

Мамедов Б. Ш.

# К ЕДИНОЙ ТЕОРИИ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА НЕПРЕРЫВНЫХ ПОТОКАХ — КРАТКАЯ ТЕОРИЯ СПУТНОВАРЩАЮЩИХСЯ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

*Рассматриваются недостатки современной теории воздушно-реактивных двигателей, основанные на ошибочной теореме о подъемной силе продуваемого профиля, выведенной профессором Н. Е. Жуковским в 1912 г. в его статье «Вихревая теория гребного винта».*

**Ключевые слова:** кинематический анализ, спутновращающиеся гребные винты, тяга и подъемная сила продуваемого профиля

## 1. Введение

Кинематический анализ, проведенный для однорядных гребных винтов, [1, С. 1–24, С. 21, фиг. 1], показывает, что к основным недостаткам последних относятся:

1. Повышенная децибельная характеристика, которая регламентируется мощными ударными волнами, генерируемыми в кинематической зоне жесткого (упругого) удара, [1, С. 21, фиг. 1, сечение В-В].

2. Наличие кинематической зоны жесткого (упругого) удара, которая генерирует мощные ударные волны в колебательном режиме, которые одинаково распространяются во все стороны, [1, С. 21, фиг. 1, сечение В-В].

3. Низкая окружная скорость вращения однорядных гребных винтов (30–40 м/с), которую невозможно увеличить из-за наличия кинематической зоны жесткого (упругого) удара в сечении В-В, п. 2, поскольку мощные ударные волны в колебательном режиме, которые генерируются в этой зоне и направленные против потока, например, тормозят последний, уменьшая  $C_a$  ниже расчетного значения, что неизбежно приводит к развитому срыву потока по спинкам продуваемых профилей гребных винтов, так как углы атаки  $i$  при этом превышают  $5-7^\circ$ , где  $C_a$  — осевая скорость продуваемого водно-газового потока на входных кромках лопастей однорядного гребного винта.

4. Закрутка водно-газового потока на выходе из лопастей однорядного гребного винта, что способствует генерированию дополнительного  $\text{grad } P$ , который после выходной кромки лопастей стягивает вращающийся водно-газовый поток в жгут, тормозя последний, уменьшая при этом осевую скорость и увеличивая статическое давление водно-газового потока за выходным сечением С-С лопасти гребного винта, что приводит к снижению тяги и КПД гребного винта.

5. Отклонение вектора тяги  $R$  лопастей однорядного гребного винта от оси вращения на угол  $\alpha$ , что приводит к снижению тяги и КПД гребного винта.

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

Известные контрвращающиеся гребные винты, [1, С. 6–7], предназначены для раскрутки водно-газового потока после первого рабочего колеса, т. е. для устранения только одного недостатка однорядных гребных

винтов, связанного с п. 4, все остальные недостатки однорядных гребных винтов присущи и контрвращающимся гребным винтам.

В современной технической литературе по теории и расчету однорядных гребных винтов, например, [2, С. 177–220], полностью отсутствует правильный вывод формул тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе продуваемой лопасти гребного винта, основанный на кинематическом анализе характера изменения статических давлений, осевых скоростей, первичных движущих сил от изменения статических давлений, ускорений (вторичных движущих динамических — инерционных сил) водно-газового потока в пределах контрольного контура Н-Н<sub>1</sub>, теория относительности.

Известный вывод теоремы о подъемной силе продуваемого профиля, выведенный профессором Н. Е. Жуковским в его статье «Вихревая теория гребного винта», 1912 г., является ошибочным, подробная критика его теоремы приведена в [1, С. 3–4], [3, С. 146–153], [4, С. 3–17] и др. источниках.

В патенте [1] приводится разработка принципиально нового типа движителей на непрерывных потоках — спутновращающихся гребных винтов, которые полностью устраняют все шесть недостатков однорядных гребных винтов и позволяют увеличить тягу второго спутновращающегося гребного винта на 200–300 % по сравнению с однорядным гребным винтом за счет увеличения оборотов.

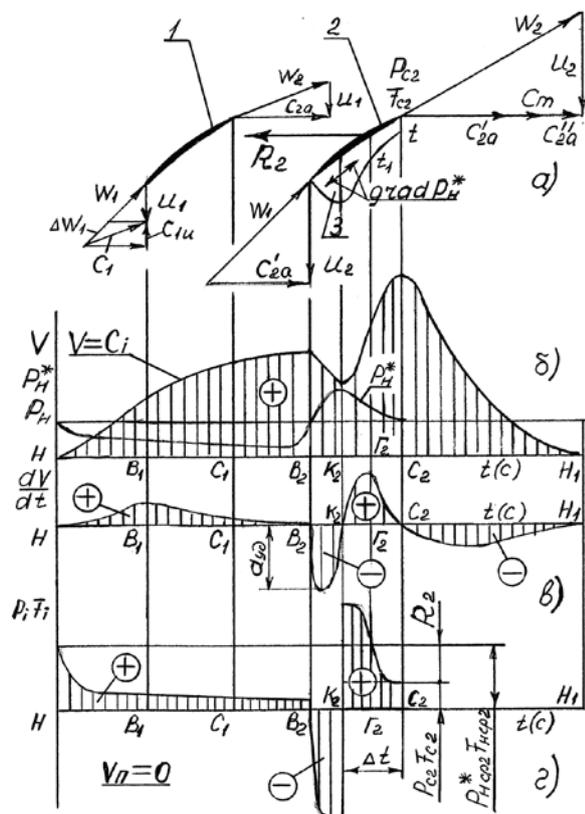
На основании вышеизложенного, перед единой теорией движителей на непрерывных потоках стояла проблема создания краткой теории спутновращающихся гребных винтов, основанной на применении неизвестного в современной теории гребных винтов метода кинематического анализа характера изменения статических давлений, осевых скоростей, первичных движущих сил от изменения статических давлений, ускорений (вторичных движущих динамических — инерционных сил) водно-газового потока с целью вывода единых для всех типов движителей на непрерывных потоках формул тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной (поперечной — морская терминология) силе продуваемой лопасти второго спутновращающегося гребного винта, раскрыть все преимущества спутновращающихся гребных винтов перед однорядными и контрвращающимися гребными винтами.

