

УДК 629.032

***АДАПТИВНЫЙ (УНИВЕРСАЛЬНЫЙ) ДВИЖИТЕЛЬ  
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ***

***Жданов А.Г.***

*к.т.н., доцент*

*Приволжский государственный университет путей сообщения,*

*Самара, Россия*

***Дорошенко Д.О.***

*студент 5 курса,*

*Приволжский государственный университет путей сообщения,*

*Самара, Россия*

***Савеленко Д.А.***

*студент 3 курса,*

*Приволжский государственный университет путей сообщения,*

*Самара, Россия*

**Аннотация:** В статье рассматривается концепция адаптивного колесного движителя для транспортных средств повышенной проходимости.

Проведен анализ существующих типов движителей, включая колесные и гусеничные системы, а также выявлены их ограничения при эксплуатации в условиях различных типов грунта.

Обоснована необходимость разработки универсального движителя, способного изменять параметры взаимодействия с опорной поверхностью в процессе движения.

Рассматривается возможность применения трансформируемых элементов конструкции колеса и интеллектуальной системы управления.

Выполнен анализ влияния коэффициента сцепления на предельный угол подъема транспортного средства и рассмотрено влияние типа грунта на характеристики проходимости.

**Ключевые слова:** адаптивный движитель, универсальный движитель, проходимость, концепция, датчики, новое поколение всепогодных вездеходов.

### ***ADAPTIVE (UNIVERSAL) ENGINE OF A HIGH-CAPACITY VEHICLE***

***Zhdanov A.G.***

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

*Privolzhsky State University of Railway Engineering,*

*Samara, Russia*

***Doroshenko D.O.***

*5th year student,*

*Privolzhsky State University of Railway Engineering,*

*Samara, Russia*

***Savelenko D.A.***

*3rd year student,*

*Privolzhsky State University of Railway Engineering,*

*Samara, Russia*

**Abstract:** The article discusses the concept of an adaptive wheeled propulsion system for high-mobility vehicles.

The analysis of existing types of propulsion systems, including wheeled and tracked systems, is carried out, and their limitations are identified when operating in conditions of different types of soil.

The necessity of developing a universal propulsion system capable of changing the parameters of interaction with the supporting surface during movement is substantiated.

The possibility of using transformable wheel design elements and an intelligent control system is being considered.

The influence of the coefficient of adhesion on the limit angle of vehicle lifting is analyzed and the influence of the type of soil on the characteristics of cross-country ability is considered.

**Keywords:** adaptive propeller, universal propeller, cross-country ability, concept, sensors, new generation of all-terrain vehicles.

Освоение труднодоступных регионов Российской Федерации, включая территории Крайнего Севера, Арктики, тайги и заболоченных районов, требует применения транспортных средств повышенной проходимости. Эффективность эксплуатации такой техники во многом определяется характеристиками движителя, обеспечивающего взаимодействие транспортного средства с опорной поверхностью.

Адаптивный колесный движитель — это интеллектуальная система, которая в реальном времени регулирует ключевые параметры колесного диска или пневматической шины. Она применяется на самоходных энергетических установках, работающих в условиях нестабильного рельефа и меняющихся свойств грунта. Ключевой принцип технологии заключается в динамическом изменении характеристик движителя под текущие условия эксплуатации. Это позволяет достигать оптимального баланса между максимальной проходимостью транспортного средства и минимальным воздействием его ходовой части на почвенный покров.

Внедрение адаптивных колесных систем в конструкцию мобильных энергетических средств (МЭС), оснащенных шинами сельскохозяйственного назначения со сверхнизким внутренним давлением, дает комплекс технологических и экономических преимуществ. К ним относятся:

- Улучшение проходимости и преодоления сложных участков;
- Динамическая адаптация к разнородным дорожным и внедорожным условиям;

- Сокращение расхода топлива и общее снижение эксплуатационных затрат;
- Рост производительности за счет непрерывности и эффективности рабочих циклов;
- Минимизация экологической нагрузки на почву благодаря оптимизации давления на грунт;
- Повышение уровня безопасности при работе в нестандартных условиях.

**Актуальность и проблематика исследования.** В условиях глобального смещения экономических и стратегических интересов в сторону труднодоступных регионов, таких как Арктический шельф, зоны вечной мерзлоты и неосвоенные территории с полным отсутствием дорожной сети, решающим фактором успеха становится мобильность. Способность доставлять грузы, персонал, оборудование и обеспечивать их функционирование в экстремальных условиях определяет экономическую целесообразность и безопасность таких проектов. Для Российской Федерации большая часть территории, которой относится именно к таким регионам, задача создания высокоэффективных транспортных средств повышенной проходимости (ТСПП) переходит из разряда технической в разряд государственной и стратегической.

