

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛЁСНОГО И ГУСЕНИЧНОГО ШАССИ ПРИ УСТАНОВКЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО МОДУЛЯ

**Кучерявый З.В.¹, Нестеренко Г.А.¹, Нестеренко И.С.¹, Войнаш С.А.², Кокиева Г.Е.^{3,4},
Иванов А.А.⁵**

¹Омский государственный технический университет, Омск;

²Рубцовский индустриальный институт (филиал) Алтайского государственного
технического университета им. И.И. Ползунова, Рубцовск;

³Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова,
Улан-Удэ;

⁴Арктический государственный агротехнологический университет, Якутск;

⁵Тверская государственная сельскохозяйственная академия, Тверь

Ключевые слова: устойчивость транспортных средств, колесное шасси, гусеничное шасси, Урал-4320, КамАЗ-4326, опрокидывание.

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ устойчивости против опрокидывания колёсных шасси полноприводных автомобилей Урал-4320 (6×6) и КамАЗ-4326 (4×4) и гусеничного шасси на примере МТ-ЛБ при установке специализированного модуля (медицинского/эвакуационного) с заданной массой и высотой центра тяжести, что приводит к значительному изменению распределения масс и повышению общего центра тяжести машин. Обоснована актуальность проблемы выбора базового шасси высокой проходимости для модульных транспортных средств специального назначения, работающих в условиях пересеченной местности. Исследованы показатели поперечной и продольной статической устойчивости на уклонах для всех трёх типов шасси, а также динамическая устойчивость при повороте. Выявлены положительные и отрицательные стороны каждого типа шасси. Выводом проделанной работы стало, что гусеничное шасси обеспечивает наилучшие показатели поперечной устойчивости (критический угол 34,6°) благодаря максимальной ширине опорного контура, однако уступает колёсным в транспортной скорости и экономичности. Среди колёсных шасси Урал-4320 имеет преимущество перед КамАЗ-4326 по поперечной устойчивости (28,5° и 25,1°), что обусловлено большей колёсной базой и массой, однако уступает в манёвренности. По продольной устойчивости все три типа шасси имеют высокие значения критических углов (73,5-75,4°). Наилучший показатель у МТ-ЛБ благодаря самому низкому центру тяжести.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STABILITY OF WHEELED AND TRACKED CHASSIS WHEN INSTALLING A SPECIALIZED MODULE

**Kucheryavyy Z.V.¹, Nesterenko G.A.¹, Nesterenko I.S.¹, Voinash S.A.², Kokieva G.E.^{3,4},
Ivanov A.A.⁵**

¹Omsk State Technical University, Omsk;

²Rubtsovsk Industrial Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University, Rubtsovsk;

³Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov, Ulan-Ude;

⁴Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk;

⁵Tver State Agricultural Academy, Tver

Keywords: vehicle stability, wheeled chassis, tracked chassis, URAL-4320, KamAZ-4326, rollover.

Abstract. The article provides a comparative analysis of the stability against overturning of wheeled chassis of all-wheel drive cars Ural-4320 (6×6) and KamAZ-4326 (4×4) and tracked chassis on the example of MT-LB when installing a specialized module (medical/evacuation) with a given weight and height center of gravity, which leads to a significant change in the distribution of masses and an increase in the overall center of gravity of the machines. The relevance of the problem of choosing a basic chassis of high cross-country ability for modular special-purpose vehicles operating in rough terrain conditions is justified. The indicators of transverse and longitudinal static stability on slopes for all three types of chassis, as well as dynamic stability during rotation, were studied. Positive and negative aspects of each chassis type were identified. The conclusion of the work done was that the tracked chassis provides the best indicators of transverse stability (critical angle 34.6°) due to the maximum width of the support contour, but is inferior to the wheeled

ones in transport speed and efficiency. Among the wheeled chassis, the Ural-4320 has an advantage over the KamAZ-4326 in transverse stability (28.5° and 25.1°), which is due to its larger wheelbase and weight, but is inferior in maneuverability. In terms of longitudinal stability, all three types of chassis have high critical angles (73.5 - 75.4°). The best indicator in MT-LB due to the lowest center of gravity.

