Федеральное Государственное Унитарное
Предприятие «Центральный Аэрогидродинамический
Институт имени проф. Н.Е Жуковского
(ФГУП «ЦАГИ»)

КОНКУРСНАЯ РАБОТА

По номинации: Лучший инновационный проект

ТЕХНОЛОГИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО И АКУСТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА

Горбань Валерий Павлович
Крицкий Борис Сергеевич
Миргазов Руслан Миннхатович
Никольский Александр Александрович

Жуковский, 2021

Введение

Разработка компоновки несущего винта (НВ) является сложной, многокритериальной научно – технической задачей. Ввиду противоречивости компоновочных решений по обеспечению высоких значений КПД, качества несущего винта в горизонтальном полете, малых величин шарнирного момента лопастей и снижения шумоизлучения НВ, представляется целесообразным проводить комплексные расчетные исследования, направленные на выбор рациональных параметров несущего винта, особенно на этапах предварительного проектирования.

В последние годы особое внимание уделяется разработке технологии комплексных подходов к расчету аэродинамических и акустических характеристик несущего винта винтокрылого летательного аппарата (ВКЛА).

Цель работы – создание расчетного комплекса по численному исследованию влияния формы лопасти и особенно ее концевой части на акустические и аэродинамические характеристики НВ.

Разработана технология и расчетный комплекс, как элемент системы автоматического проектирования (САПР), расчета аэродинамических характеристик (коэффициент тяги несущего и шарнирные моменты лопастей) и акустических характеристик несущего винта вертолета (шум вытеснения, шум от нагрузок), позволяющий на этапах начального проектирования разработать рациональную компоновку несущего винта ВКЛА под заданные требования.

1 Численное исследование по влиянию концевой части лопасти на шум вытеснения несущего винта

Несмотря на то, что вертолет является самым малошумящим летательным аппаратом вертикального взлета, уровень вызываемого им шума все же достаточно высок. Это может стать существенным недостатком вертолета, если в процессе проектирования не принять специальных мер по снижению шума. Поскольку требования в отношении уровня шума летательных аппаратов становятся все более жесткими, исследование шумоизлучения несущего винта в процессе проектирования вертолета приобретает особое значение. Шум несущего винта является сложным по своей структуре. Различают вихревой шум, шум вращения и хлопки лопастей [1]. Вихревой шум (или широкополосный) достаточно быстро затухает в дальнем поле. Шум вращения обусловлен в основном периодическим воздействием лопастей на воздух, и его частота кратна числу лопастей и количеству оборотов винта в единицу времени. Эти виды шума в настоящее время достаточно изучены. Методы определения акустических характеристик несущего винта разработаны как у нас в стране, так и за рубежом [2–10]. Хлопки лопастей характеризуются резким звуком ударов, следующих с частотой прохождения лопастей. Причиной таких хлопков считается взаимодействие лопастей с концевыми вихрями, сходящими с других лопастей (в англоязычной литературе – BVI (Blade vortex interaction)), и влияние толщины лопасти (шум вытеснения) при больших числах Маха, которые реализуются в концевых сечениях лопастей. В настоящее время влияние толщины лопасти и ее формы в плане на уровень шума, который наиболее интенсивен при больших числах Маха, изучен в недостаточной степени.

При возрастании числа Маха (М) на концевой части наступающей лопасти несущего винта до М = 0.85 и более несущий винт начинает издавать резко направленный вперед шум в виде узких пиков разрежения, следующих с частотой прохождения лопастей. Субъективно такое звуковое излучение воспринимается как весьма неприятные удары. Исследования показывают [1], что указанный шум вызван вытесняющим эффектом обтекания лопасти, связанным с наличием у нее конечной толщины. При этом имеет значение как сама физическая толщина лопасти, так и аналогичный по действию нелинейный эффект околозвукового обтекания ее концов. В данной работе исследовалось влияние физической толщины и формы лопасти в плане на шум вытеснения НВ.

Методика расчета основывалась на уравнениях линейной акустики, решение которых строилось методами, изложенными в [3, 13] В. Э. Баскиным, где получено новое, достаточно простое решение для поля звукового давления от произвольно движущейся линии с диполями, ориентированными по скорости их перемещения. На этой основе построен практический метод расчета поля звукового давления от лопасти винта ВКЛА, в том числе и вертолета, обусловленного ее толщиной. Установлено, что найденное решение удовлетворительно согласуется с данными измерений звукового давления [11, 12]. Решение позволяет анализировать влияние разных частей поверхности лопасти на уровень скоростного шума вытеснения и дать рекомендации по выбору формы конца лопасти и толщин профилей, при которых уровень шума вытеснения будет ограничен.

2 Результаты расчета шума вытеснения несущего винта

2.1 Объекты исследования

Объектом исследования в данной работе являются лопасти НВ с концевой частью разных толщин и форм. За исходные геометрические данные приняты следующие величины: радиус R = 8.6 м, хорда b = 0.66 м, расстояние от оси вращения до первого сечения лопасти r_0 = 0.2*R. В концевой части использовались профили NACA 23006, NACA 23009, NACA 23012, NACA 23015. Таким образом, толщины концевой части менялись в диапазоне от 6% до 15%. Исследовались лопасти с различными формами в плане (рисунок 2.1.1):

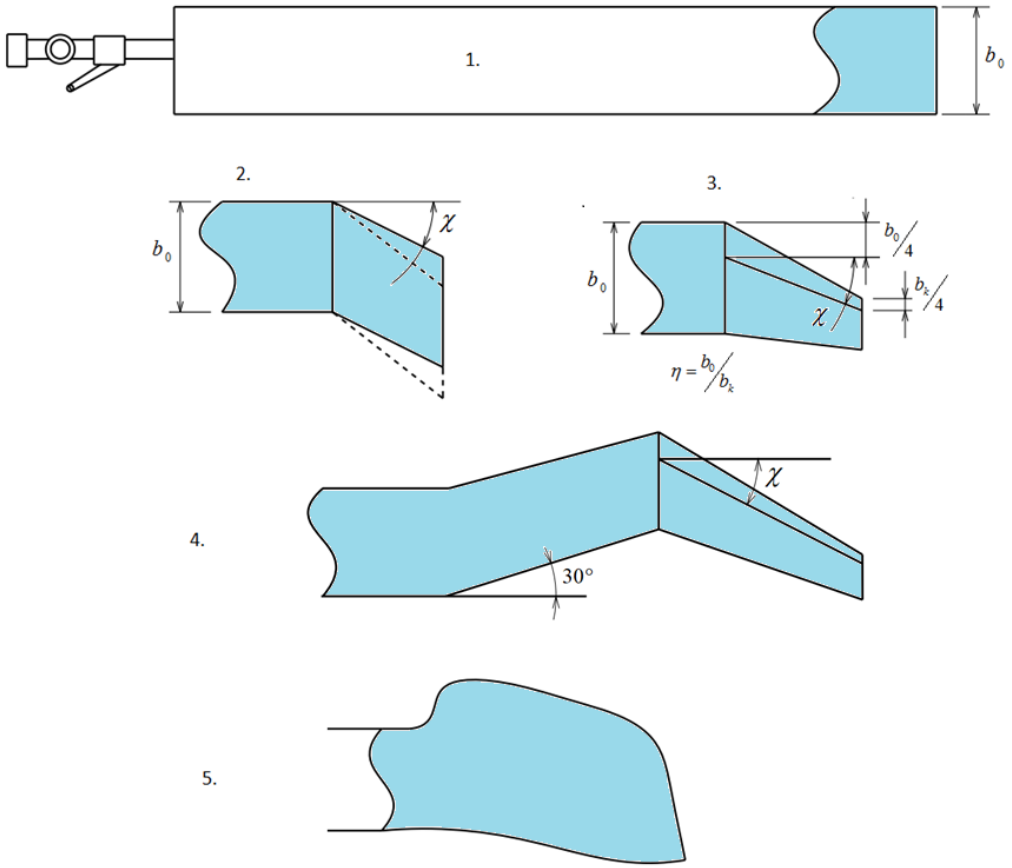


Рисунок 2.1.1 – Формы концевой части лопасти

На рисунке введены следующие обозначения:

1 – Прямоугольная форма (вертолеты типа Ми-8).

2 – Стреловидная форма без сужения (вертолеты типа UH-60).

3 – Стреловидная форма со сужением (вертолеты типа Ми 28, Ка-52).

