Центральный аэрогидродинамический
институт имени проф. Н.Е. Жуковского

О ВЛИЯНИИ БАЛАНСИРОВКИ НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСУЩЕГО ВИНТА

Б.С. Крицкий, Р.М. Миргазов

Шестая Всероссийская конференция
"Вычислительный эксперимент в аэроакустике"

19 - 24 сентября 2016 года
г. Светлогорск, Калининградской области

Введение

Постановка задачи

Численный метод

Результаты расчетов

Выводы

Виды шума вертолета

К постановке задачи

Уравнение, описывающее генерацию звука в системе координат, связанной с телом (Ffowcs Williams-Hawkings)

$$4\pi p(t) = \rho \frac{\partial}{\partial t} \iint \left[\frac{V_n}{s(1-M_r)} \right] dS + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \iint \left[\frac{\Delta p \vec{n}(\vec{x}-\vec{y})}{s^2(1-M_r)} \right] dS,$$

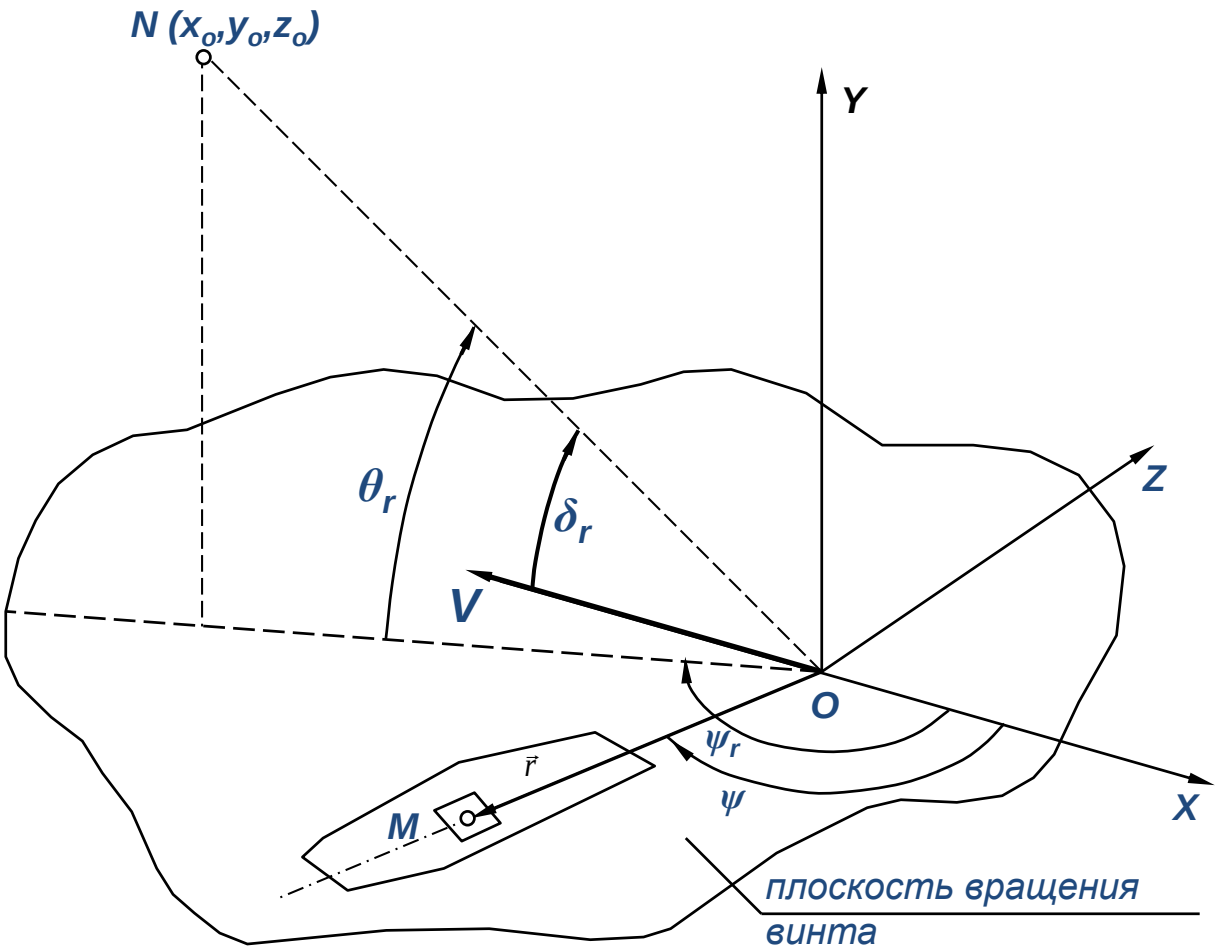
где V_n– нормальная к поверхности скорость; $\vec{x}$ – радиус-вектор точки наблюдения;$\vec{y}$ – радиус-вектор точки излучения; M_r– подсчитанное по направлению вектора число Маха; $\vec{n}$ – нормаль к поверхности; $s^2 = \left|\vec{x}-\vec{y}\right|^2$ $\boldsymbol{dS}$ - элемент поверхности.

Дифференцирование по времени вносится под знак интеграла

$$4\pi p(t) = \frac{1}{c} \iint \left[\frac{\vec{n}(\vec{x}-\vec{y})}{s^2(1-M_r)} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\Delta p}{(1-M_r)} \right] dS$$

К постановке задачи

Применительно к лопасти несущего винта:



(x_0, y_0, z_0) – координаты точки наблюдения,

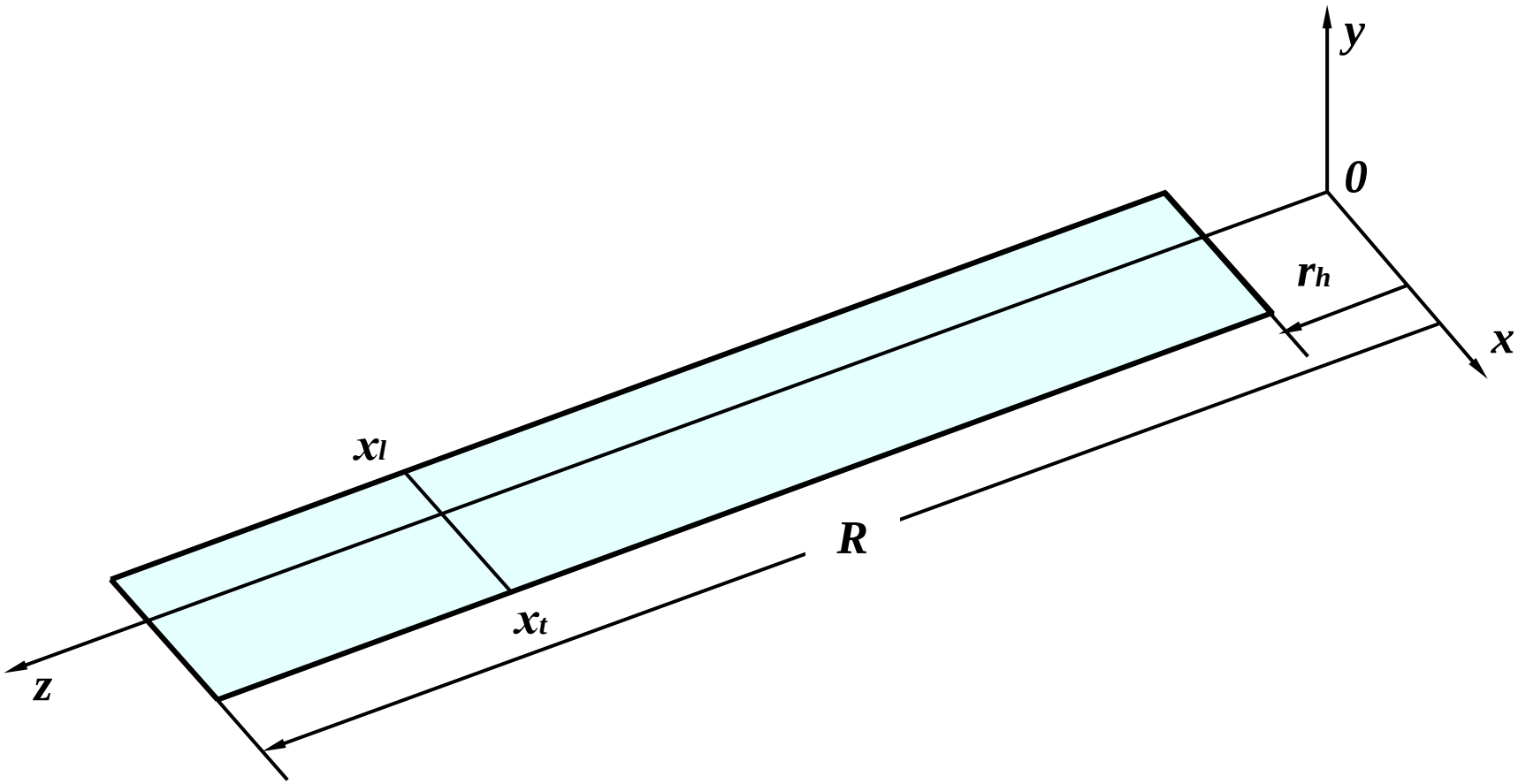
$\psi_r = \mathrm{arctg}(z_0/x_o - M_x)$ – азимут точки наблюдения с учетом запаздывания (в момент t_e);

$\theta_r = \arcsin((y_o + M_z S_o)/S_o)$ – широта точки наблюдения в момент t_e;

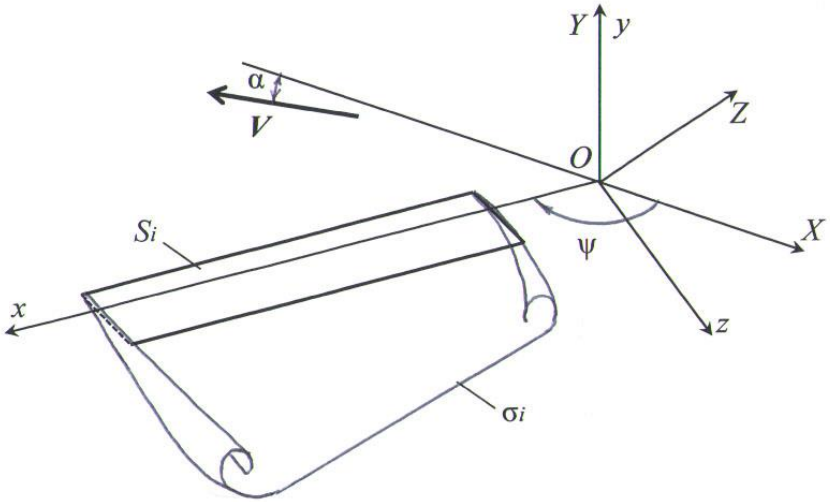
– M_x, M_z – числа Маха, определенные по проекциям скорости на оси *X, Z*; Ω – круговая частота вращения винта.

