

УДК 656.1

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_90

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РОТОРНО-ВИНТОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ АМФИБИЙНЫХ МАШИН В КАЧЕСТВЕ ВОДОХОДНЫХ

С.А. КарасеваORCID: 0000-0002-1666-777X e-mail: geliosveta@gmail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.С. Макаров**ORCID: 0000-0002-4423-5042 e-mail: makvl2010@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Д.Ю. Малахов**ORCID: 0000-0002-5706-9557 e-mail: malahow_dm@mail.ruМосковский автомобильно-дорожный государственный технический университет
Москва, Россия

Рассматриваются особенности работы роторно-винтовых движителей (РВД), оказывающие существенное влияние на их эффективность при движении амфибийных машин на плаву. Анализируются сходства и различия шнеков роторно-винтовых движителей и гребных винтов, а также возможность применения методик проектирования гребных винтов при разработке РВД. Рассматривается специфика работы роторно-винтовых движителей амфибийных машин на плаву в частично погруженном режиме, особенности и принципы взаимодействия РВД с корпусом и шнеков тандемных РВД между собой. Приводятся результаты численного моделирования, подтверждающие важность учета рассматриваемых особенностей при проектировании РВД.

Ключевые слова: роторно-винтовой движитель (РВД), амфибийная машина, частично погруженный шнек, пропульсивные характеристики, коэффициент засасывания, коэффициент неравномерности, коэффициент попутного потока, коэффициент аэрации, численное моделирование.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Карасева, С.А. Особенности функционирования роторно-винтовых движителей амфибийных машин в качестве водородных / С.А. Карасева, В.С. Макаров, Д.Ю. Малахов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 4. С. 90-99. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_90

PERFORMANCE FEATURES OF ROTARY-SCREW PROPULSION UNITS AS WATER ONES OF AMPHIBIOUS VEHICLES

S.A. KarasevaORCID: 0000-0002-1666-777X e-mail: geliosveta@gmail.ruNizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
*Nizhny Novgorod, Russia***V.S. Makarov**ORCID: 0000-0002-4423-5042 e-mail: makvl2010@gmail.comNizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

D.Yu. Malakhov

ORCID: 0000-0002-5706-9557 e-mail: malahow_dm@mail.ru

Moscow Automobile and Road Transport State Technical University

Moscow, Russia

Abstract. The features of the operation of rotary-screw propulsion units (RSP), which have a significant impact on their efficiency when moving amphibious vehicles afloat, are considered. The similarities and differences between Archimedes screws of RSP and propellers are analyzed as well as the possibility of application of propeller design techniques when designing RSP. The specificity of performance of RSP of amphibious vehicles in afloat motion in semi-submerged mode, the features and the principles of interaction of RSP with the hull and of the Archimedes screws of tandem RSP with each other are considered. The results of computer simulation are presented, confirming the importance of taking into account the considered features in the design of the RSP.

Key words: rotary-screw propulsion unit (RSP), amphibious vehicle, semi-submerged Archimedes screw, propulsive characteristics, thrust-deduction fraction, non-uniformity coefficient, wake coefficient, aeration degree, computer simulation.

FOR CITATION: Karaseva S.A., Makarov V.S., Malakhov D.Yu. Features of operation of rotary-screw propellers in water-propelled amphibious vehicles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 4. С. 90-99.
DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_90

В настоящее время активно осваиваются территории Крайнего Севера и арктических регионов [1]. Разработка месторождений, геолого-разведочные работы, аварийно-спасательные операции – для всего этого остро необходима специальная техника, транспортные и технологические амфибии, способные максимально эффективно перемещаться по различным грунтам, снегу, льду и воде [2-4]. Этим требованиям соответствуют амфибийные машины с роторно-винтовыми движителями (РВД) (рис. 1). При проектировании многоцелевых амфибий с РВД геометрические характеристики последних должны обеспечивать оптимальный баланс эффективности водходных и сухопутных характеристик.

