



## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ ЛОПАСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО КОЛЕСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ МАШИНЫ ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ

Шаповалова С. В.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Российская Федерация, e-mail: shapovalovas@bk.ru*

В статье представлена сравнительная расчетная оценка четырех вариантов лопастных элементов специализированного колесного движителя машины повышенной проходимости, предназначенной для преодоления водных преград без установки отдельного гребного винта. Целью исследования является обоснование рационального варианта лопастного элемента специализированного колесного движителя машины повышенной проходимости на основе сравнительной расчетной модели, учитывающей работу движителя на воде и сопутствующие ограничения при движении по суше. Рассмотрены серповидная, складная серповидная, V-образная секционная и ковшовая лопасти с окнами. Для всех вариантов разработаны пространственные 3D-модели, после чего выполнено сопоставление в одинаковых расчетных условиях. В качестве основных показателей использованы расчетная скорость движения в стоячей воде и на течении, тяговое усилие, коэффициент гидродинамической эффективности, курсовая устойчивость, сопротивление на суше, ударные нагрузки, технологичность изготовления и надежность. Интегральный показатель универсальности дополнен обоснованием весовых коэффициентов, процедурой нормирования баллов и анализом чувствительности. Установлено, что ковшовая лопасть обеспечивает наибольшее тяговое усилие, V-образная лопасть обладает наилучшей курсовой устойчивостью, а серповидная жесткая лопасть является наиболее простой по изготовлению. В рамках принятой расчетно-оценочной модели наибольший интегральный балл получила складная серповидная лопасть. Полученные данные могут быть использованы как основа для последующего проектирования опытного образца.

**Ключевые слова:** машина повышенной проходимости, колесный движитель, лопасть, водная преграда, сравнительная оценка, 3D-модель

## COMPARATIVE ASSESSMENT OF PADDLE-BLADE VARIANTS FOR A SPECIALIZED WHEELED PROPULSOR OF A HIGH-MOBILITY VEHICLE

Shapovalova S. V.

*Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Industrial University of Tyumen", Tyumen, Russian Federation, e-mail: shapovalovas@bk.ru*

This article presents a comparative calculated assessment of four blade element variants for a specialized wheeled propulsion unit for an all-terrain vehicle designed to overcome water obstacles without installing a separate propeller. The objective of the study is to substantiate a rational blade element variant for a specialized wheeled propulsion unit for an all-terrain vehicle based on a comparative calculation model that takes into account the propulsion unit's operation on water and the associated limitations when moving on land. The following blades are considered: sickle-shaped, folding sickle-shaped, V-shaped sectional, and bucket-type with windows. Three-dimensional 3D models were developed for all variants, after which they were compared under identical design conditions. The main performance indicators used include estimated speed in still and current water, traction force, hydrodynamic efficiency coefficient, directional stability, resistance on land, impact loads, manufacturability, and reliability. To summarize the results, an integrated versatility index is proposed; its weights, score normalization procedure, and sensitivity to changes in weighting factors are explained. It was found that the bucket design provides the highest traction force, the V-shaped design has the best directional stability, and the sickle-shaped rigid blade is the simplest to manufacture. Within the adopted calculation-and-evaluation model, the folding sickle-shaped blade received the highest integrated score. These findings can be used as a basis for the subsequent design of a prototype.

**Keywords:** high-mobility vehicle, wheeled propulsor, blade, water obstacle, comparative assessment, 3D model

### Введение

Создание транспортно-технологических машин повышенной проходимости, способных эффективно перемещаться как по суше, так и по водной поверхности, остается одной из наиболее сложных задач современной транспортной и робототехнической инженерии. Анализ опубликован-

ных работ показывает, что объединение наземного и водного способов движения в одном движителе позволяет упростить компоновку, однако почти всегда сопровождается противоречием между тяговыми свойствами на суше и гидродинамической эффективностью на воде [1–3]. Особое значение этот вопрос приобретает для машин,

ориентированных на преодоление озер, заболоченных участков, пойменных зон, мелководья и участков с неустойчивой опорной поверхностью.

В известных решениях для обеспечения водоходности применяются гребные винты, водометы, трансформируемые колеса, гибридные колесно-лопастные схемы и комбинированные движители [4–6]. Вместе с тем установка отдельного гребного органа усложняет конструкцию, увеличивает массу, снижает ремонтпригодность и требует дополнительных приводов [7–9]. Поэтому практический интерес представляет путь, при котором одно и то же колесо используется и как наземный движитель, и как источник тяги на воде за счет внешних лопастных или лопастеподобных элементов [10–12].

В рамках предшествующей конструкторской проработки была предложена модульная схема гребенных секций, устанавливаемых на колесо машины повышенной проходимости. Продолжая эту идею, в настоящей статье рассмотрены уже не один, а четыре варианта рабочих лопастных элементов, отличающихся формой, жесткостью и принципом взаимодействия с потоком воды. В отличие от базовой схемы, где основное внимание было сосредоточено на общей конструкции, здесь выполнено расширенное сравнительное сопоставление вариантов с визуализацией, эскизной проработкой и построением индивидуальных графиков по каждому варианту.

**Цель исследования** – обосновать рациональный вариант лопастного элемента специализированного колесного движителя машины повышенной проходимости на основе сравнительной расчетной модели, учитывающей работу движителя на воде и сопутствующие ограничения при движении по суше.

#### Материалы и методы исследования

В качестве базовой геометрии для сравнительного сопоставления принят колесный движитель наружным диаметром 1300 мм. Для всех вариантов сохранены одинаковые габаритные ограничения по рабочему выступанию лопасти, посадочным зонам и шагу размещения секций на ободе. На первом этапе были сформированы четыре варианта рабочих органов: 1) серповидная жесткая лопасть; 2) складная серповидная лопасть; 3) V-образная секционная лопасть; 4) ковшовая лопасть с разгрузочными окнами. Для каждого варианта подготовлены пространственная 3D-визуализация, что позволило сопоставить не только функциональные, но и технологические особенности конструкции.

