

**АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES
ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)**

Научная статья
УДК 629.033:631.41

**АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ГУСЕНИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА РАСТИТЕЛЬНЫЙ ПОКРОВ И ПОЧВЫ**

**Владимир Павлович Лапик, Иван Петрович Адылин,
Павел Владимирович Лапик, Ольга Вячеславовна Кубаткина**
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

Аннотация. В данной статье представлены как, показатели определяющие воздействия гусеничных движителей с резиноармированными гусеницами на растительный покров и почвы, которые связаны с моделями свойств почвы, так и методики их оценки. Рассмотрено моделирование физико-механических свойств почвы с использованием моделей теории упругости при распределении давления движителя вдоль опорной поверхности гусеницы. Также установлено, что на почве со слабым поверхностным слоем для формирования достаточного движущего усилия очень важными для оценки негативного воздействия гусеничных движителей на почву являются коэффициент буксования δ и коэффициент скольжения при юзе s . Представлен анализ аналитических зависимостей для расчета среднего давления под опорной поверхностью гусеничного движителя. Для различных конструкций гусеничных движителей с эластичными опорными устройствами имеет место явление юза, которое является дополнительным сдвиговым воздействием на почву к буксованию. Представленные исследования являются очень важными для оценки негативного воздействия гусеничных движителей на почву.

Ключевые слова: гусеничный движитель, переувлажненные почвы, модуль деформации, буксование, опорное основание.

Для цитирования: Анализ и определение (исследование и выбор) оценочных показателей воздействия гусеничных движителей на растительный покров и почвы / В.П. Лапик, И.П. Адылин, П.В. Лапик, О.В. Кубаткина // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 6 (112). С. 48-53.

Original article

**ANALYSIS AND DETERMINATION OF EVALUATION INDICATORS OF THE IMPACT
OF TRACKED RUNNING GEAR SYSTEMS ON VEGETATION COVER AND SOIL**

Vladimir P. Lapik, Ivan P. Adylin, Pavel V. Lapik, Ol'ga V. Kubatkina
Bryansk State Agrarian University, Bryansk region, Kokino, Russia

Abstract. This article presents both indicators that determine the effects of tracked running gear with rubber-reinforced tracks on vegetation and soil, which are associated with models of soil properties, and methods for evaluating them. The modeling of the physico-mechanical properties of the soil using models of the theory of elasticity in the distribution of the pressure of the propulsor along the bearing surface of the track is considered. It has also been found that on soil with a weak surface layer, the slip coefficient δ and the slip coefficient s are very important for assessing the negative impact of tracked running gear on the soil. An analysis of analytical dependencies for calculating the average pressure under the supporting surface of the tracked running gear is presented. For various designs of tracked running gear with elastic support devices, the phenomenon of slipping occurs, which is an additional shear effect on the ground to slip. The presented researches are very important for assessing the negative impact of tracked running gear on the soil.

Keywords: tracked running gear, waterlogged soils, deformation modulus, slippage, bearing surface.

For citation: Analysis and determination of evaluation indicators of the impact of tracked running gear systems on vegetation cover and soil / Lapik V.P., Adylin I.P., Lapik P.V., Kubatkina O.V. // Vestnik of Bryansk State Agricultural Academy. 2025. No.6 (112). pp. 48-53.

Введение. В современном агробизнесе применяют самоходные кормоуборочные комбайны, которые имеют как колесные, так и гусеничные движители.

По отношению к гусеничным машинам колесные в большей степени оказывают негативное воздействие на опорное основание. Помимо прочего колесные машины имеют низкую проходимость на

почвах со слабой несущей способностью (переувлажненных почвах) относительно гусеничных. Это может сильно отразиться на результативных экономических показателях, которые завязаны на агротехнических сроках возделывания и уборки культур. Уборочная техника с гусеничным двигателем в своей конструкции имеет резиноармированные ленты, которые наряду с положительными качествами, имеют и отрицательные такие как увеличенная вибрация, повышение буксования, а на переувлажненных естественных травостоях высокие грунтозацепы уничтожают как травостой, так и корневую систему.

