

ПОВЫШЕНИЕ ПРОХОДИМОСТИ АМФИБИЙНО-ВЕЗДЕХОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Рассмотрена проблема создания транспортных средств большой грузоподъемности для движения по слабонесущим грунтам и снегу в условиях полного бездорожья российского Севера. В качестве решения предлагается применить нетрадиционные движители с водоизмещающими пневмооболочками сверхнизкого давления большого объема. Рассмотрен принципиально новый вид движителя, который был изобретен в процессе решения поставленной задачи и специально предназначен для создания крупнотоннажных амфибийно-вездеходных транспортных средств сверхнизкого давления на грунт.

Необходимость разработки военной и гражданской транспортной техники высокой проходимости, способной эффективно выполнять транспортные задачи на обширных бездорожных территориях в различных регионах России и мира, приводит к необходимости улучшения проходимости, что возможно осуществить, снижая средние и максимальные давления на грунт. Для существующих типов опорно-контактных шасси существуют известные конструктивные ограничения, которые не позволяют кардинально повысить их проходимость. Так, они не могут быть реализованы с желаемыми контактными давлениями (ниже 8 кПа) (рис. 1). Тем не менее, давления на грунт в диапазоне ниже 8 кПа [1] являются крайне притягательным полем значений, при которых взаимодействие опорно-контактного движителя с

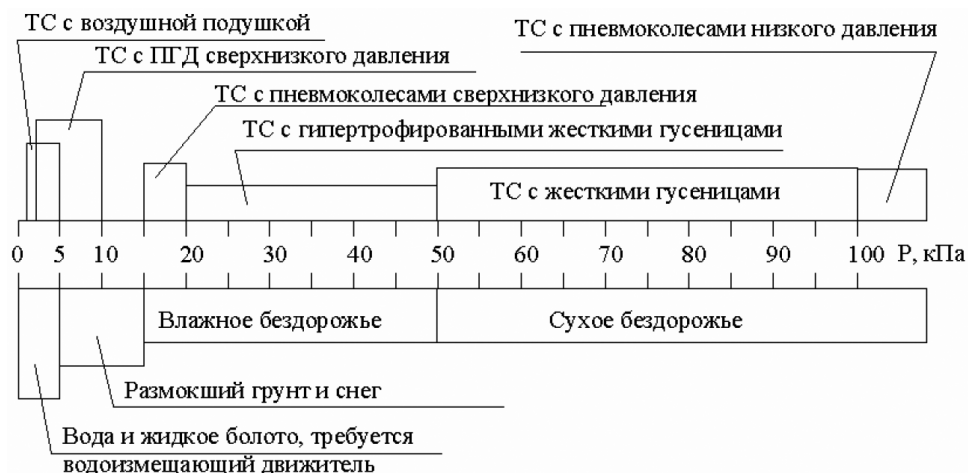


Рис. 1. Диаграмма распределения зон применения ТС с различными движителями в зависимости от давления на грунт и характера грунта

грунтом происходит совершенно в иных режимах, чем при удельных давлениях традиционных колесных и гусеничных движителей, находящихся в диапазоне 50...600 кПа (0,5...6 атм).

Для выяснения влияния давления на грунт на проходимость транспортных средств (ТС) по слабонесущим грунтам рассмотрим процессы, происходящие непосредственно в пятне контакта движителя с грунтом, при этом конструктивное исполнение всего ТС рассматривать не будем.

Пусть имеется ТС с постоянной массой, а давление в пятне контакта считается равномерным. При этом грунт в пятне контакта продавливается на некоторую глубину.

Из множества зависимостей, описывающих связь между нормальным давлением и погружением движителя, отдано предпочтение модифицированной зависимости Бернштейна–Летошнева [2]

$$p = C_r \lambda_\nu^n,$$

где p — реактивное давление на элементарную площадку движителя (на поверхность штампа); λ_ν — нормальная к поверхности движителя деформация прессования грунта; C_r , n — эмпирические параметры прессования грунта.

Данная зависимость позволяет описать грунты как с линейной деформационной характеристикой, так и с различными степенными характеристиками с высокой точностью при малых погружениях движителя в грунт.

