

# **КОНКУРСНАЯ РАБОТА**

**в номинации: «Лучший инновационный проект»**

## **РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО РУЛЕВОГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА АНСАТ**

### **От ФАУ «ЦАГИ»:**

Миргазов Руслан Миннхатович

Крымский Владимир Сергеевич

Анимица Владимир Антонович

Егоров Сергей Витальевич

Ланцов Алексей Юрьевич

Никольский Александр Александрович

### **От АО «Казанский вертолетный завод»:**

Гарипов Алексей Олегович

Салдаев Михаил Александрович

Пантюхин Константин Николаевич

Калинин Дмитрий Александрович

Еремин Владимир Анатольевич

## Введение

Вертолет АНСАТ является единственным серийно выпускающимся отечественным вертолетом легкого класса, который применяется для решения широкого круга задач: доставки грузов, перевозки пассажиров, проведения поисково-спасательных операций, оказания экстренной медицинской помощи, обучения летчиков.

Для повышения безопасности полетов и эффективности применения вертолета АНСАТ в первую очередь необходимо улучшение его ЛТХ за счет аэродинамического совершенствования агрегатов винтовой системы. С этой целью по заказу АО «Казанский вертолетный завод» в ФАУ «ЦАГИ» была разработана перспективная аэродинамическая компоновка лопастей рулевого винта (ЛРВ) вертолета АНСАТ. ЛРВ новой компоновки существенно отличались от серийных ЛРВ набором профилей ЦАГИ-4, наличием нелинейной крутки, увеличенной хордой и специальной концевой частью. АО «Казанский вертолетный завод» на базе этой компоновки спроектировал и изготовил комплект перспективных лопастей РВ. Для подтверждения улучшения аэродинамических характеристик РВ АНСАТ перспективной аэродинамической компоновки лопастей АО «Казанский вертолетный завод» разработал, изготовил и передал в ФАУ «ЦАГИ» для испытаний перспективный и контрольный серийный РВ. В данной работе представлены результаты разработки, создания, сравнительных аэродинамических испытаний двух компоновок РВ, а также результаты предварительных расчетов и испытаний лопасти на статическую прочность.

## 1 Разработка, создание и прочностные испытания перспективного РВ

По заказу АО «Казанский вертолетный завод» в ФАУ «ЦАГИ» была разработана перспективная аэродинамическая компоновка ЛРВ вертолета АНСАТ. ЛРВ новой компоновки существенно отличались от серийных ЛРВ набором профилей ЦАГИ-4, наличием нелинейной крутки, увеличенной хордой и специальной концевой частью. На основе разработанной в ФАУ «ЦАГИ» аэродинамической компоновки коллективом ОКБ АО «Казанский вертолетный завод» разработана упруго-массовая компоновка лопасти РВ. Определена технология изготовления – метод одношагового формования, которая обеспечивает повышение качества поверхности и сокращает сроки изготовления. В конструкцию лопасти включены нагревательные наклейки, входящие в противообледенительную систему. По результатам отработки технологии изготовления лопастей рулевого винта были изготовлены образцы для испытаний, проведены расчеты статической прочности и, испытания на статическую прочность.



Рисунок 1 – Общий вид перспективной лопасти РВ

На основании разработанных специалистами ОКБ АО «Казанский вертолетный завод» упруго-массовых характеристик лопасти РВ, выполнены расчеты частотных характеристик для 2-х вариантов крепления лопасти к втулке: жесткого и шарнирного. Результаты расчета частот собственных колебаний ЛРВ представлены на рисунках 2 и 3.

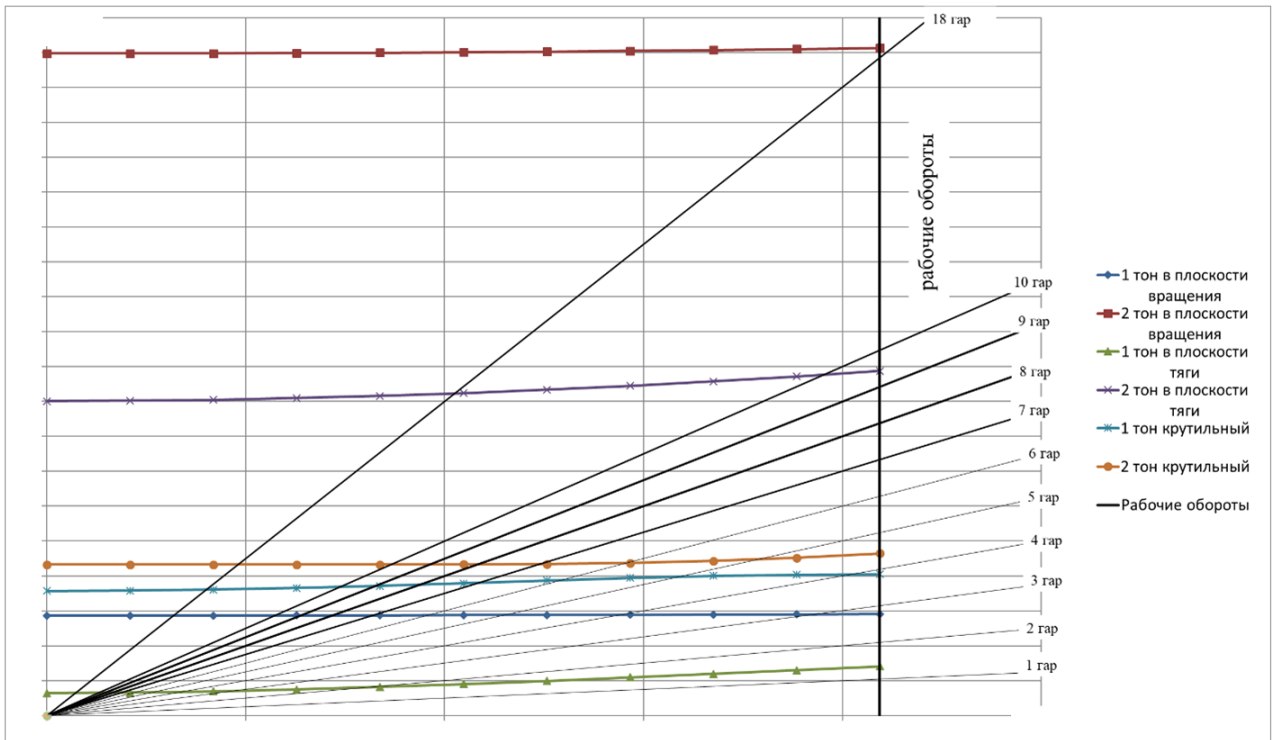


Рисунок 2 – Резонансная диаграмма перспективной лопасти РВ (жесткое крепление)

