

УДК 630.377

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_1\_84

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МОБИЛЬНОСТИ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, ОСНАЩЕННЫХ СРЕДСТВАМИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОХОДИМОСТИ

**Е.Е. Клубничкин**

ORCID: 0000-0002-4086-1011 e-mail: klubnichkin@bmstu.ru

Мытищинский филиал

Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

*Мытищи, Россия*

Поставлена задача определения мобильности колесных транспортных средств, оснащенных средствами повышения проходимости, позволяющая быстро, точно и гибко прогнозировать их проходимость по местности. Основой исследования послужили имитационные модели, описывающие взаимодействие между колесом и почвой, а также банк данных основных характеристик местности. Имитационные модели и банк данных интегрированы в географическую информационную систему. Результаты исследования возможно представить в виде карт проходимости вместе с географическими элементами, служащими ориентирами. Предложенная система может применяться там, где требуется количественная оценка мобильности транспортного средства, оснащенного средствами повышения проходимости. Учитывая, что конструктивные элементы ходовых частей транспортных средств имеют большую массу, система прикладных пакетов компьютерных программ может быть использована также в качестве вспомогательного метода при разработке транспортных средств и ходовых частей, оснащенных средствами повышения проходимости.

**Ключевые слова:** колесная транспортная машина, трение, средства повышения проходимости, цепи, траки, мобильность транспортного средства, Universal mechanism, SiminTech.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Клубничкин, Е.Е. Моделирование колесных транспортных средств, оснащенных средствами повышения проходимости // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 1. С. 84-96.

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_1\_84

## MODELING THE MOBILITY OF WHEELED VEHICLES EQUIPPED WITH TRACTION DEVICES

**E.E. Klubnichkin**

ORCID: 0000-0002-4086-1011 e-mail: klubnichkin@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia*

**Abstract.** The task of defining the mobility of wheel vehicles equipped with traction devices is set to enable rapid, accurate and flexible prediction of their landscape mobility. The study is supported by simulation models illustrating interaction between wheel and soil, as well as data pool of basic landscape characteristics, Simulation models and data pool are integrated into a Geographic Information System. The study results can be presented as traffic ability maps along with geographical elements serving as landmarks. The proposed system can be used in cases where there is a need of quantitative mobility assessment of vehicle equipped with traction devices. Considering that construction units of vehicle travel systems are heavy, computer software application packages can also be used as auxiliary method for development of vehicles and travel systems equipped with traction devices.

**Key words:** wheeled vehicle, friction, traction devices, chains, tracks, vehicle mobility, Universal mechanism, SiminTech.

**FOR CITATION:** E.E. Klubnichkin. Modeling the mobility of wheeled vehicles equipped with traction devices. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 1. С. 84-96. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_1\_84

## Введение

Количественная оценка мобильности транспортных средств имеет большое практическое значение, однако из-за большого количества переменных она является чрезвычайно сложной задачей [1]. Наиболее важные переменные: тип транспортного средства, его конструктивные элементы, шины и средства повышения проходимости, характер местности и грузоподъемность. Поскольку определение и прогнозирование мобильности транспортного средства часто в значительной степени связаны с рельефом местности и, следовательно, с местоположением, как правило, необходимы картографическая обработка и представление. Связь между чрезвычайно изменчивой информацией о мобильности и постоянными географическими элементами вряд ли может быть успешной с помощью традиционных средств, поскольку они медленны и малогибки [2].

Мобильность транспортного средства на местности можно разделить на несколько уровней:

1) *высокая мобильность*: имеются большие резервы мобильности, т.е. тяговое усилие транспортного средства, связанное с грунтом, намного больше, чем необходимо для преодоления уклона грунта;

2) *низкая мобильность*: на поверхности пути транспортные средства могут застрять в зависимости от выбранного местного маршрута;

3) *неподвижность*: тягового усилия, связанного с грунтом, недостаточно для преодоления уклона грунта или препятствия (например, открытые водные пространства, лесные массивы могут сделать невозможным свободное передвижение).

Определение информации о мобильности основано на трех основных факторах [3]:

1) имитационная модель транспортного средства / грунта;

2) имитационная модель погоды / влажности почвы;

3) банк с данными о местности, относящимися к мобильности.

Фактическая производительность прогноза мобильности определяется с помощью прикладных пакетов компьютерных программ «Universal mechanism и SiminTech» [4, 5]. На рис. 1 представлена организация последовательности вычислений в прикладных пакетах программ.

### Имитационная модель транспортного средства/почвы (поверхности пути)

В настоящей статье представлены новые модели мобильности для прогнозирования поведения колесных транспортных средств, оснащенных средствами повышения проходимости. При использовании этой модели определяется максимальный уклон грунта  $\tan a_{\max}$ , преодолеваемый транспортным средством, изменяющийся в зависимости от условий грунта. Здесь большое значение придается влиянию опорного основания.

В рамках решения задачи выявлено чрезвычайно сложное взаимодействие между транспортным средством и опорной поверхностью, требующее тщательного анализа как опорной поверхности, так и процессов, происходящих в конструкции движителя, оснащенного средствами повышения проходимости. Поэтому сделана попытка представить опорную поверхность с особым учетом ее механических свойств. В природе она проявляется с многослойной структурой (рис. 2). Соответствующая модель почвы должна позволять в достаточной мере учитывать это естественное расположение слоев [6].