## 2. Постановка цели

Применение кинематического анализа характера изменения статических давлений, осевых скоростей, первичных движущих сил от изменения статических давлений, ускорений (вторичных движущих динамических — инерционных сил) водно-газового потока в пределах контрольного контура Н-Н<sub>1</sub> для вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе продуваемого профиля лопастей спутновращающихся гребных винтов, как движителя на непрерывных потоках, проводится впервые.

Принятая терминология соответствует терминологии современной теории воздушно-реактивных двигателей.

**2.1. Принцип работы спутновращающихся гребных винтов.** Рабочие колеса 1, 2, рис. 1, спутновращающихся гребных винтов вращаются в одном направлении, при этом производительность второго по ходу потока рабочего колеса 2 выше производительности рабочего колеса 1, что достигается более высокими оборотами и гидравлическими углами β<sub>1</sub> лопастей второго рабочего колеса по сравнению с первым, обеспечивая окружную скорость вращения U<sub>2</sub> > U<sub>1</sub>, при этом, в связи с нарастанием осевой скорости водно-газового потока, что приводит к сужению водно-газодинамического тракта, наружный диаметр второго по ходу потока рабочего колеса меньше наружного диаметра первого рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов.



**Рис. 1.** Кинематический анализ характера изменения статических давлений, первичных движущих сил от изменения статических давлений, осевых скоростей, ускорений (вторичных движущих динамических — инерционных сил) водно-газового потока в пределах контрольного контура Н-Н<sub>1</sub> для вывода формулы тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе продуваемого профиля лопастей спутновращающихся гребных винтов

Таким образом, второе рабочее колесо спутновращающихся гребных винтов, создавая разрежение перед входными кромками своих лопастей, инжектирует (всасывает) водно-газовый поток через каналы между лопастями первого рабочего колеса, которое в данном режиме работы не сжимает водно-газовый поток, а служит только вращающимся направляющим аппаратом с заданным законом вращения (заданными оборотами). Разрежение, которое генерируется перед входными кромками лопастей второго по ходу потока рабочего колеса, способствует увеличению относительных скоростей W<sub>2</sub> и W<sub>1</sub> соответственно на выходе (W<sub>2</sub>) и входе (W<sub>1</sub>) в лопасти первого рабочего колеса. Увеличение W<sub>1</sub> при постоянной U<sub>1</sub> способствует закрутке входящего водно-газового потока в зоне Н-В<sub>1</sub> против вращения спутновращающихся гребных винтов. На рис. 1 закрутка входящего водно-газового потока в сечении В<sub>1</sub>-В<sub>1</sub> изображена вектором C<sub>1u</sub>. Таким образом, в зоне Н-В<sub>1</sub> водно-газовый поток претерпевает плавную нарастающую закрутку, которая достигает своего максимального значения в сечении В<sub>1</sub>-В<sub>1</sub>. Под действием центробежных сил, которые максимальны в сечении В<sub>1</sub>-В<sub>1</sub>, генерируется дополнительный градиент статических давлений водно-газового потока, grad P<sub>д</sub>, направленный к центру сечения В<sub>1</sub>-В<sub>1</sub>, который стягивает поток в жгут до и после сечения В<sub>1</sub>-В<sub>1</sub>, при этом в зоне Н-В<sub>1</sub> grad P<sub>д</sub> способствует дополнительному ускорению водно-газового потока, а в зоне В<sub>1</sub>-В<sub>2</sub> способствует его торможению, получая синусоидальную характеристику изменения осевых скоростей водно-газового потока в зоне Н-В<sub>2</sub>, [1, С. 24, фиг. 4, фиг. 5], обеспечивая нулевое ускорение водно-газового потока на входных кромках лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов. Раскрутка водно-газового потока до осевого направления осуществляется в пределах ширины лопастей первого рабочего колеса — вращающегося направляющего аппарата, рис. 1, а, план скоростей водно-газового потока на выходе из лопасти первого рабочего колеса при расчетной диффузорности лопастей.

Таким образом, в сечении В<sub>2</sub>-В<sub>2</sub> имеет место кинематическая зона неупругого удара, сила которого зависит от наклона характеристики изменения осевых скоростей в зоне В<sub>2</sub>-К<sub>2</sub>, при этом ускорение неупругого удара, [1, С. 24, фиг. 4, б], ауд, существенно уступает ускорению жесткого (упругого) удара в сечении В-В однорядных гребных винтов, [1, С. 22, фиг. 1, б].

Поэтому в спутновращающихся гребных винтах мы имеем реальную возможность увеличить обороты второго по ходу потока рабочего колеса в 2–3 раза по сравнению с оборотами однорядного гребного винта, получив ту же самую силу удара, которая генерируется в сечении В-В однорядных гребных винтов. Увеличение оборотов второго по ходу потока рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов в 2–3 раза по сравнению с расчетными оборотами однорядных гребных винтов означает и увеличение тяги спутновращающихся гребных винтов на 200–300 % по сравнению с однорядными гребными винтами, при одновременном улучшении экологических и технико-экономических показателей спутновращающихся гребных винтов.

