

УДК 629.735.33

## **Численное моделирование интерференции между несущим и рулевым винтами вертолета на режиме горизонтального полета со скольжением**

**Игнаткин Ю. М.\*, Макеев П. В.\*\*, Шомов А. И.\*\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,  
Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: k102@mai.ru*

*\*\*e-mail: vaultcity13@gmail.com*

*\*\*\*e-mail: shomov\_aleksandr@mail.ru*

### **Аннотация**

Работа посвящена исследованию аэродинамических характеристик комбинации несущего и рулевого винтов вертолета классической одновинтовой схемы. Используется нелинейная лопастная вихревая модель винта со свободным диффундирующим вихревым следом, разработанная на кафедре «Проектирование вертолетов» МАИ. Рассмотрены режимы горизонтального полета вертолета с небольшими скоростями со скольжением. Рассчитаны аэродинамические характеристики винтов, а также получены картины визуализации вихревого следа и обтекания винтов с учетом интерференции. Проведена оценка полученных результатов с точки зрения обеспечения путевого управления вертолета.

**Ключевые слова:** несущий винт, рулевой винт, численные методы аэродинамики винта, нелинейная вихревая модель, горизонтальный полет со скольжением, интерференция между винтами, аэродинамические характеристики

## Введение

Вопросы обеспечения безопасности полета одновинтового вертолета с попаданием рулевого винта в критические режимы работы, когда резко падает его тяга и эффективность как органа путевого управления, являются весьма актуальными, поскольку большой процент авиационных происшествий (АП) на вертолетах связан с ошибками экипажа при пилотировании вертолета в сложных ситуациях. Согласно представленному в МАК [8] анализу АП на вертолетах за 2005-2010г в гражданской авиации 73,5% АП связано с ошибками экипажа. Европейская группа по безопасности полетов вертолетов в результате анализа АП выделила четыре ситуации, при попадании в которые летчики наиболее часто не смогли выбрать правильную стратегию управления:

1. Дезориентация пилота в сложных метеорологических условиях.
2. Попадание несущего винта в режим «вихревого кольца».
3. Потеря эффективности рулевого винта, включая его попадание в режим «вихревого кольца».
4. Переворот вертолета при маневрировании на земле или вблизи препятствий.

Анализ сложных критических ситуаций резкого снижения эффективности работы рулевых винтов, полученных на основе результатов летных испытаний вертолетов, изложен в работах [5, 7, 10, 14]. В работе [6] представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований интерференции несущего и рулевого винтов, выполненных на основе полей индуктивных скоростей, замеренных в эксперименте в месте расположения рулевого винта.

Развитие вычислительной техники, а также разработка нелинейных лопастных вихревых моделей винтов позволили реализовать на практике расчетные исследования интерференции несущего и рулевого винтов. Результаты первых отечественных исследований в этом направлении выполнены на базе нелинейной нестационарной лопастной вихревой

модели винта, разработанной в ВВИА им. Н.Е. Жуковского и изложены в монографии [16].

Интерференция несущего и рулевого винтов при малых поступательных скоростях горизонтального полета вертолета со скольжением связана с особенностями формирования вихревого следа за винтом. Результаты экспериментальных [9, 13] и теоретических [11, 15] исследований показали, что при косом обтекании вихревая система несущего винта уже на малых скоростях полета преобразуется в систему, похожую на вихревую систему крыла, когда на краях этой системы образуются мощные вторичные вихревые жгуты. Формирование этих вихревых жгутов отмечено В.Э.Баскиным при расчете нелинейного вихревого следа за винтом [15]. В работе [11] определены основные параметры этих вторичных вихревых жгутов большой интенсивности для различных режимов работы винта. Расчеты выполнены на основе обобщенной дисковой вихревой модели несущего винта, разработанной В.И. Шайдаковым. В частности, установлено, что углы наклона вихревых жгутов по отношению к вектору скорости невозмущенного потока существенно меньше, чем углы наклона скошенного вихревого цилиндра в непосредственной близости от диска винта. Так же установлено, что циркуляция этих вихревых жгутов интенсивно возрастает на малых скоростях полета и достигает максимума при относительной скорости  $\tilde{V} \approx 1$  (соответствует  $\mu \approx 0,05$  при  $c_T \approx 0,01$ ), а затем, с ростом скорости, уменьшается (здесь  $\tilde{V} \approx V/v_{yB}$ , где  $v_{yB}$  - индуктивная скорость на режиме висения, вычисленная по теории идеального винта). Отмеченное свойство вихревой системы подтверждено в частности результатами летных испытаний по визуализации вихревых систем вертолетов Ми-4 и Ми-8, выполненных в ЛИИ [17], а также результатами модельных экспериментальных исследований по замеру индуктивных скоростей в следе за винтом [13].

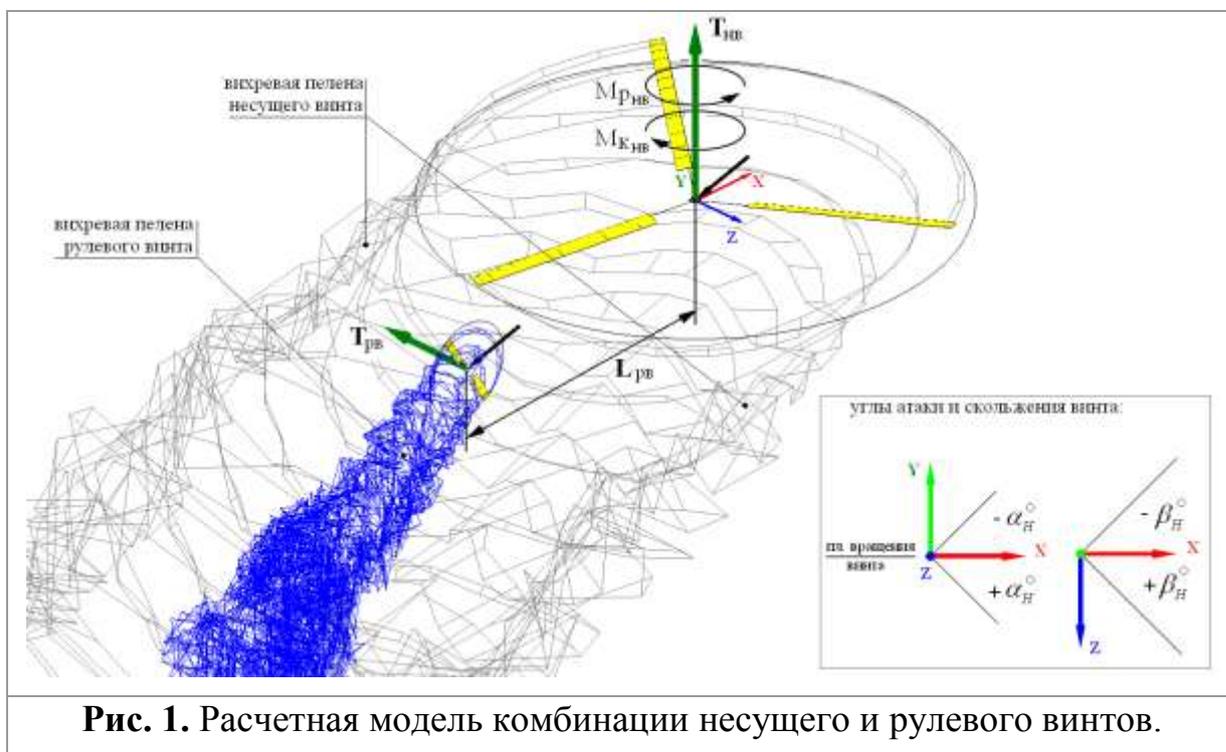
Данная статья посвящена численному исследованию индуктивного влияния нелинейного вихревого следа несущего винта на аэродинамические характеристики рулевого винта на режимах горизонтального полета вертолета с небольшими скоростями со скольжением.

Численные (расчетные) исследования выполнены на основе программного комплекса, разработанного на базе нелинейной лопастной вихревой модели винта со свободным диффундирующим следом [2, 3, 4].

В качестве объекта исследования рассматривается модель комбинации несущего и рулевого винтов вертолета Ми-2 [12].

### Расчетная модель несущего и рулевого винтов одновинтового вертолета.

На рис. 1 показана расчетная модель комбинации несущего и рулевого винтов вертолета Ми-2. Основные характеристики винтов представлены в табл. 1.