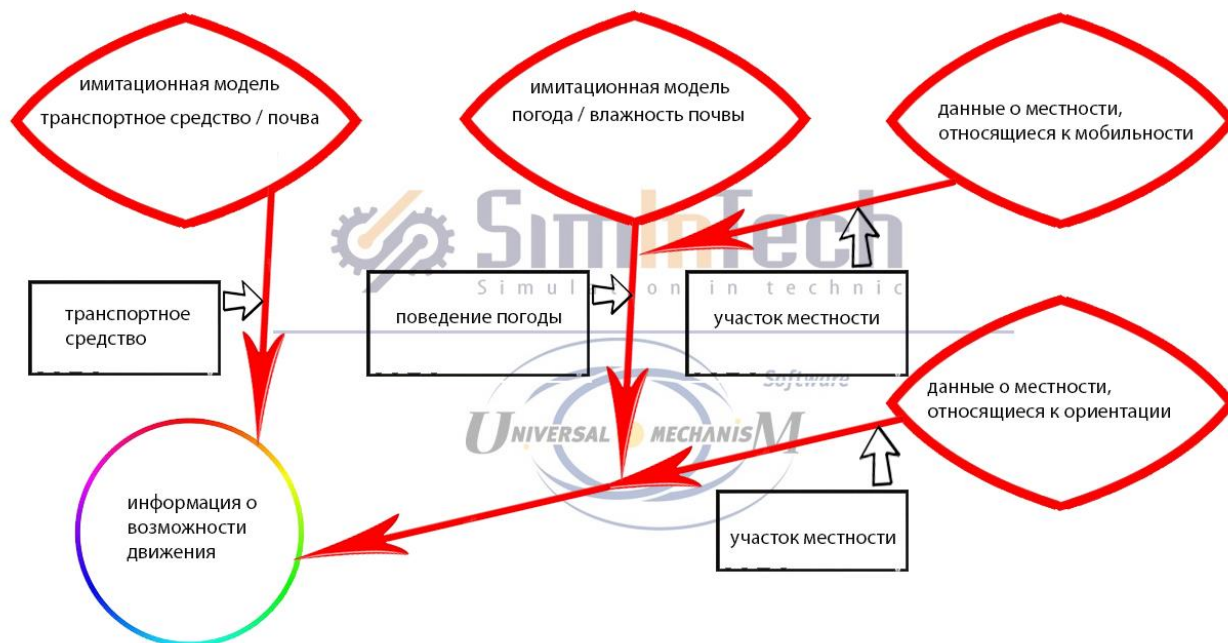


Рис. 1. Организация последовательности вычислений в прикладных пакетах программ

Fig. 1. Establishing a computing sequence in software application packages

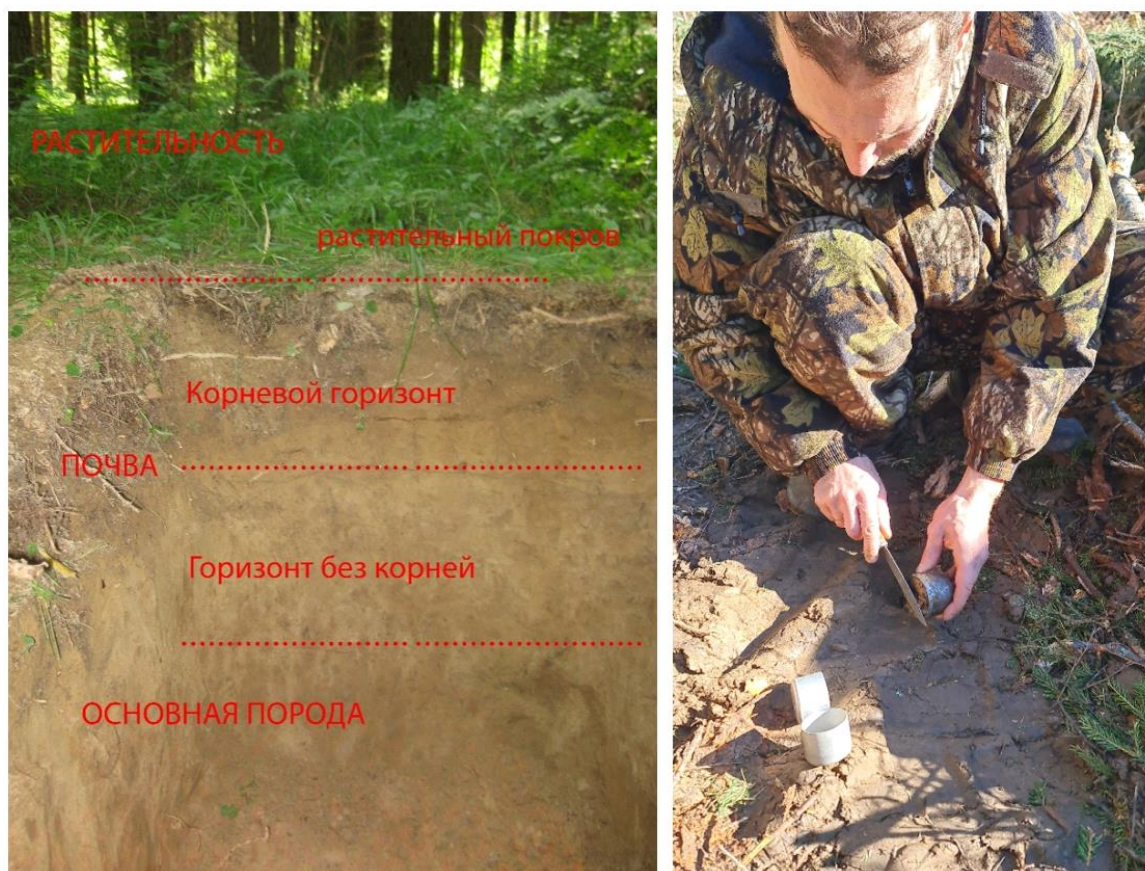


Рис. 2. Многослойная опорная поверхность

Fig. 2. Multilayered ground contact area

Для адекватного понимания сложных процессов и взаимосвязей тяги были проведены различные анализы и исследования, некоторые из них с использованием метода конечных и дискретных элементов [4,7-9], другие – с испытаниями на подвижность в лесных условиях (рис 3).



**Рис. 3. Испытания на подвижность в лесных условиях**

**Fig. 3. Testing mobility in wooded area**

Была решена задача связывания колесного движителя транспортного средства, оснащенного средствами повышения проходимости, с параметрами многослойной структуры опорной поверхности для получения представления о проходимости местности (тяговое усилие, трение качения). Цель состояла в том, чтобы сформулировать эти соотношения как можно проще на аналитической основе, получив в результате полезный инструмент для практических прогнозов.

### **Колесные движители со средствами повышения проходимости**

При применении приспособлений для повышения сцепления колес с грунтом значительно расширяется диапазон использования транспортных средств и повышаются тяговые свойства. На транспортных средствах широко используются мелкозвенчатые цепи, существенно повышающие тяговые качества транспортного средства на грязных грунтовых, заснеженных и обледенелых поверхностях пути (рис. 4).



**Рис. 4. Цепь для повышения тяговых качеств транспортного средства**

**Fig. 4. Chain for vehicle traction improvement**

Цепи, выполненные в форме сети, обеспечивают хорошее сцепление с поверхностью пути как в продольном, так и в поперечном направлениях. Мелкозвенчатые цепи в форме лестницы обеспечивают меньшее сцепление в поперечном направлении, но они значительно проще и дешевле [2].

Основным недостатком звеньевых цепей является то, что они быстро изнашиваются. Для устранения этого недостатка применяются цепи, у которых каждое звено, расположенное на беговой поверхности, имеет ролик, предохраняющий звено от износа и повышающий сцепление колес с грунтом. Другим недостатком цепей является местный износ шин. Значительно меньше шины изнашиваются при установке цепей браслетнозвеньевые типа, у которых звенья, размещенные на беговой поверхности шин, выполнены из эластичного материала. Однако эти цепи менее эффективны на зимних обледенелых поверхностях пути.

При движении по мягким грунтам мелкозвенчатые и браслетнозвеньевые цепи малоэффективны вследствие небольшой высоты грунтозацепов. Для мягких грунтов применяют траковые цепи с высокими грунтозацепами различной формы (рис. 5). Наиболее совершенны ромбовидные траки.



