

УДК 629.7.036.001

Розглядаються недоліки сучасної теорії повітря-реактивних двигунів, пов'язані з помилковою теоремою о під'йомній силі продувального профілю, розрахованою професором М.Є.Жуковським у 1912 році у його статті "Вихревая теория гребного винта"

Ключові слова: кінематичний аналіз, контрвертаючі повітряні гвинти, тяга продувального профілю, під'йомна сила

Рассматриваются недостатки современной теории воздушно-реактивных двигателей, связанные с ошибочной теоремой о подъемной силе продувального профиля, выведенной профессором Н.Е.Жуковским в 1912г. в его статье "Вихревая теория гребного винта"

Ключевые слова: кинематический анализ, контрвращающиеся воздушные винты, тяга продувального профиля, подъемная сила

К ЕДИНОЙ ТЕОРИИ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА НЕПРЕРЫВНЫХ ПОТОКАХ. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ КОНТРВРАЩАЮЩИХСЯ ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ

Б. Ш. Мамедов

Кандидат технических наук, доцент
Запорожский национальный технический университет
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063
www.zntu.edu.ua

1. Введение

Кинематический анализ, проведенный для однорядных воздушных винтов [1], показывает, что к основным недостаткам последних относятся:

1. Повышенная децибелльная характеристика, которая регламентируется ударными волнами, генерируемыми в кинематической зоне жесткого (упругого) удара [1].

2. Наличие кинематической зоны жесткого (упругого) удара, которая генерирует ударные волны в колебательном режиме [1].

3. Низкая окружная скорость вращения однорядных воздушных винтов (290-310 м/с), которую невозможно увеличить из-за наличия кинематической зоны жесткого (упругого) удара в сечении В-В, п. 2.

4. Закрутка газового потока на выходе из лопастей однорядного воздушного винта.

5. Отклонение вектора тяги R лопастей однорядного воздушного винта от оси вращения на угол α .

6. Низкие экологические и технико-экономические показатели однорядных воздушных винтов, которые регламентируются п.п.1-5.

В современной технической литературе по теории и расчету однорядных воздушных винтов, например, [2], полностью отсутствует правильный вывод формул тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе продуваемой лопасти воздушного винта, основанный на кинематическом анализе характера изменения статических давлений, осевых скоростей, первичных движущих сил от изменения статических давлений, ускорений (вторичных движущих динамических-инерционных сил) газового потока в пределах контрольного контура Н-Н₁, теория относительности.

Известный вывод теоремы о подъемной силе продуваемого профиля, выведенной профессором Н.Е.Жу-

ковским в его статье "Вихревая теория гребного винта", 1912 г., является ошибочной, подробная критика его теоремы приведена в [1, 3, 4] и др. источниках.

Построение плана скоростей на входе и на выходе из лопастей однорядного воздушного винта фиксирует закрутку газового потока на выходе из лопастей однорядного воздушного винта, которую специалисты классифицировали, и совершенно справедливо, как недостаток однорядных воздушных винтов, п. 4.

В основе конструкции контрвращающихся воздушных винтов заложена идея раскрутки водно-газового потока после первого воздушного винта вторым контрвращающимся воздушным винтом до осевого направления с целью увеличения тяги контрвращающихся воздушных винтов на 5-7% по сравнению с однорядным воздушным винтом.

Таким образом, из всех вышеперечисленных шести недостатков однорядных воздушных винтов контрвращающиеся воздушные винты предназначены только для устранения закрутки газового потока после первого воздушного винта, п. 4, увеличивая при этом общую тягу на 5-7%.

В патенте [1] приводится разработка принципиально нового типа движителя на непрерывных потоках – спутновращающихся воздушных винтов, которые полностью устраняют все шесть недостатков однорядных воздушных винтов. Естественно, чтобы перейти к описанию спутновращающихся воздушных винтов, необходимо иметь полное представление о преимуществах и недостатках как однорядных, так и контрвращающихся воздушных винтов.

Поэтому перед уже созданной единой теорией движителей на непрерывных потоках стояла проблема: на основании неизменного в современной теории воздушных винтов метода кинематического анализа характера изменения статических давлений, первичных

движущих сил от изменения статических давлений, осевых скоростей, ускорений (вторичных движущих динамических-инерционных сил) газового потока вывести единые для всех двигателей на непрерывных потоках формулы тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе (поперечной силе) продуваемого профиля лопасти воздушного винта, раскрыть все преимущества и недостатки контрвращающихся воздушных винтов.

2. Применение кинематического анализа для вывода формул тяги

Применение кинематического анализа характера изменения статических давлений, первичных движущих сил от изменения статических давлений, осевых скоростей, ускорений (вторичных динамических-инерционных сил) газового потока в пределах контрольного контура Н-Н₁ для вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе продуваемого профиля лопасти контрвращающихся воздушных винтов, как двигателей на непрерывных потоках, проводится впервые. Принятая терминология соответствует терминологии современной теории воздушно-реактивных двигателей.

2.1. Выбор контрольного контура

Продуваемые миделевые профили лопастей 1 и 2, рис. 1, вращаются в разных направлениях по миделевому радиусу относительно оси контрвращающихся воздушных винтов с окружными скоростями U_1, U_2 соответственно, при этом $U_1 > U_2$. Применяв теорему о плоско-параллельном перемещении частиц газового потока, строим планы скоростей на входных и выходных кромках профилей лопастей контрвращающихся воздушных винтов, сечения $B_1-B_1, C_1-C_1, B_2-B_2, C_2-C_2$. При вращении лопастей контрвращающихся воздушных винтов по их корытцам генерируется зона заторможенного потока 3, 4, рис. 1, в которой все частицы газового потока перемещаются к выходным кромкам лопастей первого и второго по ходу потока контрвращающихся воздушных винтов, при этом перед входной кромкой первого рабочего колеса, сечение B_1-B_1 , генерируется разрежение, которое инжектирует (всасывает) газовый поток от сечения Н-Н, рис. 1. Сечение Н-Н называется зоной невозмущенного потока, с которой начинается контрольный контур, или сечение Н-Н – это начало ускоренного движения частиц газового потока. Таким образом, контрольный контур контрвращающихся воздушных винтов ограничен слева сечением Н-Н, справа сечением Н₁-Н₁ – это сечение, которое характеризует конец ускоренного движения частиц газового потока. Зоны заторможенного потока, рис. 1, поз. 3, 4, характеризуются зонами сжатия газового потока B_1-K_1, B_2-K_2 , соответственно, в которых градиент статических давлений направлен против потока, и зонами ускоренного движения частиц газового потока K_1-C_1, K_2-C_2 , в которых градиент статических давлений направлен по потоку, или, другими словами, зоны K_1-C_1, K_2-C_2 – это реактивные сопла, в которых генерируется тяга продуваемого профиля соответствующей лопасти контрвращающихся воздушных винтов. При этом необходимо отметить, что внешний вид зоны заторможенного потока, рис. 1, поз. 3, 4, ха-