Сухопутные свойства шнекороторных движителей системно изучались специалистами из разных стран. На протяжении XX века был создан целый ряд роторно-винтовых амфибий отечественной разработки, которые успешно эксплуатировались в различных сферах [5]. На сегодняшний день ведутся активные исследования РВД в НИЛ ТМиТТК (Научно-исследовательская лаборатория транспортных машин и транспортно-технологических комплексов) при НГТУ им. Р.Е. Алексеева. При этом водходные свойства роторно-винтовых движителей на данный момент мало изучены. В отдельных работах проводятся исследования конкретных моделей либо общие аналитические зависимости, чего недостаточно для разработки универсальной методики расчета движения машин с РВД на плаву [6-10]. Создание такой методики осложняется рядом специфических особенностей работы РВД в качестве водходного движителя, влияние которых на пропульсивные характеристики требует отдельных исследований.

Рассматривая конструкцию шнека РВД, можно отметить его сходство с гребным винтом. Геометрически гребные винты и шнеки подобны друг другу, их определяют практически одни и те же параметры [11, 12]. Незначительные различия присутствуют в традиционном описании геометрических характеристик винтов и шнеков. Так, для гребных винтов принято указывать количество лопастей (z), а в описаниях шнеков РВД подобный параметр называется количеством заходов. Для шнеков указывается угол наклона (подъема) винтовой линии (φ), град, а для винтов обычно приводится значение конструктивного шага (H), м, или его распределение по длине лопасти. Эти два параметра связаны между собой через диаметр (D) формулой (1).



Рис. 1. Снегоболотоход ЗВМ-2401 производства ООО «Завод Вездеходных машин» с четырехсекционной компоновкой роторов

Fig. 1. ZVM-2401 snowmobile manufactured by ООО «Zavod Vezdekhodnykh mashin» with a four-section arrangement of rotors

$$H = \pi \cdot D \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

В описании геометрии гребных винтов также принято указывать значение дискового отношения (θ), определяемого по формуле (2) как отношение спрямленной площади всех элементов лопастной системы ($z \cdot F_{сп}$), m^2 , к площади круга диаметром D (2):

$$\theta = \frac{4z \cdot F_{сп}}{\pi \cdot D^2} \quad (2)$$

Существенно отличаются характерные значения геометрических параметров. Основные параметры гребных винтов и шнеков роторно-винтовых движителей и их диапазоны, характерные для наиболее распространенных типоразмеров, приведены в табл. 1 [13, 14].

Таблица 1.

Параметры шнеков

Table 1.

Screw Parameters

Параметр	Обозначение	Значение параметра	
		для ГВ	для шнека РВД
Количество лопастей/заходов	z	3...7	1...2
Шаговое отношение (угол наклона винтовой линии)	H/D (φ)	0,7...1,5 (12,5...25,5)	1,46...2,83 (25...42)
Ступичное отношение	d/D	0,17...0,35	0,7...0,9
Дисковое отношение	θ	0,7...1,5	1,2...2,5

В судостроении при проектировании гребных винтов применяются универсальные диаграммы – «кривые действия», представляющие собой зависимости коэффициента момента, пропульсивного коэффициента и коэффициента упора от относительной поступи (J).

Коэффициент упора (3):

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (3)$$

Коэффициент момента (4):

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad (4)$$

Пропульсивный коэффициент (5):

$$\eta_0 = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q} \quad (5)$$

Относительная поступь (6):

$$J = \frac{v_a}{n \cdot D} \quad (6)$$

В приведенных формулах T – упор, Н; ρ – плотность воды, кг/м³; n – обороты двигателя, об/с; Q – момент, Нм; v_a – скорость амфибии, м/с.

Семейства кривых действия для модельных серий гребных винтов с геометрически подобными лопастными системами, построенные в виде зависимостей безразмерных характеристик, позволяют подбирать оптимальные сочетания оборотов и геометрических характеристик для обеспечения максимальной эффективности в заданных условиях работы. Для гребных винтов такие кривые являются результатом многолетних испытаний специалистов из разных стран. Для шнеков РВД такие работы не проводились, поэтому исходная база для проектирования в виде кривых действия в настоящее время не сформирована. При проектировании амфибийных машин с РВД очень важно анализировать их водоходные свойства с учетом особенностей работы этих двигателей на плаву.

