

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ ПОДВИЖНОСТИ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА

Л.Н. Мазунова

ORCID: 0009-0003-3262-8348 e-mail: matematixx@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрена методика оценки комплексного свойства подвижности наземных транспортно-технологических средств, учитывающая многокритериальность данного понятия и его зависимость от совокупности конструктивных, режимных и эксплуатационных параметров. Интегральный показатель подвижности вычисляется на основе аддитивной свертки взвешенных нормированных групповых критериев. Разработана методика, позволяющая получить единый численный интегральный показатель подвижности Наземных транспортно-технологических средств и комплексов и оценить степень влияния частных критериев на его величину. Предложенный подход обеспечивает возможность анализа влияния отдельных конструктивных параметров на итоговый уровень подвижности машины на этапе проектирования. Проведена апробация методики на примере колесного снегоболотохода «Байкал» ЗТМ 30081-11, в результате которой определены направления его модернизации, обеспечивающие повышение качества. Предлагаемый инструментарий может быть использован в системах автоматизированного проектирования для управления качеством выпускаемой продукции.

Ключевые слова: подвижность по мобильности; интегральный показатель подвижности; оценка качества ТТМ; колесный снегоболотоход.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мазунова, Л.Н. Разработка методики оценки и повышения подвижности наземных транспортно-технологических средств на основе многокритериальной оценки качества // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 100-116. EDN LWSVGO

DEVELOPMENT OF TECHNIQUE FOR ASSESSING AND IMPROVING THE MOBILITY OF LAND TECHNOLOGICAL VEHICLES BASED ON MULTICRITERIAL QUALITY ASSESSMENT

L.N. Mazunova

ORCID: 0009-0003-3262-8348 e-mail: matematixx@mail.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses a methodology for assessing the complex property of mobility of land technological vehicles, which takes into account the multi-criteria of this concept and its dependence on a set of constructive, operational, and performance parameters. The integral mobility indicator is calculated based on the additive convolution of weighted normed group criteria. The developed methodology allows obtaining a single numerical integral mobility indicator for land technological vehicles and assessing the degree of influence of individual criteria on the value of this indicator. This approach provides an opportunity to analyze the impact of individual design parameters on the overall mobility level of the machine during the design phase. The methodology was tested on the example of the Baikal ZTM 30081-11 wheeled snow and swamp-going vehicle, which resulted in the identification of areas for its modernization to improve its quality. The proposed toolkit can be used in automated design systems to manage the product quality.

Key words mobility by mobility; mobility indicator; vehicle quality assessment; wheeled snow and swamp-going vehicles.

FOR CITATION: Mazunova L.N. Development of technique for assessing and improving the mobility of land technological vehicles based on multicriterial quality assessment. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 100-116. EDN LWSVGO

Актуальность проблемы научной оценки подвижности наземных транспортно-технологических средств и комплексов (НТТСиК) обусловлена комплексом технологических, экономических и рыночных вызовов. Это не узкоинженерная задача, а стратегический фактор конкурентоспособности как производителей, так и конечных эксплуатантов спецтехники. Существует несколько ключевых аспектов, раскрывающих значимость проблемы.

Современные транспортно-технологические машины (ТТМ) – сложные киберфизические системы, где механика, гидравлика, электроника и системы управления тесно взаимосвязаны. Изменение одного параметра (например, установка гибридной силовой установки) комплексно влияет на массу, развесовку, динамику и, следовательно, на подвижность. Интуитивный или ускорасчетный подход не способен предсказать поведение такой сложной системы в условиях неопределенности (бездорожье, экстремальные температуры). Требуется цифровой двойник подвижности, позволяющий проводить виртуальные испытания на этапе эскизного проекта. В этом заключается технологический императив задачи.

Основные затраты на создание новой техники закладываются на этапе проектирования. Ошибки, обнаруженные на стадии испытаний или эксплуатации, ведут к колоссальным убыткам. Они складываются из прямых и косвенных издержек: доработка конструкции, переделка оснастки, повторные испытания; упущенная выгода из-за срыва сроков выхода на рынок, репутационные потери. Научно обоснованная оценка подвижности минимизирует затраты, переводя поиск оптимальных решений в цифровую среду, где цена ошибки на порядки ниже. Универсальная методика оценки подвижности НТТСиК становится инструментом технико-коммерческого диалога, позволяя формулировать техническое задание на языке объективных критериев и предоставлять заказчику не просто паспортные данные, а сертификат пригодности под его конкретные сценарии. Проектирование ТТМ высокой проходимости традиционно опиралось на уникальный опыт инженеров-ветеранов. Неформализованный характер этого опыта создает риски для отрасли. Создание научной методики – это формализация и оцифровка экспертного знания, создание «цифрового наставника» для нового поколения конструкторов, что обеспечивает преемственность и накопление знаний на уровне предприятия и отрасли.

Таким образом, актуальность проблемы выходит далеко за рамки инженерной оптимизации. Это ключевое условие для повышения технологического суверенитета в области специального машиностроения; резкого сокращения затрат и сроков создания новой конкурентоспособной техники; перехода от продажи «железа» к продаже «гарантированных транспортно-технологических возможностей». Разработка и внедрение универсальной, математически строгой методики оценки и прогнозирования подвижности НТТСиК – это необходимый шаг для перехода отечественного машиностроения на новый уровень системной инженерии, где качество и эффективность закладываются цифровыми инструментами на самой ранней стадии жизненного цикла изделия.

Проведено исследование работ, посвященных оценке качества сложных технических изделий [1]. В 1970-х гг. были разработаны отраслевые инструкции для оценки легковых автомобилей, которые в дальнейшем легли в основу работ таких ученых, как М.А. Григорьев, В.А. Долецкий, Х.А. Фасхиев и др., занимавшихся вопросами качества и конкурентоспособности автотранспорта. Для оценки качества технических объектов также применяется коэффициент желательности, вычисляемый с помощью функции Харрингтона. Ключевой проблемой при построении интегральных показателей остается определение объективных весовых коэффициентов. Широко используемый метод анализа иерархий Т. Саати, хотя и является надежным, но не позволяет полностью исключить субъективность. В качестве альтернативы В.М. Постников и С.Б. Спиридонов предложили подходы, основанные на арифметической и геометрической прогрессиях, позволяющие рассчитывать весовые соотношения критериев с помощью простых аналитических выражений. Оценочные показатели, основанные на эффективности, применялись в работах Н.Ф. Бабкова, Я.И. Бронштейна, Г.Б. Безбородова, М.Г. Беккера, В.И. Гребенщикова, В.Ф. Платонова, Дж. Вонга, Ю. Мацкерле и др. Д.В. Зезю-

лин исследовал проходимость машин в зимних условиях, тесно связывая ее с понятием эффективности их движения [2]. Изучением конкурентоспособности и подвижности НТТСиК занимались ученые, чьи подходы можно разделить на две группы. Представители первого подхода связывают подвижность с конкретными техническими параметрами (Е.Е. Баженов, И.О. Донато, В.Н. Наумов, Е.Б. Сарач, Н.В. Чернышев). Вторая группа исследователей дает более комплексную, эксплуатационную интерпретацию этого понятия (В.И. Котляренко, В.В. Ларин, В. А. Горелов) [3]. При решении задач, посвященных оценке качества ТТМ и ТТК, В.В. Беляковым в соавторстве с М.Е. Бушуевой, У.Ш. Вахидовым, К.О. Гончаровым, Д.В. Зезюлиным, В.Е. Колотилиным, Г.О. Котиевым, В.С. Макаровым, В.Н. Наумовым и др. предлагается обоснованное применение понятия подвижности как интегрального эксплуатационного свойства НТТСиК; предложена система критериев, которая позволяет получить численное значение интегрального показателя подвижности на основе методов многокритериальной оптимизации; составлена концептуальная схема иерархии задач управления транспортно-технологических машин [4-5]. Для практических задач проектирования, оценки и выбора техники наиболее продуктивен системный подход, представленный школой В.В. Белякова, позволяющий преобразовать понятие «подвижность» из качественной категории в количественную, представив ее как измеримый показатель, лежащий в основе оценки качества НТТСиК [6-7].