Удельное сопротивление движению F_c движителя в наибольшей мере формируется затратами энергии на проминание колеи в пластичном грунте. При этом сила сопротивления будет численно равна интегралу по сечению колеи от функции изменения давления грунта по глубине:

$$F_c = \frac{1}{n+1} C_r \lambda_\nu^{n+1}. \quad (1)$$

Из формулы видно, что сопротивление движению повышается в степенной зависимости от увеличения глубины колеи и повышения давления в пятне контакта соответственно.

Тангенциальные напряжения в грунте, обуславливающие формирование тягового усилия на движителе, подчиняются закону Джанозии-Ханамото:

$$\tau = (c + p \operatorname{tg} \phi_r) \left(1 - e^{-\frac{|\lambda_\tau|}{\lambda_{\tau s}}}\right),$$

где τ — напряжение сдвига; $\lambda_{\tau s}$ — постоянная сдвига, характеризующая грунт; c — связность грунта; ϕ_r — угол внутреннего трения грунта; λ_τ — сдвиг грунта.

Тяговое усилие движителя F_T находят как интеграл по пятну контакта от тангенциальных напряжений в грунте, что при равномерном

давлении в пятне контакта сводится к формуле

$$F_T = \tau S = (c + p \operatorname{tg} \phi_r)(1 - e^{-\frac{|\lambda \tau|}{\lambda \tau s}})S,$$

где S — площадь пятна контакта.

Давление на грунт $p = mg/S$, откуда $S = mg/p$.

При подстановке выражений для S и p в формулу получаем

$$F_T = (cS + mg \operatorname{tg} \phi_r)(1 - e^{-\frac{|\lambda \tau|}{\lambda \tau s}}). \quad (2)$$

Таким образом, при постоянных характеристиках грунта в тяговом усилии движителя присутствуют два компонента: один пропорционален площади пятна контакта F_{Ts} , а другой — массе транспортного средства F_{Tm} :

$$F_{Ts} = cS \left(1 - e^{-\frac{|\lambda \tau|}{\lambda \tau s}}\right); \quad (3)$$

$$F_{Tm} = mg \operatorname{tg} \phi_r \left(1 - e^{-\frac{|\lambda \tau|}{\lambda \tau s}}\right); \quad (4)$$

$$F_T = F_{Ts} + F_{Tm}.$$

При снижении давления на грунт увеличение пятна контакта неизбежно влечет за собой пропорциональное увеличение составляющей от связанности грунта, при этом составляющая от сил внутреннего трения грунта остается неизменной при постоянной массе ТС.

Соппротивление движению F_c находится в степенной зависимости от глубины колеи, поэтому при снижении давления на грунт снижается и сопротивление движению ТС, а возрастание площади пятна контакта приводит к увеличению тяги движителя.

Таким образом, запас тяги $F_3 = F_T - F_c$ при снижении давления на грунт увеличивается опережающими темпами, что приводит к дополнительному повышению проходимости ТС по бездорожью.

На скользких грунтах, когда сцепление возможно только благодаря грунтозацепам, ТС с максимальной площадью пятна контакта имеет больший запас тяги, чем ТС с меньшим пятном контакта, так как в большом пятне контакта помещается большее число эффективно работающих грунтозацепов. Эксперименты показывают, что на низких давлениях коэффициент сцепления с грунтом с учетом грунтозацепов может значительно превышать единицу, что обеспечивает движение по уклонам (45°) более 100%.

В случае отсутствия грунтозацепов, силы тяги формируются за счет фрикционных свойств контактирующих материалов, а фрикционное сцепление с грунтом в обычных условиях всегда меньше единицы. Таким образом, фрикционная сила тяги всегда меньше или равна силе тяги этого же движителя с грунтозацепами при прочих равных условиях.

