

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.3

EDN JQDGFH

ПОВЫШЕНИЕ ПРОХОДИМОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Н.Б. ВеселовORCID: 0009-0008-2148-096X e-mail: veselov@nztm.ru

ООО НПО «ТРАНСПОРТ»

Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты испытаний по воздействию на грунт сельскохозяйственных тракторов, лесозаготовительных машин и вездеходных транспортных средств. Установлено, что наибольшую универсальность для тяговых и транспортных машин обеспечивают ленточные пневмогусеницы, состоящие из отдельных пневмоэлементов, разнесенных вдоль оси гусеницы на одну треть их длины (по ширине их может быть два, три, четыре в зависимости от полной массы машины). Эта универсальность обеспечивается тем, что пневматические гусеницы с поперечным расположением трактов состоят из тяговой металлической цепи с симметричным расположением пневмотрактов или с уширением только во внешнюю сторону машины. Смещение пневмотрактов влево и вправо относительно оси гусеницы приводит к увеличению периметра опорной поверхности гусеницы и, как следствие, более высоких тягово-сцепных параметров. В частном случае, на тракторе ВТ-150, пневмогусеница установлена с уширением во внешнюю сторону, а на снегоболотоходе ТТМ-6901 – с симметричным расположением пневмотрактов. Результаты испытаний подтверждены многолетним опытом эксплуатации этих машин, круглогодично показывающих высокую проходимость во всех регионах страны.

Ключевые слова: проходимость транспортно-технологических машин; гусеничный движитель; опорная поверхность гусеницы; пневмогусеницы; пневмотраки.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Веселов, Н.Б. Повышение проходимости и экологичности транспортно-технологических машин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 47-66. EDN: JQDGFH

IMPROVING THE CROSS-COUNTRY CAPABILITY AND ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL VEHICLES

N.B. VeselovORCID: 0009-0008-2148-096X e-mail: veselov@nztm.ru

LLC NPO «TRANSPORT»

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the results of tests on the impact of agricultural tractors, logging machines and amphibious all-terrain vehicles on soil. The greatest versatility for traction and transport vehicles is provided by pneumatic belt tracks, consisting of individual pneumatic elements spaced along the track axis by one third of their length (in width there can be two, three, four, depending on the total weight of the vehicles). Pneumatic tracks with transverse track arrangement consist of a traction metal chain with a symmetrical arrangement of pneumatic tracks or with widening only on the outer side of the machine. The displacement of the pneumatic tracks to the left and right relative to the track axis leads to an increase in the perimeter of the track bearing surface and, as a consequence, higher traction parameters. The pneumatic track is installed with widening to the outer side on the VT-150 tractor, and on the TTM-6901 amphibious all-terrain vehicle – with a symmetrical arrangement of the pneumatic tracks. Forty years of experience in operating these vehicles has demonstrated their high cross-country capability in summer and winter conditions in all regions of the country.

Key words: cross-country capability of transport and technological vehicles; caterpillar track; track bearing surface; pneumatic caterpillar; pneumatic tracks.

FOR CITATION: Veselov N.B. Improving the cross-country capability and environmental friendliness of transport and technological vehicles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 47-66. EDN: JQDGFH

Введение

Отечественные предприятия сельского хозяйства, лесозаготовительной отрасли, энергетики и нефтегазопроводного транспорта оснащены значительным количеством транспортно-технологических машин (ТТМ). В достижении их высокой производительности, технико-экономической эффективности и экологической безопасности далеко не исчерпаны имеющиеся резервы. Разрушающее и уплотняющее воздействие на почву сельхозугодий ходовыми системами сельскохозяйственной техники известны давно. Исследования, проведенные совместно со специалистами ВИМа, показали, что применение серийных гусеничных тракторов приводит к снижению урожайности зерновых культур на 10-15 % из-за разрушения структуры и уплотнения почвы, вызывая также ее эрозию. Основным препятствием для применения гусеничной техники является недопустимо высокие пиковые давления движителей на опорную поверхность, что ведет к образованию глубокой колеи, потере подвижности машин и разрушению верхних слоев почвы и растительного покрова.

По результатам исследований, проведенных совместно с ЦНИИМЭ, сложная ситуация с применением гусеничных машин различного назначения в лесном хозяйстве сложилась при освоении лесосек на переувлажненных и заболоченных почвах. В этих условиях проявилась несостоятельность традиционных гусеничных движителей не только с экономической, но и, что особенно важно, с экологической точки зрения. Трелевочные тракторы и гусеничные лесоповалочные машины, используемые в таких условиях, имеют малые технологические и транспортные скорости, не позволяя полностью реализовать номинальную грузоподъемность и производительность, разрушая почвенный покров лесосек. Еще сложнее ситуация с применением гусеничных ТТМ в тундровых и лесотундровых районах, где интенсивное освоение обширных пространств этих территорий с помощью гусеничной техники в короткие сроки вывело из оборота и привело к заболачиванию сотни тысяч гектаров тундры. Например, пробег гусеничной машины на 100 км приводит к повреждению почвы и растительности тундры на площади в 10...12 га. Очевидно, требуются меры по предотвращению вредного воздействия движителей гусеничных машин на почву. Успешное решение проблемы эффективного транспортного и технологического обслуживания названных отраслей в значительной мере зависит от совершенства конструкций и приемлемого экологического воздействия ТТМ на окружающую среду.

Ретроспектива создания пневмогусеничных движителей для тракторов, транспортеров и транспортно-технологических машин в СССР и России

Целью работы является формирование теоретических основ создания высокоэластичных движителей машин для обслуживания агропромышленного комплекса, нефтегазопроводов, энергетического и лесного производств в сложных природно-климатических условиях. Объектами исследований являлись: сельскохозяйственные тракторы Т-54С, Т-70С, Т-150; лесозаготовительные тракторы ТТ-4М, ТДТ-55, ЛП-19Д; гусеничные транспортеры ГАЗ-47, ГАЗ-71, ТТМ-3903, ТТМ-4902, ТТМ-5906; экскаваторы ЭО-5015, ЭО-4121, ЭО-4124; ТТМ серии СТПр-6901, серии ТТМ-6902. Исследования проводились на макетах, экспериментальных и опытных образцах, стендах, серийно выпускаемых машинах с использованием современных измерительных средств и методов обработки результатов экспериментов.

В работе обобщены результаты пятидесятилетних исследований проблемы создания высокоэластичных гусеничных движителей и серийного производства ТТМ на их основе, реализованные в разработках конструкторского бюро ООО НПО «Транспорт» за последние 35 лет. В рамках решения данной проблемы разработаны методики расчетов высокоэластич-

ных элементов движителя, их напряженно-деформированного состояния (НДС). Впервые исследовано влияние пневматических гусениц на тягово-сцепные характеристики машины, плавность хода, проходимость. Разработано, изготовлено и исследовано более 20 различных вариантов машин с высокоэластичными движителями. Новизна технических решений, использованных при создании ТТМ, обоснована более 40 авторскими свидетельствами, патентами, медалями и дипломами различных выставок, в том числе, золотыми медалями 1 степени ВДНХ СССР. Поиск новых решений был начат с анализа различных типов колесных и гусеничных движителей. Выбор был сделан в пользу гусеничных движителей с пневматическими гусеницами (рис. 1).