Современные методы оценки качества автотракторной техники все еще обладают рядом существенных недостатков, которые ограничивают их практическую полезность и эффективность. Основная проблема заключается в их фрагментарности и отсутствии системного подхода. Техника часто оценивается по ограниченному набору изолированных параметров. Такой метод не позволяет получить целостное представление о качестве, так как игнорирует взаимосвязь и взаимовлияние различных характеристик, а также слабо адаптируется к реальным, меняющимся условиям эксплуатации – типу грунта, рельефу, сезону и конкретной технологической задаче. Ключевым методологическим изъяном является высокая степень субъективности, особенно на этапе определения важности разных критериев при свертке. В результате оценка качества часто остается сложным теоретическим аппаратом, который не доведен до уровня простых и практичных решений для инженеров, проектировщиков и экспертов. Преодоление этих недостатков видится в развитии комплексных, адаптивных методик, основанных на принципах системного анализа и многокритериальной оптимизации. Подход, при котором разрозненные параметры сворачиваются в обобщенный показатель, ориентированный на итоговую эффективность или конкурентоспособность в заданных условиях, позволяет преобразовать абстрактное понятие «качества» в конкретный, измеримый инструмент для принятия научно обоснованных инженерных и коммерческих решений.

Подвижность – одно из важнейших свойств, характеризующих ТТС. В работах профессора В.В. Белякова термин «подвижность» определяется как множество свойств, сведенных в единое интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин [8-11]. В настоящем исследовании решается задача технического характера, поэтому с точки зрения подвижности малозначимыми являются экономические, экологические, эргономические, эстетические показатели и показатели безопасности. Следовательно, показатель подвижности автотракторной техники стоит на более высокой ступени иерархической лестницы, описывающей свойства НТТСиК. Таким образом, разработку методики интегральной оценки качества ТТМ фактически можно свести к методике оценки их подвижности.

Согласно концепции, т.е. трактовке подвижности автотракторной техники, иерархия оценочных свойств может содержать три уровня оценочных критериев (рис. 1), нижний из которых вычисляется на основании эксплуатационных, конструкционных, режимных измерителей (q_e , q_k , q_p) машины. Таким образом, с помощью декомпозиции интегрального свойства на групповые и эмпирические критерии оценочный показатель представлен в виде упорядоченного графа. Создана единая иерархическая структура свойств, характеристик показателей и параметров, которая позволяет разработать многокритериальную систему оценки качества транспортно-технологических средств и комплексов в смысле их подвижности.



Рис. 1. Иерархическая структура интегрального показателя подвижности F

Fig. 1. Hierarchical structure of integral index of mobility F

Поскольку структура интегрального показателя подвижности содержит два уровня (групповые и эмпирические, или частные, критерии), параметры конструкции наземного транспортно-технологического комплекса образуют двумерный массив эмпирических показателей $\{Q_{ij}\}$, где i – номер группы, j – порядковый номер частного критерия в группе. После объединения частных критериев в групповые $\{Q_i\}$ проводится их нормировка $\{\tilde{Q}_i\}$, т.е. приведение к шкале $[0, 1]$. Критерии подвижности и формирование групповых критериев в интегральный показатель подвижности подробно описаны на предыдущих этапах исследования [12]. В данной работе для каждой единицы вездеходной техники были рассмотрены 23 измерителя, 20 эмпирических и 7 групповых критериев (табл. 1).

В качестве способа объединения частных критериев при вычислении интегрального показателя подвижности применялась взвешенная аддитивная свертка, где w_i – весовые коэффициенты групповых критериев. Она подразумевает под собой построение скалярной функции F , являющейся обобщенным критерием подвижности

$$F = \sum_{i=1}^I w_i \cdot \tilde{Q}_i$$

В соответствии с классификацией ТТМ по назначению (рис. 2) назначаются весовые коэффициенты групповых параметров. Получение весовых коэффициентов методом анализа иерархий и на основе формул арифметической прогрессии дают схожие результаты (рис. 3). В рамках настоящего исследования рассматривается случай эксплуатации вездеходных колесных машин в режимах перевозок людей и грузов. Методика вычисления интегрального показателя подвижности допускает пополнение системы классификации режимов работы, а также дополнение структуры интегрального показателя вербальными (неколичественными) показателями [13-14].

Таблица 1.
Соответствие между измерителями и критериями подвижности

Table 1.
Correlation between mobility meters and criteria

Измеритель		Критерий		Направление оптимизации частного критерия
q ₁	Рабочий объем, л	Q ₁₁	Рабочий объем, л	max
q ₂	Мощность, л.с	Q ₁₂	Мощность, л.с	max
q ₃	Максимальный момент, Н·м	Q ₁₃	Максимальный момент, Н·м	max
q ₄	Максимальная скорость движения на дороге, км/ч	Q ₁₄	Максимальная скорость движения по шоссе, км/ч	max
q ₅	Максимальная скорость движения на плаву, км/ч	Q ₁₅	Максимальная скорость движения на плаву, км/ч	max
		$Q_{16}=(q_{15}+q_{16})\cdot g\cdot q_{22}$	Тяговая сила, Н	max
		$Q_{17}=(q_{15}+q_{16})\cdot g\cdot q_{23}$	Сила сопротивления движению, Н	min
q ₆	Колея, мм	Q ₂₁	Колея, мм	max
q ₇	Дорожный просвет, мм	Q ₂₂	Дорожный просвет, мм	max
q ₈	База, мм	Q ₂₃	База, мм	min
q ₉	Угол подъема (с полной нагрузкой), град	Q ₂₄	Угол подъема (с полной нагрузкой), град	max
q ₁₀	Количество колес, шт	Q ₂₅	Количество колес, шт	max
q ₁₁	Давление воздуха в шине, атм	Q ₃₁	Давление воздуха в шине, атм	min
		$Q_{32}=\frac{(q_{15}+q_{16})\cdot 100}{\frac{1}{3}\cdot q_{10}\cdot q_{19}\cdot q_{20}}$	Давление движителя на грунт, кг/см ²	min
q ₁₂	Глубина преодолеваемого брода, м	Q ₄₁	Глубина преодолеваемого брода, м	max
		$Q_{51}=\sqrt{q_{17}^2 + q_{18}^2}$	Диагональ машины, мм	min
q ₁₃	Минимальный радиус поворота (по колее наружного переднего колеса), м	Q ₆₁	Минимальный радиус поворота (по колее наружного переднего колеса), м	min
		$Q_{62}= q_8/ q_6$	Соотношение колеи и колесной базы	min
q ₁₄	Боковой крен (без нагрузки), град	Q ₇₁	Боковой крен (без нагрузки), град	max
q ₁₅	Снаряженная масса без груза, кг			
q ₁₆	Грузоподъемность, кг			
q ₁₇	Длина машины, мм			
q ₁₈	Ширина машины, мм			
q ₁₉	Наружный диаметр шины, мм			
q ₂₀	Ширина профиля шины, мм			
q ₂₁	Высота машины, мм	Q ₇₂	Высота машины, мм	min
q ₂₂	Обобщенная функция сцепления движителя с поверхностью движения, Φ_{ϕ}			
q ₂₃	Обобщенная функция сопротивления движению, Φ_f			

