

УДК 629.735.33

Интерференция несущего и рулевого винтов вертолета при полете 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 (НВ) и рулевого (РВ) винтов вертолета одновинтовой схемы. Получены новые, по сравнению с более ранними работами [1, 2], результаты численного моделирования интерференции указанных винтов на базе нелинейной лопастной вихревой модели, разработанной на кафедре «Проектирование вертолетов» МАИ. Представленные результаты позволяют прояснить физическую картину интерференции винтов, которая может привести к неуправляемому вращению вертолета при полете с небольшими скоростями со скольжением и внести определенный вклад в решение задачи повышения безопасности полетов вертолета.

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

Введение

Вопросы обеспечения безопасности полета одновинтового вертолета при попадании рулевого винта в критические режимы работы, когда резко падает его тяга и, соответственно, эффективность как органа путевого управления, являются весьма актуальными, поскольку с ними связан большой процент авиационных происшествий на вертолетах [3].

Для вертолетов одновинтовой схемы с рулевым винтом одной из причин резкого уменьшения тяги рулевого винта, сопровождающейся потерей путевого управления и возникновением неуправляемого вращения, может являться аэродинамическая интерференция между несущим и рулевым винтами.

Аэродинамическая интерференция НВ и РВ вертолета со скольжением связана с особенностями формирования вихревого следа за НВ на режиме горизонтального полета и в наибольшей степени проявляется при малых скоростях. Как показывают результаты экспериментальных исследований [4], вихревая система НВ уже на малых скоростях полета характеризуется образованием двух мощных вторичных вихревых жгутов по краям вихревого следа. Циркуляция этих вихревых жгутов интенсивно возрастает на малых

скоростях полета и достигает максимума при относительной скорости $V=10$ м/с, а затем, с ростом скорости, уменьшается [5]. В ряде случаев, таких как висение в условиях бокового ветра или полет со скольжением, возможно попадание РВ непосредственно в область одного из вторичных вихревых жгутов НВ, что может привести к резкому изменению его аэродинамических характеристик.

Данная статья посвящена продолжению численных исследований аэродинамической интерференции НВ и РВ на режимах горизонтального полета с небольшими скоростями со скольжением (висения с боковым ветром) на базе нелинейной лопастной вихревой модели винта со свободным диффундирующим следом, разработанной на кафедре «Проектирование вертолетов» МАИ [6, 7].

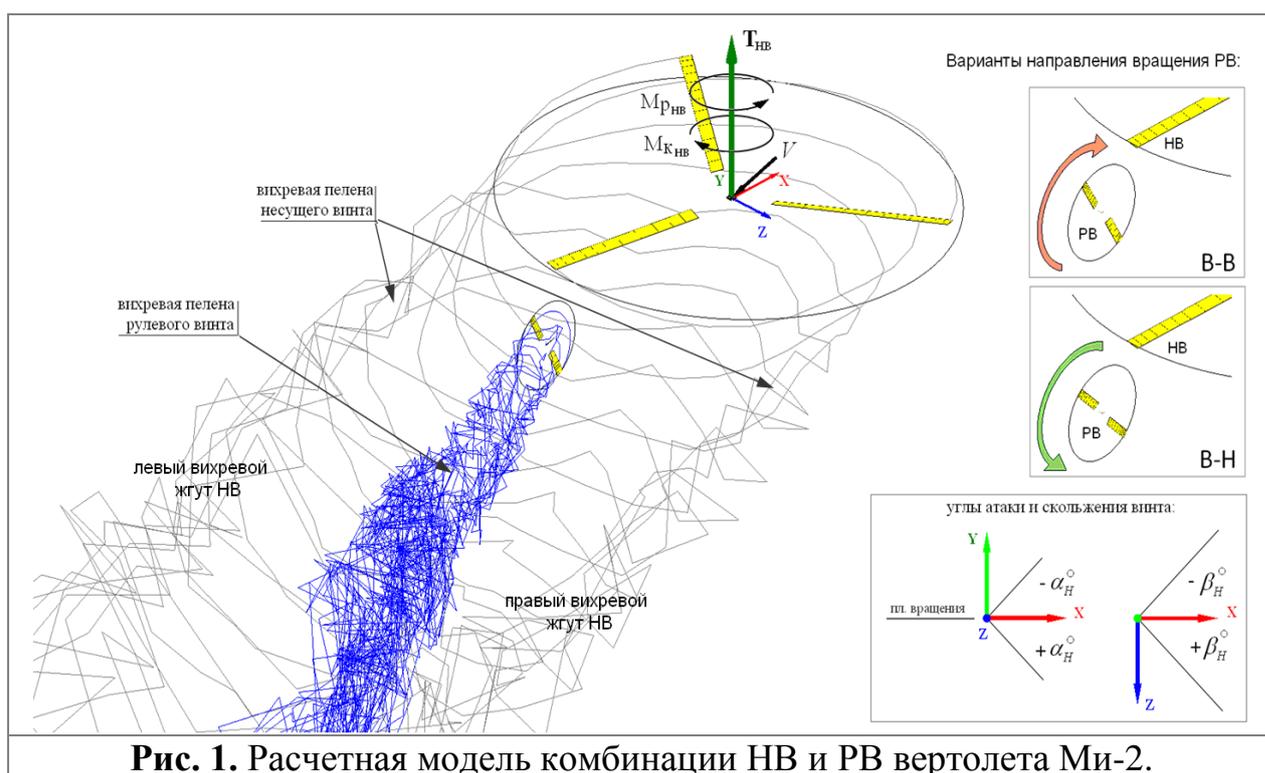
В ранних работах проведенных на базе указанной модели были получены отдельные фрагментарные результаты исследования интерференции НВ и РВ (на примере вертолета Ми-2) и ее влияния на аэродинамические характеристики РВ [1, 2].

В настоящей работе представлены значительно расширенные, новые результаты численного моделирования интерференции винтов, позволяющие существенно продвинуться в понимании физических основ интерференции винтов и ее влияния на аэродинамические характеристики РВ при круговой обдувке НВ.

В качестве объекта исследования рассматривается расчетная модель комбинации НВ и РВ вертолета Ми-2 [8].

Модель расчета интерференции несущего и рулевого винтов одновинтового вертолета

На рис. 1 представлена расчетная модель комбинации НВ и РВ вертолета Ми-2 использованная в расчетах интерференции винтов на режимах горизонтального полета. Трехлопастный НВ моделировался с учетом махового движения лопастей относительно горизонтальных шарниров. Двухлопастной РВ принимался в расчетах абсолютно жестким. В исследовании рассматривалось два варианта направления вращения РВ: В-В (верхняя лопасть идет вперед) и В-Н (верхняя лопасть идет назад), см. рис. 1.