Работа шнеков РВД в частично погруженном состоянии. При статическом положении и при работе на воде роторы РВД, помимо своей основной функции – формирования тяги – также выполняют функцию формирования водоизмещения. В связи с этим, зачастую шнеки погружены в воду только частично, в результате чего часть спиралей шнеков, расположенная над водой, в формировании тяги участия не принимает; более того, при вращении во время работы спирали увлекают с собой частицы воздуха, что приводит к существенной аэрации взаимодействующей со шнеком воды. Плотность формируемой эмульсии меньше, чем плотность воды, ввиду этого условия работы и, как следствие, пропульсивные характеристики частично погруженных шнеков отличаются от таковых для полностью погруженных.

Эффект аэрации достаточно хорошо изучен для суперкавитирующих гребных винтов быстроходных судов. Однако наработки в этой области слабо применимы к проектированию шнеков ввиду принципиальных отличий в геометрии и условиях функционирования. Данный эффект рассматривается в статье В.А. Шапкина и А.В. Согина [10], в которой, в развитие работ Коула (В.Н. Cole), авторы предлагают использовать для определения тяги частично погруженного шнека следующую формулу [10, 15] (7):

$$P = 0,5\rho \frac{D^2}{D^2-d^2} [4D^2(\tan \varphi)^2(1-s)^2n^2 - v_a^2]F_p. \quad (7)$$

Здесь d – диаметр базового цилиндра шнека, м; s – коэффициент относительного углового скольжения; F_p – выходное гидравлическое сечение, м².

Для учета аэрации воды входящая в формулу плотность должна определяться зависимостью (8):

$$\rho = k_{\text{аэр}}\rho_w, \quad (8)$$

где $k_{\text{аэр}}$ – коэффициент аэрации воды; ρ_w – плотность воды, кг/м³.

При этом стоит отметить, что практическое применение такой зависимости возможно только при наличии экспериментальных данных, характеризующих влияние геометрии, степени погружения и режима работы роторно-винтовых двигателей на аэрацию воды. Также авторами предлагается способ определения выходного гидравлического сечения как кольца, усеченного статической ватерлинией; такой способ требует экспериментальной про-

верки, так как аэрация и возмущение поверхности рабочей среды и собственно режим работы шнека (от швартовного режима до режима максимальной скорости движения) существенно влияют на итоговое гидравлическое сечение. Очень важным, интересным и до сих пор не исследованным вопросом является также подъемная сила частично погруженных шнеков и ее зависимость от режимов работы.

Совместная работа передних и задних шнеков в тандемных РВД амфибийных машин. Существует большое количество амфибий с тандемной, четырехсекционной конструкцией РВД. В этом случае по каждому борту расположено по два шнека с противоположным направлением навивки и вращающихся в разные стороны (рис. 1). Подобная компоновка имеет ряд преимуществ перед двухсекционной, так как при движении по суше амфибии с четырьмя роторами имеют меньший радиус поворота и лучшую устойчивость прямолинейного движения. При работе на воде машин с подобной компоновкой возникает сложное взаимодействие между шнеками одного борта. Тогда как на передний шнек натекает практически не возмущенный поток воды, на задний шнек приходит поток, ускоренный и закрученный передним шнеком в направлении, противоположном вращению заднего.

Отличие продольной скорости набегающего на рабочий орган движителя потока (v), м/с, от скорости движения транспортного средства учитывается, как правило, коэффициентом попутного потока, который определяется следующей зависимостью (9):

$$w = \frac{v - v_a}{v} \quad (9)$$

Для большинства амфибийных транспортных средств с «традиционными» водоходными движителями, такими как гребные винты или водометы, соотношение скоростей $v_a < v$, а коэффициент попутного потока лежит в диапазоне (10):

$$w = 0,15 \dots 0,25 \quad (10)$$

С учетом разгона потока передним шнеком, для задних шнеков РВД с тандемной конструкцией коэффициент попутного потока может принимать отрицательные значения.