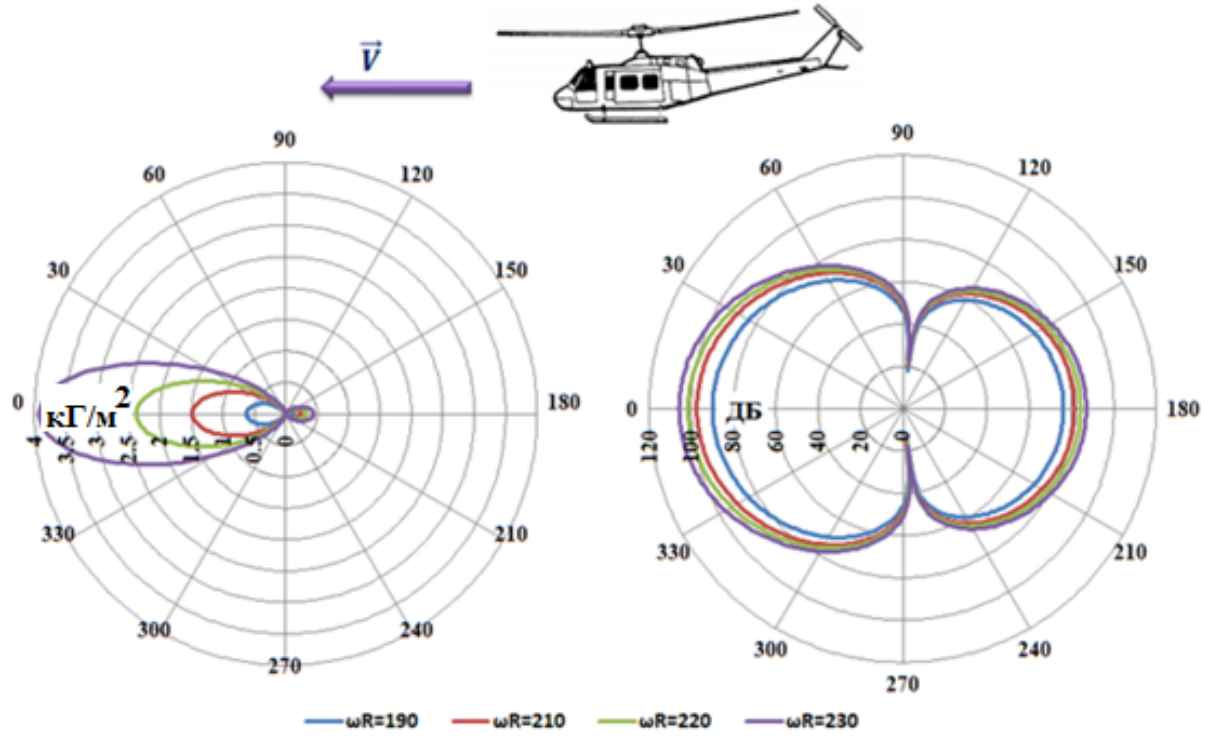
4 – Форма типа «Blue Edge» (вертолеты типа H135 Bluecopter).

5 – Форма типа «BERP » (вертолеты типа ПСВ ЛЛ 24, Westland Lynx AH7).

2.2 Результаты расчета шума вытеснения несущего винта в дальнем поле

При исследовании шума вытеснения несущего винта в дальнем поле использовались лопасти с прямоугольной и стреловидной концевой частью; профиль концевой части лопасти NACA 23012. Скорости полета V = 40 м/с, окружные скорости концов лопастей ωR=190 м/с, ωR=210 м/с, ωR = 220 м/с и ωR=230 м/с. Контрольные точки, в которых рассчитывалось звуковое давление, располагались на окружности радиусом 150 м (точка для режима сертификации) с центром во втулке в плоскости диска несущего винта.

На рисунке 2.2.1 представлены диаграммы направленности шума вытеснения в виде максимального звукового давления для четырех значений окружной скорости концов лопастей ωR = 190 м/с, 210 м/с, 220 м/с, 230 м/с. Видно, что увеличение окружной скорости приводит к увеличению максимального звукового давления $-P$ (в кГ/м^2 рисунок слева) и уровня звукового давления в ДБ (рисунок справа).



V = 40 м/с, L = 150 м

Рисунок 2.2.1 – Диаграмма направленности шума вытеснения НВ в дальнем поле

2.3 Результаты расчета шума вытеснения несущего винта в ближнем поле

2.3.1 Шум вытеснения несущего винта для концевой части лопасти прямоугольной формы

На рисунке 2.3.1 представлена зависимость звукового давления однолопастного «модельного» винта с прямоугольной концевой частью с относительной толщиной 12% по времени в области его максимума. Скорость полета V= 80 м/с, окружная скорость конца лопасти ωR=250 м/с. Пиковые значения давления наблюдаются на азимуте лопасти 90 градусов, где скорость обтекания концевой части лопасти максимальная.

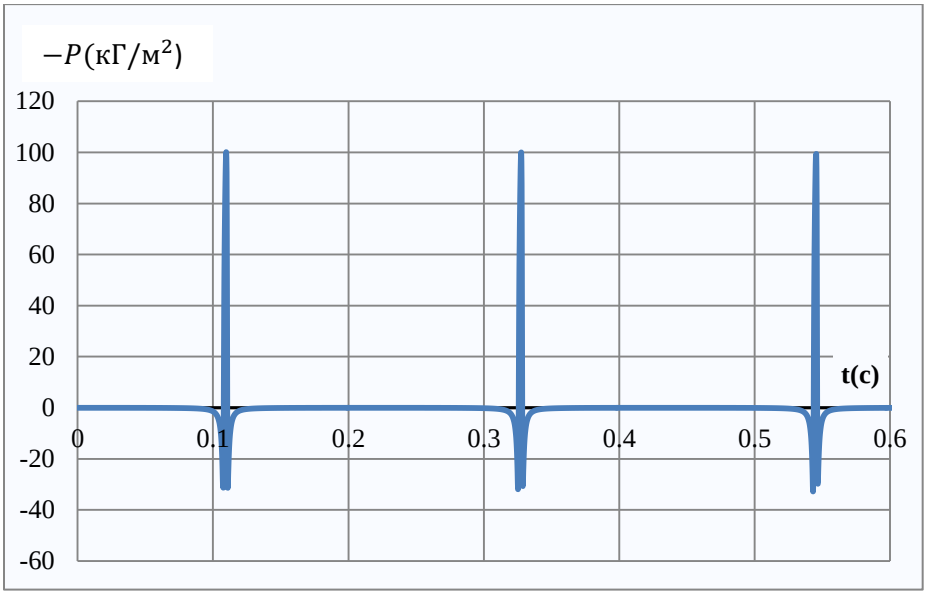


Рисунок 2.3.1 – Изменение звукового давления по времени в области его максимума (концевая часть прямоугольная)

На рисунке 2.3.2 показано распределение звукового давления $-P[\text{кГ}/\text{м}^2]$шума вытеснения НВ в области его максимума. Лопасть несущего винта прямоугольной формы с радиусом R=8.6 м и хордой b=0.66 м. Расстояние между втулкой несущего винта и микрофоном L=3R≈26 м. Скорость полета V=80 м/с, окружная скорость ωR=250 м/с. Отметим, что звуковое давление шума вытеснения имеет пиковое значение, ширина пика отрицательного звукового давления составляет порядка 3 градуса, такое давление воспринимается субъективно, как резкий сильный хлопок. Относительные толщины лопасти $\bar{c}$ изменялась с 6% до 15%. Расчеты показали, что толщина лопасти существенно влияет на звуковое давление, которое увеличивается с увеличением толщины лопасти.

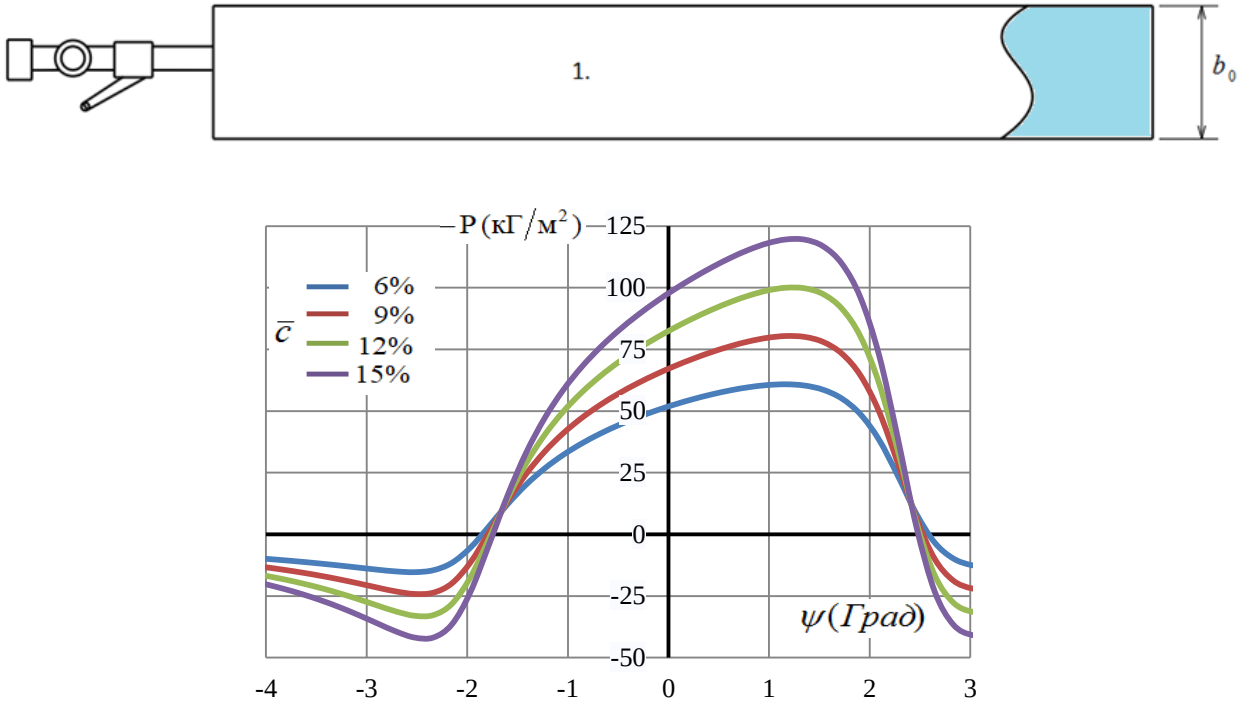


Рисунок 2.3.2 – Распределения звукового давления в области его максимума на прямоугольной законцовке с относительной толщиной $\bar{c}$ от *6%* до *15%*