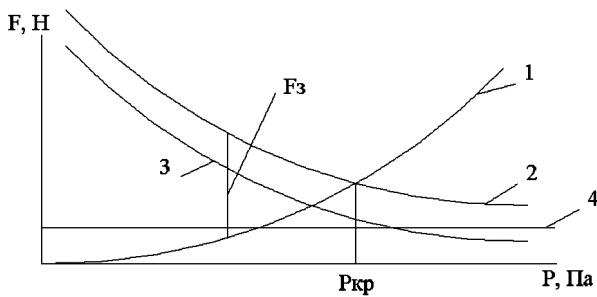


Рис. 2. Изменение параметров движения при изменении давления на грунт от ТС постоянной массы:

сопротивление движению (1), суммарная сила тяги двигателя (2), компонент силы тяги от связности грунта (3), компонент силы тяги от внутреннего трения (4)

На графике (рис. 2) показан возможный вариант изменения сопротивления движению и силы тяги при изменении давления на грунт. Точка $P_{кр}$ на пересечении кривых функций 1 и 2 соответствует потери подвижности ТС ввиду недостатка тяги двигателя.

Изучая характеристики влагонасыщенных грунтов и снега, выясняем, что современные вездеходные ТС по своим характеристикам располагаются вблизи точки $P_{кр}$, тогда как реальная вездеходность начинает проявляться только при сдвиге характеристики ТС по давлению на грунт значительно левее по графику относительно точки $P_{кр}$.

В настоящий момент пределом снижения давления на грунт от контактных типов движителя является значение 15 кПа. Такое давление обеспечивается на сверхлегких транспортных средствах с пневмоколесами сверхнизкого давления. Однако построить крупное транспортное средство большой полезной грузоподъемности на подобных пневмоколесах не представляется возможным. Так, при увеличении размера и количества колес резко возрастает сложность трансмиссии и подвески, что приводит к лавинообразному возрастанию массы машины, “съедающей” прирост несущей способности колес при увеличении их диаметра и количества [3].

Наиболее распространенными для автомобилей стали широкопрофильные пневмоколеса с регулируемым давлением [4, 5], обеспечивающие изменение давления от 100 кПа на грунтовых дорогах и бездорожье до 300...500 кПа на дорогах с твердым покрытием. Снижение давления в таких колесах менее 100 кПа (1 атм) не приводит к увеличению проходимости, так как жесткость самой шины начинает препятствовать увеличению пятна контакта, а износ боковин колеса резко возрастает: диск колеса “жуёт” резину, а амплитуда циклических изгибных нагрузок возрастает настолько, что тепловыделения от гистерезиса приводят к перегреву шин. На базе таких шин было создано большинство серийных многоосных полноприводных машин высокой проходимости — бронетранспортеров и лесовозов.

В диапазоне 15...100 кПа находятся гусеничные транспортные средства высокой проходимости [6]. При этом нижней границе соответствуют легкие гусеничные ТС (ратраки, болотоходы), а на верхней располагаются тяжелые боевые машины (танки, БМП). При изменении давления на грунт у гусеничных машин возрастает общая масса, а габаритные размеры остаются практически одинаковыми для машин всех весовых категорий, поскольку компоновка гусеничных машин мало поддается изменению, так как диктуется возможностью поворота вокруг заторможенной гусеницы и железнодорожным габаритом.

Для гусеничных машин приводятся средние значения давления, тогда как реальные пиковые нагрузки под опорными катками оказываются во много раз выше, что резко снижает реальную проходимость таких ТС.

Для преодоления топких болот были разработаны шнекоходы: ТС с водоизмещающими движителями в виде архимедовых винтов на веретенообразных вращающихся понтонах [6]. Недостатком шнекоходов является их неприспособленность для движения по твердым грунтам. На твердых грунтах пятно контакта сокращается до точечного, что приводит к разрушению тонких лопастей спирального винта и грунта под ними. Шнекоход отличается громоздкостью и высоким расположением центра масс при движении по твердому грунту.

Транспортные средства с воздушной подушкой (ВП) имеют давление до 5 кПа, но при этом для движения нужна ровная горизонтальная поверхность, так как большие уклоны и пересеченная местность для них не преодолимы. Также ТС с ВП не может двигаться по рыхлым основаниям (сухой снег, сухой песок) из-за явления воздушной эрозии, приводящего к самозакапыванию ТС при выдувании грунта высокоскоростной воздушной струей, истекающей из-под гибкого ограждения. К тому же, ВП чрезвычайно энергоемка, для ее поддержания в постоянном режиме требуется 8...10 кВт вентиляторной мощности на каждую тонну общей массы ТС.