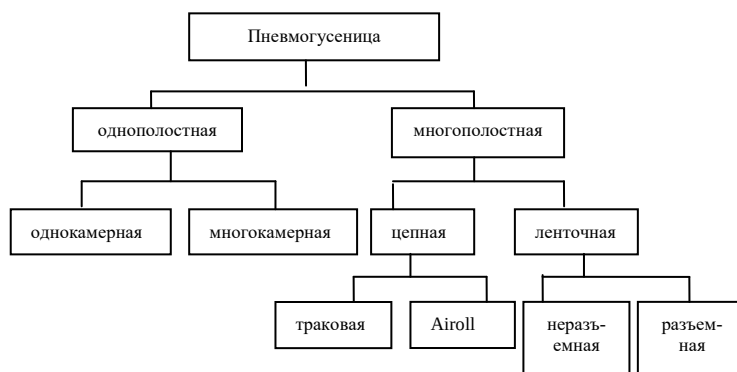


Рис. 1. Классификация пневмогусениц

Fig. 1. Classification of pneumatic tracks

Как показал анализ, к числу заслуживающих серьезного внимания относится пневмогусеницы, многополостные ленточные разъемные и пневмогусеницы, многополостные цепные траковые. Первые патенты на их конструкции относятся к 1918-1925 гг. В различных странах не раз возвращались к вопросу создания работоспособного пневмогусеничного движителя [1]. Однако получение работоспособных образцов ограничивалось отсутствием технологических возможностей реализации конструкторских разработок, недостаточно высоким качеством резинотехнических материалов и др. В дальнейшем развитие химической индустрии позволило осуществить целый ряд разработок пневмогусениц, применив при их изготовлении новые резинотехнические материалы и технологии. Весь комплекс работ по созданию экологически безопасных движителей ТТМ следует рассматривать в их хронологическом развитии, во взаимосвязи с изменяющимися по мере накопления экспериментальными и теоретическими результатами исследований конструкций движителей и машин в целом [2].

Исследования пневматических гусениц включали два направления:

- 1) пневматические гусеницы многополостные ленточные, состоящие из пневмоэлементов, разнесенных один относительно другого вдоль по длине гусеницы [3];
- 2) пневмогусеницы цепные траковые с поперечно расположенными траками относительно оси гусеницы и имеющие симметричные эластичные уширители или уширители во внешние стороны машины [4].

Высокой универсальностью для тяговых и транспортных машин обладает ленточная пневматическая гусеница, состоящая из отдельных траков по ширине и разнесенных один относительно другого вдоль оси гусеницы на одну треть их длины. Это направление работ дает возможность унификации конструкций пневматических гусениц для большого класса гусеничных транспортных средств. Всего в ОНИЛ ВМ и СКТБ ТТМ НТГУ им. Р.Е. Алексеева было разработано, изготовлено и исследовано семь различных конструкций пневмогусеничных движителей на базе тракторов Т-54С, Т-70С, Т-150, транспортеров ГАЗ-47 и ГАЗ-71 (рис. 2-7).

Пневматические элементы соединяются между собой с помощью спаренных параллельных пальцев, цевок и направляющих гребней. Такое соединение пневматических эле-

ментов дает возможность считать данную гусеницу ленточной, состоящей из жесткого неармированного участка (участок с меньшим расстоянием между пальцами) и гибкого, армированного металлокордом (участок с большим расстоянием между пальцами). Путем подбора силовой арматуры несущего пояса и набора пневмоэлементов по ширине гусеницы можно получить гусеничный обвод, не уступающий по прочностным характеристикам обводу с металлической гусеницей. Гусеница может состоять по ширине из двух, трех, четырех и т.д. пневмоэлементов в зависимости от типа машины, ее массы и требуемой величины удельного давления [5].



Рис. 2. Трактор Т-70С

Fig. 2. T-70C tractor



Рис. 3. Трактор Т-54С

Fig. 3. T-54C tractor



Рис. 4. Трактор Т-150

Fig. 4. T-150 tractor



Рис. 5. Транспортёр ГАЗ-47

Fig. 5. GAZ-47 transporter



Рис. 6. Транспортёр ГАЗ-71

Fig. 6. GAZ-71 transporter



Рис. 7. Транспортёр ГАЗ-47

Fig. 7. GAZ-47 transporter

По первому варианту для получения работоспособной конструкции пневматического элемента были рассмотрены напряженные участки гусеничного обвода и режимы его работы. Такими участками являются дуговые ветви на ведущем и направляющем колесах и участки, находящиеся в контакте с опорной поверхностью. На дуговых участках гусеничного обвода силовой каркас пневмоэлементов с продольным расположением в гусенице нагружается растягивающим усилием, обусловленным силой тяги, предварительным натяжением и центробежной силой. При поперечном расположении пневмоэлементов на этих участках нагружаются элементы крепления пневмотраков к металлическим звеньям, а силовой каркас обеспечивает необходимую жесткость для стабилизации консольной части пневмоэлемента и прочность в местах заделки элементов крепления.

При разработке движителей ТТМ с пневматическими гусеницами для оптимизации геометрических размеров и прочности пневмоэлементов был проделан значительный объем расчетно-теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия гусеничного движителя с опорной поверхностью. При оценке несущей способности пневмотраков на упругом основании использована гидромеханическая модель основания, которую описывает уравнение Терцаги-Герсеванова. Такой подход к анализу взаимодействия движителя машины с полотном пути в период создания требовал небольших вычислительных ресурсов и давал хорошую качественную сходимость результатов расчета и эксперимента [6].

На рис. 8 показана зависимость осадки движителя от скорости движения машины, а на рис. 9 – распределение относительных напряжений в почве стандартных движителей с металлической и однотипной резино-пневматической гусеницами [7].

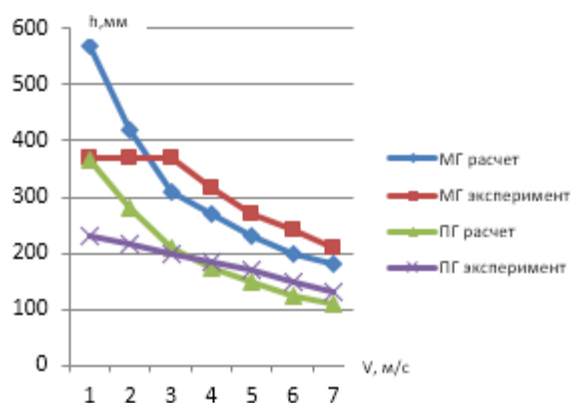


Рис. 8. Зависимость осадки движителя от скорости движения машины

Fig. 8. Dependence of the track sinkage on the vehicle speed

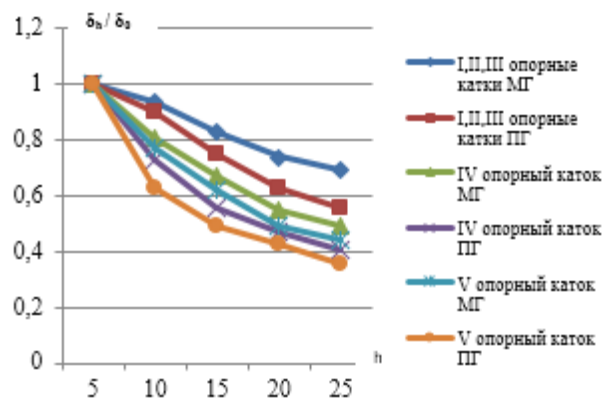


Рис. 9. Распределение

относительных напряжений в почве:

δ_h – напряжение в массе полотна пути;

δ_0 – давление в зоне контакта гусеницы и опорной поверхности; δ_h / δ_0 – относительные напряжения на глубине I-V – номера опорных катков

Fig. 9. Distribution of relative stresses in the soil:

δ_h – is the stress in the roadbed mass;

δ_0 – is the pressure in the contact zone between the track and the bearing surface;

δ_h / δ_0 – are the relative stresses at depth. I-V are the numbers of the road wheels

Разработка конструкций пневмоэлементов требовала решения ряда задач по определению их геометрических и прочностных характеристик. В силу сложной структуры пневмоэлементов и противоречивости предъявляемых требований, определение основных параметров проводилось поэтапно, с совмещением теоретических и экспериментальных методов исследований (НДС). При рассмотрении нагруженности отдельных участков гусеничного обвода было установлено, что для гусеницы с продольным расположением пневмотраков наибольшие растягивающие усилия действуют на силовой пояс на тяговой ветви и на опорной поверхности, на дуговых участках силовой пояс претерпевает изгиб и, в зависимости от расположения нейтральной оси, часть его испытывает напряжения сжатия, а часть – напряжения растяжения. Каркас пневмооболочки практически не нагружен на тяговой ветви растягивающими нагрузками и испытывает напряжения изгиба на дуговых участках. Положение нейтральной оси определяется внутренней структурой пневмоэлемента (рис. 10).