рактер распределения статических давлений в этих зонах полностью соответствуют экспериментальным данным современной теории воздушно-реактивных двигателей по продуваемым профилям, [5], где четко и ясно показано, что максимальное давление продуваемого газового потока по корытцу продуваемого профиля находится в зоне входной кромки продуваемого профиля, и это максимальное давление продуваемого потока постепенно уменьшается по мере перемещения потока к выходной кромке продуваемого профиля, что полностью соответствует всем законам механики истечения жидкостей и газов.

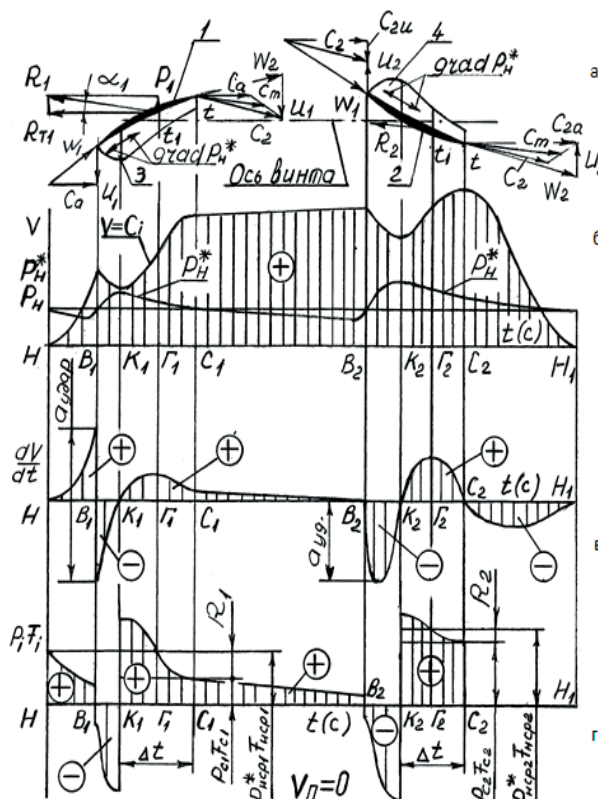


Рис. 1. Кинематический анализ характера изменения статических давлений, первичных движущих сил от изменения статических давлений, осевых скоростей, ускорений (вторичных движущих динамических-инерционных сил) газового потока

На рис. 1 представлено:

- а – продуваемые профили лопастей контрвращающихся воздушных винтов по миделю;
- б – кинематический анализ характера изменения статических давлений, осевых скоростей продуваемого потока в пределах контрольного контура Н-Н₁ контрвращающихся воздушных винтов;
- в – кинематический анализ характера изменения осевых ускорений (вторичных динамических-инерционных сил) контрвращающихся воздушных винтов в пределах контрольного контура Н-Н₁;
- г – кинематический анализ характера изменения первичных движущих сил от изменения статических давлений продуваемого газового потока контрвращающихся воздушных винтов в пределах контрольного контура Н-Н₁.

Положение зоны невозмущенного потока Н-Н регламентируется режимом работы контрвращающихся воздушных винтов, при увеличении оборотов контрвращающихся воздушных винтов сечение Н-Н удаляется от сечения V_1-V_1 , при уменьшении оборотов сечение Н-Н приближается к сечению V_1-V_1 . При работе воздушных контрвращающихся винтов по корытцу продуваемых лопастей всегда генерируются зоны заторможенного потока, рис. 1, поз. 3, 4, которые регламентируют следующие зоны и сечения контрольного контура Н-Н₁ при скорости перемещения (полета) $V_{\text{н}} \geq 0$:

Н-Н – сечение невозмущенного потока, регламентирующее равенство площадей работ первичных сил от изменения статических давлений в зонах Н-В₁ и В₁-К₁, рис. 1;

Н-В₁ – зона ускоряемого газового потока, в которой градиент статических давлений, рис. 1, б, и градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений (рис. 1, г) направлены по потоку;

В₁-К₁ – зона сжатия продуваемого газового потока, в которой градиент статических давлений (рис. 1, б) и градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений (рис. 1, г) направлены против потока;

К₁-С₁ – зона ускоряемого газового потока, в которой градиент статических давлений, рис. 1, б, и градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений (рис. 1, г) направлены по потоку, или зона К₁-С₁ – это реактивное сопло, в котором генерируется тяга (93-95%) контрвращающихся воздушных винтов;

С₁-В₂ – зона выходящей струи из первой лопасти или первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов, закрученной против вращения второго контрвращающегося воздушного винта, которая одновременно является зоной входящей закрученной струи во второе контрвращающееся рабочее колесо, в которой градиент статических давлений и градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений газового потока направлены по потоку;

В₂-К₂ – зона сжатия продуваемого газового потока на лопастях второго контрвращающегося воздушного винта, в которой градиент статических давлений и градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений газового потока направлены против потока;

К₂-С₂ – зона ускоряемого газового потока на лопастях второго контрвращающегося воздушного винта, в которой градиент статических давлений и градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений (рис.1, б, г) направлены по потоку, или зона К₂-С₂ – это реактивное сопло, в котором генерируется дополнительная тяга (5-7%) контрвращающихся воздушных винтов;

С₂-Н₁ – зона выходящей струи из второго контрвращающегося воздушного винта, в которой при $P_c > P_{\text{н}}$ градиент статических давлений направлен по потоку, при $P_c = P_{\text{н}}$ градиент статических давлений равен нулю, при $P_c < P_{\text{н}}$ градиент статических давлений газового потока направлен против потока, где $P_{\text{н}}$ – давление окружающей среды, при этом вне зависимости от величины P_c градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений газового потока всегда

равен нулю, поскольку, согласно закона Бойля-Мариотта, $P_i F_i = \text{const}$, т.е. работа первичных движущих сил от изменения статических давлений газового потока в выходящей струе всегда равняется нулю, газовый поток в выходящей струе движется только под действием инерционных сил;

Н₁-Н₁ – сечение невозмущенного потока, в котором ускорение продуваемого газового потока равно нулю.