Для согласования вращения НВ и РВ по времени ячейки вихревого следа НВ укрупняются в процессе расчета до 30 на 1 оборот НВ, соотношение расчетных шагов для НВ/РВ за 1 оборот при этом составляет

176/30. Для уточнения результатов, в отличие от предыдущих расчетов, оба винта начинают работать одновременно. При этом НВ делает до 17 оборотов, что соответствует до 3000 расчетных шагов по времени, а РВ за это время делает до 100 оборотов. Таким образом, анализ изменения тяги РВ по времени становится значительно более точным. Для ускорения расчетов был применен прием, когда вихревой след за РВ сохранялся только на протяжении 20 его оборотов (600 расчетных шагов по времени), а в дальнейшем отбрасывался, поскольку находясь на достаточно большом удалении от плоскости вращения, он практически не оказывает влияния на аэродинамические характеристики винта.

В работе рассматривался вопрос индуктивного влияния вихревого следа НВ на аэродинамические характеристики РВ вследствие интерференции. В общем случае расчетная модель учитывает взаимную интерференцию НВ и РВ. Вместе с тем анализ результатов исследований показал незначительное влияние РВ на НВ на исследуемых режимах.

Для изучения эффекта индуктивного влияния со стороны НВ на РВ проводился анализ изменения величины тяги РВ под воздействием индуктивного поля скоростей вихревого следа НВ при малых скоростях горизонтального полета.

Изменение тяги РВ анализировалось путем сопоставления тяги полученной при расчете с учетом интерференции, (для двух вариантов направления вращения РВ) с тягой полученной для изолированного РВ при тех же параметрах работы.

Блок схема расчета каждого из рассмотренных режимов показана на рис. 2. В целом сохраняется схема расчета изложенная в [1, 2]. В данной работе сделан акцент на исследовании влияния вихревого следа НВ на РВ на значительно большем числе режимов полета.

В работе рассмотрены режимы горизонтального полета с углом атаки НВ $\alpha_H = 0^\circ$, и скоростью $V = 10$ м/с, для углов скольжения $\beta_H = -180 \dots 180^\circ$, а также для скоростей $V = 2,5; 5; 7,5; 12,5; 15$ м/с, для углов скольжения $\beta_H = -90 \dots 90^\circ$.