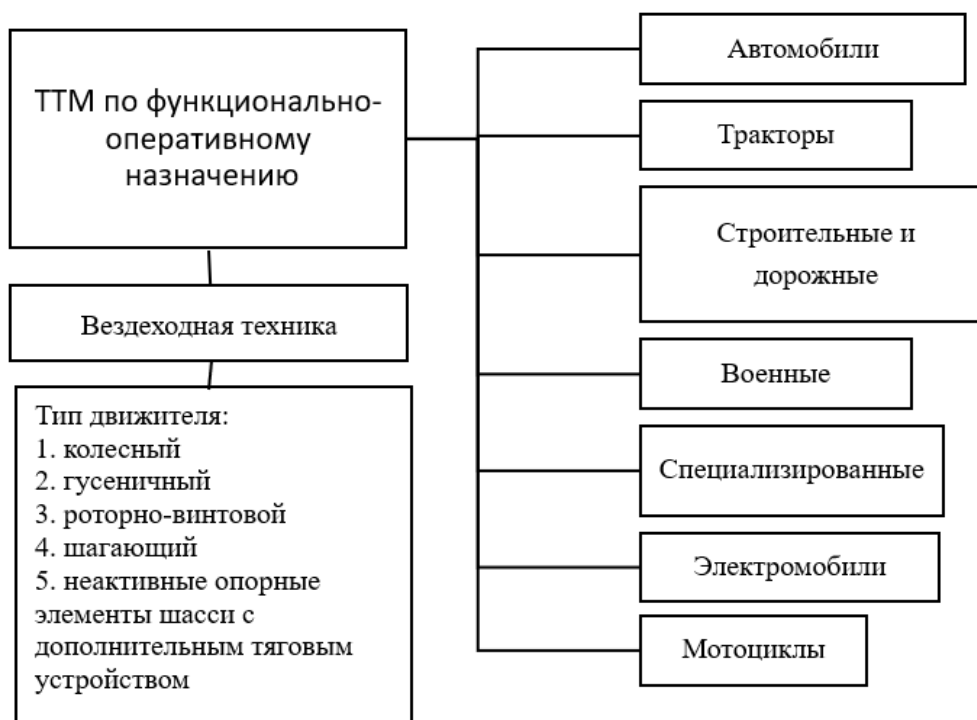


Рис. 2. Классификация ТТМ по функционально-оперативному назначению

Fig. 2. Classification of TTM by functional and operational purpose



Рис. 3. Весовые коэффициенты групповых критериев для оценки подвижности вездеходной техники

Fig. 3. Weight coefficients of group criteria for assessing the mobility of all-terrain vehicles

В среде *Matlab Simulink* построен и реализован алгоритм, позволяющий вычислить интегральный показатель подвижности, объединяющий частные и групповые критерии с учетом весомости их вклада. Полученные значения интегрального показателя можно интерпретировать по представленной шкале (табл. 2).

Таблица 2.

Шкала для интерпретации величины интегрального показателя подвижности

Table 2.

Scale for interpreting the value of the integral mobility index

Значение интегрального показателя подвижности	Пригодность ТММ для выполнения поставленной задачи
0,80 – 1,00	Образец отлично адаптирован к условиям
0,60 – 0,79	Хорошая пригодность
0,40 – 0,59	Удовлетворительная пригодность
0,20 – 0,39	Слабая пригодность, требует модернизации
0,00 – 0,19	Непригоден для данных условий

На базе алгоритма построены экспресс-методика (рис. 4), которая позволяют сравнивать между собой несколько образцов автотракторной техники с учетом их назначения и условий эксплуатации, выстраивать их в ранжированный ряд. Исходными данными для экспресс-оценки являются условия эксплуатации, режим работы и характеристики машины ($q_b = \text{const}$, $q_p = \text{const}$, $q_k = \text{var}$).

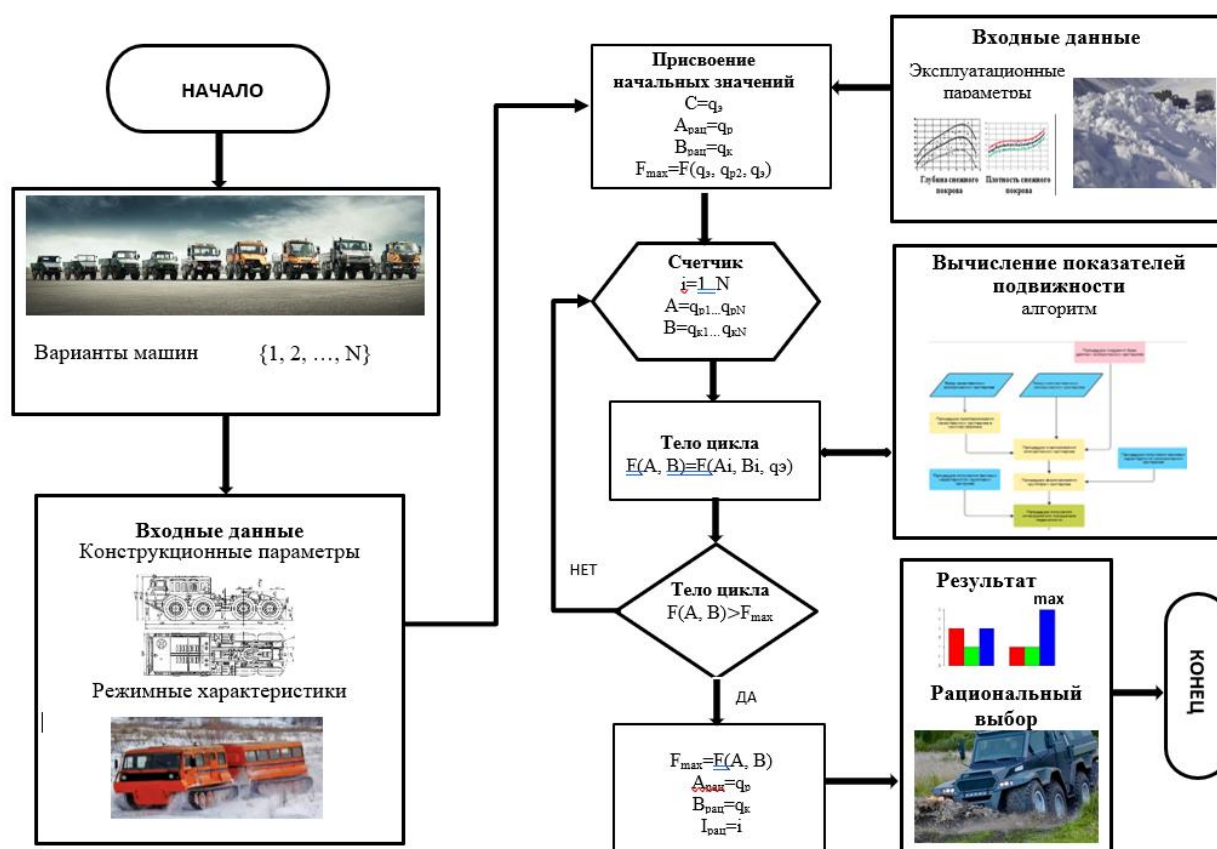


Рис. 4. Экспресс-методика оценки ТММ для выполнения поставленной задачи

Fig. 4. Express method to assess TMM ability to achieve the task

В соответствии с представленной выше шкалой и на основании вычисленных интегральных показателей подвижности снегоболотоходов при движении по твердой поверхности (рис. 5), можно сделать следующие выводы [15]. Рассматриваемая совокупность ТММ имеет интегральный показатель более 0,4, что свидетельствует об удовлетворительной подвижности в заданных условиях движения. Хорошей пригодностью для выполнения поставленной задачи среди представленных вездеходов обладают «Шерп Макс», «Атон Импульс Викинг-2992» и «Шаман», их интегральный показатель больше 0,6.