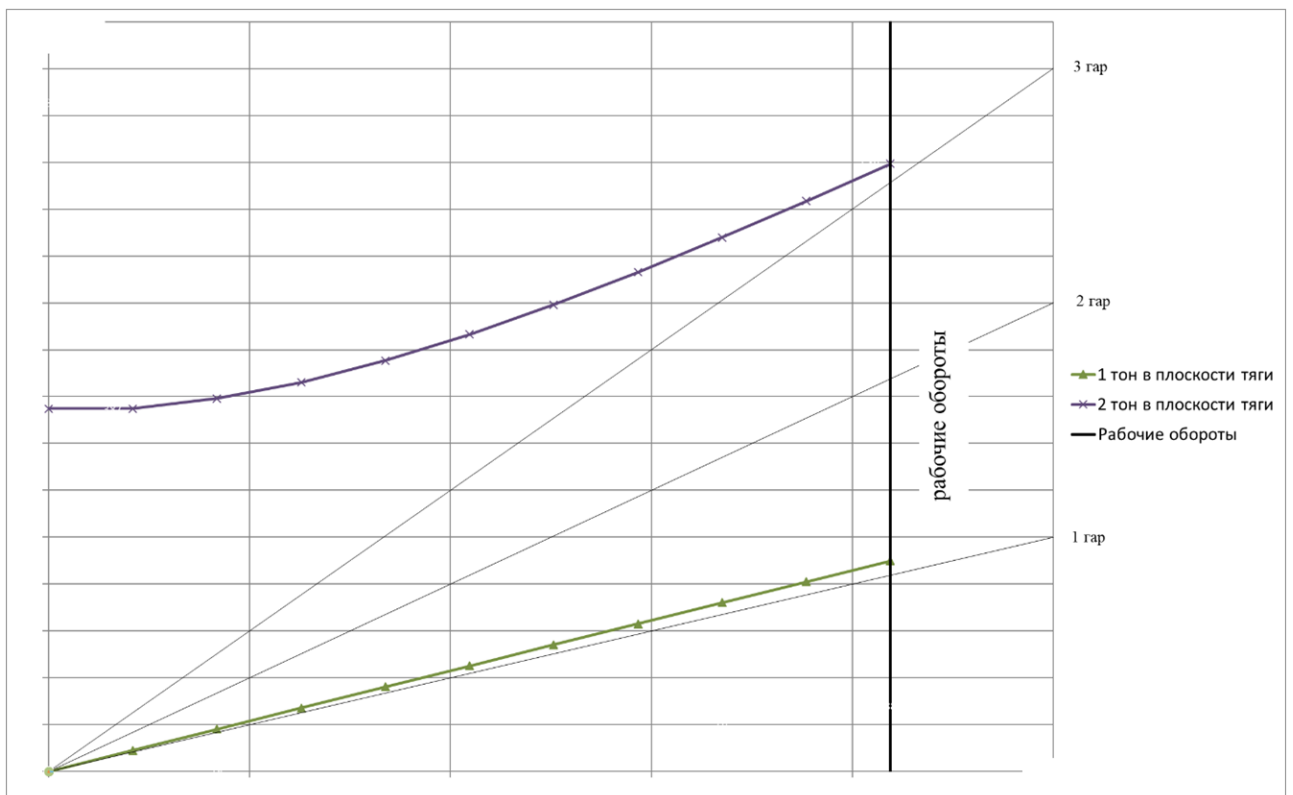


Рисунок 3 – Резонансная диаграмма перспективной лопасти РВ (шарнирное крепление)

В результате выполненных расчетов резонансных диаграмм перспективного РВ в вариантах жесткого и шарнирного крепления лопасти к втулке РВ установлено, что в рабочем диапазоне частот вращения РВ резонансы отсутствуют.

Далее были проведены расчеты статической прочности перспективного РВ. Расчетные значения запасов прочности расчетной модели перспективной лопасти РВ представлены на рисунках 4 и 5.

