

УДК 656.1

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_97

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНО-ВИНТОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ СНЕГОБОЛОТОХОДНЫХ АМФИБИЙНЫХ МАШИН

С.А. КарасеваORCID: 0000-0002-1666-777X e-mail: geliosveta@gmail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Обоснована актуальность разработки и исследования амфибийных снегоболотоходных машин с роторно-винтовым двигателем (РВД). Определены основные условия эксплуатации машин с РВД. Построены графики для одиночного и tandemного РВД с различными углами наклона винтовой лопасти. Приведены графики кривых действия (коэффициент упора, коэффициент момента, пропульсивный коэффициент). Приведена визуализация результатов численного моделирования гидродинамики шнеков с водной средой. Проведен структурный анализ гидродинамического взаимодействия с водной средой элементов поверхности шнеков. Установлено, что зона эффективности работы шнеков ограничивается первыми четырьмя элементами винтовых линий, включая входной. Приведена методика расчета эффективности амфибийных снегоболотоходных машин с РВД, включающая в себя совокупность взаимодополняющих критериев: эффективность по скорости, эффективность по курсовой ориентации, эффективность по поддержанию подвижности, эффективность по устранению критических ситуаций.

Ключевые слова: роторно-винтовой двигатель (РВД), амфибийная машина, кривые действия, численное моделирование, подвижность, эффективность, снег, лед, вода.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Карасева, С.А. Разработка методики расчета и выбор рациональных параметров роторно-винтовых двигателей снегоболотоходных амфибийных машин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 97-112. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_97

DEVELOPMENT OF CALCULATION PROCEDURE AND CHOICE OF PRACTICAL PARAMETERS OF ROTARY-SCREW PROPULSION UNITS OF SNOW AND SWAMP-GOING 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

Abstract. The paper considers the relevancy of development and research of snow and swamp-going amphibious vehicles with rotary-screw propulsion units (RSP). The main performance conditions of RSP are determined. The diagrams for single and tandem rotary-screw propulsors with different helix angles are plotted. The diagrams of performance curves are given (thrust coefficient, torque coefficient, propulsive coefficient). The visualization of the results of computer simulation of hydrodynamics of Archimedes screws in water area is given. The structural analysis of hydrodynamical interaction between water area and elements of Archimedes screws surface is carried out. There is received that the efficiency area of Archimedes screws performance is limited by the first four elements of helixes including the helix input element. The calculation procedure of efficiency of snow and swamp-going amphibious vehicles with RSP is given including complex of complementary criteria: speed efficiency, direction orientation efficiency, mobility maintenance efficiency, efficiency in elimination of critical situations.

Key words: rotary-screw propulsion unit (RSP), amphibious vehicle, performance curves, computer simulation, mobility, efficiency, snow, ice, water.

FOR CITATION: Karaseva S.A. Development of calculation procedure and choice of practical parameters of rotary-screw propulsion units of snow and swamp-going amphibious vehicles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. С. 97-112. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_97

Введение

Развитие промышленности и недропользования в районах Арктики и Крайнего Севера повышает интерес к снегоболотоходным амфибийным машинам с роторно-винтовыми движителями (РВД). Разрабатываются новые проекты амфибий и транспортно-технологических комплексов на их основе. В отличие от специализированных амфибий с РВД, таких как: технологическая машина *MudMaster* фирмы *Residue Solutions*, не предполагающая движения по воде, или *Riverine Utility Craft* фирмы *Chrysler*, скорее являющаяся плавательным средством, снегоболотоходные амфибии предназначены для движения в разных средах (например, машина ТП-2401 фирмы ООО «Завод Вездеходных Машин»). При проектировании РВД подобных амфибий геометрические характеристики шнеков должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить оптимальное сочетание эффективности при движении по суше и воде с учетом назначения и районов применения.

Сухопутные свойства РВД изучены достаточно глубоко. Существенный вклад в разработку эффективных конструкций амфибий с РВД и теорию взаимодействия шнека с опорной поверхностью внесли советские исследователи. В ОГК СТ ЗИЛ (Отделе главного конструктора специальной техники ЗИЛ) под руководством В.А. Грачева был разработан и испытан целый ряд удачных конструкций машин с РВД. В ОКБ РАЛСНЕМГ (Опытном конструкторском бюро разработки льда, снега и мерзлого грунта) и ОНИЛ ВМ (Отраслевой научно-исследовательской лаборатории вездеходных машин) при Горьковском политехническом институте им. А.А. Жданова (ныне Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева) во второй половине XX в. было проведено значительное количество научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по исследованию транспортных средств с роторно-винтовым движителем при эксплуатации по грунтам, и особенно – по снегу. Огромное значение в этой сфере имеют труды А.Ф. Николаева, С.В. Рукавишника, А.П. Куляшова, В.И. Вологодина, В.Е. Колотилина, В.А. Шапкина, А.А. Аникина, И.Г. Куклиной и многих других. В настоящее время прямым продолжателем данных работ является Научно-исследовательская лаборатория транспортных машин и транспортно-технологических комплексов (НИЛ ТМиТТК) при НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Водоходные свойства РВД являются малоисследованной областью. Их изучение зачастую ограничивалось замером тяги на швартовах и максимальной достижимой скорости на плаву в режиме полной мощности. В настоящее время фактически отсутствуют методики расчета движения РВД в воде, нацеленные на получение оптимальных водоходных качеств. М.Ю. Сандаков и М.Л. Мухина в своей работе изучают мореходность роторного движителя и возможность оптимизации корпуса транспортного средства для движения по воде. М.С. Крашенинников в своих исследованиях предлагает универсальную модель РВД, применимую при движении транспортного средства по любой опорной поверхности. В работе А.В. Согина и В.А. Шапкина в теории рассматривается движение ротора в воде, в том числе, в частично погруженном состоянии, выводятся аналитические зависимости тяги от геометрии, степени погружения и частоты вращения шнеков. Однако все эти работы исследуют либо конкретные модели, либо, напротив, описывают общие аналитические решения, чего недостаточно для разработки методики расчета и оптимизации водоходных параметров РВД. При этом все большее распространение получают роторно-винтовые машины с тандемной конструкцией движителей, в настоящее время слабоизученные.

Таким образом, во-первых, во многих сферах есть острая потребность в роторно-винтовых транспортных средствах (ТС), и, во-вторых, существует необходимость в разработке методики расчета рациональных параметров РВД для амфибийных ТС.

Для решения данных проблем была поставлена цель исследования, а именно: разработка методики расчета водоходных параметров РВД и выбор рационального сочетания геометрических параметров шнеков РВД с точки зрения требуемого соотношения водоходных и сухопутных характеристик в зависимости от назначения ТС.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- разработать методику расчета рациональных геометрических параметров полупогруженного РВД при работе на воде;
- провести структурный анализ силового взаимодействия элементов шнека РВД при взаимодействии с водой;
- провести анализ взаимодействия двух тандемно расположенных РВД при работе на воде;
- получить кривые действия шнеков типовых РВД снегоболотоходных амфибийных машин;
- разработать методику расчета и математическую модель для расчета параметров взаимодействия РВД со снегом и льдом;
- разработать методику расчета и выбор рациональных характеристик движителей снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий при движении по воде, льду и снегу.

Анализ ранее выполненных исследований

В работе [1] сравниваются транспортные средства с различными движителями, а также приводятся преимущества ТС с РВД перед ТС с воздушной подушкой. В работах [2, 3] приводится история роторно-винтовых движителей, а также технические характеристики существующих роторно-винтовых машин различного назначения. В работах [4-6] рассматриваются современные проекты уже созданных и перспективных снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий (СБРВА): от вездеходов для Арктики до поисково-спасательного робота. Работа [7] касается вопросов перспективы применения ТС с РВД в комплексе с авиацией для спасения людей в Арктических регионах. В работе [8] описана универсальная с точки зрения применимости математическая модель роторно-винтового движителя. В работе [9] описывается общий случай моделирования прямолинейного движения СБРВА. В работе [10] приведен расчет погружения РВД в снег, в работах [11, 12] – прочностной расчет в программном комплексе Ansys. В работе [13] исследуется мореходность транспортных средств с РВД посредством компьютерного моделирования, приведен статический расчет на воде. В работах [14-16] авторы проводят теоретические исследования движения роторно-винтовой машины в воде, в мелком битом и крупном битом льду, выход машины из полыньи на лед; разработаны методики расчета параметров движения СБРВА по этим опорным основаниям; однако не учитывается работа РВД в водо-воздушной среде при расчете сил трения, к примеру, а также сложная картина гидродинамики рабочей среды. Также в работе [15] определяются параметры, наиболее существенно влияющие на плавучесть, проходимость, тягу и т.д., а в работах [17, 18] проводится исследование зависимости скорости движения транспортного средства от угла наклона винтовой линии при эксплуатации на заболоченной местности.