Закрутку набегающего на задний шнек потока можно рассматривать как частный случай неравномерности натекания и учитывать коэффициентом неравномерности, характеризующим изменение упора и момента рабочего органа движителя в возмущенном потоке (11):

$$i = i_T i_Q, \quad (11)$$

где i_T – коэффициент неравномерности по упору; i_Q – коэффициент неравномерности по моменту.

Значения коэффициента неравномерности и его составляющих для гусеничных и колесных амфибий с «традиционными» водоходными движителями находятся в диапазонах (12-14):

$$i = 0,75 \dots 0,8 \quad (12)$$

$$i_T = 0,9 \dots 0,97 \quad (13)$$

$$i_Q = 1,15 \dots 1,3 \quad (14)$$

Прогнозирование пропульсивных характеристик задних шнеков роторно-винтовых амфибий с четырехсекционной компоновкой осложняется разнонаправленностью влияний поступательной и вращательной компонент набегающего на них потока, так как первая разгружает шнек, при этом уменьшая тягу и момент сопротивления вращению, а вторая – увеличивает сопротивление вращению ротора, одновременно повышая тягу. Общая картина дополнительно усложняется возмущением свободной поверхности воды и аэрацией рабочей, возникающими в результате работы переднего шнека.

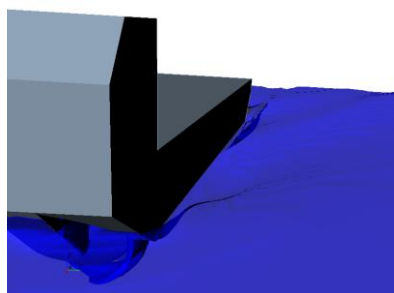
Взаимодействие шнеков РВД с корпусом амфибийной машины. Третья отличительная особенность шнековых движителей вызвана спецификой их геометрии и расположения относительно корпуса. В отличие от других типов движителей, которые обычно располагаются за или под кормой либо в тоннелях корпуса, роторно-винтовые движители расположены вдоль бортов транспортного средства и взаимодействуют с его корпусом по всей длине. Такое взаимодействие приводит к значительному увеличению надбавки к сопротивлению кор-

пуга и всех выступающих частей во время движения амфибии по воде. Подобный эффект взаимодействия корпуса и движителя для амфибийных машин принято учитывать коэффициентом засасывания (t), представляющим собой отношение добавочного сопротивления (ΔR), Н, вызванного динамическим напором от движителя, и упора этого движителя (15):

$$t = \frac{\Delta R}{T} \quad (15)$$

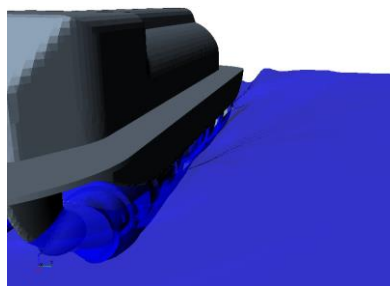
Для амфибийных машин, движение которых по воде обеспечивается гребными винтами, коэффициент засасывания, как правило, находится в диапазоне (16):

$$t = 0,2 \dots 0,3 \quad (16)$$



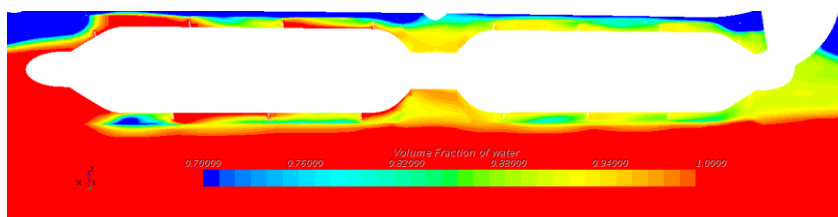
**а) Картина деформации свободной поверхности
Вариант 1 (исходный корпус)**