Преобразование уравнения применительно к лопасти несущего винта

$$p(t)=\frac{\Omega\sin\theta_r}{4\pi c\ s\left(1-M\cos\delta_r\right)^2}\int_{r_h}^{R}\int_{x_l}^{x_t}\left[\frac{1}{\left(1+a\sin\psi\right)}\frac{\partial}{\partial\psi}\frac{\Delta p}{\left(1+a\sin\psi\right)}\right]dxdz$$



Метод расчета нестационарных аэродинамических характеристик винта



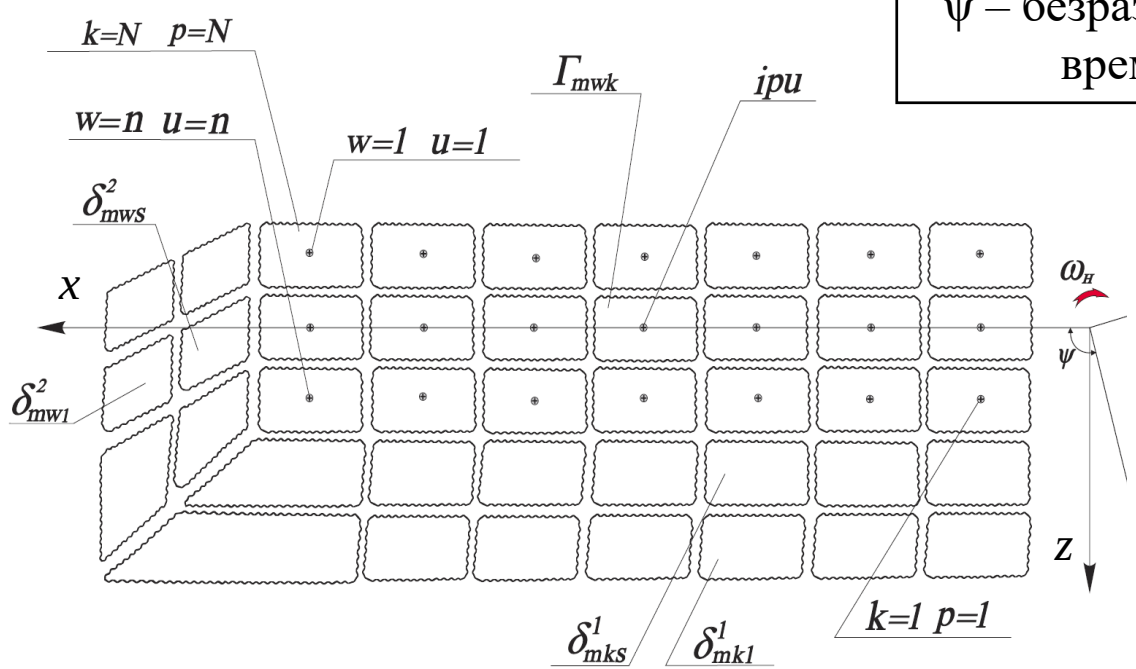
$$(\nabla\Phi - \bar{W}^*)\vec{n} = 0, \quad (x,y,z) \in S_i$$

$$p_- = p_+; \ (\nabla\Phi\vec{n})_- = (\nabla\Phi\vec{n})_+, \ (x,y,z) \in \sigma_i$$

$$\lim_{R\to\infty} \nabla\Phi = 0, \ R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$p_- = p_+; \ (\nabla\Phi\vec{n})_- = (\nabla\Phi\vec{n})_+, \ (x,y,z) \in L_i$$

ψ – безразмерное время



Численная реализация

$$p_i = \sum_{k}^{k_v} \frac{\Omega \sin\theta_r}{4\pi c\ s\left(1 - M\cos\delta_r\right)^2} \sum_{l}^{L} \sum_{p}^{k_p} \left[\frac{(\partial D_{klp} / \partial \psi)_i}{\left(1 + a\sin\psi\right)_{klp}} \right] F_{klp}$$

$$D_{klp} = \frac{\Delta p_{klp}}{\left(1 + a\sin\psi\right)_{klp}},$$

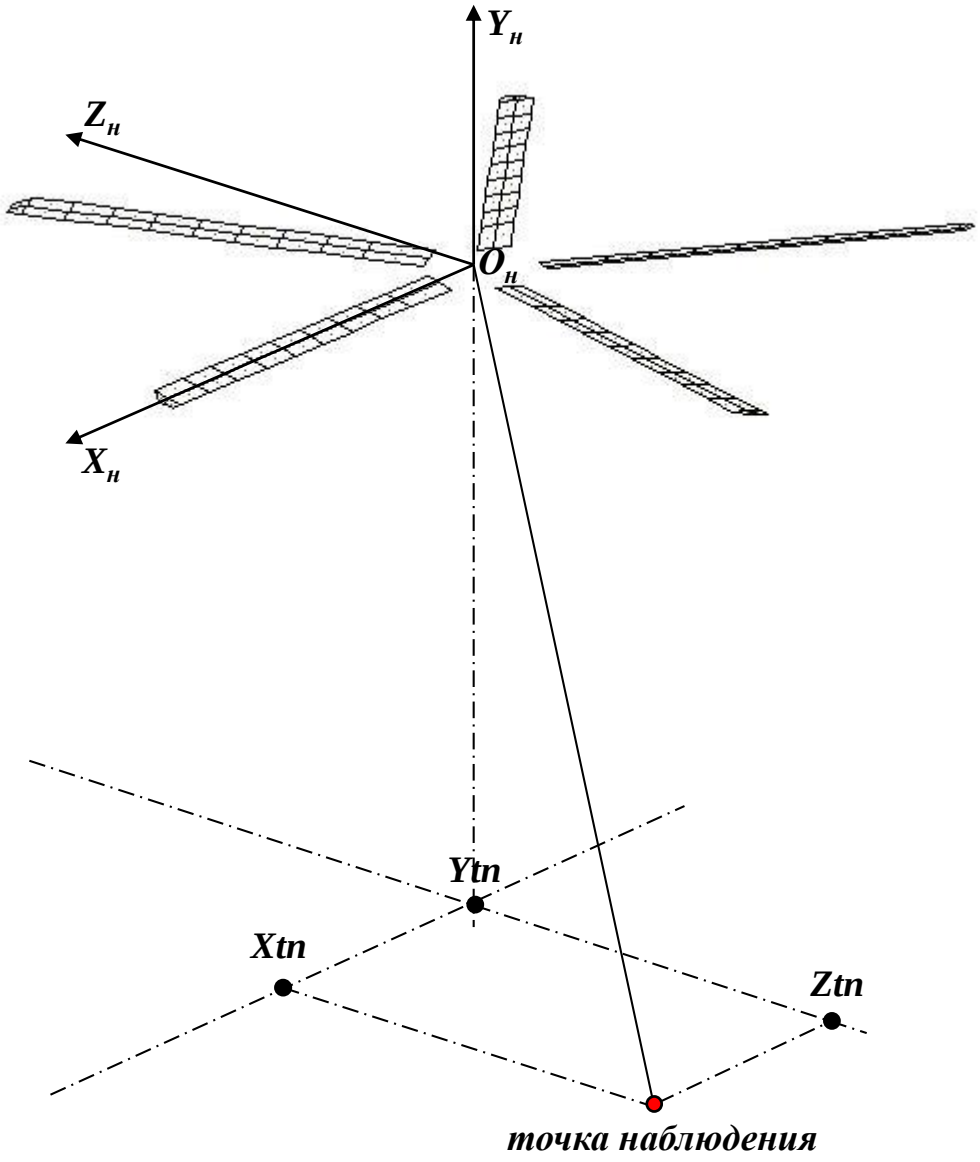
где F_{klp} – площадь панели лопасти, на которой действует перепад давления,

k_v – количество винтов в комбинации,

L – количество лопастей k – го винта,

k_p – количество панелей на лопасти k – го винта.

