

Анализ конструктивно-компоновочных исполнений гусеничных поездов для внедорожных контейнерных перевозок



Георгий КОТИЕВ



Кирилл ЕВСЕЕВ



Захид ГОДЖАЕВ

Георгий Олегович Котиев¹, Кирилл Борисович Евсеев², Захид Адыгезалович Годжаев³

^{1, 2} Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

³ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия.

✉ ² kb_evseev@bmstu.ru.

АННОТАЦИЯ

Обосновывается актуальность проведения комплексного сравнения различных вариантов исполнений транспортных средств для внедорожных контейнерных перевозок.

В связи с необходимостью определения конкретного технического решения при разработке гусеничного поезда предлагается использование метода анализа иерархий, предназначенного для решения задач, связанных с определением приоритетов многокритериальной иерархической структуры цели, а также в условиях наличия разнородных критериев или размерных и безразмерных показателей.

В качестве основы комплексного сравнения транспортных средств для внедорожных контейнерных перевозок предложена иерархия свойства подвижности, которая считается определяющей для выбора приоритетного варианта конструктивно-компоновочного исполнения.

Целью работы является обоснование выбора приоритетного технического решения гусеничных поездов для внедорожных контейнерных перевозок на основе научно обоснованной иерархии свойства подвижности.

Для достижения поставленной цели предложено последовательное решение следующих задач: формирование требований к транспортным средствам и иерархии эксплуатационных свойств; анализ существующих конструктивно-компоновочных решений и обоснование выбора альтернатив (конкретных конструктивных исполнений гусеничных поездов); проведение иерархического синтеза критериев на основании результатов экспертной оценки; определение предвзвешенного приоритета альтернатив; получение показателей эксплуатационных свойств методами имитационного математиче-

ского моделирования и/или натурно-математического моделирования; определение приоритетного технического решения.

В статье рассматривается целесообразность использования гусеничных поездов для перевозки как одного 45-футового контейнера, так и для одновременной перевозки двух 20-футовых контейнеров суммарной массой 61 т. В результате анализа существующих конструктивно-компоновочных исполнений гусеничных поездов установлено, что обеспечить такую грузоподъемность может только транспортное средство типа СВГ-701 «Ямал», разработанное в 80-х годах прошлого века и которое в настоящее время не производится. Существующие современные сочлененные гусеничные машины не могут обеспечить перевозку таких грузов. Поэтому становится актуальной задача определения приоритетного конструктивно-компоновочного решения для создания гусеничных поездов на современном этапе развития техники и технологий.

Предложены варианты конструктивно-компоновочных исполнений гусеничных поездов для внедорожных контейнерных перевозок: седельный одношарнирный полуприцепный гусеничный поезд и седельный двухшарнирный гусеничный поезд. Используя метод анализа иерархий, на основе мнений экспертов и с учётом иерархии эксплуатационных свойств было установлено, что приоритетным техническим решением является седельный двухшарнирный гусеничный поезд. Однако в силу малого различия между показателями приоритетов вариантов, необходимо проведение дальнейших исследований по определению значений показателей эксплуатационных свойств и повторного сравнения с учётом полученных результатов.

Ключевые слова: гусеничный поезд, контейнеры, технический облик, конструктивно-компоновочное исполнение, метод анализа иерархий, приоритетное техническое решение.

Для цитирования: Котиев Г. О., Евсеев К. Б., Годжаев З. А. Анализ конструктивно-компоновочных исполнений гусеничных поездов для внедорожных контейнерных перевозок // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 5 (96). С. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-5-3>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.



ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях различные страны активно осваивают ранее малоосвоенные территории, не имеющие развитой дорожной сети, дорог с твёрдым покрытием. Одним из важнейших элементов в разработке оптимальных транспортно-логистических моделей является рациональный выбор транспортных средств, отвечающих комплексу критериев, связанных в том числе с климатическими и экономическими условиями эксплуатации. Растущая контейнеризация перевозок, эффективность её использования в силу сокращения затрат на перевалку грузов и большей их сохранности обуславливают актуальность технических решений, способных обеспечить доставку грузовых контейнеров в такие местности. Случаем, требующим особого рассмотрения, являются географические зоны, где отсутствует возможность использования колёсной техники, в первую очередь, районы Крайнего Севера. Совокупность приведённых условий диктует необходимость поиска оптимальных конструктивно-компоновочных исполнений транспортных средств (ТС).

Для проведения комплексного сравнения их различных вариантов существуют различные методы. Известны методы, основанные на использовании обобщённых оценок по различным свойствам, они подробно рассмотрены в работах [1; 2]. Однако такие методы достаточно сложны для практического применения, учитывают относительно небольшое количество измерителей свойств, содержат большое количество субъективных коэффициентов оценки, и большинство из них плохо применимы на этапе проведения научно-исследовательских работ.