2.3.2 Шум вытеснения несущего винта для концевой части лопасти стреловидной формы без сужения

Проведены расчеты для концевой части лопасти с относительными толщинами 6%, 9%,12% и 15%. На рисунке 2.3.3, для примера, представлены графики при $\bar{c} = 12\%$ распределения звукового давления шума вытеснения НВ, лопасть которого имеет стреловидную форму, в области его максимума. Радиус и основная хорда лопасти сохранились как в случае лопасти прямоугольной формы. Стреловидность начинается с расстояния $0.932R$ и изменяется с $10°$ до $50°$. Определено, что на шум вытеснения НВ также влияет стреловидность. С увеличением стреловидностью концевой части лопасти шум вытеснения НВ уменьшается

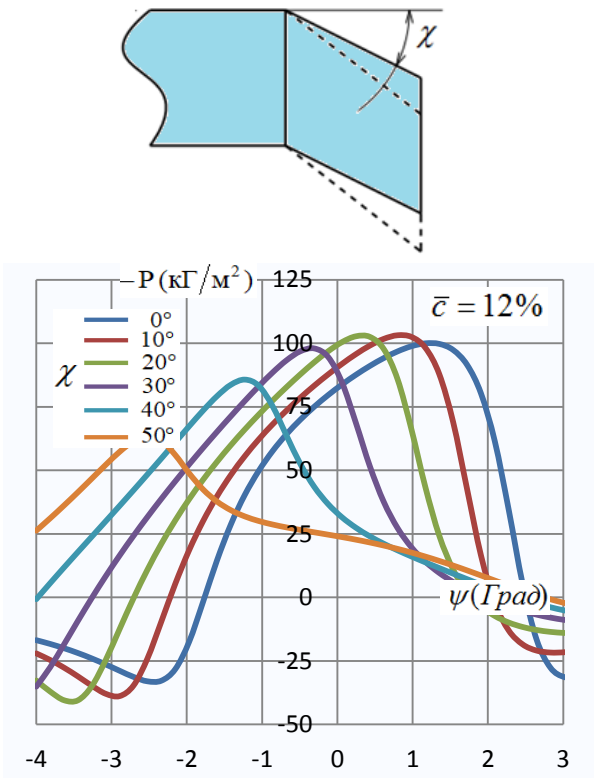


Рисунок 2.3.3 – Распределение звукового давления в области его максимума при стреловидной законцовке лопасти (η=1)

2.3.3 Шум вытеснения несущего винта для концевой части лопасти стреловидной формы с сужением

При применении методики расчета шума вытеснения НВ для лопасти со стреловидностью и сужением в ее концевой части получились некоторые результаты, которые доказывали положительные влияние сужения на шум вытеснения НВ. Основные параметры лопасти сохранились как в случае прямоугольной формы, сужение η начиналось с расстояния r=0.932R. На рисунке 2.3.4 представлены изменения распределения звукового давления шума вытеснения НВ в области его максимума при сужающейся законцовке лопасти. Сужение η концевой части лопасти увеличивались с 1 до 2.5, а максимальные значения звуковых давлений соответственно снижаются со

100 кГ/м^2 до 60 кГ/м^2. Это связано, в основном, с уменьшением физической толщины лопасти.

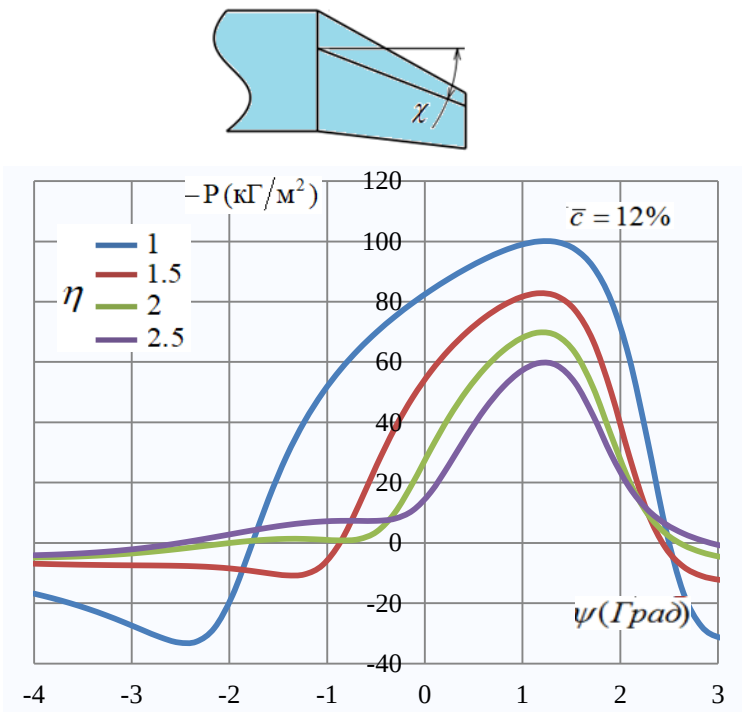


Рисунок 2.3.4 – Распределение звукового давления в области его максимума при сужающейся законцовке лопасти (η=2)

Ниже на рисунке 2.3.5 представлены результаты расчета звукового давления при стреловидной сужающейся законцовке лопасти. Как видно, придание лопасти такого типа концевой части заметно снижает уровень звукового давления с увеличением угла стреловидности.

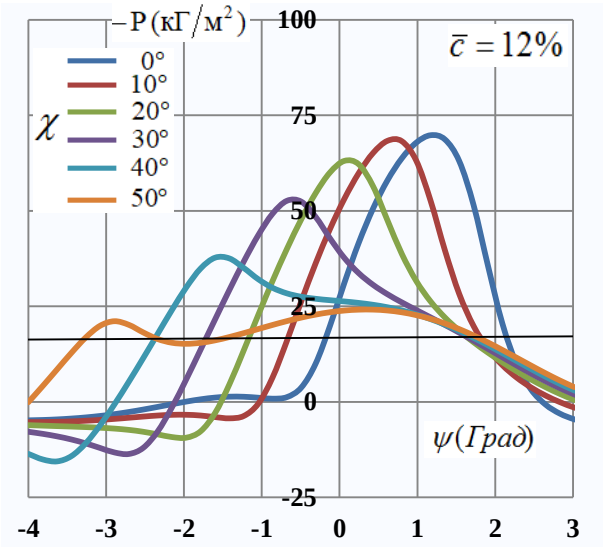


Рисунок 2.3.5 – Распределение звукового давления в области его максимума при стреловидной сужающейся законцовке лопасти (η=2)

2.3.4 Шум вытеснения несущего винта для концевой части лопасти типа «BlueEdge»

Рассмотрим форму лопасти НВ, которая позволяет заметно уменьшить уровень шума НВ. Лопасть создана компанией Eurocopter, такая лопасть называется «BlueEdge». Форма такой лопасти представлена рисунке 2.3.6. На этом рисунке также представлены распределения звукового давления шума вытеснения НВ в области его максимума при сужении η=2, а стреловидность изменилась с 20° до 50°. Проведена серия расчетов при относительных толщинах с 6% до 15%. Для примера на рисунке 2.3.6 представлено распределение шума вытеснения при $\bar{c} = 12\%$. Видно, что по сравнению с приведенными выше законцовками законцовка «BlueEdge» сильнее снижает шум вытеснения.

