

Бяков Константин Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА
И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛАСТОМЕХАНИЧЕСКОГО РОТОРНО-ВИНТОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ
ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СРЕДСТВА**

Специальность 05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена на кафедре многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: Наумов Валерий Николаевич
доктор технических наук, профессор
кафедры многоцелевых гусеничных
машин и мобильных роботов
ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: Шапкин Виктор Александрович
доктор технических наук, профессор
кафедры строительных и дорожных машин
ФГБОУ ВПО МГТУ им. Р.Е. Алексеева

Верещагин Сергей Борисович
кандидат технических наук, доцент
кафедры тягачей и амфибийных машин
ФГБОУ ВПО МАДИ

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Московский государственный
машиностроительный университет (МАМИ)»

Защита состоится «__» _____ г. в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005,
Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5., зал Ученого совета.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой
печатью учреждения, просим направлять адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская
ул., д. 5, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на официальном
сайте МГТУ им. Н. Э. Баумана: www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н.



Е.Б. Сарач

Актуальность темы

В настоящее время во многих странах активно ведутся работы по созданию новых транспортно-технологических средств и мобильных робототехнических комплексов. Одним из важнейших направлений в данной области являются исследования, посвященные вопросам улучшения проходимости подобных систем, то есть их способности безостановочно и эффективно передвигаться по различным типам грунтов.

Можно заметить, что большинство существующих комплексов предназначено, в первую очередь, для работы в условиях города и на относительно прочных основаниях. Однако при этом незанятым остается место универсального амфибийного движителя, способного обеспечивать хорошую проходимость в таких трудных грунтовых условиях, как глубокий снег, песок, переувлажненные болотистые и илистые участки местности. Чаще всего в ходовых системах специальных транспортно-технологических средств и мобильных робототехнических комплексов используются колесный и гусеничный движители - идея их применения вытекает из богатого опыта исследования и создания соответствующих многоцелевых машин. При этом возникает вопрос, почему при создании подобных систем инженеры практически не вспоминают о роторно-винтовых вездеходах, обладающих хорошей проходимостью на перечисленных выше сложных типах грунтов. Очевидно, что редкое использование движителя данного типа связано с некоторыми недостатками и особенностями его применения, а также с невозможностью изменения конструктивных параметров движителя в процессе движения.

Цель работы

Целью работы является повышение проходимости роторно-винтового движителя (РВД) и оснащенного им транспортно-технологического средства (ТТС) на деформируемых опорных основаниях путем изменения конструктивных параметров РВД при помощи технологий эласто- и пневмомеханики

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать математическую модель движения ТТС с эластомеханическим РВД изменяемой геометрии, особенностью которого является возможность дискретного варьирования угла наклона винтовой линии.
2. Верифицировать математическую модель движения ТТС с РВД и доказать эквидистантность протекания полученных теоретических и эмпирических кривых.
3. Провести расчетное исследование прямолинейного движения ТТС, оснащенного эластомеханическим РВД, при условии дискретного изменения угла наклона винтовой лопасти. Изучить влияние конструктивных параметров угла наклона (и соответственно высоты) винтовой лопасти на тяговые и скоростные характеристики ТТС. Обосновать целесообразность использования эластомеханического РВД в транспортной технике.
4. Исследовать движение ТТС с РВД, обладающих различными конструктивными параметрами по опорным основаниям с большим диапазоном

изменения физико-механических характеристик. В соответствии с полученными результатами дать рекомендации.

5. Провести анализ влияния физико-механических параметров грунта на тягово-скоростные характеристики ТТС с РВД. Рассмотреть возможность прогнозирования и корректировки необходимых величин угла наклона и высоты волны РВД для обеспечения оптимальных режимов движения ТТС в разных грунтовых условиях.

6. Для получения достоверных результатов при прогнозировании тяговых возможностей исследуемого перспективного движителя подготовить и провести эксперименты на стенде с заменой готового изделия его подобной моделью.

7. Выбрать тип оболочки предлагаемого эластомеханического роторно-винтового движителя и разработать методику расчета её напряженно - деформированного состояния.

8. Выработать общие рекомендации для разработчиков и исследователей ТТС с эластомеханическим РВД.

Поскольку исследование движения машины с новой конструкцией ходовой системы во всех, в том числе и слабоизученных режимах движения представляет собой комплексную задачу, было выдвинуто требование о необходимости и достаточности обоснования целесообразности использования эластомеханического РВД для улучшения параметров движения ТТС в основном режиме движения – прямолинейном.

Методология исследования

При проведении исследований использованы элементы системного подхода и известные аналитико-экспериментальные методы. Основой аналитических методов являются закономерности и приемы классической теоретической механики, физики деформируемого тела, террамеханики, элементы математического аппарата компьютерного моделирования. Адекватность математической модели реальному процессу движения обеспечивается оценкой математического ожидания экспериментальных величин с расчетными значениями характеристик физических моделей ТТС с РВД.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в создании оригинальной методики расчета параметров нового эластомеханического роторно-винтового движителя. В предлагаемой математической модели впервые рассматривается возможность варьирования конструктивных параметров в зависимости от грунтовых условий при движении транспортно-технологического средства с роторно-винтовым движителем изменяемой геометрии.

Новизной обладают: модель прямолинейного движения оснащенного РВД транспортно-технологического средства, созданная в пакете программ MatLab Simulink, методы моделирования параметров оригинального движителя и параметров движения, оснащенных им вездеходных транспортно-технологических средств, научно-обусловленное техническое решение, стендовое оборудование модуля генератора волн.