Сравнение вариантов выполнено в одинаковых режимах частоты вращения колеса: 20, 40, 60, 80 и 100 об/мин. Для водной среды рассматривались два характерных случая: движение по озеру без течения и движение по реке при наличии встречного течения. В качестве первичных показателей принимались расчетная скорость на воде, тяговое усилие и коэффициент гидродинамической эффективности. Дополнительно использовались интегральные конструкторско-эксплуатационные показатели: курсовая устойчивость, сопротивление на суше, ударные нагрузки, технологичность изготовления и надежность.

Поскольку на данной стадии работы выполнялась расчетная, а не натурная программа испытаний, численные значения следует рассматривать как сопоставимую инженерную модель. Ее задача заключается в том, чтобы при одинаковых исходных допущениях показать тенденции изменения показателей и предварительно ранжировать варианты для дальнейшей детализации. Такой подход согласуется с практикой ранних этапов проектирования, когда цифровая модель используется как инструмент выбора конструкции до изготовления опытного образца [13–15].

Для обобщения результатов использован интегральный показатель универсальности  $U$ , учитывающий как работу на воде, так и ограничения при движении по суше:

$$U = 0,25T + 0,15V + 0,15S + 0,15(10 - R) + 0,10(10 - I) + 0,10M + 0,10N, \quad (*)$$

где  $T$  – тяга на воде,  $V$  – скоростной потенциал на воде,  $S$  – курсовая устойчивость,  $R$  – сопротивление на суше,  $I$  – ударные нагрузки,  $M$  – технологичность изготовления,  $N$  – надежность конструкции. Для штрафных показателей  $R$  и  $I$  меньшее значение считалось более предпочтительным, поэтому в формуле они учитывались как  $(10 - R)$  и  $(10 - I)$ .

Весовые коэффициенты в формуле (\*) приняты как экспертные проектные приоритеты ранней стадии разработки. Их сумма равна единице. На показатели, непосредственно определяющие движение на воде, отнесено 0,55 интегрального веса: тяга  $T$  получила наибольший вес 0,25, поскольку именно она определяет способность движителя формировать полезную силу на воде; скорость  $V$  и курсовая устойчивость  $S$  получили по 0,15. Ограничения при движении по суше и ударные воздействия учитываются суммарным весом 0,25, так как они влияют на универсальность движителя, износ и допустимость применения лопастей на твердой опорной поверхности.

**Таблица 1**

Правила нормирования показателей при переводе в шкалу 0–10

Показатель	Правило нормирования	Пояснение
T	$T = \min(10; 10F/F_{оп})$	F – максимальное тяговое усилие; $F_{оп} = 2,40$ кН
V	$V = \min(10; 10(0,6v_{воз} + 0,4v_{ррек})/v_{оп})$	v <sub>воз</sub> и v <sub>ррек</sub> – расчетные скорости на озере и реке; v <sub>оп</sub> = 6,80 км/ч
S	Экспертная оценка 0–10	Учитываются симметрия гребка, боковой срыв, устойчивость курса
R	$R = \min(10; 10R_f/R_{оп})$	Штрафной балл сопротивления на суше; в U входит как (10 – R)
I	$I = \min(10; 10I_f/I_{оп})$	Штрафной балл ударных нагрузок; в U входит как (10 – I)
M	Экспертная оценка 0–10	Учитываются простота формы, число деталей, сборка, ремонт
N	Экспертная оценка 0–10	Учитываются подвижные соединения, загрязнение, концентрация нагрузок, ремонтпригодность

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

**Таблица 2**

Исходные условия расчетно-оценочного эксперимента

Параметр	Значение
Диаметр колеса	1300 мм
Частота вращения, n	20; 40; 60; 80; 100 об/мин
Режим 1	Движение по озеру без течения
Режим 2	Движение по реке при наличии течения
Первичные показатели	Скорость, тяга, гидродинамическая эффективность
Дополнительные показатели	Курсовая устойчивость, сопротивление на суше, ударные нагрузки, технологичность, надежность

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Технологичность M и надежность N включены с весами по 0,10, поскольку на расчетной стадии они не являются основными гидродинамическими показателями, но определяют реализуемость выбранной схемы.

Нормирование частных показателей выполнялось по шкале 0–10 (табл. 1, 2). Для показателей типа «больше – лучше» использовалось отношение расчетного значения к опорному значению данного класса движителей с ограничением сверху 10 баллами. Для штрафных показателей типа «меньше – лучше» сначала определялся штрафной балл по той же шкале, после чего в интегральный показатель включалась величина (10 – R) или (10 – I). Показатели S, M и N являются экспертно-нормированными: S учитывает симметрию взаимодействия с потоком и склонность к боковому срыву; M – число деталей, про-

стоту изготовления и сборки; N – наличие подвижных соединений, чувствительность к загрязнению, концентрацию нагрузок и ремонтпригодность.

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1–8 приведены подготовленные для статьи визуализации и индивидуальные графики по каждому варианту лопасти. В каждом случае 3D-модель используется как средство конструктивного анализа, а графики – как средство сопоставления динамики расчетных показателей при изменении частоты вращения. Ниже рассмотрены особенности каждого варианта.