Как показали экспериментальные исследования, максимальная упругая деформация гусеницы не должна превышать 2-2.5 %. Поскольку силовой пояс представляет собой композитную конструкцию, состоящую из металлического, вязкоэластичного или капронового корда и резины, для обеспечения требуемой продольной жесткости силового пояса необходимо применять поправочный коэффициент в условии прочности. Величина коэффициента запаса

прочности варьируется от 2 для металлокорда до 10 для вязкого и капронового кордов. Для исключения остаточных деформаций силового пояса были разработаны технологические приемы, заключающиеся в предварительной вытяжке под определенной нагрузкой собранного, но не вулканизированного каркаса и вулканизация изделия в напряженном состоянии. Напряженное состояние изделия обеспечивается конструкцией прессформ.

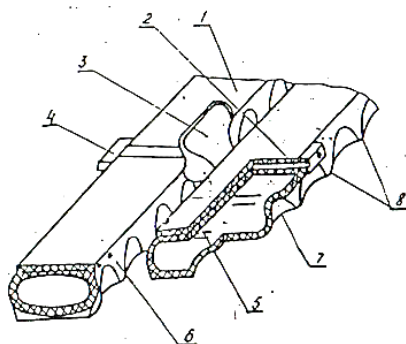


Рис. 10. Пневмогусеница с продольным расположением пневмоэлементов:

1 – пневмотрак; 2 – палец; 3 – направляющий гребень; 4 – цевка; 5 – корд;
6 – боковина; 7 – впадина; 8 – грунтозацеп

Fig. 10. Pneumatic track with longitudinal arrangement of pneumatic elements:

1 – pneumatic track; 2 – pin; 3 – guide horn; 4 – driving pin; 5 – cord;
6 – sidewall; 7 – recess; 8 – grouser

На рис. 11 показаны характеристики деформации пневматического элемента и его компонентов.

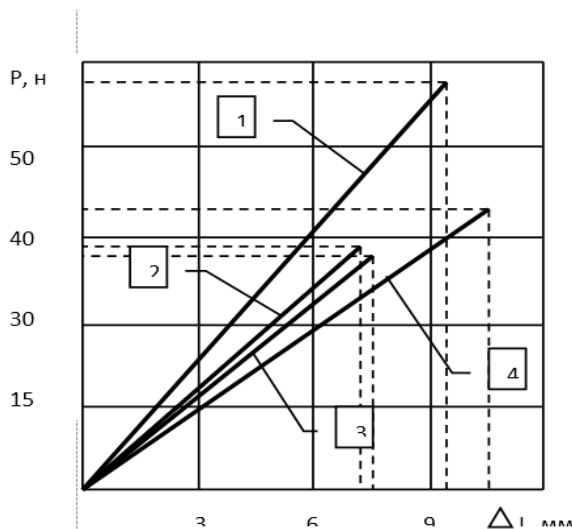


Рис. 11. Характеристики деформации пневмоэлемента:

1 – корд 40Л15; 2 – секция пневмоэлемента; 3 – силовой пояс отдельный; 4 – корд 22Л15

Fig. 11. Deformation characteristics of the pneumatic element:

1 – cord 40L15; 2 – pneumatic element section; 3 – separate load-bearing belt; 4 – cord 22L15

Пневматическая оболочка, взаимодействующая с опорной поверхностью и обеспечивающая реализацию сцепления гусеницы с полотном пути и передачу тягового усилия, выполнена как единое целое с силовым поясом пневмоэлемента. Она обуславливает упругость гусеницы в вертикальном и боковом направлениях. Жесткость оболочки определяется давлением воздуха, конструкцией боковин, числом слоев корда и углами укладки нитей корда. Жесткостные параметры оболочки выбираются из условия обеспечения требуемого пятна контакта с опорной поверхностью и устойчивости машины в боковом направлении. Эти параметры зависят от внутреннего давления воздуха в элементе, от числа слоев от схемы ук-

ладки армирующих материалов и определяются в первом приближении по аналогии с автомобильными шинами. Экспериментально установлено, что прогиб пневмотраков при номинальной вертикальной нагрузке должен быть ограничен величиной 10-12 % от высоты профиля, что согласуется с опытом проектирования и эксплуатации диагональных автомобильных шин.

Наибольшее влияние на величину прогиба оказывает давление воздуха в диапазоне 0-0.2 МПа. Дальнейшее повышение давления незначительно увеличивает грузоподъемность пневмотрака. На рис.12 показана зависимость прогиба Δh пневмоэлемента от внутреннего давления воздуха при различных углах закроя корда. Особенности поведения пневмоэлемента при нагружении внутренним давлением воздуха определяются свойствами его каркаса, состоящего из слоев обрешиненного корда с перекрещивающимися нитями, что обуславливает анизотропию механических свойств.

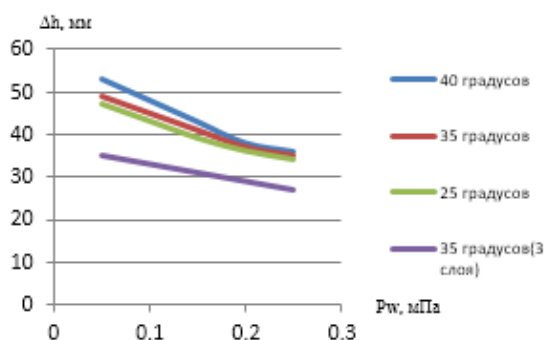


Рис. 12. Зависимость прогиба пневмоэлемента от внутреннего давления воздуха при различных углах закроя корда

Fig. 12. Dependence of the pneumatic element deflection on the internal air pressure at different cord cutting angles

При определении напряженного состояния резинокордной оболочки пневмоэлемента можно рассматривать его как тонкостенную сетчатую оболочку, нагруженную внутренним давлением. Для пневмогусениц с поперечным расположением пневмоэлементов расчетная методика потребовала существенного расширения и уточнения. Такая необходимость обусловлена тем, что поперечно расположенный пневмоэлемент передает тяговое усилие через оболочку на металлическую гусеничную цепь в паре силовой каркас-подошва металлического звена, а вертикальную нагрузку на опорную поверхность передается не только оболочкой, находящейся под звеном, но и своей консольной частью (рис. 13).

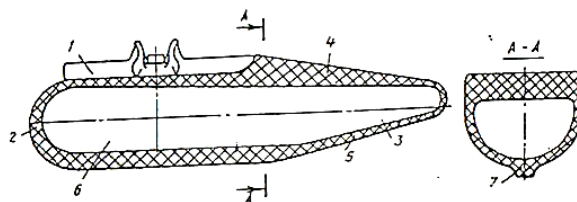


Рис. 13. Схема пневмоэлемента поперечно расположенного на тяговой цепи:

1 – тяговая цепь; 2 – пневмобаллон; 3 – внутренняя полость;
4 – эластичная консоль; 5,7 – грунтзацепы

Fig. 13. Diagram of a pneumatic element, transversely located on a drive chain:

1 – drive chain; 2 – pneumatic cylinder; 3 – internal cavity; 4 – elastic console; 5,7 – grousers

При передаче вертикальной нагрузки часть элемента, находящаяся под металлическим звеном, испытывает нагрузочный режим, аналогичный оболочке продольного расположенного пневмоэлемента. Консольная часть нагружена изгибающим моментом от верти-

кальной реакции опорной поверхности. Наиболее значимо это проявляется при движении машины по снегу и грунтам с низкой несущей способностью (болото, снег, пашня и пр.). Это обстоятельство потребовало разработки новой методики расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) каркаса пневмооболочки и силового пояса пневмоэлемента. Поскольку с математической точки зрения расчет пневмотрака на нагрузку, не зависящую от продольной координаты и расчет НДС пневматической шины эквивалентны, то и методики их расчета во многом должны быть близки. Однако специфика взаимодействия пневмотрака с деформируемым основанием и наличие изгибаемой консольной части исключает возможность применения безмоментной теории сетчатых оболочек Бидермана, поэтому расчет НДС проводился по модели моментной многослойной анизотропной оболочки Кирхгофа-Лява и сдвиговой оболочки типа Тимошенко [6].