**2.2. Выбор контрольного контура.** Продуваемые миделевые профили лопастей первого и второго рабочих колес спутновращающихся гребных винтов, рис. 1,

вращаются в одном направлении с окружными скоростями  $U_1, U_2$  соответственно, при этом  $U_1 < U_2$ . Применив теорему о плоскопараллельном перемещении частиц водно-газового потока, строим планы скоростей на входных и выходных кромках лопастей первого и второго рабочих колес спутновращающихся гребных винтов, сечения  $V_1-V_1, C_1-C_1, V_2-V_2, C_2-C_2$ .

Поскольку производительность второго рабочего колеса выше производительности первого рабочего колеса, то водно-газовый поток инжектируется (всасывается) от сечения Н-Н, которое называется сечением невозмущенного потока, градиент статических давлений при этом направлен по потоку, [1, С. 24, фиг. 4, фиг. 5]. Под действием нарастающего разрежения в зоне Н-В<sub>2</sub> из воды выделяются пузырьки растворенного газа, образуется водно-газовая смесь (водно-газовый поток), которая полностью подчиняется всем законам механики истечения жидкостей и газов. Таким образом, контрольный контур спутновращающихся гребных винтов ограничен слева сечением Н-Н — это начало ускоренного движения частиц водно-газового потока, справа сечением Н<sub>1</sub>-Н<sub>1</sub> — это конец ускоренного движения частиц водно-газового потока.

Необходимо отметить, что зона заторможенного потока  $V_2-C_2$  генерируется только по корытцам лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов. Зона заторможенного потока на лопастях первого рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов не генерируется, поскольку водно-газовый поток инжектируется (всасывается) через каналы между лопастями первого рабочего колеса, которое играет роль только вращающегося направляющего аппарата.

Зона заторможенного потока  $V_2-C_2$ , рис. 1, поз. 3, характеризуется зоной сжатия водно-газового потока  $V_2-K_2$ , в которой градиент статических давлений направлен против потока, и зоной ускоренного движения частиц водно-газового потока  $K_2-C_2$ , в которой градиент статических давлений направлен по потоку, или, другими словами, зона  $K_2-C_2$  — это реактивное сопло, в котором генерируется тяга продуваемых профилей лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов. При этом необходимо отметить, что внешний вид зоны заторможенного потока  $V_2-C_2$ , рис. 1, поз. 3, характер распределения статических давлений в этой зоне полностью соответствует экспериментальным данным современной теории воздушно-реактивных двигателей по продуваемым профилям, [5, С. 68, рис. 3.3], где четко и ясно показано, что максимальное давление продуваемого газового потока (водно-газовой смеси) 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.

На рис. 1. представлено:

*a* — продуваемые профили лопастей первого и второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов по миделю;

*б* — кинематический анализ характера изменения статических давлений, осевых скоростей продуваемого водно-газового потока в пределах контрольного контура Н-Н<sub>1</sub> спутновращающихся гребных винтов;

*в* — кинематический анализ характера изменений осевых ускорений (вторичных движущих динамических — инерционных сил) спутновращающихся гребных винтов в пределах контрольного контура Н-Н<sub>1</sub>;

*г* — кинематический анализ характера изменения первичных движущих сил от изменения статических давлений продуваемого водно-газового потока спутновращающихся гребных винтов в пределах контрольного контура Н-Н<sub>1</sub>;

Положение зоны невозмущенного потока, сечение Н-Н, регламентируется режимом работы спутновращающихся гребных винтов, при увеличении оборотов рабочих колес 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 спутновращающихся гребных винтов в пределах контрольного контура Н-Н<sub>1</sub> всегда генерируются следующие зоны и сечения при скорости перемещения (полета)  $V_{п} \geq 0$ :

Н-Н — сечение невозмущенного потока, регламентирующее равенство площадей (работ первичных движущих сил от изменения статических давлений водно-газового потока) в зонах Н-В<sub>2</sub> и В<sub>2</sub>-К<sub>2</sub>, рис. 1;

Н-В<sub>1</sub> — зона ускоряемого водно-газового потока, в которой поток постепенно закручивается и достигает максимальной закрутки  $C_{1w}$ , рис. 1, в сечении  $V_1-V_1$  при этом генерируется дополнительный градиент статических давлений,  $\text{grad } P_d$ , направленный к центру сечения  $V_1-V_1$ , который стягивает водно-газовый поток в жгут до и после сечения  $V_1-V_1$ ;

$V_1-C_1$  — зона раскрутки водно-газового потока до осевого направления, в этой зоне водно-газовый поток начинает тормозиться и стягиваться в жгут под действием дополнительного градиента статических давлений,  $\text{grad } P_d$ , от максимальных центробежных сил, генерируемых в сечении  $V_1-V_1$ , зона  $V_1-C_1$  является началом формирования экстремума синусоидального характера изменения осевых скоростей водно-газового потока в зоне Н-В<sub>2</sub>, в точке экстремума, сечение  $V_1-V_1$ , ускорение водно-газового потока максимально, рис. 1, *в*.