В настоящее время для комплексного сравнения эффективности различных транспортных средств широкое распространение получил *метод анализа иерархий (МАИ)*, разработанный Т. Саати для решения задач, связанных с необходимостью определения приоритетов многокритериальной иерархической структуры цели [3; 4]. Основным достоинством метода является возможность одновременного учёта различных разнородных критериев, которые могут иметь не только размерные и безразмерные показатели свойств, но и количественную и качественную оценку. Известны труды в области комплексного сравнения различных ТС, в основу

которых положен МАИ, подтверждающие его эффективность [5–11].

Целью работы является обоснование выбора приоритетного технического решения гусеничных поездов для внедорожных контейнерных перевозок на основе научно обоснованной иерархии свойства подвижности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Метод анализа иерархий

Рассмотрим применение метода анализа иерархий при сравнении различных вариантов конструктивно-компоновочных исполнений ТС для внедорожных контейнерных перевозок. Поскольку использование колёсных машин, как правило, требует дорог или подготовленной местности, то этот тип ТС из рассмотрения исключён.

На основе разработанной иерархии эксплуатационных свойств [12] проведём сравнительную оценку альтернатив ТС для внедорожных контейнерных перевозок методом анализа иерархий, полагая, что подвижность является определяющим критерием для выбора конструктивно-компоновочных исполнений.

Метод анализа иерархий для определения значимости критериев иерархии эксплуатационных свойств подвижности ТС для внедорожных контейнерных перевозок можно представить в виде следующих последовательных шагов [3; 4]:

1. Разработка иерархии эксплуатационных свойств подвижности ТС для внедорожных контейнерных перевозок.
2. Формирование матриц парных сравнений для каждого уровня критериев.
3. Получение экспертных суждений для каждой матрицы парных сравнений.
4. Определение локальных приоритетов критериев и альтернатив.
5. Определение согласованности матриц.
6. Синтез приоритетов.
7. Определение согласованности иерархии.

Анализ конструктивно-компоновочных решений транспортных средств для внедорожных контейнерных перевозок

В работе [13] установлено, что кардинальное повышение проходимости ТС для внедорожных контейнерных перевозок можно достичь только путём использования многозвенных гусеничных машин или гусеничных

поездов. Рассмотрим существующие и возможные конструктивно-компоновочные решения для гусеничных поездов, предназначенных для контейнерных перевозок, с учётом их классификации [13–16].

Работы по созданию экспериментальных образцов гусеничных поездов для перевозки тяжёлых неделимых грузов в России велись в НИИ-21. В результате в 1964 году был создан макетный образец гусеничного вездехода ДГМ-1 грузоподъёмностью 16 т (рис. 1)¹, выполненного по полуприцепной схеме. В ходе проведения дорожных испытаний были определены преимущества гусеничных поездов по сравнению с одиночными гусеничными машинами при их эксплуатации в условиях Крайнего Севера в части проходимости, грузоподъёмности и грузоместности.

Известно другое конструктивно-компоновочное решение для гусеничного шасси, которое в 1970 году было получено в результате проведения ряда научно-исследовательских и конструкторских работ, проводимых КБ-3 ленинградского Кировского завода. В результате были разработаны опытные образцы самоходной пусковой установки на гусеничном ходу, выполненные по вагонной схеме: «объект 825 Сп2» и «объект 825 Сп3», представляющие собой две гусеничные машины, имеющие независимое управление и соединённые через шарнирные опорно-поворотные устройства с рамой-лафетом грузоподъёмностью 60 т. Конструктивно-компоновочное решение не получило своего развития в силу высоких требований по вибронгруженности к перевозимому грузу, которые на тот момент не могли обеспечить с использованием шасси существующих гусеничных машин. Внешний вид модели «объекта 825» на базе двух танков² представлен на рис. 2.

Другим гусеничным поездом, разработанным СКБ «Газстроймашина», является сочленённый гусеничный вездеход БТ361А-01 «Тюмень», разработанный в конце 1970-х годов. Гусеничный вездеход выполнен по



Рис. 1. Сочленённый гусеничный вездеход ДГМ-1.

прицепной многошарнирной схеме: имел две шарнирно соединённые с транспортной платформой гусеничные тележки, которые, в свою очередь, между собой были соединены при помощи узла сочленения. Вездеход оснащён дизельным двигателем ЯМЗ-240БМ и имел механический привод ведущих колёс гусеничных тележек. Криволинейное движение вездехода осуществлялось за счёт управления гидроцилиндрами в узле сочленения. Для предотвращения возникновения продольно-угловых колебаний в шарнирных узлах, соединяющих транспортную платформу с гусеничными тележками, были установлены амортизаторы. Внешний вид вездехода БТ361А-01 «Тюмень»³ представлен на рис. 3, а его технические характеристики приведены в табл. 1.