В связи с данным утверждением, необходимо определить машины с такими гусеничными системами, которые снизят негативное воздействие опорное основание и способны заготавливать корма на естественных кормовых угодьях пойменных лугов, которые обладают высоким питательным качеством и биологической ценностью за счет отлагающихся аллювиальных наносов (наилков) после продолжительного затопливания их талыми весенними водами. Заготовка кормов с пойменных лугов – это практически малозатратная технология (только на уборку), а травостой — это экологически чистые корма для животноводства.

Цель исследований. Для установления гусеничных машин способных заготавливать корма на естественных переувлажненных кормовых угодьях на начальном этапе необходимо определить такие показатели, которые определяют воздействия гусеничных движителей на растительный покров и почвы. В имеющихся научно-исследовательских работах и нормативно-технических документах приняты различные системы показателей воздействия гусеничного движителя на почву. Поэтому главной целью данных исследования является установление таких показателей, которые в конечном счете формируют комплексный критерий оценки движителя.

Материалы и методы. Аналитические исследования проводились путем изучения и анализа научно-исследовательских работ и нормативно-технической документации связанных с использованием самоходных машин на различных сельскохозяйственных операциях, в том числе и с различными гусеничными системами.

Результаты и обсуждение. Для оценки воздействия гусеничного движителя на почву в научно-технических исследовательских работах для различных условий эксплуатации рассматриваются различные показатели воздействия гусеничного движителя на почву. Рассмотрим некоторые из них с точки зрения соответствия основному требованию к критериям оценки, которое на современном научном языке обозначается термином «релевантность». Этот обобщенный термин на самом деле объединяет в себе целый ряд требований [1]: адекватность, значимость, существенность, актуальность, достаточность, пригодность, уместность, соответствие запросу.

Рассмотрим некоторые предлагаемые системы показателей воздействия гусеничного движителя на почву на предмет релевантности. При этом сразу отметим, что наиболее существенным отличительным признаком различных систем показателей является модель, которой описываются физико-механические свойства почвы. Для моделирования свойств почвы используются три подхода [2]: теория пластического деформирования и предельного состояния пластического тела с внутренним трением, теория упругости и комбинированные теории. Поскольку теоретическое описание напряженного состояния комбинированного упругопластического тела вызывает большие математические проблемы, в этом случае используются упрощенные графоаналитические полуэмпирические методы (в некоторых случаях оправдывающие себя). С моделями свойств почвы связаны и методики оценки показателей воздействия движителей на почву.

В работе Николая Евгеньевича Перегудова [3] и ряде других источников в качестве основного оценочного показателя негативного воздействия гусеничного трактора на почву является конечная плотность почвы после его прохода $\rho_{\text{кон}}$. Вторичными показателями, определяющими негативное воздействие трактора на почву автором выделяются:

- вертикальная деформация слоя $\lambda_{\text{верт}}$;
- сдвиговая деформация слоя $\lambda_{\text{гор}}$;
- объемная деформация слоя e ;
- коэффициент сопротивления качению $f_{\text{поч}}$ от прессования почвы;
- буксование движителей δ .

Указано, что в совокупности данные показатели более подробно описывают картину взаимодействия гусеничного движителя со слоем почвы для анализа процесса ее уплотнения.

Учитывается, что свойства почвы и силовые характеристики взаимодействия с ней гусеничного движителя меняются с каждым проходом опорного катка трактора. В отличие от большинства исследований, в данном случае принято, что сдвиговая деформация почвы изменяется линейно по глу-

бине слоя 20-25 см, а не сводится только к срезанию почвозацепами тонкого верхнего слоя, плотность почвы влияет в наибольшей степени.