Зона контрольного контура Н-Н₁ контрвращающихся воздушных винтов полностью совпадает с зонами контрольного контура турбореактивного двигателя, [6], крыла птицы [7] и других движителей на непрерывных потоках. Согласно единой теории движителей на непрерывных потоках процесс генерирования тяги всеми типами движителей одинаков. Поэтому методика вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД лопастей контрвращающихся воздушных винтов ничем не будет отличаться от аналогичной для турбореактивных двигателей, а методика вывода теоремы о подъемной силе продуваемого профиля лопастей контрвращающихся воздушных винтов ничем не будет отличаться от аналогичной для крыла птицы и др. движителей, т.е. единая теория движителей разработана единые, общие для всех типов движителей на непрерывных потоках формулы тяги, полетного (тягового) КПД, теорему о подъемной силе продуваемого профиля.

2.2. Характеристика внешних сил, действующих на трубку тока в зоне контрольного контура Н-Н₁

При характеристике внешних сил, действующих на трубку тока в зоне контрольного контура Н-Н₁ контрвращающихся воздушных винтов, необходимо учитывать, что всегда первична статика, а вторична динамика газового потока.

К внешним силам, действующим на трубку тока в зоне Н-Н₁, относятся:

1. Первичные движущие силы от изменения статических давлений газового потока, $P_i F_i$, где P_i – статическое давление продуваемого газового потока в i -м сечении газодинамического тракта в пределах контрольного контура Н-Н₁; F_i – площадь i -го сечения газодинамического тракта в пределах контрольного контура Н-Н₁.

2. Вторичные движущие силы от изменения динамических-инерционных сил, $m_t a_t$, где m_t – массовый секундный расход газового потока через лопасть воздушного винта, a_t – ускорение газового потока в i -м сечении газодинамического тракта в пределах контрольного контура Н-Н₁.

3. Силы сопротивления – это силы, которые направлены против потока и к которым могут относиться как первичные движущие силы от изменения статических давлений, например, в зонах В₁-К₁, В₂-К₂, так и динамические-инерционные силы, когда сила инерции направлена против потока, а также сила сопротивления $P_c F_c$.

4. Сила тяги R лопастей воздушных контрвращающихся винтов, которая, как и сила сопротивления $P_c F_c$, всегда направлена против потока при своем положительном значении. На отдельных участках контрольного контура Н-Н₁, например, зоны В₁-К₁, В₂-К₂, генерируются отрицательные внешние силы тяги, которые направлены по потоку, однако они всегда ском-

пенсированы положительными силами тяги, которые генерируются в зонах Н-В₁, С₁-В₂ соответственно.

5. Гравитационные силы продуваемого газового потока, которые при горизонтальном перемещении не учитываются.

Силы трения газового потока о поверхности лопастей контрвращающихся воздушных винтов не учитываем.

Таким образом, в контрольном контуре Н-Н₁ рассматривается замкнутая система всех внешних сил, действующих на трубку тока в зоне Н-Н₁, т.е. векторная сумма всех внешних сил в пределах контрольного контура Н-Н₁ всегда равна нулю, замыкает векторный силовой многоугольник, в нашем случае линия, всегда тяга лопастей первого и второго контрвращающегося воздушного винта.

Замкнутая система внешних сил, отражая единый Закон сохранения энергии, предусматривает и равенство работ всех внешних сил, направленных по потоку и против потока. При наличии кинематического анализа работа любых внешних сил условно изображается площадью соответствующих геометрических фигур, например, работа вторичных динамических-инерционных сил, направленных против потока, условно изображается тремя геометрическими фигурами со знаком "плюс", направленных по потоку условно изображается тремя геометрическими фигурами со знаком "минус", рис. 1, в. Согласно Закону сохранения энергии сумма площадей геометрических фигур для вторичных динамических-инерционных сил со знаком "плюс" всегда равна сумме площадей геометрических фигур со знаком "минус", т.е. векторный силовой многоугольник, в нашем случае линия, всегда должен быть замкнутым для вторичных движущих динамических-инерционных сил. То же самое касается и для первичных движущих сил от изменения статических давлений газового потока в пределах контрольного контура Н-Н₁, например, работа первичных движущих сил в зоне Н-В₁ со знаком "плюс", рис. 1, г, полностью компенсируется работой первичных движущих сил в зоне В₁-К₁ со знаком "минус", положительная работа первичных движущих сил в зоне К₁-С₁ полностью компенсируется отрицательной работой внешних сил – сил сопротивления $P_{c1}F_{c1}$ и R_1 , отрицательная работа этих сил сопротивлений в виде геометрических фигур со знаком "минус" (рис. 1, г) условно не показана, то же самое касается и зоны К₂-С₂. Работа первичных движущих сил в зоне С₁-В₂ со знаком "плюс", рис. 1, г, полностью компенсируется работой первичных движущих сил в зоне В₂-К₂ со знаком "минус", положительная работа первичных движущих сил в зоне К₂-С₂ полностью компенсируется отрицательной работой внешних сил – сил сопротивления $P_{c2}F_{c2}$ и R_2 второго контрвращающегося воздушного винта. работа первичных движущих сил от изменения статических давлений газового потока в зоне выходящей струи С₂-Н₁ (рис. 1, г) всегда равна нулю, поскольку работа силы $P_{c2}F_{c2}$ на участке С₂-Н₁ всегда компенсируется равной и противоположно направленной работой силы $P_{c1}F_{c1}$ на этом же участке, поскольку, согласно закона Бойля-Мариотта, в выходящей струе $P_{c2}F_{c2} = P_{c1}F_{c1} = P_1F_1 = const$. Газовый поток в зоне выходящей струи С₂-Н₁ движется только под действием силы инерции.

Таким образом, согласно Закона сохранения энергии сумма площадей геометрических фигур, изображающих работу первичных движущих сил от изменения статических давлений и вторичных движущих динамических-инерционных сил, со знаком "плюс" всегда равна сумме площадей геометрических фигур со знаком "минус", т.е. векторный силовой многоугольник, в нашем случае линия, всегда должен быть замкнутым, а для первичных движущих сил от изменения статических давлений газового потока таким замыкающим вектором является тяга R_1 и R_2 лопастей первого и второго контрвращающихся воздушных винтов.