Комбинированные гусеничные или пневмоколесные ТС с частичной разгрузкой на ВП также не могут значительно повысить проходимость. Для них свойственны ограничения как воздушных подушек, так и обычных контактных движителей. Транспортные средства с частичной разгрузкой на ВП применяются в случаях необходимости движения с высокой маневренностью в стесненных условиях, где не применимы воздушные тяговые винты.

Области применения всех вышеназванных движителей и ТС практически не пересекаются (см. рис. 1). При этом ни одно из них не способно обеспечить транспортировку грузов по бездорожью на большие расстояния.

Для повышения проходимости наземных ТС выше уровня, достигнутого существующими движителями, необходимо создать некий новый комбинированный движитель. Новый движитель должен вобрать в себя лучшие свойства существующих движителей: от воздушной подушки — максимальное давление ниже 8 кПа; от гусеничного движителя — полную реализацию на грунте сцепного веса ТС; от пневмоколес сверхнизкого давления — статический способ распределения давления по грунту без непрерывного расхода энергии; от шнекохода — водоизмещающий движитель для вязкожидких сред.

В качестве решения поставленной задачи предлагается оснастить известные гусеничные движители с жесткими траками герметичными пневмооболочками сверхнизкого давления, а затем заставить эти новые ТС двигаться с опорой на эти пневмооболочки. Применение именно пневмооболочек объясняется их способностью создавать обширное пятно контакта равного давления, что как раз и требуется для новых амфибийно-вездеходных ТС.

При рассмотрении режимов взаимодействия жестких траков гусеничного ТС с мягкой пневмооболочкой (рис. 3, *а*) приняты следующие допущения: гусеничный обвод пневмогусеничного движителя (ПГД) является мягкой тонкой прочной оболочкой цилиндрической формы, находящейся под действием избыточного давления, при этом оболочка не имеет изгибную жесткость и условно считается невесомой. При этом сила натяжения в каждом из участков цилиндрической оболочки будет определяться по следующей формуле:

$$F = pR,$$

где F — удельная сила натяжения цилиндрической оболочки (Н/м) с кривизной радиуса R (м); p — избыточное давление в гусенице ПГД (Па = Н/м²).

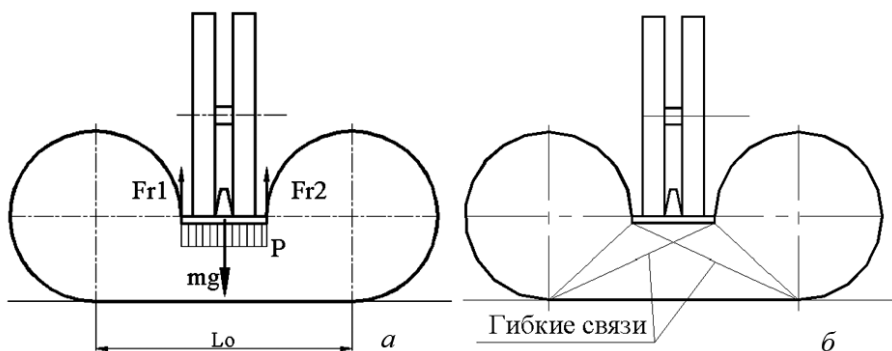


Рис. 3. Взаимодействие цилиндрической пневмооболочки с траком жесткой гусеницы транспортного средства:

а — схема действующих сил, *б* — расположение стабилизирующих гибких тяг в оболочке

Анализ взаимодействия нагрузки с цилиндрической оболочкой привел к выводу, что данный способ нагружения оболочки статически неустойчив, а система стремится опрокинуться при малейшем внешнем возмущении (положение неустойчивого равновесия).

Удельная опрокидывающая сила оболочки зависит только от разницы радиусов кривизны оболочки в зоне контакта с грунтом и давления в оболочке и однозначно определяется формулой

$$F_T = (R_2 - R_1)p,$$

где R_1, R_2 — радиусы кривизны участков оболочки, примыкающих к пятну контакта.

Сила тяги всегда направлена в сторону дуги оболочки меньшего радиуса.

Подъемная сила в оболочке на погонный метр ширины движителя (удельная грузоподъемность) однозначно определяется произведением площади пятна контакта с грунтом на давление в оболочке:

$$mg = pL_0,$$

где mg — полезная нагрузка; p — избыточное давление в оболочке; L_0 — ширина пятна контакта в плане.