#### Серповидная лопасть

Серповидная лопасть рассматривается как наиболее простая по конструкции базовая схема. Жесткая рабочая поверхность

обеспечивает достаточно плавный вход в воду и умеренную величину гидродинамического сопротивления. Согласно расчетной модели максимальная скорость движения по озеру для данного варианта составляет 6,1 км/ч, по реке – 4,7 км/ч, а максимальное тяговое усилие достигает 2,02 кН. Коэффициент гидродинамической эффективности достигает пика 63%

при 60 об/мин, после чего наблюдается его снижение, что указывает на рост динамических потерь при увеличении частоты вращения. По интегральной оценке данный вариант получил 7,39 балла и может рассматриваться как рациональное решение в случаях, когда ключевым ограничением являются простота изготовления и ремонтопригодность.

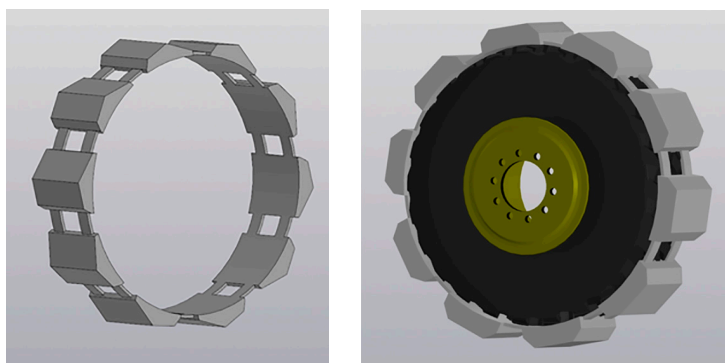


Рис. 1. Серповидная лопасть: 3D-модель

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

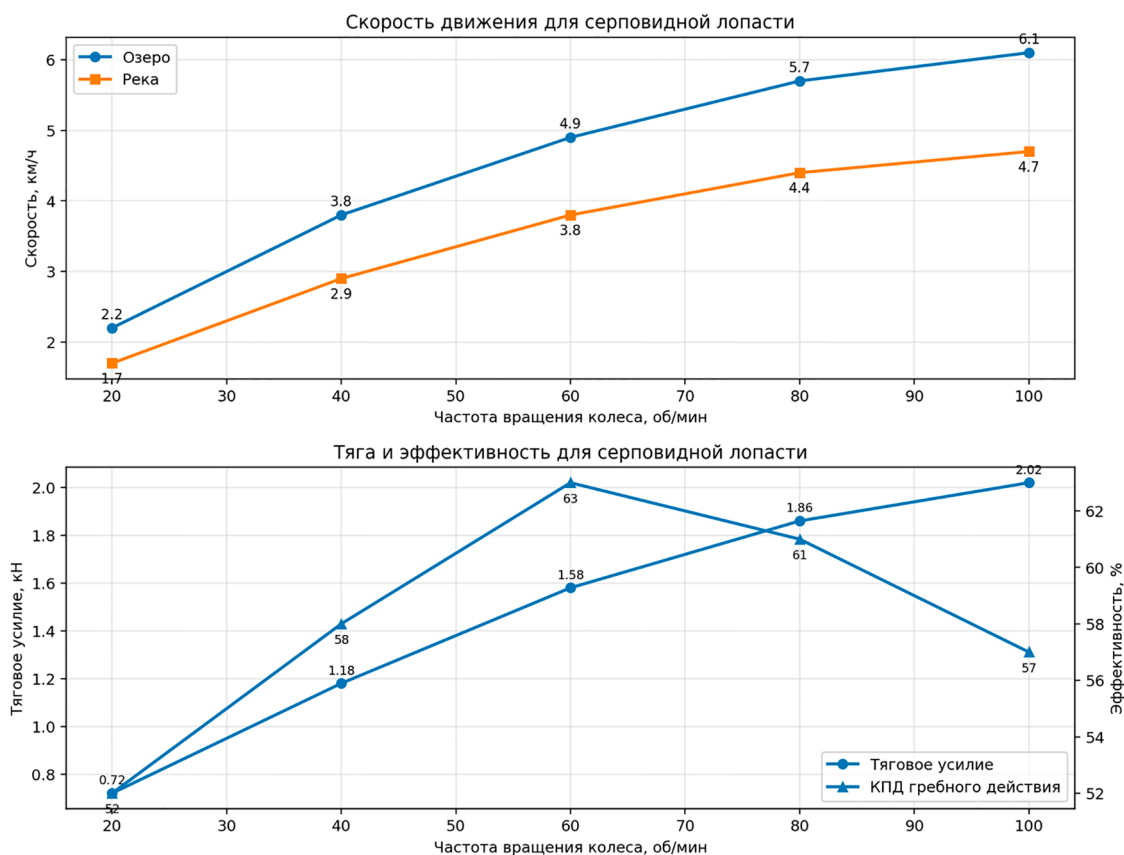


Рис. 2. Индивидуальные расчетные графики для варианта «Серповидная лопасть»

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

*Складная серповидная лопасть*

Складная серповидная лопасть отличается наличием подвижного рабочего элемента, что позволяет уменьшать паразитное сопротивление вне активной фазы гребка. Именно эта схема показала наилучший общий баланс характеристик в рамках принятой расчетно-оценочной модели. Максимальная скорость по озеру составила 6,6 км/ч, по реке – 5,1 км/ч,

максимальное тяговое усилие – 2,18 кН. Наиболее высокий коэффициент эффективности составил 68% при 60 об/мин. Дополнительным преимуществом стала лучшая оценка по критерию универсальности: 7,83 балла. Ограничивающим фактором данной схемы являются повышенные требования к шарнирному соединению, защите от загрязнения и контролю эксплуатационных зазоров.