В конце 1980-х годов совместно с канадской компанией Foremost⁴ разработан гусеничный вездеход СВГ-701 «Ямал» грузоподъёмностью до 70 тонн. Вездеход был построен по седельной двухшарнирной схеме: две независимые гусеничные тележки соединены при помощи двух шарниров с транспортной платформой, на которой размещались кабина и силовая установка. Внешний вид вездехода СВГ-701 «Ямал»³ представлен на рис. 4, а его технические характеристики приведены в табл. 2.

Другой конструкцией гусеничных поездов являются четырёхгусеничные вездеходы, выполненные по седельной двухшарнирной схеме, с двумя гусеничными тележками,

¹ Степанов А. Сочленённые гусеничные и колёсные машины высокой проходимости // Техника и вооружение. – 2003. – № 12. – С. 34–38. [Электронный ресурс]: Портал «ВикиЧтение». Раздел: Военное дело. <https://military.wikireading.ru/56023>. Доступ 21.09.2021.

² Интернет-портал информационного агентства «Оружие России» [Электронный ресурс]: <https://www.arms-expro.ru/articles/armed-forces/rvsn-nerealizovannyy-proekt-pgrk-tselina-2-s-raketoy-rt-23uttkh-15zh62/>. Доступ 21.09.2021. /

³ Славин О. Вездеход «Ямал»: болотный монстр / Автомобильный портал «5 Колесо». 03.06.2016 [Электронный ресурс]: <https://5koleso.ru/articles/obzory/vezdehod-yamal-bolotny-monstr/>. Доступ 21.09.2021.

⁴ Porter, D. From the Archives, The Foremost Yamal | Foremost Blog. Сайт компании Foremost. [Электронный ресурс]: <https://www.foremost.ca/archives-foremost-yamal/>. Доступ 21.09.2021.





Рис. 2. Самоходная пусковая установка «объект 825» (макет) (Музей истории и техники ОАО «Кировский завод», 2001 г. Фото: bastion-karpenko.narod.ru⁴).



Рис. 3. Сочленённый гусеничный вездеход БТ361А-01 «Тюмень»⁵.

Таблица 1
Технические характеристики
БТ361А-01 «Тюмень»^{1,3}

Параметр	Значение*
Мощность двигателя, кВт	220
Среднее давление движителя на грунт, кг/см ²	0,33
Снаряжённая масса, т	46
Грузоподъёмность, т	36
Максимальная скорость, км/ч	15
Дорожный просвет, мм	600
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	15560х3740х3760
Ширина гусеницы, мм	1200
Габариты транспортной платформы (ДхШ), мм	8000х3500
Угол преодолеваемого подъёма, градус	16
Минимальный радиус разворота, м	17
Глубина преодолеваемого брода, м	1,5

*См., напр., [Электронный ресурс]: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/617530>. Доступ 21.09.2021.

опорно-поворотные устройства которых имеют механическую связь между собой, обеспечивающую согласование углов поворота гусеничных тележек в горизонтальной пло-

скости при повороте вездехода, при этом гусеничные тележки имеют возможность независимого «качания» в продольной плоскости тележки. В 1973 году в НАМИ разработан первый прототип НАМИ-0157 грузоподъёмностью 8 т, выполненный по такой схеме. Впоследствии в 1980-х годах на УралАЗе развёрнуто серийное производство вездехода Урал-5920^{5, 6, 7}, внешний вид которого представлен на рис. 5. Технические характеристики вездехода Урал-5920 приведены в табл. 3.

Среди зарубежных экспериментальных образцов гусеничных поездов отметим прототип подвижного грунтового ракетного комплекса стратегического назначения Midgetman, разработанный совместно компаниями Martin Marietta и Caterpillar в США в конце 1980-х годов, выполненный по при-

⁵ Автомобильный сайт Wroom.ru. [Электронный ресурс]: <https://wroom.ru/cars/ural/5920>. Доступ 21.09.2021.

⁶ Автомобильный сайт All-auto.ru. [Электронный ресурс]: <https://all-auto.org/858-ural-5920.html>. Доступ 21.09.2021.

⁷ Самойленко В. «Урал-5920» – машина, которая не нуждается в дорогах. Интернет-портал FB. 08.11.2016. [Электронный ресурс]: <https://fb.ru/article/275695/ural-mashina-kotoraya-ne-nujdaetsya-v-dorogah>. Доступ 21.09.2021.



Рис. 4. Гусеничный вездеход СВГ-701 «Ямал»⁸.

цепной схеме. Полная масса гусеничного поезда составляла 108 т^{8,9} (рис. 6).

Существуют конструктивно-компоновочные решения зарубежных четырёхгусеничных вездеходов, выполненные по седельной одношарнирной схеме, среди которых наиболее известны канадские гусеничные вездеходы: Nodwell RN200 грузоподъемностью 12 т и Nodwell RN400 грузоподъемностью 18 т. Впоследствии компания Foremost запустила линию четырёхгусеничных вездеходов, выполненных по седельной двухшарнирной схеме: Foremost Chieftain-D, грузоподъемностью 13,6 т, и Foremost «Husky-8» грузоподъемностью 36 т, которые производятся и в настоящее время. Внешний вид вездехода Foremost Husky-8¹⁰ представлен на рис. 7, а технические характеристики приведены в табл. 4.