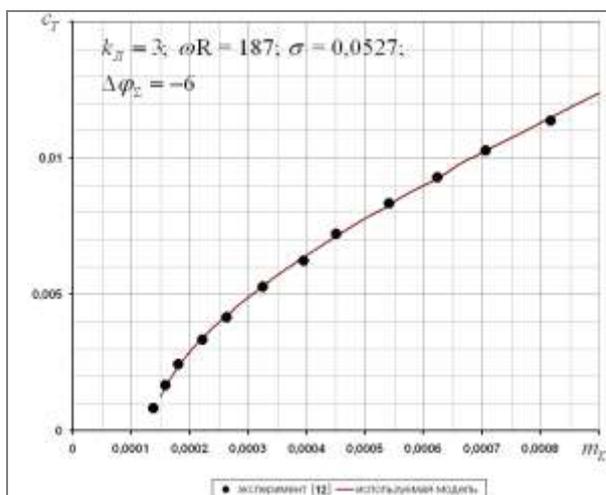


На рис. 2; 3. представлены поляры несущего и рулевого винтов. Наблюдается удовлетворительное согласование результатов расчетов и экспериментальных данных, что подтверждает достоверность

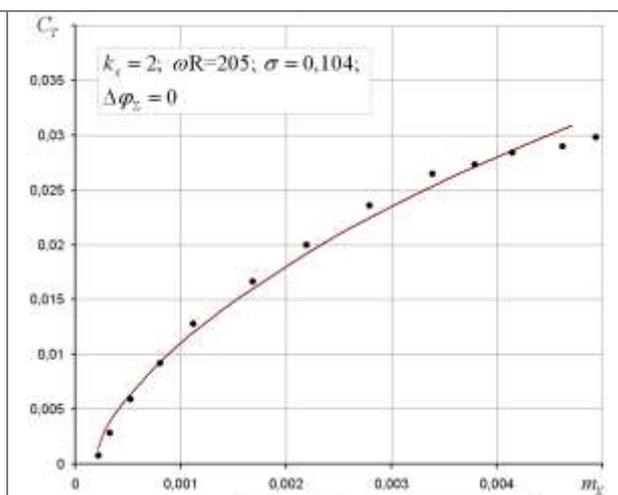
применяемой модели. В расчетах несущий винт моделировался с учетом колебаний лопастей относительно горизонтальных шарниров, а рулевой винт считался абсолютно жестким.

Табл. 1. Основные характеристики винтов.			
Винт	несущий	рулевой	
Радиус винта, R	7,25	1,35	м
Количество лопастей, $k_L$	3	2	
Хорда лопасти, $b$	0,4	0,22	м
Заполнение винта, $\sigma$	0,0527	0,104	
Окружная скорость, $\omega R$	187	205	м/с
Профиль лопасти	NACA 230-12M	NACA 0012	
Крутка лопасти, $\Delta\varphi_\Sigma$	-6 (линейная)	0	град.
Форма лопасти	прямоугольная	прямоугольная	
Масса лопасти	55	3,4	кг
Относительный радиус ГШ	0,014	-	
Компенсатор взмаха	0,4	-	
Массовая характеристика	4,267	-	
Момент инерции относительно ГШ	965,3	-	$кг \cdot м^2$

Поскольку несущий и рулевой винты имеют различные размеры и окружную скорость вращения, то за время одного оборота рулевого винта (360 градусов) несущий винт рассматриваемого вертолета поворачивается на 63 градуса. Поэтому необходима увязка расчетного шага по времени для случая совместного расчета двух винтов. Расчетная модель была построена следующим образом: рулевой винт за один оборот делал 30 шагов по азимуту; а несущий винт за полный оборот делал 177 шагов по азимуту.



**Рис. 2.** Поляра несущего винта на висении.



**Рис. 3.** Поляра рулевого винта на висении.

Для уменьшения времени расчетов был применен прием, когда ячейки вихревой пелены несущего винта укрупнялись в процессе расчета таким образом, чтобы итоговое количество шагов (ячеек) для несущего винта составляло, как и для рулевого винта, 30 ячеек (шагов) за оборот.

Так же для ускорения расчетов в случае совместного расчета несущего и рулевого винта рулевой винт начинал работу не с начала расчета, а с момента выхода несущего винта на устойчивый режим (в среднем 8-14 оборотов, в зависимости от режима полета), когда за несущим винтом наблюдался устойчивый и достаточно протяженный вихревой след, а аэродинамические характеристики выходили «на полку». При этом рулевой винт рассчитывался на протяжении 17-18 оборотов, что соответствовало 3 оборотам несущего винта.

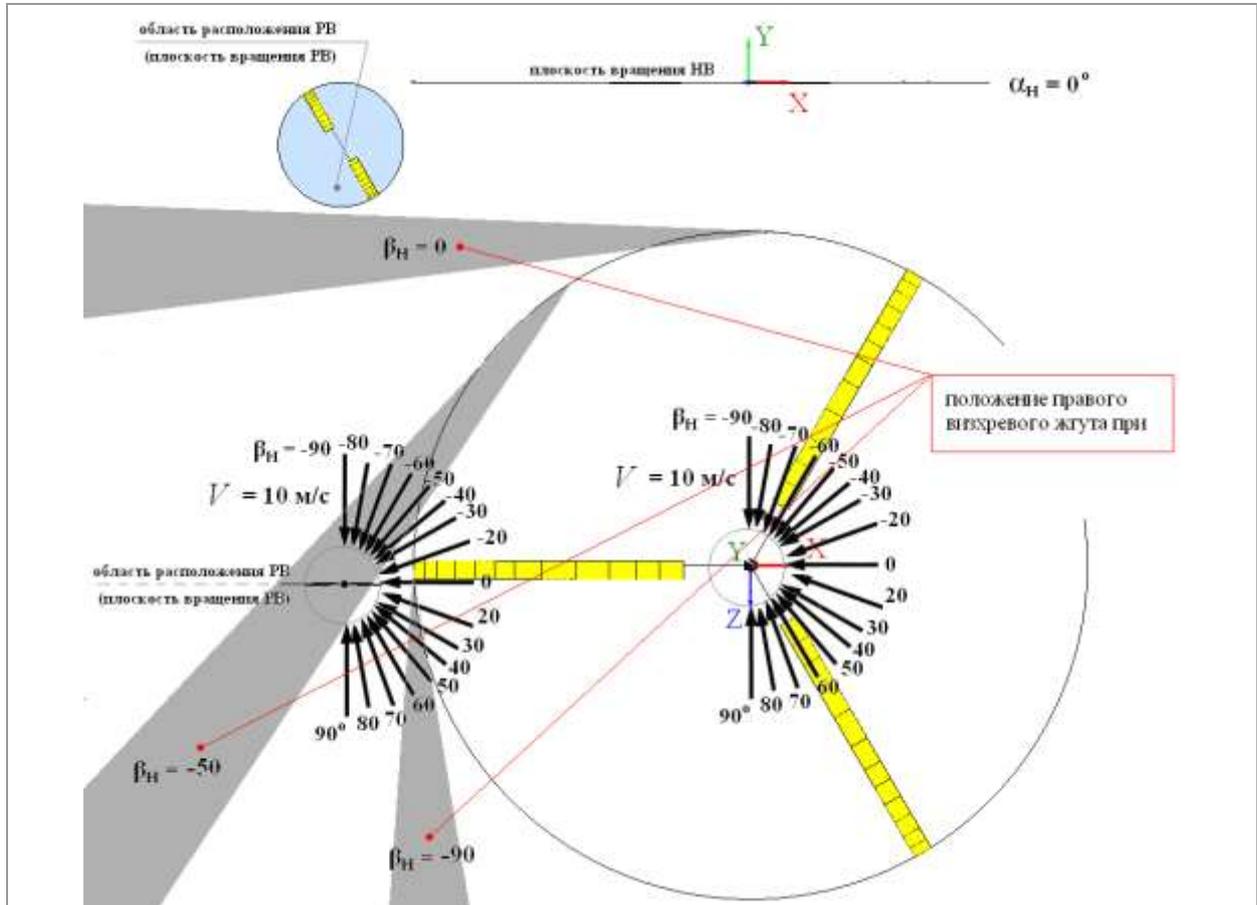
**Расчет интерференции несущего и рулевого винтов на режиме горизонтального полета со скоростью  $V = 10$  м/с со скольжением.**

Для расчетов комбинации НВ и РВ был выбран режим горизонтального полета вертолета ( $\alpha_n = 0^\circ$ ) со скоростью  $V = 10$  м/с ( $V_0/\omega R \approx 0,05$ ). Углы скольжения изменялись от  $\beta_n = -90^\circ$  до  $\beta_n = 90^\circ$  с шагом  $\Delta\beta_n = 10^\circ$ . Таким образом, всего было рассмотрено 17 расчетных режимов (см. таблицу 2 и рис. 4).

**Таблица 2.** Расчетные режимы.

№	$\alpha_n$ [град]	$V$ [м/с]	$\beta_n$ [град]
1.	0	10	-90
2.	0	10	-80
3.	0	10	-70
4.	0	10	-60
5.	0	10	-50
6.	0	10	-40
7.	0	10	-30
8.	0	10	-20
9.	0	10	0
10.	0	10	20
11.	0	10	30
12.	0	10	40