**a) Free surface deformation pattern
Option 1 (original case)**

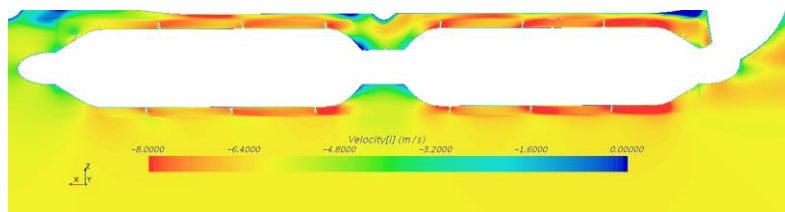


**б) Картина деформации свободной поверхности
Вариант 2 (доработанный корпус)**

**b) Free surface deformation pattern
Option 2 (modified housing)**



**с) Объемная доля воды в сечении по шнекам
c) Volume fraction of water in the auger section**



**д) Поле осевых скоростей в сечении по шнекам
d) The field of axial velocities in the cross section of the augers**

Рис. 2. Картины визуализации результатов численного моделирования

Fig. 2. Visualization patterns of numerical simulation results

Для роторно-винтовых движителей диапазоны значений коэффициента засасывания не определены, так как системных исследований по изучению взаимодействия РВД с корпусом не проводилось. Однако стоит отметить, что при проектировании амфибийных машин наилучшие показатели движения по воде достигались, когда для транспортного средства

корпус разрабатывался специально, а не использовался готовый от уже существующих проектов машин с другими двигателями. Так, при разработке ледофрезерных машин серии ЛФМ-РВД-ГПИ производства ГПИ им. А.А. Жданова первая машина серии, ЛФМ-66, была выпущена с корпусом от ранее спроектированной гусеничной машины. Для второй машины ЛФМ-72 проектировался уже новый корпус, что в комплексе с другими конструктивными изменениями привело к улучшению показателей движения по воде. Среди конструктивных мероприятий по снижению негативного влияния взаимодействия роторно-винтовых двигателей и корпуса амфибийных машин при движении на плаву стоит выделить увеличение дистанции между шнеками и корпусом, придание корпусу и выступающим частям обтекаемой формы (в особенности кронштейнам крепления шнеков), а также использование таких элементов, как дефлекторы, кожухи и т.д.

Ниже приводятся некоторые результаты численного исследования вариантов амфибийной машины (рис. 2 а, б) с идентичным тандемным РВД, одинаковой исходной статической осадкой и различными формами корпуса, более подробно представленные в работе [16]. Основной целью моделирования являлась оценка способности амфибии к движению по воде с заданной скоростью, а также минимизация энергозатрат на преодоление сил сопротивления. Вместе с тем, полученные результаты наглядно иллюстрируют описываемые в данной статье вопросы.

На рис. 3 приведены результаты сравнительного моделирования вариантов, демонстрирующие изменение сопротивления на корпусе (R), кН, совокупной тяги шнеков (P), кН, и коэффициента засасывания (t) с увеличением суммарной мощности (N), кВт, подводимой к валам шнеков, при постоянной скорости движения (6 м/с).