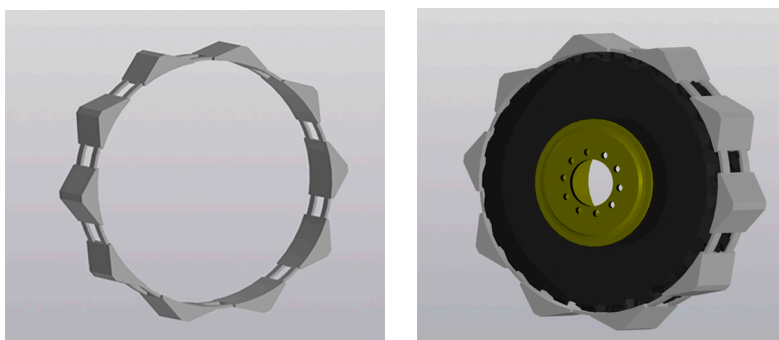


Рис. 3. Складная серповидная лопасть: 3D-модель  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

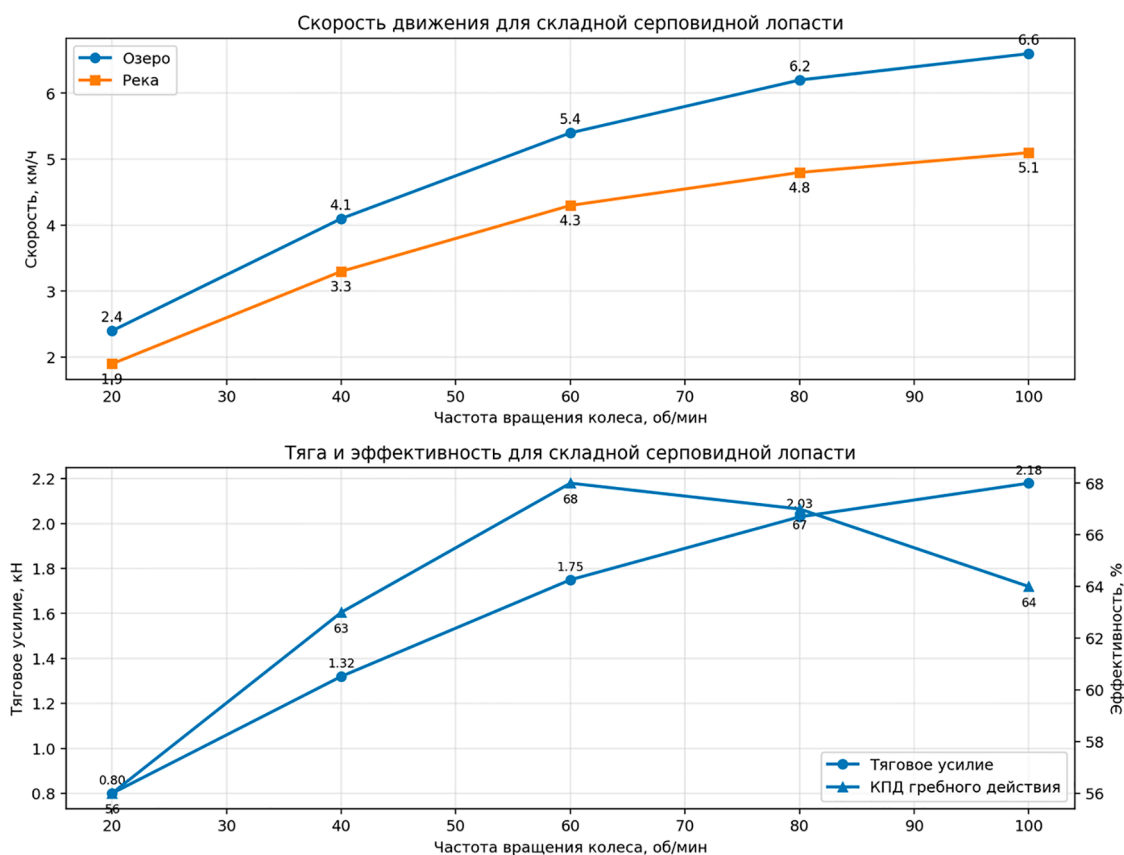


Рис. 4. Индивидуальные расчетные графики для варианта «Складная серповидная лопасть»  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

### *V-образная секционная лопасть*

*V*-образная секционная лопасть образует рабочую поверхность из двух наклонных половин, благодаря чему поток воды направляется более упорядоченно, а боковой срыв уменьшается. По расчетным данным максимальная скорость по озеру достигает 5,5 км/ч, по реке – 4,7 км/ч, тяговое усилие – 1,84 кН. Максимальная эффективность на-

блюдается при 60 об/мин и составляет 60 %. Хотя данный вариант уступает серповидным схемам по абсолютной тяге и скорости на озере, он демонстрирует наиболее высокую курсовую устойчивость и потому является перспективным для машин, для которых важны управляемость и стабильность движения на воде. Интегральный показатель составил 7,38 балла.

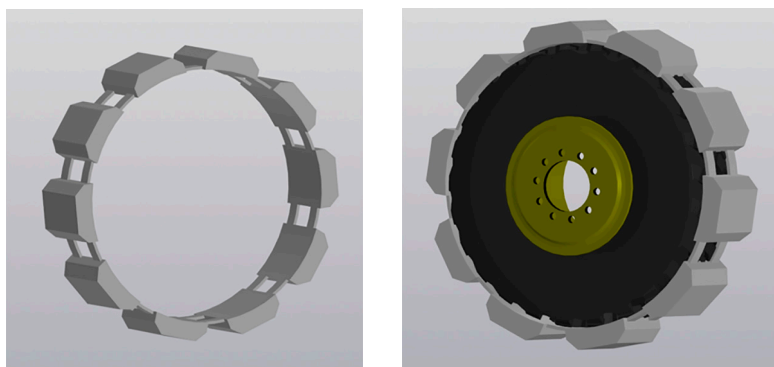


Рис. 5. *V*-образная секционная лопасть: 3D-модель и 2D-эскиз  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