Классические движители ТСПП — колеса низкого давления, гусеницы, шнекороторные и амфибийные системы — достигли высокого уровня совершенства в рамках своих узких специализаций. Колесный вездеход безнадежно застрянет в глубоком снегу или на болоте, где незаменим гусеничный, в то время как последний обладает низкой скоростью и разрушает твердое покрытие, а шнекороторный движитель совершенно непригоден для любого твердого грунта. Это порождает парадокс: для надежного освоения сложной территории требуется целый парк разнородной техники, что влечет за собой колоссальные за-

траты на приобретение, обслуживание, логистику горюче-смазочных материалов и подготовку экипажей.

Таким образом, возникает острая потребность в универсализации двигателя. Идея создания адаптивного механизма, который мог бы в автоматическом или полуавтоматическом режиме изменять свои характеристики, подстраиваясь под текущий тип опорной поверхности, является логичным ответом на вызовы времени. Разработка такого «двигателя-трансформера» способна стать основой для создания транспортной платформы нового поколения, обеспечивающей непрерывность и эффективность движения в любых условиях, что и определяет высочайшую актуальность данного исследования.

Целью исследования является анализ возможностей повышения проходимости транспортных средств за счет применения адаптивного колесного двигателя, способного изменять свои параметры в зависимости от характеристик опорной поверхности.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- анализ существующих типов колесных двигателей;
- рассмотрение принципа работы адаптивного колесного двигателя;
- теоретическая оценка условий сцепления колесного двигателя с различными типами грунтов;
- оценка влияния характеристик опорной поверхности на проходимость транспортного средства.

Таблица 1 - Классификация и характеристика колес (шин) для транспортных средств

Критерий классификации	Тип колеса / шины	Ключевые характеристики и устройство	Предназначение и основные преимущества	Недостатки и ограничения
По типу камеры	Камерные (ТТ)	Имеют отдельную резиновую камеру для воздуха.	Простота ремонта, низкая стоимость.	Риск быстрого спуска при проколе, большой нагрев.

	Бескамерные (TL)	Воздух удерживается между бортом шины и ободом, есть герметизирующий слой.	Медленный спуск при проколе, лучший теплоотвод, меньший вес.	Сложный ремонт боковых порезов, требования к состоянию обода.
По конструкции корда	Диагональные	Нити корда в слоях перекрещиваются (под углом 35-40°).	Прочные боковины, устойчивость к ударам, низкая стоимость.	Большее сопротивление качению, нагрев, меньшая стабильность на скорости.
	Радиальные	Нити корда идут радиально (от борта к борту), сверху – жесткий пояс (брекер).	Гибкость, лучшее сцепление, меньшее сопротивление, больший ресурс.	Уязвимость боковин к повреждениям, более высокая цена.
По типу протектора и назначению	Дорожные (Летние)	Мелкий/средний рисунок, много водоотводных канавок, жесткая резина.	Максимальное сцепление и комфорт на асфальте, низкий шум и расход.	Непригодны для зимы, дубеют на морозе, нулевая проходимость.
	Внедорожные (Грязевые)	Глубокий, агрессивный, редкий рисунок с крупными грунтозацепами.	Отличное самоочищение и сцепление в грязи, песке, на рыхлых грунтах.	Высокий шум, плохая управляемость и износ на асфальте.
	Зимние (Нешипуемые «Липучка»)	Мягкая резина, множество ламелей (прорезей) для сцепления.	Эффективны на снегу и мокром льду, тихие, комфортные.	Быстро изнашиваются в теплую погоду, хуже шипованных на льду.
	Зимние Шипованные	Мягкая резина с металлическими шипами.	Максимальное сцепление на льду и укатанном снегу.	Шумные, повреждают дорожное покрытие, сезонные ограничения.
По сезонности	Летние	Резина рассчитана на работу при температуре выше +7°C.	Оптимальные характеристики летом: управляемость, торможение, износ.	На морозе теряют эластичность и сцепление, опасны.
	Зимние	Резина остается эластичной при температуре ниже +7°C. Маркировка «M+S» и снежинка.	Безопасность на холодном, обледенелом, снежном покрытии.	Изнашиваются в жару, ухудшаются характеристики на теплом асфальте.
	Всесезонные	Компромиссный состав резины и рисунок протекто-	Удобство, не требуют сезонной смены в ре-	Хуже летних летом и хуже зимних зимой. Ком-