Пневмогусеницу возможно избавить от опрокидывания, вводя внутренние гибкие тяги между жесткой гусеницей и пятном контакта оболочки с грунтом (рис. 3, б).

У обычных пневматических колес силы удержания не совпадают по направлению с силой тяги, что приводит к работе боковин колеса на сдвиг. Работа на сдвиг требует от материала колеса высокой сдвиговой жесткости, что требует большей толщины материала, что, в свою очередь, повышает напряженность работы материала шины и гистерезисные потери при каждом цикле деформации колеса.

В ПГД силы удержания нагрузки и перемещающие ТС силы также не совпадают по направлению. Перемещающие ТС силы создают сдвиговые напряжения в пневмооболочке ПГД, тогда как силы удержания создают только растягивающие напряжения. В этом отношении рассмотренный ПГД не отличается от привычных пневмоколес, только с очень растянутым вдоль колеи пятном контакта, что резко поднимает грузоподъемность ТС с таким ПГД в сравнении с пневмоколесными ТС тех же габаритных размеров.

В процессе анализа поведения цилиндрической пневмооболочки под внешней нагрузкой был смоделирован новый тип ПГД. Новый движитель имеет цилиндрическую оболочку, заглушенную на концах сферическими замыканиями, что позволило назвать его сферическим ПГД (СПГД), тем самым позволяя отличать от других ПГД с тороидальными оболочками и отдельными пневмобашмаками. Пневматическая оболочка СПГД несет нагрузку от силовой платформы в максимально эффективном варианте: усилия тяги совпадают с направлением

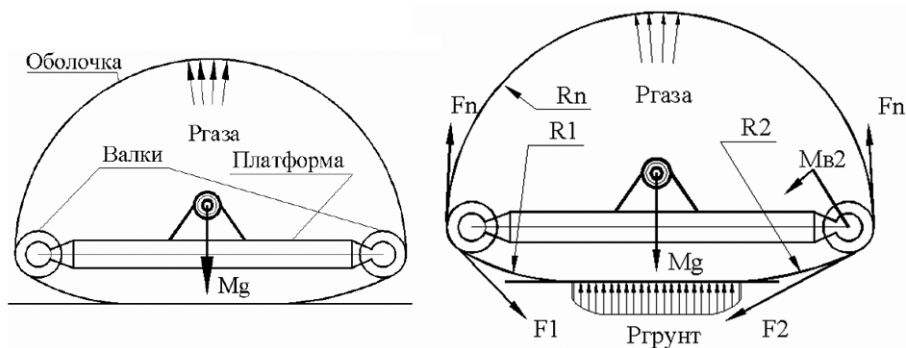


Рис. 4. Сечение СПГД и схема сил, действующих в нем

сил удержания в оболочке, что принципиально отличает СПГД от всех известных типов движителей (рис. 4). В СПГД в качестве основных удерживающих и тяговых сил используются поперечные силы натяжения в оболочке от избыточного давления и опрокидывающие усилия, которые являлись вредными в ПГД с тороидальной оболочкой. Была изменена схема нагружения пневмооболочки СПГД в сравнении с тороидальным ПГД: нагрузку поместили внутрь цилиндрической пневмооболочки, что позволило привести систему к устойчивому равновесию, которое восстанавливается при снятии внешней возмущающей силы.

Отсутствие сдвиговых нагрузок в СПГД позволяет использовать тонкие оболочки из материалов с высокой прочностью на разрыв и отсутствием сопротивления на сдвиг, таких как прорезиненные синтетические ткани и сетки. Так, при давлении на грунт 5 кПа (500 мм водяного столба или 0,05 атм.) и максимальном радиусе кривизны оболочки 6 м (пятно контакта $100 \text{ м}^2 = 10 \times 10 \text{ м}$ в плане, грузоподъемность 50 т) усилие натяжения оболочки составит 30 кН/м.п. С такой нагрузкой способна справиться прорезиненная кордовая ткань толщиной в 1 мм. Для жестких условий движения в качестве оболочки возможно использовать стандартные морозостойкие транспортерные резино-тканевые ленты, серийно выпускаемые отечественной промышленностью, которые применяют на рудничных разработках.