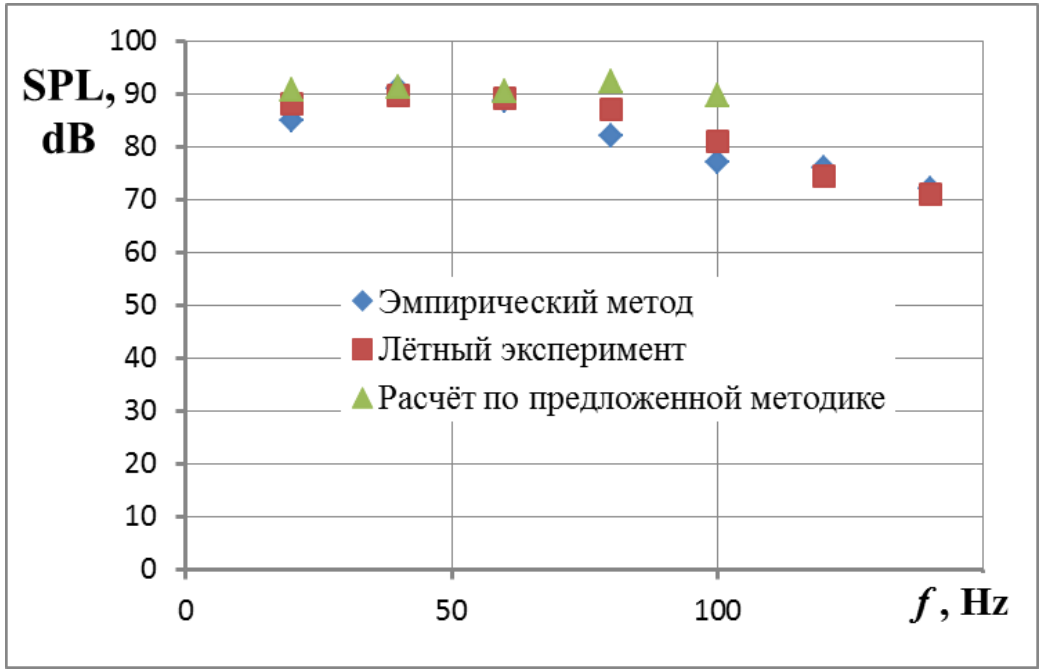
Координаты точки наблюдения



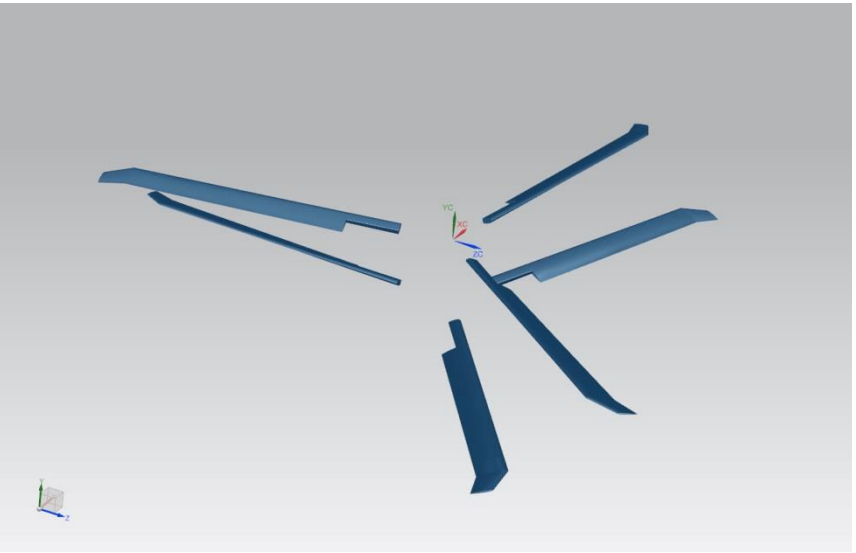
К задаваемым кинематическим параметрам движения несущего винта относятся скорость $V_н$, угол атаки $\alpha_н$, угловая скорость вращения несущего винта $\omega_н$, окружная скорость конца лопасти $\omega_н R$, параметры дискретизации по времени – угол поворота лопасти за один расчетный шаг $\Delta\psi$.

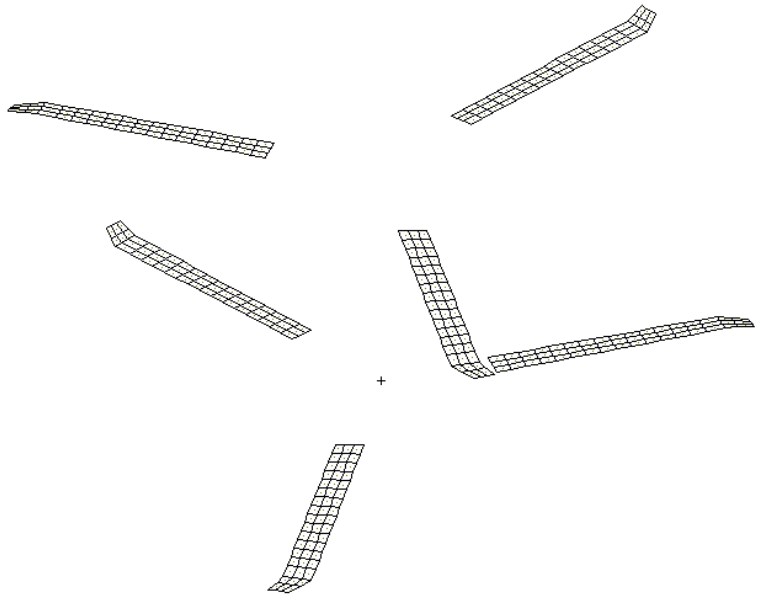
Сопоставление уровней звукового давления

Условия лётного эксперимента:
масса вертолёта 11000 кг,
D=17,3 м; $\omega_н R$=218 м/с; $V_н$=60 м/с,
количество лопастей к=5.
Точка измерения находиться на расстоянии 150 м по направлению полёта и угле возвышения $\theta=60^0$ под диском несущего винта.



Расчёт звукового давления и уровня звукового давления различных соосных винтов





По разработанной методике и программе проведены расчёты звукового давления [Па] и уровня звукового давления SPL [dB], обусловленного нестационарной нагрузкой на лопастях.
Рассмотрены 3 новые компоновки несущих винтов перспективного вертолёта и компоновка серийного вертолёта Ка-27/32.

Для каждой компоновки проводилась балансировка под заданную тягу (12500 кгс) и минимизацией первой синусной и косинусной гармоники махового движения.

Методика балансировки

Делаются предварительные расчёты для четырёх законов управления при двух углах общего шага лопасти φ_0

Получаем два оптимизированных режима для заданных углов φ_0. Далее оптимизируем полученные тяги и соответствующие для них углы общего шага под заданную (требуемую тягу) 12500 кгс.

Получаем управление сбалансированного режима и эти параметры вводим в окончательный расчёт для получения аэродинамических и акустических характеристик исследуемой компоновки.

Рассматриваемые компоновки несущих винтов

Кинематические, геометрические параметры и массовые характеристики исследуемых несущих винтов

	Ка-27/32		Камов		Цаги 600		Цаги 550	
	ВВ	НВ	ВВ	НВ	ВВ	НВ	ВВ	НВ
Радиус несущего винта, м	7.95	7.95	8	8	8	8	8	8
Угол установки лопасти, град	17.6	17.6	16.71	16.71	15.96	15.96	16.6	16.6
Коэффициент управления косинусной составляющей 1-й гармоники, град	2.831	2.831	3.62	3.62	4.41	4.41	4.34	4.34
Коэффициент управления синусной составляющей 1-й гармоники, град	-9.04	-9.04	-8.04	-8.04	-7.69	-7.69	-8.21	-8.21
Начальный азимут первой лопасти несущего винта, град	12.5	-12.5	12.5	-12.5	12.5	-12.5	12.5	-12.5
Угловая скорость несущего винта, рад/с	-27.673	27.673	-27.5	27.5	-27.5	27.5	-27.5	27.5
Кинематические параметры и массовые характеристики выбирались для всех расчётов и лопастей одинаковые								
Скорость звука, м/с	340							
Скорость концов лопастей ωR, м/с	220							
Скорость полёта V, м/с	75							
Угол атаки винта α, град	-10							
Расстояние между винтами h, м	1.48							
Момент инерции лопасти относительно горизонтального шарнира, кГс*м*с^2	167.56							
Статический момент лопасти относительно горизонтального шарнира, кГс*с^2	31.84							
Коэффициент регулятора взмаха винта	0.56							
Расстояние от вала до горизонтального шарнира, м	0.15							
Тяга несущего винта, кг	12500							

Результаты аэродинамических расчётов несущих винтов

Ка-27/32:

C_T	C_H	C_S
0.0208	0.00104	1.49E-05
T, кг	H, кг	S, кг
12483.39	623.65	8.97

Kamov:

C_T	C_H	C_S
0.0206	0.00077	1.86E-05
T, кг	H, кг	S, кг
12491.18	467.33	11.30

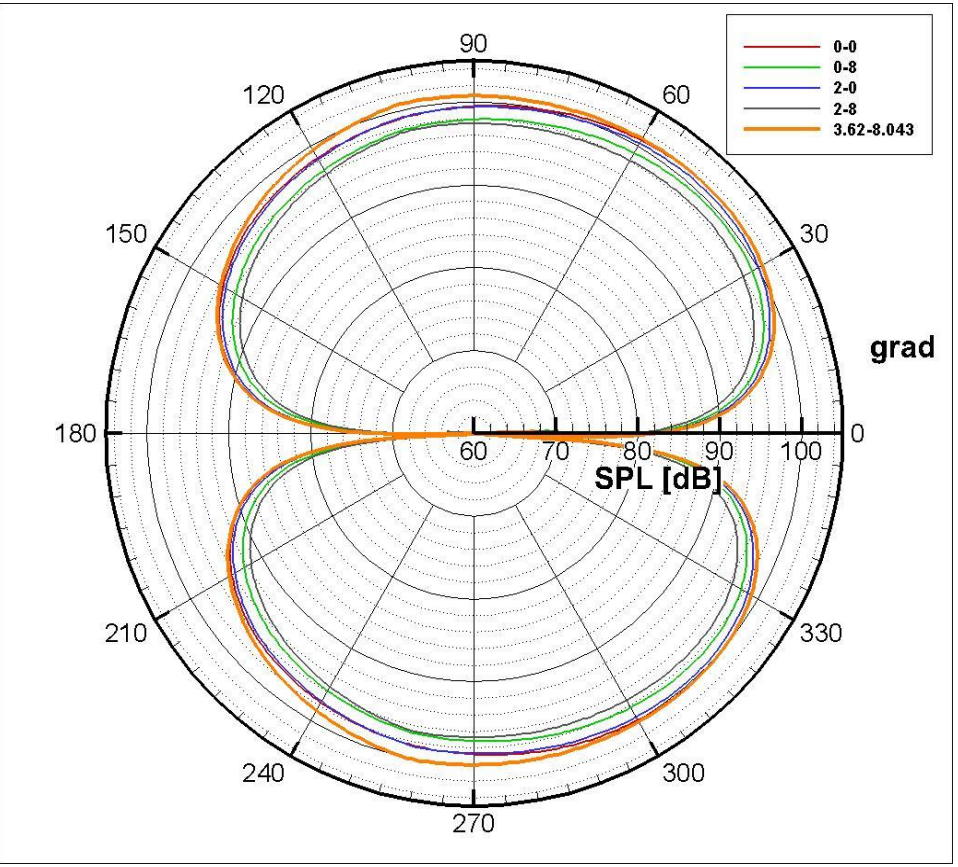
TsAGI 550:

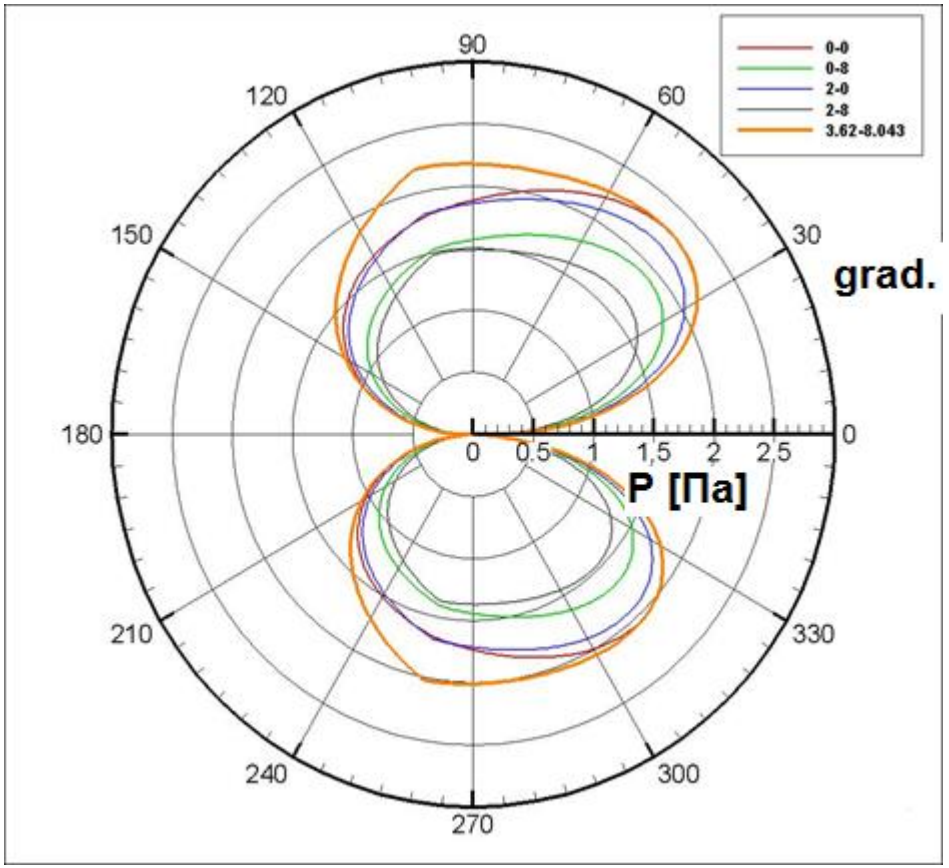
C_T	C_H	C_S
0.0206	0.00051	2.87E-05
T, кг	H, кг	S, кг
12507.17	306.79	17.44

TsAGI 600:

C_T	C_H	C_S
0.0206	0.00043	3.03E-05
T, кг	H, кг	S, кг
12511.48	261.31	18.43

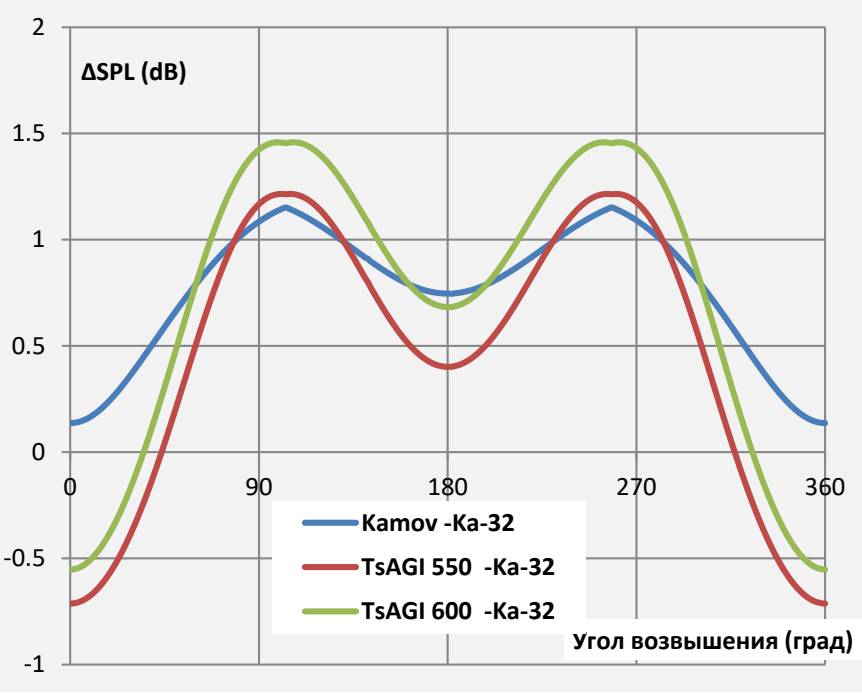
Диаграмма направленности уровня звукового давления и звукового давления в зависимости от закона управления



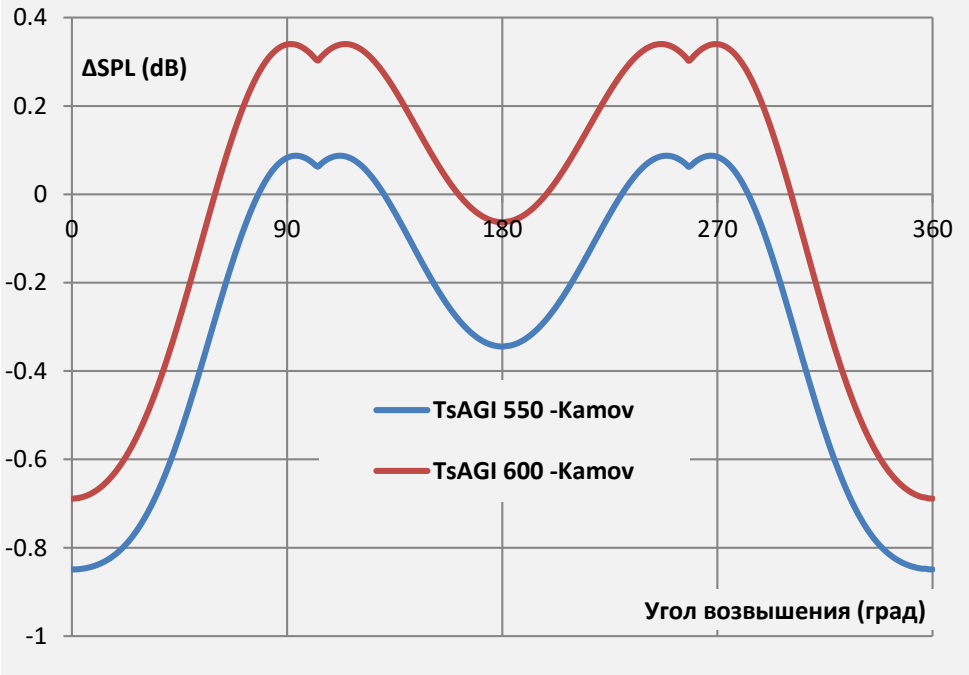


Сравнение уровня звукового давления перспективных несущих винтов в вертикальной плоскости

ΔSPL(dB) перспективных компоновок несущего винта по сравнению с винтом Ка-27/32

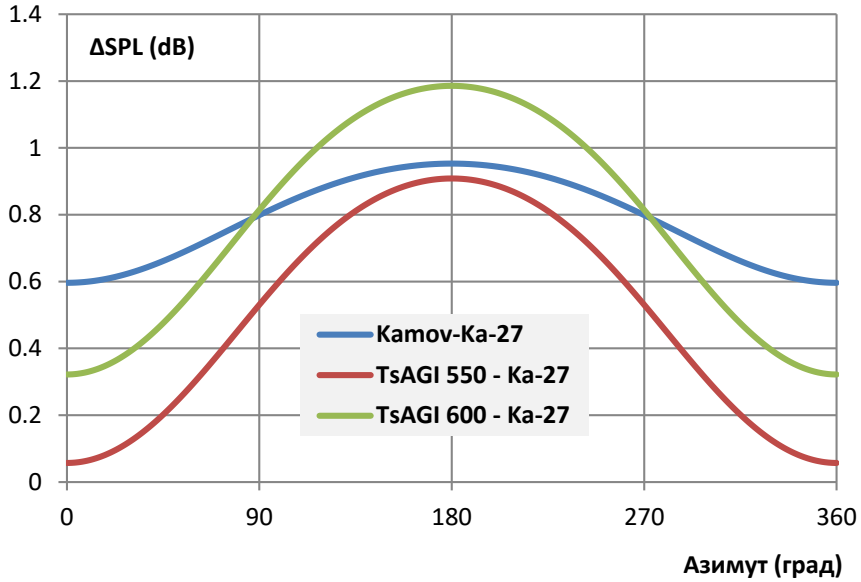


ΔSPL(dB) перспективных компоновок несущих винтов ЦАГИ по сравнению с компоновкой Камов