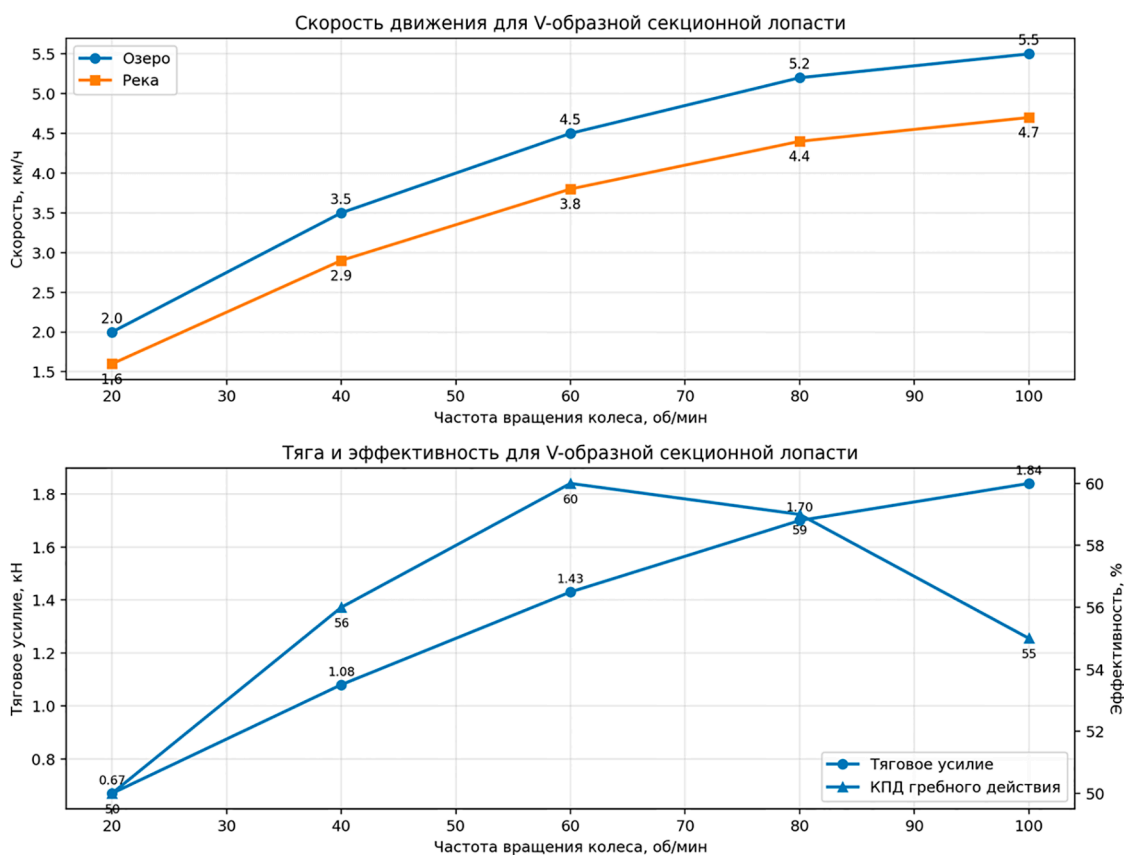
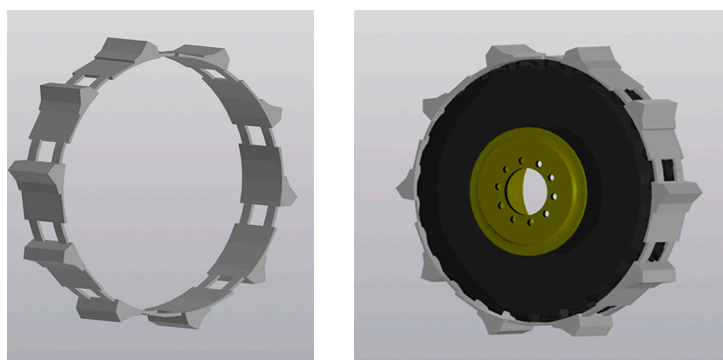


Рис. 6. Индивидуальные расчетные графики для варианта «*V*-образная секционная лопасть»  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