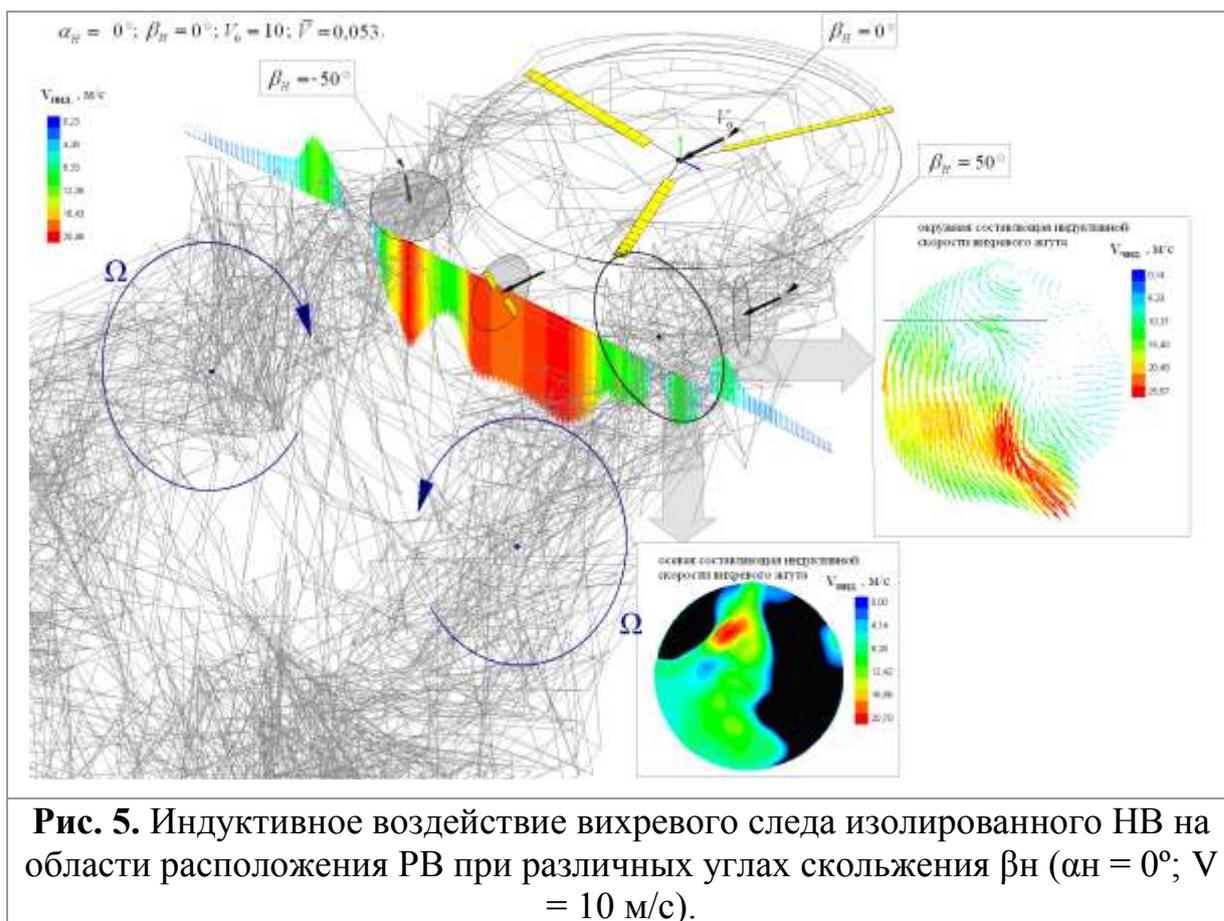
13.	0	10	50
14.	0	10	60
15.	0	10	70
16.	0	10	80
17.	0	10	90



**Рис. 4.** Направления вектора набегающего потока  $V$  при различных углах скольжения полета вертолета (различном направлении ветра).

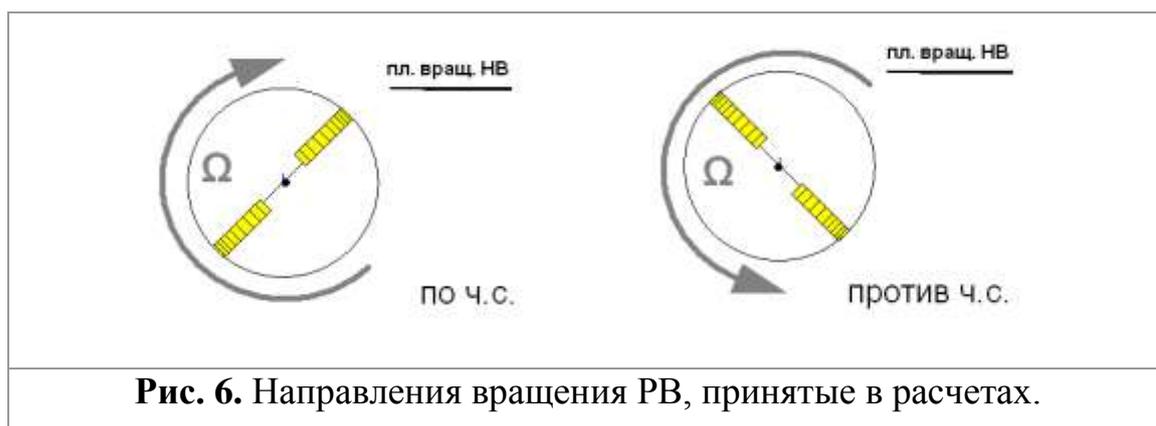
На рис. 5 представлен вихревой след изолированного НВ на режиме горизонтального полета со скоростью 10 м/с. Показаны только вихри, сходящие с концевых частей лопастей НВ. Хорошо видны мощные вихревые жгуты, в которые сворачиваются края вихревого следа. Здесь так же показаны эпюры индуктивных скоростей от вихревого следа НВ, из анализа которых можно судить о характере индуктивного воздействия вихревых жгутов на РВ. На рис. 5 представлена эпюра индуктивной скорости в плоскости, перпендикулярной вихревым жгутам. Наблюдается небольшой восходящий поток во внешней части и интенсивный нисходящий поток во внутренней (между жгутами), достигающей

величины 20 м/с. Непосредственно в районе вихревых жгутов этот поток, при попадании в него РВ, может вызывать изменение окружной скорости вращения РВ. Так же можно выделить мощный осевой индуктивный поток, направленный вдоль оси вихревого жгута (см. рис. 5), достигающий скорости 20 м/с, существенно изменяющий скорость потока в направлении, перпендикулярном плоскости диска РВ.



Из рис. 4 и рис. 5 видно, что при различных углах скольжения  $\beta_H$  рулевой винт занимает различное положение относительно вторичных вихревых жгутов. При этом в наибольшей степени РВ входит в область, занимаемую этими вихревыми жгутами при  $\beta_H = -50^\circ$  и  $\beta_H = 50^\circ$ , попадая в левый или правый вихревые жгуты, соответственно (см. рис. 5).

При моделировании интерференции НВ и РВ рассматривалось два варианта направления вращения РВ: «по часовой стрелке» (когда верхняя лопасть движется вперед) и «против часовой стрелки», когда верхняя лопасть движется назад (см. рис. 6).



### **Результаты расчета интерференции несущего и рулевого винтов на режиме горизонтального полета со скольжением.**

На рис. 7...21 для примера представлены результаты расчетов комбинации НВ и РВ на режиме горизонтального полета ( $\alpha_n = 0^\circ$ ;  $V = 10$  м/с) при значениях углов скольжения  $\beta_n = -90^\circ, -50^\circ, 0^\circ, 50^\circ, 90^\circ$ .

На рис. 7 показаны вихревые следы от НВ (серый цвет) и РВ (синий цвет), рассчитанные с учетом интерференции при  $\beta_n = -90^\circ$ , а на рис 8 вихревые следы изолированного РВ и РВ с учетом интерференции со стороны НВ при равных углах установки лопастей  $\varphi_7$ . Из формы вихревого следа изолированного РВ видно, что он обтекается набегающим потоком под отрицательным углом атаки (см. рис. 8), и работает на осевом режиме. При совместном расчете НВ и РВ удаленная часть вихревого следа РВ попадает в область расположения левого вихревого жгута НВ и, затягиваясь в него, деформируется. При этом ближняя к диску РВ часть вихревого следа остается практически не изменой.

На рис. 9, изображены зависимости тяг РВ в зависимости от числа оборотов РВ –  $n$ , для случаев изолированного винта, а также с учетом интерференции для двух направлений вращения. Видно, что индуктивное влияние вихревого следа НВ на данном режиме вызывает пульсации тяги РВ, при этом средние значения тяги сохраняются близкими к значениям, полученным для РВ при изолированной работе. При этом величина тяги РВ практически не зависит от направления его вращения. Эти результаты