На основании анализа литературных источников, цели и задач была определена следующая последовательность данного исследования:

- 1) изучение особенностей работы РВД снегоболотоходных машин на воде;
- 2) создание и верификация расчетной модели РВД на воде;
- 3) исследование и сравнительный анализ различных конструкций РВД при работе на воде;
- 4) расчет движения по снегу и льду выбранных моделей РВД;
- 5) определение эффективности СБРВА при движении по воде, снегу и льду;
- 6) создание методики расчета эффективности снегоболотоходных машин с РВД по воде, снегу и льду.

Анализ условий движения амфибийных роторно-винтовых машин

В результате анализа эксплуатации роторно-винтовых снегоболотоходных машин с учетом рациональности использования были выделены следующие типовые опорные поверхности: вода, шуга, битый лед в воде, чистый лед, заснеженный лед, неглубокий и глубокий снег, болото, ил, жидкая грязь, песок, мерзлые грунты, пересеченная местность. Данные виды опорных оснований встречаются в различных комбинациях, например, в регионах Арктики, Крайнего Севера, Урала и Сибири, в некоторых дальневосточных областях.

Необходимо отметить, что не все перечисленные опорные основания permanently присутствуют в типовых регионах эксплуатации; многие из них имеют сезонный характер. Поэтому было решено классифицировать выявленные опорные основания с учетом сезонности эксплуатации. Предлагаемый способ разделения представлен на рис. 1. Необходимо отдельно подчеркнуть, что предлагаемая схема классификации достаточно условна в сезонности; разумеется, есть несколько типов опорных оснований, которые встречаются в разные времена года практически в неизменном виде. Такие опорные основания были отнесены к какому-либо сезону, исходя из логических соображений и некоторых условных взаимосвязей этих оснований с другими. В других сезонах вышеуказанные спорные основания не отмечались, несмотря на их возможное наличие.

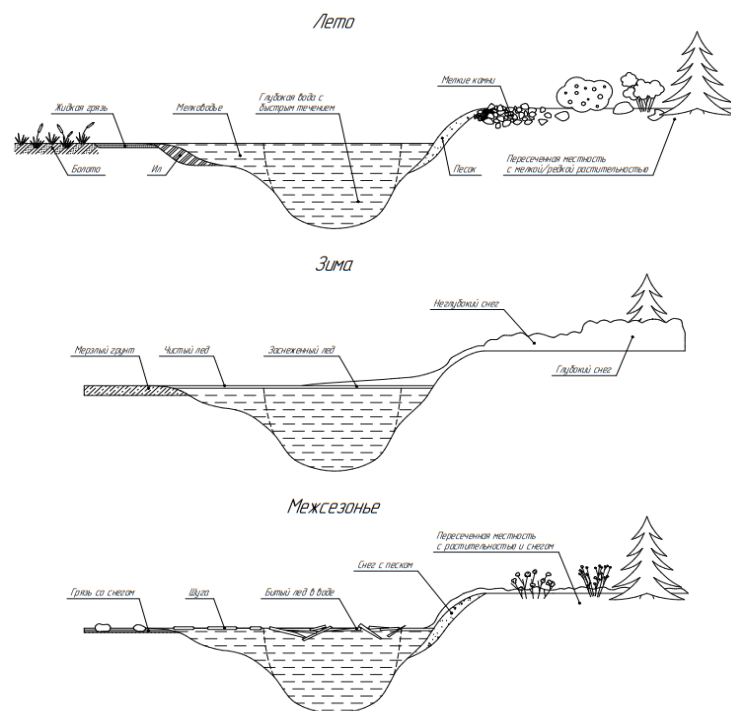


Рис. 1. Графическая иллюстрация типовых опорных оснований для движения амфибийных роторно-винтовых машин

Fig. 1. Graphical illustration of typical bearing surfaces for motion of amphibious rotary-screw vehicles

Согласно общему анализу поведения роторно-винтовых снегоболотоходных машин на различных основаниях, наиболее изученной является работа РВД на неглубоком и глубоком снегу, на льду, на болоте; наименее изученной – на воде, шуге, иле, на битом льду в воде.

Исследование движения снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий по воде

При анализе водоходных свойств амфибийных машин с РВД принципиально важно учитывать ряд особенностей функционирования их движителей. Рассмотрим три характерных особенности работы РВД на воде. Первой из них является полупогруженный режим работы, так как на воде шнеки РВД не только обеспечивают тягу, но и в существенной мере формируют водоизмещение амфибии, в связи с чем из-за специфики конструкции в большинстве случаев они погружены в воду не полностью. В результате находящаяся над водой часть спирали шнека в создании тяги участия не принимает. Более того, погружаясь при вращении в воду, спирали шнека увлекают за собой воздух. Формируемая таким образом эмульсия имеет меньшую по сравнению с водой плотность, что изменяет условия работы и, следовательно, пропульсивные характеристики шнека.

Плотность эмульсии в этом случае должна определяться зависимостью:

$$\rho = k_{\text{аэр}}\rho_w, \quad (1)$$

где ρ_w – плотность воды, $k_{\text{аэр}}$ – коэффициент аэрации, определяющий степень насыщения воды воздухом.

Вторая отличительная особенность – это важность фактора взаимодействия с корпусом, так как, в отличие от других водоходных движителей, располагаемых за кормой или в тоннелях корпуса, шнеки РВД взаимодействуют с корпусом амфибии по всей длине. Это взаимодействие приводит к существенному возрастанию сопротивления корпуса и выступающих частей при работе движителя. В общем случае данный эффект учитывается коэффициентом засасывания. Руководствуясь многолетним опытом, при проектировании амфибийных машин с гребными винтами этот коэффициент принимают в диапазоне $t = 0,2 \dots 0,3$.

Третья важная отличительная черта РВД проявляется в наиболее распространенной в настоящее время тандемной конструкции. В этом случае по каждому борту расположено по два шнека с противоположным направлением навивки, вращающихся в разные стороны. При движении по грунтам со скоростью 5 км/ч и выше такая компоновка имеет ряд преимуществ перед двухроторной; угол поворота четырехроторных машин при таких условиях больше, чем у двухроторных, управляемость выше.

При работе на воде между шнеками борта возникает сложное взаимодействие. Особенно специфичны условия работы заднего шнека, работающего в кильватерном следе переднего. Набегающий на задний шнек поток ускорен и закручен в направлении, противоположном его вращению. Отличие продольной скорости натекающего на рабочий орган движителя потока от скорости движения транспортного средства принято учитывать коэффициентом попутного потока. Для большинства амфибийных машин с традиционными водоходными движителями коэффициент попутного потока лежит в диапазоне $w = 0,15 \dots 0,25$. Очевидно, что для задних шнеков тандемных РВД он может принимать отрицательные значения. Закрутку потока на входе в задний шнек можно рассматривать как частный случай неравномерности натекания и учитывать коэффициентом неравномерности, характеризующим изменение упора и момента рабочего органа движителя в возмущенном потоке. Известно, что значения коэффициента неравномерности для гусеничных и колесных амфибийных машин, оборудованных гребными винтами, находятся в диапазонах $i = 0,75 \dots 0,8$; его составляющих коэффициента неравномерности по моменту $i_Q = 1,15 \dots 1,3$, коэффициента неравномерности по упору $i_T = 0,9 \dots 0,97$. Сложность прогнозирования пропульсивных характеристик заднего шнека тандемного РВД обуславливается разнонаправленностью влияния поступательной и вращательной составляющих набегающего потока. Первая разгружает шнек, снижая тягу и момент сопротивления вращению. Вторая противодействует вращению, одновременно повышая тягу. Общая картина работы заднего шнека дополнительно усложняется аэрацией и возмущением свободной поверхности воды, вызванными работой переднего шнека.