В качестве оценочных показателей уплотняющего воздействия ходовых систем на почвенный слой различными авторами используются: среднее давление движителей $q_{\text{ср}}$, максимальное давление движителей $q_{\text{макс}}$, максимальное напряжение q_h в деформируемом слое на глубине h ; уплотняющий показатель воздействия U (кН/м) [4]; влажность, твердость, остаточная вертикальная деформация почвы [5] и др.

В работе [6] для оценки экологичности движителя используется два критерия:

- вертикальное давление на опорное основание P ;
- касательное напряжение τ .

Результирующее суммарное напряжение, вызванное сжатием (от вертикального давления P) и сдвигом грунта (касательное напряжение вследствие буксования τ), не должно превысить несущую способность почвы:

$$\sigma = \sqrt{p^2 + \tau^2} \quad . \quad (1)$$

Также напряжение сдвига не должно превысить прочность почвы на срез τ_{max} .

Исследована также глубина колеи, которая принимается зависящей от модуля деформации почвы. Известно, что модуль деформации, в отличие от модуля упругости учитывает как упругую составляющую деформации, так и пластическую [7]. Поэтому такую модель можно назвать комбинированной и полуэмпирической.

В работах Добрецова Р.Ю. [8] при рассмотрении путей снижения воздействия на грунт движителя со звенчатой гусеницей перечислены типичные виды воздействия, оказываемого гусеничным шасси на почву: «уплотнение грунта при движении машины, образование колеи, срыв грунта при передаче тягового усилия и при пассивном качении движителя; срез, смятие грунта при повороте».

Указано, что оптимум относительно требований, предъявляемым к движителям и уровнем негативного воздействия на опорное основание достигается исключительно комплексным подходом в проектировании конструкции движителя.

Наиболее значительное разрушающее воздействие гусеничный движитель транспортного средства оказывает на грунты со слабым поверхностным слоем, основная особенность которых - наличие мощного подстилающего слоя.

Отсюда следует формулировка задачи: прочность дернового покрова должна обеспечивать неповреждающее воздействие опорной поверхности только в пределах упругих деформаций почвы. Любые технические решения по экологически безопасному движителю должны удовлетворять этому основному требованию. В обратной постановке: технические характеристики машины должны иметь параметры по уплотнению и сдвигу почвы не выше ее прочностных свойств.

ГОСТ Р 58655-2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву» определяет допустимое максимальное нормальное давление на почву мобильных сельскохозяйственных машин в зависимости от её физико-механического состава и влажности, безотносительно к способу и глубине определения давления, где глубина должна быть 20 см (в старых версиях ГОСТ - на глубине 15 см). Модель почвы, в данном случае, является упруго-деформируемой среды с использованием эталонного образца грунта, представляющего собой песок, укатанный движителем испытываемой техники.

Здесь учтено, что каждое звено гусеницы оставляет свой отдельный отпечаток на поверхности почвы, причем под средней частью звена и вблизи шарнира напряжения в почве будут различными. Датчики давления, установленные под разными частями звена, будут в процессе прохождения над ними опорных катков движителя «записывать» различные эпюры распределения давления под опорной частью гусеницы (и соответственно давать различные значения максимального давления). Поэтому ГОСТ предусматривает методику определения давления на почву с помощью четырех датчиков, попадающих под различные точки по длине звена, взятые с интервалом в четверть его длины. Затем определяется среднеарифметическая величина из этих четырех показаний.

Наличие волн на почве после прохождения гусеничного движителя, длина которых кратна длине звена гусеницы, отмечается и в работах [8]. Там отмечается и наблюдение волн длиной, кратной длине опорной части гусеницы.