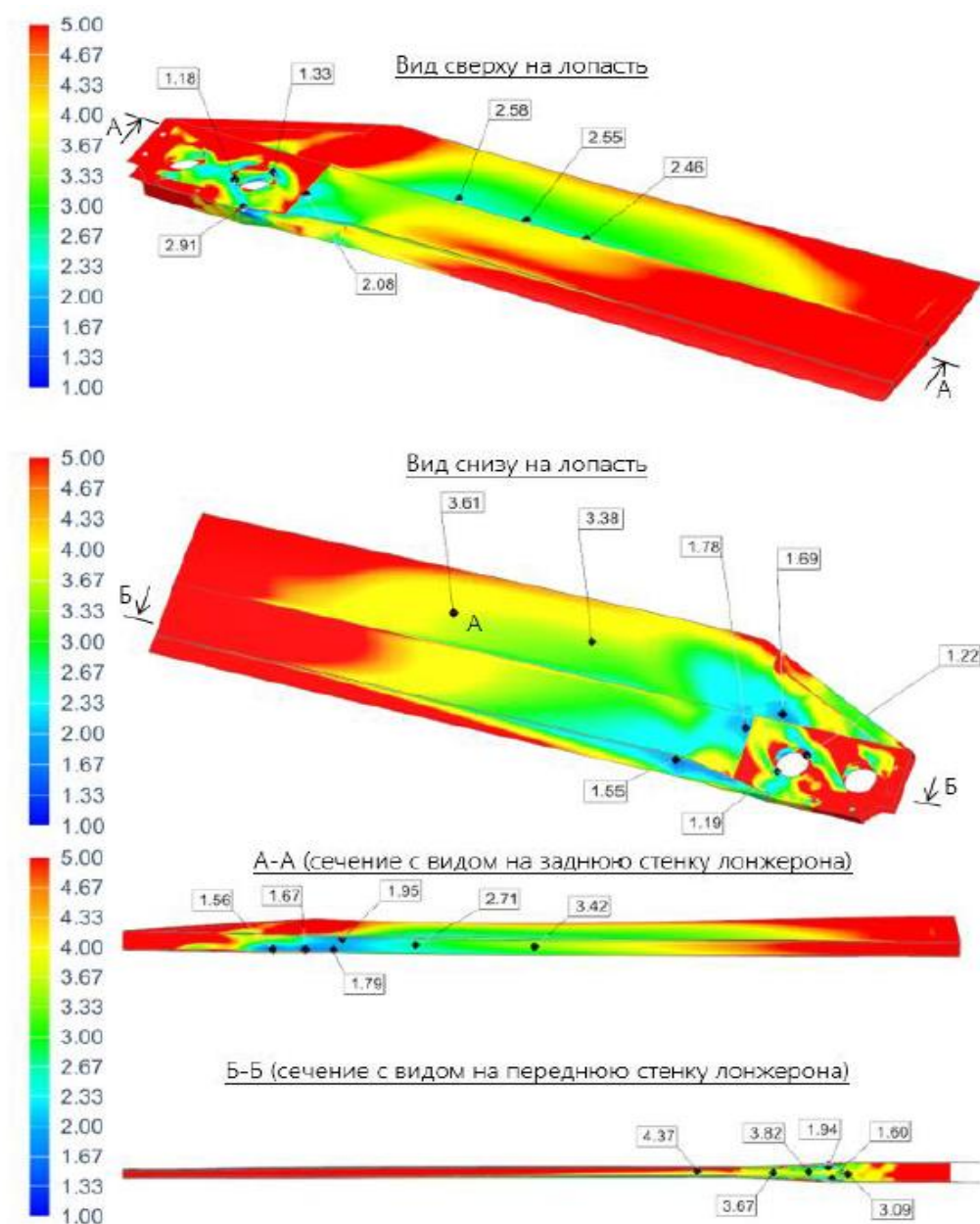


Рисунок 4 – Распределение коэффициентов запаса прочности конструкции перспективной лопасти РВ (расчетный случай – максимальные полетные нагрузки)

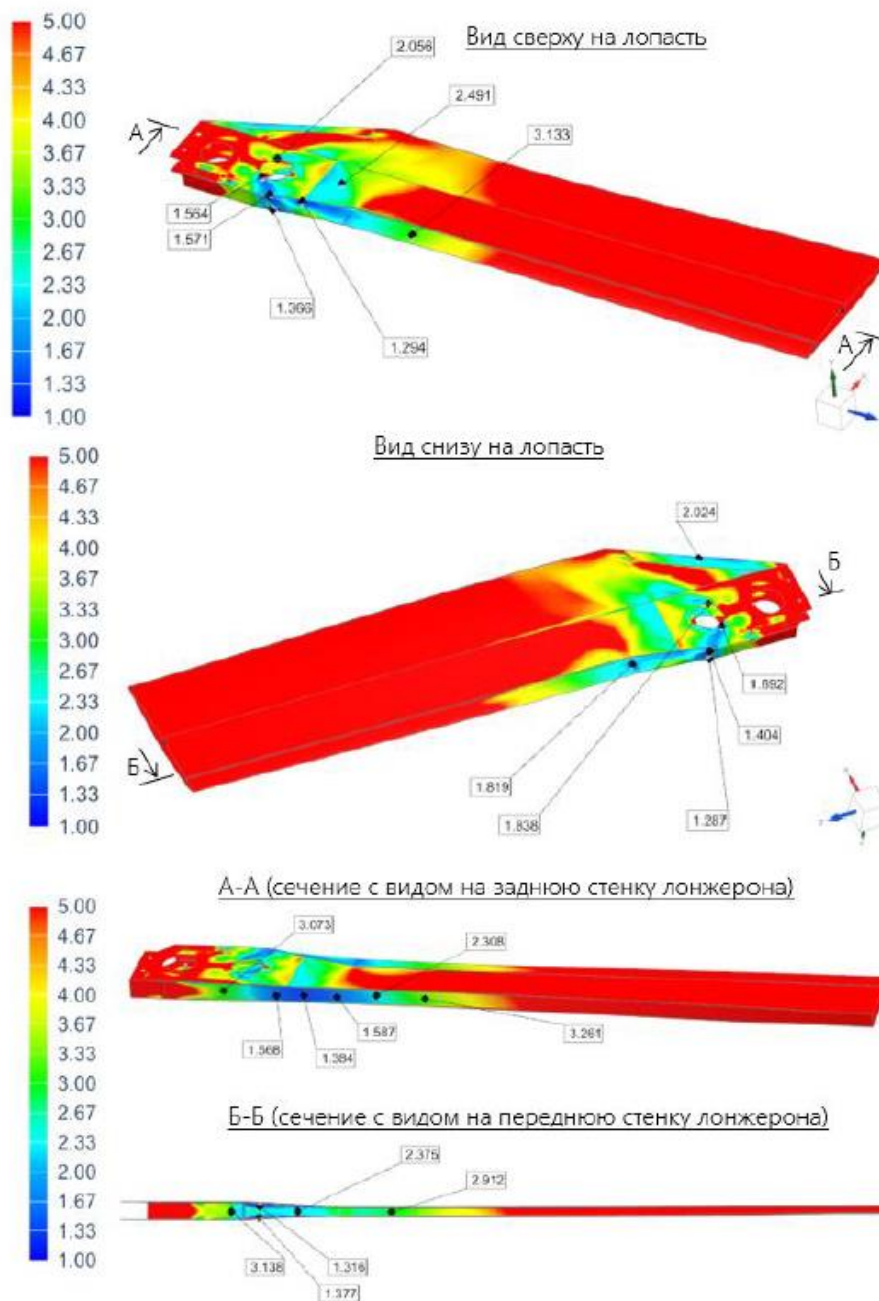


Рисунок 5 – Распределение коэффициентов запаса прочности конструкции перспективной лопасти РВ (расчетный случай – максимальная центробежная сила)