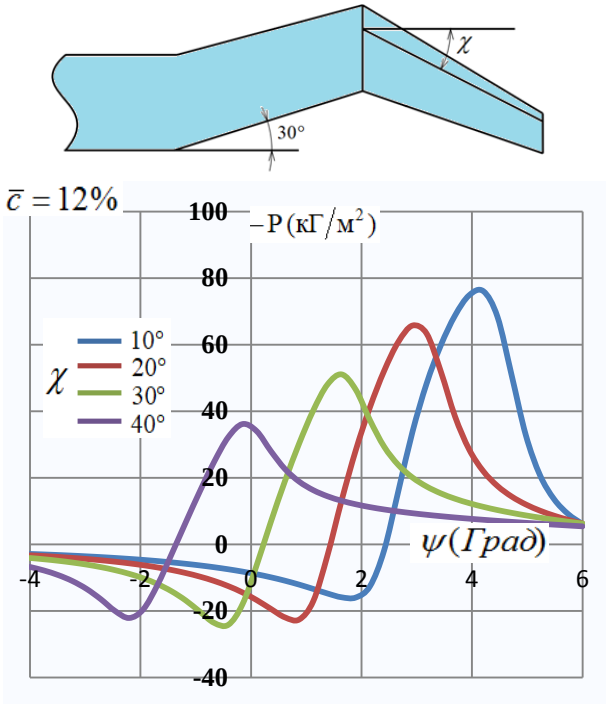


Рисунок 2.3.6 – Распределение звукового давления в области его максимума для лопасти типа «BlueEdge»

2.3.5 Шум вытеснения несущего винта для концевой части лопасти типа «BERP»

На рисунке 2.3.7 представлены распределения звукового давления шума вытеснения НВ в области его максимума. В этом случае использовалась лопасть типа «BERP». Конструкция лопастей ротора «BERP» была разработана в рамках Британской Программы Экспериментального Ротора (Experimental Rotor Program). Цель заключалась в увеличении грузоподъемности вертолетов и максимальной скорости с использованием новых конструкций и материалов. На практике в концевой части использовался профиль с относительной толщиной 6%. Как видно на графике (рисунок 2.3.7) давление шума вытеснения в этом случае не превышает 30 кГ/м^2. Таким образом, такая лопасть также имеет хорошую акустическую характеристику с низкими уровнями шума вытеснения НВ.

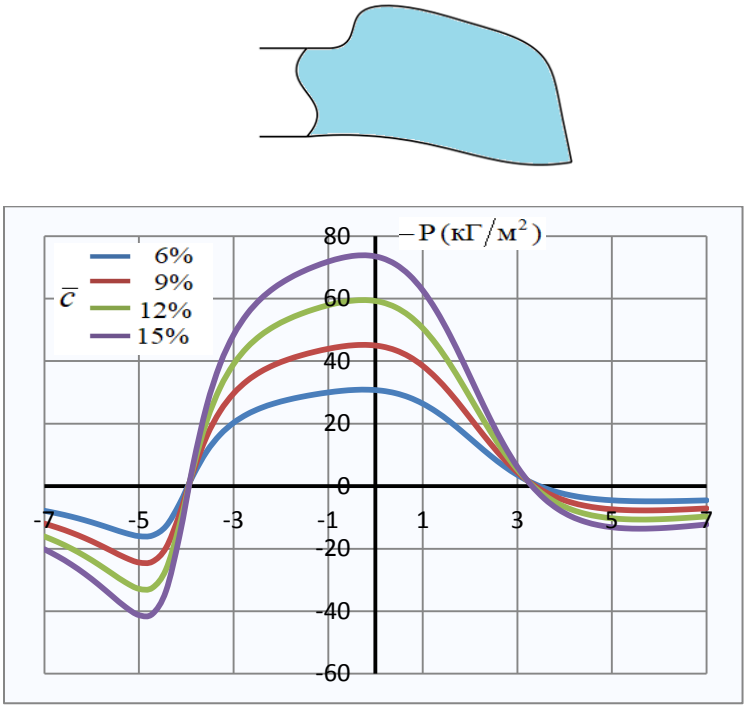
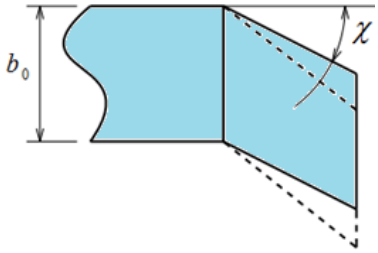
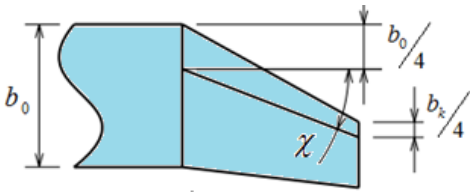
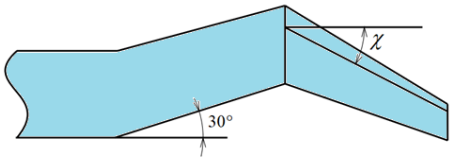
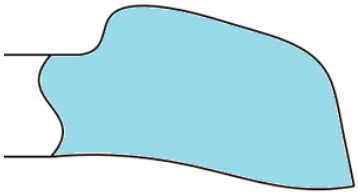


Рисунок 2.3.7 – Распределение звукового давления в области его максимума для лопасти типа «BERP»

Чтобы иметь более четкое представление о влиянии разных форм концевой части лопасти на шум вытеснения НВ рассмотрим таблицу 2.3.1. В таблице 2.3.1 представлены максимальные значения давления шума вытеснения НВ с разными формами концевой части лопасти, которые рассмотрены выше. На рисунке 2.3.8 представлены гистограммы звукового давления при одинаковой относительной толщине $\bar{c} = 12\%$ для рассматриваемых законцовок (скорость V=80 м/с, ωR=250 м/с).

Таблица 2.3.1 – Максимальные значения давления шума вытеснения НВ с разными формами концевой части лопасти

Формы концевой части лопасти		$-P_{max}$(кГ/м^2)			
		6%	9%	12%	15%
1. Прямоугольная		60.8	80.4	100.0	119.6
2. Стреловидная 	$\chi = 30°$	58.9	78.4	98.0	117.5
	$\chi = 40°$	49.4	67.5	85.7	103.8
	$\chi = 50°$	32.9	48.2	63.5	78.8
3. Стреловидная со сужением 	$\eta = 2$; $\chi = 30°$	45.9	60.1	74.3	88.5
	$\eta = 2$; $\chi = 40°$	34.6	46.1	58.1	70.2
	$\eta = 2$; $\chi = 50°$	25.0	27.2	33.7	41.9
4. Типа «Blue Edge» 	$\eta = 2$; $\chi = 30°$	26.3	38.6	51.0	63.4
	$\eta = 2$; $\chi = 40°$	18.8	27.4	36.1	44.7
5.Типа«BERP» 		30.8	45.2	59.5	73.8

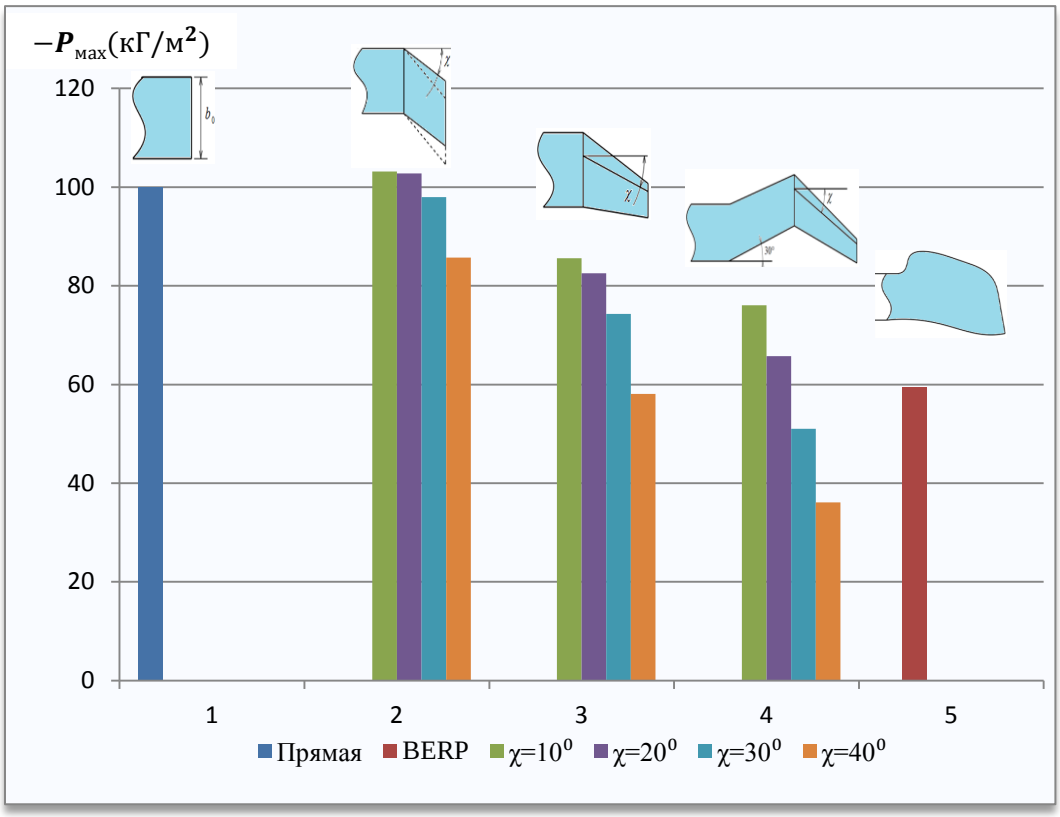


Рисунок 2.3.8 – Сравнение максимальных давлений шума вытеснения НВ разными типами законцовок

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:

- Снижение уровня шума вытеснения НВ можно достичь посредством уменьшения толщины, увеличения угла стреловидности и сужения концевой части лопасти, а также применения некоторых особых форм типа «BlueEdge», «BERP».
- С точки зрения шумоизлучения НВ, лопасть типа «BlueEdge» является наиболее рациональной с наименьшим шумом вытеснения. Далее следуют лопасти с большим сужением и большей стреловидностью. Очевидно, что аэродинамическое проектирование лопастей НВ следует выполнять с учетом всех факторов, влияющих на его аэродинамические и акустические характеристики.