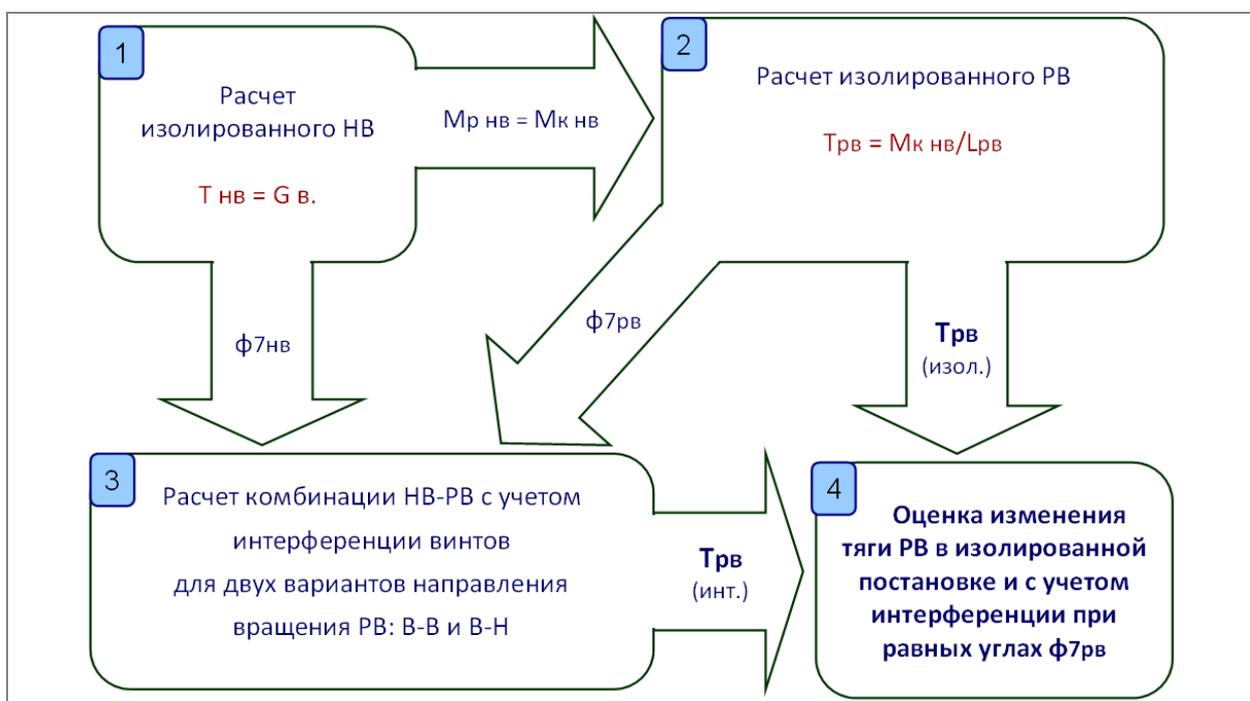


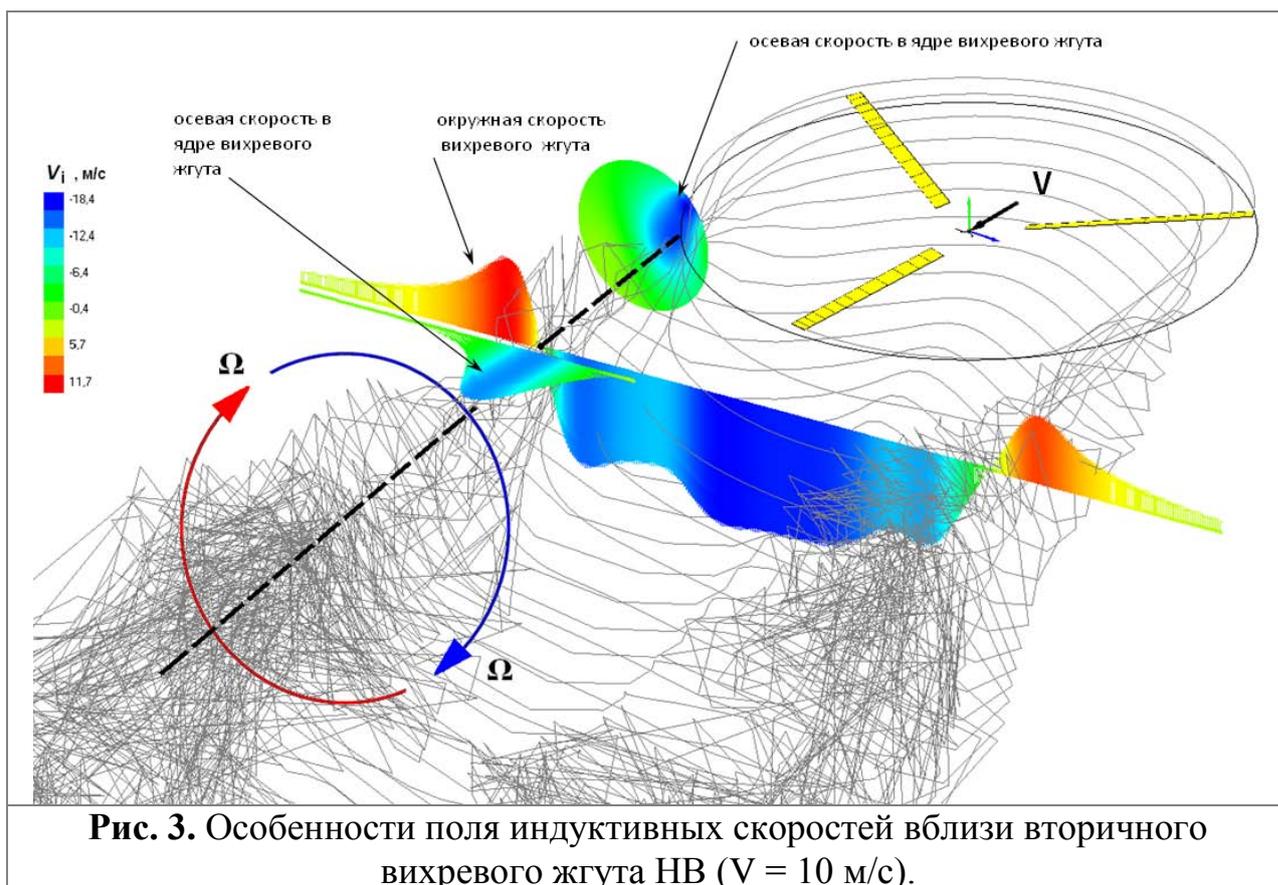
Рис. 2. Блок схема алгоритма расчета интерференции НВ и РВ.

Анализ индуктивного поля скоростей от вторичных вихревых жгутов НВ и его воздействия на РВ

Анализ картины полей индуктивных скоростей за НВ на режиме горизонтального полета, изложенный ниже, позволяет описать особенности наблюдаемых в проведенных расчетах эффектов влияния на РВ со стороны

НВ, и их связь с взаимным расположением винтов при различных расчетных случаях, зависящем от скорости полета V и угла скольжения β_n .

На рис. 3. представлен расчетный вихревой след НВ на режиме горизонтального полета со скоростью $V = 10$ м/с. Видно, что вихревой след, сворачиваясь за винтом, образует два мощных вторичных вихревых жгута.



Индуктивную скорость, вызываемую в пространстве вторичным вихревым жгутом НВ можно приближенно представить в виде двух составляющих: окружной, закручивающей поток вокруг оси вихревого жгута и осевой, направленной вдоль оси вихревого жгута по направлению полета. От положения плоскости вращения РВ относительно ближайшего вихревого

жгута НВ в каждом конкретном случае зависят аэродинамические характеристики РВ.

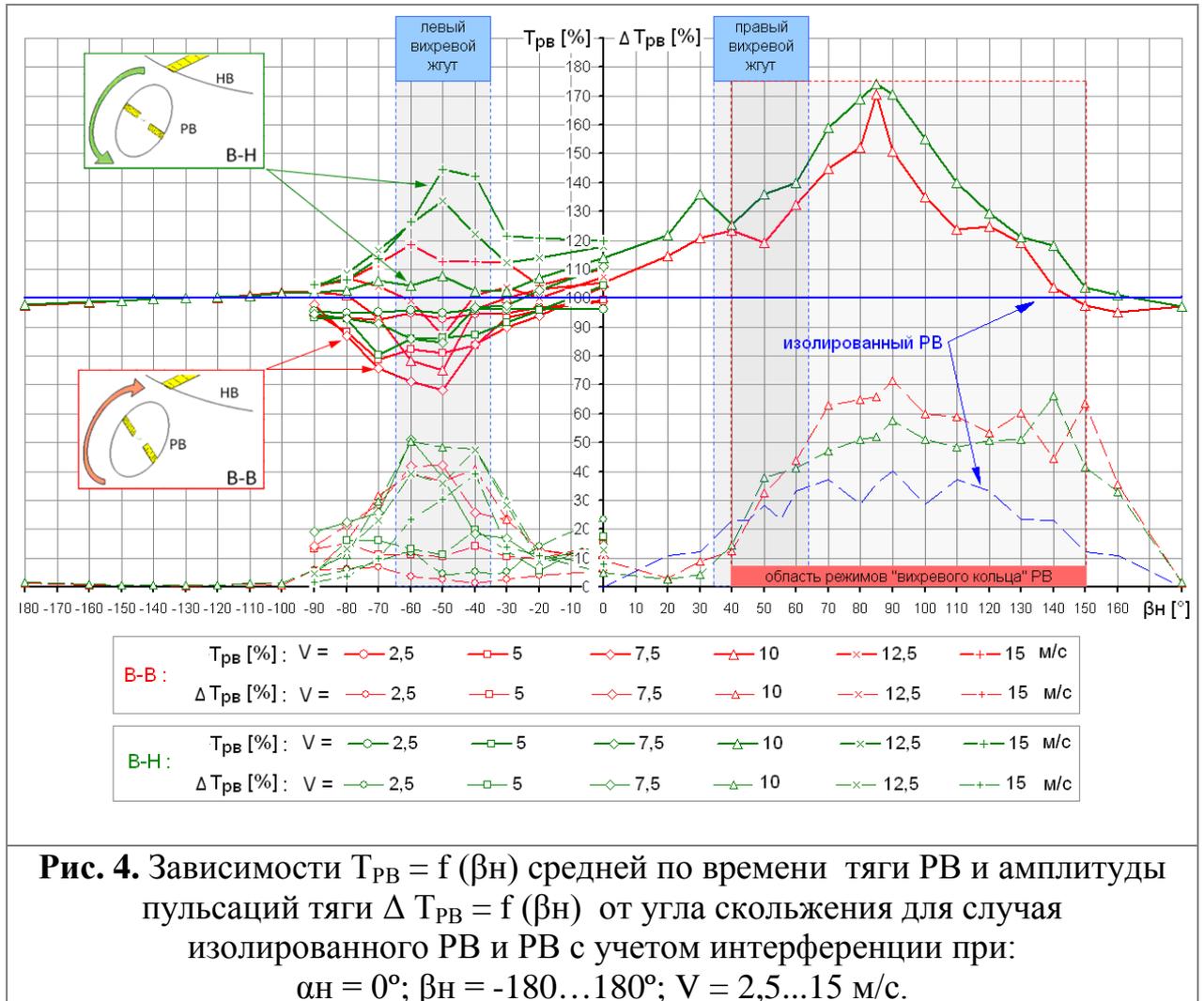
На рис. 3. построены эпюры для указанных составляющих индуктивных скоростей вблизи от плоскости вращения НВ там, где может находиться РВ. Видно, что осевой поток в вихревом жгуте достигает величины до 15 м/с, а окружная составляющая - до 18 м/с.