По результатам выполненных расчетов установлено, что статическая прочность перспективного РВ в рассматриваемых расчетных случаях достаточна.

Далее были проведены статические испытания образца перспективного РВ.

Стенд для испытаний представляет собой конструкцию, смонтированную на силовом полу зала лаборатории прочности, позволяющую установить образец

рулевого винта согласно схеме, представленной на рисунке 6. Общий вид образца, установленного в стенде, представлен на рисунке 7.

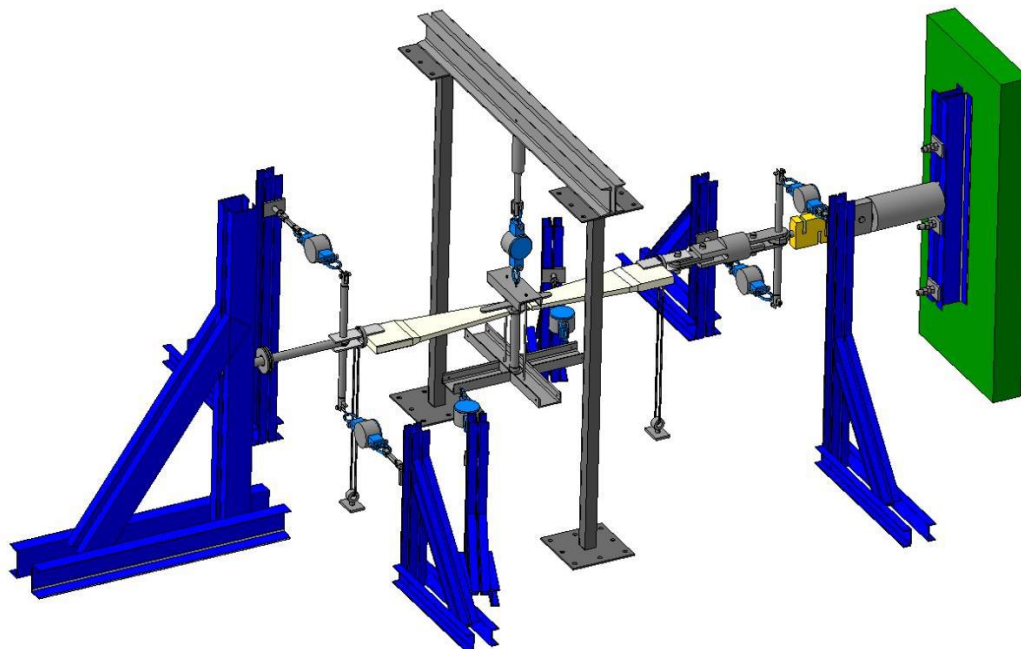


Рисунок 6 – Общий вид стенда для статических испытаний РВ



Рисунок 7 – Общий вид образца испытаний в стенде для испытаний на статическую прочность

Перед испытаниями на объекте испытаний была установлена система тензодатчиков, проведена градуировка измерительных каналов. Монтаж объекта испытаний на испытательный стенд был выполнен в соответствии с требованиями методики Программы испытаний.

В ходе испытаний объект испытаний выдержал без разрушения последовательно 67% и 100% расчетной нагрузки в рассматриваемых критических случаях нагружения, что подтверждает достаточную прочность конструкции перспективного РВ.

## **2 Аэродинамические испытания перспективного РВ**

После проведения прочностных испытаний перспективный РВ был передан в ФАУ «ЦАГИ» для дальнейших аэродинамических испытаний. При испытаниях использовалось следующее экспериментальное оборудование:

1. Аэродинамическая труба (АДТ) Т-104.
2. Информационно-измерительный комплекс АДТ Т-104.
3. Гоночная площадка НИЦ КИиРВКЛА.
4. Экспериментальная установка ВП-17.
5. Экспериментальная установка ВП-19.
6. Информационно-измерительные комплексы и системы управления экспериментальными установками ВП-17, ВП-19.
7. Системы управления и приводов электродвигателей установок ВП-17, ВП-19.
8. Информационно-измерительный комплекс для регистрации измеряемых параметров ВП-17 и ВП-19.

На рисунках 8 и 9 показаны общие виды экспериментальных установок ВП-17 и ВП-19.



Рисунок 8 – Общий вид экспериментальной установки ВП-17 на гоночной площадке НИЦ КИиРВКЛА ЦАГИ



Рисунок 9 – Общий вид экспериментальной установки ВП-19 на гоночной площадке НИЦ КИиРВКЛА ЦАГИ

В качестве объектов испытаний использовались:

**1. Натурный серийный РВ** вертолета АНСАТ (рисунок 10), состоящий из втулки на совмещенном горизонтальном шарнире и 2-х серийных лопастей РВ.

Параметры серийного РВ:

- диаметр, $D_{РВ}$	2,1 м
- хорда лопасти, $b$	0,223 м
- количество лопастей, $k$	2
- коэффициент заполнения РВ, $\sigma$	0,135
- форма лопасти в плане	прямоугольная
- профили лопастей серии	NACA 23012



Рисунок 10 – Натурный серийный РВ вертолета АНСАТ

**2. Перспективный РВ** вертолета АНСАТ (рисунок 11), состоящий из втулки на совмещенном горизонтальном шарнире и 2-х лопастей усовершенствованной аэродинамической компоновки.