3 Численное исследование по влиянию концевой части лопасти на аэродинамические характеристики и шум от аэродинамической силы несущего винта

На основе разработанной технологии и расчетного комплекса, проведены численные исследования уровня звукового давления от нестационарных сил несущих винтов в дальнем акустическом поле, на расстоянии R=150 м. от втулки несущего винта с концевыми частями разных форм. Данный вид шума, генерируемый несущим винтом, является одним из важнейших и преобладающих компонентов шума несущего винта, особенно на малых, средних и крейсерских скоростях полета. Эти скорости особенно важно для режимов сертификации. Шум от нестационарных сил имеет характерную диаграмму направленности. Максимум его излучения находится в окрестностях точек, в которых замеряются данные для сертификации по шумовому излучению. Также рассчитывались коэффициенты силы тяги и шарнирные моменты от рассматриваемых компоновок несущих винтов, что важно учитывать при проектировании компоновок несущих винтов.

4 Результаты расчета аэродинамических характеристик и шума от нагрузки несущего винта

4.1 Объекты исследования

В качестве примера численного исследования по влиянию форм концевой части лопасти НВ на аэродинамические силы, шарнирный момент и шум от нагрузки был проведен расчет пятилопастного несущего винта вертолета. Формы концевой части лопасти НВ представлены в первой части.

На основании имеющихся геометрических параметров модели лопасти были вычислены x, y и z – координаты узлов, таким образом, чтобы лопасть

была разбита на 19 рамок по размаху и на 4 рамки по хорде. Методические исследования [16] показали, что данное разбиение является рациональным с точки зрения точности и скорости расчета.

Рассчитывались аэродинамические коэффициенты $c_T, c_H, c_s, m_k, m_ш$ НВ. Рассматривались два способа крепления лопасти к втулке: 1) способ «жесткой» заделки несущего винта, исключающего маховое движение лопастей и 2) способ крепления через горизонтальный шарнир, позволяющий совершать маховое движение лопастей.

Численное моделирование обтекания проводилось со следующими входными параметрами:

- Количество лопастей НВ $k_л = 5$;
- Радиус винта R=8.6 м;
- Средняя хорда лопасти b=0.66 м;
- Скорость вращения лопасти $\omega_{н.в.} = 25.58\ \frac{рад}{сек}$;
- Скорость горизонтального полета $V_{гор.} = 60$ м/с;
- Коэффициент регулятора взмаха $k = 0.5$;
- Шаг расчета $\Delta\psi = 5°$ (72 шагов за один оборот);
- Угол атаки несущего винта $\alpha = -10°$.
- Расстояние до точки наблюдения при расчете шума нагрузки в вертикальной плоскости, проходящей через вал втулки L=150 м

Методы расчета аэродинамических коэффициентов и шума нагрузки НВ, описаны в [14, 15]. На рисунке 4.1 представлена вихревая пелена, полученная в результате расчетов по нелинейной вихревой теории несущего винта.

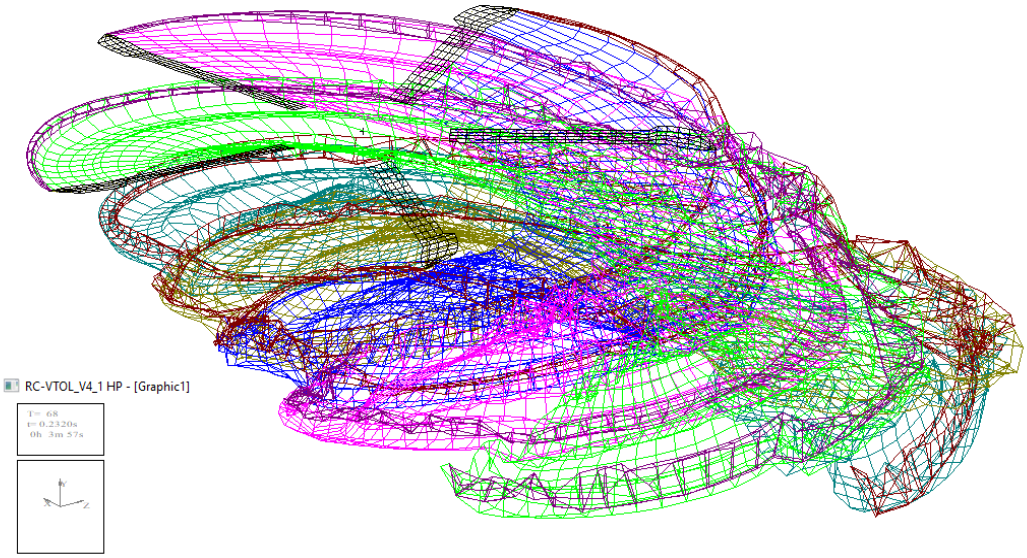
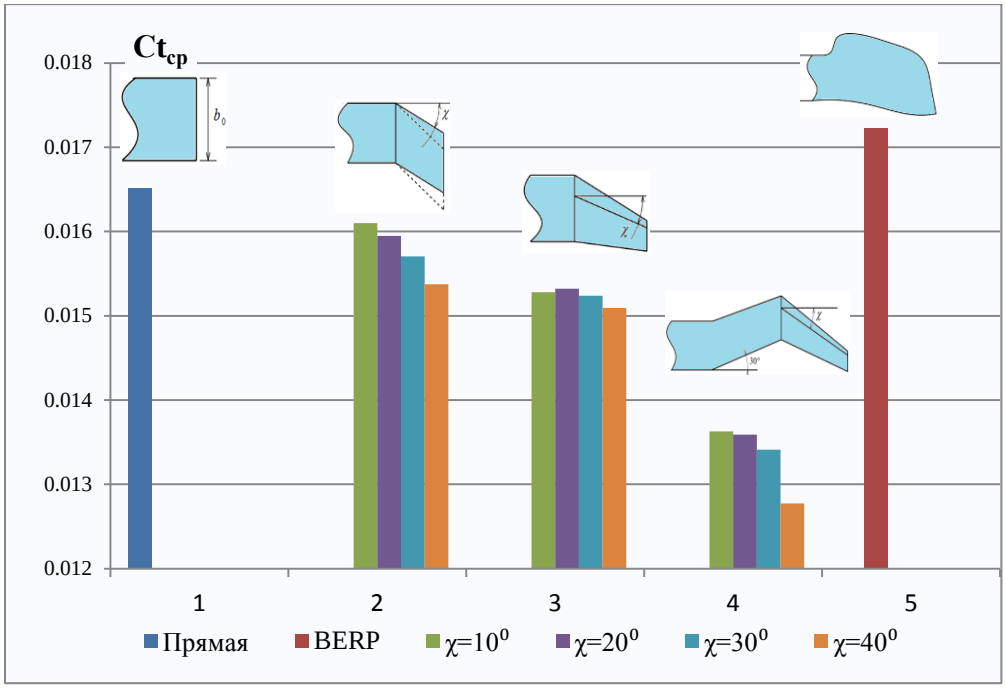