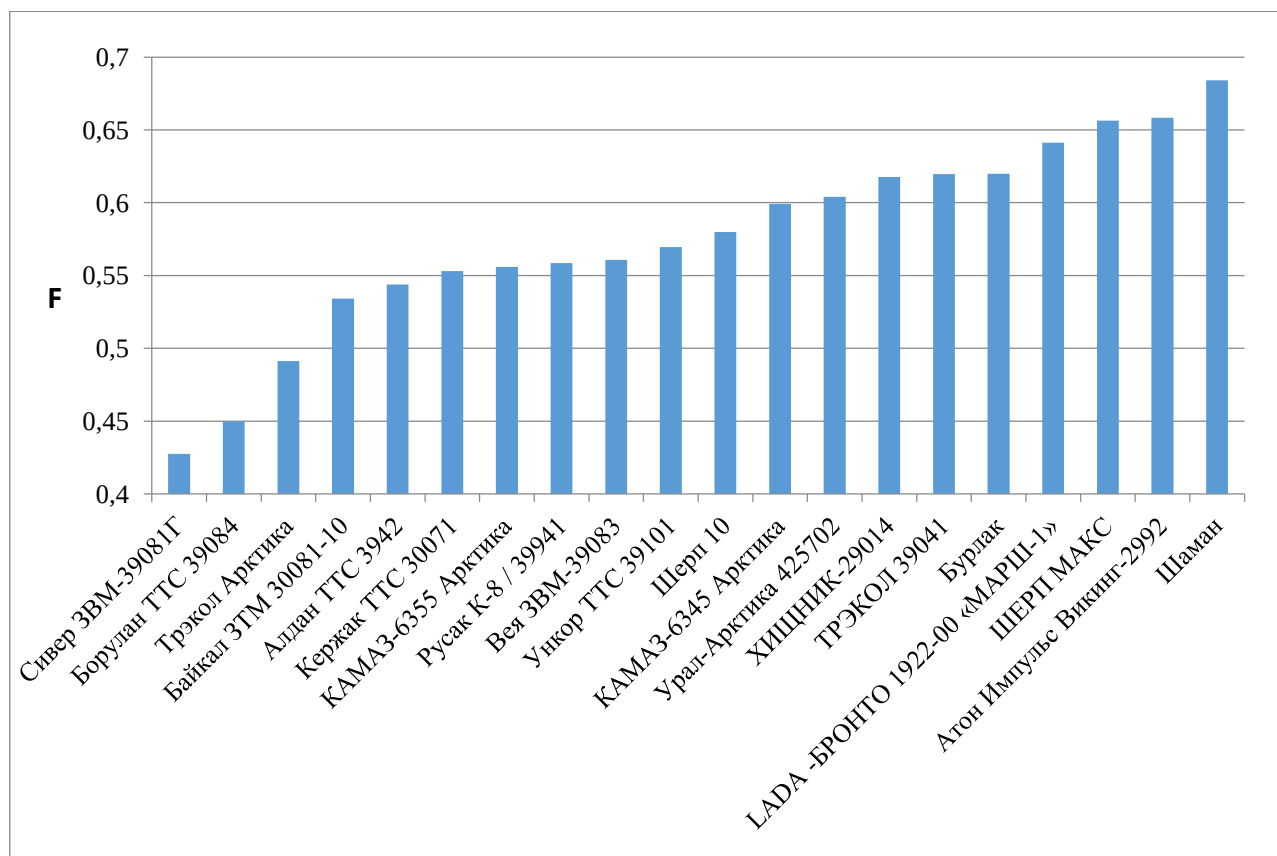


Рис. 5. Ранжирование колесных вездеходов по интегральному показателю подвижности

Fig. 5. Ranking wheeled all-terrain vehicles by integral mobility score

Экспресс-методика выбора снегоболотохода на основе интегрального показателя подвижности нужна для быстрой и объективной оценки, какая именно машина будет максимально эффективна в конкретных условиях эксплуатации (рис. 6). В отличие от простого сравнения характеристик, интегральный показатель позволяет количественно оценить и сравнить разные модели по единому критерию – их реальной способности выполнять поставленную задачу в заданных условиях эксплуатации ($q_p = \text{const}$, $q_b = \text{var}$, $q_k = \text{var}$). К преимуществам представленных экспресс-методик можно отнести скорость и простоту, они не требуют сложных расчетов.

В рассматриваемой группе колесных вездеходов с формулой 6х6 (рис. 7) снегоболотоход «Кержак, ТТС 30076» (№ 21) имеет самый высокий показатель подвижности не зависимо от плотности опорной поверхности. На слабых грунтах «Байкал ЗТМ 30081-10» (№ 22) обладает слабой подвижностью, однако с увеличением плотности поверхности движения подвижность вырастает и на снегах более высокой плотности его интегральный показатель подвижности превышает показатель для «Вея ЗВМ-39083» (№ 23).

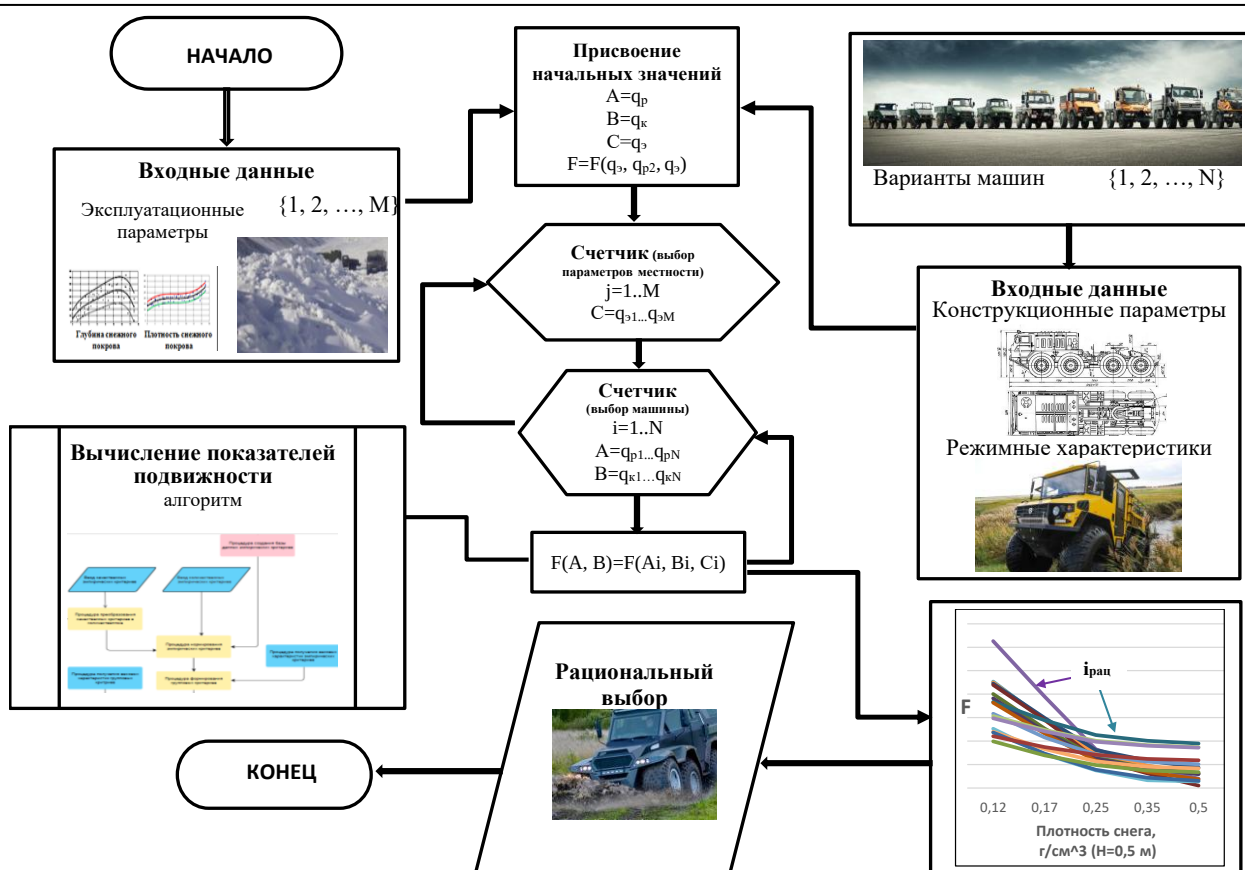


Рис. 6. Экспресс-методика рационального выбора ТТМ в зависимости от условий эксплуатации

Fig. 6. Express method of rational choice of TTM depending on operating conditions