Кроме этого, среди четырёхгусеничных вездеходов, производимых компанией Foremost, выделим следующие модели: Foremost Chieftain-R грузоподъемностью 13,6 т и Foremost Chieftain-C грузоподъемностью 15 т, выполненные по прицепной сочленённой схеме. Они оснащены гидравлическим приводом на узле сочленения, который обеспечивает поворот транспортного средства.

Среди гусеничных поездов, выпускающихся на сегодняшний день на территории РФ, существуют двухзвенные гусеничные вездеходы семейства «Витязь» различной

⁸ Secret Projects Forum. [Электронный ресурс]: <https://www.secretprojects.co.uk/threads/midgetman-sicbm-mobile-launchers.1076/>. Доступ 21.09.2021.

⁹ ICBM Hard Mobile Launcher. [Электронный ресурс]: <https://weaponsandwarfare.com/2019/06/05/icbm-hard-mobile-launcher/>. Доступ 21.09.2021.

¹⁰ Веб-сайт компании Foremost. [Электронный ресурс]: <https://www.foremost.ca/foremost-mobile-equipment/tracked-vehicles/husky-8/>. Доступ 21.09.2021.

Таблица 2

Технические характеристики СВГ-701 «Ямал»³

Параметр	Значение
Мощность двигателя, кВт	525
Среднее давление движителя на грунт, кг/см ²	0,39
Снаряжённая масса, т	97,5
Грузоподъёмность, т	70
Максимальная скорость, км/ч	15
Дорожный просвет, мм	520
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	20560х4700х4500
Ширина гусеницы, мм	1850
Длина транспортной платформы, мм	12000
Угол преодолеваемого подъёма, градус	30
Минимальный радиус разворота, м	22
Глубина преодолеваемого брода, м	2,6

грузоподъёмности, выполненные по прицепной схеме, криволинейное движение которых обеспечивается кинематическим способом, путём создания складывающего момента в поворотно-сцепном устройстве, расположенного между секциями.

Для внедорожных контейнерных перевозок в настоящее время могут быть использованы в качестве базовой модели двухзвенные гусеничные транспортёры ДТ-30-1 или ДТ-30МН, дополнительно оборудованные транспортной платформой. Внешний вид и габаритные размеры транспортёров¹¹ представлены на рис. 8 и 9, а их технические характеристики приведены в табл. 5.

Представим основные технические характеристики существующих гусеничных поездов графически в виде их зависимостей от грузоподъёмности ТС (рис. 10).

¹¹ «Витязь» – машиностроительная компания, город Ишимбай. [Электронный ресурс]: <http://www.bolotohod.ru/>. Доступ 21.09.2021.





Рис. 5. Гусеничный вездеход Урал-59206.



Рис. 6. Подвижный грунтовой ракетный комплекс Midgetman[®].

Таблица 3
Технические характеристики вездехода
Урал-5920^{5, 6, 7}

Параметр	Значение
Мощность двигателя, кВт	154
Среднее давление движителя на грунт, кг/см ²	0,22
Снаряжённая масса, т	14,5
Грузоподъёмность, т	8
Максимальная скорость, км/ч	30
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	9900х300х3700
Ширина гусеницы, мм	970
Габариты транспортной платформы (ДхШ), мм	5740х2317
Угол преодолеваемого подъёма, градус	30
Минимальный радиус разворота, м	14
Глубина преодолеваемого брода, м	1,8

Таблица 4
Технические характеристики
Foremost Husky-8¹⁰

Параметр	Значение
Мощность двигателя, кВт	328
Среднее давление движителя на грунт, кг/см ²	0,32
Снаряжённая масса, т	42,9
Грузоподъёмность, т	36,3
Максимальная скорость, км/ч	14,5
Дорожный просвет, мм	533
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	14757х3632х3810
Ширина гусеницы, мм	1430
Габариты транспортной платформы (ДхШ), мм	10465х2743
Угол преодолеваемого подъёма, градус	31
Минимальный радиус разворота, м	14
Глубина преодолеваемого брода, м	1,43

Анализируя технические характеристики как функции грузоподъёмности, можно сделать следующие выводы:

- с ростом грузоподъёмности гусеничных поездов возрастает минимальный радиус разворота и среднее давление на грунт, при

этом коэффициент грузоподъёмности в среднем равен 0,8 и в основном зависит от принятых конструктивно-компоновочных решений;

- среднее давление на грунт у рассмотренных гусеничных вездеходов находится в пределах от 0,2 до 0,4 кг/см²;



Рис. 7. Гусеничный вездеход Foremost Husky-8¹⁰.