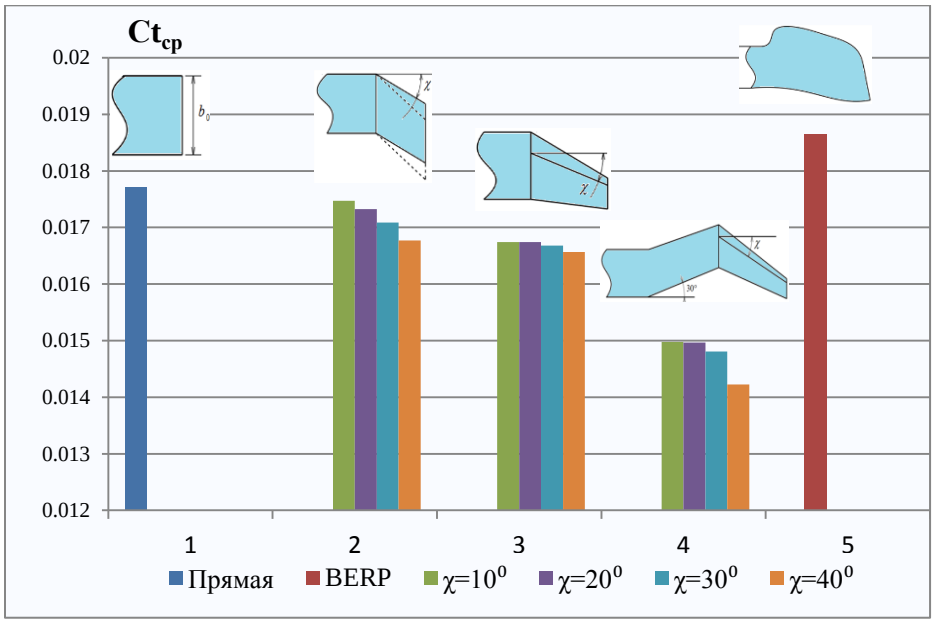
Рисунок 4.1 – Вихревая пелена несущего винта, вид в изометрии

4.2 Результаты расчета аэродинамических характеристик и шума от нагрузки жесткого НВ и винта с шарнирным креплением лопастей

На рисунке 4.2 показаны гистограммы средних значений коэффициента силы тяги за оборот для винтов с разными типами концевых частей лопасти. Графики А и Б соответствуют результаты в случае винта с жестким креплением (А) и винта с шарнирным креплением (Б) лопастей. Из графиков видно, что при жестком и шарнирном креплении лопасти, среднее значение коэффициентов силы тяги несущего винта в случаях: а) стреловидной концевой части без сужения, б) стреловидной с сужением и в) «Blue Edge» меньше по сравнению с несущим винтом с лопастями прямоугольной формы. Это объясняется тем, что нормальная составляющая скорости обтекания профиля концевой части уменьшается из-за стреловидности - чем больше стреловидность, тем меньше коэффициент силы тяги *Ct*. В случае г) – «BERP» коэффициент *Ct* увеличивается из-за увеличенной площади концевой части.



А – Жесткое крепление

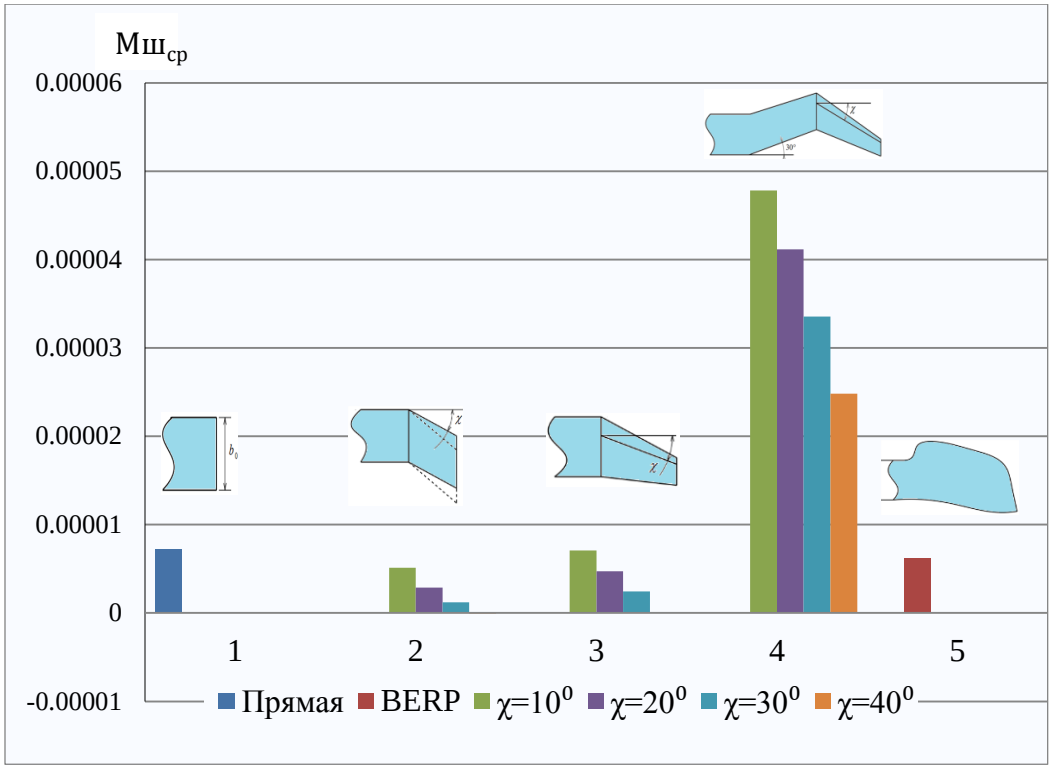


Б – Шарнирное крепление

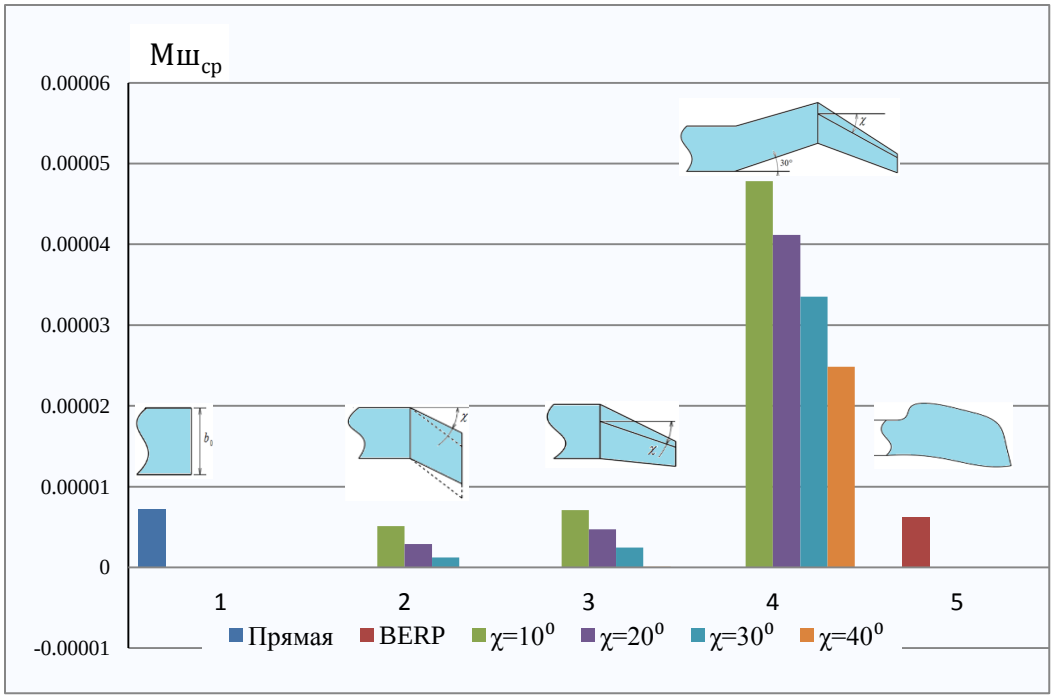
Рисунок 4.2 – Сравнение средних значений коэффициента силы тяги винтов

На рисунке 4.3 показано сравнение средних значений коэффициента коэффициента шарнирного момента для компоновок несущих винтов рассмотренных выше в случае жесткого крепления (А) и шарнирного крепления (Б). Расчетом показано, что в случае стреловидной законцовки без сужения и с сужением коэффициенты шарнирного момента уменьшается с увеличением угла стреловидности по сравнению с прямоугольной концевой формой, при шарнирном креплении винта значения коэффициентов шарнирного момента имеют ярко выраженный максимум, особенно в области азимута лопасти 90 градусов (наступающая лопасть). Коэффициент шарнирного момента лопасти типа «Blue Edge» заметно выше по сравнению с концевой частью прямой формы. Зависимость коэффициентов шарнирного момента лопасти от азимута с концевой частью типа «BERP» и прямоугольной при жестком креплении не сильно отличаются.

Расчетным путем получены диаграммы направленности шума, вызванного нестационарной нагрузкой на лопастях НВ (в Па), в плоскости симметрии вертолета для разных типов концевых частей лопасти. Шум от нагрузки в дальнем поле является преобладающим при крейсерских скоростях полета вертолета, поэтому его необходимо учитывать, при проектировании НВ. Расчеты позволяют оценить влияние формы концевой части лопасти на шумоизлучение лопасти. Для примера на рисунке 4.4 представлена диаграмма направленности для компоновки с формой лопасти типа «BERP», которая по форме в плане концевой части наиболее близка к перспективным отечественным лопастям. Шум от нагрузки больше, чем для прямоугольной лопасти, это обусловлено тем, что основная тяга несущего винта сосредоточена в концевой части, площадь которой значительно превосходит площадь концевой части прямоугольной лопасти, однако это получено без учета профильной компоновки и крутки лопасти.