В связи с этим разработку полноценной методики выбора рациональных параметров РВД необходимо разбить на несколько этапов. В данном исследовании решалась задача оценки эффективности РВД в первом приближении, а именно – в свободной воде без учета влияния корпуса. При моделировании решались уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу (RANS) с использованием k - ε -модели турбулентности. Дискретная модель расчетной области содержит 3,2 млн ячеек типа «trimmer» (усеченные прямоугольные ячейки) с измельчением в зоне работы шнеков. Моделирование вращения шнеков обеспечено их размещением в цилиндрических подобластях, сопряженных с основной расчетной областью по принципу накладывающийся сетки «overset mesh».

Для оценки адекватности и точности полученных данных численная модель в данном случае была отработана и проверена на близком по топологии, работающем в аналогичных условиях гребном винте серии Трооста (табл. 1). Для верификации был выбран пятилопастной гребной винт с максимальным из серии дисковым отношением для более адекватного сравнения. Такой выбор обуславливается спецификой конструкции РВД, обладающего достаточно высоким дисковым отношением.

Таблица 1.

Параметры модели гребного винта

Table 1.

Parameters of propeller model

Параметр	Обозначение	Значение
Диаметр, мм	D	800
Количество лопастей, шт	z	5
Шаговое отношение	H/D	1,4
Ступичное отношение	d/D	0,325
Дисковое отношение	θ	1,05

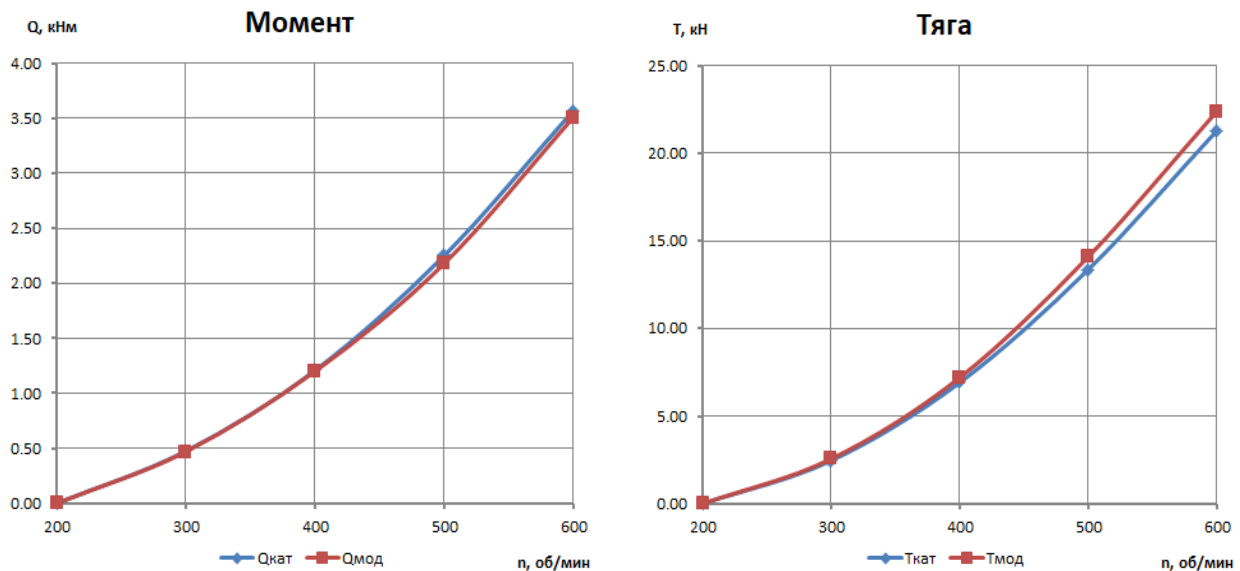


Рис. 2. Сравнение результатов численного моделирования с каталожными результатами модельных испытаний гребного винта в опытовом бассейне: момент (слева) и тяга (справа)

Fig. 2. Comparison of the results of computer simulation and the catalog results of model trials of propeller in experimental tank: torque (left) and thrust (right)

В результате численного эксперимента были получены зависимости тяги и момента винта в свободной воде при скорости потока 4 м/с в диапазоне частот вращения от 200 до 600 об/мин. Диаграммы на рис. 2 показывают, что максимальное расхождение значений тяги и момента, полученных при физическом и численном моделировании, отличаются не более чем на 5 и 2 % соответственно. Такая погрешность вполне приемлема для сравнительного анализа.

Таблица 2.

Параметры модели РВД

Table 2.

Parameters of RSP model

Параметр	Модель №1	Модель №2	Модель №3
D	800	800	800
z	3	3	3
H/D	1,4	1,8	2,5
d/D	0,8	0,8	0,8
θ	3,48	2,91	2,35
φ	24	30	39