**Рис. 5. Траковая цепь с высокими грунтозацепами**

**Fig. 5. Traction chain with high ground grips**

Кроме цепей, охватывающих шину по всей окружности, для повышения проходимости могут быть использованы и более простые средства: браслеты из звенчатых или траковых цепей, противобуксовочные колодки, эластичные манжеты. Эти приспособления значительно легче и быстрее крепятся к колесу. Они целесообразны для маршрутов с редко встречающимися небольшими по протяженности труднопроходимыми участками мягкого грунта. Недостаточно широкое применение съемных средств повышения проходимости для транспортных средств можно объяснить следующими причинами: большой массой и металлоемкостью приспособлений; трудоемкостью их установки на колеса и снятия с них; необходимостью транспортировки; опасением повредить шины жесткими элементами приспособлений. При установке съемных грунтозацепов на транспортные средства значительно расширяется диапазон грунтовых условий, в которых можно использовать эти транспортные средства. Таким образом, дальнейшее развитие колесных транспортных средств, оснащенных средствами повышения проходимости, приводит к преобразованию их в средства, оснащенные колесно-гусеничным двигателем.

Уже давно сложилось мнение, что в условиях бездорожья лучше использовать гусеничные двигатели, а для дорог колесные, ведь гусеничные двигатели разрушают покрытие дорог и на дорогах с твердым покрытием не могут конкурировать с колесными. Известно, что гусеничные двигатели имеют меньший срок службы. Естественны попытки создать комбинированный двигатель, сочетающий преимущества обоих двигателей, эффективно работающий как на дорогах, так и в условиях бездорожья, имеющий достаточно высокий срок службы [2].

На рис. 6 показано транспортное средство, имеющее колесно-гусеничный двигатель. Металлические гусеницы надевают непосредственно на шины, привод в гусеничном варианте остается прежним, усилие от пневматических колес передается на гусеницы за счет сцепления между гусеницами и шинами.



Рис. 6. Транспортное средство, имеющее колесно-гусеничный движитель

Fig. 6. Vehicle equipped with wheel-track driver

При этом никакого усложнения трансмиссии не требуется. Основная трудность возникает в осуществлении поворота. На транспортном средстве, представленном на рис. 6, эта задача решена применением шарнирно-сочлененной рамы. Поворот машины осуществляется за счет поворота частей рамы относительно друг друга [10]. Для данной схемы характерны длительность и трудоемкость снятия и надевания гусениц. Машины с такими движителями удобно использовать в лесу в сухое время года как колесные, а весной, осенью и зимой – как гусеничные. Наибольшая универсальность будет обеспечена, если схема позволяет получить три комбинации движителя: колесный, колесно-гусеничный, гусеничный. Учитывая это, вопрос моделирования мобильности колесных транспортных средств, оснащенных средствами повышения проходимости, является актуальным и требует внимания.