$C_1-V_2$  — зона осевого водно-газового потока, который продолжает тормозиться дополнительным градиентом статических давлений,  $\text{grad } P_d$ , обеспечивая при этом 100 %-ную стабилизацию осевых скоростей от комля до периферии лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов, в зоне  $C_1-V_2$  завершается формирование синусоидального характера изменения осевых скоростей водно-газового потока в зоне Н-В<sub>2</sub>, обеспечивая при этом нулевое ускорение водно-газового потока на входных кромках лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов, рис. 1, *б*, в зоне Н-В<sub>2</sub> градиент статических давлений и градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений направлены по потоку;

$V_2-K_2$  — зона сжатия водно-газового потока по корытцу продуваемого профиля лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов, в которой градиент статических давлений и градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений направлены против потока;

$K_2-C_2$  — зона ускоряемого водно-газового потока, в которой градиент статических давлений и градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений, рис. 1, *г*, направлены по потоку, или зона

$K_2-C_2$  — это реактивное сопло, в котором генерируется вся тяга (100 %) спутновращающихся гребных винтов;

$C_2-N_1$  — зона выходящей струи из второго спутновращающегося гребного винта, в которой при  $P_c > P_n$  градиент статических давлений направлен по потоку, а градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений водно-газового потока равен нулю, поскольку в выходящей струе, согласно закона Бойля — Мариотта,  $P_i F_i = \text{const}$  при любых  $P_c$ , при  $P_c = P_n$  градиент статических давлений водно-газового потока равен нулю, градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений тоже равен нулю, при  $P_c < P_n$  градиент статических давлений водно-газового потока направлен против потока, а градиент первичных движущих сил от изменения статических давлений равен нулю, т. е. работа первичных движущих сил от изменения статических давлений водно-газового потока в зоне выходящей струи  $C_2-N_1$  при любых значениях  $P_c$  всегда равна нулю, водно-газовый поток в выходящей струе движется только под действием инерционных сил.

$N_1-N_1$  — сечение невозмущенного потока, в котором ускорение продуваемого водно-газового потока равно нулю, при этом на подходе к этому сечению все газовые пузырьки опять растворяются в воде.

Зоны контрольного контура  $N-N_1$  спутновращающихся гребных винтов, рис. 1, полностью совпадают с зонами контрольного контура турбореактивных двигателей, [6, С. 18, рис. 1], крыла птицы, [7, С. 14, рис. 1], паруса грот, [8, С. 13, рис. 1], и других движителей на непрерывных потоках. Согласно единой теории движителей на непрерывных потоках процесс генерирования тяги всеми типами движителей на непрерывных потоках одинаков. Поэтому методика вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД лопастей спутновращающихся гребных винтов ничем не будет отличаться от аналогичной для турбореактивных двигателей, а методика вывода теоремы о подъемной силе продуваемого профиля лопастей спутновращающихся гребных винтов ничем не будет отличаться от аналогичной для крыла птицы, паруса, и др. движителей, т. е. единая теория движителей разработала единые, общие для всех типов движителей на непрерывных потоках, формулы тяги, полетного (тягового) КПД, теорему о подъемной силе продуваемого профиля.

**2.3. Характеристика внешних сил, действующих на трубку тока в зоне контрольного контура  $N-N_1$  лопастей спутновращающихся гребных винтов.** При характеристике внешних сил, действующих на трубку тока в зоне контрольного контура  $N-N_1$  лопастей спутновращающихся гребных винтов, необходимо учитывать, что всегда первична статика, а вторична динамика водно-газового потока.

К внешним силам, действующим на трубку тока в зоне  $N-N_1$ , относятся:

1. Первичные движущие силы от изменения статических давлений водно-газового потока,  $P_i F_i$ , где  $P_i$  — статическое давление продуваемого водно-газового потока в  $i$ -м сечении водно-газодинамического тракта в пределах контрольного контура  $N-N_1$ ,  $F_i$  — площадь  $i$ -го сечения водно-газодинамического тракта в пределах контрольного контура  $N-N_1$ .

2. Вторичные движущие силы от изменения динамических — инерционных сил,  $m_T \cdot a_i$ , где  $m_T$  — массовый секундный расход водно-газового потока через лопасть

гребного винта,  $a_i$  — ускорение водно-газового потока в  $i$ -м сечении водно-газодинамического тракта в пределах контрольного контура  $N-N_1$ .

3. Силы сопротивления — это силы, направленные против потока, к которым могут относиться как первичные движущие силы от изменения статических давлений, например, в зоне  $V_2-K_2$ , так и динамические — инерционные силы, когда сила инерции направлена против потока, сила сопротивления  $P_{c2} F_{c2}$ .

4. Сила тяги  $R_2$  лопастей спутновращающихся гребных винтов, которая, как и сила сопротивления  $P_{c2} F_{c2}$  для зоны контрольного контура  $K_2-C_2$ , всегда направлена против потока при своем положительном значении. На отдельных участках контрольного контура  $N-N_1$ , например, в зоне  $V_2-K_2$ , генерируется отрицательная внешняя сила тяги, которая направлена по потоку, однако она всегда скомпенсирована положительной силой тяги, которая генерируется в зоне  $N-V_2$  спутновращающихся гребных винтов.

5. Гравитационные силы продуваемого водно-газового потока, которые при горизонтальном полете (перемещении) не учитываются.

Силы трения водно-газового потока о поверхность лопастей спутновращающихся гребных винтов не учитываем.

Таким образом, в контрольном контуре  $N-N_1$  рассматривается замкнутая система всех внешних сил, действующих на трубку тока в зоне  $N-N_1$ , т. е. векторная сумма всех внешних сил в пределах контрольного контура  $N-N_1$  всегда равна нулю, замыкает векторный силовой многоугольник, в нашем случае линия, всегда тяга лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов.

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 двумя геометрическими фигурами со знаком «плюс», направленных по потоку, условно изображаются двумя геометрическими фигурами со знаком «минус» рис. 1, в. Согласно Закона сохранения энергии сумма площадей геометрических фигур для 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 для вторичных движущих динамических — инерционных сил, места для замыкающего вектора силы тяги  $R$  в этом силовом многоугольнике — линии нет, поэтому скорость водно-газового потока, генерирующая вторичные движущие динамические — инерционные силы, тяги никогда не создает.