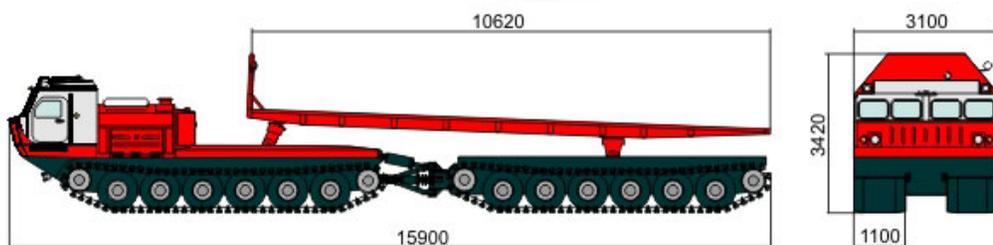


Рис. 8. Сочленённый гусеничный транспортёр ДТ-30-1 и его габаритные размеры¹¹.

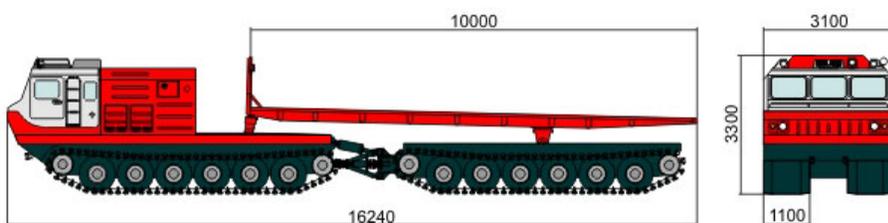


Рис. 9. Сочленённый гусеничный транспортёр ДТ-30МН и его габаритные размеры¹¹.



**Технические характеристики гусеничных транспортёров¹²
ДТ-30-1 и ДТ-30МН**

Параметр	ДТ-30-1	ДТ-30МН
Мощность двигателя, кВт	522	588
Среднее давление движителя на грунт, кг/см ²	0,3	0,3
Снаряжённая масса, т	29	30
Грузоподъёмность, т	30	30
Максимальная скорость, км/ч	37	37
Дорожный просвет, мм	350	350
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	15900х3100х3420	16240х3100х3300
Ширина гусеницы, мм	1100	1100
Длина транспортной платформы, мм	10620	10000
Угол преодолеваемого подъёма, градус	30	30
Минимальный радиус разворота, м	17,3	17,3
Глубина преодолеваемого брода, м	1,8	1,8

• максимальная скорость движения определяется мощностью силовой установки и в зависимости от грузоподъёмности и принятых конструктивно-компоновочных решений изменяется от 15 км/ч до 37 км/ч;

• угол преодолеваемого подъёма для всех рассмотренных гусеничных вездеходов принимает практически постоянное значение не менее 30 градусов.

Решение задачи выбора оптимального варианта

При использовании гусеничных поездов для контейнерных перевозок экономически целесообразной представляется возможность перевозки контейнеров с использованием одного универсального транспортного средства, позволяющего обеспечить перевозку как одного 45-футового контейнера, так и одновременную перевозку двух 20-футовых контейнеров. Таким образом, грузоподъёмность ТС определяется суммарной массой брутто двух 20-футовых контейнеров (61 т), а габаритные размеры транспортной платформы должны соответствовать габаритам 45-футового контейнера. Из представленных гусеничных вездеходов обеспечить такую грузоподъёмность может только вездеход СВГ-701 «Ямал», который в настоящее время не производится. Грузоподъёмность современных сочленённых гусеничных транспортёров ДТ-30-1 и ДТ-30МН составляет 30 т, таким образом, габаритные размеры транспортной платформы и грузоподъёмность транспортёров позволяют перевозить только один 20-футовый

контейнер. Рассмотренные зарубежные образцы гусеничных поездов также не могут обеспечить требуемую грузоподъёмность или являются объектом вооружения, в связи с этим актуальна задача определения приоритетного технического решения для создания гусеничных поездов, предназначенных для контейнерных перевозок и позволяющих осуществить перевозку как одного 45-футового контейнера, так и одновременную перевозку двух 20-футовых контейнеров.

Для решения задачи определения предпочтительного варианта технического облика транспортного средства для внедорожных контейнерных перевозок будем использовать МАИ. Для иерархии подвижности (рис. 11) [12], в соответствии с МАИ, составим таблицы матриц парных сравнений критериев и альтернатив с использованием экспертных оценок, выполненных авторами.

В качестве сравниваемых альтернатив рассмотрим беспилотные гусеничные поезда: седельный одношарнирный полуприцепной гусеничный поезд (альтернатива «А») и седельный двухшарнирный гусеничный поезд (альтернатива «В»), технический облик которых рассмотрен и обоснован в работе [13]. Внешний вид альтернатив представлен на рис. 12.