Достоверность

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и

рекомендаций подтверждается использованием строгого математического аппарата современной механики, научно-обоснованных теоретических предпосылок, адекватностью аналитических данных и экспериментальных результатов.

Практическая ценность

Практическая ценность работы заключается в реализации теоретических разработок, методик расчетов, предложенных практических рекомендаций при создании транспортно-технологических комплексов с эластомеханическим роторно-винтовым двигателем.

Апробация работы

Основные положения диссертации доложены, обсуждены и одобрены на конференциях, проходивших на кафедрах многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов и колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2011г., 2012г., 2013г.), а также на 87-ой международной научно-технической конференции «Эксплуатационная безопасность автотранспортных средств» в НГТУ им. Р.Е.Алексеева (Н. Новгород, 2014г.).

Личный вклад

Все представляемые к защите данные и результаты являются подлинными и оригинальными и, кроме специально оговоренных случаев, получены соискателем лично.

Публикации

Основное содержание работы отражено в 8 статьях, 5 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ. Общий объем публикаций – 4,874 печатных листов.

Реализация результатов работы

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедре многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов МГТУ им. Н.Э.Баумана, а также в выполняемой отделом СМ4-4 НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана НИР «Поисковые исследования в области военно – экономического обеспечения разработок и производства вооружений, и военной и специальной техники, а также создания перспективных робототехнических средств и многофункциональных конструктивных материалов» (шифр «Эстафета-Ф-МГТУ»), в части «Разработка возможных принципиальных схем построения, состав и структура двигателей наземных робототехнических комплексов с нетрадиционными принципами движения в зависимости от боевого применения».

Объем работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих результатов и выводов по работе, списка литературы из 111 наименований библиографии, приложения. Общий объем: 179 страниц, 90 рисунков, 27 таблиц.

Основные положения, выносимые на защиту диссертации:

1. Оригинальная математическая модель прямолинейного движения роторно-винтового транспортно-технологического средства и разработанная на ней методика расчета параметров оригинального эластомеханического РВД.

2. Результаты исследований и рекомендации по выбору рациональных параметров транспортно-технологического средства с эластомеханическим роторно-винтовым двигателем.

3. Научно-обусловленное техническое решение, представляющее собой эластомеханический роторно-винтовой двигатель.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, раскрыта методология исследования, отмечена научная новизна, указана практическая ценность получаемых результатов, указан объем работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена проблема создания универсального амфибийного двигателя вездеходного ТТС или мобильного роботизированного комплекса, способного обеспечивать надежное передвижение в таких тяжелых грунтовых условиях как песок, сильно переувлажненные болотистые и илистые участки местности, водные преграды, глубокий снег. Отмечена особая актуальность данной темы в связи с необходимостью освоения богатого полезными ископаемыми Арктического региона Российской Федерации. Предложен вариант решения данной задачи за счет использования роторно-винтового двигателя.

Проведен анализ результатов испытаний машин с подобным типом двигателя. Отмечена универсальность РВД, основанная на сочетании в себе качеств гидравлического и сухопутного двигателей, и достаточная эффективность работы на сильно переувлажненных грунтах, снегу, льду, воде и на опорных основаниях, являющихся комбинацией перечисленных сред.

Выделены основные недостатки роторно-винтовых машин, среди которых особенно подчеркнута низкая адаптивность данного типа двигателя. Отмечено, что многообразие свойств и конструктивных решений не позволяет реализовать преимущества РВД во всех режимах движения на различных подстилающих поверхностях в силу ограничений, наложенных на конкретно спроектированное шасси (например, фиксированная высота лопастей и угол наклона витков).

Для повышения адаптивных свойств РВД в работе предлагается использовать элементы эластомеханических и пневмооболочных технологий, представляющих собой активно развивающееся направление в технике, основанное на использовании эластичных свойств материалов и на преобразовании энергии рабочей среды, заключенной в оболочку, в движение.

После анализа существующих совмещенных («Аэролл», «пневмогусеница») и несомещенных («торовый двигатель») эластомеханических и пневмооболочных двигателей предложен оригинальный тип эластомеханического (эластовинтового) РВД. Данный тип двигателя должен сочетать высокую проходимость на традиционно сложных для преодоления машиной грунтовых основаниях с высокой адаптивностью, следующей из возможности формирования волн-лопастей с разными параметрами, в том числе и непосредственно в процессе движения. Конструкция предлагаемого двигателя

состоит из герметичной неподвижной полости, нагруженной изнутри избыточным давлением, обеспечивающим достаточную несущую способность ходового модуля, механизма генерации бегущей волны необходимой высоты и угла уклона и системы управления, оптимизирующей эти параметры в зависимости от грунтовых условий и режимов движения.

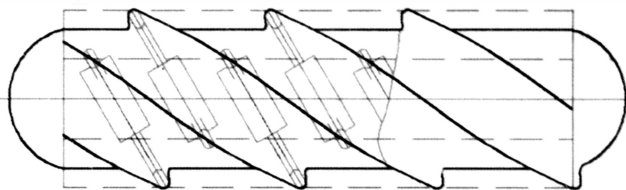


Рис. 1. Принцип формирования волны в эластомеханическом РВД (вид сверху)

Произведен выбор наиболее рациональной конструкции эластомеханического РВД. В предлагаемом варианте продавливание оболочки производится роликами, закрепленными на механизмах, расположенных в ряд на неподвижной опорной балке параллельно друг другу и приводимых в движение безколлекторными двигателями с внешними роторами. За счет наклона механизмов на поверхности оболочки образуется гребень, а смещение роликов друг относительно друга и натяжение оболочки позволяют создавать лопасти разного угла наклона и высоты (Рис.1, 2). Кроме того данный вариант обеспечивает повышение КПД за счет снижения зоны трения роликов и оболочки и дает возможность регулировать высоту волны помимо варьирования угла наклона лопасти.