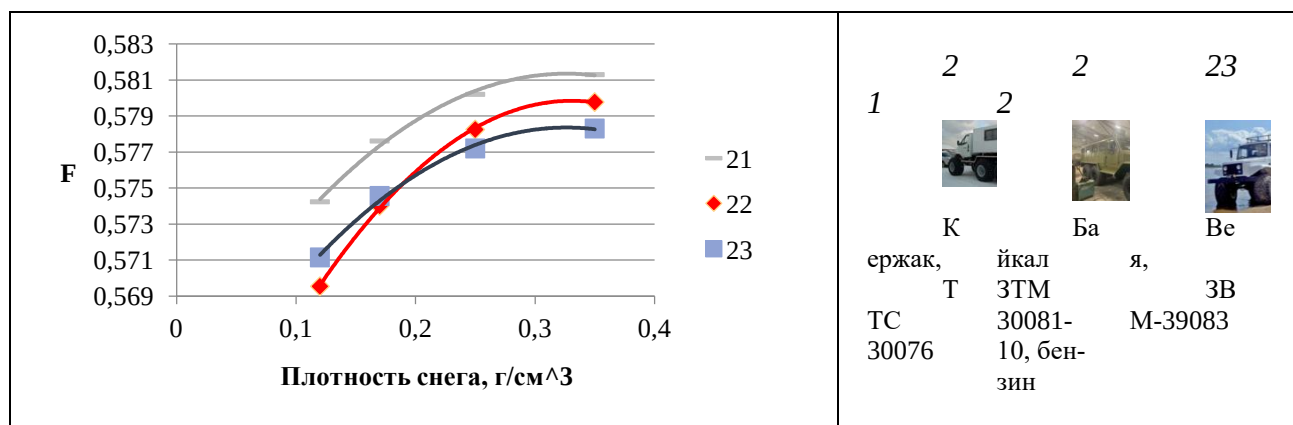


Рис. 7. Изменение интегрального показателя подвижности вездеходов 6х6 № 21-23 в зависимости от плотности поверхности движения

Fig. 7. Change in the integral mobility indicator of 6x6 all-terrain vehicles No. 21-23, depending on the density of the driving surface

Заключительный и главный этап методики – выработка рекомендаций по повышению подвижности на стадии проектирования или модернизации [16]. Интегральный показатель подвижности – это не просто итоговая оценка, он может служить базой для вычисления одной из ключевых диагностических характеристик – *эффективности подвижности* по частному или групповому критерию (табл. 3). Эти характеристики раскрывают внутреннюю структуру качества машины.

Таблица 3.
Характеристика показателей эффективности по подвижности
Table 3.
Performance characteristic by mobility

Оценка эффективности	Формула	Применимость
по групповому критерию	$\mathcal{Q}_{qi} = \frac{\tilde{Q}_i}{F}$	для всех групповых критериев
по частному критерию	$\mathcal{Q}_{qij} = \frac{\tilde{Q}_{ij}}{F}$	для всех частных критериев
по оценочному показателю	$\mathcal{Q}_{qi} = \frac{\tilde{q}_i}{F}$	для показателей, оптимизируемых только на максимум или на минимум

Анализ характера изменения показателей эффективности подвижности по частным показателям и критериям их связи с интегральным показателем проводился на всей совокупности рассматриваемых единиц вездеходной техники с различной колесной формулой, а также внутри каждой отдельных групп с определенной колесной формулой

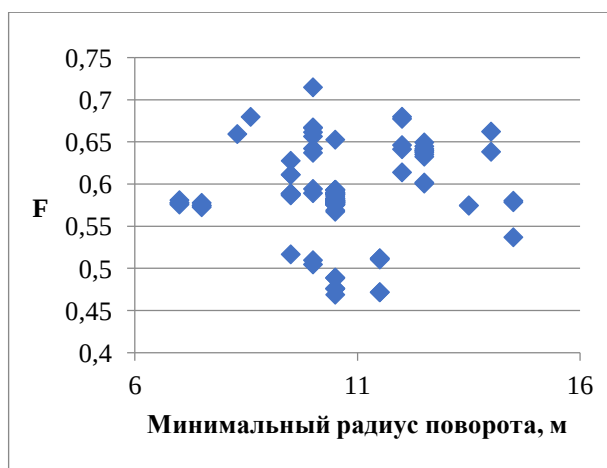


Рис. 8 (а)

Изменение интегрального показателя подвижности F в зависимости от минимального радиуса поворота

Fig. 8(a). Change of integral index of mobility F depending on minimum turning radius s

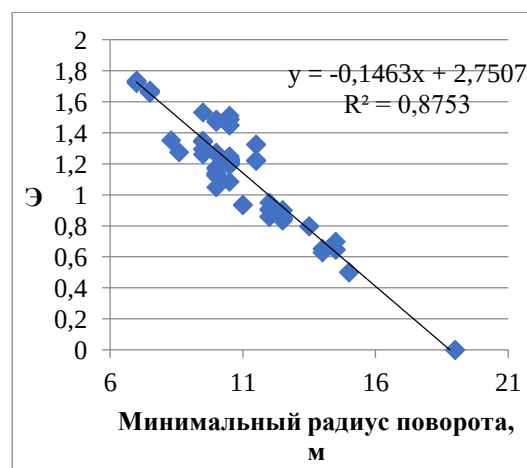


Рис. 8 (b)

Изменение показателя эффективности по частному критерию $\mathcal{E}$ в зависимости от минимального радиуса поворота

Fig. 8(b). Change in the efficiency of private criterion $\mathcal{E}$ depending on minimum turning radius

В исследовании рассчитывалась эффективность по всем показателям. В данной работе в качестве примера представлены графики изменения интегрального показателя подвижности и эффективности подвижности по частному критерию, минимальному радиусу поворота, в зависимости от минимального радиуса поворота транспортного средства. Установлено, что отсутствует зависимость интегрального показателя подвижности от величины минимального радиуса поворота, однако показатель эффективности подвижности по частному критерию (рис. 8) имеет тесную обратную связь с величиной минимального радиуса поворота. С уменьшением минимального радиуса поворота, а, следовательно, с улучшением управляемости, эффективность подвижности по этому частному критерию возрастает, следовательно, возрастает вклад этого частного критерия в интегральный показатель подвижности. Это коррелирует с тем фактом, что наиболее эффективно будут использоваться машины с меньшим значением минимального радиуса поворота.

Эффективность подвижности по частным и групповым критериям отражает долю участия этих критериев в величине интегрального показателя подвижности. Ориентируясь на него, можно указать критерии, за счет которых возможно увеличение подвижности ТТМ. Чем выше показатель эффективности, тем наиболее обоснованным является тот факт, что данный критерий является сильной стороной машины, т.е. этот параметр уже близок к своему пределу, дальнейшее улучшение будет давать минимальный прирост интегрального показателя подвижности.

Таблица 4.
Матрица балльной оценки эффективности
по частным показателям подвижности
(шкала 1-7, где 1 – лучшая оценка в группе, 7 – худшая)

Table 4.
Scorecard of the individual mobility performance rating
(scale 1-7, where 1 is the best in the group, 7 is the worst)

Частный критерий подвижности	Колесная формула 8x8						
	№26	№27	№28	№29	№30	№31	№32
							
	Ша- ман 8x8	Звезда Т24 шины Звезда	Звезда Т24 шины Мамонт	КАМАЗ- 6355 Арктика	Русак К-8 / 39941	Алдан 8x8	Трэкол Аркти- ка
Рабочий объем, л	7	5	4	1	6	2	3
Мощность, л.с	7	3	2	1	5	4	6
Максимальный момент, Нм	6	4	3	1	7	5	2
Максимальная скорость движения, км/ч: по шоссе	3	2	1	4	5	7	6
Максимальная скорость движения, км/ч: на плаву	3	2	1	6	7	5	4
Колея, мм	6	3	2	5	4	1	7
Дорожный просвет, мм	7	3	2	1	5	6	4
База, мм	4	6	5	7	3	1	2
Подъем, град	2	5	5	1	5	4	3
Давление воздуха в шине, атм	6	5	4	7	1	3	2
Глубина преодолеваемого брода, м	3	2	1	5	7	6	4
Минимальный радиус поворота, м.	2	7	6	4	1	5	3
Боковой крен, град	1	3	2	4	5	6	6
Длина, мм	2	6	5	7	3	1	4
Ширина, мм	4	7	6	3	5	2	1
Высота, мм	2	6	5	7	3	1	4
Наружный диаметр шины, мм	7	2	3	1	4	6	5
Ширина профиля шины, мм	7	1	5	3	6	4	2

Проведена комплексная оценка эффективности подвижности ТТМ по частным критериям в виде матрицы балльных оценок, выделены самые низкие оценки в группе по каждому

частному критерию (табл. 4). Снегоболотоходы расположены в порядке убывания значений интегрального показателя подвижности.