Параметры перспективного РВ:

- диаметр, $D_{РВ}$	2,2 м
- хорда лопасти, $b$	0,241 м
- количество лопастей, $k$	2
- коэффициент заполнения РВ, $\sigma$	0,140
- форма лопасти в плане	прямоугольная
- профили лопастей серии	ЦАГИ-4



Рисунок 11 – Перспективный РВ

Далее были проведены сравнительные испытания двух РВ АНСАТ в АДТ Т-104 на установке ВП-17. Общий вид экспериментальной установки ВП-17 в АДТ Т-104 показан на рисунке 12.

Экспериментальная установка ВП-17 была установлена на аэродинамические весы АВ-104 АДТ Т-104 так, чтобы РВ находился в ядре воздушного потока при всех значениях углов скольжения. Углы скольжения экспериментальной установки изменялись при повороте всей кабины весов АВ-104 относительно вертикальной оси.



Рисунок 12 – Общий вид экспериментальной установки ВП-17 в АДТ Т-104

В процессе испытаний серийного и перспективного РВ определены их аэродинамические характеристики и условия нагружения.

Далее по следующим формулам рассчитывались коэффициенты аэродинамических характеристик РВ:

$$C_T = \frac{2T}{\rho(\omega R)^2 \pi R^2}; \quad (1)$$

$$m_k = \frac{2M_k}{\rho(\omega R)^2 \pi R^3}; \quad (2)$$

$$\eta_0 = \frac{C_T^{3/2}}{2m_k}; \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{kb}{\pi R}, \quad (4)$$

где:  $T$  – сила тяги винта;  $\rho$  – плотность воздуха;  $\omega$  – угловая скорость вращения винта;  $R$  – радиус винта;  $M_k$  – крутящий момент винта;  $\eta_o$  – относительный КПД рулевого винта на режиме висения,  $k$  – количество лопастей винта;  $b$  – хорда лопасти.

На рисунке 13 представлено сравнение относительного КПД РВ  $\eta_o$  серийного и перспективного РВ на режиме висения в зависимости от относительного коэффициента силы тяги РВ  $C_T/\sigma$ .

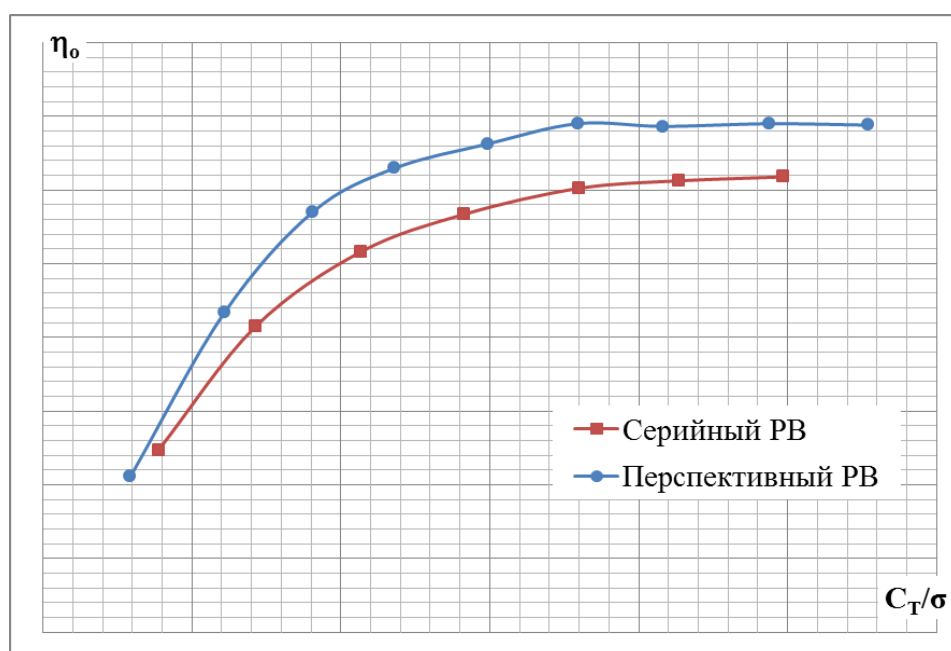


Рисунок 13 – Сравнение зависимостей относительного КПД  $\eta_o$  на режиме висения серийного и перспективного РВ от величин коэффициентов силы тяги РВ

Разница в относительном КПД и максимальном  $C_T/\sigma$  показывает существенное аэродинамическое превосходство перспективного РВ над серийным на режиме висения.

На рисунка 14–16 показаны зависимости относительного коэффициента силы тяги РВ  $C_T/\sigma$  от относительного коэффициента крутящего момента РВ  $m_k/\sigma$  при различных скоростях потока в АДТ Т-104.