Тяга в любом движителе на непрерывных потоках создается только первичными движущими силами от изменения статических давлений водно-газового потока, например, спутновращающихся гребных винтов. Закон сохранения энергии касается и для первичных движущих сил от изменения статических давлений водно-газового потока в пределах контрольного контура  $N-N_1$ , например, работа первичных движущих сил в зоне  $N-V_2$  со знаком «плюс», рис. 1, z, полностью компенсируется

работой первичных движущих сил в зоне  $B_2-K_2$  со знаком «минус». Положительная работа первичных движущих сил в зоне  $K_2-C_2$  полностью компенсируется отрицательной работой внешних сил — сил сопротивления  $P_{c2}F_{c2}$  и силы тяги  $R_2$  лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов.

Отрицательная работа этих внешних сил сопротивлений,  $P_{c2}F_{c2}$ ,  $R_2$ , в виде прямоугольных геометрических фигур со знаком «минус» на рис. 1 условно не показана, но ее всегда необходимо иметь в виду.

Работа первичных движущих сил от изменения статических давлений водно-газового потока в зоне  $C_2-H_1$ , как уже отмечалось, всегда равна нулю, поскольку работа силы  $P_{c2}F_{c2}$  на участке  $C_2-H_1$  всегда компенсируется равной и противоположно направленной работой силы  $P_{н1}F_{н1}$  на этом же участке, поскольку согласно закона Бойля — Мариотта, в выходящей струе

$$P_{c2}F_{c2} = P_i F_i = P_{н1} F_{н1} = \text{const.} \quad (1)$$

Водно-газовый поток в зоне выходящей струи  $C_2-H_1$  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 водно-газового потока таким замыкающим вектором всегда является тяга  $R_2$  лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов.

На основании вышеизложенного уже разработанная единая теория движителей на непрерывных потоках ставила своей целью (заданием) создать новую теорию спутновращающихся гребных винтов на основе вывода принципиально новых фундаментальных формул тяги, полетного (тягового) КПД и теоремы о подъемной силе продуваемой лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов, показать и доказать, что спутновращающиеся гребные винты способны увеличить тягу на 200–300 % по сравнению с однорядными гребными винтами.

**2.4. Применение кинематического анализа характера изменений статических давлений, осевых скоростей, первичных движущих сил от изменения статических давлений, ускорений.** Кинематический анализ, приведенный на рис. 1, показывает, что основой для увеличения оборотов второго рабочего колеса в 2–3 раза по сравнению с однорядными гребными винтами, а значит и увеличения тяги на 200–300 %, является наличие осевой скорости водно-газового потока в зоне  $C_1-B_2$  и полное устранение кинематической зоны жесткого (упругого) удара в сечении  $B_2-B_2$ , которая имеет место в однорядных гребных винтах, [1, С. 21, фиг. 1, сечение В-В], путем замены характера движения частиц водно-газового потока с нарастающим ускорением, что имеет место в однорядных гребных винтах в зоне Н-В, [1, С. 21, фиг. 1], на синусоидальный, обеспечивающий нулевое ускорение частиц водно-газового потока в сечении  $B_2-B_2$  спутновращающихся гребных винтов, рис. 1, б, зона Н-В<sub>2</sub>.

Кинематический анализ показывает также, что отрицательная работа первичных движущих сил от изменения статических давлений продуваемого водно-газового потока в зоне  $B_2-K_2$  полностью компенсируется положительной работой первичных движущих сил в зоне Н-В<sub>2</sub>.

Таким образом, кинематический анализ показывает, что нескомпенсированной зоной работы первичных движущих сил от изменения статических давлений водно-газового потока, в которой генерируется тяга продуваемых лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов, является зона  $K_2-C_2$ . Работа, подведенная к продуваемому водно-газовому потоку в зоне  $K_2-C_2$ , 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  $P_{нсп2}^* \cdot F_{нсп2}$ ,  $K_2 C_2$ . Поэтому, с учетом соответствующих масштабов, можно записать, что подведенная движителем к водно-газовому потоку работа в зоне  $K_2-C_2$  равна

$$A_{н2} = P_{нсп2}^* \cdot F_{нсп2} \cdot K_2 C_2 \quad (\text{кГм}), \quad (2)$$

где  $K_2 C_2$  — равно перемещению потока за время  $\Delta t$ , рис. 1, з.

Подведенная к продуваемому водно-газовому потоку в зоне  $K_2-C_2$  работа  $A_{н2}$  затрачивается на преодоление работы силы сопротивления

$$A_{cc2} = P_{c2} \cdot F_{c2} \cdot K_2 C_2 \quad (\text{кГм}), \quad (3)$$

и на преодоление работы силы тяги

$$A_{R2} = R_2 \cdot K_2 C_2 \quad (\text{кГм}). \quad (4)$$

Таким образом, можно записать

$$A_{н2} = A_{cc2} + A_{R2}, \quad (5)$$

или

$$P_{нсп2}^* \cdot F_{нсп2} \cdot K_2 C_2 = P_{c2} \cdot F_{c2} \cdot K_2 C_2 + R_2 \cdot K_2 C_2, \quad (6)$$

откуда

$$R_2 = P_{нсп2}^* \cdot F_{нсп2} - P_{c2} F_{c2}, \quad \text{при } V_{п} = 0, \quad (7)$$

$$R_2' = P_{нсп2}^* / \cdot F_{нсп2}' - P_{c2}' \cdot F_{c2}', \quad \text{при } V_{п} > 0, \quad (8)$$

где

$$P_{нсп2}^* / = P_{нсп2}^* \pm \Delta P_{нсп2}^*, \quad (9)$$

где  $\pm \Delta P_{нсп2}^*$  — приращение или уменьшение среднего статического давления заторможенного водно-газового потока в среднем сечении  $\Gamma_2-\Gamma_2$  водно-газодинамического тракта, рис. 1, при  $V_{п} > 0$ , при этом  $\pm \Delta P_{нсп2}^*$  зависит от скорости водно-газового потока в среднем сечении  $\Gamma_2-\Gamma_2$ .