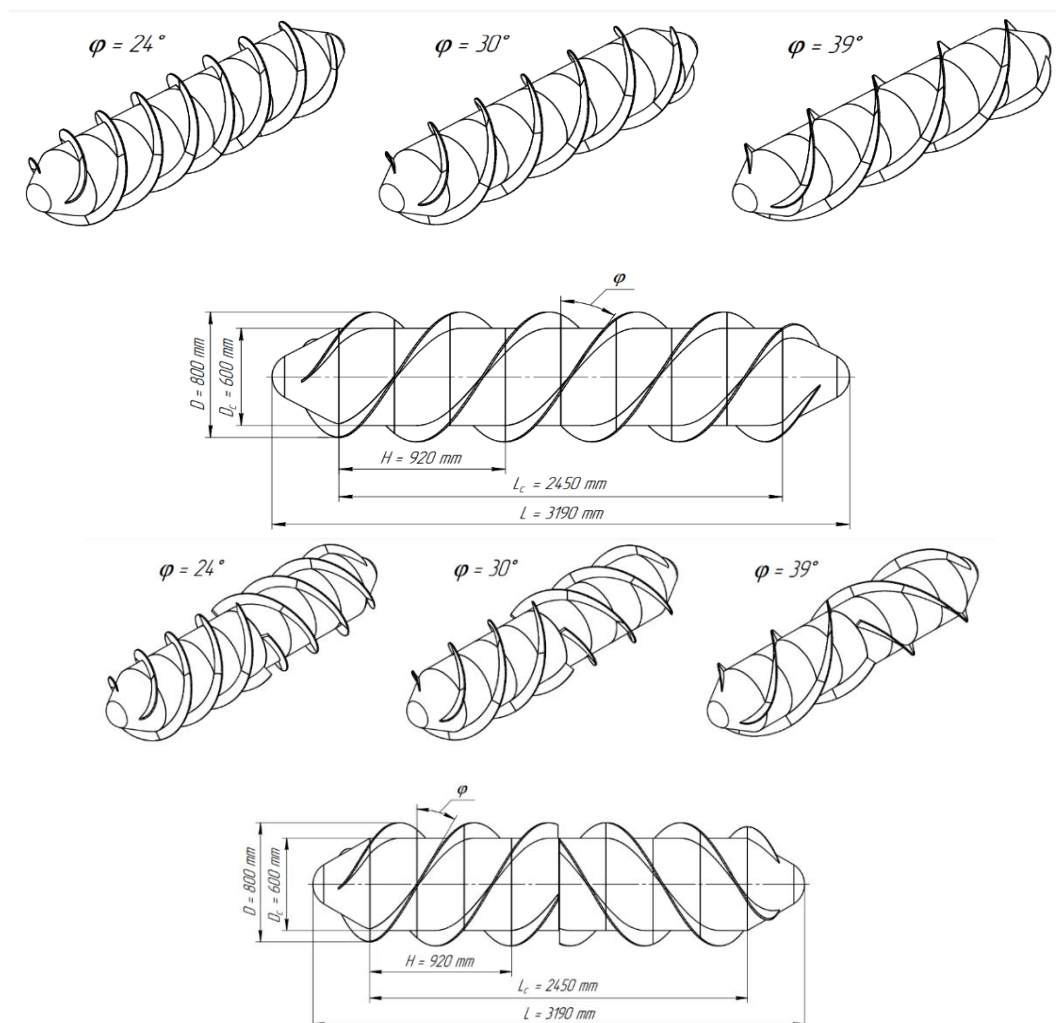


Рис. 3. Модели РВД одиночной и тандемной конструкции

Fig. 3. RSP models with single and tandem design

Параметры моделируемых РВД подбирались, исходя из результатов анализа существующих снегоболотоходных машин. Одним из основных факторов, определяющих динамические характеристики РВД на воде, является угол наклона винтовой линии φ . Данный параметр существенно влияет на упор и момент движителя, при постоянной угловой скорости эти характеристики возрастают по мере увеличения угла φ . Для первоначальной оценки эффективности РВД при работе на воде в полностью погруженном состоянии были созданы три модели одиночной и тандемной конструкции с крайними и средними значениями параметра φ (табл. 2, рис. 3). Численное моделирование для рассматриваемых вариантов конструктивного исполнения шнеков выполнялось для ходового режима ($v = 4$ м/с, $n = 200 \dots 1000$ об/мин) и швартовного режима ($n = 200 \dots 600$ об/мин). Оценка эффективности водоходных движителей и, соответственно, выбор оптимальных параметров в судостроении осуществляется при помощи кривых действия. Данные графики отражают построенные в относительных координатах зависимости безразмерных коэффициентов – коэффициента упора, коэффициента момента и пропульсивного коэффициента – от относительной поступи.

На рис. 4 приведено сравнение кривых действия шнеков РВД одиночной конструкции с различными углами наклона винтовой линии. На рис. 5 представлено сравнение кривых действия одиночного и тандемного роторно-винтовых движителей с различными углами наклона винтовой лопасти. У тандемного движителя с углом наклона 24° коэффициент упора выше, чем у одиночного, более чем в 2,5 раза; у тандемных движителей с углами 30 и 39° он больше в 3 раза. Коэффициент момента тандемного движителя с углом 24° больше, чем у одиночного, в 1,5 раза; с углом 30° – больше в 2 раза; с углом 39° – в 2,5 раза. Наиболее ярко характеризуют преимущества тандемной схемы представленные графики пропульсивного коэффициента. Тандемные движители в среднем в 1,5-2 раза эффективнее, чем соответствующие движители одиночной конструкции.

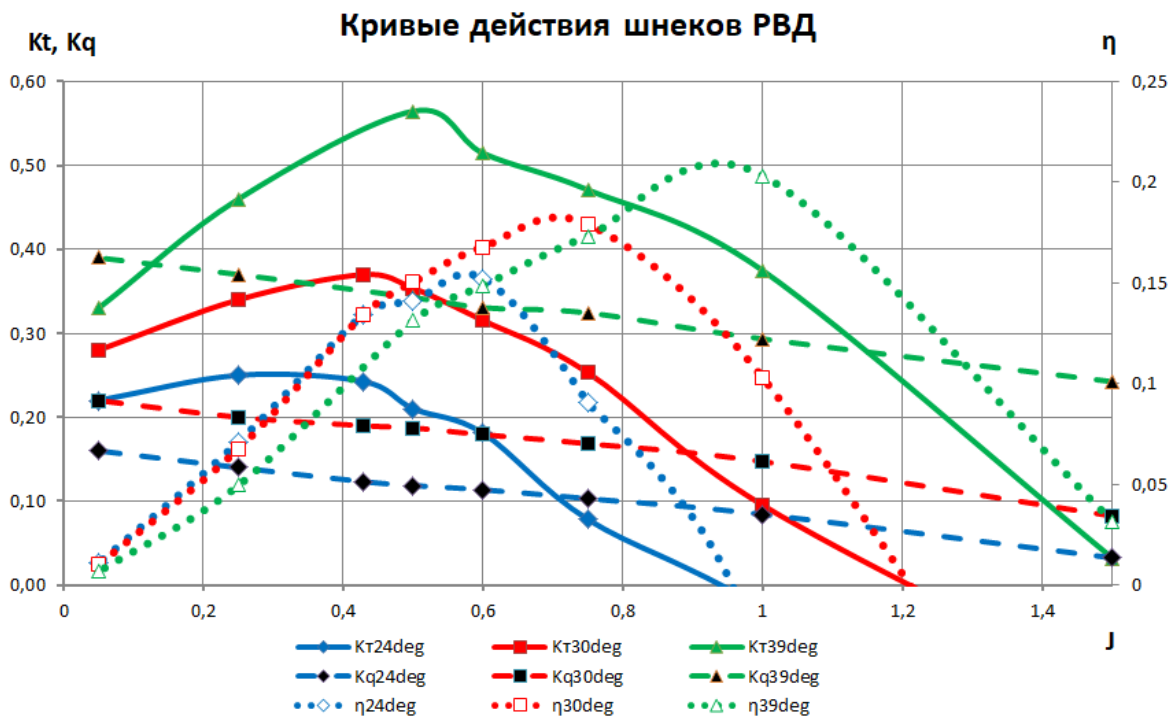


Рис. 4. Кривые действия

Fig. 4. Performance curves

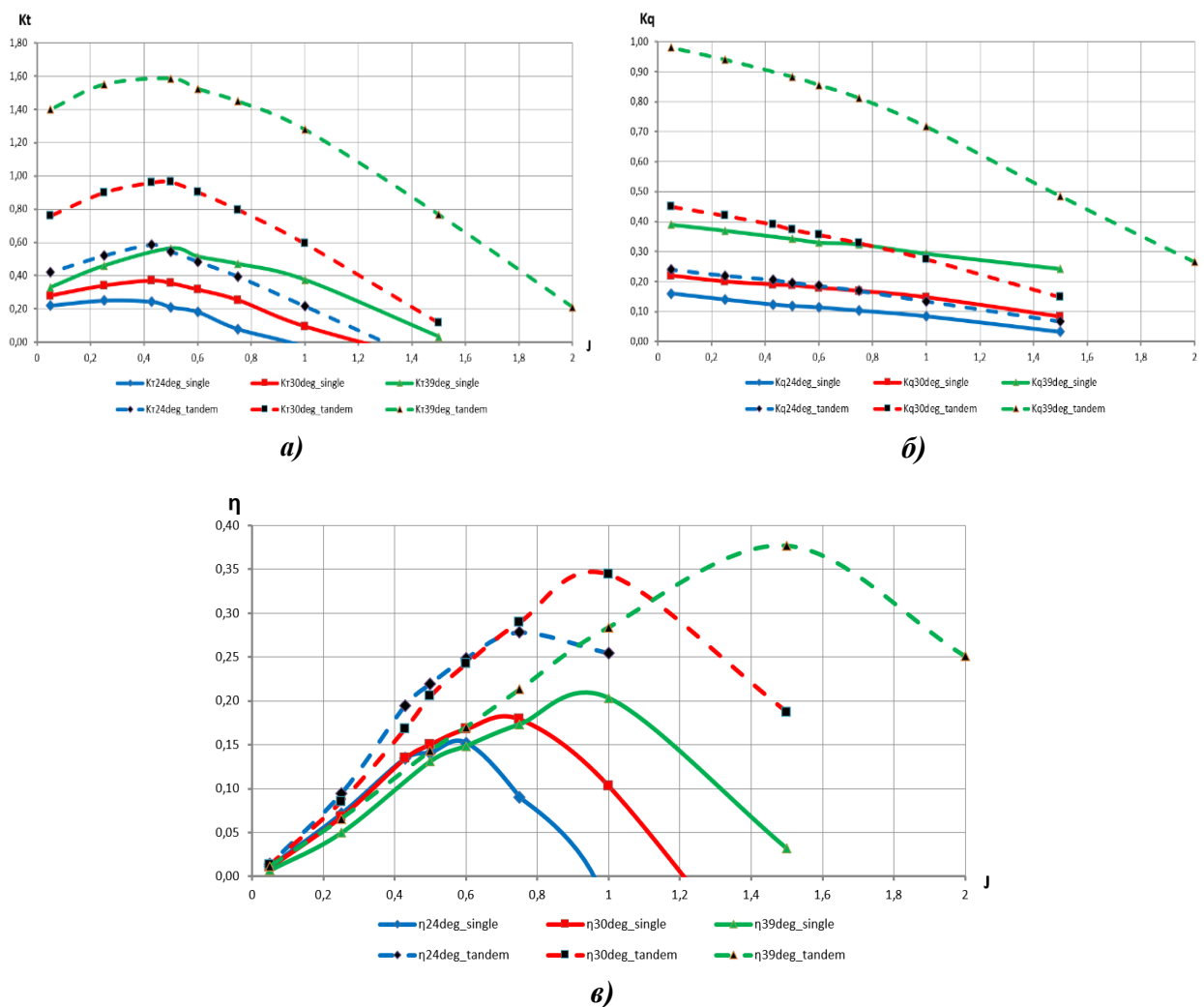


Рис. 5. Кривые действия РВД одиночной и тандемной конструкции:
 а) коэффициент упора; б) коэффициент момента; в) пропульсивный коэффициент