В категории колесных вездеходов 8х8 наибольшей подвижностью обладает «Шаман». Оценки эффективности подвижности по частным критериям указывают недостаточный вклад в подвижность по режимным критериям (рабочий объем 3 л, мощность 146 л с, максимальный крутящий момент 350 Н·м). Из этого следует один из сценариев повышения подвижности за счет замены двигателя *Iveco F1C*, 3.0 TD на более мощный. Низкая эффективность показателей профильной проходимости (колея 1950 мм, дорожный просвет 450 мм) указывают на возможность увеличения подвижности за счет изменения этих конструктивных параметров. Низкая эффективность подвижности по показателям опорной проходимости – диаметру и ширине профиля шины (1200 мм и 600 мм соответственно) – говорит еще об одном варианте повышения подвижности – замене существующих шин низкого давления на шины большего размера. Наименьший интегральный показатель подвижности в рассматриваемой совокупности имеет снегоболотоход «Трэкол Арктика». Матрица оценок содержит низкие значения эффективности подвижности по частным критериям: колея, боковой крен. Увеличение этих показателей с большой долей вероятности повысит подвижность ТС.

Расположение снегоболотоходов в порядке убывания интегрального показателя дает общую иерархию их универсальной подвижности. Однако сопутствующая матрица балльных оценок по частным критериям раскрывает внутреннюю структуру этого результата, выявляя как сбалансированные универсальные конструкции, так и специализированные машины-лидеры по отдельным параметрам. Практическое применение данных выводов в проектировании и модернизации НТТСиК может сводиться к построению профиля эффективностей – диаграммы показателей эффективности подвижности по всем критериям, который дает ментальную визуальную картину: где пики (сильные стороны), а где провалы (слабые звенья). Для обоснованного выбора изменений конструкции с целью повышения подвижности необходим одновременный учет как общего интегрального показателя подвижности, так и профиля ее показателей эффективности подвижности по частным критериям в соответствии с планируемыми условиями эксплуатации.

С учетом вышеизложенного разработана методика повышения подвижности НТТСиК, позволяющая проводить мероприятия, повышающие работоспособность автотракторной техники с максимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины (рис. 9). Представленная методика является не просто оценочной, а проектно-оптимизационной. Она предоставляет инженеру формализованный итеративный инструмент для диагностики текущего состояния машины, научно обоснованного выбора приоритетов модернизации, прогнозной оценки эффективности планируемых изменений.

Практическое применение методики повышения подвижности рассмотрено на примере модели снегоболотохода «Байкал», разработанного на ООО «ТрансМаш». На этапе разработки конструкции подвижность вездехода оценивалась величиной интегрального показателя, равной 0,4702, что свидетельствовало об удовлетворительной пригодности ТТМ для выполнения поставленной задачи в заданных условиях эксплуатации (движение по твердой поверхности). Однако данный показатель был ниже среднего по группе вездеходов с колесной формулой 6х6, поэтому с целью повышения конкурентоспособности продукции на рынке колесных вездеходов была поставлена задача об увеличении подвижности снегоболотохода. Согласно представленной методике, необходимо выяснить, за счет каких изменений в конструкции это возможно.

На основании профиля эффективности (рис. 10) можно сделать вывод, что низкая эффективность тягово-скоростных свойств и характеристик шин является прямым указанием на то, что именно они – слабые места машины, ограничивающие подвижность. Кроме того, подвижность можно повысить за счет увеличения колеи и максимальной величины бокового крена.

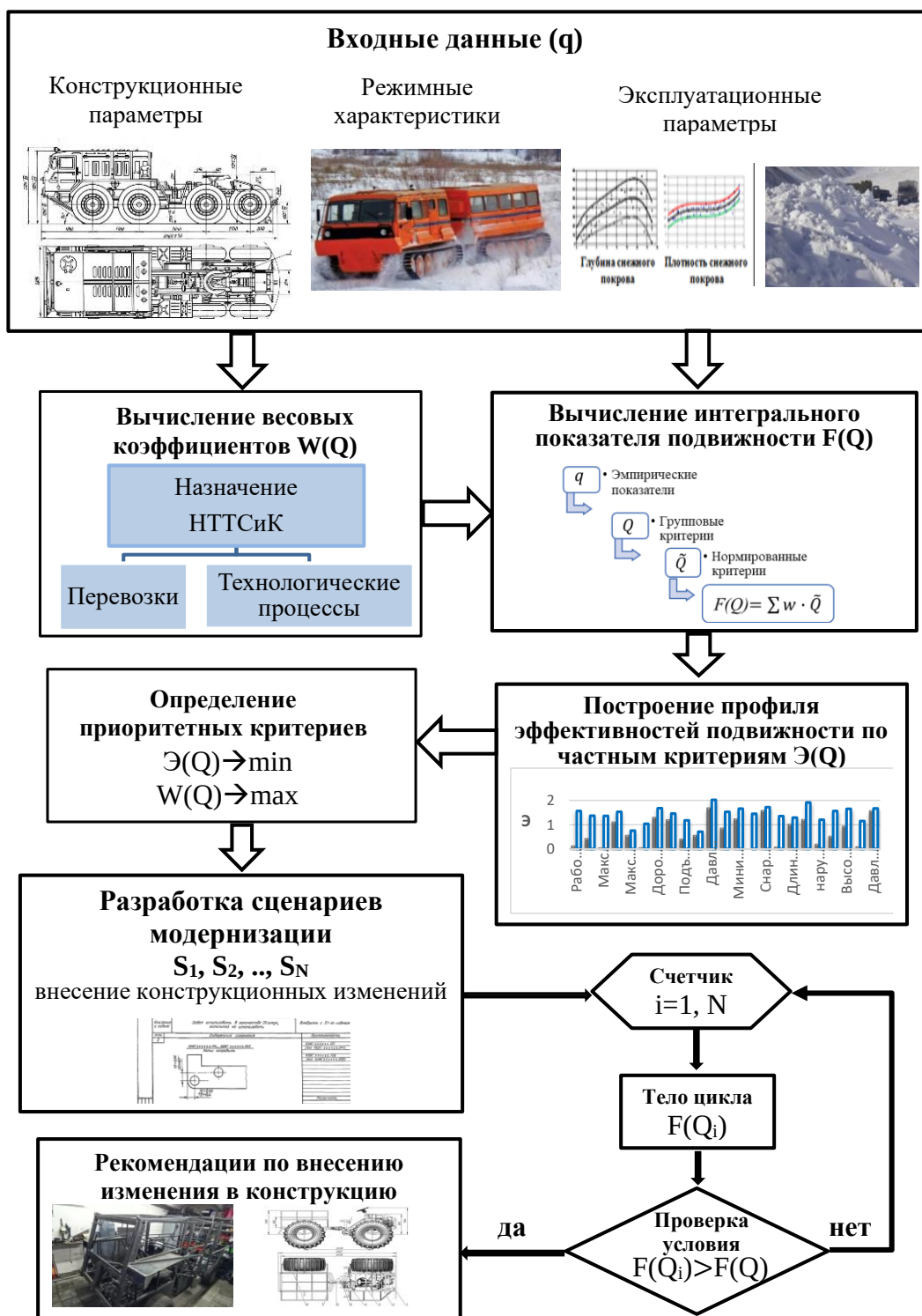


Рис. 9. Методика повышения интегрального показателя подвижности НТТСиК

Fig. 9. Methodology for increasing the integral index of mobility of land technological vehicles and complexes

Возможные стратегии модернизации должна быть нацелена на радикальное улучшение именно двигателя и шин: увеличиваем нормированные значения критериев с низкой эффективностью (двигатель, шины), стараясь при этом минимально ухудшить критерии с высокой эффективностью (габариты, масса).