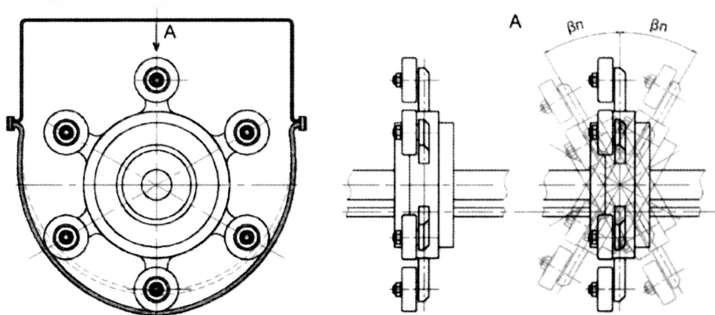


Рис.2. Основные узлы предлагаемой конструкции эластомеханического РВД

Для изменения оригинального параметра РВД - угла подъема винтовой линии, в предлагаемом варианте конструкции используется механизм наклона волны, который представляет собой электропривод и червячный редуктор, позволяющие за счет смещения подвижной рейки формирования волны изменять угол наклона поворотных механизмов на необходимую величину.

В завершении главы сформулирована цель исследования, выделены применяемые методы и поставленные задачи.

Для разработки математической модели движения ТТС с РВД во второй главе проведен анализ имеющихся исследований, посвященных теории взаимодействия вездеходных машин и ТТС с РВД с различными грунтовыми основаниями. К подобным фундаментальным трудам относятся работы Я.С.Агейкина, Н.А. Забавникова, В. Ф. Платонова, Г.А. Смирнова, Н.Ф. Бочарова, А.А. Крживицкого, Б.Н. Коула, Дж. Гордона, Х. Дугоффа, Р. Эрлиха, М. Беккера, А. Солтынского, Н.Ф. Кошарного, А. П. Куляшова, С.В. Рукавишников, В.И. Вологодина, В. И. Захаренкова, В.И. Гавага, Р.А. Хабутдинова, М.М. Танклевского, А.Ф. Николаева, Ю.П. Адясова, В.Н. Колотилина, Л.С. Левшунова, В.В. Белякова, В. А. Шапкина, Ю. И. Молева, Т. В. Водопьянова, У. Ш. Вахидова, С. В. Доровских, Л.В. Барахтанова, В.И.Ершова, Ю. И. Молева, А. А. Кошуриной, Т. В. Водопьянова, Ю.В. Щербакова, А.В. Ганина и других ученых.

Для описания характеристики сопротивления грунтового основания нормальным нагрузкам и модели сопротивления сдвигу используются формулы Н.Ф. Кошарного и А.П. Куляшова:

$$\sigma_H = [C(B) + C_V z] z^\mu \quad (z < 0,4r_0 \text{ или } z < 0,5r_0)$$

$$\sigma_H = [C(B) + C_V z] z_{max}^\mu \cos \alpha_\sigma \quad (z \geq 0,4r_0 \text{ или } z \geq 0,5r_0).$$

$$\tau_K = \tau_0 + (\tau_\Pi - \tau_0)(1 - e^{-k_\tau S_0} + m_\tau S_0^{n_\tau} e^{-m_\tau S_0})$$

где $C(B)$ - коэффициент, зависящий от масштабного фактора; C_V - коэффициент, зависящий от вязкости грунта; μ - показатель нелинейности; z - глубина погружения движителя в грунт; α_σ - угол между осью O_z и точкой приложения реакции; z - глубина погружения РВД; r_0 - радиус базового цилиндра ротора, $\tau_0 = K_0 \tau_\Pi$ - структурное начальное удельное сопротивление сдвигу; τ_Π - предельное сопротивление сдвигу; k_τ, m_τ, n_τ - эмпирические константы кривой сдвига; $S_0 = S/S_M$ - относительный сдвиг; S - абсолютный сдвиг; S_M - сдвиг грунта при предельном сопротивлении сдвигу τ_Π .

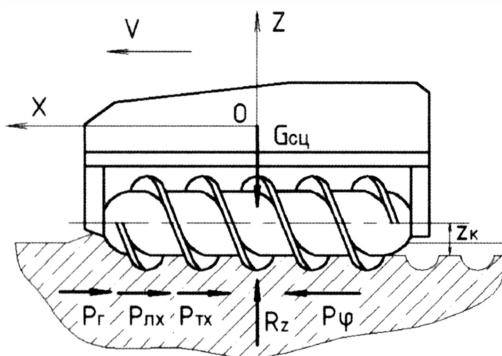


Рис.3. Силы, действующие на ТТС с РВД при взаимодействии с опорным основанием Oxz

Сила сцепления одиночного РВД (Рис.3):

$$P_{\varphi} = P_{\varphi_{\max}} (1 - e^{-k_{\tau} S_0} + m_{\tau} S_0^{\tau} e^{m_{\tau} S_0})$$