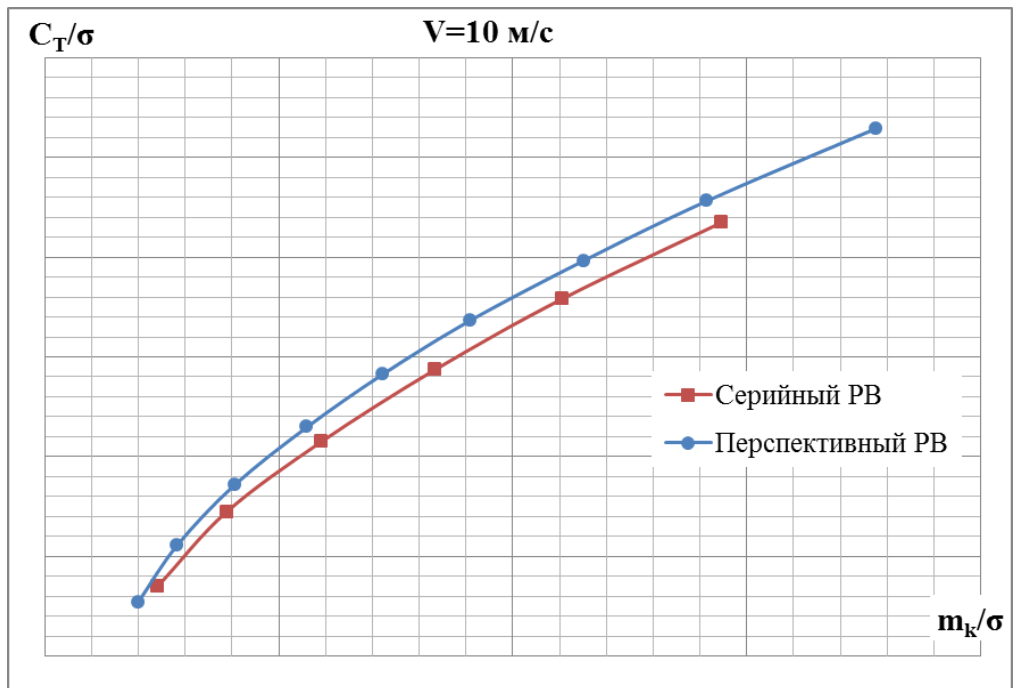


Рисунок 14 – Сравнение зависимостей  $C_T/\sigma$  от  $m_k/\sigma$  для серийного и перспективного РВ при скорости потока АДТ Т-104  $V=10 \text{ м/с}$

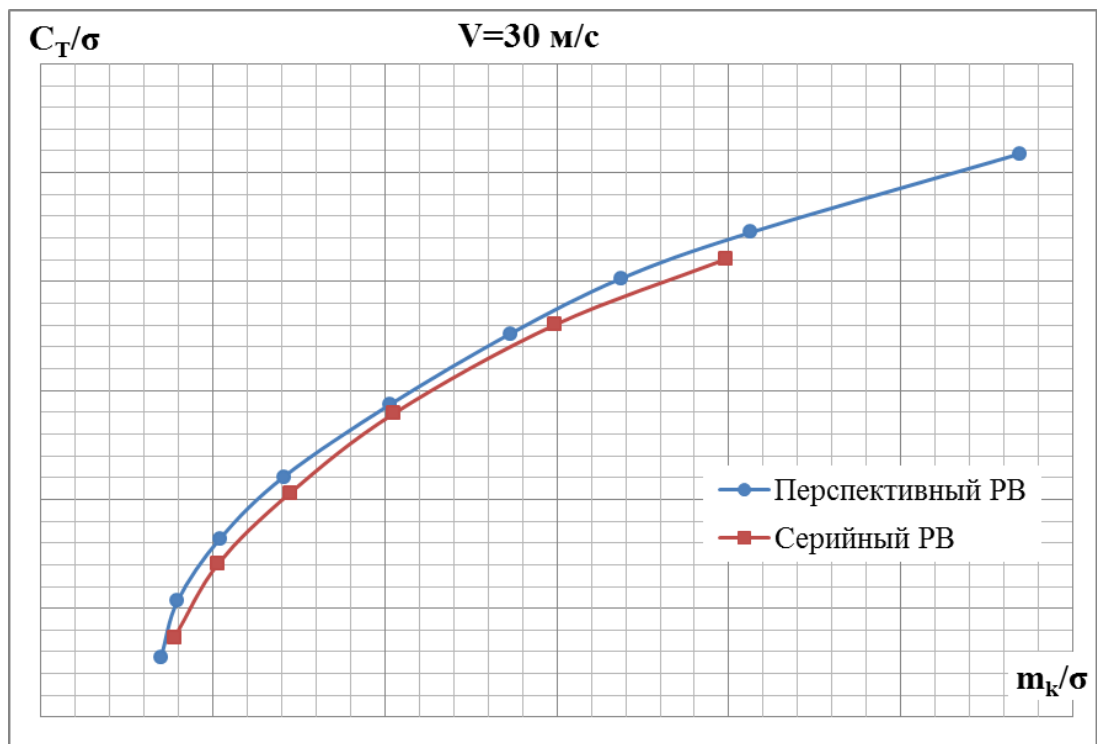


Рисунок 15 – Сравнение зависимостей  $C_T/\sigma$  от  $m_k/\sigma$  для серийного и перспективного РВ при скорости потока АДТ Т-104  $V=30 \text{ м/с}$