		ра.	гионах с мягкой зимой.	промисс во всем.
--	--	-----	------------------------	------------------

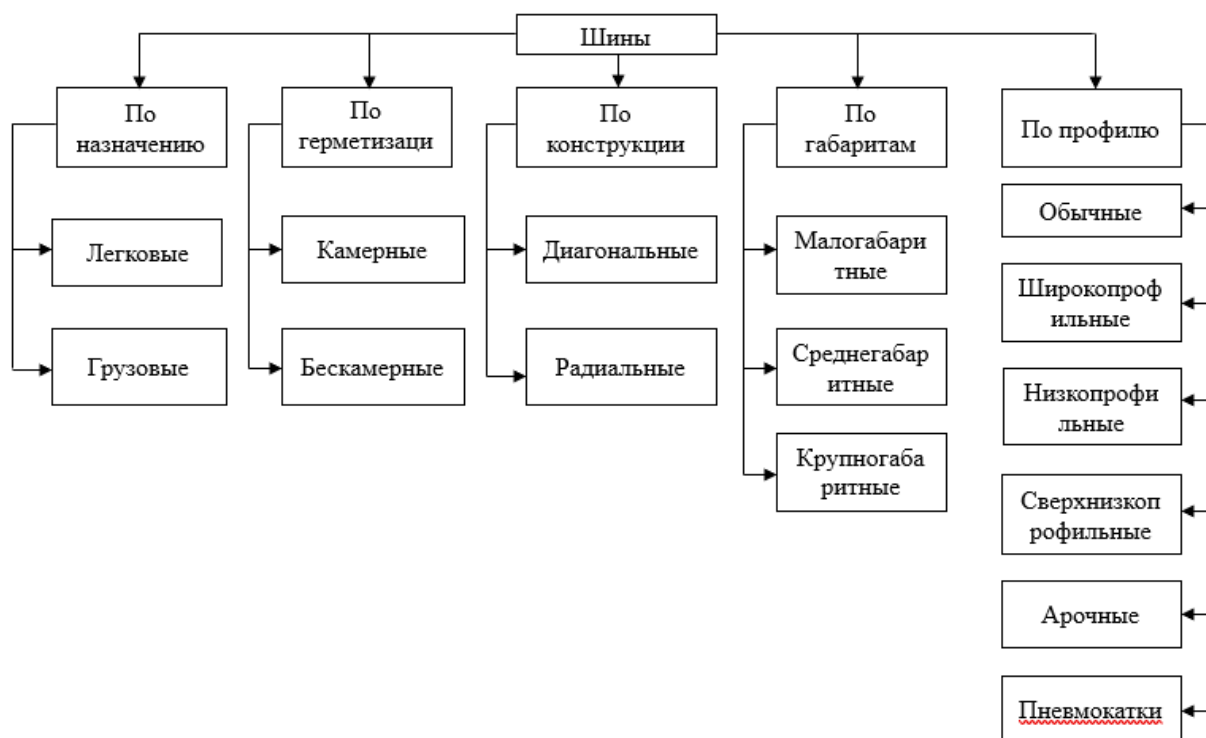


Рис. 1 - Классификация шин

Максимальная сила сцепления колес с грунтом при торможении должна быть не меньше суммы составляющей силы тяжести, стремящейся скатить машину вниз, и силы инерции (при замедлении).

Для упрощенного статического случая (без учета инерции), когда автомобиль удерживается на уклоне только тормозами, условие имеет вид:

$$F_{сц} \geq G * \sin(\alpha), \quad (1)$$

где  $F_{сц}$  — максимальная сила сцепления колес с дорогой, Н;

$G$  — вес транспортного средства, Н;

$\alpha$  — предельный угол уклона, град. или рад.

Сила сцепления определяется:

$$F_{сц} = \varphi * G * \cos(\alpha), \quad (2)$$

где  $\varphi$  — коэффициент сцепления шины с грунтом (зависит от типа покрытия, состояния шин и т. д.).

Подставляем формулу (2) в неравенство (1) и получаем основное уравнение:

$$\varphi * G * \cos(\alpha) \geq G * \sin(\alpha), \quad (3)$$

Сокращая вес  $G$ , приходим к ключевому соотношению:

$$\varphi \geq \operatorname{tg}(\alpha), \quad (4)$$

Следовательно, формула (5) для расчета предельного угла уклона  $\alpha_{пред}$  будет иметь вид:

$$\alpha_{пред} = \operatorname{arctg}(\alpha), \quad (5)$$

где  $\alpha_{пред}$  — предельный угол уклона, при котором возможно удержание транспортного средства тормозами без проскальзывания, град. или рад.;

$\varphi$  — коэффициент продольного сцепления шины с опорной поверхностью.