Любое изменение скорости полета (перемещения) влечет за собой изменение всех пяти параметров, входящих в формулы тяги (7), (8) продуваемых лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов. Естественно, полную тягу лопастей второго

рабочего колеса необходимо рассчитывать с учетом количества лопастей

Вывод формул тяги (8) при  $V_{п} > 0$  для лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов аналогичен вышеприведенному.

Полетный (тяговый) КПД продуваемой лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов определяется из уравнения

$$\eta_{п2} = \frac{A_{R2}}{A_{п2}}, \quad (10)$$

откуда

$$\eta_{т2} = \left( 1 - \frac{P_{c2} \cdot F_{c2}}{P_{нр2}^* \cdot F_{нр2}} \right) \cdot 100 \%, \text{ при } V_{п} = 0, \quad (11)$$

$$\eta_{п2} = \left( 1 - \frac{P'_{c2} \cdot F'_{c2}}{P'_{нр2} \cdot F'_{нр2}} \right) \cdot 100 \%, \text{ при } V_{п} = 0. \quad (12)$$

Необходимо отметить, что направление вектора тяги  $R_2$  второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов всегда противоположно среднему вектору скоростей  $C_r$ .

Для однорядных гребных винтов направление вектора тяги никогда не совпадает с осью вращения винта, всегда составляет определенный угол  $\alpha$ , [1, С. 24, фиг. 6, а].

Поэтому теорему о подъемной силе продуваемого профиля лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов в общем виде можно описать уравнением

$$P_2 = R_2 \cdot \sin \alpha, \quad (13)$$

откуда

$$P_2 = (P_{нр2}^* \cdot F_{нр2} - P_{c2} \cdot F_{c2}) \cdot \sin \alpha, \text{ при } V_{п} = 0, \quad (14)$$

$$P'_2 = (P'_{нр2} \cdot F'_{нр2} - P'_{c2} \cdot F'_{c2}) \cdot \sin \alpha', \text{ при } V_{п} = 0, \quad (15)$$

где  $P_2$  — подъемная сила продуваемого профиля лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов.

Поэтому теорему о подъемной силе продуваемого профиля лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов можно сформулировать следующим образом.

Подъемная сила продуваемого профиля лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов всегда является функцией от тяги, генерируемой продуваемым профилем лопасти и рассчитывается по формулам (13), (14), (15).

Отклонение вектора тяги  $R_1$ ,  $R_2$  от оси гребного винта на угол  $\alpha$  влияет на конечное значение полетного (тягового) КПД

$$\eta_{т2} = \left( 1 - \frac{P_{c2} \cdot F_{c2}}{P_{нр2}^* \cdot F_{нр2}} \right) \cdot 100 \% \cdot \sin \alpha, \text{ при } V_{п} = 0, \quad (16)$$

$$\eta_{п2} = \left( 1 - \frac{P'_{c2} \cdot F'_{c2}}{P'_{нр2} \cdot F'_{нр2}} \right) \cdot 100 \% \cdot \sin \alpha', \text{ при } V_{п} = 0. \quad (17)$$

Для спутновращающихся гребных винтов диффузорность лопастей второго рабочего колеса рассчитывается

такой, чтобы угол  $\alpha$  на расчетном режиме был бы равен нулю, [1, С. 24, фиг. 6, б].

В формулах (2–17) для лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов приняты следующие обозначения:  $R_2$  — тяга продуваемой лопасти второго рабочего колеса при  $V_{п} = 0$ ;  $P_{нр2}^* = P_{r2}^*$  — статическое давление продуваемого водно-газового потока в среднем сечении  $\Gamma_2$ - $\Gamma_2$ ;  $F_{нр2}$  — площадь водно-газодинамического тракта в среднем сечении  $\Gamma_2$ - $\Gamma_2$  зоны  $K_2$ - $C_2$ , равная  $t_1 \cdot l$ , где  $t_1$  — толщина водно-газодинамического тракта в среднем сечении  $\Gamma_2$ - $\Gamma_2$ ,  $l$  — длина лопасти гребного винта;  $P_{c2}$  — статическое давление продуваемого водно-газового потока в выходном сечении  $C_2$ - $C_2$  реактивного сопла зоны  $K_2$ - $C_2$  при  $V_{п} = 0$ ;  $F_{c2}$  — площадь водно-газодинамического тракта в выходном сечении  $C_2$ - $C_2$  реактивного сопла зоны  $K_2$ - $C_2$ , равная  $t \cdot l$ , где  $t$  — толщина водно-газодинамического тракта в выходном сечении  $C_2$ - $C_2$  реактивного сопла зоны  $K_2$ - $C_2$  при  $V_{п} = 0$ ;  $\alpha$  — угол между направлением вектора тяги  $R_2$  и осью гребного винта при  $V_{п} = 0$ ;  $\eta_{т2}$  — тяговый КПД продуваемой лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов при  $V_{п} = 0$ ;  $P_2$  — подъемная сила продуваемого профиля лопасти второго рабочего колеса при  $V_{п} = 0$ ;  $R'_2$  — тяга продуваемой лопасти второго рабочего колеса при  $V_{п} > 0$ ;  $P'_{нр2} = P'_{r2}$  — статическое давление продуваемого водно-газового потока в среднем сечении  $\Gamma_2$ - $\Gamma_2$ , водно-газодинамического тракта зоны  $K_2$ - $C_2$ , приведенное к зоне невозмущенного потока  $H$  при  $V_{п} > 0$ , зависит также от осевой скорости водно-газового потока в среднем сечении  $\Gamma_2$ - $\Gamma_2$ ;  $F'_{нр2}$  — площадь водно-газодинамического тракта в среднем сечении  $\Gamma_2$ - $\Gamma_2$ , зоны  $K_2$ - $C_2$  при  $V_{п} > 0$ , равная  $t'_1 \cdot l$ , где  $t'_1$  — толщина водно-газодинамического тракта в среднем сечении  $\Gamma_2$ - $\Gamma_2$  при  $V_{п} > 0$ ;  $P'_{c2}$  — статическое давление продуваемого водно-газового потока в выходном сечении  $C_2$ - $C_2$  реактивного сопла зоны  $K_2$ - $C_2$  при  $V_{п} > 0$ ;  $F'_{c2}$  — площадь водно-газодинамического тракта в выходном сечении  $C_2$ - $C_2$  реактивного сопла зоны  $K_2$ - $C_2$ , равная  $t_1 \cdot l$ , где  $t_1$  — толщина водно-газодинамического тракта в выходном сечении  $C_2$ - $C_2$  реактивного сопла зоны  $K_2$ - $C_2$  при  $V_{п} > 0$ ;  $\alpha_1$  — угол между направлением вектора тяги  $R'_2$  и осью гребного винта при  $V_{п} > 0$ ;  $\eta_{п2}$  — полетный (тяговый) КПД продуваемой лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов при  $V_{п} > 0$ ;  $P'_2$  — подъемная сила продуваемой лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов при  $V_{п} > 0$ .