Введение. Современные требования к наземным транспортно-технологическим средствам специального назначения предусматривают возможность быстрой адаптации автомобиля под различные задачи путём установки сменных модулей [1-3]. В качестве базовых шасси для таких решений наиболее часто рассматриваются колёсные автомобили повышенной проходимости и гусеничные транспортёры – тягачи [4-6]. Среди колёсных шасси особое место занимают Урал-4320 и КамАЗ-4326, обладающие высокой проходимостью.

Урал-4320 представляет собой полноприводный грузовой автомобиль с колёсной формулой 6×6, серийно выпускаемый с 1977 года. КамАЗ-4326 – более современный полноприводный автомобиль с колёсной формулой 4×4, который характеризуется меньшими габаритами и массой.

Гусеничные шасси, многоцелевой транспортёр, тягач МТ-ЛБ обладает принципиально разными характеристиками: большей опорной поверхностью, меньшим удельным давлением на грунт, и более высокой проходимостью и устойчивостью [7].

При установке специализированных модулей (ремонтных, генераторных, боевых, медицинских и др.), которые имеют значительную массу и высоко расположенный центр тяжести, проблема обеспечения устойчивости против опрокидывания становится критической [8]. Особенно важна статическая устойчивость на уклонах, так как именно она определяет безопасность стоянки и движения на пересечённой местности [9, 10].

Целью работы является проведение сравнительного анализа статической поперечной и продольной устойчивости трёх типов шасси (Урал-4320, КамАЗ-4326 и гусеничного шасси МТ-ЛБ) при установке специализированного модуля массой 2000 кг, выявить положительные и отрицательные стороны каждого варианта.

В качестве кандидатуры для установки модуля были приняты три типа шасси:

- Урал-4320 – полноприводный грузовой автомобиль повышенной проходимости;
- КамАЗ-4326 – полноприводный грузовой автомобиль повышенной проходимости;
- МТ-ЛБ – многоцелевой гусеничный транспортёр-тягач.

В качестве специализированного модуля принят модуль с условной массой 2000 кг и высотой центра тяжести 1,5 м (типовое значение, которое изменяется от комплектации модуля, например, ремонтная мастерская, генераторная установка или боевой модуль).

Основные параметры шасси, принятые для расчёта, приведены в таблице 1.

Табл. 1. Основные параметры сравниваемых шасси

Параметр	Обозначение	УРАЛ-4320	КамАЗ-4326	МТ-ЛБ
Колесная формула	–	6х6	4х4	Гусеничная
Снаряженная масса, кг	$m_{ш}$	7700	8025	9700
Полная масса, кг	$m_{полн}$	17300	11600	12200
Грузоподъемность, кг	–	7375	3275	2000
Колея (ширина опорного контура), м	B	1,95	2,0	2,50
База (опорная длина), м	L	4,00	4,25	3,70
Высота центра масс шасси, м	$h_{ш}$	1,10	1,05	0,85
Максимальная скорость, км/ч	V_{max}	85	90	60

Для оценки статической устойчивости рассматривается положение машины на поперечном и продольном уклоне. Опрокидывание наступает в момент, когда линия действия силы тяжести выходит за пределы опорного контура.

Поперечная устойчивость

Критический угол поперечного уклона по опрокидыванию определяется из условия равенства, опрокидывающего и восстанавливающего моментов:

$$\beta_{кр} = \arctg\left(\frac{B}{2h_{цм}}\right), \quad (1)$$

где B – колея (ширина опорного контура), м; $h_{цм}$ – высота центра тяжести машины с модулем, м.

Высота центра тяжести машины с учетом установки модуля:

$$h_{цм} = \frac{m_{ш} \cdot h_{ш} + m_{м} \cdot h_{м}}{m_{ш} + m_{м}}, \quad (2)$$

где $m_{ш}$ – масса шасси, кг; $h_{ш}$ – высота центра масс шасси, м; $m_{м}$ – масса модуля, кг; $h_{м}$ – высота центра масс модуля, м.