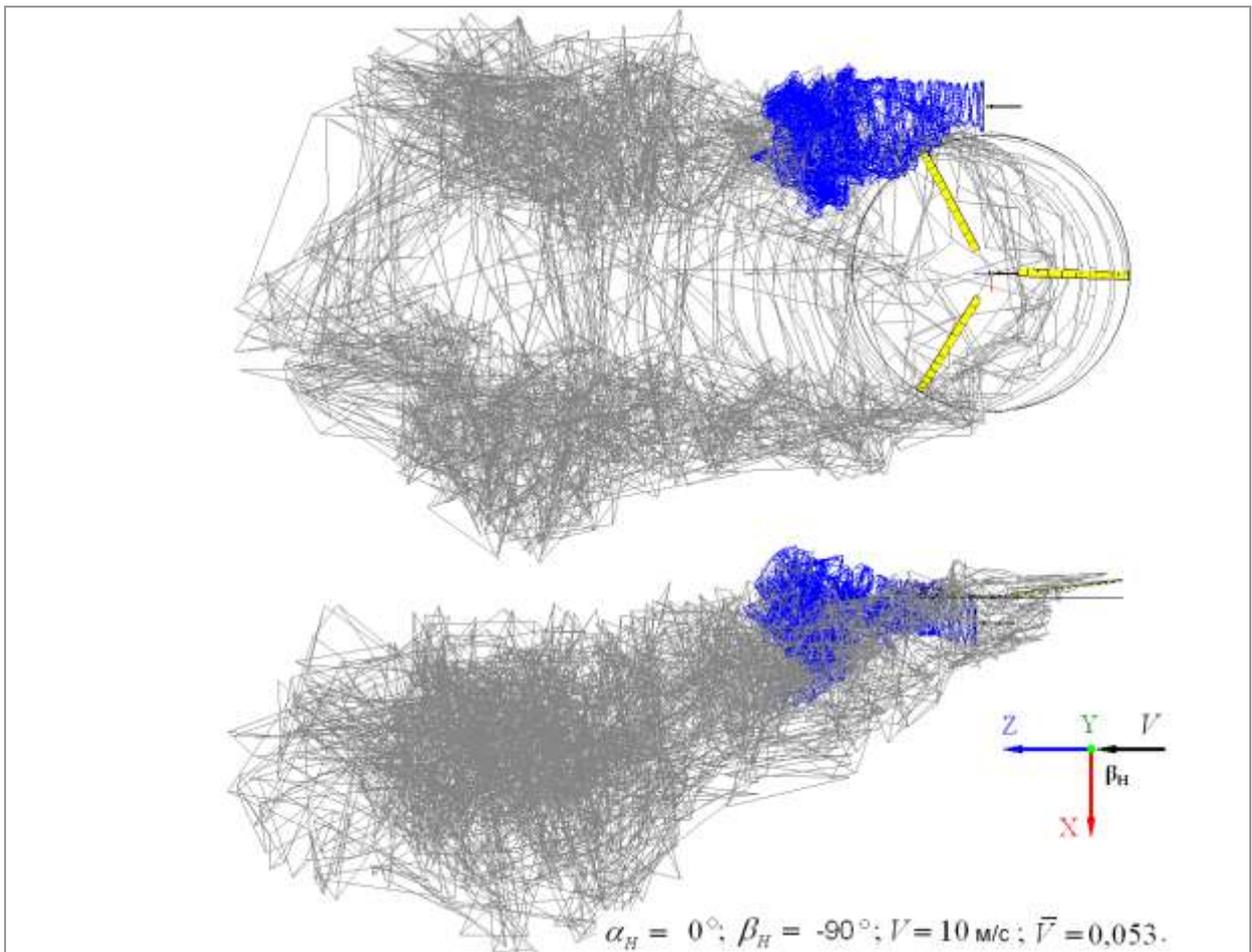
свидетельствует о том, что эффект интерференции на данном режиме незначителен, прежде всего, в силу удаленного расположения плоскости вращения РВ от вихревого следа НВ.

На рис. 10 показан вихревой след от НВ и РВ, рассчитанный при  $\beta_n = -50^\circ$ . На рис. 11. показаны вихревые следы изолированного РВ и РВ с учетом интерференции. Вихревой след РВ с учетом интерференции значительно деформирован, что ведет, как будет показано ниже, к существенному изменению аэродинамических характеристик РВ и значительным пульсациям его тяги. На рис. 12 представлены графики зависимости тяги РВ от числа его оборотов для случаев изолированного РВ и РВ с учетом интерференции при разном направлении вращения РВ. Видно, что интерференция оказывает отрицательный эффект на РВ, уменьшая его тягу на 26% (при направлении вращения РВ, когда верхняя лопасть идет вперед). При изменении направления вращения этот эффект преодолевается, что дает уже прирост тяги до 14%. Таким образом, разница в тягах при различном направлении вращения РВ достигает 40% .

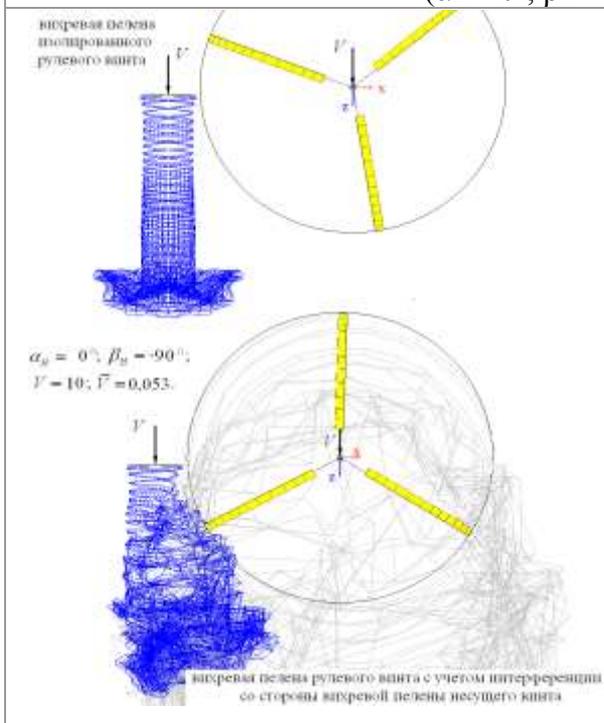
На рис. 13 показаны вихревые следы от НВ и РВ, рассчитанные при  $\beta_n = 0^\circ$ . На рис. 14 показаны вихревые следы изолированного РВ и РВ с учетом интерференции. Из рис. 13 видно, что рулевой винт на данном режиме занимает практически равноудаленное положение между правым и левым вихревыми жгутами НВ. При этом вихревой след РВ с учетом интерференции сильно скошен вниз из-за влияния на него индуктивного потока со стороны НВ (см. рис. 13, 14). На рис. 15 представлены графики зависимости тяги РВ от числа его оборотов для случаев изолированного РВ и РВ с учетом интерференции при разных направлениях его вращения. Видно что интерференция со стороны НВ оказывает положительный эффект на РВ, в обоих случаях увеличивая его тягу (до 15% при направлении вращения РВ, когда верхняя лопасть идет назад). Пульсации аэродинамических характеристик при этом незначительны.

На рис. 16 показаны вихревые следы от НВ и РВ рассчитанный при  $\beta_n = 50^\circ$ . На рис. 17. показаны вихревые следы изолированного РВ и РВ с учетом интерференции. На рис. 18 представлены графики зависимости тяги РВ от числа его оборотов. РВ на данном режиме обтекается под положительным углом атаки, находясь на режиме близком к «вихревому кольцу». Наблюдаются значительные пульсации тяги РВ. Видно что интерференция оказывает положительный эффект на РВ, увеличивая его тягу на 47% (при оптимальном, в данном случае, направлении вращения РВ) в сравнении с изолированным винтом при равных углах установки лопастей  $\varphi_7$ .

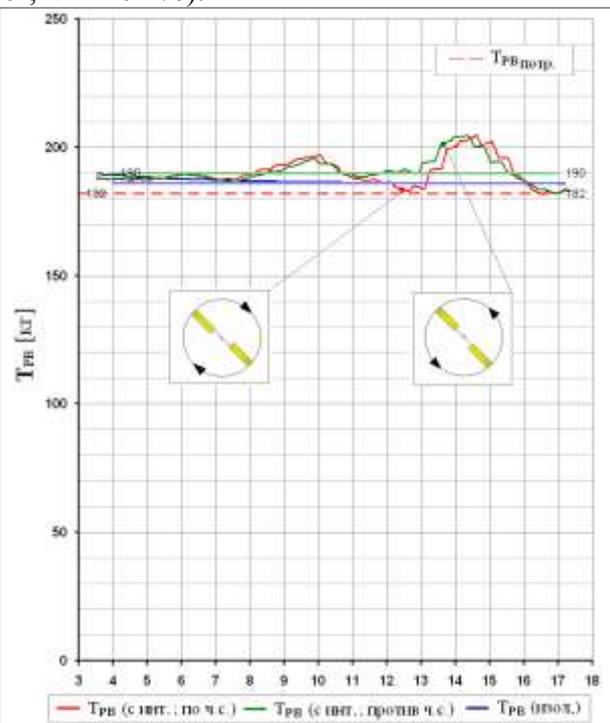
На рис. 19 показаны вихревые следы НВ и РВ для  $\beta_n = 90^\circ$ . При таком угле скольжения РВ работает на осевом режиме «вихревого кольца». Из рис. 20, где изображены вихревые следы РВ при изолированной работе и вихревой след РВ с учетом интерференции для двух направлений вращения, видно, что вихревой след РВ при расчете его с учетом интерференции, частично затягивается правым вихревым жгутом НВ. Таким образом, вихревой жгут НВ «отсасывает» часть вихревого следа РВ существенно деформируя его форму и, соответственно, меняя условия его работы. На графиках рис. 21 это изменение условия работы РВ в присутствии вихревого следа НВ отражается в резком изменении тяги в положительную сторону, до 42% в случае направления вращения РВ против часовой стрелки, в сравнении с тягой РВ при изолированной работе.