Fig. 5. Performance curves of RSP with single and tandem design:
 а) thrust coefficient; б) torque coefficient; в) propulsive coefficient

Таким образом, при сравнительном анализе видно, что коэффициенты упора и момента, а также пропульсивный коэффициент (т.е. КПД) движителей тандемного типа выше, чем движителей одиночного типа. Анализ картин визуализации результатов (рис. 6) численного моделирования гидродинамики шнеков подтвердил сложность характера их взаимодействия с водной средой, в частности показав существенную неравномерность распределения нагрузок по отдельным элементам. Для оценки вклада элементов шнека в создание полезной тяги и структуру затрат мощности на вращение шнека при движении по воде был проведен структурный анализ рассмотренных выше моделей РВД. В данной статье приведен пример структурного анализа для одиночного шнека.

Для получения возможности структурного анализа гидродинамического взаимодействия с водной средой поверхности моделей шнеков были разделены на элементы, на каждом из которых в процессе моделирования регистрировались осредненные значения тяги в продольном направлении и крутящего момента относительно оси вращения. В результате модели шнеков составлены из 8 участков винтовых линий, расположенных на базовом цилиндре шнека, – цилиндрических винтовых линий, 8 фрагментов самого базового цилиндра шнека, переднего и заднего обтекателя, 3 входных и 3 выходных элементов винтовых линий.

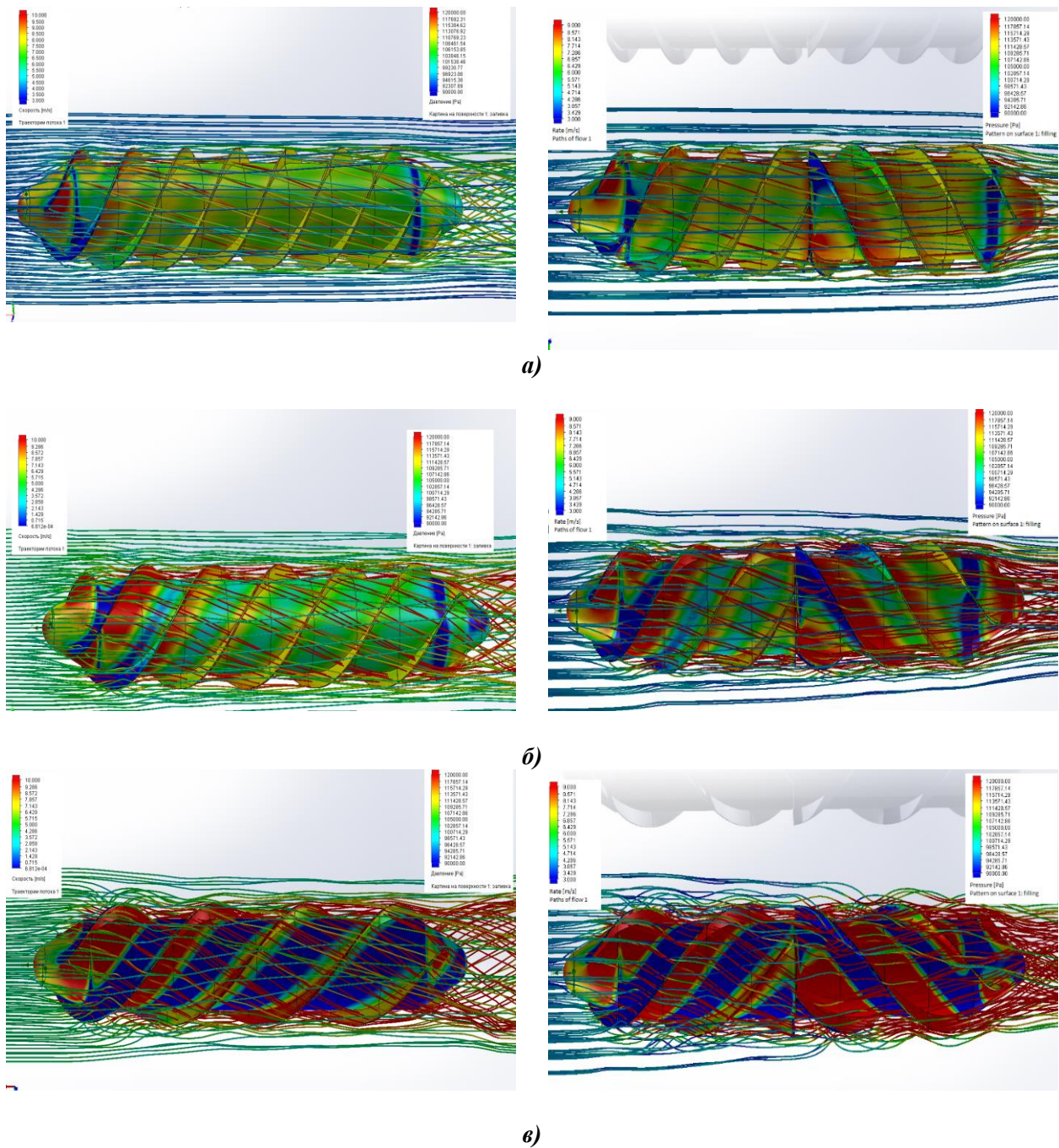


Рис. 6. Картины визуализации численного моделирования гидродинамики полностью погруженного шнека РВД одиночной (слева) и tandemной (справа) конструкции ($v=4$ м/с, $n=500$ об/мин):
 а) угол наклона винтовой линии $\varphi=24^\circ$; б) угол наклона винтовой линии $\varphi=30^\circ$;
 в) угол наклона винтовой линии $\varphi=39^\circ$

Fig. 6. Visualization patterns of computer simulation of hydrodynamics of full-submerged Archimedes screws of RSP with single (left) and tandem (right) design ($v=4$ m/sec, $n=500$ rpm):
 а) helix angle $\varphi=24^\circ$; б) helix angle $\varphi=30^\circ$; в) helix angle $\varphi=39^\circ$

Поставленные задачи решались средствами численного моделирования при фиксированном значении скорости потока $v = 4$ м/с и переменных значений частоты вращения шнека в диапазоне $n = 200 \dots 700$ об/мин.