С учётом коэффициента поперечного сцепления колеса с опорной поверхностью μ критический угол наклона косогорья:

$$\beta_{кр.оп} = \arctg\left(\frac{k_{ст} - \mu}{1 + k_{ст} \cdot \mu}\right), \quad (3)$$

где μ – коэффициент поперечного сцепления колеса с опорной поверхностью; $k_{ст}$ – коэффициент статической устойчивости:

$$k_{ст} = \frac{B}{2h_{цм}}. \quad (4)$$

Продольная устойчивость

Критический угол продольного уклона (подъёма) по опрокидыванию:

$$\alpha_{кр} = \arctg\left(\frac{L}{h_{цм}}\right), \quad (5)$$

где L – продольная база, м.

Определение координат центра тяжести

Расчёт высоты центра тяжести для всех трёх типов шасси с установленным модулем выполнен по формуле (2). Результаты представлены в таблице 2.

Табл. 2. Расчет высоты центра тяжести

Параметр	Обозначение	Урал-4320	КамАЗ-4326	МТ-ЛБ
Масса шасси, кг	$m_{ш}$	7700	8025	9700
Высота центра масс шасси, м	$h_{ш}$	1,10	1,05	0,85
Масса модуля, кг	$m_{м}$	2000	2000	2000
Высота центра масс модуля, м	$h_{м}$	1,50	1,50	1,50
Общая масса, кг	$m_{общ}$	9700	10025	11700
Центр масс, м.	$h_{цм}$	1,182	1,140	0,961

Проанализировав данные, получаем, что гусеничное шасси МТ-ЛБ имеет наиболее низкое расположение центра тяжести (0,961 м) благодаря конструктивным особенностям (низкий силуэт, расположение основных агрегатов в нижней части корпуса). Среди колёсных шасси КамАЗ-4326 имеет несколько более низкий центр тяжести (1,140 м) по сравнению с Урал-4320 (1,182 м).

Статическая поперечная устойчивость

Расчёт критических углов поперечного уклона выполнен по формуле (1) с учётом коэффициента сцепления $\mu = 0,7$ (для сухого грунта). Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Табл. 3. Критические углы поперечной устойчивости

Параметр	Урал-4320	КамАЗ-4326	МТ-ЛБ
Коэффициент статической устойчивости	0,825	0,877	1,301
Критический угол (без учёта сцепления)	39,6	41,3	52,5
Критический угол (с учётом сцепления $\mu = 0,7$)	28,5	25,1	34,6
Запас устойчивости относительно КамАЗ-4326, %	+13,5	–	+37,8
Запас устойчивости относительно Урал-4320, %	–	-11,9	+21,4

Полученные данные показывают, что гусеничное шасси МТ-ЛБ имеет наилучшие показатели поперечной устойчивости (34,6°), что на 37,8% выше, чем у КамАЗ-4326, и на 21,4% выше, чем у Урал-4320. Среди колёсных шасси Урал-4320 превосходит КамАЗ-4326 на 13,5% по критическому углу поперечного уклона. Это объясняется большей шириной опорного контура гусеничного шасси и более низким расположением центра тяжести.

Статическая продольная устойчивость

Расчёт критических углов продольного уклона выполнен по формуле (5). Результаты представлены в таблице 4.

Продольная устойчивость всех трёх типов шасси находится на высоком уровне (критические углы превышают 73°). Наибольший критический угол имеет гусеничное шасси МТ-ЛБ (75,4°) благодаря самому низкому центру тяжести, несмотря на наименьшую опорную длину. КамАЗ-4326 занимает промежуточное положение (75,0°), Урал-4320 имеет наименьший показатель (73,5°) из – за наибольшей высоты центра тяжести.