При определении НДС пневмотрака решены две независимые задачи:

- расчет НДС и контактного давления для некруговой цилиндрической многослойной оболочки под действием нагрузки, независимой от продольной координаты;
- расчет НДС для некруговой цилиндрической оболочки от изгибающей нагрузки.

При анализе напряженно-деформированного состояния пневмотрака, контактирующего с жестким основанием, рассматривалась многослойная оболочка, геометрические параметры и механические характеристики которой были заданы из реальной конструкции. Расчетно-теоретические исследования НДС пневмоэлементов и эксперименты по оценке деформаций пневмотраков под действием вертикальных нагрузок на различных опорных поверхностях показали высокую сходимость результатов, позволили обосновать прочностные и геометрические параметры элементов и определили необходимость учета упругодемпфирующих свойств пневмотраков при анализе плавности хода машин.

Исследования колебаний корпуса были проведены для пяти- и шестикатковых машин с пневматическими и металлическими гусеницами. Во-первых, необходимо было установить влияние на динамику колебаний машины (движение без явлений «пробоев» пневмоэлементов) таких параметров пневматической гусеницы, как коэффициент демпфирования и вертикальная жесткость, а также исследовать влияние некоторых конструктивных параметров самой машины на уровень колебаний корпуса в различных условиях движения. Второй задачей являлось исследование нелинейной динамики системы поддрессирования машины в критических случаях движения, когда возникают «пробои» пневмоэлементов при переездах через сосредоточенные препятствия.

В табл. 1. приведены обобщенные данные по вертикальным ускорениям центра масс корпуса исследованной машины при ее движении по трассе со случайным профилем неровностей как без учета «пробоев» пневматического элемента, так и с их учетом.

Таблица 1.

Вертикальные ускорения центра масс машины

Table 1.

Vertical accelerations of the vehicle center of mass

№	Тип машины	Применяемая модель	$Q_{y_{шт}}$	$D_{y_{шт}}$	Примечание
1	Машина с ПГ	Линейная модель	2,4	5,76	
2	Машина с ПГ	Нелинейная модель	3,2	10,24	Расчетное количество «пробоев» на участке 200 м составило 3-5 раз
3	Машина с МГ	Линейная модель	4,9	24,01	

Сравнение расчетных значений ускорений центра масс корпуса машин при движении по дорогам со случайным микропрофилем показывает, что уровень ускорений центра масс машины с металлическими гусеницами выше почти в 1,5 раза [8]. Для проверки расчетов были проведены экспериментальные исследования плавности хода на фонах, характерных для сельскохозяйственных и транспортных машин: грунтовая дорога и паровое поле. В ходе

исследований фиксировались вертикальные ускорения на сидении механика-водителя, в центре масс и в двух точках носовой части корпуса обоих бортов.

Результаты экспериментальных исследований, отмечены точками на рис. 14, 15. Очевидно, характер изменения расчетных и экспериментальных среднеквадратических значений ускорений идентичны. Количественное совпадение результатов следует считать удовлетворительным. Средняя погрешность при этом составляет 20-25 %. Анализ показал, что при движении по паровому полю среднеквадратические ускорения на сидении механика-водителя машины с пневматической гусеницей изменяются от 0,9 до 4,2 м/с², для машины с металлической гусеницей, соответственно, при тех же условиях движения находятся в диапазоне от 1,8 до 7,2 м/с². Из анализа уровня колебаний машин при движении по укатанной грунтовой дороге следует, что среднеквадратические значения ускорений по сути одинаковы и изменяются в диапазоне от 1,4 до 1,8 м/с².

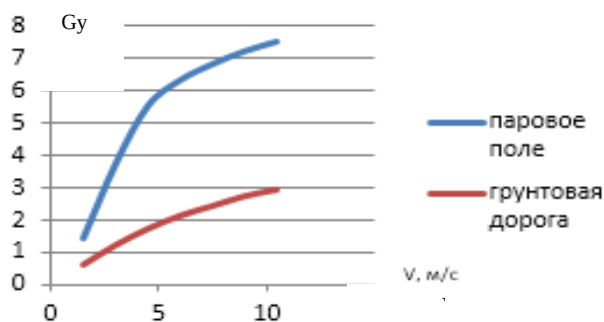


Рис. 14. Среднеквадратические значения ускорений на сидении водителя (металлогусеница):

1 – паровое поле; 2 – грунтовая дорога

Fig. 14. Root mean square acceleration values at the driver's seat (metal track):

1 – fallow field, 2 – dirt road

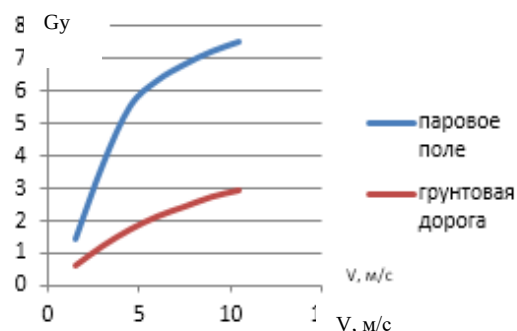


Рис. 15. Среднеквадратические значения ускорений на сидении водителя (пневмогусеница):

1 – паровое поле; 2 – грунтовая дорога

Fig. 15. Root mean square acceleration values at the driver's seat (pneumatic track):

1 – fallow field; 2 – dirt road

Проведенным анализом влияния параметров пневматических элементов движителя на колебания корпуса машины установлено:

- уменьшение жесткости пневмоэлемента (при прогибе не более 10+12 %) приводит к уменьшению уровня колебаний корпуса; (оптимальная величина жесткости в расчетах была принята $C_{пг} = 160 \frac{\kappa H}{м}$);
- выбор коэффициента демпфирования необходимо проводить по допускаемому прогибу пневмоэлемента, (оптимальная величина коэффициента демпфирования в расчетах была принята $K_{пг} = 400 \frac{\kappa^2}{с}$).

Установка пневмогусениц взамен металлических обеспечивает снижение уровня колебаний машины при движении через единичную неровность в 1,8 -2,2 раза; при движении по реальному микропрофилю среднеквадратические значения ускорений корпуса снижаются в 1,2-1,7 раза. Большой цикл работ был проведен по исследованию влияния пневматических гусениц на уплотнение почвы, распределение напряжений внутри почвы и как следствие влияние их на урожайность ряда сельскохозяйственных культур [7]. Тягосцепные параметры исследовались как при обработке почвы сельскохозяйственными тракторами, так и на снегоболотоходных машинах в условиях болот и снежной целины.

Проведенные исследования показывают, что и у тракторов Т-70С, Т-54С (ПГ), Т-150 (ПГ) и транспортеров ГАЗ-47, ГАЗ-71 под воздействием движителей зафиксировано измене-

ние плотности почвы на глубину до 400-500 мм (с учетом колеи). Но степень уплотнения под движителями с металлическими и пневматическими гусеницами различна. Общее уплотнение почвы по следам Т-54С (ПГ) и Т-150 (ПГ) меньше, чем по следам Т-70С и Т-150, соответственно на 23,9 и 28,3 %, при этом осадка уплотнения составляет 57-64 % от общей глубины следов. При определении твердости почвы по следам Т-54С (ПГ) и Т-150 (ПГ) установлено, что на глубине до 100 мм она соответственно на 36 и 14 % меньше, чем по следам тракторов Т-70С и Т-150. При вспашке почвы на глубину 100 мм (стерня озимой пшеницы) получено, что сопротивление плугу по следу трактора Т-150 (ПГ) на 15,5 %, а по следу трактора Т-150 – на 24,7 % выше, чем вне следа.

