестовые расчеты по определению шума, генерируемого системой точечных монополей.
- Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных предсказания шума одиночного винта и открытого ротора.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!