где $P_{\varphi_{\max}} = G_{\text{сц}} (1 + \kappa_{\Gamma}) \varphi \cos \beta_{\Pi}$; $\varphi = \tan \Phi_{\Gamma} + \sigma^{-1} q_H$;

$$\kappa_{\Gamma} = L_{PC} h_{\Gamma} B_{\Pi} \rho_{\Gamma} G_{\text{сц}}^{-1} \kappa_F; L_{PC} = 2 \arccos \left(1 - \frac{z_K + h_{\Gamma}}{r_H} \right) r_0$$

$$\kappa_F = 1 - \frac{T_B \cos \beta_{\Pi} \sin \beta_{\Pi}}{4 r_H \arccos \left(1 - \frac{z_K + h_{\Gamma}}{r_H} \right)}; \sigma = \frac{G_{\text{сц}} (1 + \kappa_{\Gamma})}{8 B_{\Pi} r_H \kappa_F \arccos \left(1 - \frac{z_K + h_{\Gamma}}{r_H} \right)}$$

$$z_K = \left[\frac{G_{\text{сц}} \kappa_L}{1,3 B_{\Pi} C(B) J_1 r_0^{0,5} \cos \Phi_H} \right]^{\frac{1}{\mu + 0,5}}; z_K < 0,4 r_0$$

$$z_K = \left[\frac{G_{\text{сц}} \kappa_L}{0,46 B_{\Pi} C(B) J_2 r_0^{0,75} \cos \Phi_H} \right]^{\frac{1}{\mu + 0,25}}; z_K \geq 0,4 r_0$$

Сила сопротивления движению РВД находится из выражения:

$$P_f = P_{\Gamma} + P_{\text{ТХ}} + P_{\text{ЛХ}}$$

где P_{Γ} - сила сопротивления колееобразованию, $P_{\text{ТХ}}$ - продольная составляющая силы трения скольжения базового цилиндра, $P_{\text{ЛХ}}$ - продольная составляющая силы трения скольжения винтовых лопастей.

$$P_{\Gamma} = R_z f_{\Gamma}; f_{\Gamma} = \frac{z_K}{B_{\Pi} (\mu + 1,25)}; R_z = 0,5 C(B) B_{\Pi} J_2 r_0^{0,75} z_K^{\mu + 0,25} \cos \Phi_H$$

$$P_{\text{ТХ}} = \sqrt{2 r_0} B_{\Pi} z_K^{0,5} \frac{i_{\text{кд}}}{\sqrt{1 + i_{\text{кд}}^2}} [2 C(B) \tan \Phi_H J_2 z_K^{\mu} + 2 q_H], z_K < 0,4 r_0$$

$$P_{\text{ТХ}} = r_0^{1/3} B_{\Pi} z_K^{2/3} \frac{i_{\text{кд}}}{\sqrt{1 + i_{\text{кд}}^2}} [2 C(B) \tan \Phi_H J_2 z_K^{\mu} + 3 q_H], z_K \geq 0,4 r_0$$

$$P_{\text{ЛХ}} = P_{\varphi} \operatorname{tg} \Phi_H \sin \beta_{\Pi} + \frac{3}{2} \operatorname{tg} \beta_{\Pi} r_0^{2/5} h_{\Gamma} n_{\text{Л}} q_H$$

Третья глава посвящена созданию и исследованию математической модели прямолинейного движения ТТС с РВД на основании рассмотренных в предыдущей главе зависимостей.

Принято допущение, что движение ТТС в направлении оси Oz подвижной системы координат и изменение крена и дифферента неуправляемо и зависит от продольного и поперечного профилей опорной поверхности, её физико-механических свойств, внешних силовых возмущений, вертикальных колебаний машины и т.п. Соответственно, влияние движителя распространяется только на параметры движения машины по осям Ox и Oy и угол φ . В таком случае анализ непосредственно прямолинейного движения, разгона и торможения ТТС с РВД проводится на основе решения уравнения: $\ddot{x} = m^{-1} [\sum_{i=1}^N (P_{\varphi_{xi}} + P_{f_{xi}})] + \dot{\varphi} \dot{y}$

Если оба шнека движутся по опорным основаниям, обладающим одинаковыми параметрами, а угловые скорости вращения роторов равны между собой, то скорости поворота и бокового увода будут равны нулю: $\dot{\varphi} = \dot{y} = 0$

Таким образом, в общем виде основное уравнение принимает вид:

$$\frac{\sum_{i=1}^N (P_{\varphi_{xi}} + P_{f_{xi}})}{m} = \ddot{x}$$

Модель создана с применением современных вычислительных средств и рабочих компонентов программы MatLab Simulink, что наряду с использованием основных, не требующих знания чрезмерно большого числа переменных, формул позволило значительно оптимизировать процесс моделирования прямолинейного движения ТТС с РВД не прибегая к необходимости создания обобщенных математических моделей движения машин с РВД, предназначенных для анализа не рассматриваемых в данной работе типов установившегося и неустановившегося движения.

Проверка адекватности и работоспособности модели проведена путем сравнения полученных результатов с удостоверенными при помощи эксперимента на физических моделях результатами, приведенными в исследовании Ю.В.Щербакова, при условии совпадения начальных параметров моделирования движения ТТС с заданными характеристиками по разным типам донного глинистого грунта. Был сделан вывод, что, несмотря на определенные отклонения, вызванные другой методикой моделирования, отличием ряда дополнительных параметров рабочих условий и присутствием вероятной погрешности определения значений, для всех случаев характерна эквидистантность протекания теоретических и эмпирических кривых, а следовательно можно сделать вывод, что созданная модель обладает достаточной степенью точности для заявленных в работе задач обоснования целесообразности разработки эластомеханического РВД.