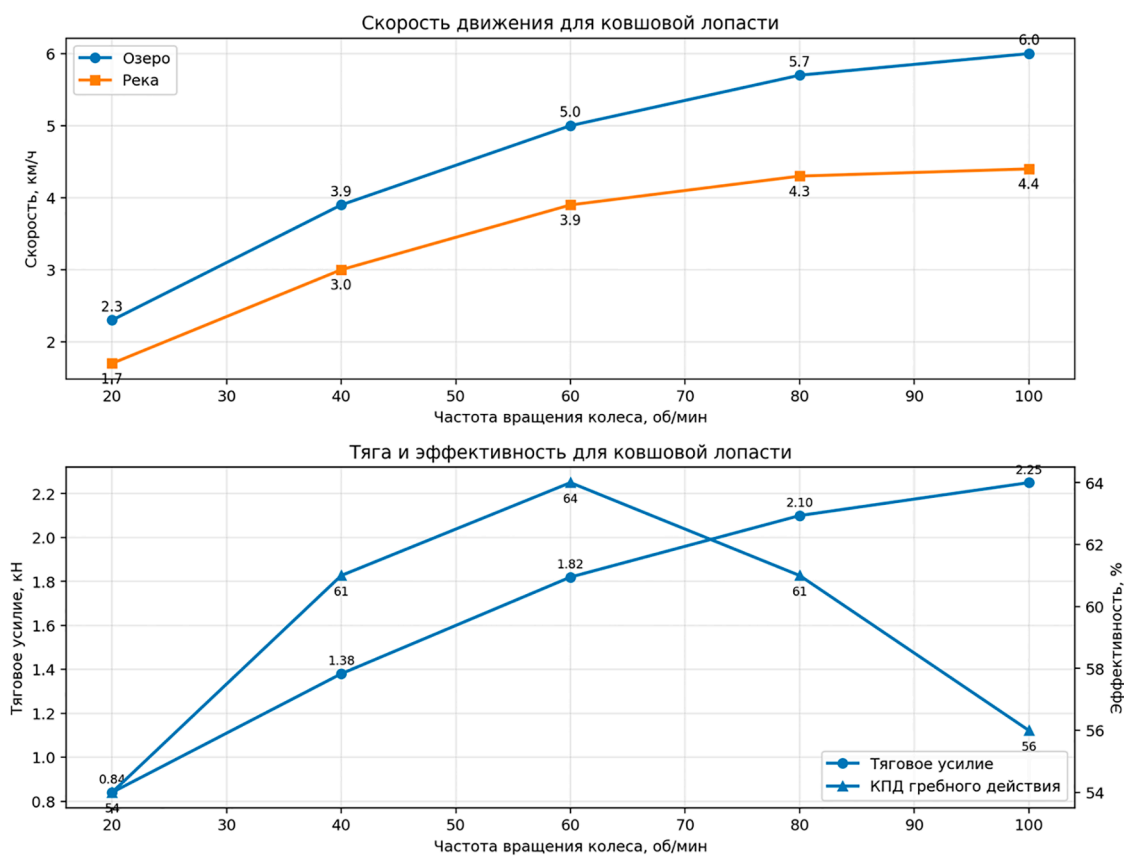
*Ковшовая лопасть с окнами*

Ковшовая лопасть с окнами ориентирована на максимальный захват и отбрасывание водной массы. В результате именно этот вариант показал наибольшее тяговое усилие – 2,25 кН при 100 об/мин. Скорость движения по озеру достигает 6,0 км/ч, по реке – 4,4 км/ч, а максимальная эффективность составляет 64 % при 60 об/мин.

Вместе с тем увеличение рабочей площади вызывает рост сопротивления при движении по суше и повышение ударных нагрузок, что снижает интегральный показатель до 6,95 балла. Такой вариант целесообразен в ситуациях, когда приоритетом является именно тяга на воде, а требования к движению по твердому покрытию являются вторичными.



*Рис. 7. Ковшовая лопасть с окнами: 3D-модель и 2D-эскиз  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования*



*Рис. 8. Индивидуальные расчетные графики для варианта «Ковшовая лопасть с окнами»  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования*

### Сводное сравнение вариантов

Для завершающего сопоставления вариантов использованы интегральные оценки и частные балльные показатели, приведенные в табл. 3. Из данных видно, что лидерство конкретного варианта определяется выбранным критерием: ковшовая схема обеспечивает максимум тяги, V-образная – лучшую устойчивость, серповидная жесткая – наибольшую технологичность среди жестких лопастей, а складная серповидная – наилучшее сочетание скоростных, тяговых и эксплуатационных свойств.

Анализ чувствительности (табл. 4) показывает, что при изменении проектных приоритетов складная серповидная лопасть сохраняет первое место. Следовательно, вывод о ее наибольшем интегральном балле не является следствием единственного случайно выбранного набора весовых коэффициентов. Наибольшая чувствительность наблюдается у ковшовой схемы: при повышении веса тягово-скоростных характеристик ее оценка возрастает, а при усилении штрафов за сопротивление на суше и ударные нагрузки – снижается (рис. 9).

**Таблица 3**

Сравнительная оценка вариантов лопастей по основным критериям

Вариант	T	V	S	R	I	M	N	U
Серповидная	8,4	8,1	7,6	4,8	4,2	7,5	8,2	7,39
Складная серповидная	9,1	8,8	8,4	3,2	2,8	5,8	6,5	7,83
V-образная секционная	7,7	7,6	9,1	4,0	3,9	6,6	7,8	7,38
Ковшовая с окнами	9,4	7,9	7,0	6,4	6,1	7,0	7,3	6,95

Примечание: R и I являются штрафными показателями; чем ниже их балл, тем лучше. Значения U рассчитаны по формуле (\*) с учетом показателя N.

Составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

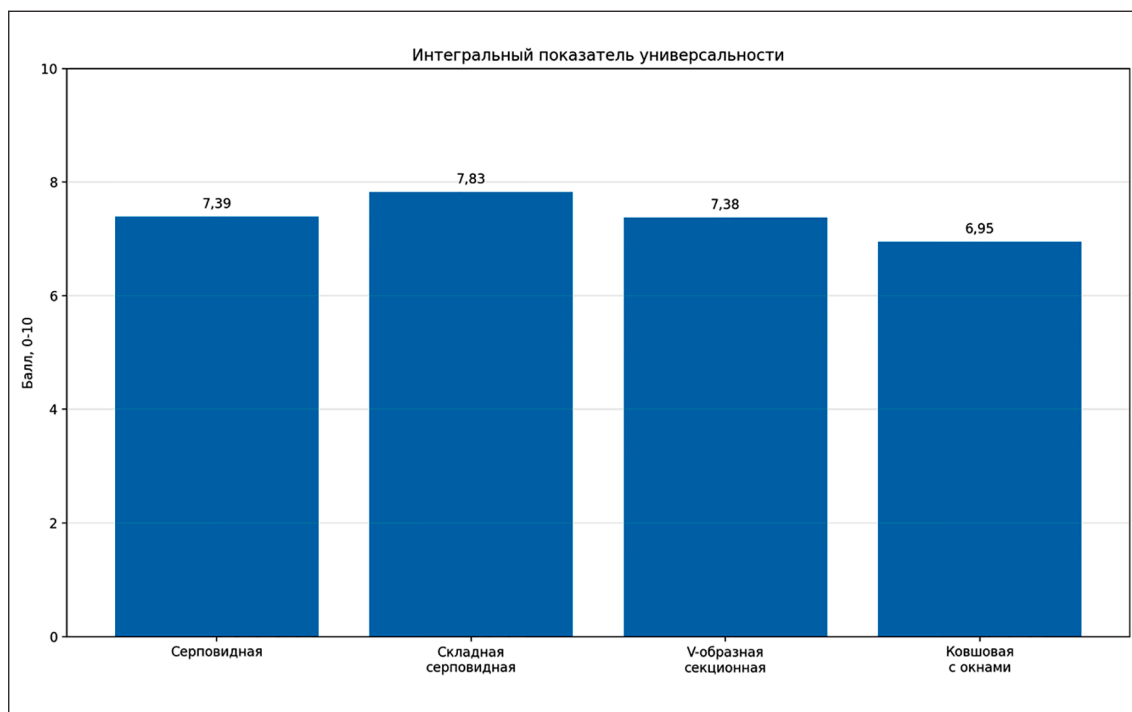


Рис. 9. Интегральный показатель универсальности по вариантам лопастей после уточнения нормирования и показателя надежности N

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Таблица 4

Анализ чувствительности интегрального показателя U к изменению весовых коэффициентов

Параметр	Серповидная	Складная серповидная	V-образная секционная	Ковшовая с окнами
Базовый вариант	7,39	7,83	7,38	6,95
Приоритет воды	7,54	8,01	7,50	7,24
Приоритет суши и ударных нагрузок	7,16	7,67	7,24	6,54
Приоритет надежности и технологичности	7,42	7,65	7,36	6,94

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

### Результаты исследования и их обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что для специализированного колесного двигателя не существует единственной формы лопасти, одинаково оптимальной по всем критериям. Увеличение активной площади, как правило, приводит к росту тягового усилия на воде, однако одновременно вызывает увеличение сопротивления на суше и рост ударных нагрузок. Именно поэтому ковшовая схема, лидируя по тяге, уступает складной серповидной лопасти по интегральному показателю. Аналогичная логика прослеживается и для V-образной схемы: выигрыш по устойчивости достигается ценой некоторого снижения скорости и тяги.

В рамках принятой расчетно-оценочной модели наибольший интегральный балл получила складная серповидная лопасть. Она сочетает высокую тягу, наилучшую скорость в обоих водных режимах и приемлемые значения штрафных показателей на суше. При этом жесткая серповидная лопасть может быть рекомендована в качестве упрощенной и более технологичной альтернативы, если проект ставит во главу угла ремонтпригодность, низкую стоимость и минимальную сложность изготовления. V-образная схема целесообразна в конструкциях, где критична устойчивость курса, например при работе на течении, а ковшовая – в машинах, для которых кратковременное увеличение тяги важнее универсальности.

Следует подчеркнуть, что представленные зависимости получены в рамках единой расчетно-оценочной модели. Они не заменяют полноценных натурных испытаний, а выступают как предварительный инструмент ранжирования конструкций. Тем не менее такой подход позволяет еще на стадии проектирования определить приоритетный путь дальнейшей детализации, сократить

количество заведомо неэффективных решений и обосновать выбор варианта для изготовления опытного образца.

### Валидация расчетной модели и сопоставление с данными литературы

Поскольку в настоящей работе исследование выполнено на расчетно-оценочном уровне, валидация результатов проведена путем сопоставления выявленных тенденций с опубликованными данными по аналогичным колесно-лопастным и трансформируемым двигателям амфибийного типа (табл. 5). Прямое сравнение абсолютных значений скорости и тягового усилия является ограниченным, так как в литературных источниках рассматриваются конструкции другого масштаба, массы, диаметра двигателя, числа лопастей, частоты вращения и условий испытаний. Поэтому валидация выполнялась не по полному совпадению численных значений, а по проверке инженерных тенденций: влияния формы лопасти на тягу, сопротивление, устойчивость движения и универсальность применения в режимах «суша – вода».

В работе С. Kim и соавт. исследован колесно-лопастной двигатель типа angled spoke paddling wheel с самоповорачивающимися лопастями. Экспериментальная оптимизация показала, что геометрия и угол установки лопасти существенно влияют на тяговое усилие при движении на воде. Это подтверждает корректность принятого в настоящей статье подхода, при котором форма рабочего элемента рассматривается как один из основных факторов, определяющих тяговые свойства двигателя.

Полученные результаты также согласуются с работами X. Xie и соавт., Z. Wang и соавт., Y. Ge, F. Gao и W. Chen, где рассматриваются трансформируемые колесные, wheel-spoke-paddle и мультимодальные схемы амфибийных двигателей.