Табл. 4. Критические углы продольной устойчивости

Параметр	Урал-4320	КамАЗ-4326	МТ-ЛБ
Продольная база L , м	4,00	4,25	3,70
Критический угол подъёма	73,5	75,0	75,4

Выводы

Установка специализированного модуля с заданной массой и высотой центра тяжести приводит к значительному изменению распределения масс и повышению общего центра тяжести машин. Наименьшая высота ЦТ зафиксирована у гусеничного шасси, наибольшая – у Урал-4320.

По показателям поперечной устойчивости гусеничное шасси МТ-ЛБ значительно превосходит оба колёсных шасси: критический угол составляет 34,6°, что на 37,8% выше, чем у КамАЗ-4326, и на 21,4% выше, чем у Урал-4320. Это обусловлено максимальной шириной опорного контура и наименьшей высотой центра тяжести.

По продольной устойчивости все три типа шасси имеют высокие значения критических углов (73,5-75,4°). Наилучший показатель у МТ-ЛБ благодаря самому низкому центру тяжести.

Заключение

Проведённый сравнительный анализ статической устойчивости показывает, что выбор типа шасси для установки специализированного модуля массой 2000 кг должен определяться условиями эксплуатации и требованиями к машине:

Для эксплуатации преимущественно на дорогах с твёрдым покрытием при необходимости высокой транспортной скорости и экономичности, а также при работе на малых уклонах, целесообразно применение КамАЗ-4326.

Для работы в условиях бездорожья, при необходимости установки тяжёлых модулей и высокой грузоподъёмности, а также при необходимости перевозки дополнительных грузов предпочтительным является Урал-4320.

В условиях предельного бездорожья, на слабых грунтах, при повышенных требованиях к устойчивости и минимальном удельном давлении на грунт следует отдавать предпочтение гусеничному шасси (МТ-ЛБ), однако необходимо учитывать, его грузоподъёмность.

При проектировании модулей на колёсных шасси следует предусматривать меры по повышению устойчивости: увеличение колеи, применение систем стабилизации, оптимизацию расположения модуля. Для гусеничных шасси основным направлением является оптимизация компоновки для снижения массы и повышения транспортной скорости.

Список литературы

1. Стурова Д.Ю., Колдин М. С. Модульный принцип проектирования в машиностроении // Наука и образование. – 2024. – Т. 7, №4.
2. Васильченко А.Д. Эволюция моделей сетевого производства европейского автомобилестроения в конце XX – начале XXI вв // Теоретическая экономика. – 2025. – №7(127). – С. 90-108. – DOI: 10.52957/2221-3260-2025-7-90-108.
3. Нестеренко Г.А., Нестеренко И.С. Проект транспортирующего автомобиля для ремонта техники в полевых условиях // Автомобильная промышленность. – 2023. – №4. – С. 4-6.
4. Кучерявый З.В., Нестеренко Г.А., Нестеренко И.С. Выбор базового шасси для передвижного медицинского комплекса в строительстве // Современное строительство и архитектура. – 2026. – №6(73). – DOI: 10.60797/mca.2026.73.4.
5. Патент №2128814 РФ. Бронированная ремонтно-эвакуационная машина / А.И. Никонов, А.В. Комаров, С.Л. Нечеухин. – Заявка №96120947 от 22.10.1996; опублик. 10.04.1999.
6. Шкитов М.С., Нестеренко Г.А., Нестеренко И.С. Передвижной пункт управления на базе автомобиля КамАЗ-5350 // Тенденции развития науки и образования. – 2022. – №91-7. – С. 75-77. – DOI: 10.18411/tmio-11-2022-346.
7. Савин В.И., Забара Н.А. Перспективы применения многоцелевого транспортера - тягача МТ-ЛБ в Вооруженных силах Российской Федерации // Актуальные проблемы военно-научных исследований: сборник научных трудов. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – С. 218-226.
8. Абдуллабеков Р.Н., Федорчук В.Е., Минникова Т.В. Передвижные медицинские комплексы в России // Медицинские технологии. Оценка и выбор. – 2021. – №3(43). – С. 45-52. – DOI: 10.17116/medtech20214303145.
9. Панамарев А.М., Акулов И.Ю. Анализ использования переносной лаборатории 2М6У и её комплектации // Актуальные вопросы физико-математических и технических наук в свете современных исследований АПК: Материалы национальной научно-практической конференции (23 октября 2024 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 333-338.
10. Холоденко Д.А. Математическое моделирование поворота транспортера-тягача МТ-ЛБ с бесступенчатым регулированием радиуса поворота // Актуальные вопросы перспективных направлений применения вооружения, военной и специальной техники: Сборник научных трудов I Межведомственной научно-практической конференции. – СПб.: ООО "Медиапапир", 2019. – С. 294-300.