С использованием разработанной математической модели проведено исследование влияния геометрических параметров РВД (а именно угла наклона винтовой линии и высоты лопасти) на тягово-скоростные параметры движителя при разгоне ТТС с РВД при дискретном изменении угла наклона винтовой лопасти. При проведении исследования изменение угла наклона винтовой лопасти производилось в диапазоне от 5° до 60° (Рис.4).

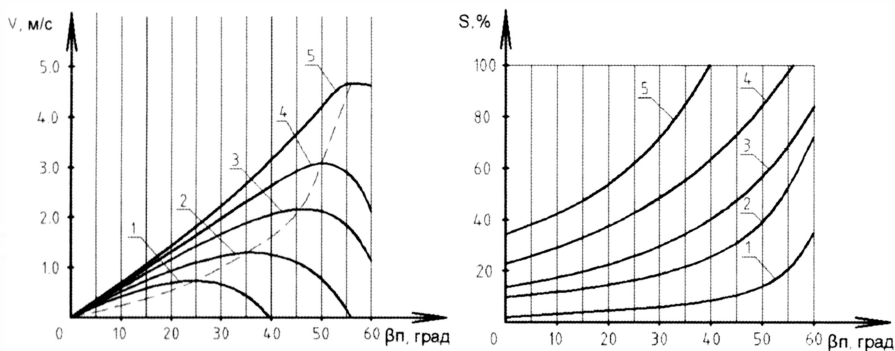


Рис. 4. Графики зависимости скорости РВД и величины буксования от угла наклона лопасти для разных типов донных грунтов

Анализ полученных результатов показывает, что путем варьирования такого конструктивного параметра РВД, как угол наклона винтовой линии (а

соответственно и шага и высоты наклона лопасти) можно осуществлять движение ТТС с РВД в оптимальном режиме на опорных основаниях с различными физико-механическими свойствами. Такую возможность предоставляет эластомеханический РВД.

В четвертой главе работы производится выбор рациональных параметров эластомеханического РВД.

Традиционным способом изменения скорости движения ТТС с РВД является не варьирование величины угла наклона винтовой лопасти, а изменение скорости вращения шнеков, входящей в уравнение теоретической скорости: $V_t = r_0 \tan \varphi_l \omega$.

Результаты моделирования разгона исследуемой ТТС с РВД на опорном основании с характеристиками донного грунта, обладающего усредненными параметрами, показали, что при заданном фиксированном значении угла наклона лопасти $\beta = 12,5^\circ$ для случая дискретного изменения скорости вращения роторов с $\omega = 10 \text{ с}^{-1}$ до $\omega = 15 \text{ с}^{-1}$, скорость исследуемого ТТС увеличивается менее чем на 50%.

При этом не задействованным остаётся диапазон скоростей, возрастающий до максимального значения при увеличении угла подъема винтовой линии $12,5^\circ \dots 46^\circ$. Варьирование данного конструктивного параметра, реализованное в эластомеханическом РВД дало возможность изменить скорость ТТС, для которого производилось моделирование на 186% (Рис.5).

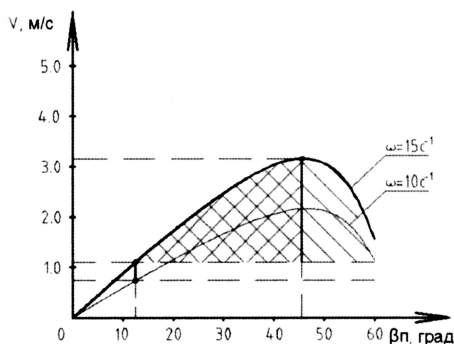


Рис. 5. Совмещенные графики зависимостей скорости РВД от угла наклона лопасти при дискретном изменении скорости вращения роторов при движении по одному типу грунта

Совмещение кривых скорости РВД от величины буксования показало, что точки, соответствующие одинаковым значениям углов наклона винтовой лопасти разных кривых, лежат на прямых линиях, пересекающих ось абсцисс в точке равной 100% величины буксования. Зная характер изменения основных физико-механических параметров грунта, по которому происходит движение ТТС с РВД, можно прогнозировать значения тягово-скоростных характеристик машины и за счет соответствующей корректировки величин угла наклона винтовой линии выбирать рациональный режим движения (Рис.6).

В работе исследовано влияние каждого параметра математической модели грунта в отдельности на тягово-скоростные характеристики ТТС с РВД.

Полученные результаты подтверждены моделированием прямолинейного движения ТТС с РВД по основаниям с характеристиками близкими к фирновому повторно фирнизованному сухому сыпучему и фрикционно-связному уплотненному осевшему снегу. При этом максимальное значение $V_{\max}$ в случае движения по снегу с усредненными параметрами было достигнуто при значительно меньшем значении угла наклона лопасти, чем в случае движения по «среднему» донному грунту (27° вместо 46° соответственно). Так ТТС с традиционным РВД с углом подъема винтовой линии порядка 40° показало бы высокую скорость при движении по «среднему» донному основанию но испытало бы затруднения при движении по снегу с усредненными характеристиками, в отличии от ТТС с эластомеханическим РВД, способным двигаться в оптимальных режимах на обоих видах грунтовых оснований.