Согласно результатам испытаний, на снегу транспортные средства с пневматическими гусеницами имеют в 1,4-1,8 раза большую силу тяги по сцеплению, чем машины с металлическими гусеницами в тех же условиях. Это объясняется в основном более равномерным распределением нормальных нагрузок по длине опорной поверхности движителя, увеличением активной опорной поверхности гусеницы, большим коэффициентом трения пневматической гусеницы по полотну пути. Имеет значение также то, что касательные реакции от грунтазацепов всех траков, лежащих в зоне контакта движителя с полотном пути, располагаются в направлении движения машины (за счет высокой обратной жесткости гусеницы). Но у мелкозвенчатых гусениц с большим прогибом между опорными катками направление реакций от зацепов, следуя изгибу гусениц, отклоняются от направления движения машины. Наряду с этим, высокие сцепные характеристики пневмогусеничного движителя (ПГД) объясняются большей самоочищаемостью ПГ благодаря ее эластичности. В движителе с металлическими гусеницами опорная поверхность гусеницы из-за сильного налипания, особенно при температуре воздуха, близкой к нулю, практически забита снегом, и сила тяги по сцеплению определяется трением *снег по снегу* (рис. 16).



Рис. 16. Состояние пневматической и металлической гусениц при движении по снегу при температуре воздуха, близкой к нулевой

Fig. 16. Condition of pneumatic and metal tracks when moving on snow at air temperature near freezing

Основной вид сопротивления при движении гусеничных машин по снежной целине – за счет вертикальной деформации снега. Сравнительные исследования позволили установить, что на снежной целине глубиной 250-750 мм коэффициент сопротивления движению у машины с ПГ в 1,2-1,5 раза ниже, чем с металлическими, за счет того, что глубина колеи первой в 1,5-2 раза меньше колеи второй (рис. 17).

Кроме того, в результате прогиба металлической гусеницы между опорными катками возникает дополнительное сопротивление на перекачивание машины, чего в ПГД практически не наблюдается. В ПГД значительно снижается количество снега, попадающего на беговую дорожку под опорные катки. Пневмогусеничный транспортер способен двигаться по снежной целине глубиной 500-700 мм на всех передачах со скоростями 25-30 км/ч; в то же время с металлическими гусеницами он движется только на первой и второй передачах со

скоростями 10-15 км/ч. При движении пневмогусеничной машины по укатанной заснеженной дороге коэффициент сопротивления движению был выше (за счет гистерезисных потерь) и составил 0,10-0,11, соответственно, для машины с металлическими гусеницами он был равен 0,08. Основные пути снижения коэффициента сопротивления движению пневмогусеничных транспортных средств при движении по твердым дорогам связаны с применением материалов с малыми гистерезисными потерями и конструктивными доработками пневмоэлементов.

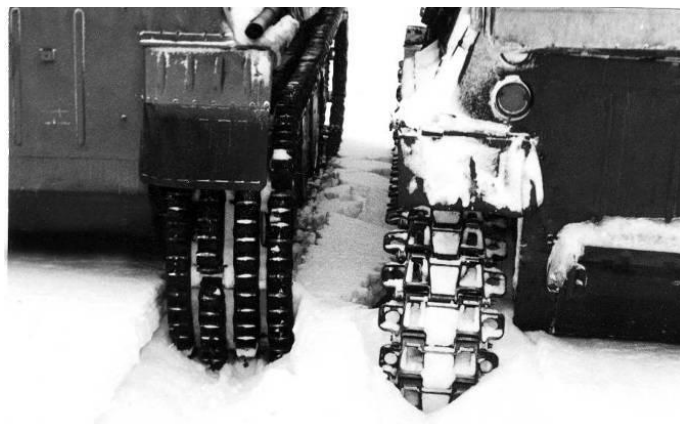


Рис. 17. Колея машин с пневматической и металлической гусеницами на снежной целине

Fig. 17. Track rut left by vehicles with pneumatic and metal tracks on virgin snow

На этом этапе работы по созданию и исследованию пневмогусеничных движителей были решены следующие задачи:

- 1) выяснена принципиальная возможность работы резинокордной оболочки с внутренним избыточным давлением воздуха в качестве тягообразующего и несущего элемента гусеничной цепи;
- 2) разработана технология изготовления, оценена трудоемкость и особенности технологического процесса изготовления пневматических гусениц;
- 3) разработаны новые конструкторские решения наиболее оптимальных образцов пневматических элементов гусеничного движителя;
- 4) проведен сравнительный анализ экономической эффективности и экологической целесообразности пневмогусеничного движителя в сравнении с традиционными гусеничными движителями;
- 5) выявлен и оценен наиболее целесообразный класс пневмогусеничных ТТМ и наиболее эффективные области их применения.

Второе направление работы было посвящено созданию движителя с поперечным расположением пневматических траков относительно тяговой металлической цепи [5]. При этом решались два вопроса:

- 1) повышение проходимости и экологичности серийно выпускаемых машин;
- 2) создание новых машин, наиболее полно отвечающих всем требованиям с учетом эксплуатации их в условиях пахотных земель, болот и снежной целины.

ПГ состоит из поперечно закрепленных пневматических элементов (траков) на серийных либо специально созданных звеньях. Пневматические элементы цилиндрической равновесной формы на опорной поверхности (в поперечном сечении) имеют грунтозацепы, а на участках, сопрягаемых с металлическими гусеницами – детали крепления (болты и гайки). ПГ может быть симметричной относительно тяговой цепи или имеет консольное эластичное уширение во внешнюю сторону машины.

Пневматическими гусеницами с поперечным расположением элементов были оборудованы следующие серийно выпускаемые машины:

- экскаваторы ЭО-5015, ЭО-4121, ЭО-4124 (рис. 18-20);
- лесозаготовительные тракторы: ТДТ-55, ЛП-18Д (рис. 21-22).



Рис. 18. Экскаватор ЭО-5015

Fig. 18. Excavator EO-5015



Рис. 19. Экскаватор ЭО-4124

Fig. 19. Excavator EO-4124



Рис. 20. Пневмогусеничный движитель экскаватора

Fig. 20. Pneumatic track mover of an excavator



Рис. 21. Лесозаготовительный трактор ТДТ-55

Fig. 21. Logging tractor TDT-55



Рис. 22 Валочно-тревочная машины ЛП-18Д

Fig. 22. Felling and skidding machine LP-18D

При этом для серийно выпускаемых экскаваторов преследовалась основная цель – преобразование неболотоходных машин обычного исполнения (более дешевые) в болотоходные. Пневмотраки устанавливаются на серийную металлическую гусеницу с уширением во внешнюю сторону. Рассматривались два варианта пневмогусениц: первый – траки отличались по длине и при установке чередовались: короткий – длинный, образующиеся окна

между длинными траками обеспечивали значительно увеличение тяговых характеристик машины. Это требовало иметь при эксплуатации два типа траков в случае выхода из строя. Во втором варианте на тяжелых экскаваторах пневмотраки были одинаковой длины.

Величина среднего давления на грунт уменьшалась более чем в два раза. Экскаваторы имели возможность уверенно выполнять работы не только на переувлажненных грунтах, но и на болотах первого и частично второго типов. Сравнительные экспериментальные исследования по определению показателей проходимости лесозаготовительных машин на пневматических гусеницах проводились совместно с ЦНИИМЭ. Испытания серийного трактора ТТ-4М и трактора ТТ-4М с ПГД проводились одновременно, далее они были продолжены на трелеровочной бесчокерной машине ЛП-18Д.

По результатам испытаний было установлено, что:

- сопротивление движению ЛП-18Д-ПГД на 26 % ниже по сравнению с ЛП-18Д;
- после десяти проездов сравниваемых машин в холостом режиме движения по переувлажненному лесному грунту колесообразование ЛП-18Д-ПГД в 3,5 раза меньше, чем у ЛП-18Д, при этом повреждения дернового слоя после проездов ЛП-18Д-ПГД наблюдалось незначительно.