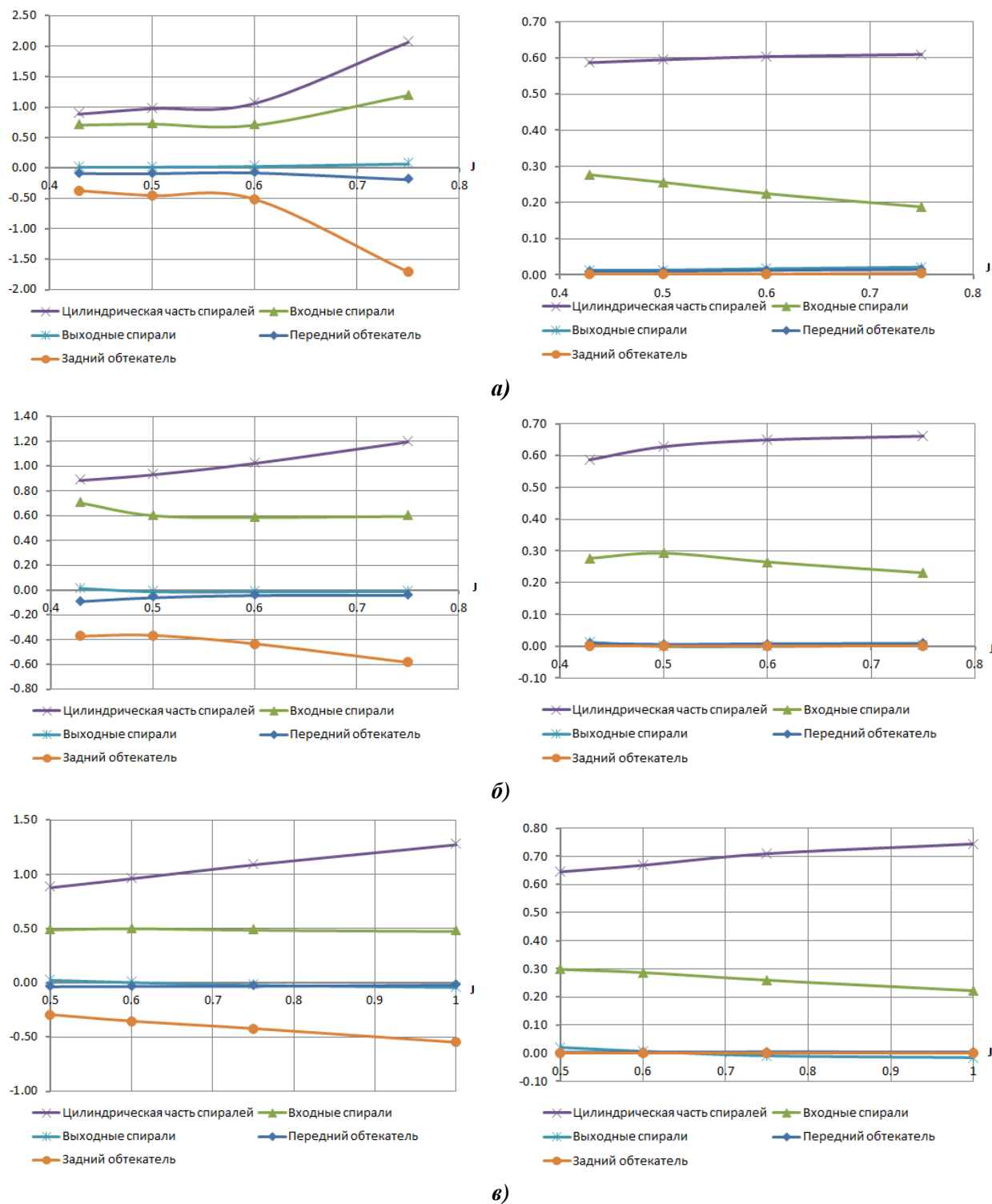


Рис. 7. Влияние относительной поступи на удельную тягу (слева) и удельный момент (справа) при фронтальном натекании потока на полностью погруженный шнек:
 а) угол наклона винтовой линии $\varphi=24^\circ$; б) угол наклона винтовой линии $\varphi=30^\circ$;
 в) угол наклона винтовой линии $\varphi=39^\circ$

Fig. 7. Influence of advance ratio on specific thrust (left) and specific torque (right) when water flow frontally approaching on full-submerged Archimedes screw:
 а) helix angle $\varphi=24^\circ$; б) helix angle $\varphi=30^\circ$; в) helix angle $\varphi=39^\circ$

На рис. 7 представлены зависимости тяги и момента на основных элементах, приведенных, соответственно, к тяге на шнеке целиком и подводимому к нему моменту от относительной поступи. Здесь отрицательные значения соответствуют ситуации, когда элемент создает сопротивление.

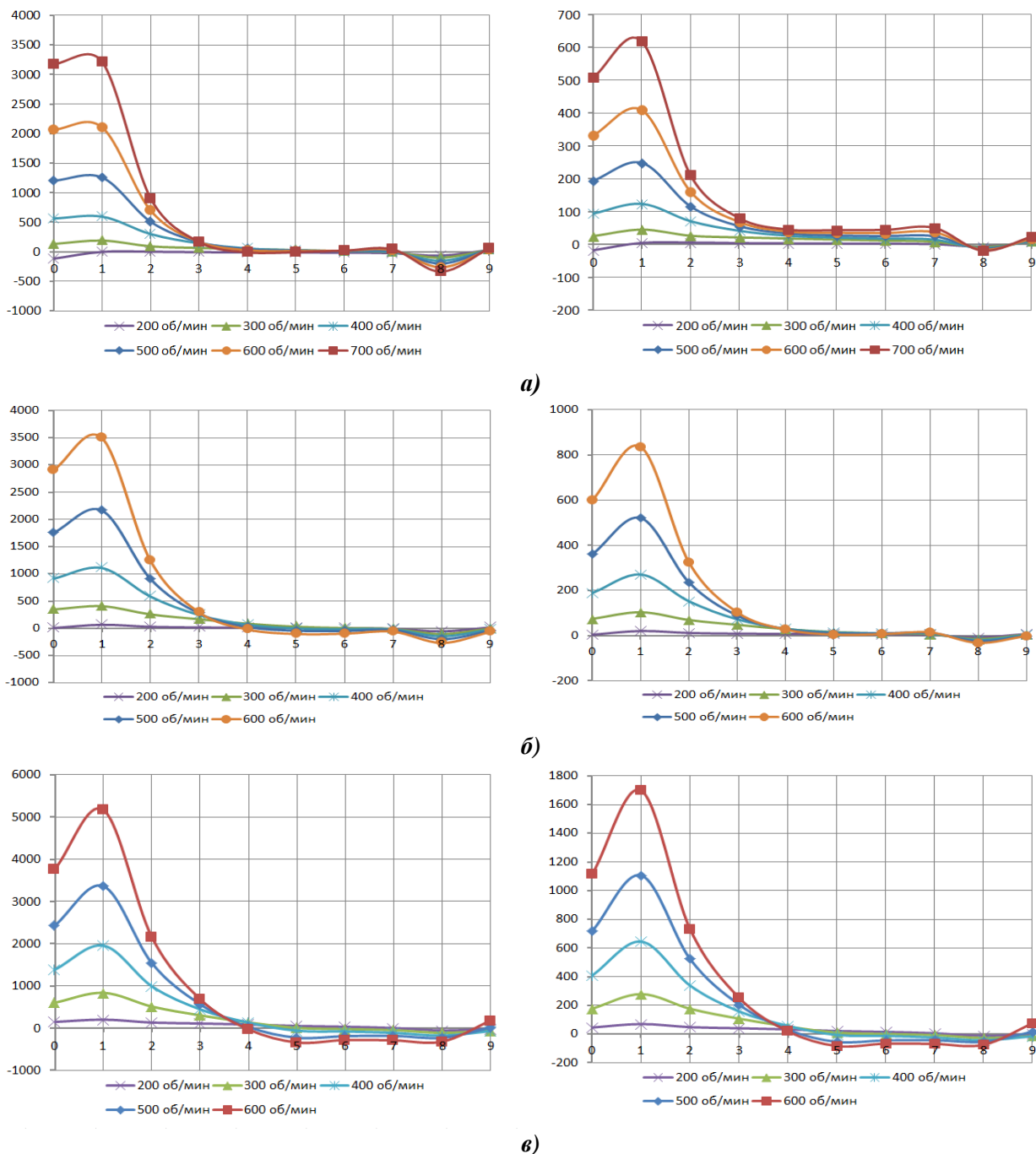


Рис. 8. Распределение тяги и момента по длине одной спирали шнека:
 а) угол наклона винтовой линии $\varphi=24^\circ$; б) угол наклона винтовой линии $\varphi=30^\circ$;
 в) угол наклона винтовой линии $\varphi=39^\circ$