ГОСТ 26954-2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Метод определения максимального нормального напряжения в почве» устанавливает метод определения нормальных вертикальных напряжений в почве в зависимости от нормального давления на её поверхности и глубины. При этом в качестве стандартной глубины принята глубина $h = 50$ см. Используется формула зависимости

$\sigma(h)$, не учитывающая тип и влажность почвы, заимствованная из теории деформирования линейно упругих тел. Рассчитывается давление на глубине h под центральной точкой прямоугольной площади контакта длиной $2a$ и шириной $2b$ при равномерно распределенном по поверхности контакта давлении (за которое принимается среднее давление под опорной поверхностью гусеничного движителя, умноженное на коэффициент неравномерности, \bar{q}). В несколько преобразованной форме эта зависимость имеет вид:

$$\sigma_z(h) = \frac{2}{\pi} \bar{q} \left[\arcsin\left(\frac{ab}{\sqrt{a^2 + h^2} \sqrt{b^2 + h^2}}\right) + \frac{ha}{(a^2 + h^2)(b^2 + h^2)} \frac{(a^2 + b^2 + 2h^2)}{\sqrt{a^2 + b^2 + h^2}} \right] \quad (2)$$

В дальнейшем будем ориентироваться на использование моделей теории упругости при рассмотрении распределения давления движителя вдоль опорной поверхности гусеницы. При рассмотрении деформирования почвы в поперечной плоскости и формирования колеи будем ориентироваться на модель пластического тела. Такое разделение моделей почвы объясняется малым отношением ширины опорной части гусеницы к её длине. При определении вертикальных напряжений в почве на различной глубине следует учитывать, что при наличии жесткого подстилающего слоя выпирание почвы из-под гусеницы происходит преимущественно не вверх, а в стороны - по горизонтали. При этом вертикальные напряжения в деформируемом слое изменяются с глубиной не по зависимости (2), а могут быть постоянными и даже несколько возрастать [2]. В то же время, при этом увеличивается ширина участка деформируемого слоя, воспринимающего давление движителя (за счет выпирания почвы в стороны от гусеницы), и в целом вертикальные напряжения уменьшаются по сравнению с рассчитанными по отношению веса машины к опорной площади. В целом необходимо придерживаться методики, изложенной в ГОСТ.

Что касается показателя уплотнения почвы, то для его определения нужно знать три напряжения: σ_z , σ_x и σ_y . Первое из этих напряжений не зависит от коэффициента Пуассона материала, второе - зависит от него [2], а третье вообще должно определяться согласно теории пластического деформирования. Для уплотненных грунтов с высокой несущей способностью, на которых устраиваются фундаменты сооружений, коэффициент Пуассона принимается равным 0,3 - 0,4 [2, 7]. Каким можно принимать значение этого коэффициента для почв со слабой несущей способностью - неизвестно. Таким образом, этот показатель на стадии теоретического исследования определить не представляется возможным.

Такой показатель, как глубина колеи можно применять к рыхлым песчаным почвам (наиболее соответствующим модели пластической деформации сыпучей среды с сухим внутренним трением), либо переувлажненным глинистым, обладающим высокой текучестью, в отсутствие жесткого подстилающего слоя и мощного дернового слоя. Обычно только в этих случаях имеется четко выраженная колея. Однако в этих же случаях имеется и четкая линейная зависимость глубины колеи от давления на почву. Поэтому такой показатель является избыточным, но фиксироваться наличие колеи должно. Согласно концепции «экологичного движителя», колея на почвах со слабой несущей способностью вообще не должна образовываться [8].