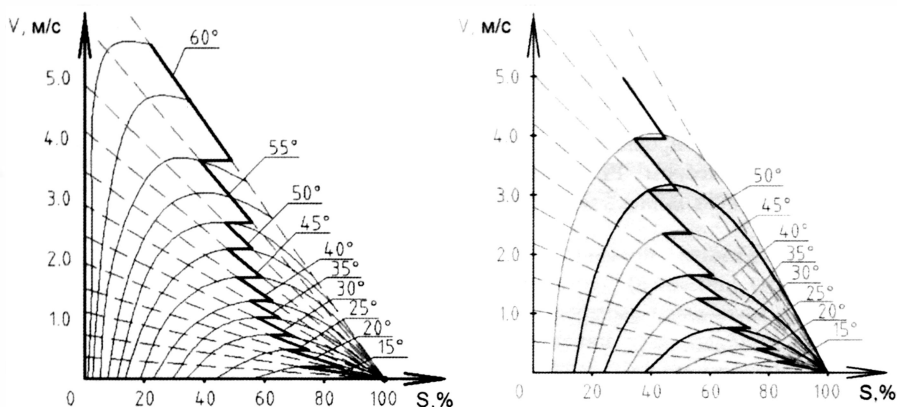


Рис. 6. Графическое представление процесса корректировки режимов движения ТТС с РВД в процессе движения по любому типу основания с характеристиками близкими к донному грунту (слева) и снегу (справа) за счет дискретного изменения величины угла наклона винтовой линии

Последующее моделирование движения ТТС с другими конструктивными параметрами подтверждает, что увеличение размеров РВД (прежде всего его радиуса) ведет к увеличению возможной максимальной скорости $V_{\max}$. При этом достижение максимальной скорости для обеих исследуемых моделей машин возможно при практически одинаковых значениях угла наклона винтовой линии.

Для учета влияния ряда параметров, предлагаемой в данной работе конструкции эластомеханического РВД, а так же для дальнейшей их оптимизации, на основе модифицированного стенда, спроектированного и изготовленного на кафедре многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов МГТУ им. Н.Э. Баумана была разработана оригинальная лабораторная установка – стенд испытания оболочек, позволяющий осуществлять

экспериментальные исследования в широком диапазоне параметров системы грунт-эластичная оболочка-генератор волны эластомеханического РВД (Рис.7).

Описание стенда и результаты экспериментальных исследований приведены в пятой главе.

Была подтверждена возможность получения удельных характеристик продольных сил $P_x(t)$, посредством использования модуля генератора волн, входящего в стенд испытания оболочек, и разработана методика обработки результатов.

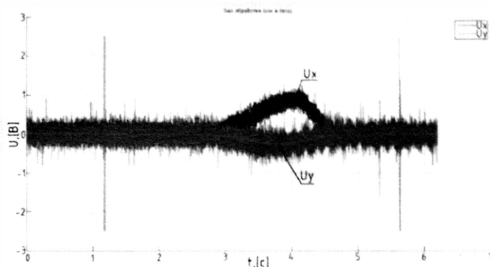
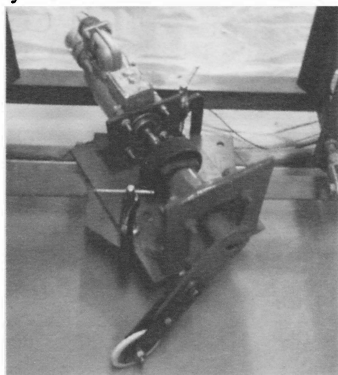


Рис.7. Модуль генератора волны стенда и необработанный сигнал

Произведена экспериментальная оценка влияния глубины погружения ролика реактора и угла подъема винтовой линии РВД на величину контактных усилий в процессе взаимодействия движителя с грунтом (Рис.8). Выполнена оценка точности измерений аппаратно-измерительного комплекса стенда.

Полученные значения P_x для одного из фиксированных углов поворота МГВ θ позволяют определить при помощи матрицы направляющих косинусов (поворота) соответствующие значения для любых углов наклона винтовой линии без проведения дополнительных экспериментальных исследований с последующим расчетом тягово-скоростных параметров при помощи уточненных компонентов разработанной математической модели.

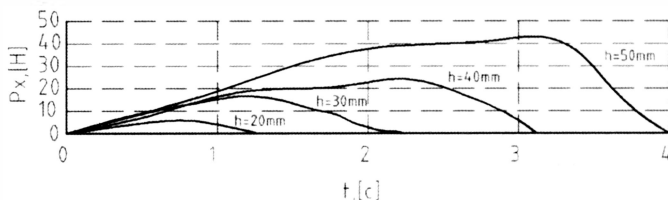


Рис. 8. Совмещение графиков продольных сил $P_{x30}(t)$ при разных значениях глубины погружения ролика реактора волны h_p

Шестая глава посвящена выбору и исследованию свойств эластомеханической оболочки предлагаемого типа движителя. После анализа существующих мягких конструкционных материалов, принято решение о

целесообразности изготовления оболочки предлагаемого эластомеханического роторно-винтового движителя мягкой сетчатой резинокордной с двумя направлениями корда.

Была разработана методика расчета напряженно - деформированного состояния резинокордной оболочки эластомеханического РВД при основных видах нагрузки – внутреннего давления, распределенной нагрузки со стороны грунта и давления от колеса генератора волн. Параметры ТТС для расчета приняты в соответствии с рекомендациями, приведенными в четвертой главе.

Осесимметричное напряженно – деформированное состояние резинокордной оболочки было рассчитано по методике В.Л. Бидермана. Принято, что оболочка имеет шинную геометрию нитей с параметром

$$\chi = \frac{\sin(\beta_0)}{R} = \frac{\sin(54.7^\circ)}{0.6} = 1.36 \frac{1}{\text{м}}$$

где R — текущий радиус; β — угол наклона нити к меридиану (Рис.9); χ — константа геометрии нитей.