А – Жесткое крепление



Б – Шарнирное крепление

Рисунок 4.3 – Сравнение средних значений коэффициента шарнирного момента винтов

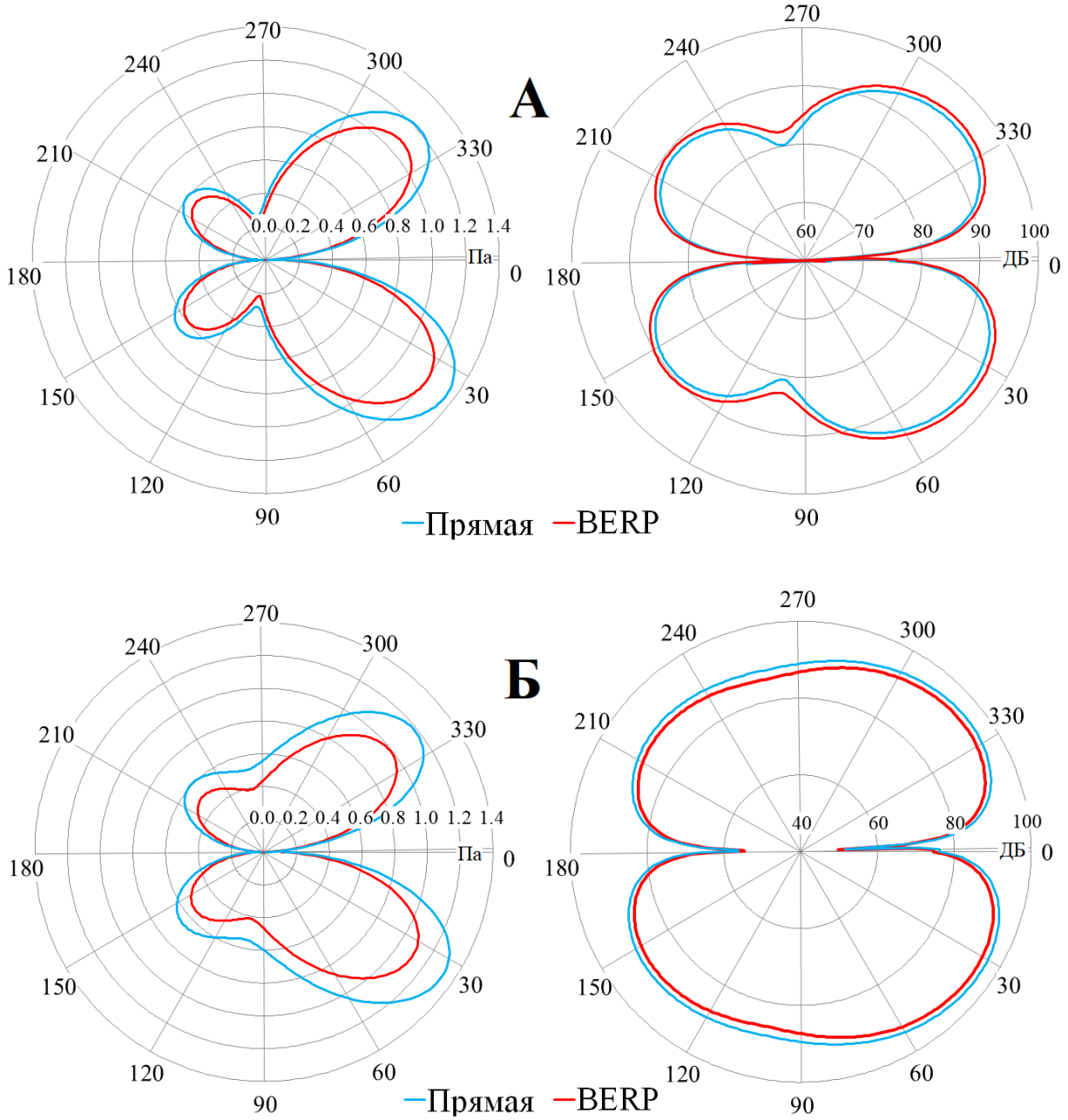


Рисунок 4.4 – Диаграммы направленности шума нагрузки НВ (*Па, слева и Дб справа*) в плоскости симметрии вертолета для разных типов концевых частей лопасти

А – Жесткое крепление **Б** – Шарнирное крепление

На рисунке 4.5 представлена гистограмма влияния формы концевой части лопасти на шум от нагрузки НВ, в которой показано сравнение

значений максимального давления шум от нагрузки НВ на угле наблюдения 40 градусов вниз от плоскости несущего винта вертолета для разных типов концевой части лопасти. По графику наглядно можно оценить преимущества и недостатки той или иной конкретной компоновки.

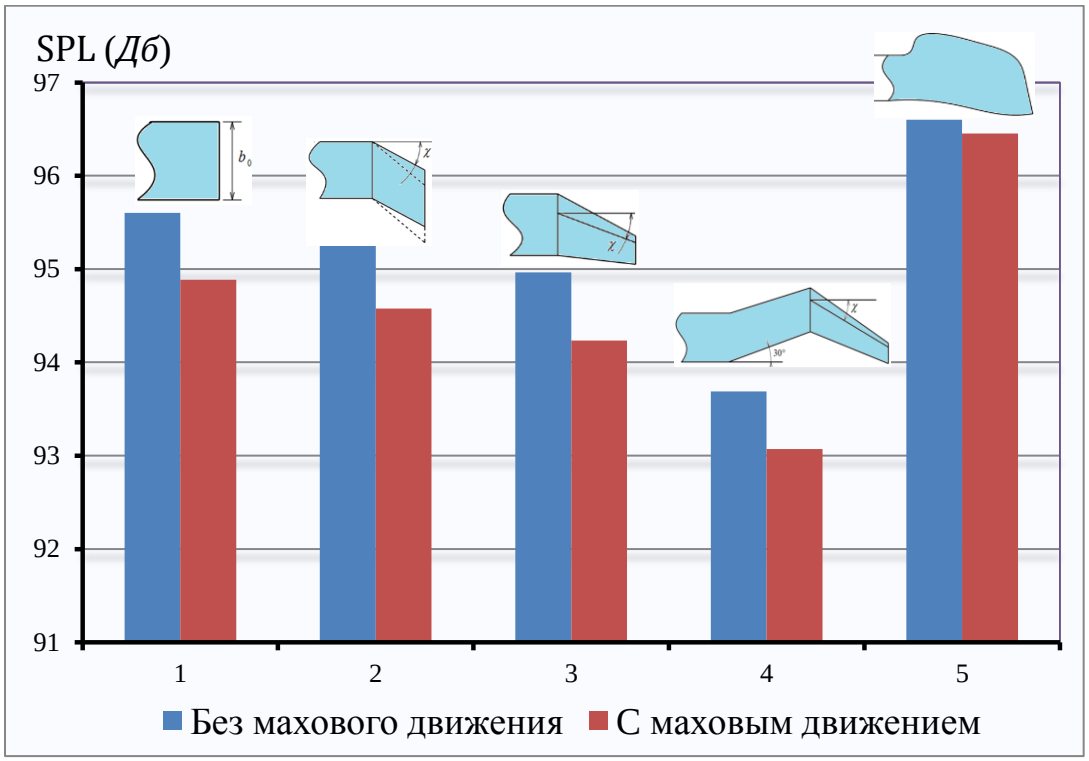


Рисунок 4.5 – Сравнение значений максимального давления шума от нагрузки НВ на угле наблюдения 40 градусов

Выше рассмотрено влияние разных типов концевых частей лопасти на аэроакустические характеристики НВ, такие как шум вытеснения, шум нагрузки, коэффициент силы тяги и коэффициент шарнирного момента. Относительные максимальные и средние значения этих характеристик представлены ниже на лепестковой диаграмме (рисунок 4.6). В качестве примера, выбран угол стреловидности для форм 2, 3 и «Blue Edge» 30 градусов. Из анализа диаграммы можно сделать следующие выводы:

1. Стреловидность и сужение на концевой части лопасти НВ уменьшают шум вытеснения, шум от нагрузки и шарнирный момент, однако снижают тягу несущего винта.
2. Форма лопасти типа «Blue Edge» заметно уменьшает шум вытеснения, шум нагрузки, но увеличивает шарнирные моменты при прочих равных условиях. Поэтому применение такого типа лопасти требует тщательного выбора положения продольной оси лопасти с целью минимизации шарнирного момента.
3. Форма лопасти «BERP» заметно снижает шум вытеснения, при этом сохраняется шарнирный момент лопасти НВ, как и на прямоугольной лопасти. Однако при такой форме больше тяга и шум от нагрузки НВ, вероятно, это обусловлено большей площадью концевой части лопасти.