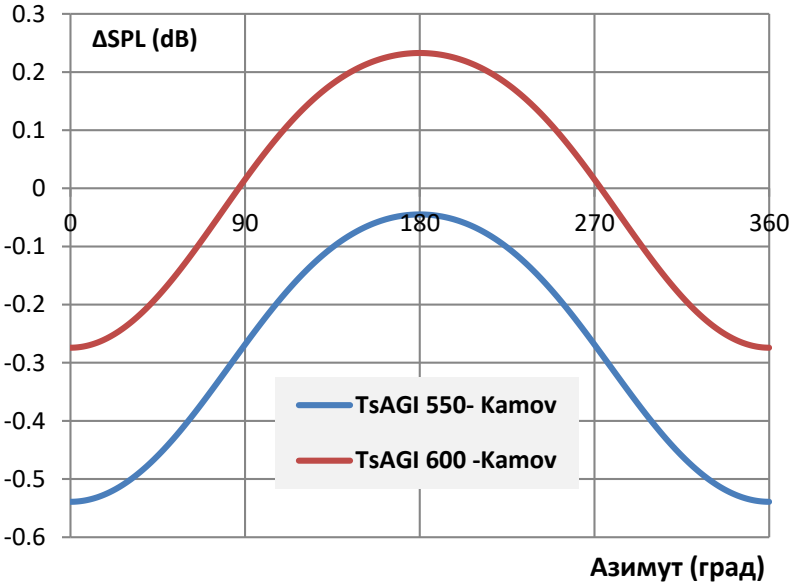


Сравнение уровня звукового давления перспективных несущих винтов в горизонтальной плоскости (Y=-150 м)

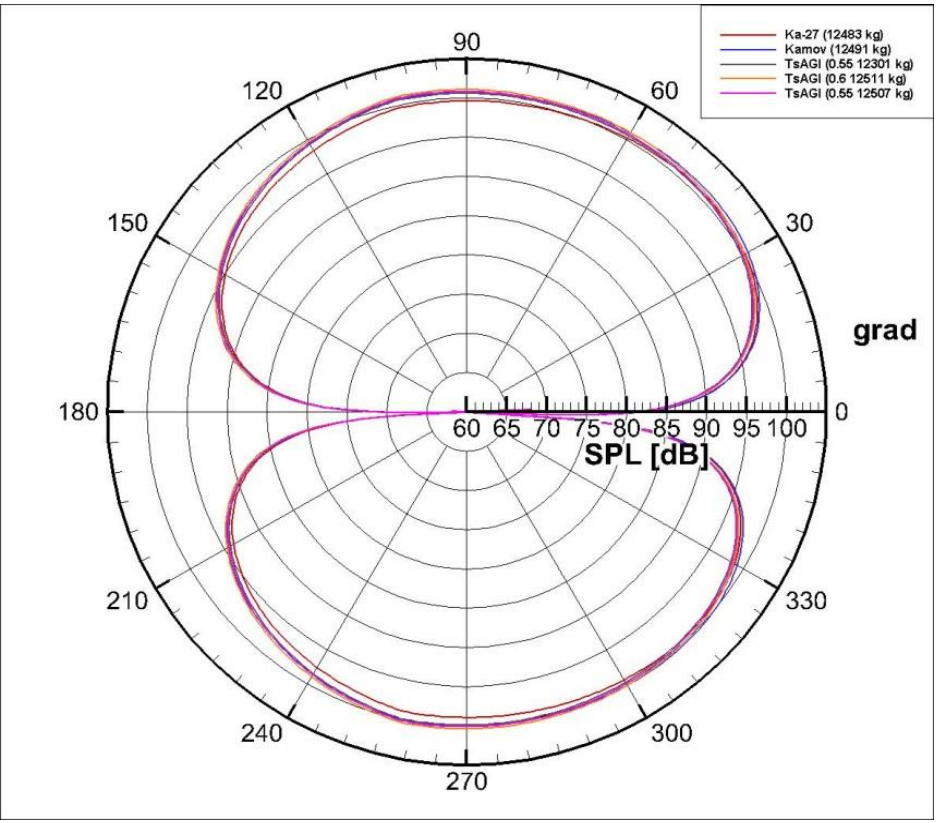
ΔSPL(dB) перспективных компоновок несущего винта по сравнению с винтом Ка-27/32

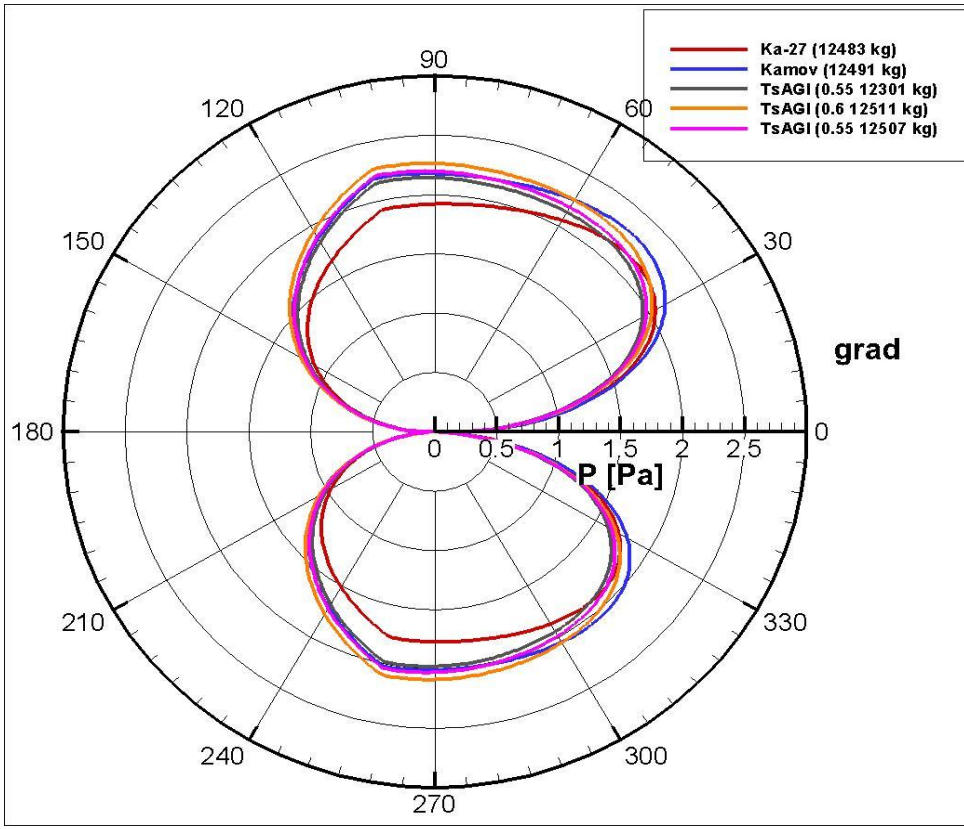


ΔSPL(dB) перспективных компоновок несущих винтов ЦАГИ по сравнению с компоновкой Камов