На основании вышеизложенного, уже созданная единая теория движителей на непрерывных потоках ставила своей целью (заданием) создать новую теорию воздушных контрвращающихся винтов на основе вывода принципиально новых фундаментальных формул тяги, полетного (тягового) КПД и теоремы о подъемной силе продуваемой лопасти воздушных контрвращающихся винтов.

2.3. Применение кинематического анализа характера изменения статических давлений, осевых скоростей, первичных движущих сил

Кинематический анализ, приведенный на рис. 1, показывает, что при вращении лопастей первого, 1, и второго, 2, контрвращающихся воздушных винтов перед их входными кромками, сечения В₁-В₁ и В₂-В₂, генерируется разрежение и частицы газового потока с некоторого сечения Н-Н, которое называется зоной невозмущенного потока, начинают перемещаться к сечению В₁-В₁ с нарастающим ускорением (рис. 1, в) зона Н-В₁. При достижении входной кромки лопастей первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов газовый поток сжимается в зоне В₁-К₁, его осевая скорость уменьшается, а статическое давление, наоборот, увеличивается (рис. 1, б) зоны Н-В₁, В₁-К₁. Процесс сжатия газового потока осуществляется до сечения К₁-К₁, после которого газовый поток в зоне К₁-С₁ ускоряется, процесс ускорения газового потока в этой зоне всегда сопровождается уменьшением статического давления до P_n в сечении С₁-С₁, зона К₁-С₁ при этом является реактивным соплом, в котором генерируется тяга R_1 лопастей первого рабочего колеса, поскольку работа первичных движущих сил в зоне Н-В₁ полностью компенсируется работой аналогичных сил в зоне В₁-К₁ (рис. 1, г). Положительная работа первичных движущих сил от изменения статических давлений в зоне реактивного сопла К₁-С₁ полностью компенсируется работой сил сопротивлений $P_{c1}F_{c1}$ и R_1 . Дополнительные графики работ сил сопротивлений $P_{c1}F_{c1}$ и R_1 для зоны К₁-С₁, $P_{c2}F_{c2}$ и R_2 для зоны К₂-С₂ на рис. 1 условно не показаны, но их всегда необходимо иметь в виду.

При этом необходимо отметить, что вектор тяги R_1 , который генерируется лопастями первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов, всегда противоположен среднему вектору C_m , (рис. 1, а) и составляет определенный угол α с осью вращения контрвращающихся воздушных винтов, разложение вектора тяги R_1 на две составляющие, R_{T1} , P_1 , где R_{T1} – осевая составляющая, P_1 – подъемная сила, генерируемая лопастями первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов, которая дает возможность сформулировать теорему о подъемной силе продуваемых

лопастей первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов. Все то же самое касается и продуваемых лопастей второго рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов.

Кинематический анализ, рис. 1, показывает, что касательная к любой точке кривой, характеризующей изменение осевых скоростей газового потока в зоне Н-В₁, имеет определенный угол наклона α к горизонту, при этом $\operatorname{tg}\alpha$, условно характеризующий ускорение газового потока, с увеличением осевой скорости последнего растет и имеет положительное значение. В сечении В₁-В₁ $\operatorname{tg}\alpha$ мгновенно меняет свое значение на отрицательное, что является свидетельством наличия в сечении В₁-В₁ так называемой кинематической зоны жесткого (упругого) удара, сила которого прямо пропорциональна произведению секундной массы продуваемого газового потока на ускорение удара, рис. 1, в, генерируя в окружающее пространство мощные ударные волны в колебательном режиме, регламентируя высокую децибельную характеристику, что является основным недостатком как однорядных, так и контрвращающихся воздушных винтов, ограничивая окружную скорость на лопастях воздушных винтов величиной не более 310 м/с.

Согласно плану скоростей газового потока на входной и выходной кромках лопастей первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов (рис. 1, а), газовый поток претерпевает максимальную закрутку на выходной кромке, при этом под действием центробежных сил генерируется дополнительный градиент статических давлений газового потока, $\operatorname{grad} P_d$, направленный к центру сечения С₁-С₁, который одновременно тормозит и стягивает газовый поток в жгут в зоне С₁-В₂.

Процесс торможения газового потока в зоне С₁-В₂ под действием дополнительного градиента статических давлений, $\operatorname{grad} P_d$, положительно сказывается на кинематике потока, поскольку последний достигает входной кромки лопастей второго рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов при нулевом ускорении и сила удара в сечении В₂-В₂ будет регламентироваться только наклоном характеристики изменения осевых скоростей газового потока в зоне В₂-К₂. Сила удара во второй кинематической зоне неупругого удара, сечение В₂-В₂, почти наполовину меньше аналогичной в сечении В₁-В₁. Однако обороты второго рабочего колеса существенно ниже оборотов первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов. Это объясняется тем, что при наличии на входе встречной закрутки газового потока по корытцам лопастей второго рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов степень сжатия заторможенного газового потока $\Pi_{K_2}^*$ в зоне В₂-К₂ существенно превосходит аналогичную $\Pi_{K_1}^*$ в зоне В₁-К₁ первого рабочего колеса, регламентируя, таким образом, расчетную гидродинамическую нагрузку на лопасти второго рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов. Поэтому любое увеличение оборотов второго рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов приведет к увеличению гидродинамической нагрузки на лопасти второго рабочего колеса, что неизбежно приведет к поломке последних.

Наличие на входе в лопасти второго рабочего колеса встречной закрутки газового потока способствует

удлинению зоны сжатия потока В₂-К₂ по сравнению с аналогичной зоной В₁-К₁ на лопастях первого рабочего колеса. Удлинение зоны сжатия В₂-К₂ при высоком $\Pi_{K_2}^*$ способствует тому, что сжатый в зоне В₂-К₂ газовый поток в зоне К₂-С₂, в зоне реактивного сопла, не успеет расшириться до Р_н в сечении С₂-С₂ и покидает это сечение со статическим давлением $P_{C_2}^* > P_n$, что существенно снижает тягу лопастей, полетный (тяговый) КПД, [8, при $\Pi_{c.p.} > \Pi_{c.расч.}$], [8 – 10].

Кинематический анализ показывает, что вторичные движущие динамические-инерционные силы в пределах контрольного контура Н-Н₁ дают общую сумму, равную нулю, или, другими словами, суммарная работа вторичных динамических-инерционных сил в пределах контрольного контура Н-Н₁ всегда равна нулю (рис. 1, в). Графически это выражается в том, рис. 1, в, что площадь геометрических фигур, условно отражающих работу вторичных динамических-инерционных сил со знаком "плюс" всегда равна площади геометрических фигур со знаком "минус".