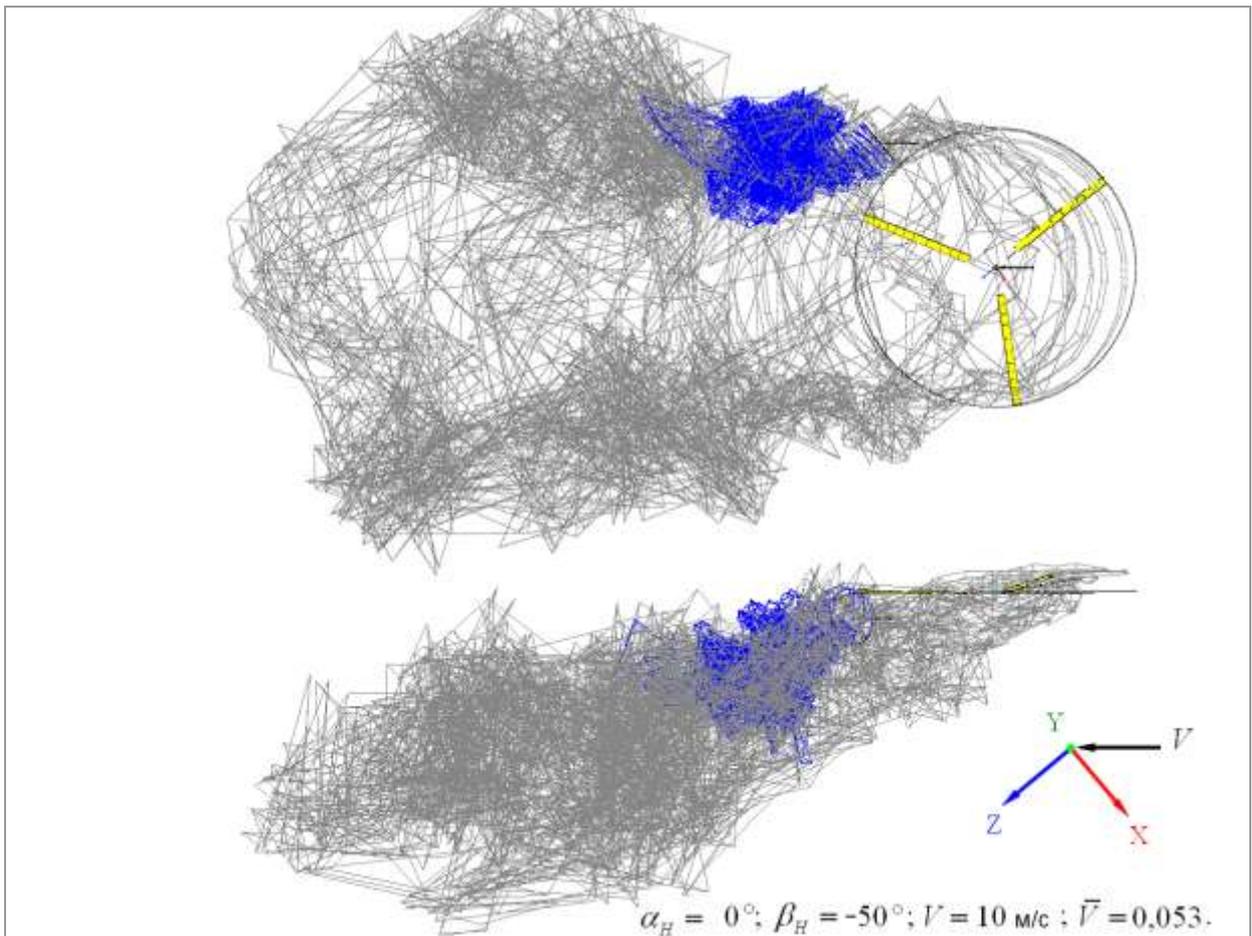
**Рис. 7.** Вихревые следы НВ и РВ с учетом интерференции ( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = -90^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



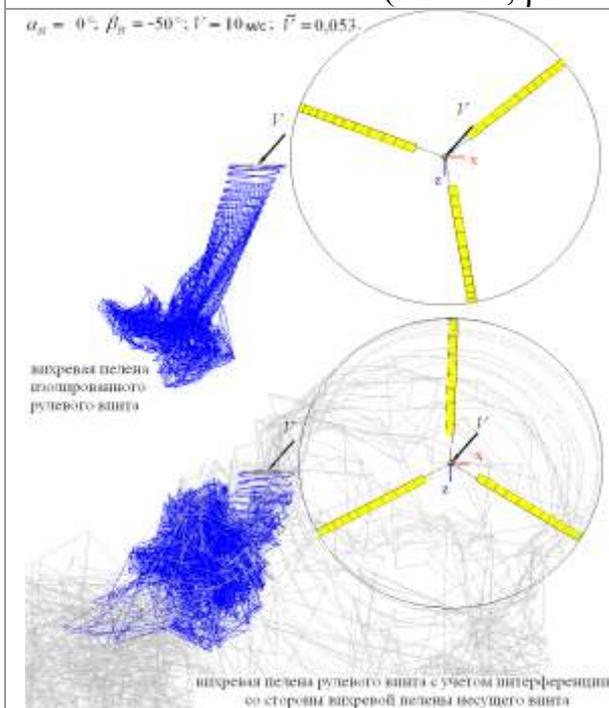
**Рис. 8.** Вихревые следы изолированного РВ и РВ с учетом интерференции от НВ ( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = -90^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



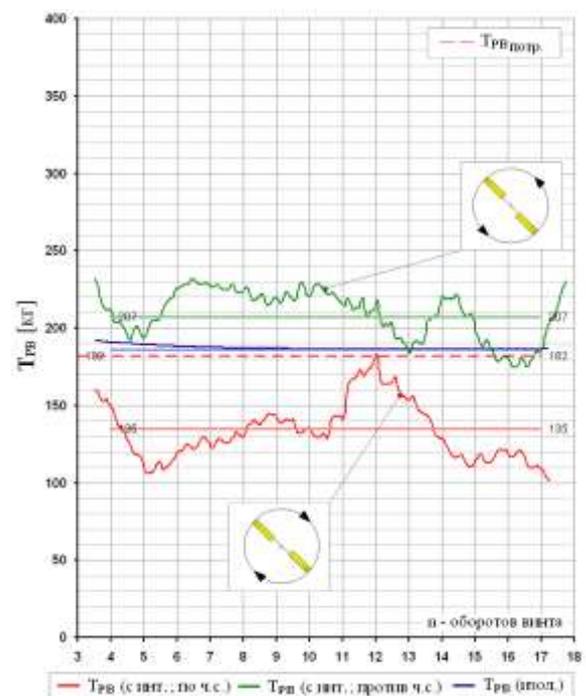
**Рис. 9.** Зависимость  $T_{RV} = f(n)$  изолированного РВ и РВ с учетом интерференции ( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = -90^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



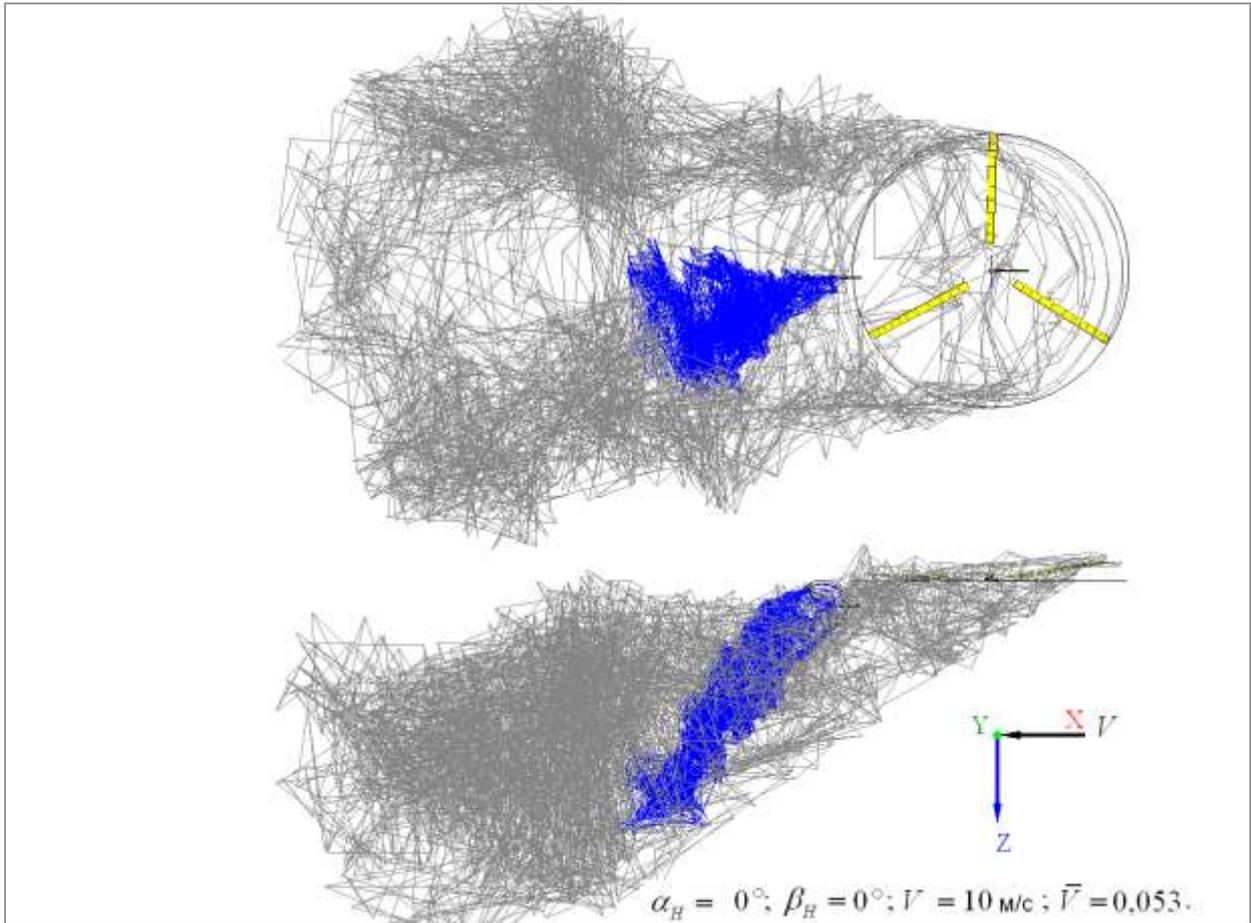
**Рис. 10.** Вихревые следы НВ и РВ с учетом интерференции ( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = -50^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