**2.5. Применение уравнения Эйлера, как контрольного варианта, для вывода формулы тяги продуваемой лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов.** Для решения поставленной задачи рассмотрим правильное применение уравнения Эйлера для трубки тока в зоне  $K_2$ - $C_2$ , [9, С. 10–13], [10, С. 70–71].

Для вывода формулы тяги продуваемой лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов с помощью уравнения Эйлера необходимо обе части этого уравнения разделить на  $\Delta t$  с целью перехода на размерность к  $\Gamma$  или  $H$ , 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 водно-газового потока через продуваемую лопасть гребного винта,

$\Delta V$  — разница осевых скоростей на выходе,  $V_2$ , из трубки тока в зоне  $K_2-C_2$ , сечение  $C_2-C_2$ , и на входе,  $V_1$ , в ту же трубку тока, сечение  $K_2-K_2$ ;  $\Delta t$  — время импульса всех внешних сил, действующих на трубку тока в зоне  $K_2-C_2$ , или время перемещения потока от сечения  $K_2-K_2$  до сечения  $C_2-C_2$ ;  $\frac{\Delta V}{\Delta t} = a$  — изменение ускорения продуваемого водно-газового потока в зоне  $K_2-C_2$ ;  $\Sigma P_i$  — сумма всех остальных внешних сил, действующих на трубку тока в зоне  $K_2-C_2$ , включая силу тяги  $R_2$  продуваемой лопасти спутновращающихся гребных винтов, реакции отсоединенных потоков со стороны первичных движущих сил от изменения статических давлений, вторичных движущих динамических — инерционных сил продуваемого водно-газового протока, действующих слева на сечение  $K_2-K_2$  от зоны Н- $K_2$  и справа на сечение  $C_2-C_2$  от зоны  $C_2-N_1$ , рис. 1, з.

В этом случае уравнение Эйлера (18) читается только так:

Изменение силы инерции продуваемого водно-газового потока  $m_r a$ , которая является одной из внешних сил, действующих на трубку тока в зоне  $K_2-C_2$ , всегда равняется сумме всех остальных внешних сил, включая силу тяги  $R_2$  продуваемой лопасти гребного винта, а также реакции отсоединенных потоков от первичных движущих сил от изменения статических давлений, вторичных движущих динамических — инерционных сил продуваемого водно-газового потока, действующих на сечение  $K_2-K_2$  слева от зоны Н- $K_2$  и справа на сечение  $C_2-C_2$  от зоны  $C_2-N_1$ .

Запишем уравнение Эйлера (18) в векторной форме:

$$\overline{m_r a} = \overline{P_{ин1}} + \overline{P_{ин2}} + \overline{P_{нсп2}^* \cdot F_{нсп2}} + \overline{P_{с2} \cdot F_{с2}} + \overline{R_2}, \quad (19)$$

где  $P_{ин1}$  — реакция отсоединенного потока зоны Н- $K_2$  от динамических — инерционных сил, которая действует на сечение  $K_2-K_2$  слева;  $P_{ин2}$  — реакция отсоединенного потока зоны  $C_2-N_1$  от динамических — инерционных сил, которая действует на сечение  $C_2-C_2$  справа;  $R_2$  — тяга продуваемой лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов.

Реакции отсоединенных потоков зон Н- $K_2$  и  $C_2-N_1$ , которые действуют на сечения  $K_2-K_2$ ,  $C_2-C_2$  со стороны первичных движущих сил от изменения статических давлений продуваемого водно-газового потока, всегда равняются нулю, поэтому уравнение Эйлера (19) можно записать так:

$$\overline{P_{ин1}} + \overline{m_r a} + \overline{P_{ин2}} = \overline{R_2} + \overline{P_{нсп2}^* \cdot F_{нсп2}} + \overline{P_{с2} \cdot F_{с2}}. \quad (20)$$

Левая часть этого уравнения является суммой вторичных движущих динамических — инерционных сил в пределах контрольного контура Н- $N_1$ , которая для любых движителей на непрерывных потоках, включая рассматриваемые спутновращающиеся гребные винты, всегда равняется нулю, рис. 1, в, тогда в модульной форме:

$$0 = -R_2 + P_{нсп2}^* \cdot F_{нсп2} - P_{с2} \cdot F_{с2}, \quad (21)$$

откуда

$$R_2 = P_{нсп2}^* \cdot F_{нсп2} - P_{с2} \cdot F_{с2}. \quad (7)$$

Таким образом, продуваемая лопасть второго рабочего колеса спутновращающихся гребных 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, (7), (8), (10), (11), (12), (14), (15), согласно уже разработанной единой теории движителей на непрерывных потоках.