После проведения экспертной оценки для верхнего первого уровня иерархии матрица парных сравнений будет иметь вид, представленный в табл. 6. Также составлены матрицы парных сравнений для критериев второго уровня иерархии и определяются локальные

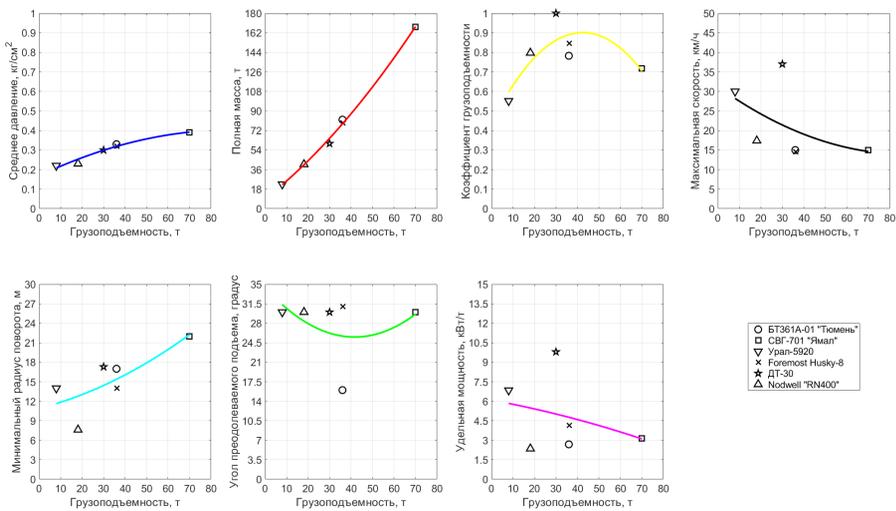


Рис. 10. Технические характеристики существующих гусеничных поездов (выполнено авторами).



Рис. 11. Иерархия эксплуатационных свойств ТС для контейнерных перевозок (выполнено авторами).

приоритеты. Матрицы парных сравнений для критериев второго уровня иерархии представлены в таблицах 7 и 8.

Локальные приоритеты критерия «запас хода» (К3.1) будут соответствовать локальным приоритетам критерия автономности первого уровня иерархии.

Для каждой матрицы парных сравнений критериев определены локальные приоритеты, а затем для критериев низшего уровня определены глобальные приоритеты (табл. 9) с учётом локальных приоритетов критериев вышестоящего уровня иерархии свойств.

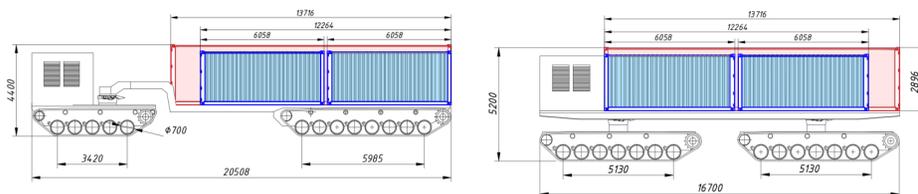
Анализируя полученный вектор глобальных приоритетов критериев низшего уровня иерархии, можно сделать вывод, что приоритетными критериями являются следующие (в порядке убывания значимости): опорная проходимость, запас хода, профильная проходимость и бродоходимость. Перечисленные критерии в большей степени влияют на выбор

конкретного конструктивного исполнения ТС по сравнению с остальными: динамичностью, управляемостью и устойчивостью и способностью двигаться по неровностям пути. Определяющим критерием является опорная проходимость, которая имеет максимальный приоритет, равный 0,382.

Аналогично для рассматриваемых альтернатив ТС с учётом экспертной оценки (качественная оценка) была получена матрица парных сравнений альтернатив и определён вектор локальных приоритетов для каждой матрицы (табл. 10).

Для оценки адекватности полученных результатов необходимо оценить согласованность матриц парных сравнений, которые отражают субъективные суждения, так как компоненты, входящие в них, как правило, отличаются от согласованных значений. Мера оценки степени отклонения от согласованности является индекс согласованности





Альтернатива «А»
Альтернатива «В»
Рис. 12. Альтернативы гусеничных ТС для контейнерных перевозок (выполнено авторами).

Таблица 6

Матрица парных сравнений критериев первого уровня иерархии (выполнено авторами)

Подвижность	Проходимость	Быстроходность	Автономность
Проходимость (К1)	1	5	3
Быстроходность (К2)	1/5	1	1/3
Автономность (К3)	1/3	3	1

Таблица 7

Матрица парных сравнений критерия проходимости (выполнено авторами)

Проходимость	Опорная проходимость	Профильная проходимость	Бродоходимость
Опорная проходимость (К1.1)	1	3	3
Профильная проходимость (К1.2)	1/3	1	1
Бродоходимость (К1.3)	1/3	1	1

Таблица 8

Матрица парных сравнений критерия быстроходности (выполнено авторами)

Быстроходность	Динамичность	Способность двигаться по неровностям пути	Управляемость и устойчивость
Динамичность (К2.1)	1	5	1/7
Способность двигаться по неровностям пути (К2.2)	1/5	1	1/9
Управляемость и устойчивость (К2.3)	7	9	1

Таблица 9

Глобальные приоритеты критериев низшего уровня иерархии (выполнено авторами)

Критерий	Приоритет
Опорная проходимость (К1.1)	0,382
Профильная проходимость (К1.2)	0,1275
Бродоходимость (К1.3)	0,1275
Динамичность (К2.1)	0,015
Способность двигаться по неровностям пути (К2.2)	0,045
Управляемость и устойчивость (К2.3)	0,045
Запас хода (К3.1)	0,258

(ИС) [4], который определяется следующим выражением:

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1},$$

где λ_{\max} – максимальное собственное значение рассматриваемой матрицы парных

сравнений, а n – размерность матрицы парных сравнений.