Исходя из этого, кинематический анализ позволяет сделать следующий вывод: изменение скорости продуваемого газового потока, обтекающего продуваемые лопасти первого или второго рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов в пределах контрольного контура Н-Н₁, генерирует динамические-инерционные силы, сумма которых в пределах контрольного контура Н-Н₁ всегда равна нулю, это означает, что скорость продуваемого потока никогда не создает тягу движителя. Тяга любого движителя на непрерывных потоках создается только положительной работой первичных движущих сил от изменения статических давлений продуваемого газового потока в зоне К₁-С₁, К₂-С₂ лопастей контрвращающихся воздушных винтов, поскольку положительная работа первичных сил в зонах К₁-С₁, К₂-С₂ (рис. 1, г) полностью компенсируется отрицательной работой сил сопротивления $P_{c_1}F_{c_1}$, $P_{c_2}F_{c_2}$ и отрицательной работой сил тяги R₁ и R₂, которые генерируются на лопастях первого и второго рабочих колес контрвращающихся воздушных винтов.

Кинематический анализ показывает, что основным преимуществом контрвращающихся воздушных винтов является кинематика газового потока на входе в лопасти второго рабочего колеса, обеспечивающая нулевое ускорение потока, что существенно снижает мощность ударных волн, генерируемых в кинематической зоне неупругого удара, сечение В₂-В₂.

Кинематический анализ показывает также, что к основным недостаткам контрвращающихся воздушных винтов относятся:

1. Повышенная децибельная характеристика, которая регламентируется мощными ударными волнами, генерируемыми в кинематической зоне жесткого (упругого) удара (рис. 1, в) сечение В₁-В₁ первого рабочего колеса, и неупругими ударными волнами существенно меньшей мощности, которые генерируются на входе в лопасти второго контрвращающегося рабочего колеса, рис. 1, в, сечение В₂-В₂.

2. Наличие кинематической зоны жесткого (упругого) удара на входе в лопасти первого рабочего колеса, наличие кинематической зоны неупругого удара на входе во второе рабочее колесо контрвращающихся воздушных винтов, рис. 1, в, сечения В₁-В₁, В₂-В₂.

3. Низкая окружная скорость вращения как первого, так и второго контрвращающегося воздушного винта, что регламентируется п. 2.

4. Наличие двух колен закрутки и раскрутки газового потока после сечения V_1-V_1 (закрутка) и в зоне V_2-C_2 (раскрутка).

5. Отклонение векторов тяги R_1, R_2 , генерируемых соответственно лопастями первого и второго рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов, от оси вращения на угол α_1, α_2 , что снижает полетный (тяговый) КПД винтов.

6. Очень низкий полетный (тяговый) КПД лопастей второго рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов, составляющий (5-7)% от подведенной ко второму контрвращающемуся рабочему колесу энергии, по сравнению с полетным (тяговым) КПД лопастей первого рабочего колеса, составляющим 30% от подведенной к первому рабочему колесу энергии, при этом энергия, подведенная к первому и второму рабочему колесу, одинакова. Низкий полетный (тяговый) КПД второго рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов объясняется низкими оборотами, которые не позволяют заторможенному газовому потоку в зоне K_2-C_2 расширяться до P_n в сечении C_2-C_2 , в реалиях $P_{c2}^* > P_n$, что приводит к снижению тяги и КПД.

7. Невозможность увеличения оборотов второго рабочего колеса из-за увеличения гидродинамической нагруженности, которая может привести к поломке лопастей второго контрвращающегося воздушного винта. Увеличение гидродинамической нагруженности по корытцам лопастей второго контрвращающегося воздушного винта объясняется только наличием предварительной закрутки газового потока против вращения лопастей второго контрвращающегося воздушного винта.

8. Все перечисленные недостатки контрвращающихся воздушных винтов по п.п. 1-7 регламентируют их низкие экологические и технико-экономические показатели, включая тягу, расход топлива, децибельную характеристику и др.

Кинематический анализ показывает также, что отрицательная работа первичных движущих сил от изменения статических давлений продуваемого газового потока в зоне V_1-K_1 полностью компенсируется положительной работой первичных движущих сил от изменения статических давлений продуваемого газового потока в зоне $H-V_1$.

Кинематический анализ показывает также, что работа первичных движущих сил от изменения статических давлений в зоне выходящей струи C_2-H_1 для любых типов движителей на непрерывных потоках, включая контрвращающиеся воздушные винты, всегда равна нулю.

Это объясняется тем, что в выходящей струе, зона C_2-H_1 (рис. 1, г) согласно закона Бойля-Мариотта, $P_1 F_1 = \text{const}$, т.е. работа первичных движущих сил от изменения статических давлений продуваемого газового потока ($P_{c2} \cdot F_{c2} \cdot C_2 H_1$, кГм), всегда скомпенсирована равной и противоположной направленной работой сил сопротивлений ($P_{c1} \cdot F_{c1} \cdot C_2 H_1$, кГм), поскольку в выходящей струе:

$$P_{c2} \cdot F_{c2} = P_1 \cdot F_1 = P_{c1} \cdot F_{c1} = \text{const} . \quad (1)$$

На рис. 1 отрицательная работа сил сопротивлений в зонах $K_1-C_1, K_2-C_2, C_2-H_1$ не показана, но ее всегда необходимо иметь в виду.

Такое понятие, как работа силы тяги, при положительной силе тяги, направленной по полету, всегда относится к разряду работ сил сопротивлений, направленных против потока.

Отрицательная работа силы тяги учитывается только в той зоне, где она генерируется, например, зоны K_1-C_1, K_2-C_2 лопастей контрвращающихся воздушных винтов.

Таким образом, кинематический анализ показывает, что нескомпенсированной зоной работы первичных движущих сил от изменения статических давлений продуваемого газового потока, в которой генерируется тяга продуваемых лопастей, например, первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов, является зона K_1-C_1 . Работа, подведенная к продуваемому газовому потоку в зоне K_1-C_1 численно равна площади геометрической фигуры, ограниченной параболической кривой и осью абсцисс, заштрихованная зона со знаком "плюс". Площадь этой геометрической фигуры равна площади прямоугольника со сторонами $P_{nc1}^* \cdot F_{nc1}, K_1 C_1$.