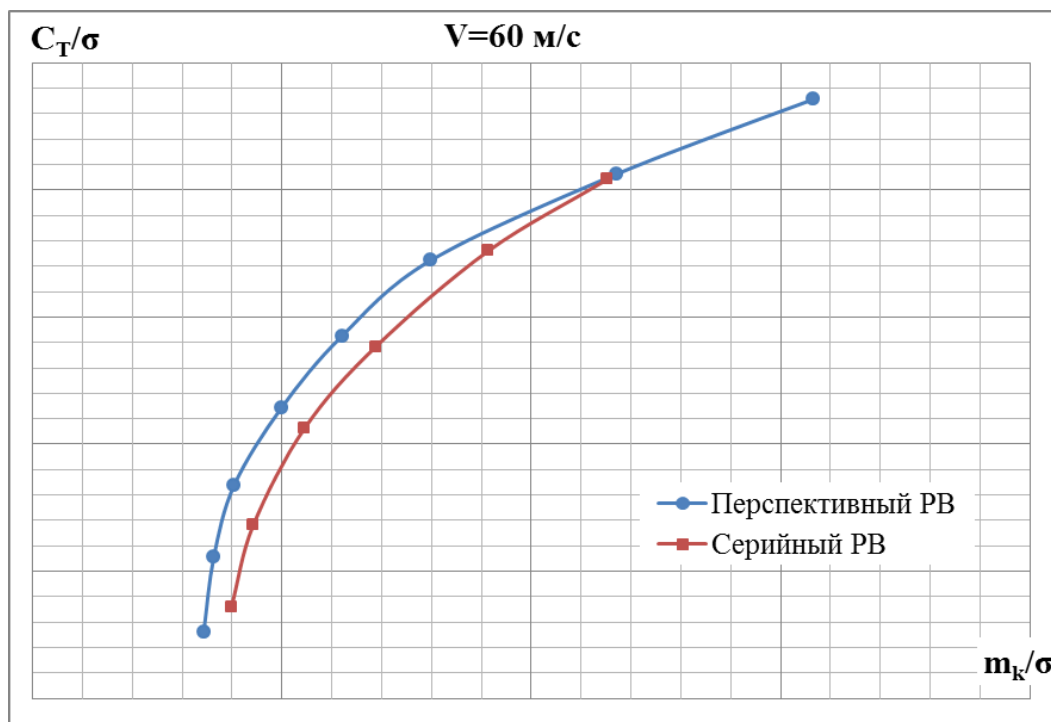


Рисунок 16 – Сравнение зависимостей  $C_T/\sigma$  от  $m_k/\sigma$  для серийного и перспективного РВ при скорости потока АДТ Т-104  $V=60$  м/с

На рисунке 17 показаны зависимости относительного коэффициента силы тяги РВ  $C_T/\sigma$  от относительного коэффициента крутящего момента РВ  $m_k/\sigma$  при различных углах скольжения  $\beta$  и скорости потока в АДТ Т-104  $V=80$  м/с.

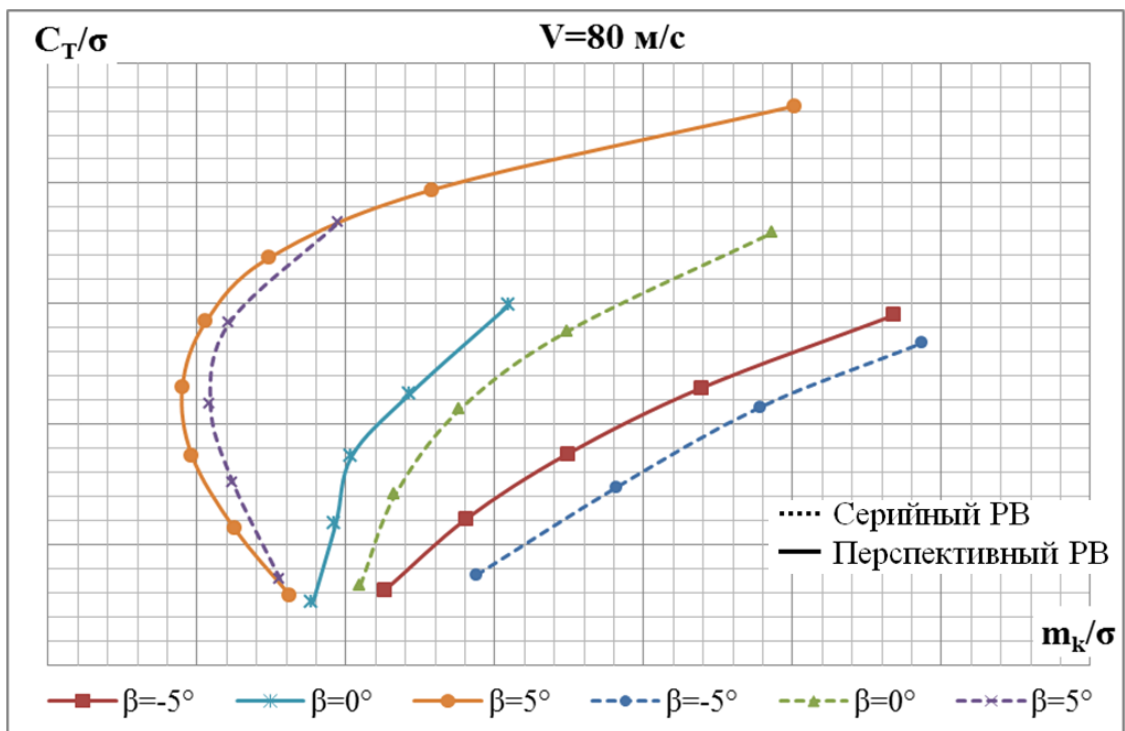


Рисунок 17 – Сравнение зависимостей  $C_T/\sigma$  от  $m_k/\sigma$  для серийного и перспективного РВ при скорости потока АДТ Т-104  $V=80$  м/с, при различных значениях углов скольжения вертолета

Результаты сравнительных испытаний показывают существенное аэродинамическое превосходство перспективного РВ над серийным на всех режимах полета.

Далее, с целью определения границы безопасных угловых скоростей вращения вертолета АНСАТ вокруг вертикальной оси были проведены испытания серийного и перспективного РВ на установке ВП-19.

На рисунке 18 показаны зависимости относительного коэффициента силы тяги перспективного РВ  $C_T/\sigma$  от угловой скорости вращения установки ВП-19  $\Omega_y$  при различных углах шага РВ.