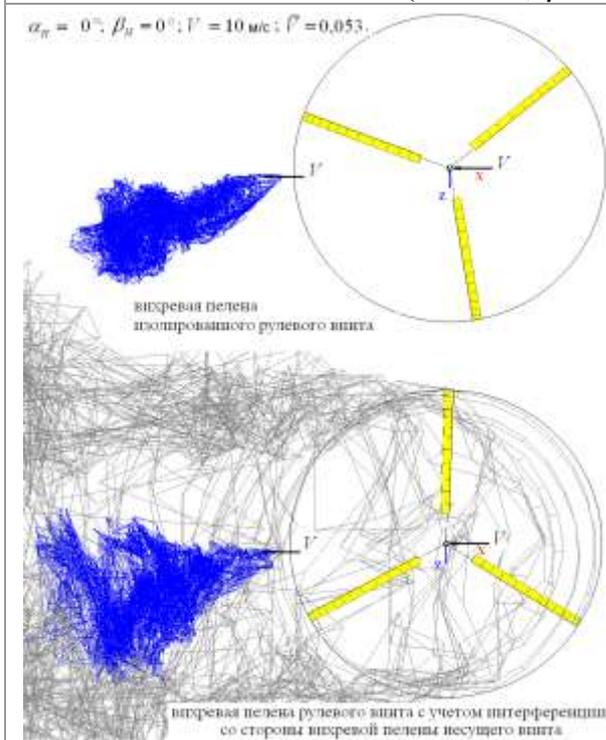
**Рис. 11.** Вихревые следы изолированного РВ и РВ с учетом интерференции от НВ ( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = -50^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



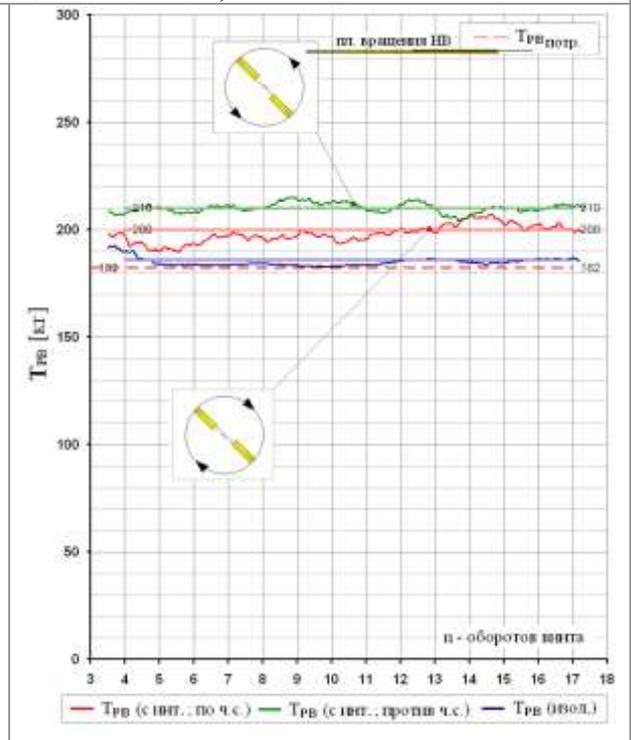
**Рис. 12.** Зависимость  $T_{рв} = f(n)$  изолированного РВ и РВ с учетом интерференции ( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = -50^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



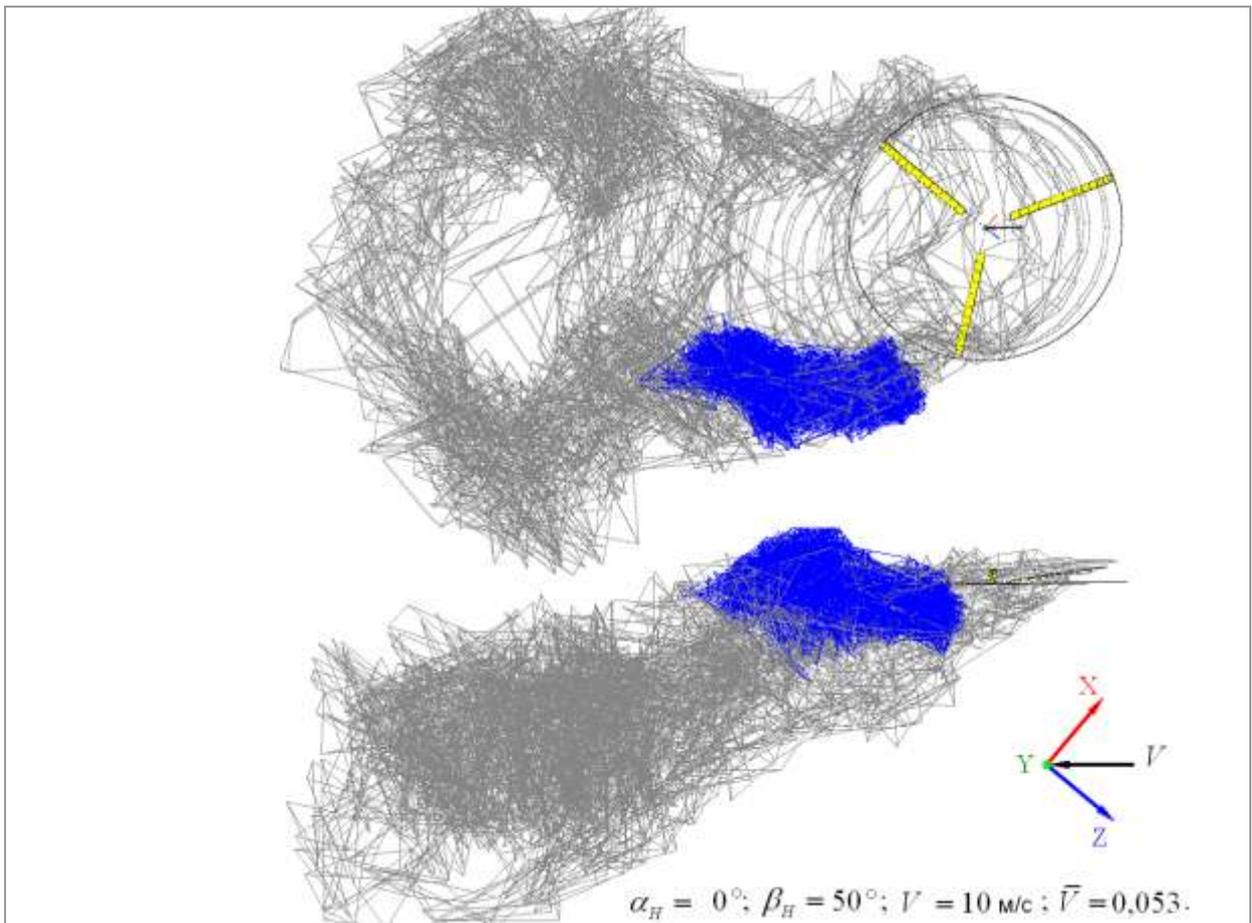
**Рис. 13.** Вихревые следы НВ и РВ с учетом интерференции ( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = 0^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



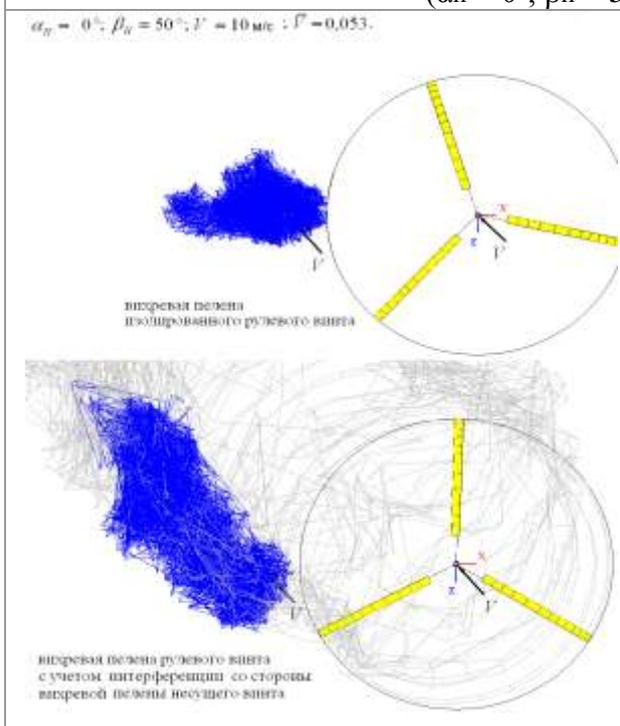
**Рис. 14.** Вихревые следы изолированного РВ и РВ с учетом интерференции от НВ ( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = 0^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



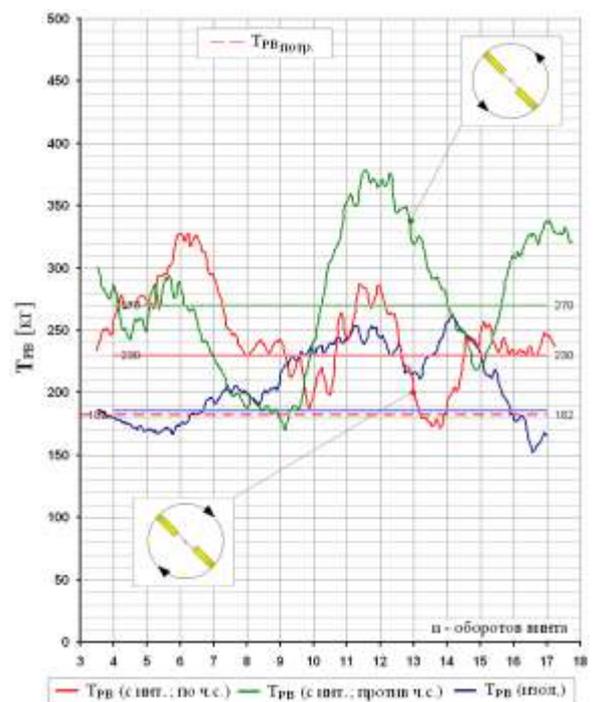
**Рис. 15.** Зависимость  $T_{рв} = f(n)$  изолированного РВ и РВ с учетом интерференции ( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = 0^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