Сферический ПГД включает в себя силовую платформу с несущими валками и пневмооболочку с избыточным давлением (см. рис. 4). При этом платформа с валками находится внутри пневмооболочки. Зависание над поверхностью передвижения осуществляется за счет сил натяжения оболочки, создаваемых избыточным давлением внутри замкнутой оболочки, а перемещение — за счет перекатывания валков по внутренней поверхности оболочки. Стоит особо заметить, что в СПГД полностью отсутствуют опорные катки, а их нагрузку полностью принимают на себя два несущих валка, исполняющих роли ленивца и ведущей звездочки соответственно.

Движение СПГД возможно, как в пассивном (буксируемый прицеп), так и в активном режимах (самостоятельно двигающийся СПГД).

В пассивном режиме СПГД осуществляет только распределение нагрузки по поверхности движения в процессе движения, а тянущее усилие прилагается извне к грузовой платформе от внешнего буксира.

В активном режиме движения тянущее усилие формируется самим СПГД. Способ формирования тянущего усилия может быть различен, например: создание крутящего момента на одном или нескольких валках СПГД или создание тянущего воздействия на силовой платформе СПГД другим способом, например электромагнитным (линейный электродвигатель и т.д.). Торможение СПГД осуществляется торможением внутренних валков.

На изобретенный СПГД получен патент (№ 2240250 приоритет от 5 февраля 2004 г).

Из проведенного анализа видно, что СПГД оказывается в области эксплуатационных условий, в которых нет ни одного конкурента из числа существующих транспортных средств. Сферический ПГД совмещает в себе лучшие свойства существующих движителей: от гусеничного движителя — полную реализацию на грунте тягового усилия от сцепного веса; от пневмоколес — равномерное распределение давления в пятне контакта, герметичность и экономичность поддержания избыточного давления; от шнекохода — водоизмещающий движитель. При этом СПГД обладает выдающейся топливной экономичностью при движении по слабонесущим грунтам, так как глубина колеи при давлении 5...8 кПа ничтожно мала (в сравнении с существующими колесными и гусеничными ТС) и не требуются постоянные расходы энергии на поддержание статического давления в движителе (как это необходимо в судах с воздушной подушкой). Транспортные средства с СПГД сверхнизкого давления способны к плаванию по открытой воде, движению по болотам любой несущей способности и снегу неограниченной толщины.

Сферический ПГД обладает конструктивными особенностями, позволяющими изготовить очень крупные ТС с большой грузоподъемностью (рис. 5). Это позволяет создавать многоопорные вездеходно-амфибийные ТС для транспортировки тяжелых крупногабаритных изделий высокой заводской готовности по полному бездорожью. До сих пор такие грузы удавалось доставлять только по дорогам с твердым покрытием на специальных сверхгабаритных транспортных платформах.

У транспортных средств с СПГД много отличий от других транспортных средств как в возможностях применения, так и в способах конструктивного исполнения отдельных узлов — возможность полностью исключить контакт трансмиссии и силовых узлов с водой и

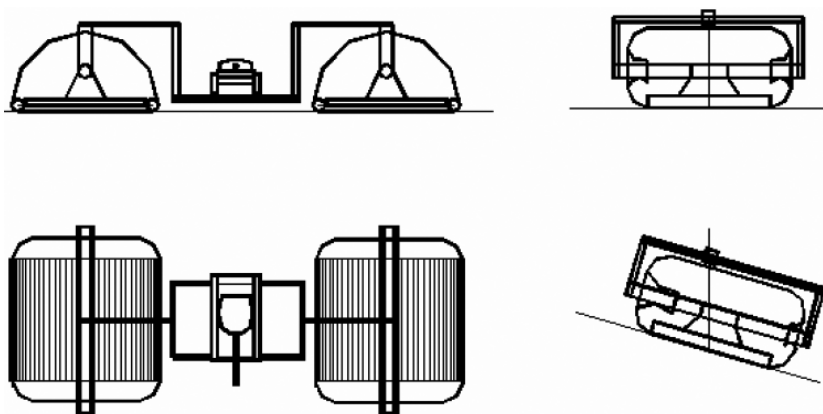


Рис. 5. Крупнотоннажное амфибийно-вездеходное ТС с СПГД

грязью, так как все эти системы заключены в герметичной оболочке с избыточным давлением; разворот ТС с СПГД на прочных грунтах необходимо производить с помощью поворотной опоры при полном вывешивании движителей над грунтом, когда внешняя грузовая платформа опущена на грунт; на слабых, скользких или разжиженных грунтах ТС с СПГД может поворачиваться как обычное сочлененное гусеничное ТС (к примеру ДТ-30 “Витязь”).