Индекс согласованности сопоставляется со статистическим случайным значением, называемым случайным индексом (СИ), получаемым в результате обработки большого числа матриц различной размерности [3; 4]. Отклонение от согласованности считается допустимым при отношении ИС к СИ менее 10 %. Для рассмотренных матриц парных сравнений отношение ИС к СИ не превышает 2,5 %, таким образом, мнения экспертов считаются согласованными.

Далее, на основании полученных глобальных приоритетов критериев и локальных приоритетов альтернатив проводится иерархический синтез, в результате которого определяется глобальный вектор предпочтительности альтернатив, результаты приведены в табл. 11.

**Матрицы парных сравнений альтернатив и вектор их локальных приоритетов
(выполнено авторами)**

			Вектор приоритетов				Вектор приоритетов
K1.1	A	B		K2.1	A	B	
A	1	1	0,5	A	1	1	0,5
B	1	1	0,5	B	1	1	0,5
K1.2	A	B		K2.2	A	B	
A	1	1/3	0,25	A	1	1	0,5
B	3	1	0,75	B	1	1	0,5
K1.3	A	B		K2.3	A	B	
A	1	1/5	0,17	A	1	5	0,83
B	5	1	0,83	B	1/5	1	0,17
K3.1	A	B					
A	1	1	0,5				
B	1	1	0,5				

Таким образом, анализируя результаты, полученные на основе экспертной оценки, можно установить, что приоритетным техническим решением является седельный двухшарнирный гусеничный поезд, однако, учитывая незначительную разницу в значениях вектора глобальных приоритетов, необходимо проведение дальнейших исследований по определению значений показателей свойств и повторной оценки с учётом полученных результатов. Очевидно, что сравнительная оценка эффективности применения конструктивного исполнения гусеничных поездов для вновь разрабатываемых ТС не представляется возможной без имитационного математического моделирования рабочих процессов на ЭВМ [17; 18]. Также для решения представленной задачи может эффективно применяться комплекс натурно-математического моделирования, позволяющий имитировать движение транспортных средств по статистически заданным трассам под управлением «водителя-оператора», находящегося за компьютером, в режиме «реального времени».

Таким образом, сравнение различных вариантов конструктивно-компоновочных исполнений гусеничных поездов для внедорожных контейнерных перевозок состоит из следующих этапов:

- формирование иерархии эксплуатационных свойств с разделением на уровни критериев;
- определение альтернатив по результатам анализа конструктивно-компоновочных исполнений;
- экспертная оценка вариантов альтернатив с использованием метода анализа иерархий, выбор альтернатив;

Таблица 11

**Глобальные приоритеты альтернатив
(выполнено авторами)**

Альтернатива	Приоритет
«А»	0,44
«В»	0,56

- определение показателей свойств для выбранных альтернатив методами имитационного математического моделирования (натурно-математического моделирования);
- определение приоритетного технического решения с учётом результатов, полученных при проведении имитационного математического моделирования (натурно-математического моделирования).

ВЫВОДЫ

В результате анализа конструктивно-компоновочных исполнений существующих гусеничных поездов установлены зависимости, отражающие изменение основных технических характеристик, связанных с требуемой грузоподъемностью ТС. Из представленных гусеничных вездеходов обеспечить такую грузоподъемность может только не выпускающийся сегодня вездеход СВГ-701 «Ямал». Существующие гусеничные вездеходы не могут обеспечить требуемую грузоподъемность, поэтому на основании результатов анализа сформированы требования к техническим характеристикам разрабатываемых транспортных средств для перевозки одного 45-футового контейнера или двух 20-футовых контейнеров.