В зависимости от ориентации плоскости вращения относительно оси вторичного вихревого жгута НВ во влиянии на аэродинамические характеристики РВ преобладает та или иная составляющая индуктивных скоростей. Кроме того, поле индуктивных скоростей, создаваемое вихревым жгутом НВ нестационарно по времени, что приводит к пульсации аэродинамических характеристик РВ по времени.

Анализ зависимости тяги РВ $T_{РВ} = f(\beta_n)$ с учетом интерференции винтов при $\beta_n = -180...180^\circ$ для РВ с направлениями вращения В-В и В-Н

На рис. 4 представлен график зависимостей $T_{РВ} = f(\beta_n)$ средней по времени тяги изолированного РВ и РВ с учетом интерференции для двух направлений вращения (В-В и В-Н) от угла скольжения β_n . Графики построены в процентах от тяги изолированного РВ, которая принята за 100% для каждого из расчетных режимов. На графике выделены области, соответствующие углам скольжения при которых левый и правый вторичные вихревые жгуты НВ проходят в непосредственной близости от РВ, а также область углов скольжения, при которых РВ работает на положительных

углах атаки на режимах «вихревого кольца». Кроме того, на рис. 4 представлены зависимости амплитуды пульсаций тяги РВ от углов скольжения β_n (пунктирные линии).



Из представленных зависимостей $T_{РВ} = f(\beta_n)$ видно, что тяга РВ с направлением вращения В-В и тяга РВ с направлением вращения В-Н при одинаковых углах скольжения в ряде случаев близки, а в ряде случаев существенно отличаются друг от друга и от тяги изолированного РВ.

При $\beta_n = -180 \dots -80^\circ$ тяга РВ для обоих вариантов направления вращения РВ практически одинакова и не отличается от тяги изолированного

PВ, пульсаций тяги не наблюдается. PВ при этом находится на достаточном удалении от вихревых жгутов НВ, поэтому индуктивное влияние на PВ со стороны НВ незначительно, либо практически отсутствует.

Начиная с угла скольжения $\beta_n = -90^\circ$ наблюдается изменение тяги PВ за счет интерференции относительно тяги изолированного PВ, составляющее для рассматриваемых скоростей полета $V = 2,5 \dots 15$ м/с величину от 93 до 105% в зависимости от величины скорости и направления вращения PВ, пульсации тяги достигают 20% при $V=7,5$ м/с. Максимально падение тяги до 93% отмечено для $V=5$ м/с (В-Н PВ), а прирост до 105% для $V=15$ м/с (В-Н PВ).

При $\beta_n = -80 \dots -30^\circ$, когда левый вихревой жгут НВ проходит вблизи PВ, наблюдается наиболее значительное изменение тяги PВ за счет интерференции для отрицательных углов скольжения. Максимальное относительное снижение тяги PВ с направлением вращения В-В составляет для $V = 7,5$ м/с до 68% при $\beta_n = -50^\circ$, а для направления вращения В-В до 80% при $V = 7,5$ м/с и $\beta_n = -70^\circ$. Максимальный прирост относительной тяги за счет интерференции достигает 144% при $V = 15$ м/с и $\beta_n = -50^\circ$ (В-Н PВ), и 119% при $V = 15$ м/с и $\beta_n = -60^\circ$ (В-В PВ). При данных углах скольжения наблюдаются пульсации тяги с большой амплитудой, достигающей до 50% при $V=7,5; 10$ м/с (В-Н PВ).

При $\beta_n = -30 \dots 0^\circ$ изменения тяги PВ за счет интерференции для обоих направлений вращения проявляются в меньшей степени. Также уменьшаются

и пульсации тяги. Тяга РВ с учетом интерференции меняется от 95 до 120% от тяги изолированного РВ, а пульсации тяги не превышают 15%.

При $\beta_n = 0$ РВ занимает центральное положение между левым и правым вихревыми жгутами НВ. Вместе с тем, РВ при этом находится в нисходящем индуктивном потоке, вызываемым вихревым следом НВ. Из-за этого с ростом скорости, по мере зарождения вихревых жгутов, наблюдается эффект интерференции, приводящий к росту тяги РВ, для обоих направления вращения РВ. Для направления вращения В-Н тяга возрастает до 120% при $V=15$ м/с по сравнению с тягой изолированного РВ, а для В-В до 110% для той же скорости полета.

На положительных углах скольжения $\beta_n = 0...180^\circ$ исследования проводились только для скорости $V = 10$ м/с. При $\beta_n = 0...90^\circ$, начиная с угла скольжения $\beta_n = 30^\circ$, средняя тяга РВ для обоих вариантов направления вращения лопастей РВ значительно возрастает по сравнению с тягой изолированного РВ, достигая величины 174% (В-Н РВ) и 170% (В-В РВ). В целом при $\beta_n > 0^\circ$ средние величины тяги РВ для обоих направлений вращения ведут себя одинаково, при этом тяга РВ с направлением вращения В-Н на 5-15% выше, чем у РВ с направлением вращения В-В.

При $\beta_n = 40...70^\circ$, когда РВ проходит вблизи правого вихревого жгута НВ наблюдаются резкие изменения среднего значения тяги РВ.

При углах скольжения $\beta_n = 90...180^\circ$ РВ обтекается под положительными углами атаки винта. Скачкообразное изменение средней тяги РВ, связанное с прохождением РВ через правый вихревой жгут НВ

проявляется в меньшей степени, чем при прохождении через левый жгут. Далее изменение тяги плавно снижается при приближении к $\beta_n = 180^\circ$.

В диапазоне углов скольжения $\beta_n = 30 \dots 160^\circ$, когда РВ работая на положительных углах атаки, находится в области режимов вихревого кольца, наблюдаются значительные пульсации тяги, достигая величины 20-40% от среднего значения тяги для случая изолированного РВ. Пульсации возрастают до 40-70% в случае интерференции винтов, под влиянием вихревого следа НВ. При этом видно, что пульсации тяги РВ с направлением В-Н оказываются несколько меньше, чем у РВ с направлением В-В, в среднем на 10-15%.