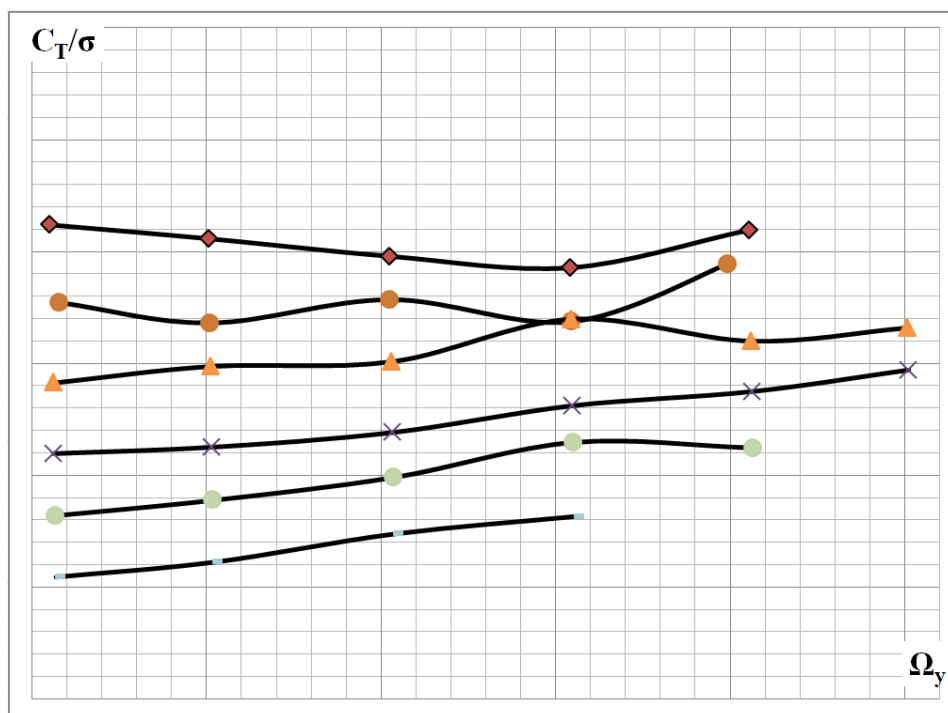


Рисунок 18 – Зависимости  $C_T/\sigma$  перспективного РВ от угловой скорости вращения установки ВП-19  $\Omega_y$  при различных углах шага РВ

Результаты испытаний на установке ВП-19 подтвердили значительное повышение запасов путевого управления вертолета АНСАТ за счет применения перспективного РВ, что должно привести к повышению безопасности полетов вертолета.

### 3 Выводы

На базе вертолетных профилей серии ЦАГИ-4 разработана перспективная аэродинамическая компоновка и на ее основе – конструкция перспективной лопасти РВ вертолета АНСАТ.

Результаты расчетов статической прочности перспективного РВ показали его достаточную прочность, что было подтверждено испытаниями, в ходе которых объект испытаний выдержал без разрушения 67% и 100% расчетной нагрузки.

В результате выполненных расчетов резонансных диаграмм перспективного РВ в вариантах жесткого и шарнирного крепления лопасти к втулке РВ установлено, что в рабочем диапазоне частот вращения РВ резонансы отсутствуют, что в дальнейшем было подтверждено при испытаниях на гоночной площадке.

На первом этапе аэродинамических испытаний проведены испытания перспективного и серийного РВ на различных режимах: висения с различными величинами и направлениями ветра, горизонтального полета на различных скоростях и углах скольжения. По результатам проведенных испытаний максимальный относительный КПД перспективного РВ АНСАТ на режиме висения значительно превзошел серийный. Величина максимальной тяги перспективного РВ на режиме висения также значительно выше серийного РВ. На режимах горизонтального полета перспективный РВ показал существенное повышение максимальных значений сил тяги и значительное снижение потребной мощности при одинаковых значениях силы тяги РВ. Таким образом, результаты испытаний в аэродинамической трубе подтвердили существенное аэродинамическое превосходство перспективного РВ над серийным как на режимах висения, так и в горизонтальном полете.

На втором этапе аэродинамических испытаний проведены испытания перспективного и серийного РВ на режиме неуправляемого вращения вертолета вокруг вертикальной оси с целью определения границы безопасных режимов

полета при вращении вертолета. В результате испытаний было показано существенное аэродинамическое превосходство перспективного РВ над серийным на режимах вращения вертолета вокруг вертикальной оси. Результаты испытаний подтвердили значительное повышение запасов путевого управления модернизированного вертолета АНСАТ с перспективным РВ за счет применения в лопастях РВ перспективной аэродинамической компоновки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Экспериментальные исследования по аэродинамике вертолета / В.Ф. Антропов, Г.Б. Бураков, А.С. Дьяченко и др.; ред. А.К. Мартынов. 2-е изд. – М. : Машиностроение, 1980. – 240 с.
2. А.К. Мартынов. Экспериментальная аэродинамика. М. : Государственное издательство оборонной промышленности, 1950. – 478 с.
3. Испытания натурного РВ вертолета АНСАТ с лопастями усовершенствованной аэродинамической компоновки для определения аэродинамических, аэроакустических (на гоночной площадке НИО-5 ЦАГИ) характеристик и нагрузок на режимах висения, набора высоты и поступательного установившегося полёта: Отчет об ОКР: Инв. № 05-2413 ДСП; Договор № 5416 от 30.11.2020 г. между АО «Казанский вертолетный завод» и ФАУ «ЦАГИ»; рук. Р.М. Миргазов; исполн.: В.С. Крымский, А.Ю. Ланцов, М.М. Еремин, М.Ю. Зайцев и др. – Жуковский, 2022. – 288 с. – Для служеб. пользования.
4. Испытания натурного РВ вертолета АНСАТ с лопастями усовершенствованной аэродинамической компоновки для определения аэродинамических характеристик и нагрузок на режиме вращения вертолета: Отчет о НИР: Инв. № 05-2435 ДСП; Договор № 5416 от 30.11.2020 г. между АО «Казанский вертолетный завод» и ФАУ «ЦАГИ»; рук. Р.М. Миргазов; исполн.: В.С. Крымский, В.А. Анимица, В.А. Леонтьев, С.В. Егоров, А.Ю. Ланцов, и др. – Жуковский, 2023. – 62 с. – Конфиденциально.
5. Техническая справка №ТС-346,3950 РД-2019 Расчет резонансных диаграмм лопасти рулевого винта АНСАТ.
6. РР.94.1.АНС-М.346.3950.ГИ.1 Расчет статической прочности рулевого винта.
7. Отчет №2416 проведение статических испытаний образца рулевого винта вертолета АНСАТ.