Fig. 8. Thrust and torque distribution over the length of one helix of Archimedes screw:
 а) helix angle $\varphi=24^\circ$; б) helix angle $\varphi=30^\circ$; в) helix angle $\varphi=39^\circ$

Естественным образом основным элементом, формирующим тягу, является цилиндрическая часть винтовых линий шнека. Во всем диапазоне углов винтовых линий их тяга близка к совокупной тяге шнека. Вторым элементом, формирующим тягу, являются входные винтовые линии. На восходящей ветви КПД шнека их доля в общей тяге не зависит от поступи и варьируется в диапазоне 0,5...0,8 (меньшие значения соответствуют большим значениям угла наклона винтовой линии). Удельный момент лежит в пределах 0,2...0,3, снижаясь с увеличением относительной поступи. Основным фактором, снижающим гидродинамическую эффективность шнеков, является сопротивление заднего обтекателя, доля которого в совокупной тяге возрастает с уменьшением угла наклона винтовой линии и увеличением относительной поступи. Критический рост удельного сопротивления заднего обтекателя наблюдается на нисходящей ветви КПД шнека. Вклад этого элемента в затраты мощности на вращение шнека незначителен. Приведенные зависимости показывают, что остальные конструктивные элементы практически не оказывают влияние на общую эффективность полностью погруженного шнека во фронтально набегающем потоке.

Особый интерес представляют полученные результаты распределения тяги и момента по длине спиральной навивки шнеков (рис. 8). Для представления на диаграммах элементы винтовых линий пронумерованы от носа к корме (значения по оси абсцисс). Значения «0» и «9» соответствуют входному и выходному элементам винтовых линий. Зона эффективности ограничивается первыми четырьмя элементами винтовых линий, включая входной. Вклад остальных участков в тягу и затрачиваемую мощность незначителен, особенно на высоких оборотах (при малых значениях относительной поступи). Интересен также выявленный эффект перехода части винтовых линий (элементы 5...8) в «турбинный режим», наблюдающийся при больших углах навивки (39°).

По результатам исследования можно сделать следующие основные выводы: тягу формируют в основном входные и цилиндрические элементы винтовых линий шнека, а основное негативное влияние на совокупную тягу шнека оказывает сопротивление заднего обтекателя; подводимая мощность и эффективная тяга практически реализуются только на входном участке винтовых линий и на передней части цилиндрических винтовых линий; существенная доля входных элементов спиралей в формировании тяги шнеков в сочетании с их высокой гидродинамической эффективностью свидетельствует о необходимости особого отношения к обработке конструкции этих элементов при проектировании.

На основании принятого порядка проведения расчетов далее необходимо представить математические модели расчета сил сопротивления и мощности, затрачиваемых при движении РВД по льду и снегу. В рамках настоящей статьи такие модели не рассматриваются. Но с учетом того, что данные значения могут быть рассчитаны, приведем методику оценки эффективности снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий при движении по воде, льду и снегу.

Методика расчета эффективности снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий при движении по воде, льду и снегу

В общем виде эффективность снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий может быть выражена зависимостью:

$$E = k_w P_w + k_s P_s, \quad (2)$$

где k_w и k_s – влияние параметров, оценивающих эффективность для РВД при движении по воде, снегу и льду соответственно; P_w и P_s значения эффективности для воды, снега и льда.

Выбор критериев осуществляется с точки зрения подвижности транспортного средства, определяющей иерархию и структуру задач управления [19, 20]. Таким образом, в соответствии с формулой (1) и структурой, предложенной В.В. Беляковым, можно представить следующую иерархию значений коэффициентов влияния параметров, оценивающих эффективность для РВД при движении по грунту и воде:

- 1) *влияние скорости движения* (в зависимости от конечной цели можно оценивать скорость, время или путь на исследуемых участках, причем рассматриваемые величины должны быть относительны (E_V));
- 2) *задача управления курсовой подвижностью* (оценивается параметрами, характеризующими изменение курса РВД (E_ρ));
- 3) *задача поддержания подвижности* (содержит следующие параметры: управление курсовой ориентацией, управление скоростью движения, управление критическими ситуациями, поддержание подвижности по живучести (эксплуатационная живучесть, отказная живучесть) ($E_{\Delta P}$));
- 4) *задача предотвращения и устранения критических ситуаций* (т.н. динамическая адаптивная подвижность, включающая следующие системы: управление системами ТС на режимах торможения и разгона; контроль курсовой и траекторной устойчивости; управление распределением крутящего момента по двигателям; управление подвеской автомобиля; системы поддержания проходимости, в том числе системы повышения подвижности (E_{KC}));
- 5) *основная задача*, включающая все предыдущие, а именно, обеспечение устойчивого и безопасного движения, в данном случае – аналог эффективности движения РВД ($E_{РВД}$).

В соответствии с принятой структурой и иерархией, расчет эффективности РВД может быть проведен по следующей зависимости:

$$E_{РВД} = E_{Vg} E_{\rho w} E_{\Delta P w} E_{KCw} + E_{Vs} E_{\rho s} E_{\Delta P s} E_{KCs}, \quad (3)$$

или:

$$E_{РВД} = k_{KCwV} k_{wV} \bar{V}_w k_{KCw\rho} k_{w\rho} \bar{\rho}_w k_{KCw\Delta P} k_{w\Delta P} \bar{\Delta P}_w + k_{KCsV} k_{sV} \bar{V}_s k_{KCs\rho} k_{s\rho} \bar{\rho}_s k_{KCs\Delta P} k_{s\Delta P} \bar{\Delta P}_s. \quad (4)$$

где $E_V = k_V \bar{V}$ – эффективность по скорости, \bar{V} – нормированная скорость, $E_\rho = k_\rho \bar{\rho}$ – эффективность по управляемости, $\bar{\rho}$ – нормированная кривизна, $E_{\Delta P} = k_{\Delta P} \bar{\Delta P}$ – эффективность по запасу силы тяги, ΔP – нормированный запас силы тяги, $E_{KC} = k_{KCV} k_{KC\rho} k_{KC\Delta P}$ – эффективность с позиции устранения критических ситуаций и применения средств повышения подвижности, k_{KCV} , $k_{KC\rho}$, $k_{KC\Delta P}$ – коэффициенты, характеризующие рост скорости движения, увеличение курсовой ориентации, увеличение показателя подвижности при использовании системы устранения критических ситуаций. В формулах (3) и (4) индексы «w» и «s» означают движение по воде, снегу и льду соответственно.

Методика расчета эффективности снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий при движении по воде, льду и снегу при движении по грунту и воде представлена на рис. 9.

Выводы

Разработана методика расчета эффективности амфибийных снегоболотоходных машин с РВД, включающая в себя совокупность взаимодополняющих критериев и строгую иерархию в соответствии с теорией подвижности В.В. Белякова. Эффективность по скорости движения находится на самом нижнем уровне иерархии, эффективность по курсовой ориентации включает в себя эффективность по скорости, эффективность по поддержанию подвижности включает в себя эффективность по курсовой ориентации, эффективность по устранению критических ситуаций является дополняющей к эффективности по скорости, курсовой ориентации и поддержанию подвижности. В целом эффективность снегоболотоходной амфибийной машины с РВД рассчитывается по формулам (3) и (4) (рис. 9).

Проведен анализ условий движения амфибийных роторно-винтовых машин. Показано, что на пути следования амфибийных машин с РВД встречаются: вода, шуга, битый лед в воде, чистый лед, заснеженный лед, неглубокий и глубокий снег, болото, ил, жидкая грязь, песок, мерзлые грунты, пересеченная местность, а также данные виды опорных оснований в различных комбинациях.