Поэтому, с учетом соответствующих масштабов, можно записать, что подведенная движителем к газовому потоку работа в зоне K_1-C_1 равна:

$$A_{n1} = P_{nc1}^* \cdot F_{nc1} \cdot K_1 C_1, \text{ (кГ}\cdot\text{м)}, \quad (2)$$

где $K_1 C_1$ равно перемещению потока за время Δt_1 , рис. 1, г.

Подведенная к продуваемому газовому потоку в зоне K_1-C_1 работа A_{n1} затрачивается на преодоление работы силы сопротивления:

$$A_{cc1} = P_{c1} \cdot F_{c1} \cdot K_1 C_1, \text{ (кГ}\cdot\text{м)}, \quad (3)$$

и на преодоление работы силы тяги:

$$A_{R1} = R_1 \cdot K_1 C_1, \text{ (кГ}\cdot\text{м)}. \quad (4)$$

Таким образом, можно записать:

$$A_{n1} = A_{cc1} + A_{R1}, \quad (5)$$

или:

$$P_{nc1}^* \cdot F_{nc1} \cdot K_1 C_1 = P_{c1} \cdot F_{c1} \cdot K_1 C_1 + R_1 \cdot K_1 C_1, \quad (6)$$

откуда

$$R_1 = P_{nc1}^* \cdot F_{nc1} - P_{c1} \cdot F_{c1}, \text{ при } V_n = 0, \quad (7)$$

$$R_1' = P_{nc1}' \cdot F_{nc1}' - P_{c1}' \cdot F_{c1}', \text{ при } V_n > 0, \quad (8)$$

$$\text{где } P_{nc1}' = P_{nc1}^* \pm \Delta P_{nc1}^*, \quad (9)$$

где $\pm \Delta P_{nc1}^*$ – приращение или уменьшение среднего статического давления заторможенного газового потока в среднем сечении $\Gamma_1-\Gamma_1$ газодинамического тракта, рис. 1, при $V_n > 0$.

Любое изменение скорости полета влечет за собой изменение всех пяти параметров, входящих в формулы

тяги (7), (8) продуваемой лопасти первого рабочего колеса. Естественно, полную тягу лопастей первого рабочего колеса необходимо рассматривать с учетом количества лопастей.

Таким образом, векторный силовой многоугольник, в нашем случае линия, согласно уравнений (7), (8), всегда замыкается вектором тяги R_1 , R'_1 продуваемой лопасти первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов.

Вывод формулы тяги (8) при $V_n \geq 0$ для лопастей второго рабочего колеса аналогичен вышеприведенному, при этом необходимо иметь в виду, что положительная работа первичных движущих сил от изменения статических давлений продуваемого газового потока в зоне C_1-B_2 , полностью компенсируется отрицательной работой аналогичных сил в зоне B_2-K_2 .

Полетный (тяговый) КПД продуваемой лопасти первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов определяется из уравнения:

$$\eta_{n1} = \frac{A_{R1}}{A_{n1}}, \tag{10}$$

откуда

$$\eta_{r1} = \left(1 - \frac{P_{cl} F_{cl}}{P_{ncr1}^* F_{ncr1}} \right) \cdot 100\%, \text{ при } V_n = 0, \tag{11}$$

$$\eta_{r1} = \left(1 - \frac{P'_{cl} F'_{cl}}{P'_{ncr1} F'_{ncr1}} \right) \cdot 100\%, \text{ при } V_n > 0. \tag{12}$$

Необходимо отметить, что направление векторов тяги R_1, R_2 лопастей первого и второго рабочих колес контрвращающихся воздушных винтов всегда противоположно средним векторам скоростей продуваемого газового потока в зонах B_1-C_1, B_2-C_2 (рис. 1, а) и всегда составляют определенный угол α_1, α_2 с осью вращения, поэтому теорема о подъемной силе продуваемой лопасти, например, первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов описывается уравнением:

$$P_1 = R_1 \cdot \sin \alpha_1, \tag{13}$$

откуда

$$P_1 = (P_{ncr1}^* F_{ncr1} - P_{cl} F_{cl}) \cdot \sin \alpha_1, \text{ при } V_n = 0, \tag{14}$$

$$P'_1 = (P'_{ncr1} F'_{ncr1} - P'_{cl} F'_{cl}) \cdot \sin \alpha'_1, \text{ при } V_n > 0. \tag{15}$$

Поэтому теорему о подъемной силе продуваемого профиля лопасти первого рабочего колеса можно сформулировать следующим образом:

Подъемная сила продуваемого профиля лопасти воздушного винта всегда является функцией от тяги, генерируемой продуваемым профилем лопасти, и рассчитывается по формулам (13), (14), (15).

Отклонение вектора тяги R_1, R'_1 , генерируемой продуваемой лопастью воздушного винта, от оси воздушного винта на угол α_1 влияет на конечное значение полетного (тягового) КПД

$$\eta_{r1} = \left(1 - \frac{P_{cl} F_{cl}}{P_{ncr1}^* F_{ncr1}} \right) \cdot 100\% \cdot \sin \alpha_1, \text{ при } V_n = 0, \tag{16}$$

$$\eta_{r1} = \left(1 - \frac{P'_{cl} F'_{cl}}{P'_{ncr1} F'_{ncr1}} \right) \cdot 100\% \cdot \sin \alpha'_1, \text{ при } V_n > 0. \tag{17}$$

В формулах (2-17) для лопастей первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов приняты следующие обозначения:

R_1 – тяга продуваемой лопасти воздушного винта при $V_n = 0$;

$P_{ncr1}^* = P_{r1}^*$ – статическое давление продуваемого газового потока в среднем сечении $\Gamma_1-\Gamma_1$ газодинамического тракта зоны K_1-C_1 , приведенное к зоне невозмущенного потока H , при $V_n = 0$, зависит также от осевой скорости газового потока в среднем сечении $\Gamma_1-\Gamma_1$;

F_{ncr1} – площадь газодинамического тракта в среднем сечении $\Gamma_1-\Gamma_1$ зоны K_1-C_1 , равная $t_1 \cdot l$ при $V_n = 0$, где t_1 – толщина газодинамического тракта в среднем сечении $\Gamma_1-\Gamma_1$, l – длина лопасти воздушного винта;

P_{cl} – статическое давление продуваемого газового потока в выходном сечении C_1-C_1 реактивного сопла зоны K_1-C_1 при $V_n = 0$;