Согласно выведенной теореме о подъемной силе продуваемого профиля лопасти второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов, формулы (14), (15), установлено, что подъемную (поперечную — морская терминология) силу любого продуваемого профиля (грот парус яхты, крыло птицы, самолета, планера, любой лопаточный профиль, включая продуваемую лопасть второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов, и др.) всегда нужно рассматривать как функцию от тяги, генерируемой продуваемым профилем, установлено, что полетный (тяговый) КПД любого продуваемого профиля, включая любые лопасти гребных винтов, дополнительно зависят от угла  $\alpha$ , который образуется между вектором тяги  $R$  и осью гребного винта, формулы (16), (17), установлено, что все продуваемые лопасти любых гребных 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 гидродинамической трубой: выдать все табличные данные согласно формул (7), (8), (10), (11), (12), (14), (15) с целью существенного упрощения расчета любых лопастей гребных винтов, поскольку разработанная краткая теория спутновращающихся гребных винтов, согласно единой теории движителей на непрерывных потоках, утверждает, что конструктор не должен рассчитывать лопасть гребного винта, он должен выбрать ее из табличных данных, оформленных согласно формул (7), (8), (10), (11), (12), (14), (15).

### 3. Общие выводы.

#### Перспективы дальнейших разработок

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

В данной статье полностью решена проблема создания краткой теории спутновращающихся гребных винтов, основанной на применении неизвестного в современной теории гребных винтов метода кинематического анализа характера изменения статических давлений, осевых скоростей, первичных движущих сил от изменения статических давлений, ускорений (вторичных движущих динамических — инерционных сил) водно-газового потока. Выведены принципиально новые, единые для всех типов движителей на непрерывных

потоках формулы тяги, (7), (8), полетного (тягового) КПД, (10), (11), (12), (16), (17), теоремы о подъемной силе продуваемого профиля, (13), (14), (15), лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов, раскрыты все преимущества последних перед однорядными и контрвращающимися гребными винтами.

Исходя из вышеизложенного, очередная статья будет касаться краткого сравнительного анализа однорядных, контрвращающихся, спутновращающихся гребных винтов, в которой последовательно будет показано и доказано, что наиболее эффективными гребными винтами являются спутновращающиеся, поскольку только в этих гребных винтах полностью устраняется кинематическая зона жесткого (упругого) удара, что позволит увеличить обороты и тягу второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов в 2–3 раза по сравнению с расчетными оборотами и тягой однорядных гребных винтов.

#### Литература

1. Патент 35561, Україна, МПК В63Н 1/14, В63Н 1/28, В63Н 5/00. Судновий двигуно-рушійний комплекс [Текст] / Б. Ш. Мамедов. — № U200805116, заявл. 21.04.2008, опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18, 2008.
2. Справочник по малотоннажному судостроению [Текст] / Составитель Б. Г. Мордвинов. — Ленинград: Судостроение, 1988. — 576 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. — 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. — 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. — Т. 4, N 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. — 2012. — № 44. — С. 11–20.
8. Мамедов, Б. Ш. Основы единой теории движителей на непрерывных потоках. Вывод формулы тяги паруса [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — Т. 5, N 7(59). — С. 11–17.
9. Мамедов, Б. Ш. Применение уравнения Эйлера для вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД воздушно-реактивных двигателей по внешним параметрам газового потока при  $V_n \geq 0$  [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. — 2013. — № 4(978). — С. 3–15.
10. Мамедов, Б. Ш. Единая теория движителей. Вывод формул тяги, полетного (тягового) КПД ракетных двигателей [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2013. — Т. 1, N 7(61). — С. 67–71.

#### ДО ЄДИНОЇ ТЕОРІЇ РУШІВ НА НЕПЕРЕРВНИХ ПОТОКАХ — СТИСЛА ТЕОРІЯ СУПУТНООБЕРТАЮЧИХСЯ ГРЕБНИХ ГВИНТІВ

Розглядаються недоліки сучасної теорії повітряно-реактивних двигунів, які пов'язані з помилковою теоремою о підйомній силі продуваемого профілю, яку професор М. Є. Жуковський вивів у 1912 році у своїй статті «Вихревая теория гребного винта».

**Ключові слова:** кінематичний аналіз, супутнообертаючі гребні гвинти, тяга і підйомна сила продуваемого профілю.

*Мамедов Борис Шамшадович, кандидат технических наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, Украина.*

*Мамедов Борис Шамшадович, кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна.*

*Mamedov Borys, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine*

УДК 621.793

**Коваленко В. И.,  
Маринин В. Г.**

## КАВИТАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ РАЗНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

Представлены экспериментальные данные по измерениям кавитационной прочности вакуумно-дуговых  $Ti, Zr, (Ti + Zr)N$  покрытий, полученных при различной ориентации поверхности подложек, на которые осаждают покрытие относительно плоскости катода, эжектирующего металлическую плазму. Результаты исследований показали, что кавитационная стойкость, микротвердость, абразивная стойкость вакуумно-дуговых титановых, циркониевых и системы  $Ti-Zr$  покрытий зависят нелинейным образом от величины угла, образованного поверхностями подложки и катода.

**Ключевые слова:** вакуумные дуговые покрытия, титан, цирконий, стойкость, кавитация, сопротивление, абразивный износ