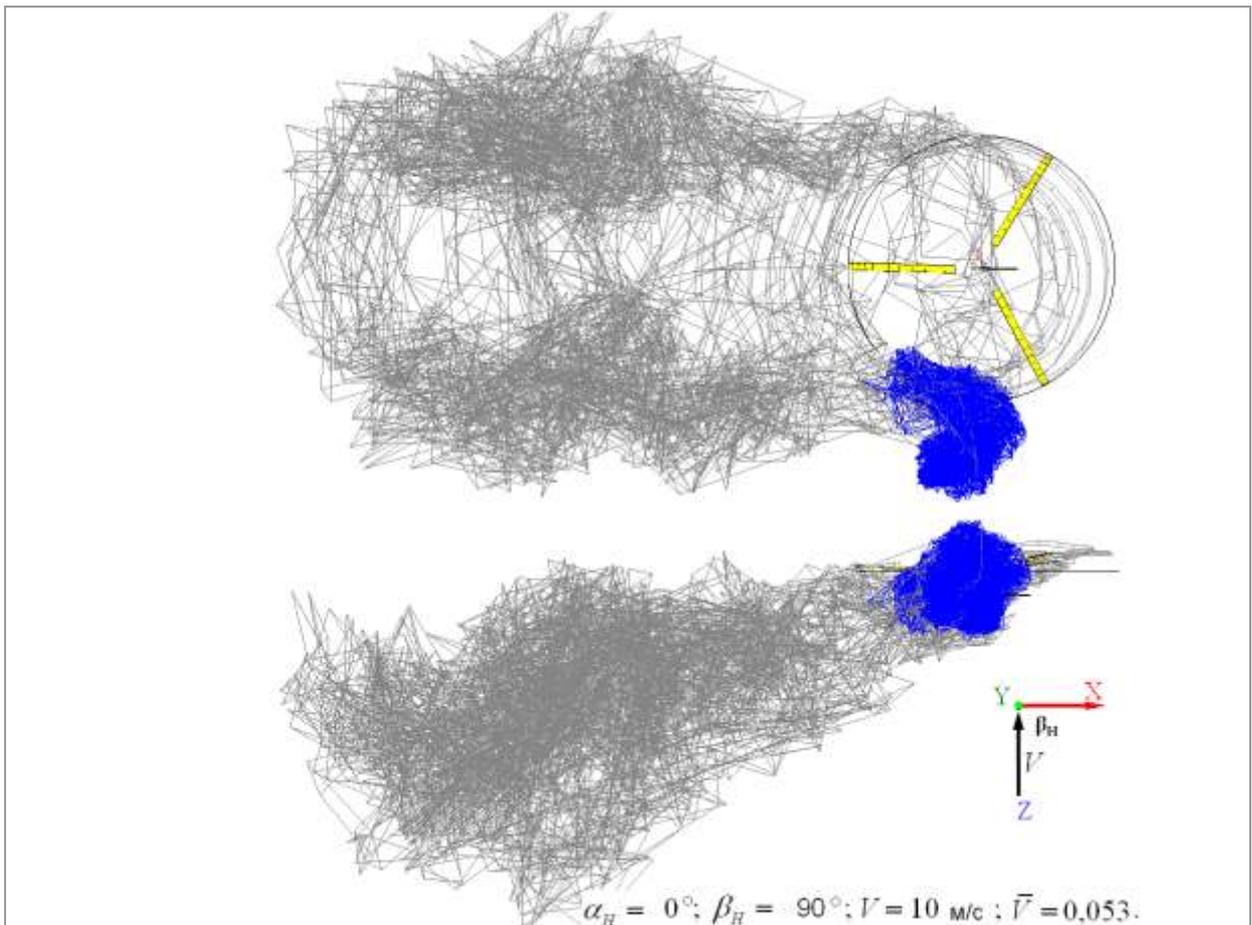
**Рис. 16.** Вихревые следы НВ и РВ с учетом интерференции  
( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = 50^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



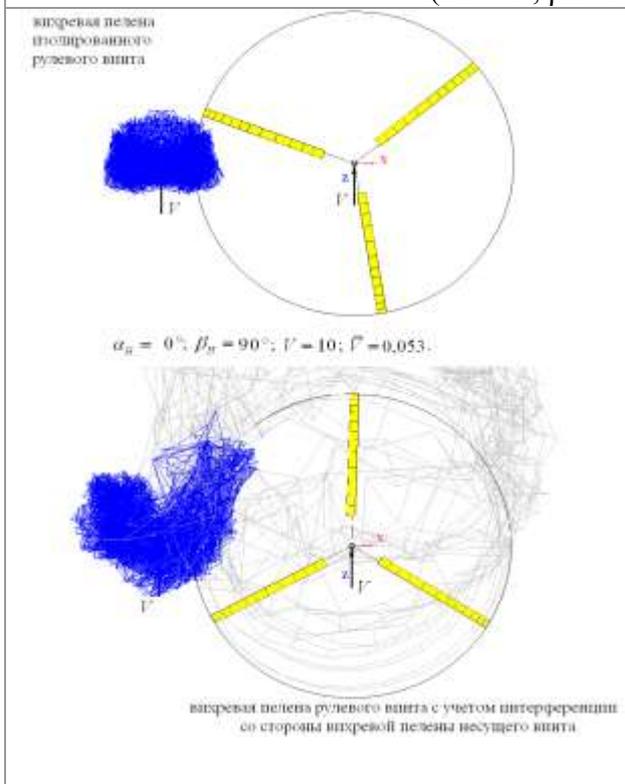
**Рис. 17.** Вихревые следы изолированного РВ и РВ с учетом интерференции от НВ  
( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = 50^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



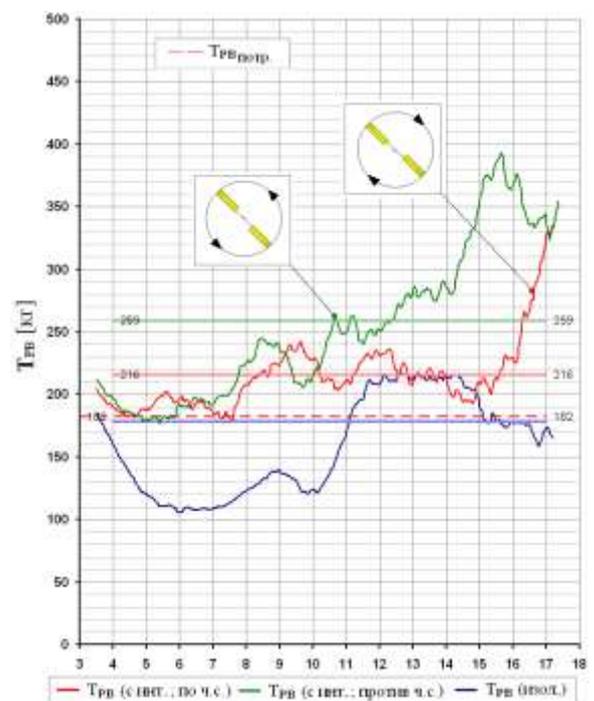
**Рис. 18.** Зависимость  $\Gamma_{PB} = f(n)$  изолированного РВ и РВ с учетом интерференции  
( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = 50^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