F_{cl} – площадь газодинамического тракта в выходном сечении C_1-C_1 реактивного сопла зоны K_1-C_1 , равная $t \cdot l$, где t – толщина газодинамического тракта в выходном сечении C_1-C_1 реактивного сопла зоны K_1-C_1 , при $V_n = 0$;

α_1 – угол между направлением вектора тяги R_1 и осью воздушного винта при $V_n = 0$;

η_{r1} –тяговый КПД продуваемой лопасти воздушного винта при $V_n = 0$;

P_1 – подъемная сила продуваемой лопасти воздушного винта при $V_n = 0$;

R'_1 – тяга продуваемой лопасти воздушного винта при $V_n > 0$;

$P_{ncr1}^* = P_{r1}^*$ – статическое давление продуваемого газового потока в среднем сечении $\Gamma_1-\Gamma_1$ газодинамического тракта зоны K_1-C_1 , приведенное к зоне невозмущенного потока H при $V_n > 0$, зависит также от осевой скорости газового потока в среднем сечении $\Gamma_1-\Gamma_1$;

F'_{ncr1} – площадь газодинамического тракта в среднем сечении $\Gamma_1-\Gamma_1$ зоны K_1-C_1 при $V_n > 0$, равная $t'_1 \cdot l$, где t'_1 – толщина газодинамического тракта в среднем сечении $\Gamma_1-\Gamma_1$ при $V_n > 0$;

P'_{cl} – статическое давление продуваемого газового потока в выходном сечении C_1-C_1 реактивного сопла зоны K_1-C_1 при $V_n > 0$;

α'_1 – угол между направлением вектора тяги R'_1 и осью воздушного винта при $V_n > 0$;

η_{r1} –полетный (тяговый) КПД продуваемой лопасти воздушного винта при $V_n > 0$;

P'_1 – подъемная сила продуваемой лопасти воздушного винта при $V_n > 0$.

2.4. Применение уравнения Эйлера, как контрольного варианта, для вывода формулы тяги

Для решения поставленной задачи рассмотрим применение уравнения Эйлера только для трубки тока в зоне K_1-C_1 , поскольку применение уравнения Эйлера с той же целью для трубки тока K_2-C_2 (рис. 1, г) будет носить аналогичный характер.

Для вывода формулы тяги продуваемой лопасти первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов с помощью уравнения Эйлера необходимо обе части этого уравнения разделить на Δt с

целью перехода на размерность кГ или Н, после чего уравнение Эйлера преобразуется во второй закон И. Ньютона:

$$m_r \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = m_r \cdot a = \sum P_i, \quad (18)$$

где m_r – секундный массовый расход газового потока через продуваемую лопасть воздушного винта; ΔV – разница осевых скоростей на выходе, V_2 , из трубки тока в зоне K_1-C_1 , сечение C_1-C_1 , и на входе, V_1 , в эту же трубку тока, сечение K_1-K_1 ; Δt – время импульса внешних сил, действующих на трубку тока в зоне K_1-C_1 , или время перемещения потока от сечения K_1-K_1 до сечения C_1-C_1 ; $\frac{\Delta V}{\Delta t} = a$ – изменение ускорения продуваемого газового потока в зоне K_1-C_1 ; $m_r \cdot a$ – изменение силы инерции продуваемого газового потока в зоне K_1-C_1 ; $\sum P_i$ – сумма всех остальных внешних сил, действующих на трубку тока в зоне K_1-C_1 , включая силу тяги R_1 продуваемой лопасти первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов, реакции отсоединенных потоков со стороны первичных движущих сил от изменения статического давления, вторичных движущих динамических-инерционных сил продуваемого газового потока, действующих слева на сечение K_1-K_1 от зоны Н- K_1 и справа на сечение C_1-C_1 от зоны C_1-H_1 (рис. 1, г).

В этом случае уравнение Эйлера (18) читается только так: изменение силы инерции продуваемого газового потока $m_r a$, которая является одной из внешних сил, действующих на трубку тока в зоне K_1-C_1 , всегда равняется сумме всех остальных внешних сил, включая силу тяги R_1 продуваемой лопасти воздушного винта, а также реакции отсоединенных потоков от первичных движущих сил от изменения статических давлений, вторичных динамических-инерционных сил продуваемого газового потока, действующих на сечение K_1-K_1 слева от зоны Н- K_1 и на сечение C_1-C_1 справа, от зоны C_1-H_1 .

Запишем уравнение Эйлера (18) в векторной форме:

$$\overline{m_r \cdot 0} = \overline{P_{ин1}} + \overline{P_{ин2}} + \overline{P_{Нср1}^* F_{Нср1}} + \overline{P_{с1} F_{с1}} + \overline{R_1}, \quad (19)$$

где $P_{ин1}$ – реакция отсоединенного потока зоны Н- K_1 от динамических-инерционных сил, которая действует на сечение K_1-K_1 слева; $P_{ин2}$ – реакция отсоединенного потока зоны C_1-H_1 от динамических-инерционных сил, которая действует на сечение C_1-C_1 справа; R_1 – тяга продуваемой лопасти первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов.

Реакции отсоединенных потоков в зоне Н- K_1 и C_1-H_1 , которые действуют на сечения K_1-K_1 , C_1-C_1 со стороны первичных движущих сил от изменения статических давлений продуваемого газового потока, всегда равняются нулю, поэтому уравнение Эйлера (19) можно записать так:

$$\overline{P_{ин1}} + \overline{m_r \cdot 0} + \overline{P_{ин2}} = \overline{R_1} + \overline{P_{Нср1}^* F_{Нср1}} + \overline{P_{с1} F_{с1}}. \quad (20)$$

Левая часть этого уравнения является суммой вторичных динамических-инерционных сил в пределах контрольного контура Н- H_1 , которая для любых движителей на непрерывных потоках, включая рас-

сматриваемые контрвращающиеся воздушные винты, всегда равна нулю, рис. 1, в, тогда в модульной форме:

$$0 = -R_1 + P_{Нср1}^* F_{Нср1} - P_{с1} F_{с1}, \quad (21)$$

откуда следует (7).

Таким образом, продуваемая лопасть первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов генерирует тягу, полетный (тяговый) КПД, теорему о подъемной силе продуваемого профиля, которые рассчитываются по единым формулам тяги, полетного (тягового) КПД, теореме о подъемной силе продуваемого профиля для всех типов движителей на непрерывных потоках, формулы (7), (8), (11), (12), (14), (15), согласно уже разработанной единой теории движителей на непрерывных потоках.