Так как на практике уклон часто выражают в процентах ( $i$ , %), используют преобразование, получим:

$$i_{пред} = \operatorname{tg}(\alpha_{пред}) * 100\%, \quad (5)$$

Данная формула (5) справедлива для идеализированного случая — полного использования сцепного веса и одинаковых условий для всех колес. В реальности на значение  $i_{пред}$  влияют:

- 1) Перераспределение веса по осям при торможении.
- 2) Разброс коэффициента сцепления под левыми и правыми колесами.
- 3) Наличие системы АБС (антиблокировочной системы).

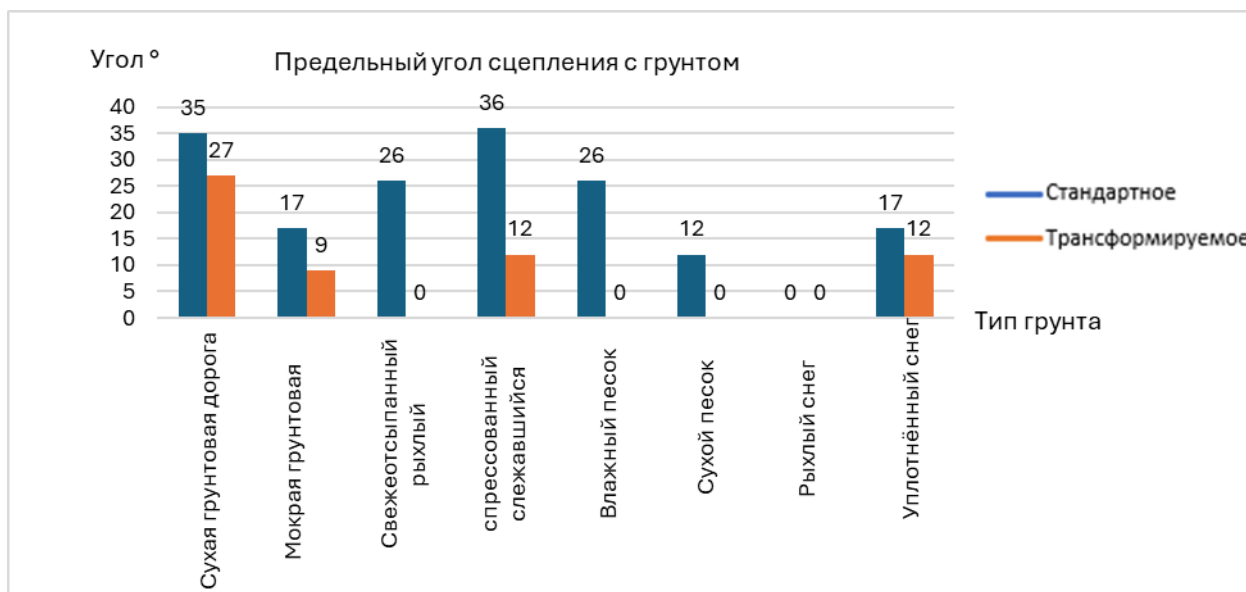


Рис 2. - Предельный продольный угол подъема, преодолеваемый легковым автомобилем по условию сцепления движителя с дорогой

Анализ влияния типа грунта на предельный угол сцепления колесных движителей

Ключевым параметром, определяющим проходимость транспортного средства, является предельный угол сцепления его движителя с опорной поверхностью. Этот показатель характеризует максимальный уклон, который может преодолеть машина без пробуксовки, и напрямую зависит от свойств грунта.

Проведенные испытания (рис. 1) демонстрируют значительный разброс значений предельного угла сцепления для различных типов поверхностей:

– Наиболее благоприятные условия наблюдаются на сухой грунтовой дороге, где предельный угол достигает  $40^\circ$ . Это объясняется оптимальным сочетанием трения и сцепления колеса с уплотненной и сухой поверхностью.

– Увлажнение грунта приводит к существенному снижению проходимости: для мокрой грунтовой дороги предельный угол падает до  $30^\circ$ . Вода выступает в роли смазки, резко уменьшая коэффициент трения между шиной и почвой.