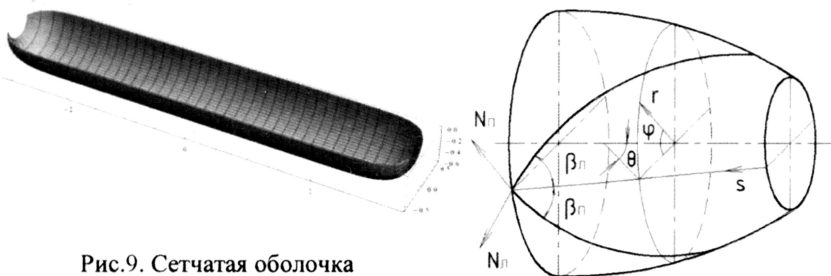


Рис.9. Сетчатая оболочка

Форма меридиана, мембранные усилия, натяжение и углы наклона нитей корда в исходном состоянии движителя найдены путем решения краевой задачи для системы нелинейных дифференциальных уравнений теории сетчатых оболочек для осесимметричного случая. Краевая задача для полученной системы решалась методом стрельбы процедурой NDSolve из пакета Mathematica.

Графики мембранных усилия показывают, что краевые зоны оболочки напряжены заметно меньше, чем цилиндрическая часть и поэтому краевые зоны не требуют дополнительных подкрепляющих элементов. Выражение для натяжения нитей находилось через мембранное усилие T_1 :

$$N = \frac{T_1 \pi r}{n \cos \beta},$$

где n - количество нитей в оболочке.

Количество нитей корда определяется найденным натяжением и предельным усилием в одной нити. Задача об изменении формы оболочки от воздействия распределенной нагрузки со стороны грунта (снега) сведена к задаче механики гибкой нити и решена методами, применяемыми при расчете гибких нитей. Приведены примеры расчета формы поперечного сечения и нагрузки со

стороны грунта (снега) на оболочку. Распределение давления снега аппроксимировано законом квадратной параболы. Показано, что существенное искажение формы сечения оболочки наблюдается при давлении со стороны грунта (снега) близком к внутреннему давлению в полости оболочки.

На основании динамики изменения продольной составляющей силы трения скольжения винтовых лопастей РВД и в соответствии с элементами теории надежности выбрано рациональное число роликов в каждом механизме формирования волны.

Рассмотрено взаимодействие резинокордной оболочки РВД с колесами генератора волн. Напряженно - деформированного состояния резинокордной оболочки вращения, нагруженной неосесимметричной нагрузкой, описывается дифференциальными уравнениями в частных производных по координатам s и φ (s - дуга меридиана, φ - полярный угол) и рассчитывается по методике Ф.Д.Сорокина и Чан Ки Ана.

Отмечено, что форма деформированной поверхности резинокордной оболочки в зоне локального нагружения также может быть получена при помощи бессеточного метода (Mesh Free) по методике Ф.Д.Сорокина и М.В.Попкова (Рис. 10).

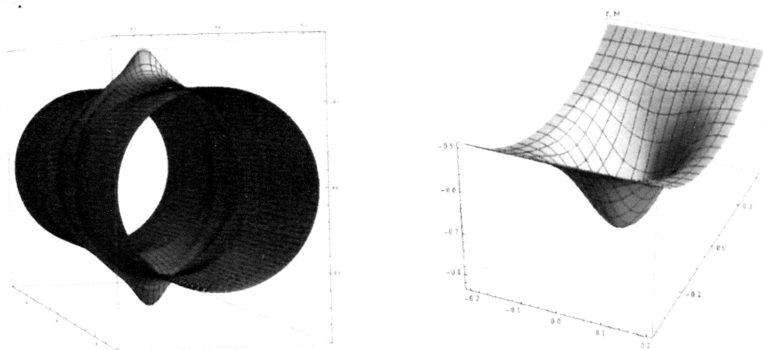


Рис.10. Форма деформированной оболочки при воздействии роликов генератора волн

На основании решения серии линейных краевых задач удалось связать параметры колеса и давление на колесо генератора волн с перемещением, которое вызывает колесо. Таким образом, найдена нужная для практики связь нагрузки на колесо с перемещением оболочки, которое вызывается колесом.

ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана математическая модель прямолинейного движения ТТС с эластомеханическим РВД изменяемой геометрии, обладающим способностью дискретного варьирования угла наклона винтовой линии. Установлено, что погрешность характера и расположения относительно друг друга теоретических кривых, полученных в результате проведенного моделирования, при сравнении с соответствующими удостоверенными расчетными значениями характеристик физических моделей ТТС с РВД составляет менее 5% при средней относительной погрешности конечных значений параметров не более 19%.

2. При проведении расчетного исследования прямолинейного движения роторно-винтового транспортно-технологического средства при дискретном изменении угла наклона винтовой лопасти, доказано, что фиксированное значение угла наклона винтовой линии значительно сокращает диапазон возможных скоростей ТТС. Обоснована целесообразность использования в транспортной технике эластомеханического РВД, обладающего возможностью изменения указанного конструктивного параметра. Установлено, что при изменении угла наклона винтовой лопасти в промежутке от 5° до 60° с шагом в 5° происходит увеличение возможной максимальной скорости $V_{\max}$ в среднем в 3 раза по сравнению с базовым фиксированным углом наклона $12,5^\circ$. Доказано, что изменение угла наклона винтовой линии ТТС с РВД дает возможность увеличить скорость исследуемого ТТС на величину почти в 4 раза большую, чем в случае дискретного изменения скорости вращения роторов с $\omega=10\text{с}^{-1}$ до $\omega=15\text{с}^{-1}$ при фиксированном значении угла наклона лопасти $\beta = 12,5^\circ$.