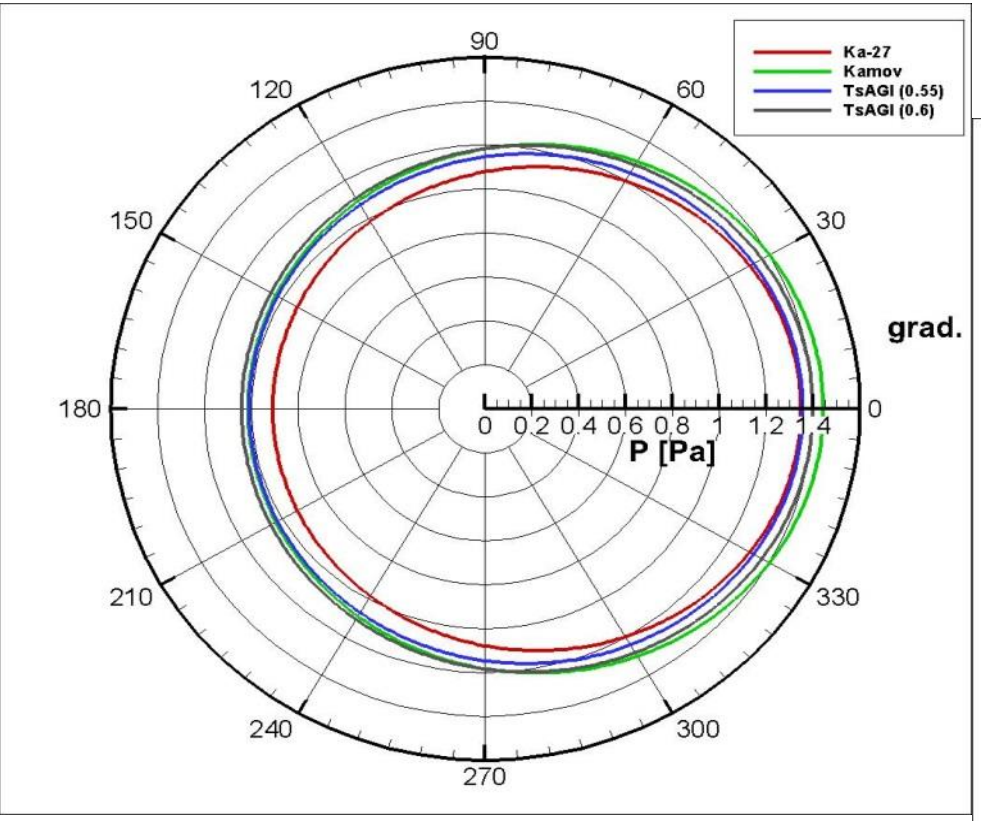


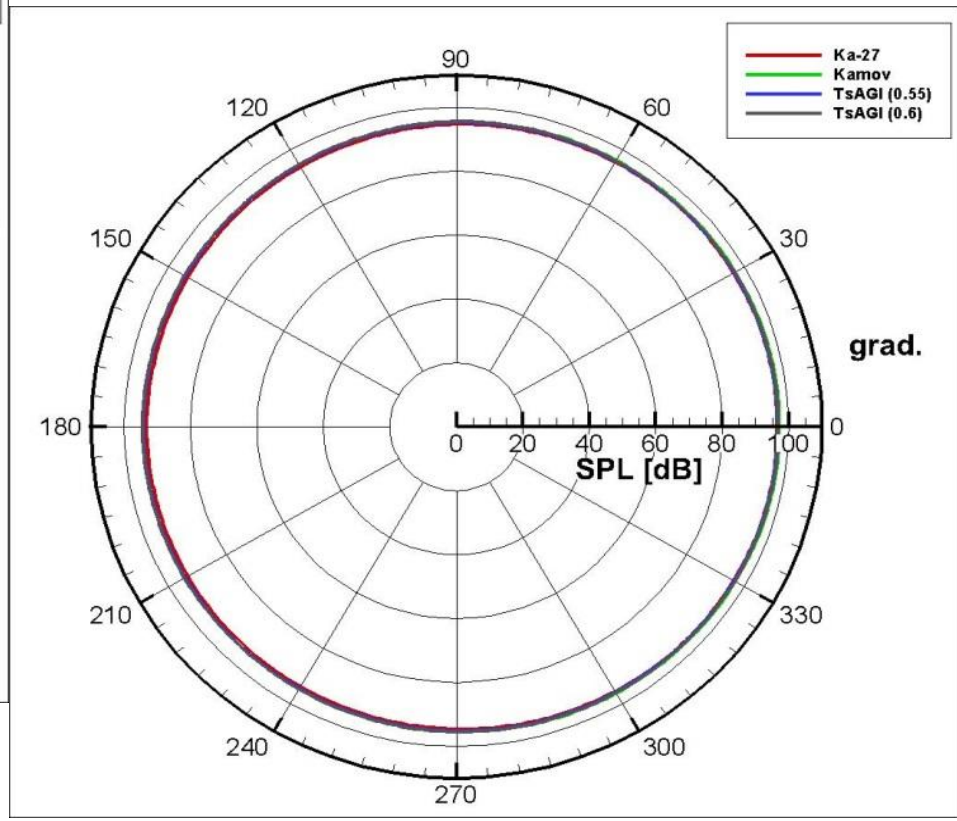
Диаграммы направленности звукового давления и уровня звукового давления исследуемых компоновок несущих винтов в вертикальной плоскости с учётом балансировки





Диаграммы направленности звукового давления P [Па] и уровня звукового давления SPL [dB] исследуемых компоновок несущих винтов в горизонтальной плоскости с учётом балансировки





Сравнение соосной и эквивалентной одновинтовой схемы (T=12500 кгс)

Аэродинамические характеристики одиночного несущего винта с T=*const*

Ка-27/32:

	T	H	S	MK
R, м	7.95	7.95	7.95	7.95
Fi0, град	14	14	14	14
g, м/с^2	9.81	9.81	9.81	9.81
S, м^2	198.5565	198.5565	198.5565	198.5565
rO, кг/м^3	1.225	1.225	1.225	1.225
wR, м/с	220	220	220	220
Ct=	0.020776	0.001126	-0.00087	0.004046
QR, кг/м^2	29645	29646	29647	29648
T, кг	12465.99	675.4606	-519.188	2427.829

Kamov:

	T	H	S	MK
R, м	8	8	8	8
Fi0, град	14	14	14	14
g, м/с^2	9.81	9.81	9.81	9.81
S, м^2	201.0619	201.0619	201.0619	201.0619
rO, кг/м^3	1.225	1.225	1.225	1.225
wR, м/с	220	220	220	220
Ct=	0.020572	0.000884	-0.00116	0.003484
QR, кг/м^2	29645	29646	29647	29648
T, кг	12499.28	536.9869	-705.456	2117.326

TsAGI 550:

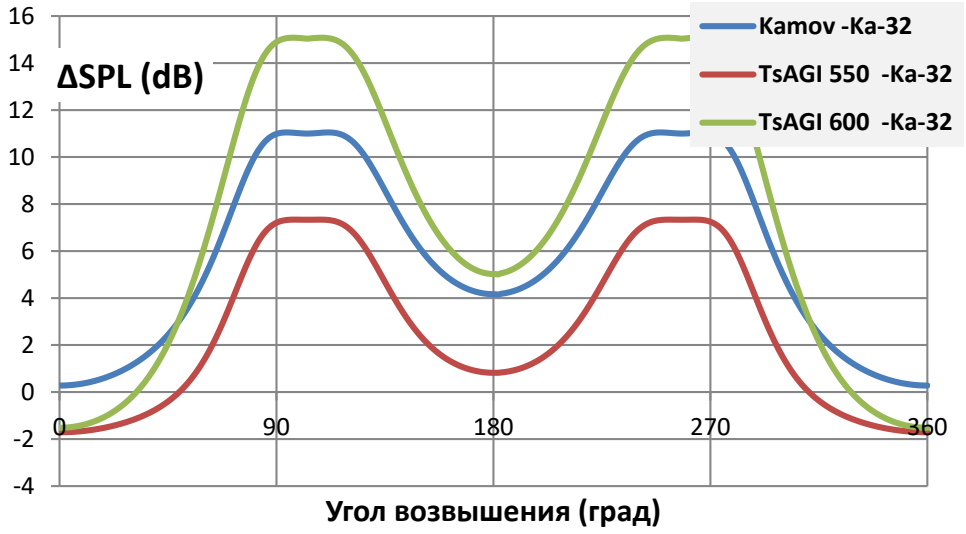
	T	H	S	MK
R, м	8	8	8	8
Fi0, град	17.07595	17.07595	17.07595	17.07595
g, м/с^2	9.81	9.81	9.81	9.81
S, м^2	201.0619	201.0619	201.0619	201.0619
rO, кг/м^3	1.225	1.225	1.225	1.225
wR, м/с	220	220	220	220
Ct=	0.020576	0.000716	-0.00131	0.00351
QR, кг/м^2	29645	29646	29647	29648
T, кг	12501.56	435.04	-794.625	2132.955

TsAGI 600:

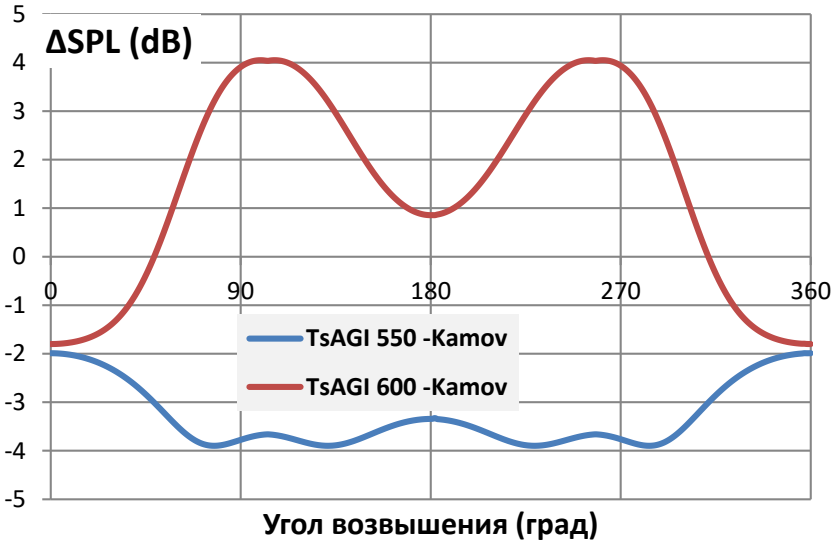
	T	H	S	MK
R, м	8	8	8	8
Fi0, град	16.33369	16.33369	16.33369	16.33369
g, м/с^2	9.81	9.81	9.81	9.81
S, м^2	201.0619	201.0619	201.0619	201.0619
rO, кг/м^3	1.225	1.225	1.225	1.225
wR, м/с	220	220	220	220
Ct=	0.020612	0.000639	-0.00137	0.003343
QR, кг/м^2	29645	29646	29647	29648
T, кг	12523.43	388.4103	-829.644	2031.47

Сравнение уровня звукового давления перспективных несущих винтов в вертикальной плоскости