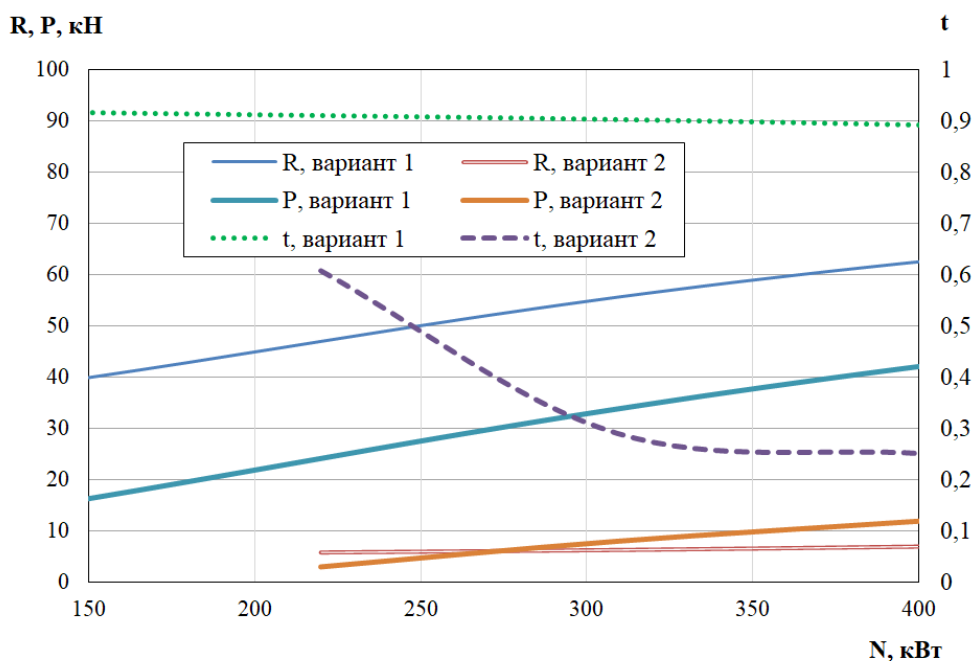


Рис. 3. Зависимость сопротивления корпуса, тяги шнеков и коэффициента засасывания от суммарной мощности на валах шнеков

Fig. 3. Dependence of the resistance of the housing, the thrust of the screws and the suction coefficient on the total power on the screw shafts

Из приведенных зависимостей видно, что в рассматриваемом диапазоне подводимых мощностей для первого варианта заданная скорость является недостижимой (кривые тяги шнеков и сопротивления корпуса не пересекаются). Для второго варианта баланс между сопротивлением корпуса и тягой двигателя устанавливается при подводимой мощности 270

кВт, что соответствует частоте вращения шнеков порядка 220 об/мин. В указанном режиме коэффициент засасывания для варианта 2 составляет около 0,43, что в 1,5...2 раза превышает приведенные выше значения, характерные для амфибийных машин с традиционными водходными движителями. В этом же режиме коэффициент засасывания для варианта 1 составляет около 0,88 и практически не уменьшается с увеличением подводимой мощности. В результате почти вся подводимая мощность реализуется на корпусе в виде дополнительного сопротивления.

Для варианта 2 были более детально проанализированы условия работы переднего и заднего шнека тандема. На рис. 2b представлена картина деформации свободной поверхности при скорости движения машины 6 м/с и скорости вращения шнеков 220 об/мин. Объемная доля воды на границе раздела сред 0,95. Картина наглядно демонстрирует высокую относительную степень аэрации заднего шнека. Количественно степень аэрации можно оценить по рис. 2с. Средняя доля воды в смеси, взаимодействующей с лопастной системой заднего шнека тандема, составляет около 0,88. Степень аэрации водной среды усиливается по мере приближения к корме, что в совокупности с возмущением шнеками свободной поверхности влияет не только на тяговые характеристики, но и на подъемную силу, которая с учетом весовой доли шнеков в водоизмещении существенно влияет на динамическую посадку. Представленная на рис. 2d картина поля продольных скоростей в сечении по шнекам показывает неравномерность распределения этого фактора между передним и задним шнеком.

В результате численного моделирования тандемного РВД были получены зависимости, представленные на рис. 4. Их анализ показывает, что во всем диапазоне смоделированных оборотов, несмотря на повышенную аэрацию, задний шнек создает большую по сравнению с передним тягу при меньшей затрачиваемой мощности. Эффективность отдельных шнеков тандема и РВД в целом можно оценить коэффициентом относительного качества (рис. 4b), определяемым по формуле [17] (17):

$$\xi' = \frac{P}{1,16(ND)^{2/3}}, \quad (17)$$

где P – тяга, Н; N – мощность, кВт.