References

1. Sturova D.Yu., Koldin M.S. Modular Design Principle in Mechanical Engineering // Science and education. 2024, vol. 7, no. 4.
2. Vasilchenko A.D. Evolution of Network Production Models in the European Automobile Industry in the Late 20th – Early 21st Centuries // Theoretical Economics. 2025, no. 7(127), pp. 90-108. DOI: 10.52957/2221-3260-2025-7-90-108.
3. Nesterenko G.A., Nesterenko I.S. Project of a transport vehicle for repairing equipment in the field // Automotive Industry. 2023, no. 4, pp. 4-6.
4. Kucheryavyi Z.V., Nesterenko G.A., Nesterenko I.S. The choice of a base chassis for a mobile medical complex in construction // Modern construction and architecture. 2026, no. 6(73). DOI 10.60797/mca.2026.73.4.
5. Patent No. 2128814 RU. Armored recovery vehicle / A.I. Nikonov, A.V. Komarov, S.L. Necheukhin. – Appl. No. 96120947 from 22.10.1996; publ. 10.04.1999.
6. Shkitov M.S., Nesterenko G.A., Nesterenko I.S. Mobile control post based on the KamAZ-5350 vehicle // Trends in the Development of Science and Education. 2022, no. 91-7, pp. 75-77. DOI: 10.18411/tmio-11-2022-346.
7. Savin V.I., Zabara N.A. Prospects for the use of the MT-LB multipurpose tractor transporter in the Armed Forces of the Russian Federation // Current issues in military scientific research: collection of scientific papers. – SPb.: POLYTECH-PRESS, 2019. – P. 218-226.
8. Abdullabekov R.N., Fedorchuk V.E., Minnikova T.V. Mobile medical complexes in Russia // Medical technologies. Evaluation and selection. 2021, no. 3(43), pp. 45-52. DOI: 10.17116/medtech20214303145.
9. Panamarev A.M., Akulov I.Y. Analysis of the use of the 2M6U portable laboratory and its equipment // Current issues in the physical, mathematical, and technical sciences in the context of modern research in the agro-industrial complex: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference (October 23, 2024). – Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2024. – P. 333-338.
10. Kholodenko D.A. Mathematical modeling of the rotation of the MT-LB tractor conveyor with stepless control of the turning radius // Current issues and promising areas of application of weapons, military and special equipment:

Сведения об авторах:

Information about authors:

Кучерявый Захар Викторович – аспирант	Kucheryavyy Zakhar Viktorovich – postgraduate student
Нестеренко Григорий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины»	Nesterenko Grigory Anatolyevich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of "Hydromechanics and transport machines"
Нестеренко Ирина Сергеевна – старший преподаватель кафедры «Гидромеханика и транспортные машины»	Nesterenko Irina Sergeevna – senior lecturer of the Department of "Hydromechanics and transport machines"
Войнаш Сергей Александрович – младший научный сотрудник	Voinash Sergey Aleksandrovich – junior researcher
Кокиева Галия Ергешевна – доктор технических наук, доцент	Kokieva Galia Ergeshevna – doctor of technical sciences, associate professor
Иванов Александр Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация автомобилей»	Ivanov Aleksandr Alekseevich – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Department "technical operation of cars"
sergeyvoinash@yandex.ru	

Получена 04.08.2026