*Очень сухая недеформированная почва.* Опыт показывает, что большинство опорных поверхностей в очень сухом состоянии практически не оставляют следов от транспортных средств и, следовательно, не приводят к погружению движителя в опорную поверхность. В таких случаях опорная поверхность считается недеформируемой и учитывается теория трения. Тяговые силы рассчитываются как силы трения в зоне контакта между органом движения и опорной поверхностью (рис. 7).

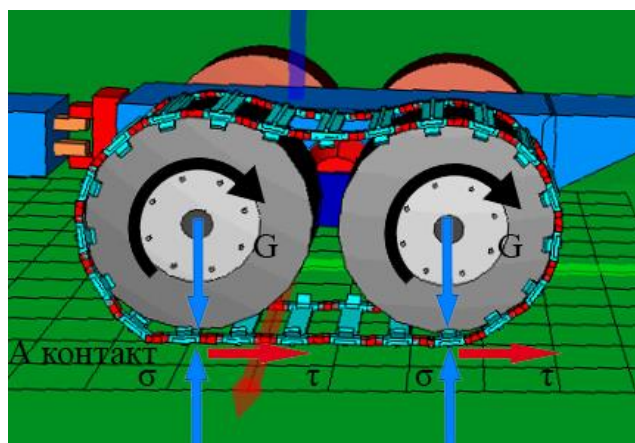


Рис. 7. Применение теории трения для очень сухой почвы

Fig. 7. Use of friction theory for very dry soil

Тангенциальное предельное натяжение  $\tau$  между органом движения и опорной поверхностью определяется произведением коэффициента трения  $\mu$  и нормального контактного давления  $\sigma$ :

$$\tau = \sigma \cdot \mu, \quad (1)$$

Это соотношение применяется к каждому колесу  $j$ , и из результирующего напряжения трения вычисляется сила трения как произведение напряжения трения и площади контакта. Таким образом, максимальный уклон очень сухой почвы, преодолеваемый транспортным средством, составляет:

$$\tan \alpha_{max} = \frac{Z_{max}}{G} = \sum_{j=1}^m \sigma_j \cdot \mu \cdot A_{contact} \cdot \frac{1}{G}. \quad (2)$$

Коэффициент трения  $\mu$  между дерном и органом движения определяется как отношение силы тяги  $Z_{max}$  к массе транспортного средства  $G$  и измеряется с помощью специального трибометра в полевых условиях. Однако, когда основание сухое, влажное или намокшее, транспортные средства, в зависимости от условий, более или менее погружаются в грунт и оставляют соответствующие следы. Здесь поверхностные явления больше не действуют, но решающими являются механические свойства деформируемого грунта. Двигатель проникает в грунт при движении и приводит к реактивным напряжениям в зависимости от деформации, которые в конечном итоге ответственны за тяговые силы (рис. 8).

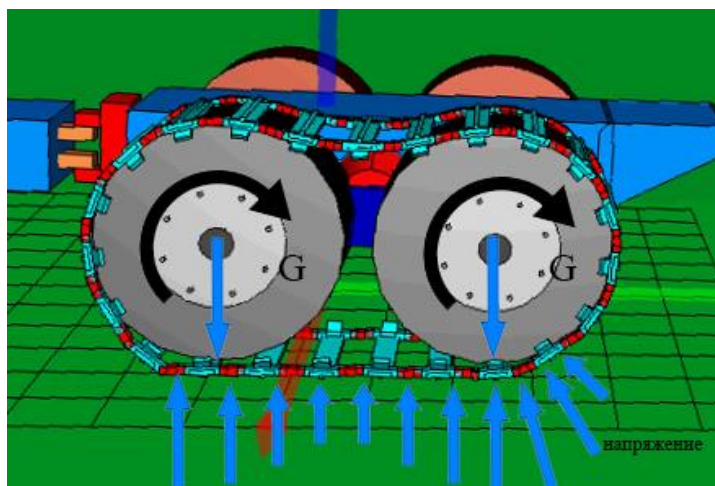


Рис. 8. Применение теории упругости и пластичности для сухой, влажной и размокшей почвы

Fig. 8. Use of elasticity and plasticity theory for dry, wet and soggy soil

Поскольку в природе структура почвы определенно состоит из двух слоев, что также проявляется в ее механических свойствах, мы рассматриваем оба слоя почвы. Напряженно-деформированное состояние грунта определяется с помощью трехосных испытаний. Измеренные кривые в верхнем горизонте почвы с большим количеством корней показывают, что в сухих и влажных условиях происходит типичное трение (внутреннее трение) с когезией при различной плотности различных типов почвы. Во влажном состоянии все почвенные материалы практически не испытывают трения. Кривые для нижнего горизонта почвы с меньшим количеством корней показывают значительно более жесткое и стойкое поведение.

Для расчетов с имитационными моделями на основе трехосных испытаний была получена упругопластическая модель грунта. Для этого все поле кривых определяется по выбранным кривым, полученным в результате трехосных испытаний, и выражается параметром упругого материала  $E_{1-5}$ , пластическими параметрами или внутренним трением  $\phi_{1-4}$  и их соотношением (рис. 9).