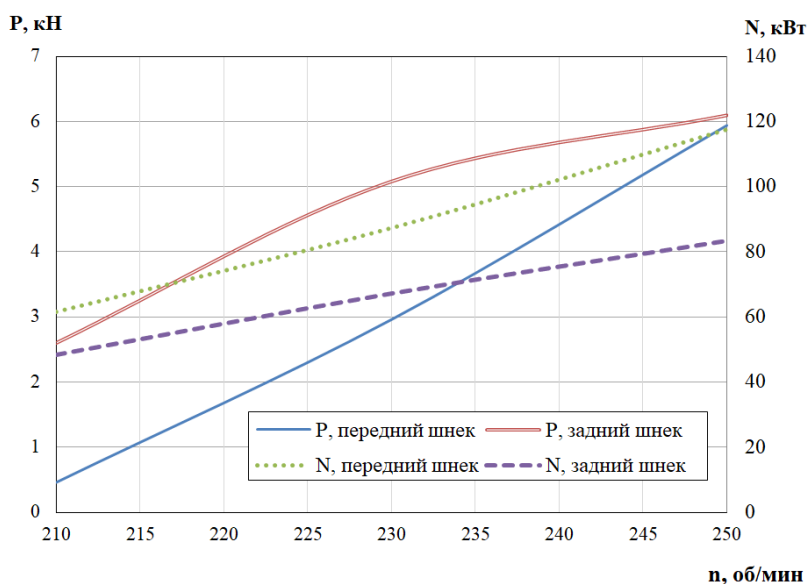
Полученные результаты позволяют предполагать, что эффективность движения по воде машин с тандемным РВД может быть повышена за счет выбора оптимального сочетания оборотов передних и задних шнеков. Этот подход практически реализуем при индивидуальном бесступенчатом приводе шнеков РВД.

С учетом описанных выше особенностей и общих подходов к проектированию водходных движителей баланс тяги РВД и буксировочного сопротивления (R_6) Н корпуса амфибийной машины, необходимый для движения с заданной скоростью, можно представить следующим выражением [18] (18):

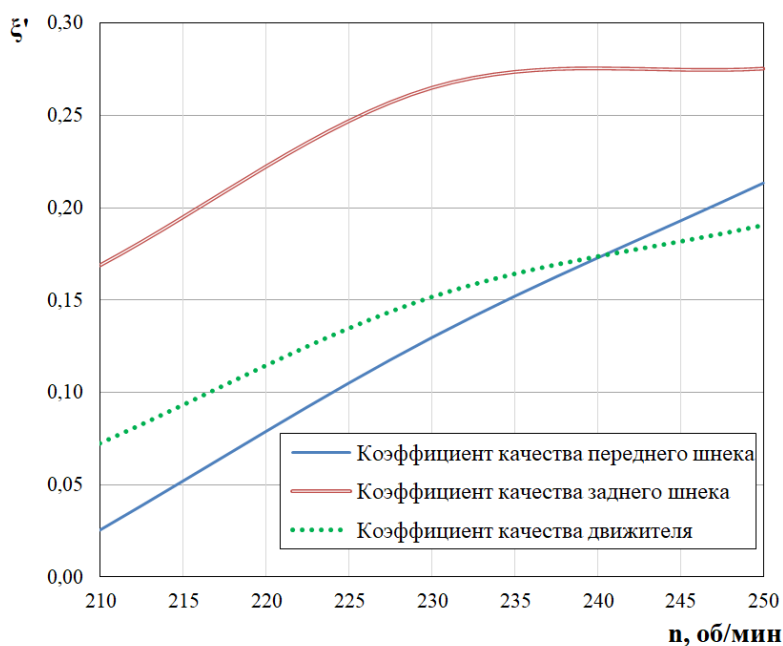
$$R_6 = P = 2 \sum_{j=1}^n P_j \frac{(1 - w_j) i_{Tj}}{(1 - t_j) k_{aэpTj}} \quad (18)$$

где n – количество шнеков по борту; P_j – тяга j -го шнека в свободной воде с учетом степени его погружения, определяемая по кривым действия, Н.

Для практического использования данной зависимости при проектировании РВД амфибийных машин необходимо проведение комплексных исследований, направленных на формирование базы кривых действия частично погруженных шнеков, а также и эмпирических данных по соответствующим коэффициентам взаимодействия.



а) Тяга и мощность на валах шнеков
a) Thrust and power on auger shafts



б) Коэффициент относительного качества
b) Relative quality coefficient

Рис. 4. Пропульсивные характеристики РВД

Fig. 4. Propulsive characteristics of the RSP

Описанные особенности, определяющие эффективность РВД снегоболотоходных амфибийных машин при движении на плаву, представляют собой сложный комплекс взаимосвязанных явлений, исследование которых обеспечит разработчиков перспективных АМ с РВД необходимыми данными и инструментарием для прогнозирования водоходных свойств. В совокупности с имеющимися методами определения показателей движения по грунтам и снегу это позволит совершенствовать разрабатываемые амфибии с учетом сочетания сухопутных и водоходных характеристик.