На рис. 5 приведена круговая градиентная диаграмма зависимости $T_{РВ} = f(\beta_n, V)$ средней по времени тяги РВ с учетом интерференции, выраженная в процентах от тяги изолированного РВ (принята за 100 %) для направлений вращения ВВ и ВН, построенная на основе графиков на рис. 4. Такое представление изменения тяги РВ под воздействием интерференции со стороны вихревого следа НВ позволяет наглядно определить области режимов, где относительная тяга РВ за счет интерференции значительно изменяется: падает, либо возрастает. На рис. 5 хорошо заметна область снижения тяги темно-синего цвета, при $\beta_n = -70 \dots -40^\circ$ и $V = 5 \dots 10$ м/с. Эта область более обширна и характеризуется большими величинами падения тяги для направления вращения В-В, чем для направления вращения В-Н.

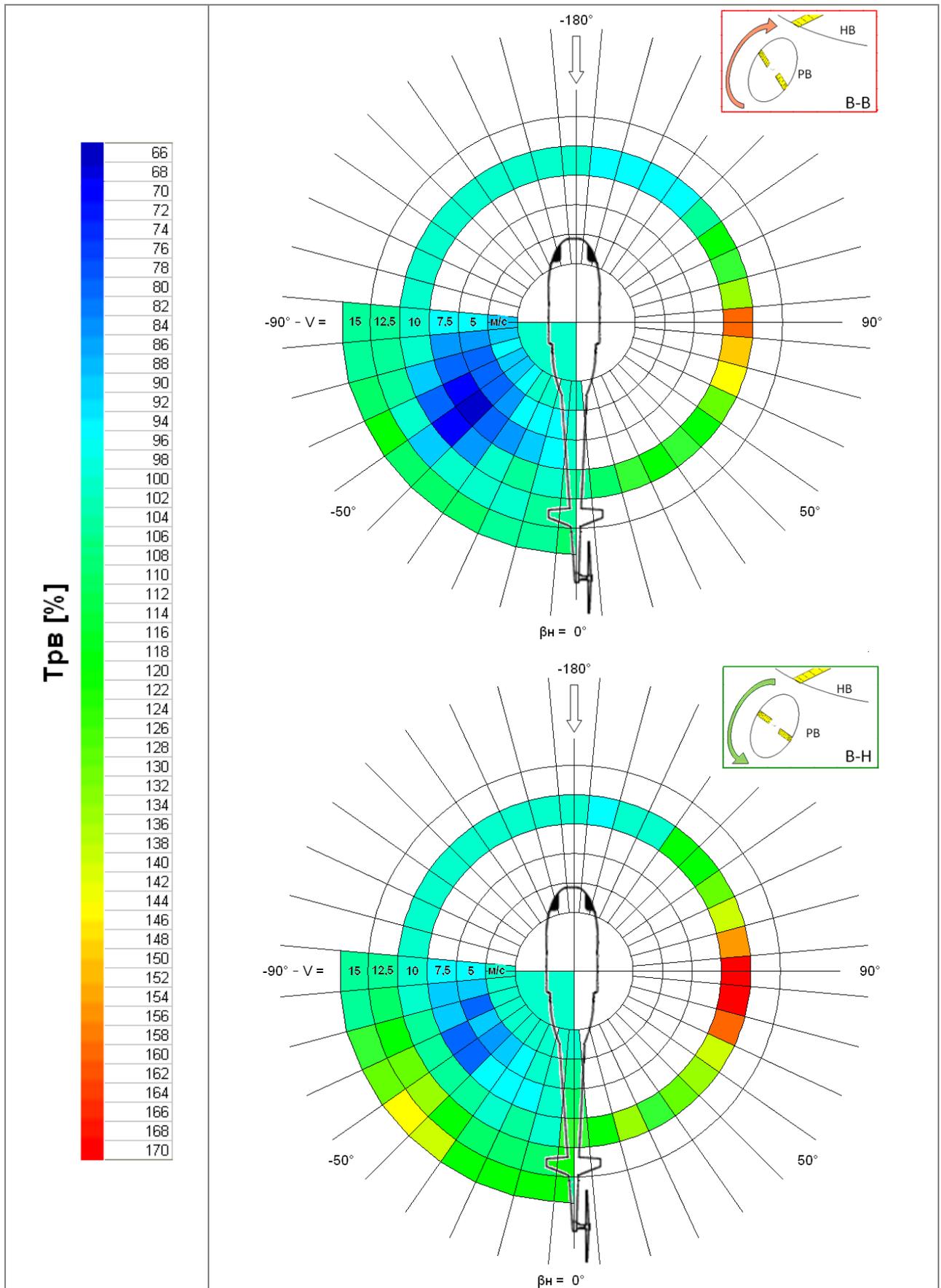


Рис. 5. Круговая диаграмма зависимости $T_{PB} = f(\beta_H, V)$ средней по времени тяги РВ с учетом интерференции, выраженная в % от тяги изолированного РВ (принята за 100 %) для направлений вращения В-В и В-Н.

Анализ форм вихревого следа и зависимостей тяги РВ по времени

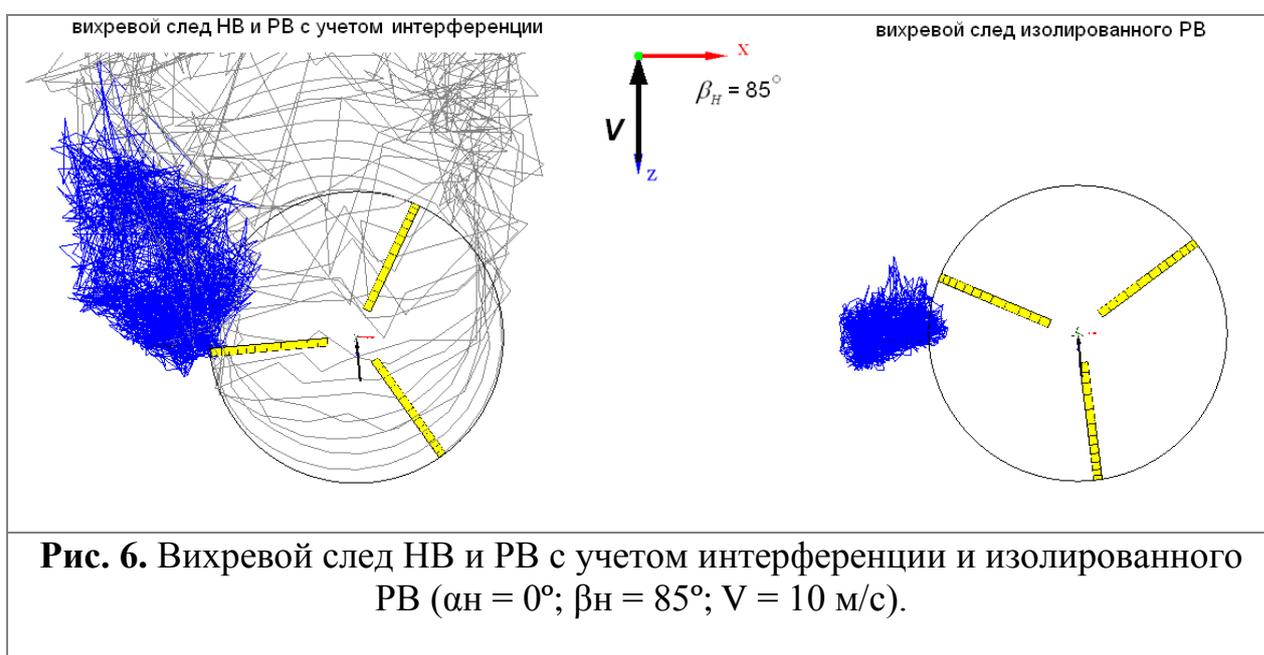
$T_{РВ} = f(n)$ с учетом интерференции винтов на характерных расчетных режимах