Наконец, рассмотрим такие показатели, как касательные напряжения в почве и буксование. В рассмотренных выше стандартах эти показатели отсутствуют. Буксование как показатель тягово-сцепных свойств движителя (скорее, как показатель устойчивости сцепления движителя с почвой) рассматривается в ГОСТ 30745 - 2001 «Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей». Причем буксование определяется косвенным путем, через разницу между номинальной и фактической скоростей перемещения трактора. Непосредственно буксование фактически никем не измерялось, видимо потому, что нет общей теории этого процесса для разных типов гусеничных движителей. Более-менее хорошо этот процесс теоретически изучен применительно к движителям со звенчатыми гусеницами с высокими грунтозацепами [8]. В то же время, установлено, что при относительно небольшой крюковой нагрузке (до $P_{кр} = 0,1G$, где G - сцепной вес машины) параллельно с буксованием на некотором участке опорной части гусеницы, на другом её участке имеет место юз, т. е. смещение звеньев гусеницы относительно опорной поверхности в направлении движения трактора [8]. Особенно это характерно для рыхлых сыпучих грунтов и недеформируемого опорного основания (жесткой дороги при скоростях движения 1-10 м/с. Наличие юза объясняется «механизмом шагания траков» - траки бегут волной вперед, по направлению движения трактора. Здесь играет роль и образование волн на поверхности колеи, и неустойчивость положения траков, опирающихся на грунтозацепы.

На рисунке 1 показано распределение смещения звеньев гусеницы на участке юза и участке буксования (а) и при наличии только буксования в случае большой крюковой нагрузки (б) [8]. Через T обозначено натяжение гусеницы, R_0 - движущая сила.

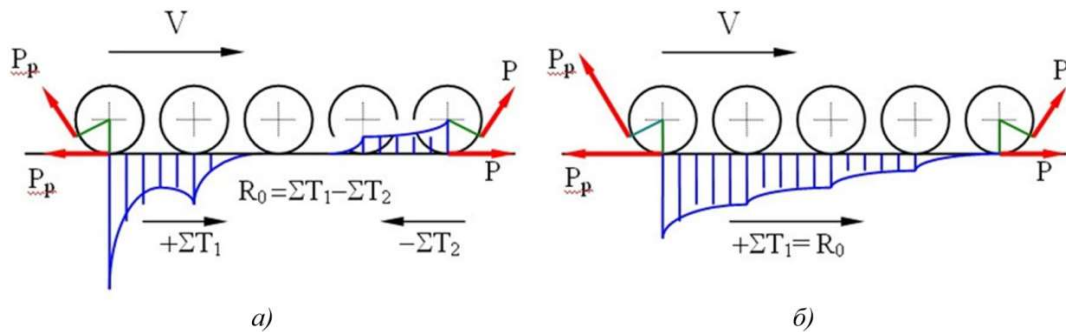


Рисунок 1 - Схема формирования движущего усилия при взаимодействии гусеничного движителя с опорным основанием при наличии (а) и отсутствии юза (б) [8]

На почве со слабым поверхностным слоем для формирования достаточного движущего усилия необходим и большой коэффициент буксования δ , и большой коэффициент скольжения при юзе s . Чем больше юз, тем больше буксование. Юз - это дополнительное к буксованию сдвиговое воздействие на почву. Очевидно, эти два показателя являются очень важными для оценки негативного воздействия гусеничных движителей на почву. К сожалению, измерение разности между номинальной и фактической скоростями перемещения трактора дает только разность коэффициентов δ и s , а для оценки воздействия на почву нужно знать их сумму. Поэтому снова встает вопрос о методике непосредственного измерения смещения звеньев гусеницы относительно опорного основания (дороги или почвы). Кроме того, необходимы отдельные теоретические исследования явления юза.

При настоящем уровне изученности этого вопроса использовать такой показатель, как касательные напряжения в почве, при количественной теоретической оценке негативного воздействия на почву гусеничного движителя определенной конструкции, являются также важным оценочным показателем, поэтому необходимо выполнить исследования качественной оценки данного показателя.

Выводы. Анализ приведенных показателей оценки гусеничных движителей показал, что при моделировании физико-механических свойств почвы целесообразно использование моделей теории упругости при рассмотрении распределения давления движителя вдоль опорной поверхности гусеницы. При рассмотрении деформирования почвы в поперечной плоскости и формирования колеи нужно ориентироваться на модель пластического тела.