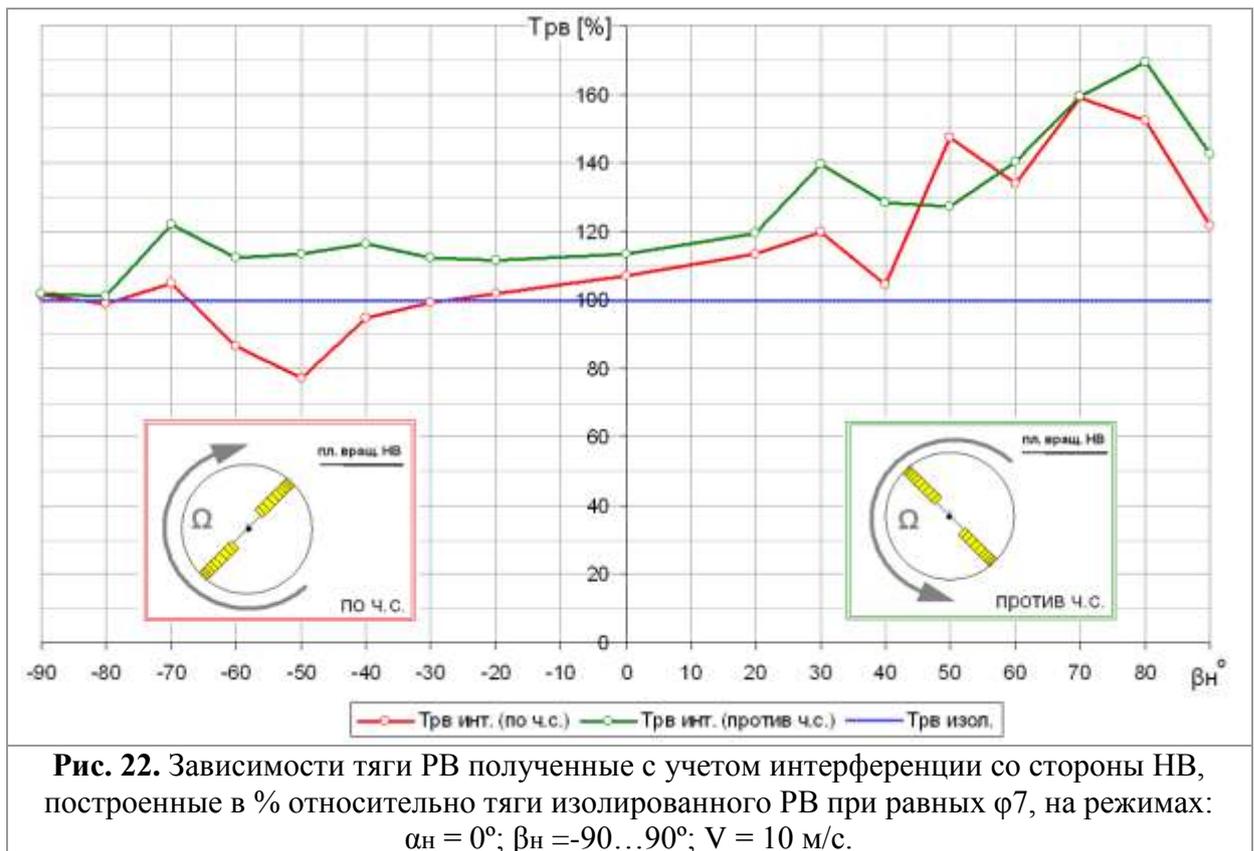
**Рис. 19.** Вихревые следы НВ и РВ с учетом интерференции ( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = 90^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



**Рис. 20.** Вихревые следы изолированного РВ и РВ с учетом интерференции от НВ ( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = 90^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



**Рис. 21.** Зависимость  $T_{РВ} = f(n)$  изолированного РВ и РВ с учетом интерференции ( $\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = 90^\circ; V = 10 \text{ м/с}$ ).



**Рис. 22.** Зависимости тяги РВ полученные с учетом интерференции со стороны НВ, построенные в % относительно тяги изолированного РВ при равных  $\phi_7$ , на режимах:  $\alpha_n = 0^\circ$ ;  $\beta_n = -90 \dots 90^\circ$ ;  $V = 10$  м/с.

## ВЫВОДЫ

Для оценки эффекта интерференции со стороны вихревого следа несущего винта на аэродинамические характеристики рулевого винта проведены расчетные исследования комбинации несущего и рулевого винтов на примере вертолета Ми-2. Исследования выполнены при скорости горизонтального полета  $V_x = 10$  м/с ( $\alpha_n = 0^\circ$ ) и углах скольжения  $\beta_n = -90 \dots 90^\circ$  с шагом  $\Delta\beta_n = 10^\circ$

Расчеты выполнены на основе нелинейной вихревой модели винта со свободным диффундирующим следом по программе, учитывающей одновременную совместную работу несущего и рулевых винтов с учетом их интерференции. Расчеты произведены для тяги несущего винта, соответствующей взлетной массе вертолета 3500 кг при  $H=0$ .

Для каждого режима рассчитаны и построены структуры вихревого следа изолированных винтов (несущего и рулевого), а также с учетом их интерференции.

Для фиксированного значения тяги несущего винта рассчитан крутящий момент и потребная на его уравнивание тяга рулевого винта. Определены углы установки, обеспечивающие величину этой тяги для случая изолированного рулевого винта. Для тех же углов установки определена тяга рулевого винта при разных направлениях его вращения с учетом интерференции от несущего винта.

Определено, что воздействие несущего винта на рулевой винт проявляется на рассмотренных режимах в значительной степени и определяется вихревой структурой несущего винта и местом положения по отношению к этой структуре рулевого винта. Воздействие несущего винта на рулевой сильно зависит также от режима работы и направления вращения рулевого винта. При определенном угле скольжения рулевой винт начинает работать при положительных углах атаки, попадая при малых скоростях полета в режим вихревого кольца.

Установлено, что оптимальным направлением вращения рулевого винта является направление против часовой стрелки (верхняя лопасть движется назад). При этом направлении вращения РВ индуктивное воздействие со стороны НВ увеличивает тягу по сравнению с обратным направлением вращения на всех рассмотренных режимах.

При положительных углах скольжения потребная тяга рулевого винта по сравнению с изолированным винтом возрастает. При оптимальном направлении вращения (верхняя лопасть движется назад) увеличение тяги РВ достигает 48% при  $\beta_n=50^\circ$  ( $V_0=10\text{м/с}$ ) по сравнению с изолированным РВ. При обратном направлении вращения (верхняя лопасть движется вперед) увеличение тяги РВ достигает 30% при  $\beta_n=50^\circ$  ( $V_0=10\text{м/с}$ ).

На отрицательных углах скольжения, когда рулевой винт работает на отрицательных углах атаки, при оптимальном направлении вращения (верхняя лопасть движется назад) увеличение тяги РВ достигает 14% при  $\beta_n=50^\circ$  ( $V_0=10\text{м/с}$ ) по сравнению с изолированным РВ. При обратном

направлении вращения (верхняя лопасть движется вперед) падение тяги РВ достигает 26% при  $\beta_n=50^\circ$  ( $V_0=10\text{м/с}$ ).

Данные результаты могут быть использованы для оценки и выбора оптимального направления вращения рулевого винта и определения запасов путевой устойчивости и управляемости.

### **Библиографический список**

1. Игнаткин Ю.М., Константинов С.Г., Макеев П.В., Шомов А.И. Моделирование режима «вихревого кольца» несущего винта вертолета на базе нелинейной вихревой модели и методов CFD. Электронный журнал «Труды МАИ», №59, 2012. <http://www.mai.ru/science/trudy/>
2. Игнаткин Ю.М., Гревцов Б.С., Макеев П.В., Шомов А.И. Метод расчета аэродинамических характеристик несущих винтов вертолета на режимах осевого и косоугольного обтекания на основе нелинейной лопастной вихревой модели. Труды 8-го форума Российского Вертолетного Общества. М, 2008.
3. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И. Исследование аэродинамических характеристик несущего винта вертолета на режиме «вихревое кольцо» на базе нелинейной лопастной вихревой теории. Вестник МАИ, т.16, №6, 2009.
4. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И. Программный комплекс для расчета аэродинамических характеристик несущих и рулевых винтов вертолетов на базе нелинейной лопастной вихревой теории. Электронный журнал «Труды МАИ», №38, 2010.
5. Браверманн А.С., Вайнтриуб А.П. Динамика полета. Предельные режимы полета. – М.: Машиностроение, 1988.
6. Анимица В.А., Головкин В.А., Крайнов М.В., Новак В.Н., Тарасов Н.Н., Щеглова В.М. Расчетно-экспериментальные исследования влияния полей индуктивных скоростей за несущим винтом на аэродинамические

характеристики рулевого винта на малых скоростях полета вертолета. Труды 6-го форума Российского вертолетного общества. М., 2004.

7. Анимица В.А., Леонтьев В.А. О «самопроизвольном» вращении одновинтовых вертолетов. Научный вестник МГТУ ГА № 151. М., 2010.

8. Шиббаев В., Фаворова Т., Аполлонов Д. Тренировки пилотов в расширенной области параметров движения воздушного судна как залог безопасности полетов. Аэрокосмический курьер. №5. 2011.

9. Миль М.Л., Некрасов А.В., Браверманн А.С., Гродко Л.Н., Лейканд М.А. Вертолеты. Расчет и проектирование. Т 1. Аэродинамика. М.: Машиностроение. 1966.

10. Володко А.М. Безопасность полета вертолетов. М.: Транспорт. 1981.

11. Шайдаков В.И., Игнаткин Ю.М. Методы расчета индуктивных скоростей за пределами диска несущего винта вертолета на базе приближенной модели вихревого следа – В сб.: Аэродинамика крыла и корпуса летательного аппарата – М. МАИ 1982.

12. Зозуля В.Б., и др. Практическая аэродинамика вертолета Ми-2. Москва. «Воздушный транспорт». 1984г.

13. Heyson H.H. and Katzoff S. “Induced Velocities Near a Lifting Rotor with No uniform Disc Loading”. NACA Report 1319. 1957.

14. Ромасевич В.Ф., Самойлов Г.А.. Практическая аэродинамика вертолета. М.: Воениздат, 1980.

15. Баскин В.Э., Вильдгрубе Л.С., Вождаев Е.С., Майкапар Г.И. Теория несущего винта. М.: Машиностроение, 1973.

16. Белоцерковский С.М., Локтев Б.Е., Ништ М.И. Исследование на ЭВМ аэродинамических и упругих характеристик винтов вертолета. М.: Машиностроение, 1992.

17. Бутов В.П. Структура, геометрия и интенсивность спутного вихревого следа несущих винтов одновинтовых и ссосных вертолетов в реальных условиях полета. Труды 4-го форума Российского вертолетного общества. М., 2000.

**18.** Щеглова В.М. Вихревая структура комбинации несущий винт – рулевой винт на большой скорости полета. Научный вестник МГТУ ГА №188. 2013.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.1836