Рассмотрим два характерных расчетных случая, анализ которых позволяет прояснить физические основы наблюдаемых эффектов интерференции и выяснить причины связанного с ними изменения тяги РВ. К этим режимам, прежде всего, относятся случаи, когда РВ проходит вблизи вторичных вихревых жгутов, вызывающих наиболее значительные изменения его средней тяги, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. К таким расчетным случаям можно отнести углы скольжения $\beta_n = -50^\circ$ при $V = 7,5$ м/с (падение тяги РВ до 65%, попадание РВ в левый жгут НВ) и $\beta_n = 85^\circ$ (рост тяги РВ до 174%, нахождение РВ вблизи правого жгута НВ).

Рассмотрим расчетный случай попадания РВ в правый вихревой жгут НВ при угле скольжения $\beta_n = 85^\circ$, когда был отмечен наибольший полученный в расчетах прирост тяги РВ за счет интерференции, составивший 70% для РВ с направлением вращения В-Н (см. рис. 4).

На рис. 6 представлена визуализация форм свободного вихревого следа РВ и НВ с учетом интерференции, а так же форма вихревого следа изолированного РВ. На данном режиме РВ работает на положительном угле атаки, находясь на режиме «вихревого кольца». Хотя РВ и не попадает непосредственно в правый вихревой жгут НВ, последний зарождается непосредственно за плоскостью вращения РВ. При этом вихревой след РВ

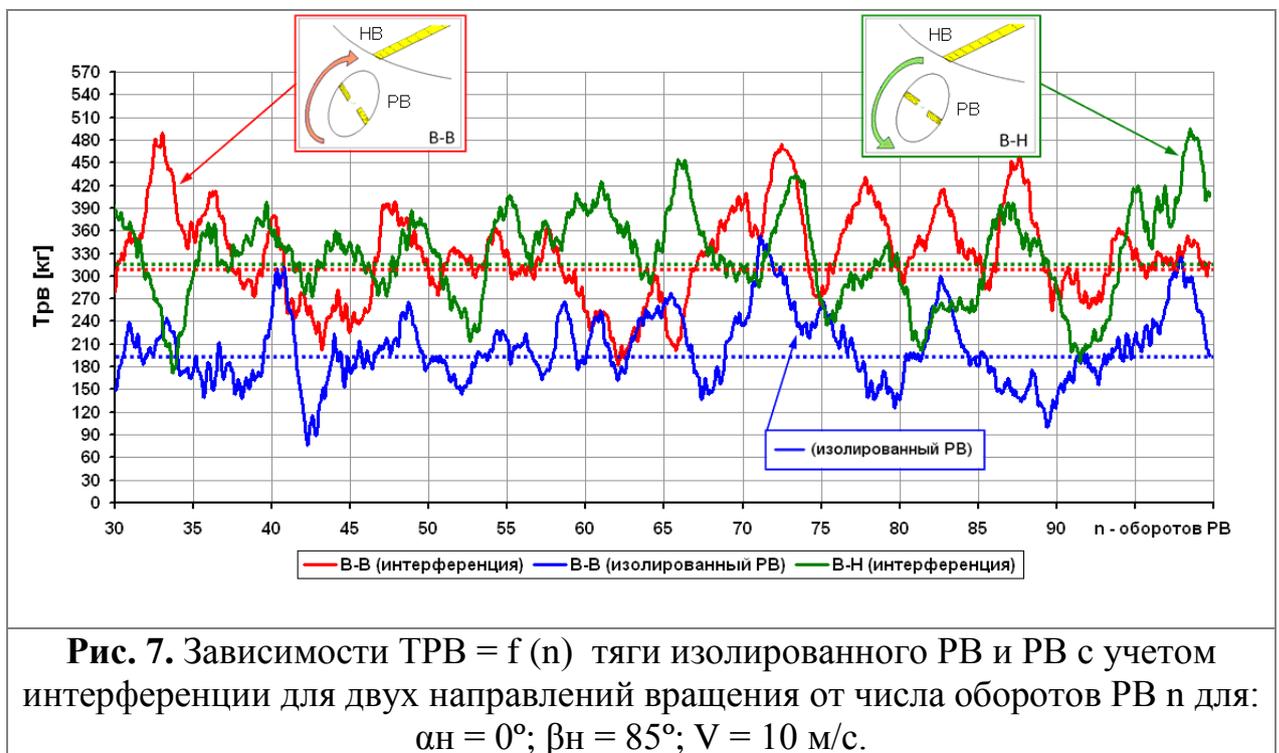
«сдувается» правым вихревым жгутом НВ. В то же время непосредственное индуктивное воздействие правого жгута на величины скоростей обдувки лопастей РВ и величину углов атаки элементов лопастей невелико. Поэтому все основное воздействие правого вихревого жгута НВ на РВ происходит за счет сдува его вихревого следа, что изменяет режим его работы. В результате РВ из-за стягивания вихревого следа не работает на режиме «вихревого кольца», что улучшает его аэродинамические характеристики.