ΔSPL(dB) перспективных компоновок несущего винта по сравнению с винтом Ка-27/32

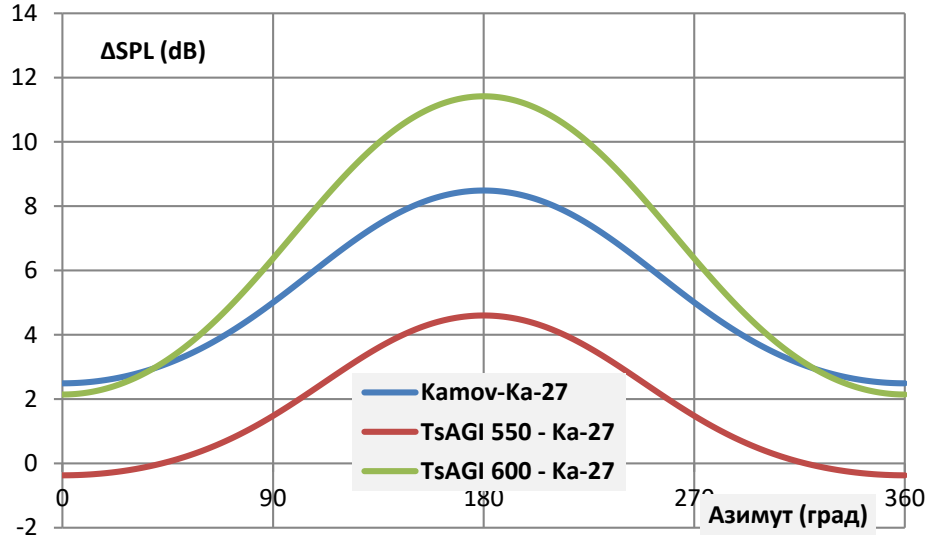


ΔSPL(dB) перспективных компоновок несущих винтов ЦАГИ по сравнению с компоновкой Камов

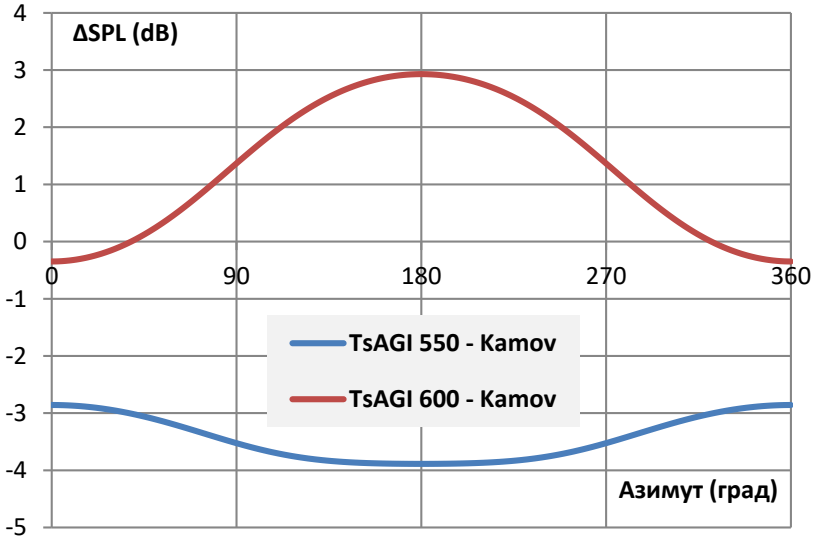


Сравнение уровня звукового давления перспективных несущих винтов в горизонтальной плоскости (Y=-150 м)

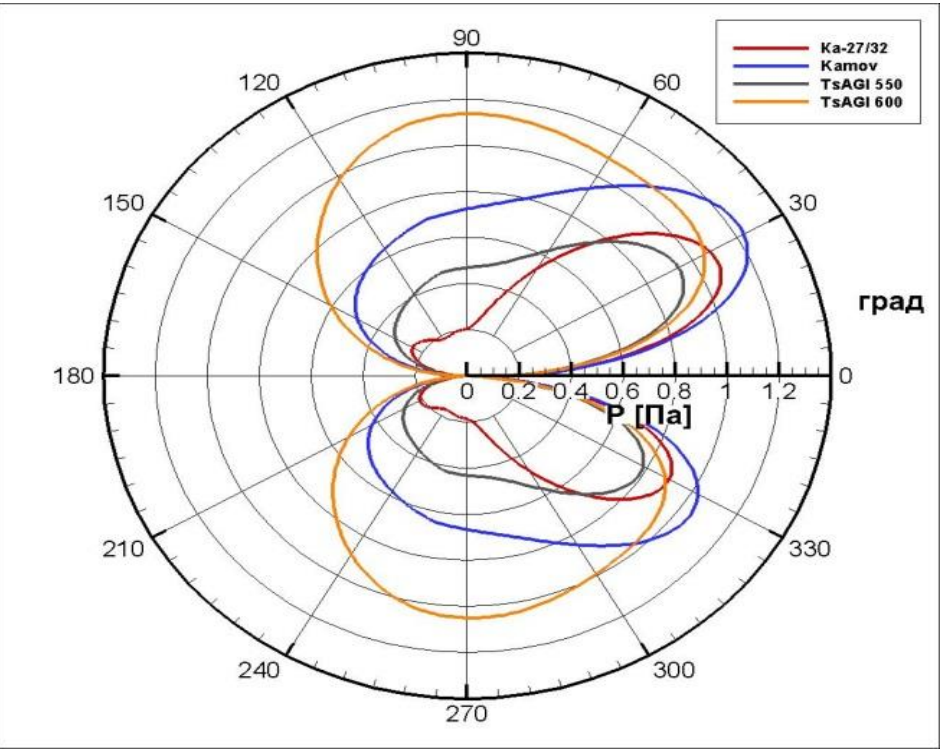
ΔSPL(dB) перспективных компоновок несущего винта по сравнению с винтом Ка-27/32

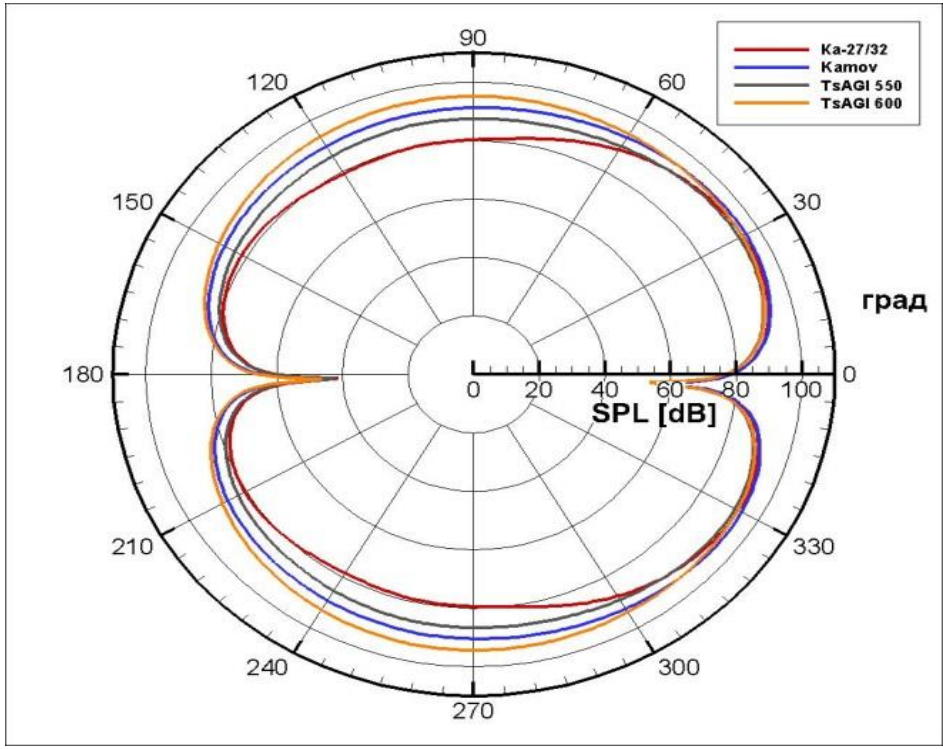


ΔSPL(dB) перспективных компоновок несущих винтов ЦАГИ по сравнению с компоновкой Камов



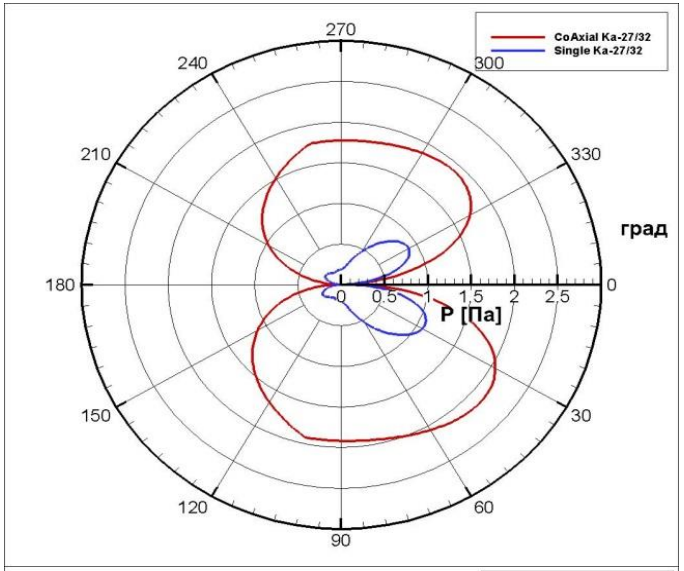
Диаграммы направленности эквивалентной по параметрам компоновки одновинтовой схемы, на базе лопастей Ка-27/32, Kamov, TsAGI 550 и TsAGI 600 в вертикальной плоскости