На основе иерархии эксплуатационных свойств беспилотных гусеничных поездов,



предназначенных для внедорожных контейнерных перевозок, и мнений экспертов методом анализа иерархий установлено, что приоритетным техническим решением является седельный двухшарнирный гусеничный поезд, но в связи с незначительной разницей в значениях глобальных приоритетов для гусеничных поездов, необходимо проведение дальнейших исследований по определению значений показателей свойств с использованием математического моделирования рабочих процессов гусеничных поездов и повторной оценки с учётом полученных результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Морозов А. В., Котровский А. А., Филев А. В. Выбор метода комплексного сравнения объектов автобронетанковой техники на этапе проектирования // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2014. – № 2 (104). – С. 120–123. [Электронный ресурс]: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2014/02/120-123.pdf>. Доступ 22.09.2021.
2. Шпилов В. В., Каспаров В. Б., Акимущин А. В. [и др.] Методы оценки эффективности полноприводной автомобильной техники / Под общ. ред. В. В. Шпилова. – Бронницы, 2005. – 144 с.
3. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с. [Электронный ресурс]: https://www.studmed.ru/saati-t-prinyatie-resheniy-metod-analiza-ierarhiy_7fc4629a50e.html. Доступ 22.09.2021.
4. Саати Т. Л., Кернс К. Аналитическое планирование. Орг. систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с. [Электронный ресурс]: https://www.studmed.ru/saati-t-kerns-l-analiticheskoe-planirovanie-organizaciya-sistem_62e9f43e1af.html. Доступ 22.09.2021.
5. Плиев И. А. Оценка технического уровня семейств автомобильной многоцелевого назначения на основе метода анализа иерархий // Журнал ААИ. – 2010. – № 3 (62). – С. 46–49. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21251680>. Доступ 22.09.2021.
6. Плиев И. А. Оценка технического уровня семейств автомобилей многоцелевого назначения на основе метода анализа иерархий // Журнал ААИ. – 2010. – № 5 (64). – С. 50–54. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22076583>. Доступ 22.09.2021.
7. Рязанцев В. И., Морозов А. В. Методика проведения согласования экспертных оценок полученных путём индивидуального анкетирования методом анализа иерархий // Инженерный вестник. – 2014. – № 12. – С. 1–9. [Электронный ресурс]: <http://www.ainjournal.ru/file/out/742942>. Доступ 22.09.2021.

8. Морозов А. В. Комплексное сравнение объектов военной автомобильной техники типа MRAP на стадии проектирования // Журнал ААИ. – 2015. – № 1 (90). – С. 40–45. [Электронный ресурс]: <http://www.aae-press.ru/f/90/40.pdf>. Доступ 22.09.2021.

9. Дубенский М. Я. Метод выбора базового шасси при создании спецавтомобиля / Дис... канд. техн. наук. – М., 1999. – 130 с. [Электронный ресурс]: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002797298>. Доступ 22.09.2021.

10. Постников М. В. Метод комплексного сравнения военных гусеничных машин на основе анализа иерархий / Дис... канд. техн. наук. – М.: Моск. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 2003. – 240 с. [Электронный ресурс]: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002327454>. Доступ 22.09.2021.

11. Наумов В. Н., Рождественский Ю. Л., Брекалов В. Г. Оценка конструкций и компоновок военных гусеничных машин с помощью метода анализа иерархий: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 64 с.

12. Евсеев К. Б. Иерархия эксплуатационных свойств транспортных средств для перевозки тяжёлых неделимых грузов в условиях Крайнего Севера // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2021. – № 2 (133). – С. 74–84. [Электронный ресурс]: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2021/02/074-084.pdf>. Доступ 22.09.2021.

13. Евсеев К. Б. К вопросу о формировании технического облика наземных транспортных средств, предназначенных для внедорожных контейнерных перевозок // Грузовик. – 2021. – № 7. – С. 3–8. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46380850>. Доступ 22.09.2021.

14. Тарасов В. В., Фаробин Я. Е. Исследование поворотливости сочленённых гусеничных машин // Вестник бронетанковой техники. – 1964. № 1. – С. 47–55.

15. Фаробин Я. Е. Теория поворота транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 176 с.

16. Зубов П. П., Макаров В. С., Зезюлин Д. В. [и др.] Обзор существующих конструкций сочленённых гусеничных машин и рекомендации по выбору их параметров // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2015. – № 2 (109). – С. 170–176. [Электронный ресурс]: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2015/02/170-176.pdf>. Доступ 22.09.2021.

17. Kotiev, G. O., Gumerov, I. F., Stadukhin, A. A., Kositsyn, B. B. Selection of the required deceleration for high-mobility wheeled vehicles with wear resistant brake systems IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, статья № 879, (2020) 0012030. DOI: 10.1088/1757-899X/819/1/012030.

18. Kotiev, G., Padalkin, B., Miroshnichenko, A., Stadukhin, A., Kositsyn, B. A theoretical study on the high-speed electric tracked vehicle mobility IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, статья № 820 (2020) 00122012. DOI: 10.1088/1757-899X/820/1/012012. ●

Информация об авторах:

Котиев Георгий Олегович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Колёсные машины» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана), Москва, Россия, kotievgo@ya.ru.

Евсеев Кирилл Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Колёсные машины» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана), Москва, Россия, kb_evseev@bmstu.ru.

Годжаев Захид Адыгезалович – член корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), Москва, Россия, fic51@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 22.09.2021, одобрена после рецензирования 20.10.2021, принята к публикации 03.11.2021.