Графики зависимостей $TPB = f(n)$ для $\beta_n = 85^\circ$; $V = 10$ м/с, представлены на рис. 7. Видно, что тяга РВ как в случае изолированной работы, так и с учетом интерференции испытывает значительные пульсации. Из рис. 7 следует, что тяга РВ с учетом интерференции возрастает до 170% при направлении вращения В-В и до 174% при направлении вращения В-Н. Это обстоятельство связано со «сдувом» вихревого следа РВ за счет интерференции, в результате чего РВ переходит на другой режим работы и

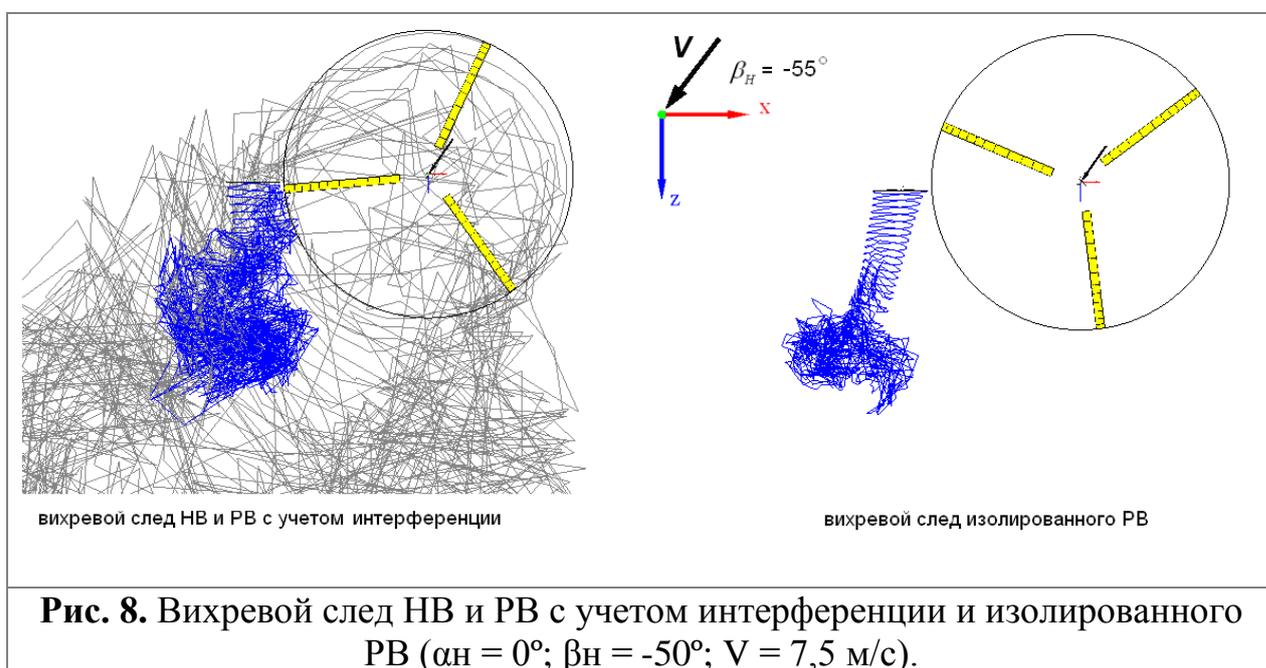
выходит из области режимов «вихревого кольца», что при неизменном угле установки лопастей РВ дает значительный прирост тяги.

Рассмотрим расчетный случай попадания РВ в левый вихревой жгут при $\beta_H = -55^\circ$ и $V = 7,5$ м/с, который интересен тем, что на данном режиме за счет интерференции наблюдается падение тяги не только у винта с направлением вращения В-В, но и у винта с направлением вращения В-Н.



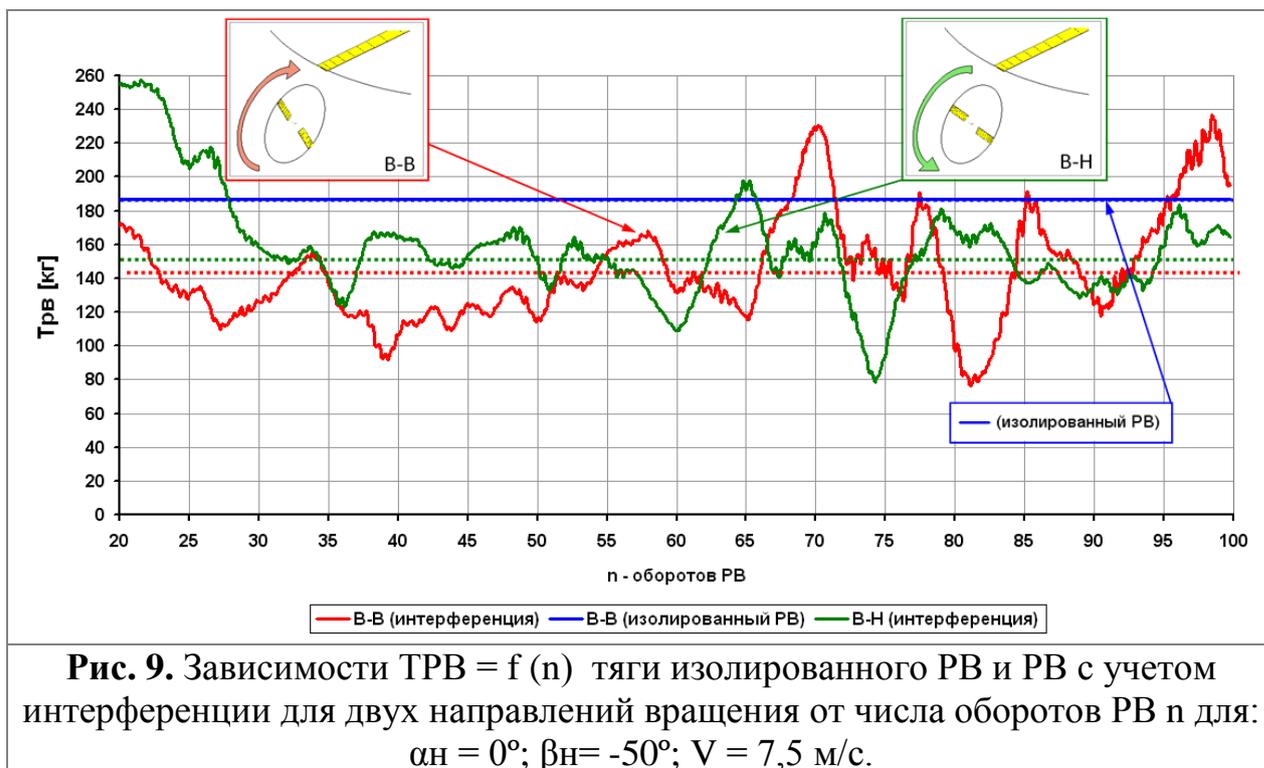
На рис. 8. представлена форма вихревого следа НВ и РВ с учетом интерференции, а также форма вихревого следа изолированного РВ. На данном режиме, когда скорость полета $V = 7,5$ м/с, так же наблюдаются мощные вторичные вихревые жгуты. Как показал анализ вихревого следа, при данной скорости $V = 7,5$ м/с левый вторичный вихревой жгут НВ проходит несколько ниже плоскости диска РВ, чем при $V = 10$ м/с, из-за чего

РВ оказывается не в самом вихревом жгуте, а немного выше него. В этом случае РВ попадает в наиболее мощную периферийную часть вращательной компоненты скоростей от вихревого жгута, причем при рассматриваемом угле скольжения на диске РВ будут наблюдаться значительные нормальные составляющие индуктивной скорости, набегающие на него слева практически на всей площади диска винта. Сложное переменное поле индуктивных скоростей вызывает при этом значительную деформацию вихревого следа РВ (рис. 8), что отражается на его аэродинамических характеристиках. Вихревой след РВ под воздействием индуктивного потока от вихревого жгута изменяет угол наклона относительно плоскости вращения РВ.