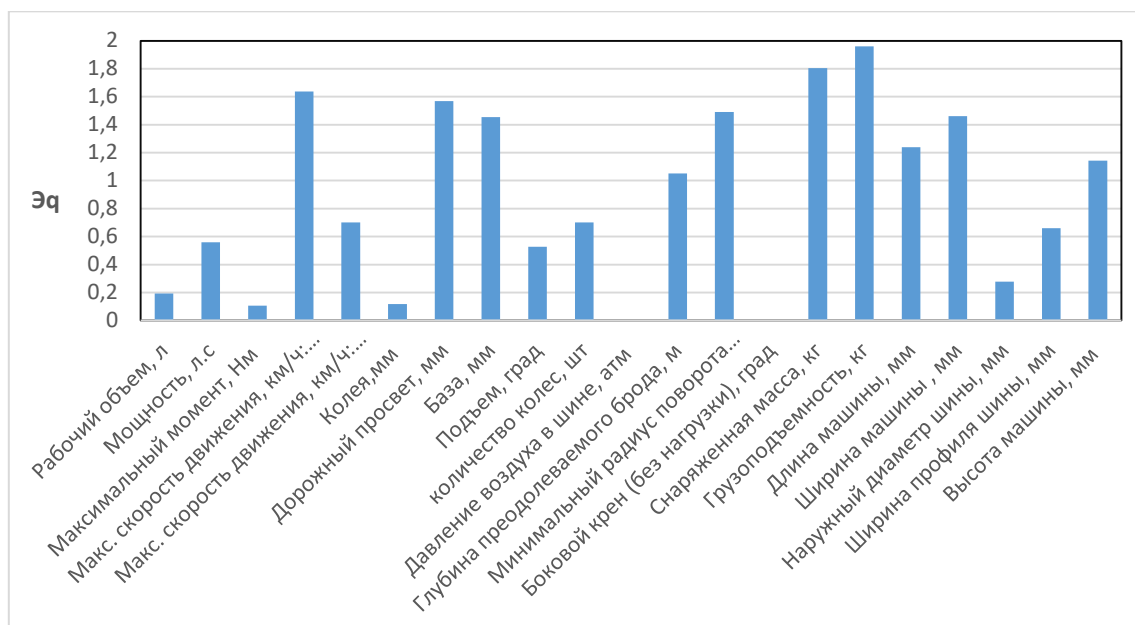


Рис. 10. Профиль эффективности подвижности по частным критериям для снегоболотохода «Байкал» на этапе разработки

Fig. 10. Mobility efficiency profile by private criteria for snow and swamp-going vehicle «Baikal» at the development stage

Рассматривалось несколько сценариев модернизации, в каждом случае проводилась оценка подвижности (табл. 5). Сценарий S_1 : снижение полной снаряженной массы на 1000 кг (достигается путем замены материала кузова на алюминиевый). Сценарий S_2 : замена двигателя на ЗМЗ 40522.10 – четырехцилиндровый из семейства бензиновых инжекторных ОАО «ЗМЗ» (объем – 2,4 л, степень сжатия – 9,3, ном. мощность при частоте вращения коленвала мин, квт (л.с) 111,8(152) 5200, мин. уд. расход топлива г/кВт (г/лсч) 269,3 (198). Сценарий S_3 : установка шин низкого давления «Avtoros Salamandra» с характеристиками: четыре слоя корда, наружный диаметр 1450 мм, ширина профиля 650 мм.

Таблица 5.
Сценарии модернизации снегоболотохода «Байкал»

Table 5.
Scenario of modernization of snow and swamp-going vehicle «Baikal»

Сценарий модернизации	Исходный вариант	S_1	S_1+S_2	$S_1+S_2+S_3$
Вносимые изменения	-	снижение полной массы	замена двигателя	замена шин
F	0,4702	0,4708	0,4756	0,5692

Таким образом, комплексные вносимые изменения в конструкцию позволили увеличить интегральный показатель подвижности на 20 %. В результате модернизации опытного образца на ООО «ТрансМаш» был выпущен снегоболотоход «Байкал» модель ЗТМ 30081-11. В рамках исследования была построена полная унифицированная иерархическая структура интегрального показателя подвижности, которая обладает свойством универсальности и может применяться для оценки любых ТТМ. С использованием методов многокритериальной оценки качества разработан алгоритм вычисления интегрального показателя подвижности путем свертки взвешенного векторного критерия. Кроме того, для корректного описания свойства подвижности и выбора весовых коэффициентов предложена классификация транспортных средств по функциональному назначению, учитывающая режимы работы. Важной особенностью разработанной методики является возможность дополнения иерархии свойств НТТСИк вербальными (качественными) показателями. В качестве практической де-

монстрации были получены количественные оценки эффективности энергетической установки, что доказывает гибкость метода при работе с трудно формализуемыми характеристиками. Апробация подхода проведена на примере ранжирования ТТМ по уровню подвижности. Сравнение расчетных данных с экспертными оценками не выявило существенных расхождений, что подтверждает валидность модели.

Разработанная методика обеспечивает переход от экспертно-эмпирических к научно обоснованным, количественным процедурам прогнозирования подвижности на этапе проектирования и оптимизации конструктивных решений для целенаправленного повышения интегрального показателя. С помощью показателей эффективности подвижности по частным критериям методика позволяет установить, какие из них в наибольшей степени влияют на прирост подвижности. Результаты исследовательской работы были внедрены в производство. На мощностях ООО «ТрансМаш» был выпущен опытный образец, освоенный затем в серии снегоболотоход «Байкал», модель ЗТМ 30081-11. Новая модель сочетает в себе высокую грузоподъемность, улучшенную динамику и уникальную проходимость, обеспеченную шинами сверхнизкого давления, что позволяет эффективно эксплуатировать машину в условиях заболоченной местности, снежной целины и мелководья.

Библиографический список

1. **Мазунова, Л.Н.** Обзор подходов к оценке качества и подвижности автотракторной техники, основанных на методах многокритериальной оценки качества / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, Л.Н. Ерофеева [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21. № 3. – С. 170-179.
2. **Зезюлин, Д.В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров двигателей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: автореферат дисс... канд. техн. наук / Зезюлин Денис Владимирович. – Нижний Новгород, 2013. – 17 с. – EDN QIGUZJ.
3. **Беляков, В.В.** Критерии оценки качества транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А. М. Беляев, П. О. Береснев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – № 4(115). – С. 128-168. – EDN XWRMCX.
4. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Е.Ю. Голышев // НГТУ, Н.Новгород, 2002 Деп. в ВИНТИ 10.01.02. № 28-В 2002
5. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, Е.Ю. Голышев // Проблемы качества и эксплуатации автотракторных средств: материалы II международной научно-технической конференции (21-23 мая 2002 г.) / ПГАСА. – Пенза, 2002. – Ч. 1. – С. 23-31.
6. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, Е.Ю. Голышев // Колесные машины: сб. тр. / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2003. – С. 29-30.
7. **Беляков, В.В.** Подвижность и конкурентоспособность транспортно-технологических машин // Известия Академии инженерных наук РФ им. акад. А.М. Прохорова. Транспортно-технологические машины и комплексы. – 2003. – Т. 5. – С. 3-25.
8. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических систем // «АВТО-НН-2000» (27-29 июня 2000 г): материалы международной научно-технической конференции / НГТУ. – Н. Новгород, 2000. – С. 339-357.
9. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3 (100). – С. 145-174.
10. **Беляков, В.В.** Решение задачи оценки подвижности автотракторной техники с помощью многокритериальной оптимизации / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов // «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2001): тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции посвященной 65-летию факультета информационных систем и технологий НГТУ Н. Новгород 20 апреля 2001 г. / НГТУ. – Н. Новгород, 2001. – С. 167-168.
11. **Беляков, В.В.** Многокритериальная оптимизация в задачах подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов / НГТУ. – Н. Новгород, 2001. – 271 с.