При определении вертикальных напряжений в почве на различной глубине следует учитывать, что при наличии жесткого подстилающего слоя выпирание почвы из-под гусеницы происходит преимущественно не вверх, а в стороны - по горизонтали. При этом вертикальные напряжения в деформируемом слое не уменьшаются с глубиной, а могут быть постоянными и даже несколько возрастать. В то же время, при этом увеличивается ширина участка деформируемого слоя, воспринимающего давление движителя (за счет выпирания почвы в стороны от гусеницы), и в целом вертикальные напряжения уменьшаются по сравнению с рассчитанными по отношению веса машины к опорной площади.

Такой показатель, как глубина колеи является избыточным, но фиксироваться наличие колеи должно, т.к. согласно концепции «экологичного движителя», колея на почвах со слабой несущей способностью вообще не должна образовываться.

На почве со слабым поверхностным слоем для формирования достаточного движущего усилия необходим и большой коэффициент буксования δ , и большой коэффициент скольжения при юзе s . Эти два показателя являются очень важными для оценки негативного воздействия гусеничных движителей на почву, но стоит вопрос о методике непосредственного измерения смещения звеньев гусеницы относительно опорного основания (дороги или почвы).

Для различных конструкций гусеничных движителей с эластичными опорными устройствами необходимы отдельные теоретические исследования явления юза.

Список источников

1. Ким М.С. Ким В.Х. Основы механики грунтов: учеб. пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 200 с.
2. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. 1. Л.-М.: Госстройиздат, 1959. 356 с.
3. Носов С.В., Перегудов Н.Е. Оценка уплотняющего воздействия и эксплуатационных характеристик гусеничного трактора на основе реологического подхода // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 1. С. 43-51.
4. Computing the pressure of agricultural tractors on soil and mapping its compaction / I.P. Adylin, A. Comparetti, C. Greco et al. // Dokuchaev Soil Bulletin. 2024. No. 120. P. 136-163.

5. Парлюк Е.П. Повышение надежности силовых установок в условиях граничного // Чтения академика В.Н. Болтинского: семинар, 20-21 января 2021 года. М.: ООО "Сам Полиграфист", 2021. С. 27-33.
6. Валге А.М. Оптимизация параметров почвообрабатывающего агрегата // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2020. № 1 (102). С. 49-55.
7. Чемшикова Ю.М. Снижение отрицательного воздействия гусеничных вездеходов лесного хозяйства и лесозаготовок на лесные почвогрунты: дис. ... канд. техн. наук. Ухта, 2019. 153 с.
8. Экспериментальные исследования тяговых характеристик колесного энергетического средства / Е.В. Маршанин, А.В. Михайлов, А.А. Бутенко, Е.Е. Кузнецов // Аграрный научный журнал. 2025. № 3. С. 119-128.

Информация об авторах:

В.П. Лапик - доктор технических наук, профессор кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, v.p.lapick@mail.ru.

И.П. Адылин - кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

П.В. Лапик - инженер, АО «Транснефть Дружба».

О.В. Кубаткина - старший преподаватель кафедры автоматизации, физики и математики ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Information about the authors:

V.P. Lapik - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical Systems in Agribusiness, Environmental Management and Road Construction, Bryansk State Agrarian University, v.p.lapick@mail.ru.

I.P. Adylin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technical Systems in Agribusiness, Environmental Management and Road Construction, Bryansk State Agrarian University.

P.V. Lapik - Engineer, Transneft Druzhba JSC.

O.V. Kubatkina - Senior Lecturer at the Department of Automation, Physics and Mathematics, Bryansk State Agrarian University.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14.08.2025, одобрена после рецензирования 15.09.2025, принята к публикации 12.10.2025.

The article was submitted 14.08.2025, approved after reviewing 15.09.2025, accepted for publication 12.10.2025.

© Лапик В.П., Адылин И.П., Лапик П.В., Кубаткина О.В.