На рис. 9 представлены зависимости $T_{РВ} = f(n)$ для $\beta_H = -50^\circ$; $V = 7,5$ м/с. Видно, что тяга РВ с учетом интерференции испытывает значительные пульсации и в среднем своем значении падает для обоих направлений

вращения: до 77% для направления вращения В-В и до 80% для направления вращения В-Н по сравнению с тягой изолированного винта.



Падение тяги для обоих направлений вращения РВ связано с работой винта в действующем на него слева мощном индуктивном потоке от левого вихревого жгута НВ, который вызывает уменьшение истинных углов атаки винта и, соответственно, падение его тяги. В данном случае падение тяги практически не зависит от направления вращения РВ, поэтому направление вращения РВ В-Н, оптимальное для большинства рассмотренных выше режимов с точки зрения изменения тяги за счет интерференции здесь не дает преимущества.

В связи с этим можно заключить, что на ряде режимов с отрицательными углами скольжения, когда РВ оказывается расположенным над левым вихревым жгутом НВ, падение тяги будет наблюдаться при обоих

вариантах направления вращения РВ. Как показали проведенные в работе расчеты, это диапазон скоростей $V = 5 \dots 7,5$ м/с при угле атаки винта $\alpha_n = 0^\circ$. Кроме того, очевидно, что такой эффект будет наблюдаться и при других, больших значениях скоростей полета V при наличии небольших отрицательных углов атаки НВ.

Выявление и анализ данных режимов с целью определения величин возможного падения тяги для винта с направлением вращения В-Н требует дополнительных исследований, что особенно актуально в связи с тем, что такое направление вращения принято на большинстве современных вертолетов.

Выводы

Для оценки эффекта интерференции НВ и РВ проведены расчетные исследования комбинации несущего и рулевого винтов вертолета Ми-2 при скоростях полета $V = 2,5 \dots 15$ м/с, когда интенсивность вторичных вихревых жгутов НВ близка к максимальной.

Расчеты выполнены на основе нелинейной вихревой модели винта со свободным диффундирующим следом по программе, учитывающей одновременную совместную работу НВ и РВ вертолета с учетом их интерференции. Расчеты произведены для тяги НВ, соответствующей взлетной массе вертолета для угла атаки винта $\alpha_n = 0$ и диапазона углов скольжения $\beta_n = -180 \dots 180^\circ$.

Рассчитаны, построены и проанализированы структуры вихревого следа изолированных винтов (НВ и РВ), а также с учетом их интерференции.

Для фиксированного значения тяги НВ рассчитан крутящий момент и необходимая на его уравновешивание тяга РВ. Определены углы установки, обеспечивающие величину этой тяги для случая изолированного РВ. Для тех же углов установки определена тяга РВ при разных направлениях его вращения (В-В и В-Н) с учетом интерференции.

Установлено, что интерференция НВ и РВ при полете на малых скоростях со скольжением определяется особенностями вихревой структуры НВ, образующей два вторичных вихревых жгута и их положением относительно РВ.

Выявлено, что эффект интерференции зависит от угла скольжения НВ β_n и от направления вращения РВ, а также скорости набегающего потока.

Определено, что на рассмотренных режимах направление вращения РВ «В-Н» является более рациональным с точки зрения величины тяги, чем направления вращения «В-В».

Установлено, что существуют режимы работы винтов, когда наблюдается значительное падение тяги вследствие интерференции для обоих рассмотренных направлений вращения, как для В-В, так и для В-Н.

Максимальный прирост тяги РВ за счет интерференции наблюдается при угле скольжения $\beta_n = 85^\circ$ ($V=10\text{м/с}$) и достигает 174% (В-Н) и 170% (В-В) по сравнению с тягой изолированного РВ, который находится на режиме «вихревого кольца».

Максимальное падение тяги РВ за счет интерференции наблюдается при попадании РВ в левый вихревой жгут НВ при $\beta_n = -50^\circ$ и составляет 68% ($V=7,5$ м/с, В-В) при $\beta_n = -50^\circ$ и 80% ($V=7,5$ м/с, В-Н) при $\beta_n = -70^\circ$ от тяги изолированного РВ.

Полученные результаты могут быть использованы для выбора рационального направления вращения РВ и анализа путевой устойчивости и управляемости вертолета с точки зрения обеспечения безопасности полета вертолета на малых скоростях со скольжением, либо на режиме висения с боковым ветром.

Полученная информация позволяет определить область режимов полета вертолета, при которых из-за падения тяги РВ возможно возникновение самопроизвольного вращения вертолетов одновинтовой схемы.

Работа по исследованию интерференции винтов на режимах полета со скольжением с небольшими скоростями требует продолжения за счет расширения перечня рассматриваемых режимов и уточнения параметров расчетной модели

Библиографический список

1. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И. Численное моделирование интерференции между несущим и рулевым винтами вертолета на режиме горизонтального полета со скольжением // Электронный журнал «Труды МАИ», 2013, выпуск №69:

публикации 10.10.2013)

2. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И. Численное исследование аэродинамической интерференции несущих и рулевых винтов на особых режимах полета // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. №200. С. 47 – 54.
3. Шибаетов В., Фаворова Т., Аполлонов Д. Тренировки пилотов в расширенной области параметров движения воздушного судна как залог безопасности полетов // Аэрокосмический курьер. 2011. №5. С. 48 – 49.
4. Бутов В.П. Структура, геометрия и интенсивность спутного вихревого следа несущих винтов одновинтовых и сросных вертолетов в реальных условиях полета // Труды 4-го форума Российского вертолетного общества. Москва, 2000, С. 19 - 34.
5. Аэродинамика крыла и корпуса летательного аппарата / Тематический сборник научных трудов института – М.: МАИ, 1982. – 60 с.
6. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Гревцов Б.С., Шомов А.И. Нелинейная лопастная вихревая теория винта и ее приложения для расчета аэродинамических характеристик несущих и рулевых винтов вертолета // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т.16. №5. – С. 24 – 31.
7. 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», 2010, №38: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=14148> (дата публикации 23.06.2010).

8. Зозуля В.Б., и др. Практическая аэродинамика вертолета Ми-2. - М.: Воздушный транспорт, 1984. – 175 с.