При проведении исследований определялось напряженное состояние грунта и колесообразование под движителями на грунтовых участках при различных нагрузочных режимах и скоростях движения машины. На процесс колесообразования главным образом влияют значения максимальных пиковых нормальных давлений (МПНД) движителя машины на грунт, в связи с этим, проведен анализ экспериментальных данных по распределению величины максимальных пиковых нормальных напряжений (МПНН) по глубине грунта под движителями ТТ-4М (табл. 2).

Таблица 2.

Распределение максимальных пиковых нормальных напряжений по глубине грунта под серийным движителем и ПГД

Table 2.

Distribution of maximum peak normal stresses by soil depth under a serial and pneumatic track movers

Глубина закладки датчика, м	Вес груза, кН	Максимальные пиковые нормальные напряжения, кПа					
		Серийный движитель			ПГД		
		Передачи					
		1	3	5	1	3	5
0,2	65	136,9	176,0	219,1	83,0	65,1	95,5
	0	117,8	138,8	157,9	98,7	75,7	77,0
0,4	65	72,9	91,6	109,7	55,4	52,6	53,2
	0	79,5	80,6	87,2	57,6	44,4	45,5
0,6	65	43,2	53,2	52,1	32,0	30,2	38,2
	0	53,2	53,2	55,4	36,9	30,7	31,6

Согласно полученным данным, установлено, что с ростом скорости движения в холостом и грузовом режимах у трактора ТТ-4М величина МПНН возрастает в среднем на 10 % с переходом на каждую высшую передачу коробки трансмиссии, а у ТТ-4М-ПГД значения МПНН несколько снижаются. Общей тенденцией для напряженного состояния грунта под движителями машин является уменьшение МПНН по глубине грунта и данное явление согласуется с основными положениями механики грунтов. Сравнительный анализ по величине МПНН в грунтовом массиве от воздействия движителей выявляет значительное преимущество движителя ТТ-4М-ПГД, которые составляют в среднем 45,7 % от значений МПНН ТТ-4М, при этом колесообразование серийной машины составило 20,5 см, а ТТ-4М-ПГД-10,9 см. Замеры нормальных напряжений по глубине грунта на различных испытательных участках определили коэффициент неравномерности распределения МПНН под движителями машин. Применение ПГД на ТТ-4М в 2,5-3 раза снижает коэффициент неравномерности

МПНН, следовательно, и нормальных давлений по длине опорной площади движителя. За счет обратной жесткости пневмоэлементов ПГД передача нагрузки от катка передается на большое количество звеньев гусеницы и этим, снижая воздействие на грунт, уменьшает величину колесообразования в два раза по сравнению с серийным движителем.

Важным параметром профильной проходимости для машин является конструктивная величина клиренса машины. Установка ПГД при прочих упомянутых выше положительных качествах повышает клиренс на 130 мм.



Рис. 23. Трактор ВТ-150 на пневматических гусеницах

Fig. 23. VT-150 tractor on pneumatic tracks

ПГ трактора ВТ-150 (рис. 23) представляет собой гусеничную цепь, состоящую из 44 пневмотраков, соединенных между собой металлическим пальцем диаметром 25 мм (рис. 24). Пневмотрак, в свою очередь, состоит из металлического звена 1 и соединенного с ним пневмоэлемента 2 (рис. 25). Металлическое звено в верхней части имеет конструктивные элементы (беговую дорожку – 3, направляющие гребни – 4 и поверхности зацепления – 5 с ведущим колесом), аналогичные серийному тракту гусеничной цепи трактора ВТ-150, это позволяет установить пневматическую гусеницу на серийную ходовую систему трактора без ее доработки. На нижней поверхности металлического звена сформировано углубление с ребрами, сопрягаемое с присоединительной поверхностью пневмоэлемента. На горизонтальной поверхности звена выполнены 4 отверстия под крепление пневмоэлемента. На рис. 24 изображен продольный разрез пневмотрака.

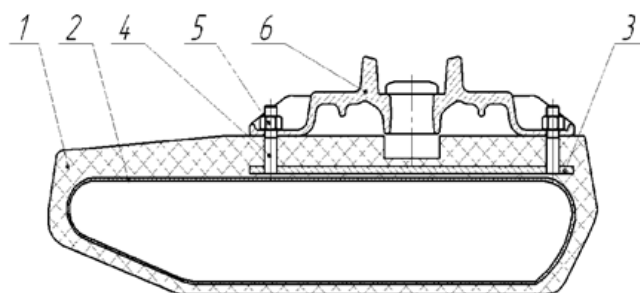


Рис. 24. Гусеница трактора ВТ-150, продольный разрез:

1 – оболочка с каркасом; 2 – пневмокамера; 3 – пластина;
4 – болт; 5 – гайка; 6 – металлический трек

Fig. 24. VT-150 tractor track, longitudinal section:

1 – shell with frame; 2 – air chamber; 3 – plate; 4 – bolt; 5 – nut; 6 – metal track

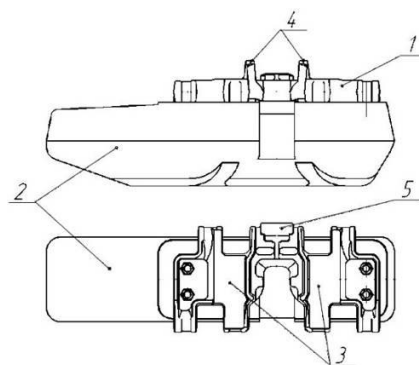


Рис. 25. Гусеница трактора ВТ-150 в сборе

Fig. 25. Complete track assembly for the VT-150 tractor

Пневмоэлемент представляет собой армированную эластичную (резиновую) полую оболочку 1 с каркасом, пневмокамерой 2 и стальной крепежной пластиной 3 с четырьмя шпильками 4. Каркас состоит из трех слоев металлокорда и четырех слоев синтетического корда. Это основа пневмоэлемента, обеспечивающая ему прочность, гибкость, упругость и сохранение формы. Каркас принимает на себя значительную часть нагрузки, которая действует на пневмоэлемент. Пневмокамера 2 состоит из тонкостенной резиновой оболочки и вентили с золотником. Камера в конструкции выполняет двойную функцию. На стадии изготовления (вулканизации) пневмоэлемента она поддерживает технологическое давление внутри пресс-формы; в готовом изделии в корпус золотника вкручивается золотник и устанавливается колпачок для поддержания внутри пневмоэлемента атмосферного давления воздуха. Во время эксплуатации при наезде на него опорным катком давление внутри пневмоэлемента увеличивается. На внешней поверхности пневмоэлемента выполнены грунтозацепы для повышения тягового усилия. Ширина пневмоэлемента на 10 % больше, чем шаг металлического звена. За счет этого при сборке пневмотраков в гусеничную цепь возникает эффект обратной жесткости. На ведущем колесе и ленивце звенья гусеницы укладываются свободно. При попытке прогнуть ее в обратную сторону (нагрузка в зонах между опорными катками при переезде через препятствие), когда пневмоэлементы прижимаются друг к другу, возникают упругие силы, удерживающие гусеницу от такого прогиба. Обратная жесткость гусеницы позволяет более равномерно распределить давление на почву от опорных катков. Это приводит к уменьшению неравномерности распределения давления под гусеницами.

Полевые испытания были проведены в ФГУ «Северо-Кавказская МИС» на тракторе ВТ-150. Программа-методика испытаний на тракторе ВТ-150 предусматривала сравнительные испытания трех типов гусениц:

- 1) серийной металлической гусеницы, с открытыми металлическими шарнирами;
- 2) пневматической гусеницы; пневмоэлементы, закрепленные на металлической гусенице с открытыми металлическими шарнирами;
- 3) резинометаллической (резиноармированной) гусеницы.

Сравнительные испытания проводились с целью: 1) определения тяговых показателей в соответствии с требованиями ГОСТ 30745-2001 «Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей»; 2) определения параметров воздействия движителей на почву в соответствии с требованиями ГОСТ 26955-86 «Техника сельскохозяйственная, мобильная. Нормы воздействия движителей на почву».