Библиографический список

1. Проектирование шасси специальных транспортно-технологических машин: учеб. пособие / В.В. Беляков [и др.]. – Нижегород. гос. тех. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2019. – 431 с.
2. **Kristian, N.** Requirements and concepts for arctic evacuation: Department of Marine Technology: Master thesis / N. Kristian; Norwegian University of Science and Technology, 2011. – 98 p.
3. **Lars, M.F.N.** Modeling, analysis and joystick control of the "AMV Oil Spill Fighter": Department of Marine control engineering: Master thesis / M.F.N. Lars; Norwegian University of Science and Technology, 2011. – 81 p.
4. **Котляренко, В.И.** Анализ различных показателей транспортных средств для организации всепогодных транспортных перевозок в условиях Севера / В. И. Котляренко, Л. В. Барахтанов // Журнал автомобильных инженеров. 2015. № 6(95). С. 64-67.
5. Введение в динамику систем заснеженная местность – роторно-винтовая машина: монография / В.А. Шапкин, У.Ш. Вахидов, И.А. Ерасов, А.А. Кошурина, Ю.И. Молев. – Н.: Нивогород: НИУ РАНХиГС, 2017. – 390 с.
6. **Strizhak, A.** Modelling of vehicles with rotary-screw propulsion unit along water-flooded substructure / A. Strizhak, U. Vakhidov, A. Lipin, R. Dorofeev, A.V. Sogin and L.S. Mazunova // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177 (2019) 012039.
7. **Крашенинников, М.С.** Математическая модель роторно-винтового движителя / М.С. Крашенинников // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8. №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/50TVN416.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
8. **Наумов, В.Н.** Моделирование прямолинейного движения транспортно-технологического средства с роторно-винтовым движителем / В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, К.Е. Бяков // Известия высших учебных заведений. 2013. № 12. С. 31-35.
9. **Сандаков, М.Ю.** Оценка мореходности роторно-винтового транспортного средства на ранних стадиях проектирования / М. Ю. Сандаков, М. Л. Мухина // Транспортные системы. 2017. № 1(4). – С. 34-38. – DOI 10.46960/62045_2017_1_34.
10. **Согин, А.В.** Исследование движения роторно-винтовой машины (РВМ) по воде / А.В. Согин, В.А. Шапкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2006. – № 5. – С. 54-64.
11. **Басин, А.М.** Ходкость и управляемость судов.: учеб. пособие для вузов водн. трансп. / А.М. Басин. – М.: Транспорт, 1977. – 456 с.
12. **Карасева, С.А.** Расчет основных параметров движителя шнекороторной амфибии / С.А. Карасева // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2014. № 2(2). С. 11.
13. **Куляшов, А.П.** Экологичность движителей транспортно-технологических машин / А.П. Куляшов, В.Е. Колотилин. – М.: Машиностроение, 1993. – 288 с.
14. **Николаев, А.Ф.** Роторно-винтовые амфибии / А.Ф. Николаев, А.П. Куляшов. – Горьк. политехн. ин-т им. А.А. Жданова. – Горький: Волго-Вят. кн. изд-во, 1973. – 47 с.
15. **Cole, V.N.** Inquiry into amphibious screw traction / V.N. Cole // Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers. 1961. Vol. 75. № 19.
16. **Karaseva, S.** Efficiency determinants of rotary-screw propulsion units of snow and swamp-going amphibious vehicles in afloat motion / S. Karaseva, V. Makarov, D. Malahov // 20th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, ISTVS 2021,
17. **Васильев, В.Ф.** Водометные движители: учебное пособие / В.Ф. Васильев. – МАДИ (ГТУ). – М., 2006. – 45 с.
18. **Степанов, А.П.** Проектирование амфибийных машин / А.П. Степанов. – М.: Мегалион, 2007. – 420 с.

*Дата поступления
в редакцию: 31.08.2021*