Сопоставление результатов расчетной модели с данными литературы по аналогичным колесно-лопастным схемам

Источник	Основные выводы	Соответствие исследованию
Kim et al.	Форма, угол установки и режим вращения лопасти заметно влияют на создаваемую тягу колесно-лопастного движителя	Подтверждает необходимость сравнения нескольких геометрических вариантов лопастей по тяге, скорости и эффективности
Xie et al.	Трансформируемое колесо амфибийного вездехода должно работать в разных состояниях в зависимости от условий движения	Согласуется с использованием интегрального критерия U, объединяющего водные показатели и ограничения движения по суше
Wang et al.	Мультимодальное трансформируемое колесо рассматривается как способ совмещения наземного и водного режимов без отдельного гребного органа	Подтверждает актуальность специализированных лопастных элементов, устанавливаемых на колесный движитель
Ge et al.	Wheel-spoke-paddle схема обеспечивает движение по суше, воде и переходным участкам, но требует компромисса между режимами	Соответствует выводу о преимуществе складной серповидной лопасти как компромиссного варианта по критерию «суша – вода»
Guan et al.	Интегрированные wheel-leg-paddle конструкции применяются для амфибийных роботов и подтверждают перспективность объединенных движителей	Подтверждает общий выбор направления исследования, связанного с совмещением колесного и лопастного принципов движения

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

В этих исследованиях подчеркивается, что универсальный движитель должен обеспечивать приемлемое движение не только в воде, но и на суше, поэтому повышение водной тяги не может рассматриваться отдельно от сопротивления, ударных нагрузок, надежности и технологичности конструкции.

Сопоставление показывает, что выявленные в расчетно-оценочной модели зависимости имеют инженерное подтверждение в опубликованных работах. Увеличение активной площади лопасти действительно способствует росту тяги на воде, однако одновременно может увеличивать сопротивление и ударные нагрузки при движении по суше. Трансформируемые и складные схемы позволяют уменьшить данное противоречие, что объясняет получение наибольшего интегрального балла складной серповидной лопастью в рамках принятой расчетно-оценочной модели.

Вместе с тем выполненная валидация является предварительной. Для окончательного подтверждения расчетных результатов необходимы CFD-моделирование обтекания лопастей, стендовые испытания колесного движителя в водной среде и последующая проверка опытного образца при движении по озеру и по реке при наличии течения.

### Список литературы

- Baines R., Fish F. E., Kramer-Bottiglio R. Amphibious Robotic Propulsive Mechanisms: Current Technologies and Open Challenges // *Bioinspired Sensing, Actuation, and Control in Underwater Soft Robotic Systems*. 2021. P. 41–69. DOI: 10.1007/978-3-030-50476-2\_3.
- Xie X., Gao F., Huang C., Zeng W. Design and development of a new transformable wheel used in amphibious all-terrain vehicles (A-ATV) // *Journal of Terramechanics*. 2017. Vol. 69. P. 45–61. DOI: 10.1016/j.terra.2016.11.001.
- Kim C., Han S., Won J., Seo T. Empirical optimization of an angled spoke paddling wheel with self-rotating mechanism // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Art. 20511. DOI: 10.1038/s41598-022-25181-7.
- Zhou F., Xu X., Xu H., Chang Y., Wang Q., Chen J. Implementation of a Reconfigurable Robot to Achieve Multimodal Locomotion Based on Three Rules of Configuration // *Robotica*. 2020. Vol. 38. Is. 8. P. 1478–1494. DOI: 10.1017/S0263574719001589.
- Liu B., Xu X., Pan D. Influence of resistance due to locomotion mechanism configurations of a new high-speed amphibious vehicle (HSAV-II) // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 283. Art. 115175. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115175.
- Pan D., Xu X., Liu B., Xu H., Wang X. A review on drag reduction technology: Focusing on amphibious vehicles // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 280. Art. 114618. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114618.
- Xu X., Liu B., Pan D., Xu H. Influence of towing position on hydrodynamic characteristics of an Amphibious Tractor // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 272. Art. 113932. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113932.
- Yan Z., Li M., Du Z., Yang X., Luo Y., Chen X., Han B. Study on a tracked amphibious robot bionic fairing for drag re-

duction // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 267. Art. 113223. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113223.

9. Md-Tahir H., Zhang J., Zhou Y., Sultan M., Ahmad F., Du J., Ullah A., Hussain Z., Xia J. Engineering Design, Kinematic and Dynamic Analysis of High Lugs Rigid Driving Wheel, a Traction Device for Conventional Agricultural Wheeled Tractors // *Agriculture*. 2023. Vol. 13. Is. 2. Art. 493. DOI: 10.3390/agriculture13020493.

10. Wang Z., Luo B., Cui W., Li W. Design of multimodal transformable wheels for amphibious robotic vehicles // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2024. Vol. 379. Art. 115952. DOI: 10.1016/j.sna.2024.115952.

11. Ge Y., Gao F., Chen W. A transformable wheel-spoke-paddle hybrid amphibious robot // *Robotica*. 2024. Vol. 42. P. 701–727. DOI: 10.1017/S0263574723001716.

12. Policarpo H., Lourenco J. P. B., Anastacio A. M., Parente R., Rego F., Silvestre D., Afonso F., Maia N. M. M.

Conceptual Design of an Unmanned Electrical Amphibious Vehicle for Ocean and Land Surveillance // *World Electric Vehicle Journal*. 2024. Vol. 15. Is. 7. Art. 279. DOI: 10.3390/wevj15070279.

13. Xia D., Yan H., Shi Y., Wu J., Luo X. Development of a novel amphibious robot with a reusable cycloidal propulsion module // *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 312. Part 1. Art. 119129. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119129.

14. Xia M., Zhu Q., Yin Q., Lu Z., Zhu Y., Luo Z. Hydrodynamic Simulation and Experiment of a Self-Adaptive Amphibious Robot Driven by Tracks and Bionic Fins // *Biomimetics*. 2024. Vol. 9. Is. 10. Art. 580. DOI: 10.3390/biomimetics9100580.

15. Guan M., Zhang L., Cui B., Wang L. Design and Implementation of wheel-leg-paddle Integrated structure amphibious robot // *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Art. 710. DOI: 10.1038/s41598-025-30238-4.

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The author declares that there is no conflict of interest.

**Финансирование:** Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

**Financing:** The research was performed without external funding.