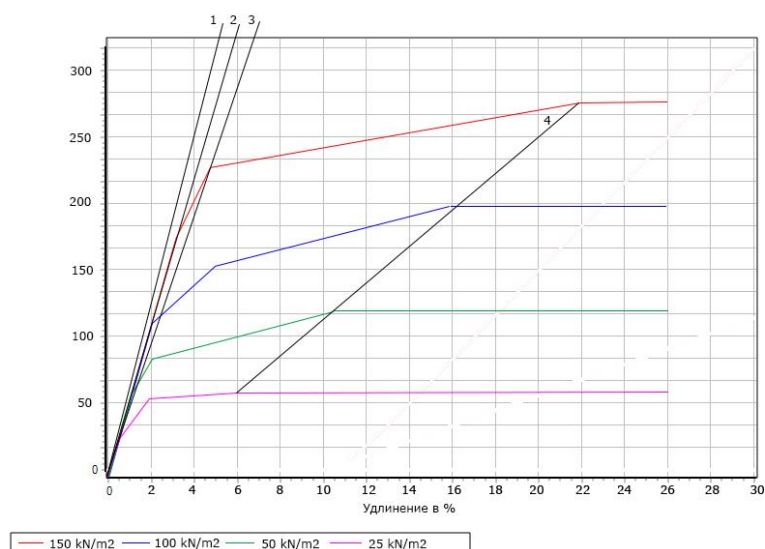


Рис. 9. Уруголастическая модель грунта с модельными параметрами 1, 2, 3, 4

Fig. 9. Simulated elastic-plastic ground with model parameters 1, 2, 3, 4

*Деформированная сухая, влажная и намокшая почва.* Принцип имитационных моделей для сухого, влажного и намокшего грунта основан на следующем подходе: сначала принимаются определенные ключевые значения скольжения, угла дифферента и пробуксовки транспортного средства (рис. 10). Эти параметры соответствуют определенным положениям ходовой системы колесных транспортных средств, оснащенных средствами повышения проходимости, которые определяются с помощью кинематических соображений.

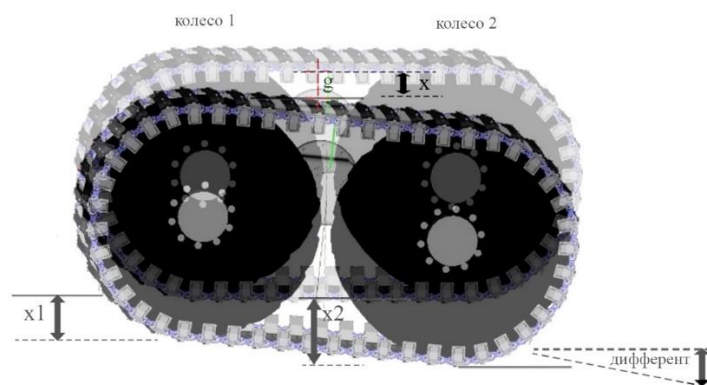
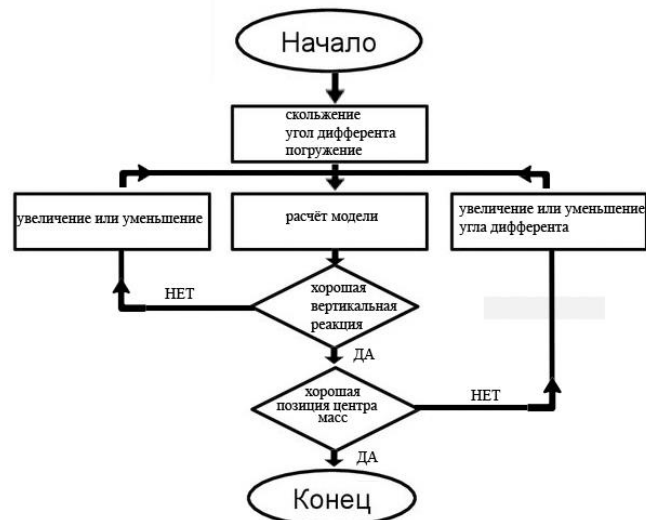


Рис. 10. Имитационная модель ходовой системы колесного транспортного средства, оснащенного средствами повышения проходимости в среде программного комплекса «Universal mechanism»

Fig. 10. Simulation model of travel system of wheeled vehicle equipped with traction devices in the environment of Universal mechanism software package

Далее ходовая система колесного транспортного средства, оснащенная средствами повышения проходимости, получает реактивные напряжения, которые определяются результирующими нагрузками на ось, движущими силами и силами сопротивления качению. Вся система расчета проводится итеративно, т.е. операции повторяются в целях переработки результатов предыдущего этапа. Модель ходовой системы колесного транспортного средства, оснащенного средствами повышения проходимости, настраивается до тех пор, пока расчетные и фактические нагрузки на ось, а также центр тяжести транспортного средства не будут окончательно определены (рис. 11).