Полученные результаты испытаний на сельхозугодиях в рамках выполненной работы позволили сделать вывод, что применение разработанных пневмогусениц на сельскохозяйственных тракторах в сравнении с колесными движителями обеспечивает:

- 1) повышение тягово-сцепных свойств, значение тягового КПД трактора составило 0,791...0,796, вместо 0,65 для колесного при меньшем (не менее чем в два раза) буксовании;
- 2) снижение величины максимального давления на почву в 3-4 раза;
- 3) повышение проходимости и обеспечение возможности эффективной работы на тяжелых и переувлажненных почвах;
- 4) обеспечение выхода в поле на 5-6 дней раньше в весенний период.

В сравнении с ходовыми системами на металлических гусеницах применение пневмогусениц позволяет:

- 1) обеспечить возможность движения по дорогам с твердым и усовершенствованным покрытием без их разрушения;
- 2) обеспечить возможность выхода в поле на 5-6 дней раньше в весенний период;
- 3) обеспечить повышенный ресурс на почвах с высоким содержанием абразива не менее чем в 1,5 раза;
- 4) снизить вибронегруженность на сиденье водителя в 1,4...1,9 раза и максимальный уровень шума в кабине в 2...3 Дб;
- 5) снизить максимальное давление на почву в 2,2...2,4 раза;
- 6) обеспечить снижение пиковых нагрузок на почву под катками трактора в 1,3...1,6 раза;
- 7) обеспечить средний производственный ресурс гусениц трактора не менее 1000 ч или трех лет эксплуатации.

Указанные выше величины ресурса даны на основании опыта эксплуатации пневмогусениц на снегоболотоходах ТТМ 6901 производства ООО НПО «Транспорт». По сравнению с резиноармированной, ПГ имеет лучшую ремонтопригодность. Это обусловлено возможностью замены или ремонта вышедших из строя пневмотраков, а также лучшими условиями для монтажа гусеницы на машину в случае ее сброса. Поэтому для техники, эксплуатируемой в условиях, где вероятен сброс гусеницы (болота, косогоры и др.) предпочтение должно быть отдано пневматической гусенице. ПГ рекомендуется для проведения сельскохозяйственных работ при любых значениях влажности почвы, по сравнению с металлической она обеспечивает снижение максимального давления на почву в 1,4 раза, а также обеспечивает улучшение условий труда оператора по уровням вибрации на рабочем месте в 1,38 раза.

Современные тенденции развития снегоболотоходной техники с применением пневмогусеничного движителя

Новые снегоболотоходные машины семейства ТТМ-6901 оборудованы симметрично расположенными пневматическими траками: ТТМ-6901 базовое шасси, ТТМ-6902Э с экскаваторной установкой «Святовит», ТТМ-6902ПНУ с насосной установкой ПНУ-2, ТТМ-6902ГМ с краноманипуляторной установкой ИФ300С-15, ТТМ-6902АКМ с вакуумной нефтепромысловой цистерной АКН-7,5 ОД, ТТМ-6902ГС с самосвальной установкой, ТТМ-6902ПЖ с пожарным оборудованием для тушения лесных пожаров (рис. 26-32) [9].

Для выравнивания эпюры давления у всех указанных машин, поперечно расположенные пневмоэлементы устанавливаются также с предварительным натягом по боковым поверхностям, обеспечивающим высокую обратную жесткость на верхней и опорной ветвях обвода. Наличие предварительного натяга между элементами в верхней ветви обвода стабилизирует ее поведение при значительно меньшем предварительном натяжении гусеницы.

Эластичные консоли гусеницы при движении по ровному деформируемому полотну пути (болото, снежная целина) отгибаются на 10-12°. За счет эластичности консольные части пневматических элементов при наездах на сосредоточенные единичные препятствия (пни, валуны, кочки, бревна и т.п.) могут отгибаться практически до 90°. После снятия воздействия на трак его первоначальная форма восстанавливается.



Рис. 26. ТТМ-6901 Базовое шасси

Fig. 26. TTM-6901. Basic chassis



Рис 27. ТТМ-6901Э – снегоболотоход с экскаваторной установкой

Fig. 27. TTM-6901E. Snow and swamp-going vehicle with an excavator mount



Рис. 28. ТТМ-6901ПНУ – снегоболотоход с насосной установкой

Fig. 28. TTM-6901PNU. Snow and swamp-going vehicle with a pump unit



Рис. 29. ТТМ -6901ГМ – снегоболотоход с краноманипуляторной установкой

Fig. 29. TTM-6901GM. Snow and swamp-going vehicle with a crane-manipulator unit



Рис. 30. ТТМ-6901ГС – снегоболотоход с самосвальной установкой

Fig. 30. TTM-6901ГС. Snow and swamp-going vehicle with dump truck



Рис. 31. ТТМ-6902АКМ с вакуумной нефтепромысловой цистерной АКН-7,5 ОД

Fig. 31. TTM-6902AKM. Snow and swamp-going vehicle with vacuum oilfield tank АКН-7,5 ОД

На конструкции пневматических гусениц с поперечным расположением элементов получено более 10 патентов, в том числе, на технологию изготовления пневмотраков.



Рис. 32. ТТМ-6901ПЖ – снегоболотоход с комплектом пожарного оборудования для тушения лесных пожаров

Fig. 32. TTM-6901PZH. Snow and swamp-going vehicle with firefighting equipment for extinguishing forest fires

Установка пневматических гусениц взамен металлических дает выравнивание эпюры распределения давления по длине опорной поверхности. Распределение давления вдоль опорной поверхности ПГД (рис. 33) так же, как и в движителе с металлическими гусеницами, является несколько неравномерным, но вершины пиковых давлений под катками скруглены, и удельные давления межкатковых участков гусеницы соизмеримы с максимальными пиковыми давлениями под катками. Коэффициент неравномерности эпюры давлений при этом в 1,5-1,9 раза ниже у движителя с пневматическими гусеницами. Максимальная величина коэффициента неравномерности эпюры удельных давлений для шестикатковой машины на пневматических гусеницах при движении по песку $a=1,7$, в тех же условиях с металлическими гусеницами, $a=3,25$.

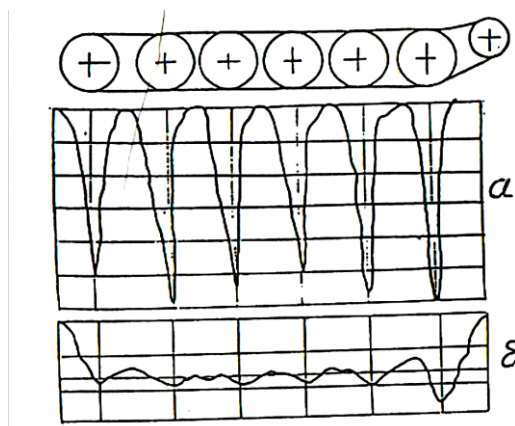


Рис. 33. Распределение давления вдоль опорной поверхности:

a – металлогусеница; б – пневмогусеница

Fig. 33. Pressure distribution along the bearing surface:

a – metal track; b – pneumatic track

Анализ коэффициента полноты использования опорной поверхности и коэффициента неравномерности (а) показывает, что активная длина опорной поверхности пневматической гусеницы в 2-2,3 раза выше, чем металлической гусеницы аналогичной машины, работающей в тех же условиях. Таким образом, ПГ описанной конструкции имеет большую по сравнению с металлической длину активной части опорной поверхности, т.е. обеспечивает более полное использование опорной поверхности гусеничного движителя. Из представленных эпюр распределения удельных давлений следует, что вертикальная нагрузка, воспринимаемая межкатковым участком пневматической гусеницы, значительно больше, чем нагрузка, воспринимаемая тем же участком движителя с металлической гусеницей, что обуславливает-

ся высокой обратной жесткостью пневматической гусеницы, перераспределением вертикальных нагрузок резинокордной оболочкой с внутренним давлением воздуха, копированием ею неровностей полотна пути, высота которых меньше или равна высоте пневмобаллона. Как показали расчетно-теоретические и экспериментальные исследования, а также многолетний опыт эксплуатации ПГД с поперечным расположением пневмотраков рассмотренных конструкций, они пригодны для тяговых и технологических снегоболотоходных и сельскохозяйственных машин, максимальная скорость которых не превышает 30 км/час.