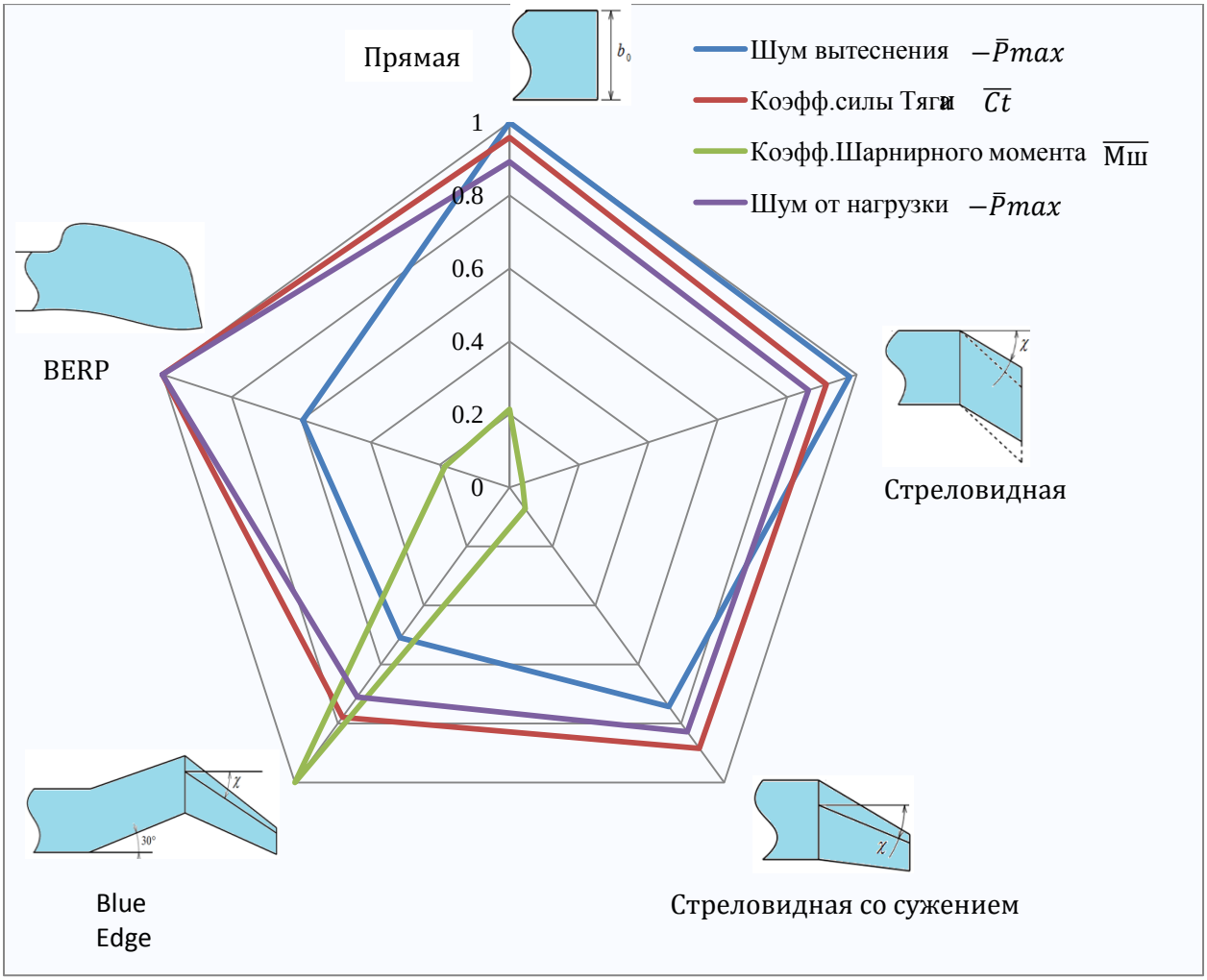


Рисунок 4.6 – Относительные значения аэроакустических характеристик НВ для разных типов законцовок

Отметим, что на данном этапе все расчеты проводились без балансировки винта под заданную тягу. Анализ литературы показал, что это количественно, но не качественно повлияет на аэродинамические характеристики и акустику несущего винта. Представленная методика позволяет проводить поисковые исследования по выбору рациональной компоновки НВ и РВ вертолета с учетом аэродинамики и акустики несущего винта.

Выводы

Рассмотрено влияние форм в плане и толщин лопасти на силу тяги несущего винта, шарнирные моменты, на шум вытеснения и на шум от нагрузки. Сделаны следующие выводы:

1. Рассмотрены методы расчета шума вытеснения, аэродинамических характеристик и шума от нагрузки НВ. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, показано удовлетворительное согласование результатов расчета с экспериментальными данными. Продемонстрирована возможность их применения в инженерной практике для исследования влияния геометрических параметров лопасти НВ на аэродинамические и акустические характеристики НВ.
2. Расчеты показали, что при увеличении толщины лопасти, в частности, толщины концевой ее части, шум вытеснения существенно возрастает, особенно на больших скоростях полета. Таким образом, при проектировании концевой части лопасти необходимо применять профили с меньшей относительной толщиной.
3. Исследованы наиболее распространенные формы концевой части лопасти, такие как прямоугольная, стреловидная без сужения, стреловидная с сужением, типа «Blue Edge» и типа«BERP».
4. Стреловидность и сужение на концевой части лопасти НВ уменьшают шум вытеснения, шум от нагрузки, шарнирный момент, однако снижают силу тягу несущего винта.
5. Форма лопасти типа «Blue Edge» заметно уменьшает шум вытеснения, шум нагрузки, но заметно увеличивает шарнирные моменты при прочих равных условиях. Поэтому применение такого типа лопасти

требует тщательного выбора положения продольной оси лопасти с целью минимизации шарнирного момента.

6. Форма лопасти «BERP» заметно снижает шум вытеснения, при этом сохраняется шарнирный момент лопасти НВ, как и на прямоугольной лопасти. При этом несущий винт создает бóльшую тягу и шум от нагрузки НВ, что обусловлено большей площадью на концевой части лопасти.
7. Разработана технология и расчетный комплекс, как элемент системы автоматического проектирования (САПР) расчета аэродинамических и акустических характеристик несущего винта вертолета, в частности, шума вытеснения, шума от нагрузок и аэродинамических характеристик НВ, позволяющий на этапах начального проектирования разработать рациональную компоновку несущего винта ВКЛА под заданные требования.

Список использованных источников

1. Джонсон У. Теория вертолета. Т. 2. — М.: Мир, 1983.
2. Гутин Л. Я. О «звуке вращения» воздушного винта // ЖТФ. 1942. Т. 12, вып. 2–3.
3. Баскин В. Э. Акустическое давление, вызываемое винтом вертолета при горизонтальном полете // Труды ЦАГИ. 1972, вып. 1373.
4. Авиационная акустика / Под ред. А. Г. Мунина. — М.: Машиностроение, 1986.
5. Samokhin V. F, Rozhdestvensky M. G. External noise of single rotor helicopters // AGARD Conference «Aerodynamics and Aeroacustics of Rotorcraft» Proceedings N 552, Germany, 1994.

6. Hubbard H, Regier A. Free-space oscillating pressures near the tips of rotating propellers // NACA. TR 1079, 1952.
7. Ffowcs Williams J.E., Howkings D.L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion//Phil. Trans. Royal Soc., Series A. V. 264, 1969.
8. Головкин В.А., Крицкий Б.С., Миргазов Р.М. О расчете шума вытеснения несущего винта, вызванного толщиной лопасти// Ученые записки ЦАГИ т. XLI, № 5, 2010.с. 3-12.
9. Крицкий Б.С., Миргазов Р.Н. Расчет звукового давления в дальнем акустическом поле несущего винта. Труды XV Международного симпозиума «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики». Харьков-Херсон, 2011.
10. Mirgazov R., Golovkin V., Kritsky B. The estimate of helicopter rotor noise from unsteady forces. 40th EuropeanRotorcraftForum, Southampton, 2014.
11. Schmitz F. H., Boxwell D. A. In-flight far-field measurement of helicopter impulsive noise // 32nd Annual National Forum AHS, Preprint, N 1062. 1976.
12. Vause C. R., Schmitz F. H., Boxwell D. A. Hight-speed helicopter impulsive noise // 32nd Annual National Forum AHS, Preprint, N 1004. 1976.
13. Баскин В. Э. К линейной теории нестационарного движения газа под действием непотенциальных внешних сил // Изв. АН СССР. МЖГ. 1969. № 4.
14. Белоцерковский С.М., Локтев Б.Е., Ништ М.И. Исследование на ЭВМ аэродинамических и аэроупругих характеристик винтов вертолетов. М., Машиностроение, 1992.
15. Крицкий Б.С. Математическая модель аэродинамики винтокрылого летательного аппарата // Труды ЦАГИ. – 2002. Вып. № 2655