Согласно выведенной теореме о подъемной силе продуваемого профиля лопасти первого рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов, формулы (14), (15), установлено, что подъемную силу любого продуваемого профиля (грот парус яхты, крыло птицы, самолета, планера, любой лопаточный профиль, включая продуваемую лопасть первого и второго рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов и др.) всегда нужно рассчитывать как функцию от тяги, генерируемой продуваемым профилем, установлено, что полетный (тяговый) КПД любого продуваемого профиля, включая любую лопасть воздушных контрвращающихся винтов, дополнительно зависит от угла α_1 , который образуется между вектором тяги R_1 и осью воздушного винта, формулы (16), (17), установлено, что все продуваемые лопасти любых воздушных винтов, как и турбореактивные двигатели, относятся к движителям прямой реакции, тяга которых должна измеряться только в кГ или Н.

Исходя из вышеизложенного, единая теория движителей на непрерывных потоках ставит дополнительную цель (задание) перед организациями и фирмами, владеющими аэродинамической трубой, выдать все табличные данные согласно формул (7), (8), (11), (12), (14), (15) с целью существенного упрощения расчета любых лопастей воздушных винтов, поскольку разработанная краткая теория контрвращающихся воздушных винтов, согласно единой теории движителей на непрерывных потоках, утверждает, что конструктор не должен рассчитывать лопасть воздушного винта, он должен выбрать ее из табличных данных, оформленных согласно формул (7), (8), (11), (12), (14), (15).

3. Общие выводы. Перспективы дальнейших разработок

Разработанная краткая теория контрвращающихся воздушных винтов является логической цепью серии статей, касающихся создания краткой теории однорядных воздушных винтов, краткой теории контрвращающихся воздушных винтов, краткой теории спутновращающихся воздушных винтов, сравнительного анализа одnorядных, контрвращающихся и спутновращающихся воздушных винтов с целью выбора наиболее эффективного варианта.

Контрвращающиеся воздушные винты критикуются с любых позиций и относятся к категории движителей на непрерывных потоках с большими энергетическими затратами и очень низким полетным (тяговым) КПД, поскольку подведенная работа (мощность) к двум воздушным контрвращающимся винтам одинакова, но на первом рабочем колесе $\eta_{п1}$, $\eta_{п1}$ равны 30-35%, а на втором рабочем колесе контрвращающихся воздушных винтов $\eta_{п2}$, $\eta_{п2}$ равны 5-7%, что объясняется очень низкими оборотами второго рабочего колеса по сравнению с первым, при которых заторможенный по корытцам лопастей продуваемый газовый поток на выходе из реактивного сопла, сечение S_2-S_2 , имеет статическое давление, существенно превышающее P_n , т.е. $P_{c2}^* > P_n$, что, естественно, снижает тягу и КПД второго рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов. Увеличить обороты второго рабочего колеса невозможно, поскольку увеличение оборотов приведет к увеличению гидродинамической нагруженности на корытце продуваемой лопасти выше расчетной, что может привести к поломке последних. Повышенная гидродинамическая нагруженность на корытце продуваемых лопастей второго рабочего колеса контрвращающихся воздушных винтов объясняется только встречной закруткой газового потока на входных кромках последних.

Содержание данной статьи открывает широкие перспективы, прежде всего её практического применения, например, отклонение вектора тяги R_1 лопасти воздушного винта на угол α_1 от оси воздушного винта (рис. 1, а) ставит перед конструкторами решаемую задачу: какие воздушные винты необходимо применить, чтобы обеспечить их максимальный КПД путем обеспечения угла α_1 , равного нулю.

Для получения исходных данных для такого расчета ведущим организациям, фирмам, владеющим аэродинамической трубой, необходимо провести целенаправленную продувку различных профилей лопастей воздушных винтов с целью точной фиксации геометрических и газодинамических параметров зоны заторможенного потока V_1-C_1 или V_2-C_2 , (рис. 1, а).

Исходя из вышеизложенного, конечной целью серии статей будет являться: показать и доказать, что тягу спутновращающихся воздушных винтов можно увеличить на 200-300% по сравнению с однорядным воздушным винтом, если устранить кинематическую зону жесткого (упругого) удара и закрутку газового потока на входных кромках лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся воздушных винтов. Поэтому очередная статья будет касаться создания краткой теории спутновращающихся воздушных винтов, в которой будет приведен их полный анализ.

Литература

1. Патент 26883, Украина, МПК (2006) В64С 11/00, В64С 27/00, В64Д 35/00, F02К 3/00 .Турбогвинтовентиляторный движун [Текст] / Б. Ш. Мамедов. – № U200705886, заявл. 29.05.2007, опубл. 10.10.2007.
2. Юрьев, Б. Н. Избранные труды. Том I. Воздушные винты. Вертолеты [Текст] / Б. Н. Юрьев. – Изд. Академии наук СССР. – Москва, 1961. – 531 с.
3. Мамедов, Б. Ш. Глава 2. Основы единой теории движителей на непрерывных потоках. Вывод формулы тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе продуваемого профиля, как движителя [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – №33. – С. 146-153.
4. Мамедов, Б. Ш. Глава 9. Основы единой теории движителей на непрерывных потоках. Вывод формулы тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе продуваемого профиля единичного размаха. как движителя на непрерывных потоках (краткая теория крыла самолета) [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – №50(956). – С. 3-17.
5. Казанджан, П. К. Теория авиационных двигателей [Текст] / П. К. Казанджан, Н. Д. Тихонов, А. К. Янко. – М.: Машиностроение, 1983. – 223 с.
6. Мамедов, Б. Ш. Глава 1. Основы единой теории движителей на непрерывных потоках. Вывод формулы тяги, полетного (тягового) КПД турбореактивных двигателей [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №4/7 (52). – С. 15-20.
7. Мамедов, Б. Ш. Глава 7. Основы единой теории движителей на непрерывных потоках. Вывод формулы тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе продуваемого профиля крыла птицы, как движителя [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №44. – С. 11-20.
8. Шляхтянко, С. М. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей, [Текст] / С. М. Шляхтянко. – М.: Машиностроение, 1987. – 568 с.
9. Мамедов, Б. Ш. Единая теория движителей. Вывод формул тяги, полетного (тягового) КПД ракетных двигателей. [Текст] / Б. Ш. Мамедов// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №1/7(61). – С. 67-71.
10. Мамедов, Б. Ш. Применение уравнения Эйлера для вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД воздушно-реактивных двигателей по внешним параметрам газового потока при [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №4(978). – С. 3-15.