При равных габаритных размерах и давлении на грунт транспортное средство с СПГД может нести значительно бóльшую нагрузку, чем ТС с ПГД. Экономия массы достигается тем, что СПГД не нуждается в тяжелой прочной звенчатой гусенице, в опорных катках и элементах их подвески.

Выводы. 1. Существует проблема создания новых амфибийно-вездеходных ТС большой грузоподъемности для доставки грузов на дальние расстояния по снегу, болотам и прочему бездорожью, особенно для Севера и Востока страны.

2. Повышение амфибийно-вездеходных свойств ТС возможно благодаря применению нетрадиционных пневмогусеничных движителей сверхнизкого давления (ниже 8 кПа) с водоизмещающими пневмооболочками большого объема.

3. Изобретен принципиально новый СПГД.

4. Применение СПГД дает возможность создания нескольких оригинальных (сейчас не существующих классов) ТС большой грузоподъемности, высочайшей проходимости и экономичности. Такие ТС смогут обеспечить доставку грузов и комфортное проживание людей в регионах, которые до сих пор не заселены и не осваиваются только из-за транспортной недоступности или крайней дороговизны воздушного транспорта.

5. Сферические ПГД сверхнизкого давления являются экологичными движителями, так как не оставляют следов даже на самых слабых

грунтах, а травяной покров лишь приминается, без расплющивания стеблей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б е л я к о в В. В. Взаимодействие со снежным покровом эластичных двигателей специальных транспортных машин. Докт. дис. – Н.Новгород, 1999. – 485 с.
2. Н а у м о в В. Н., Р о ж д е с т в е н с к и й Ю. Л. Моделирование процессов взаимодействия двигателей мобильных робототехнических комплексов с деформируемым грунтом. – Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 1992. – № 1. – С. 79–92.
3. Т р а н с п о р т н ы е средства на высокоэластичных двигателях / Н.Ф. Бочаров и др. – М.: Машиностроение, 1974. – 208 с.
4. П р о е к т и р о в а н и е полноприводных колесных машин / Под общ. ред. Полунгяна А.А. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000, – 640 с.
5. А к с е н о в П. В. Многоосные автомобили. – М.: Машиностроение, 1989. – 280 с.
6. Б а р а х т а н о в Л. В., Е р ш о в В. И., К у л я ш е в А. П., Р у к а в и ш н и к о в С. В. Снегоходные машины. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.

Статья поступила в редакцию 21.11.2006

Илья Алексеевич Монин родился в 1973 г., окончил МГТУ им. Н.Э.Баумана в 1996 г. и заочную аспирантуру МГТУ им. Н.Э.Баумана. Главный специалист по системам отопления, вентиляции и кондиционирования в ОАО “20 Центральный Проектный институт” (ОАО “20ЦПИ”).

I.A. Monin (b. 1973) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1996. Chief specialist for systems of heating, ventilation and conditioning of limited liability company “ОАО “20TsPI”.

В издательстве МГТУ вышла в свет книга

Лысенко Л.Н. Наведение и навигация баллистических ракет: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. – 672 с.

Изложены научные и методологические основы наведения и навигации летательных аппаратов баллистического типа. Рассмотрены вопросы программирования движения (задачи наведения) и информационно-навигационного обеспечения управления (задачи навигации), а также проблемы статистической динамики полета – оценивание движения и определение точности стрельбы (задачи оценки точности возмущенного движения). Показаны направления решений соответствующих задач при создании существующих ракетных комплексов тактического, оперативно-тактического и стратегического назначений, возможные пути совершенствования баллистико-навигационного обеспечения полета ракет последующих поколений.

Для студентов технических вузов, слушателей военных академий, а также аспирантов, инженеров и научных работников, специализирующихся в области баллистики, динамики полета и управления движением летательных аппаратов.