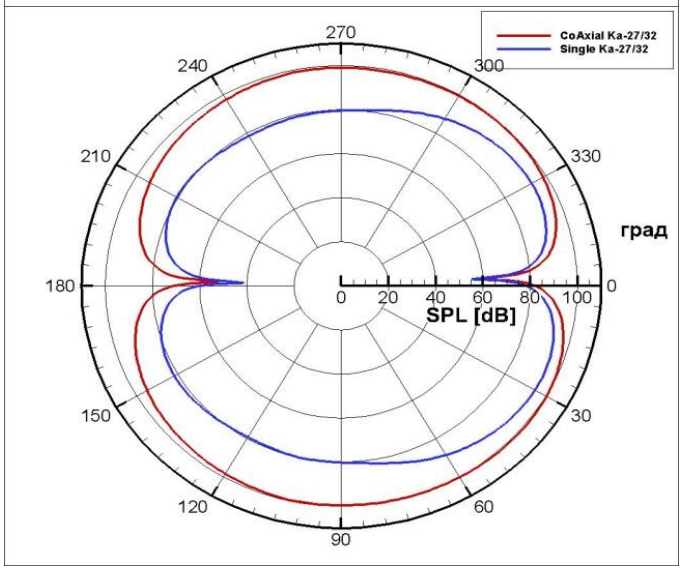




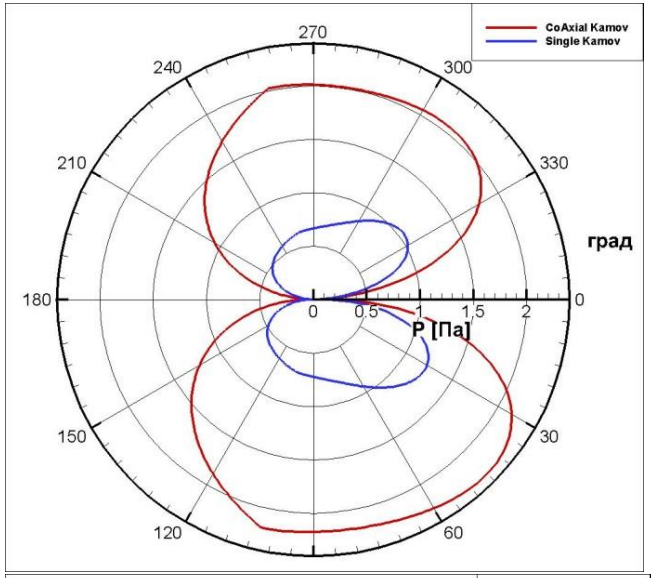
Сравнительные диаграммы направленности соосного и эквивалентного одновинтового НВ в вертикальной плоскости (Камов)

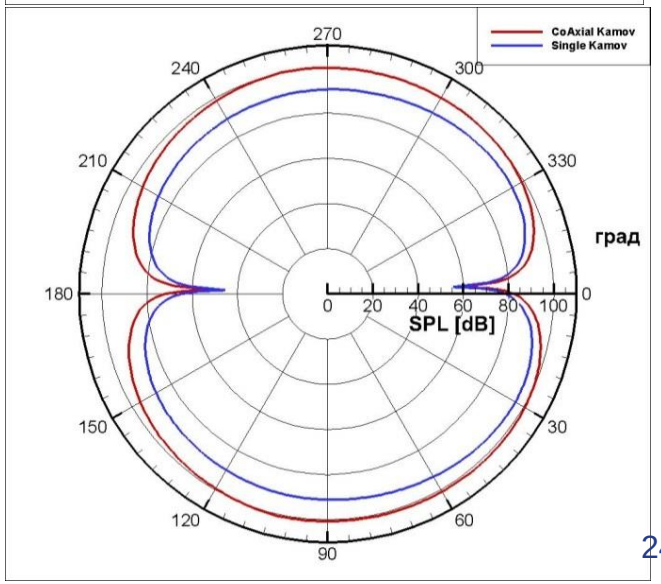
Ка-27/32:





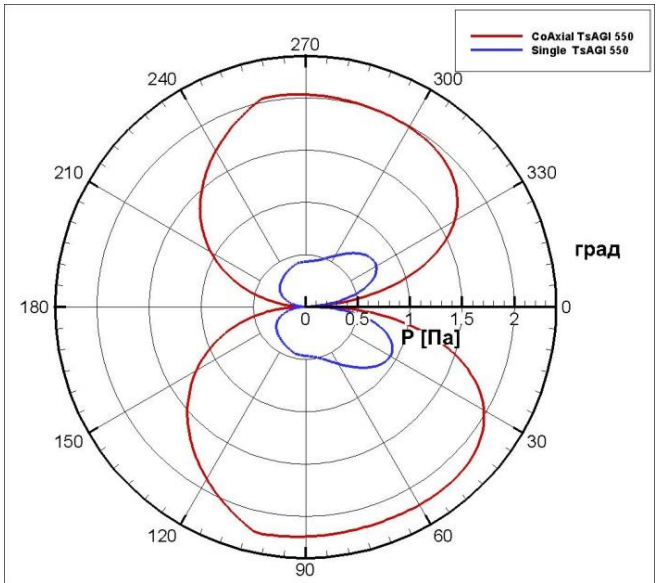
Kamov:

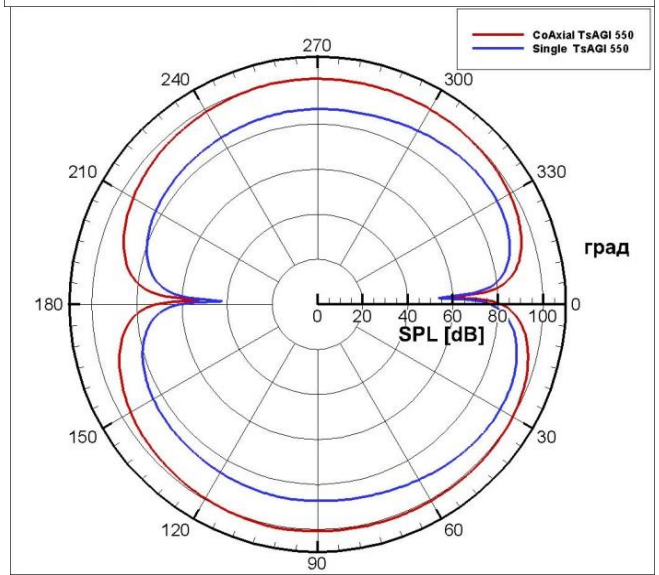




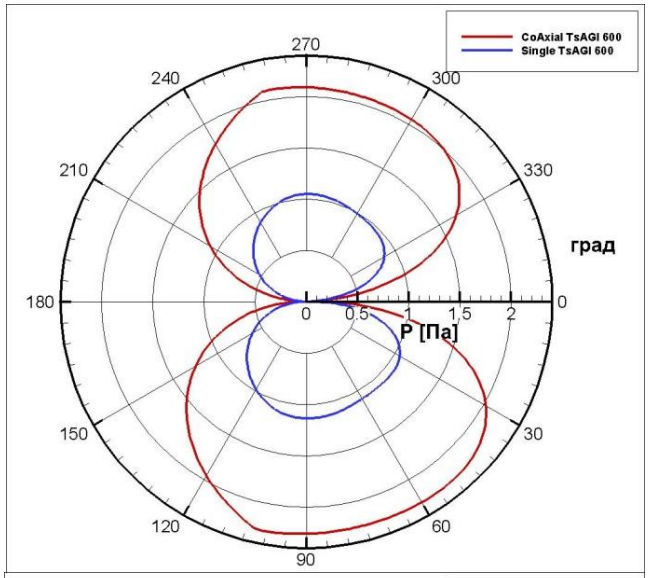
Сравнительные диаграммы направленности соосного и эквивалентного одновинтового НВ в вертикальной плоскости (ЦАГИ)

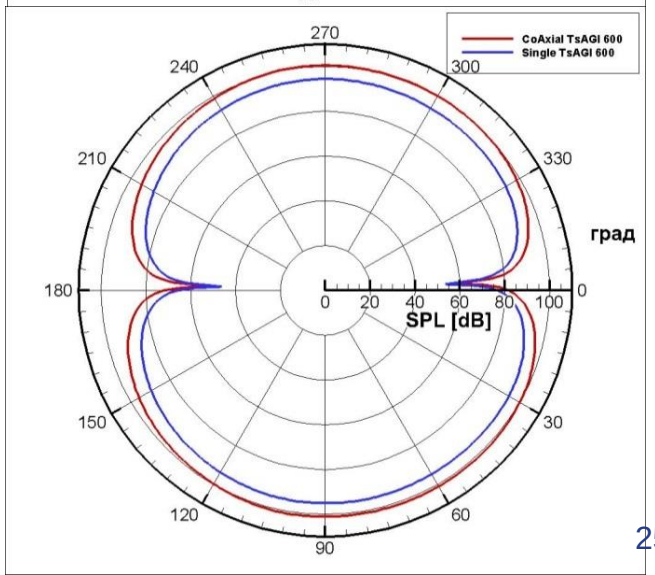
TsAGI 550:





TsAGI 600:





Заключение

- Выполнены расчетные исследования аэродинамических и акустических характеристик перспективных НВ и несущего винта вертолета Ка-27/37с помощью метода, основаннго на модифицированном уравнении Фокс Вильямса-Хоукингса и нелинейной теории несущего винта в нестационарной постановке.
- Показано, что уровень звукового давления, вызванный нестационарной нагрузкой, для всех трех компоновок НВ примерно одинаковый и выбор окончательной компоновки следует проводить по аэродинамическим и динамическим характеристикам.
- Получено, что эквивалентная (одновинтовая) схема несущего винта по сравнению с соосной производит меньше шума при одинаковой тяге (T=const).
- Показано, существенное влияние управления на уровень звукового давления. Для полной (количественной) оценки шума необходимо проводить расчёт вертолёта целиком с учётом балансировки.

Спасибо за внимание!