12. **Мазунова, Л.Н.** Разработка методики вычисления показателя подвижности по мобильности легковых автомобилей, основанной на применении многокритериальной оптимизации / Л.Н. Мазунова, М.А. Дубкова [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2021. – № 2(133). – С. 102-112.
13. **Мазунова, Л.Н.** Сравнительный анализ методов многокритериальной оценки конкурентоспособности и подвижности автотракторной техники с учетом весовой значимости характеристик / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2022. – № 1(136). – С. 125-136. – DOI 10.46960/1816-210X_2022_1_125.
14. **Мазунова, Л.Н.** Преобразование качественных характеристик автотранспортных средств в количественные показатели с применением метода анализа иерархий / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2023. – № 1(140). – С. 97-106. – DOI 10.46960/1816-210X_2023_1_97. – EDN JOIWB1.
15. **Мазунова, Л.Н.** Применение методики вычисления интегрального показателя подвижности с целью повышения качества наземных транспортно-технологических средств на этапе проектирования / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, Л.Н. Ерофеева [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. – Т. 23. № 2. – С. 166-175.
16. **Мазунова, Л.Н.** Методика вычисления интегрального показателя подвижности колесных вездеходов на основе метода многокритериальной оптимизации / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, Л.Н. Ерофеева [и др.] // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2022. – № 3. – С. 211-222.

References

1. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., et al. Obzor podkhodov k otsenke kachestva i podvizhnosti avtotraktornoy tekhniki, osnovannykh na metodakh mnogokriterial'noy otsenki kachestva [Review of approaches to assessing the quality and mobility of automotive and tractor equipment based on multi-criteria quality assessment methods]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(3):170-179. (in Russian).
2. Zezyulin D.V. Razrabotka metodiki vybora konstruktsionnykh parametrov dvizhiteley, obespechivayushchikh effektivnost' dvizheniya kolesnykh mashin po snegu [Development of a methodology for selecting design parameters of propulsors ensuring the efficiency of wheeled vehicles motion on snow]. Abstract of PhD thesis. Nizhny Novgorod; 2013. 17 p. EDN QIGUZZ. (in Russian).
3. Belyakov V.V., Belyaev A.M., Beresnev P.O., et al. Kriterii otsenki kachestva transportno-tekhnologicheskikh mashin [Criteria for assessing the quality of transport-technological machines]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2016;(4(115)):128-168. EDN XWRMCX. (in Russian).
4. Belyakov V.V., Golyshev E.Y. Otsenka podvizhnosti transportno-tekhnologicheskikh mashin [Assessment of mobility of transport-technological machines]. Dep. in VINITI 10.01.02. No. 28-V 2002. Nizhny Novgorod: NSTU; 2002. (in Russian).
5. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Golyshev E.Y. Otsenka podvizhnosti transportno-tekhnologicheskikh mashin [Assessment of mobility of transport-technological machines]. In: *Materialy II mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy kachestva i ekspluatatsii avtotraktornykh sredstv"* (21-23 maya 2002 g.) [Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference "Problems of Quality and Operation of Automotive and Tractor Vehicles" (May 21-23, 2002)]. Penza: PGASA; 2002. Part 1. p. 23-31. (in Russian).
6. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Golyshev E.Y. Otsenka podvizhnosti transportno-tekhnologicheskikh mashin [Assessment of mobility of transport-technological machines]. In: *Kolesnyye mashiny: sb. tr.* [Wheeled Vehicles: collected papers]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2003. p. 29-30. (in Russian).
7. Belyakov V.V. Podvizhnost' i konkurentosposobnost' transportno-tekhnologicheskikh mashin [Mobility and competitiveness of transport-technological machines]. In: Gulyaev Y.V., editor. *Izvestiya Akademii inzhenernykh nauk RF im. akad. A.M. Prokhorova. Transportno-tekhnologicheskiye mashiny i komplekсы* [Proceedings of the Russian Academy of Engineering Sciences n.a. acad. A.M. Prokhorov. Transport-technological machines and complexes]. Moscow – Nizhny Novgorod: NSTU; 2003. Vol. 5. p. 3-25. (in Russian).

8. Belyakov V.V. Otsenka podvizhnosti transportno-tekhnologicheskikh sistem [Assessment of mobility of transport-technological systems]. In: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "AVTO-NN-2000" (27-29 iyunya 2000 g.) [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "AVTO-NN-2000" (June 27-29, 2000)]. Nizhny Novgorod: NSTU; 2000. p. 339-357. (in Russian).
9. Belyakov V.V., Belyaev A.M., Bushueva M.E. Kontseptsiya podvizhnosti nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin [The concept of mobility of ground transport-technological machines]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2013;(3(100)):145-174. (in Russian).
10. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Sagunov V.I. Resheniye zadachi otsenki podvizhnosti avtotraktoroy tekhniki s pomoshch'yu mnogokriterial'noy optimizatsii [Solving the problem of assessing the mobility of automotive and tractor equipment using multi-criteria optimization]. In: Tezisy dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnyye sistemy i tekhnologii» (IST-2001), posvyashchennoy 65-letiyu fakul'teta informatsionnykh sistem i tekhnologiy NGTU (N. Novgorod, 20 aprelya 2001 g.) [Abstracts of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Information Systems and Technologies» (IST-2001), dedicated to the 65th anniversary of the Faculty of Information Systems and Technologies of NSTU (Nizhny Novgorod, April 20, 2001)]. Nizhny Novgorod: NSTU; 2001. p. 167-168. (in Russian).
11. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Sagunov V.I. Mnogokriterial'naya optimizatsiya v zadachakh podvizhnosti, konkurentosposobnosti avtotraktoroy tekhniki i diagnostiki slozhnykh tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobiye [Multi-criteria optimization in problems of mobility, competitiveness of automotive and tractor equipment and diagnostics of complex technical systems: textbook]. Nizhny Novgorod: NSTU; 2001. 271 p. (in Russian).
12. Mazunova L.N., Dubkova M.A., Belyakov V.V., et al. Razrabotka metodiki vychisleniya pokazatelya podvizhnosti po mobil'nosti legkovykh avtomobiley, osnovannoy na primenenii mnogokriterial'noy optimizatsii [Development of a methodology for calculating the mobility indicator of passenger cars based on the application of multi-criteria optimization]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2021;(2(133)):102-112. (in Russian).
13. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Makarov V.S., et al. Sravnitel'nyy analiz metodov mnogokriterial'noy otsenki konkurentosposobnosti i podvizhnosti avtotraktoroy tekhniki s uchetom vesovoy znachimosti kharakteristik [Comparative analysis of multi-criteria assessment methods for competitiveness and mobility of automotive and tractor equipment taking into account the weight significance of characteristics]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2022;(1(136)):125-136. doi: 10.46960/1816-210X_2022_1_125. (in Russian).
14. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Makarov V.S., et al. Preobrazovaniye kachestvennykh kharakteristik avtotransportnykh sredstv v kolichestvennyye pokazateli s primeneniye metoda analiza iyerarkhiy [Transformation of qualitative characteristics of vehicles into quantitative indicators using the analytic hierarchy process]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2023;(1(140)):97-106. doi: 10.46960/1816-210X_2023_1_97. EDN JOIWBI. (in Russian).
15. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., et al. Primneniye metodiki vychisleniya integral'nogo pokazatelya podvizhnosti s tselyu povysheniya kachestva nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh sredstv na etape proyektirovaniya [Application of the methodology for calculating the integral mobility indicator to improve the quality of ground transport-technological means at the design stage]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(2):166-175. (in Russian).
16. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., et al. Metodika vychisleniya integral'nogo pokazatelya podvizhnosti kolesnykh vezdekhodov na osnove metoda mnogokriterial'noy optimizatsii [Methodology for calculating the integral mobility indicator of wheeled all-terrain vehicles based on the multi-criteria optimization method]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University]. 2022;(3):211-222. (in Russian).

**Дата поступления
в редакцию: 12.03.2026**

**Дата принятия
к публикации: 10.07.2026**