Снегоболотоходные пневмогусеничные плавающие машины семейства ТТМ-6901 с различным технологическим оборудованием широко используются на предприятиях топливно-энергетического комплекса страны при обслуживании магистральных нефтегазопроводов, линий электропередач на Дальнем Востоке, Западной Сибири, полуострове Таймыр, в Республике Коми, а также в Казахстане и республике Беларусь.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования, а также многолетний опыт эксплуатации подтвердили, что применение пневмогусеничных движителей (как с продольным, так и с поперечным расположением пневмоэлементов) позволяет существенно повысить проходимость и экологичность транспортно-технологических машин. Установлено, что пневмогусеницы обеспечивают более равномерное распределение давления на опорную поверхность, снижают пиковые нагрузки на грунт в 1,5-3 раза, уменьшают глубину колеи и степень уплотнения почвы, что особенно важно для сельскохозяйственных угодий, лесных территорий и земель в зоне тундры.

По сравнению с металлическими гусеницами пневмогусеницы демонстрируют лучшие тягово-сцепные свойства (особенно на снегу, болотах и переувлажненных грунтах), снижают вибронагруженность рабочего места оператора в 1,4-1,9 раза и позволяют приступать к полевым работам весной на 5-6 дней раньше. Разработанные конструкции успешно прошли испытания на тракторах, экскаваторах, лесозаготовительных и снегоболотоходных машинах, а их эффективность подтверждена серийным выпуском и эксплуатацией в различных регионах России и странах СНГ.

Таким образом, пневмогусеничные движители являются перспективным направлением развития наземных транспортно-технологических средств и комплексов, обеспечивающим рациональный компромисс между высокой производительностью, сохранением плодородия почв и минимизацией техногенного воздействия на окружающую среду.

Автор выражает благодарность всем участникам проекта «Высокоэластичные гусеничные движители», принимавшим участие в разное время в течение пятидесяти лет в разработке, исследованиях опытных образцов (МВТУ им. Н.Э. Баумана, НАМИ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ЦНИИМЭ, ВИМа), серийно выпускаемых пневмогусеничных движителей и машин на них (ООО НПО «Транспорт», а также специалистов занимающихся эксплуатацией машин на пневматических гусеницах (ПАО «Траснефть», ПАО «Газпром», ПАО «Роснефть», ПАО «Россети»).

Библиографический список

1. **Бочаров, Н.Ф.** Транспортные средства на высокоэластичных движителях / Н.Ф. Бочаров, В.И. Гусев, В.М. Семёнов. – М.: Машиностроение, 1974. – 209 с.
2. **Новиков, Ю.П.** К вопросу применения пневматических гусениц на транспортных средствах / Ю.П. Новиков, Н.Б. Веселов // Труды ГПИ им. А.А. Жданова. – 1973. – Т. 29, вып. 17. – С. 37-40.
3. **А.С. № 985869** (1982). Пневмотрак гусеничного транспортного средства / Н.Б. Веселов, С.В. Руквишников, А.М. Растворов, Л.В. Барахтанов. – Заявитель: Горьковский политехнический институт им. А.А. Жданова.
4. **А.С. № 1129115** (1983). Пневмотрак гусеничного транспортного средства / Н.Б. Веселов, В.А. Антонец, Л.В. Барахтанов, Ю.Н. Васькина, Л.И. Вахрушин, А.П. Ермаков, Ю.Д. Седов. – Заявитель: Горьковский политехнический институт им. А.А. Жданова.

5. **Бочаров, Н.Ф.** Новые конструкции высокоэластичных гусеничных движителей и перспективы их применения на сельхозмашинах / Н.Ф. Бочаров, Н.Б. Веселов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 1985. – С. 12-18.
6. **Веселов, Н.Б.** Конструирование и расчет гусеничных транспортно-технологических машин / Н.Б. Веселов. – Нижний Новгород: Р.И. Бегемот, 2012. – 254 с.
7. **Веселов, Н.Б.** Сравнительный анализ воздействия на почву пневматических и металлических гусениц / Н.Б. Веселов, С.В. Рукавишников // Труды ВИМ. – 1978. – Т. 81. – С. 110-118.
8. **Веселов, Н.Б.** Конструкции и особенности эксплуатации гусеничных транспортно-технологических машин / Н.Б. Веселов. – Нижний Новгород: РИ Бегемот, 2012. – 232 с.
9. **Веселов, Н.Б.** Транспортно-технологические машины / Н.Б. Веселов. – Нижний Новгород: ООО НПО «Транспорт»: Кварц, 2022. – 148 с.

References

1. Bocharov N.F., Gusev V.I., Semenov V.M. Transportnye sredstva na vysokoelastichnykh dvizhitelyakh [Vehicles on highly elastic propulsors]. Moscow: Mashinostroenie; 1974. 209 p. (in Russian).
2. Novikov Yu.P., Veselov N.B. K voprosu primeneniya pnevmaticheskikh gusenits na transportnykh sredstvakh [On the issue of using pneumatic tracks on vehicles]. *Trudy GPI im. A.A. Zhdanova* [Proceedings of Gorky Polytechnic Institute named after A.A. Zhdanov]. 1973;29(17):37-40. (in Russian).
3. Veselov N.B., Rukavishnikov S.V., Rastvorov A.M., Barakhtanov L.V. Avtorskoe svidetel'stvo № 985869 (1982). Pnevmotrak gusenichnogo transportnogo sredstva [Pneumatic track of a tracked vehicle]. Applicant: Gor'kovskiy politekhnicheskiiy institut im. A.A. Zhdanova. (in Russian).
4. Veselov N.B., Antonets V.A., Barakhtanov L.V., Vas'kina Yu.N., Vakhrushin L.I., Ermakov A.P., Sedov Yu.D. Avtorskoe svidetel'stvo № 1129115 (1983). Pnevmotrak gusenichnogo transportnogo sredstva [Pneumatic track of a tracked vehicle]. Applicant: Gor'kovskiy politekhnicheskiiy institut im. A.A. Zhdanova. (in Russian).
5. Bocharov N.F., Veselov N.B., et al. Novye konstruksii vysokoelastichnykh gusenichnykh dvizhitelya i perspektivy ikh primeneniya na sel'khoz mashinakh [New designs of highly elastic tracked propulsors and prospects for their use on agricultural machinery]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and Agricultural Machinery]. 1985:12-18. (in Russian).
6. Veselov N.B. Konstruirovaniye i raschet gusenichnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin [Design and calculation of tracked transport and technological vehicles]. Nizhny Novgorod: R.I. Begemot; 2012. 254 p. (in Russian).
7. Veselov N.B., Rukavishnikov S.V. Sravnitel'nyy analiz vozdeystviya na pochvu pnevmaticheskikh i metallicheskh gusenits [Comparative analysis of the impact of pneumatic and metal tracks on soil]. *Trudy VIM* [Proceedings of All-Union Research Institute of Agricultural Mechanization]. 1978;81:110-118. (in Russian).
8. Veselov N.B. Konstruksii i osobennosti ekspluatatsii gusenichnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin [Designs and operational features of tracked transport and technological vehicles]. Nizhny Novgorod: RN Begemot; 2012. 232 p. (in Russian).
9. Veselov N.B. Transportno-tekhnologicheskie mashiny [Transport and technological vehicles]. Nizhny Novgorod: ООО НПО «Транспорт»: Кварц; 2022. 148 p. (in Russian).

**Дата поступления
в редакцию: 09.11.2025**

**Дата принятия
к публикации: 18.05.2026**