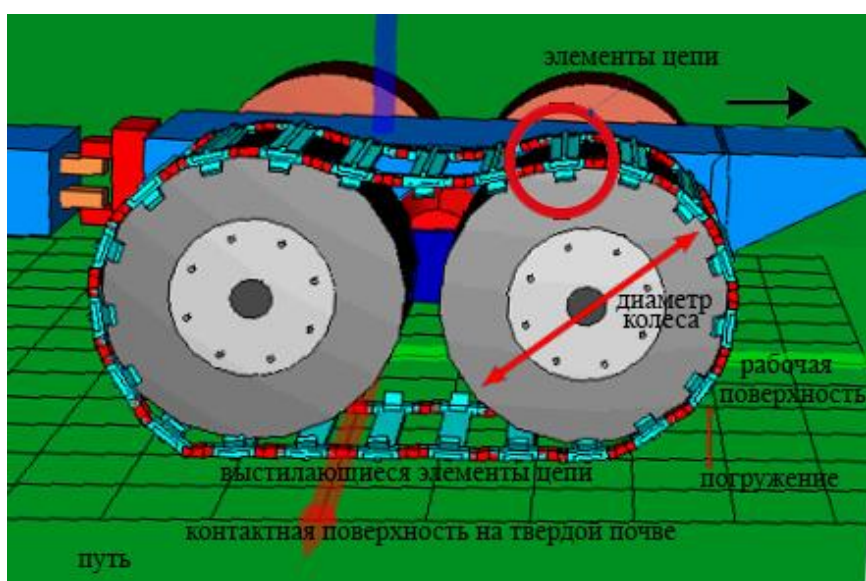


**Рис. 11. Итерационная процедура расчета для определения напряжений реакции грунта**

**Fig. 11. Iterative calculation procedure to identify ground response stresses**

Сначала мы рассматриваем кинематику ходовой системы колесного транспортного средства, оснащенного средствами повышения проходимости. Для каждого элемента ходовой системы это определяется тремя факторами: по скольжению, по провалу в центре масс транспортного средства и по углу дифферента, если балансиры колесных осей или тележек считаются жесткими. Для определения кинематики колесного движителя, оснащенного средствами повышения проходимости, необходимо определить ряд элементов с одинаковыми размерами (рис. 12). Например, такой элемент представляет собой гусеничный башмак с грунтозацепом и идеализированный элемент шины с протектором и пространством между шипами протектора. Эти элементы далее делятся на плоские частичные поверхности.

Для определения кинематики колесного движителя данными четырьмя элементами являются: передняя часть протектора, поверхность протектора, задняя часть протектора и пространство между шипами протектора.



**Рис. 12. Разбиение движителя на элементы**

**Fig. 12. Division of driver into units**

Элементы образуют соединение, при этом вся система удерживается шарнирами. Кинематика определяет последовательные положения элементов ходовой системы в процессе движения: от движения качения до проникновения в грунт и повторного выхода из грунта. Отдельные компоненты движения получаются для каждого элемента в результате наложения вертикального перемещения массы, вращения при качении и горизонтального перемещения относительно грунта из-за скольжения в соответствии с формулами (3)-(5) и рис. 13.

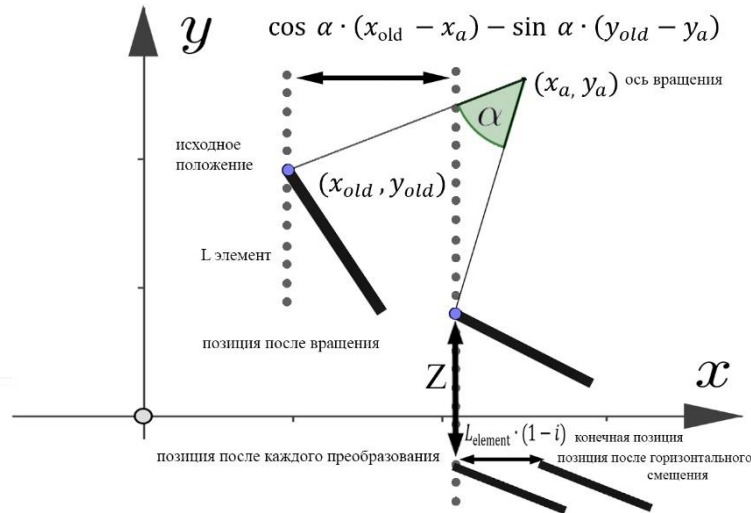


Рис. 13. Кинематика элемента

Fig. 13. Unit kinematics

$$x_{\text{new}} = [\cos \alpha \cdot (x_{\text{old}} - x_a) - \sin \alpha \cdot (y_{\text{old}} - y_a)] + x_a + L_{\text{elem}} \cdot (1 - i) \quad (3)$$

и

$$y_{\text{new}} = [\sin \alpha \cdot (x_{\text{old}} - x_a) + \cos \alpha \cdot (y_{\text{old}} - y_a)] + y_a - z \quad (4)$$

со скольжением, определяемым следующим образом:

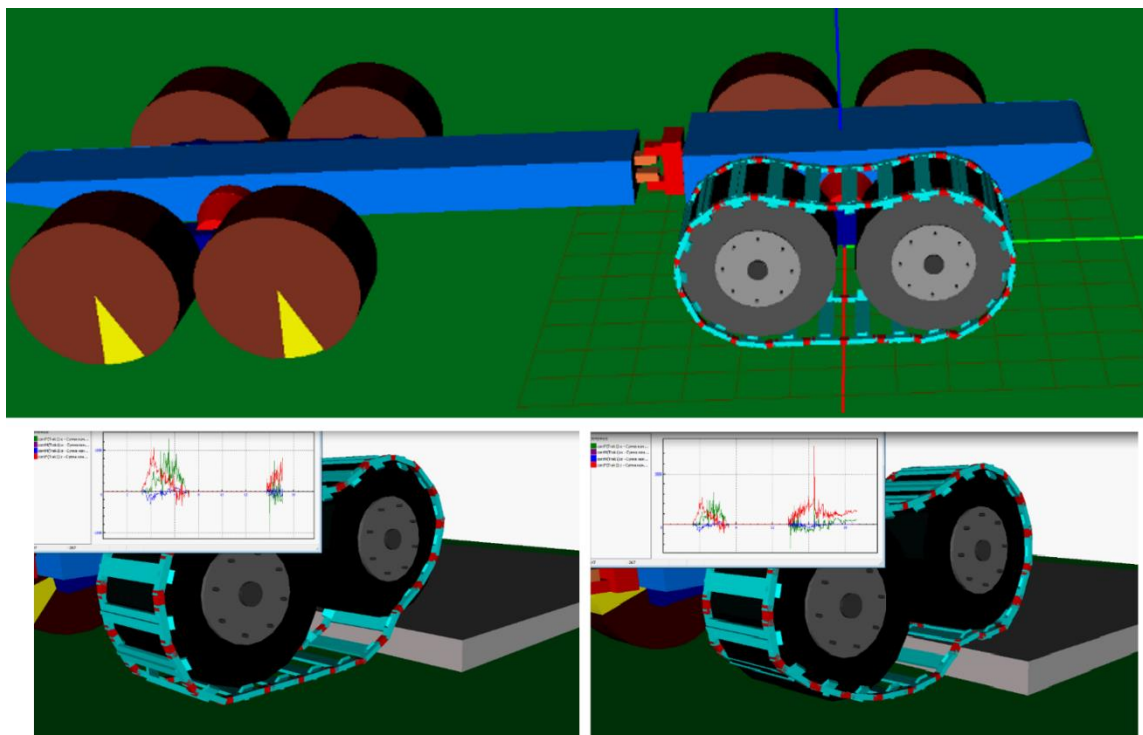
$$i = 1 - \frac{V_{\text{эффектив}}}{V_{\text{теоретическ}}} \quad (5)$$

Для элемента ходовой системы колесного транспортного средства, оснащенного средствами повышения проходимости, расчетный процесс движения показан на рис. 14. Исходя из траектории отдельных элементов ходовой системы колесного транспортного средства, оснащенного средствами повышения проходимости, определенной кинематикой, рассчитываются сжатия, создаваемые в грунте для каждого элемента. В качестве стандартного значения берется эталонная длина, соответствующая условиям грунта. Исходная длина характеризует расширение сектора грунта, в котором вступает в действие колесный движитель, оснащенный средствами повышения проходимости.

Сжатый таким образом грунт приводит к соответствующим реактивным напряжениям (выраженным основным полем напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ ), которые определяются отношением напряжения к деформации, выявленным при трехосных испытаниях в лаборатории, и могут быть рассчитаны относительно простым способом. Исходя из этого поля напряжений, теперь вычисляем напряжение, обычно действующее на элемент, с помощью анализа напряжений Мора [9, 11-13] в соответствии с (6):

$$\sigma_n = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cdot \cos 2\beta \quad (6)$$

Угол  $\beta$  ограничен направлением нормального напряжения на элементе  $\sigma_n$  и направлением основного напряжения  $\sigma_1$ .



**Рис. 14. Расчетная последовательность движения элемента движителя в среде программного комплекса «Universal mechanism»**

**Fig. 14. Computing sequence for driving unit movement in the environment of Universal mechanism software package**

Касательное напряжение  $\tau$ , действующее на элемент, вычисляется с использованием нормального напряжения  $\sigma_n$  и сжатия  $\epsilon_\tau$  в тангенциальном направлении в соответствии с дробным законом или законом Мора-Кулона (7).

$$\tau = [1 - \theta^{-2.3 \cdot \epsilon_\tau}] \cdot (c + \sigma_n \cdot \tan \varphi) \quad (7)$$

Мы вводим зависимость от сжатия  $\epsilon_\tau$  таким образом, что напряжение сдвига увеличивается с деформацией сдвига, вплоть до конечного значения  $c + \sigma_n \cdot \tan \varphi$  для очень большой деформации. Коэффициент  $-2,3$  означает, что при деформации 100-90 % достигается конечное значения  $\tau$ . Эффективные силы определяются из напряжений  $\sigma_n$  и  $\tau$  и суммируются для всех элементов органов движения ходовой системы колесного транспортного средства, оснащенного средствами повышения проходимости. Они делятся на горизонтальные и вертикальные.

Горизонтальные силы – это силы от нормального напряжения и напряжения сдвига, спроецированные на горизонтальную линию:

$$H_0 = \sigma_n \cdot B \cdot L \cdot \sin \gamma \quad (8)$$

$$H_\tau = \tau \cdot B \cdot L \cdot \cos \gamma \quad (9)$$

где  $B$  – ширина поверхности элемента;  $L$  – длина поверхности элемента;  $\gamma$  – угол между поверхностью элемента и горизонтальной линией.