3. При помощи математической модели исследовано движение ТТС с РВД, обладающих различными конструктивными параметрами по опорным основаниям с большим диапазоном изменения физико-механических характеристик. Установлено по результатам моделирования, что увеличение размеров шнека на четверть дает увеличение возможной максимальной скорости $V_{\max}$ почти в 2 раза. Площадь области рациональных тягово-скоростных параметров ТТС на совмещенном графике зависимости скорости от величины буксования при этом увеличивается практически вдвое.

4. Проведен анализ влияния физико-механических параметров грунта на тягово-скоростные характеристики ТТС с РВД. Доказана возможность прогнозирования и корректировки необходимых величин угла наклона и высоты волны РВД для обеспечения оптимальных режимов движения ТТС в разных грунтовых условиях.

5. Предложена оригинальная конструкция эластомеханического роторно-винтового движителя, высота и углы наклона бегущих винтовых линий которого формируются за счёт деформации неподвижной оболочки. Доказано, что выбранный вариант конструкции снижает площадь области трения роликов и оболочки в два раза.

6. Для получения достоверных результатов при прогнозировании тяговых возможностей исследуемого перспективного движителя была разработана оригинальная лабораторная установка и проведено

экспериментальное исследование на стенде, по результатам которого произведена оценка влияния глубины погружения ролика реактора и угла подъема винтовой линии РВД на величину контактных усилий в процессе взаимодействия движителя с грунтом. Установлено по результатам эксперимента, что увеличение глубины погружения ролика реактора h_p на 10 мм приводит к увеличению продольных сил P_x в среднем вдвое.

7. Для выбранного типа оболочки разработана методика расчета напряженно - деформированного состояния резинокордной оболочки эласто – винтового движителя при основных видах нагрузки – внутреннего давления, распределенной нагрузки со стороны грунта и давления от колеса генератора волн. Установлено, что уменьшение ширины роликов в два раза при одинаковом уровне перемещений соответствующим образом увеличивает давление на ролик со стороны оболочки почти в 2 раза.

РЕКОМЕНДАЦИИ

- Предложенный вариант конструкции эластомеханического РВД является наиболее рациональным. Он позволяет разместить все элементы привода непосредственно внутри движителя и обеспечивает наиболее высокий КПД за счет снижения зоны трения роликов и оболочки вдвое, а также возможность регулировки высоты волны помимо варьирования угла наклона лопасти.
- Повысить значение допустимой максимальной скорости ТТС с РВД возможно путем увеличения размеров РВД и скорости вращения роторов.
- Учитывая, что конструктивно затруднительно обеспечить угол наклона винтовой лопасти РВД более 50° , наиболее целесообразно использование движителя предлагаемой эластомеханической роторно-винтовой конструкции на грунтах с низкими значениями параметров коэффициента сопротивления смятию и плотности грунта.
- При создании эластомеханического роторно-винтового движителя рекомендуется использовать в каждом механизме формирования волны 4...6 роликов.
- Оболочку предлагаемого эластомеханического РВД рекомендуется делать мягкой сетчатой резинокордной с двумя направлениями корда. Угол наклона корда к меридиану необходимо принять равным $\beta_0=54,7^\circ$ (равновесный угол).

Основное содержание работы отражено в 8 статьях, 5 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

1. Наумов В.Н., Бяков К.Е. Улучшение роторно-винтового движителя мобильного робота путем использования технологий эластичной механики [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 10 (10). (0,375 п.л. / 0,187 п.л.)
2. Наумов В.Н., Бяков К.Е. Изменение тягово-скоростных характеристик транспортно-технологического средства с роторно-винтовым двигателем варьированием угла подъема винтовой лопасти в процессе движения [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 10 (10). (0,437 п.л. / 0,218 п.л.)
3. Наумов В.Н., Машков К.Ю., Бяков К.Е. Моделирование прямолинейного движения транспортно-технологического средства с роторно-винтовым двигателем // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 12. С. 31-35. (0,625 п.л. / 0,312 п.л.)
4. Транспортное средство высокой проходимости с эласто-винтовым двигателем / К.Е. Бяков [и др.]. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 5 (650). С. 37-42. (0,75/0,187 п.л.)
5. Методы улучшения проходимости вездеходных транспортных машин путём использования эластомеханических движителей / К.Е. Бяков [и др.]. Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 6 (89). С. 34-37. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.)
6. Расчет больших перемещений резинокордной оболочки эласто-винтового движителя от действия локальной нагрузки бессеточным методом / К.Е. Бяков [и др.]. Инженерный вестник. 2014. № 1. С. 144-150. (0,437 п.л. / 0,109 п.л.)
7. Расчет напряженно-деформированного состояния резинокордной оболочки эласто-винтового движителя / К.Е. Бяков [и др.]. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 1 (658). С. 24-30. (0,875 п.л. / 0,218 п.л.)
8. Стенд для исследования контактного взаимодействия в системе грунт - эластичная оболочка - генератор волны эластовинтового движителя / К.Е. Бяков [и др.]. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. №8 (665). С. 42-48. (0,875 п.л. / 0,218 п.л.)