– Рыхлые и сыпучие грунты формируют отдельную группу с низкими показателями. Свежеотсыпанный рыхлый грунт позволяет развить угол лишь в  $20^\circ$ , а влажный песок —  $15^\circ$ . В данном случае сопротивление движению связано не только с трением, но и с необходимостью преодолевать силу деформации и сдвига самого грунта. Интересно, что сухой песок ( $25^\circ$ ) демонстрирует лучшие характеристики, чем влажный, так как вода в его порах усиливает слипание частиц и увеличивает сопротивление качению.

– Слежавшийся спрессованный грунт, несмотря на свою твердость, показывает относительно невысокий результат —  $25^\circ$ . Это может быть связано с его часто пылевидной или мелкоструктурной поверхностью, которая легко разрушается под колесом, снижая реальное пятно контакта.

– Наименее проходимой средой, согласно графику, является рыхлый снег, где предельный угол сцепления не превышает  $10^\circ$ . Низкая плотность, отсутствие твердых связей между кристаллами и их легкая подвижность под нагрузкой делают снег крайне сложным основанием для колесного движителя.

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие выводы. Полученные данные имеют фундаментальное значение для разработки адаптивных колесных движителей. Система управления такого движителя, определяя тип грунта (например, по косвенным признакам: проскальзыванию, сопротивлению качению, данным датчиков), должна не только изменять давление в шинах, но и корректировать стратегию управления тягой и моментом на каждом колесе. Для преодоления подъема на рыхлом снегу или влажном песке потребуются гораздо более плавная и деликатная подача крутящего момента, чем для движения по сухой грунтовой дороге. Таким образом, адаптация должна быть комплексной: геометрическая трансформация колеса + интеллектуальное управление силовой установкой.

**Библиографический список**

1. Ванторихин А.В. Теория и конструкция автомобилей повышенной проходимости: учебник для вузов / А.В. Ванторихин. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. — 543 с.
  2. Лукин П.П. Конструирование и расчет автомобиля: учебное пособие / П.П. Лукин, Г.А. Гаспарянц, В.Ф. Родионов. — М.: Машиностроение, 2019. — 440 с. — Разд. «Двигатели транспортных средств».
  3. Гришкевич А.И. Автомобили: теория эксплуатационных свойств / А.И. Гришкевич, В.М. Клинковштейн, Д.А. Антонов. — Минск: Вышэйшая школа, 2017. — 523 с.
  4. Иванов С.К. Адаптивные и трансформируемые двигатели для специальной колесной техники / С.К. Иванов // Вестник автомобильного транспорта. — 2022. — № 4 (112). — С. 45–52.
  5. Петров Р.Н. Система централизованного регулирования давления в шинах как основа адаптивного двигателя / Р.Н. Петров, А.С. Волков // Транспортные системы и технологии. — 2021. — Т. 7, № 3. — С. 88–101. — DOI: 10.17816/transsyst20217388-101.
  6. Smith J. Advanced Terrain Adaptive Mobility Systems: Concepts and Prototypes / J. Smith, K. Yamada // Journal of Terramechanics. — 2020. — Vol. 91. — P. 15-28. — DOI: 10.1016/j.jterra.2020.07.003.
  7. Классификация и технические требования к шинам для внедорожной техники: ГОСТ Р 58401-2019. — Введ. 2020-07-01. — М.: Стандартинформ, 2019. — 34 с.
  8. Методы испытаний колесных вездеходов на проходимость: ОСТ 37.001.469-2020. — М.: ФГУП «НАМИ», 2020. — 67 с.
  9. Семенов В.А. Математическое моделирование процесса взаимодействия адаптивного двигателя с деформируемым грунтом / В.А. Семенов, О.Л. Михайлов // Труды международной научно-технической конференции «Транспорт и логистика – 2023». — М.: МАДИ, 2023. — С. 134–140.
- Дневник науки | [www.dnevniknauki.ru](http://www.dnevniknauki.ru) | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

10. Техническое руководство по эксплуатации системы СТIS для автомобилей «Урал» и «КамАЗ»: руководство № Р-012.03. — Миасс: АО «АЗ „УРАЛ“», 2021. — 120 с.

11. Официальный сайт Международного общества террамеханики (ISTVS) [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.istvs.org> (дата обращения: 20.09.2025).

12. Патент 2784563 РФ, МПК В60В 15/00. Адаптивное колесо транспортного средства повышенной проходимости / Д.И. Соколов, П.В. Кузнецов; заявитель и патентообладатель ПАО «КАМАЗ». — № 2022101234; заявл. 11.01.2022; опубл. 15.11.2023, Бюл. № 32. — 15 с.