Вертикальные силы – это силы от нормального напряжения и напряжения сдвига, спроецированных на вертикальную линию:

$$V_\sigma = \sigma_n \cdot B \cdot L \cdot \cos \gamma \quad (10)$$

$$V_\tau = \tau \cdot B \cdot L \cdot \sin \gamma \quad (11)$$

Горизонтальные и вертикальные силы для каждого элемента приводят к вертикальной реакции, движущей силе и сопротивлению качению в соответствии со следующими формулами:

Вертикальная реакция колеса  $j$  рассчитывается путем сложения по всем элементам  $i$ :

$$V_j = \sum_{\sigma=1}^n V_{\sigma j} + \sum_{\tau=1}^n V_{\tau j} \quad (12)$$

Движущая сила колеса  $j$  рассчитывается путем сложения по всем элементам  $i$ :

$$T_j = \sum_{\sigma=1}^n H_{\sigma-j} + \sum_{\tau=1}^n H_{\tau-j} \quad (13)$$

Соппротивление качению колеса  $j$  рассчитывается путем добавления дополнительных элементов  $i$ :

$$R_j = \sum_{\sigma=1}^n H_{\sigma+j} + \sum_{\tau=1}^n H_{\tau+j} \quad (14)$$

Добавленные ко всем колесам средства повышения проходимости позволяют нам получить полную массу транспортного средства,

$$G = \sum_{j=1}^m V_j \quad (15)$$

движущую силу транспортного средства,

$$T = \sum_{j=1}^m T_j \quad (16)$$

и сопротивление качению транспортного средства.

$$R = \sum_{j=1}^m R_j \quad (17)$$

Максимальный уклон грунта  $\tan \alpha$ , преодолеваемый транспортным средством, рассчитывается следующим образом:

$$\tan \alpha = \frac{T-R}{G} \quad (18)$$

Максимум обычно достигается при значении скольжения около 40 %.

Таким образом, в имеющейся имитационной модели транспортного средства представлен ряд параметров, а именно, для колесного транспортного средства это масса, центр масс, количество осей, расстояние между осями, радиус колеса, длина контакта шины.

### Выводы

1. В представленных имитационных моделях соединены почвенные модели верхнего и нижнего горизонтов почвы. Сцепление определено таким образом, что для каждого элемента движителя напряжения от обеих моделей грунта определяются отдельно и определяются в зависимости от глубины погружения. При очень незначительном погружении будет преобладать влияние верхней, при очень глубоком погружении – нижней модели грунта.

2. Влажность почвы рассчитывается в зависимости от количества осадков, испарения и времени года. Количество осадков должно быть измерено непосредственно. Испарение определяется на основе наблюдаемых переменных температуры, влажности воздуха, облачности и скорости ветра.

3. Используемые теоретические основы базируются на экспериментальных данных.

4. Данные о местности, относящиеся к мобильности, включают тип почвы, наклон, тип растительности и ее плотность. В настоящей работе применена правильная квадратная поверхность сетка и определены соответствующие данные о рельефе для каждой области.

### Библиографический список

1. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 230 с.
2. Агейкин, Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. Теория и расчет / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
3. Аникин, А.А. Теория передвижения колесных машин / А.А. Аникин, В.В. Беляков, И.О. Донато. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.
4. Погорелов, Д.Ю. Компьютерное моделирование динамики технических систем с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. № 4 (10). С. 27-34.
5. Ахрамович, С.А. Использование среды динамического моделирования технических систем SiminTech в задачах полунатурного моделирования / С.А. Ахрамович, А.В. Сычев, А.М. Колпаков, Е.А. Пономарев // XXIV Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация». Тезисы докладов. М.: МАИ-Принт, 2019. С. 71-73.

6. **Кузыченко, Ю.А.** Изменение структуры поверхностного слоя почвы и экологическая совместимость мобильных машин с почвой // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 4 (78). С. 20-22.
7. **Савкин, А.Н.** Расчет напряженно-деформированного состояния конструктивного элемента автомобиля методом конечных и дискретных элементов / А.Н. Савкин, А.С. Горобцов, В.В. Гетманский, А.В. Андроник, А.А. Седов, К.А. Бадиков // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 15 (194). С. 79-84.
8. **Makarov, V.S.** Mathematical model of overcoming discrete snow obstacles / V.S. Makarov, A.V. Parunin, S.A. Karaseva, V.V. Belyakov // В книге: Перспективы развития аграрных наук Agrosience-2022. Материалы Международной научно-практической конференции. Чебоксары, 2022. С. 72.
9. **Макаров, В.С.** Исследование деформационных свойств дорожно-грунтовых оснований типа микст / В.С. Макаров, А.М. Беляев, А.И. Марковнина, В.В. Беляков / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции. СПб, 2021. С. 430-434.
10. **Макуев, В.А.** Переходный режим при повороте колесной шарнирно-сочлененной лесозаготовительной машины / В.А. Макуев, В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, А.В. Шняков // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2015. Т. 19. №1. С. 107-110.
11. **Александров, А.С.** Применение критерия Друкера-Прагера для модификации условий пластичности / А.С. Александров, Г.В. Долгих, А.Л. Калинин // Наука и техника в дорожной отрасли. 2013. № 2 (65). С. 26-29.
12. **Редкозубов, А.В.** Математическая модель поверхности движения лесных дорог / А.В. Редкозубов, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 4 (106). С. 348-352.
13. **Котов, В.Л.** Аппроксимация напряжений в окрестности полости, расширяющейся с постоянной скоростью в среде с условием пластичности Мора-Кулона // Проблемы прочности и пластичности. 2019. Т. 81. № 2. С. 177-190.

*Дата поступления  
в редакцию: 10.01.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 03.03.2023*