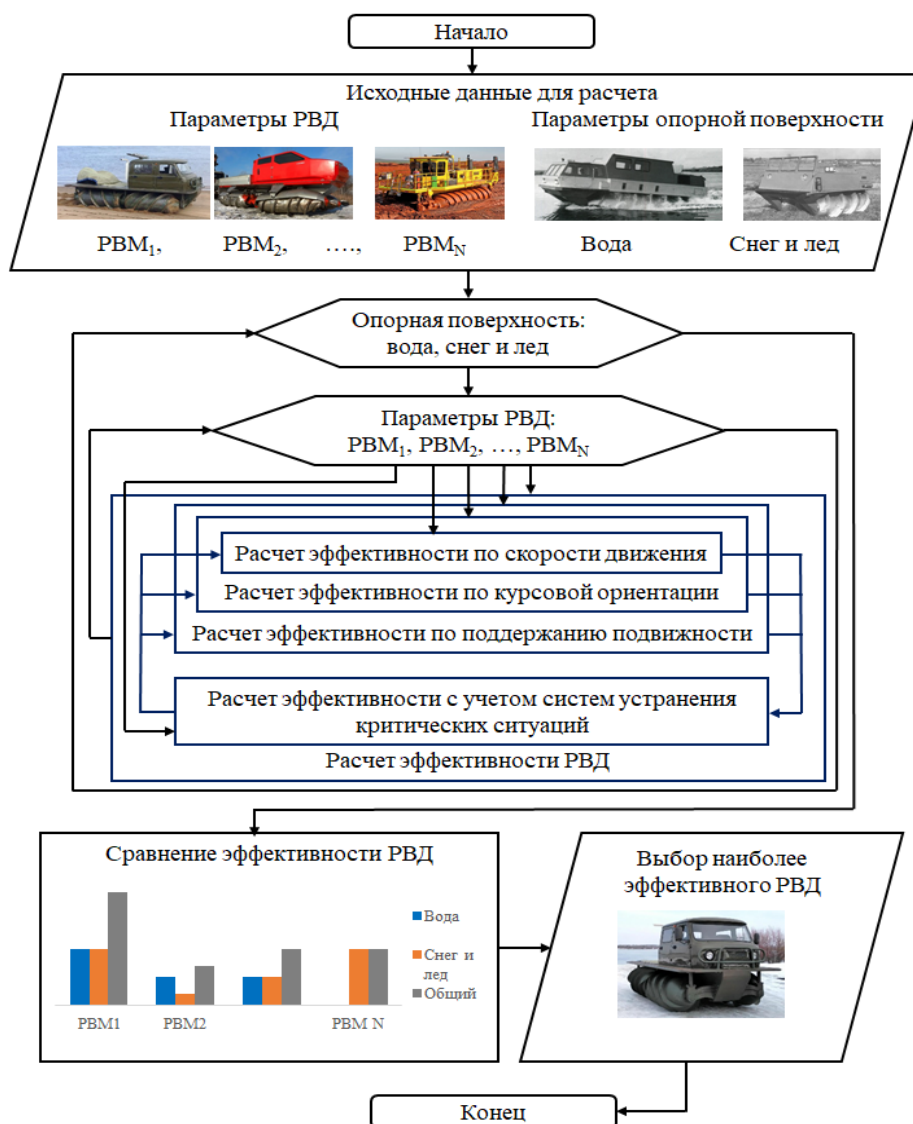


Рис. 9. Блок-схема методики расчета эффективности амфибийных машин с РВД

Fig. 9. Flow chart of calculation procedure of efficiency of amphibious vehicles with RSP

Более детально решена задача оценки эффективности РВД в свободной воде без учета влияния корпуса. Проведены расчеты для одиночного и тандемного роторно-винтовых движителей с различными углами наклона винтовой лопасти. Тандемные движители в среднем в 1,5-2 раза эффективнее, чем соответствующие движители одиночной конструкции.

Библиографический список

1. **Котляренко, В.И.** Анализ различных показателей транспортных средств для организации всепогодных транспортных перевозок в условиях Севера / В.И. Котляренко, Л.В. Барахтанов // Исследования, конструкции, технологии. 2015. № 6 (95). С. 64-67.
2. **Данилов, Р.Г.** Развитие конструкции роторно-винтовых движителей для транспортных и технологических машин / Р.Г. Данилов // Строительные и дорожные машины. 2015. №1. С. 53-58.
3. **Колотилин, В.Е.** Статистическая модель выбора геометрических параметров, массово-инерционных и мощностных характеристик транспортно-технологических машин на роторно-винтовых движителях / В.Е. Колотилин, А.В. Михеев, П.О. Береснев, А.М. Беляев, А.В. Папунин, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков, А.А. Куркин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 3 (110). С. 156-208.

4. **Кошурина, А.А.** Вектор развития современного вездеходного транспорта для Арктики / А.А. Кошурина // Арктика: история и современность; Труды Второй международной научной конференции. - Санкт-Петербург: ООО «Медиапапир», 2017. С. 210-217.
5. **Кошурина, А.А.** Поисково-спасательный робот для работы в шахтах / А.А. Кошурина, В.Е. Гай, Р.А. Дорофеев [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. № 4 (17). С. 57-61.
6. **Крашенинников, М.С.** Универсальное коллективное спасательное средство с роторно-винтовым двигателем / М.С. Крашенинников, А.А. Кошурина, А.В. Шмелев // Актуальные вопросы машиноведения. 2013. № 2. С. 77-80.
7. **Лопота, А.В.** Концептуальные вопросы разработки роботизированных систем для поиска и спасения людей, терпящих бедствие, в условиях Арктики / А.В. Лопота, П.К. Шубин // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 1 (18). С. 3-9.
8. **Крашенинников, М.С.** Математическая модель роторно-винтового двигателя / М.С. Крашенинников // Интернет-журнал «Науковедение». Том 8. 2016. №4.
9. **Наумов, В.Н.** Моделирование прямолинейного движения транспортно-технологического средства с роторно-винтовым двигателем / В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, К.Е. Бяков // Известия вузов. 2013. № 12. С. 31-35.
10. **Крашенинников, М.С.** Расчет погружения роторно-винтового двигателя в снег / М.С. Крашенинников, Л.В. Барахтанов // Интернет-журнал «Науковедение». Том 9. 2017. №5.
11. **Липин А.А.** Расчет напряженно-деформированного состояния системы «шнек-грунт» с использованием пакета Ansys / А.А. Липин, В.А. Шапкин, У.Ш. Вахидов [и др.] // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2016. № 3 (71). С. 14-15
12. **Липин А.А.** Статистический прочностной расчет системы «шнек-грунт» / А.А. Липин, А.Д. Стрижак // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития; Материалы международной научно-практической конференции: в 2-х частях. – Вологда: ООО «Маркер», 2017. С. 17-19.
13. **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.
14. **Дonato, И.О.** Роторно-винтовые машины. Основы теории движения / И.О. Донато, В.А. Жук, Б.В. Кузнецов, А.П. Куляшов, В.А. Шапкин, Ю.В. Щербаков. – Н. Новгород, 2000. – 451 с.
15. **Вахидов, У.Ш.** Автоматизированный подход к проектированию транспортно-технологических машин с роторно-винтовым двигателем / У.Ш. Вахидов, А.В. Согин, В.А. Шапкин, Ю.В. Шапкина, А.А. Липин // Транспортные системы. 2016. № 1. С. 17-23.
16. **Согин, А.В.** Исследование движения роторно-винтовой машины (РВМ) по воде / А.В. Согин, В.А. Шапкин // Известия вузов. Машиностроение. 2006. №5. С. 54-64.
17. **Стрижак, А.Д.** Выбор рациональных параметров роторно-винтового двигателя (РВД) транспортно-технологического средства по заболоченной местности / А.Д. Стрижак, А.А. Липин // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития; Материалы международной научно-практической конференции: в 2-х частях. Научный центр «Диспут». – Вологда: ООО «Маркер», 2017. С. 41-42.
18. **Стрижак, А.Д.** Исследование прямолинейного движения транспортно-технологического средства, оснащенного роторно-винтовым двигателем, по заболоченной местности / А.Д. Стрижак, А.А. Липин, А.В. Вишняков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Том 22. № 3. С. 55-62.
19. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева, У.Ш. Вахидов, К.О. Гончаров, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, К.Я. Лелиовский, В.С. Макаров, А.В. Папунин, А.В. Тумасов, А.В. Федоренко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 145-175.
20. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 72-77.

*Дата поступления
в редакцию: 30.07.2022*

*Дата принятия
к публикации: 10.11.2022*