

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОБОСНОВАНИЮ ВЗАИМОСВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ГУСЕНИЧНОГО ЗВЕНА И ГЕОМЕТРИИ ГРУНТОЗАЦЕПОВ

Киц И.В., Воронцов И.И.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: гусеничный движитель, механика грунтов, грунтозацеп, многофазное разрушение, выклинивание трака, тягово-сцепные свойства.

Аннотация. Взаимодействие элементов ходовых систем транспортных машин с деформируемыми поверхностями определяет предельный уровень реализации тягово-сцепных свойств наземных транспортно-технологических комплексов. В представленной статье выполнен критический анализ существующих математических моделей, используемых для обоснования рациональной геометрии гусеничного обвода. Рассмотрены три основных подхода: классические расчетные схемы, базирующиеся на концепции мгновенного плоскостного сдвига грунтового массива, пространственная модель предельного равновесия Алябьева – Калинина, учитывающая формирование зоны выпора под опорной поверхностью, а также метод многофазного анализа Кулабухова, описывающий дискретную динамику разрушения среды в межзвеневом пространстве гусениц. На основе сопоставления исходных допущений и граничных условий указанных моделей выявлены системные методологические риски, связанные с некорректной подменой масштабов геометрических параметров в инженерной практике проектирования. Научная новизна работы заключается в определении аналитических границ применимости теории предельного равновесия к дискретным элементам гусеничного звена, а также в установлении функциональной связи между глобальным критерием погружения гусеничного обвода и локальными параметрами фазового разрушения грунта. Полученные результаты позволяют дифференцировать расчетный процесс на эскизном и техническом этапах проектирования ходовых систем, обеспечивая минимизацию буксования машин в тяжелых грунтовых условиях, тем самым повышая эффективность их проходимости.

ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES TO SUBSTANTIATING THE RELATIONSHIP BETWEEN TRACK LINK PARAMETERS AND LUG GEOMETRY

Kits I.V., Vorontsov I.I.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg

Keywords: tracked vehicle, soil mechanics, track shoe lug, multiphase failure, track wedging, traction performance.

Abstract. The interaction between running gear components of transport vehicles and deformable surfaces determines the ultimate traction performance of ground-based transport complexes. This paper presents a critical analysis of existing mathematical models used to justify the rational geometry of a tracked undercarriage. Three main approaches are considered: classical calculation schemes based on the concept of instantaneous planar shear of the soil mass; the spatial limit equilibrium model by Alyabyev and Kalinin, which accounts for the formation of a heave zone beneath the support surface; and Kulabukhov's multiphase analysis method, which describes the discrete failure dynamics of the medium in the inter-link space of tracks. By comparing the initial assumptions and boundary conditions of these models, systematic methodological risks are identified, arising from the incorrect substitution of geometric parameter scales in engineering design practice. The scientific novelty lies in defining the analytical boundaries for applying limit equilibrium theory to discrete track link elements, as well as in establishing a functional relationship between the global track immersion criterion and local parameters of phase soil failure. The obtained results make it possible to differentiate the calculation process at the conceptual and detailed design stages of running gear, ensuring minimization of vehicle slippage under severe soil conditions, thereby enhancing their off-road mobility.

Введение

Обеспечение нормативных показателей тягово-сцепной проходимости наземных транспортно-технологических комплексов (НТТК) на деформируемых поверхностях является одной из приоритетных задач специального машиностроения. Эффективность реализации крутящего момента гусеничным движителем жестко лимитирована физико-механическими

процессами, протекающими в зоне контактного взаимодействия элементов ходовой части с массивом грунта, по которому осуществляется движение. При этом параметры макрогеометрии обвода, такие как длина опорной поверхности и ширина движителя, и локальные геометрические характеристики единичного звена, такие как шаг звена, высота и профиль грунтозацепов, формируют сложную, динамически меняющуюся систему напряженно-деформированного состояния (НДС) подстилающего грунта [1].

В современной практике проектирования ходовых систем выбор оптимального соотношения конструктивных параметров гусеничного движителя сопряжен с некоторыми затруднениями. Ошибки, которые могут быть допущены на этапе эскизного расчета, напрямую влияют на снижение КПД движителя, могут привести к росту буксования и преждевременному разрушению структуры опорного массива. Существующие аналитические подходы, используемые для прогнозирования тяговых усилий, зачастую базируются на взаимно исключающих допущениях механики грунтов, что приводит к получению противоречивых инженерных рекомендаций [2, 3].

Основное научно-методическое противоречие заключается в расхождении пространственно-временных масштабов рассматриваемых моделей взаимодействия. Традиционные расчетные схемы, оперирующие концепцией мгновенного плоскостного сдвига, полностью игнорируют нюансы среды и геометрию распределения грунтозацепов. В свою очередь, более продвинутое подходы, основанные на теории предельного равновесия, требуют прецизионного разграничения понятий шага единичного звена и полной продольной длины контактной поверхности. В инженерной практике это нередко приводит к методологическим ошибкам, в частности к некорректному переносу граничных условий с общей длины обвода на отдельно взятое звено [3, 4].

Данная работа направлена на разрешение указанного противоречия посредством проведения критического сравнительного анализа фундаментальных аналитических моделей взаимодействия гусеничного движителя с грунтом. Для достижения поставленной цели в статье последовательно решаются задачи по выявлению системных ограничений классических методов сдвига, определению пространственных границ применимости метода области предельного равновесия Алябьева – Калинина, а также оценке физической достоверности многофазного анализа Кулабухова с позиций динамики пошагового разрушения среды. Конечным результатом исследования является формирование единой матрицы критериев по категориям и выработка дифференцированных рекомендаций по сквозному проектированию элементов гусеничного звена.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта теоретического анализа в настоящей работе выступает комплекс отечественных аналитических моделей, устанавливающих функциональные зависимости между геометрическими параметрами элементов гусеничного обвода и реализуемой им тангенциальной силой тяги. Предметом исследования являются граничные условия, исходные физико-механические допущения и заложенные в данные модели оптимизационные критерии.

Методологическую основу работы составляет аппарат системного сравнительного анализа и разбора граничных условий задач механики грунтов. Ввиду фундаментальных различий в физической природе рассматриваемых моделей – от статического плоскостного сдвига до динамического многофазного резания среды – прямое сквозное количественное сопоставление результатов без привязки к конкретным жестким параметрам лабораторных или натурных испытаний является методологически некорректным. В связи с этим систематизация подходов осуществлена на основе построения категориальной матрицы, фиксирующей полноту учета геометрических параметров движителя, адекватность отображения кинематики разрушения грунтового массива во времени и физический смысл используемых критериев оптимизации [4, 5].

Информационную базу исследования сформировали фундаментальные труды отечественных научных школ в области теории танков, тракторов и специальных машин,

включая профильные публикации в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, материалы диссертационных исследований и монографии. При формировании репрезентативной выборки источников ключевыми критериями отбора служили: наличие в явном виде верифицированных математических уравнений связи «геометрия – тяга» и прохождение моделями процедуры экспериментальной проверки на специализированных стендах или естественных основаниях [6, 7].

Границы данного исследования умышленно лимитированы классом детерминированных аналитических моделей, не требующих привлечения ресурсоемкого численного моделирования. В рамках решаемых задач свойства грунтов и пространственная анизотропия их прочностных характеристик рассматриваются в качестве перспективных факторов расширения расчетного аппарата и не включаются в базовые уравнения сопоставляемых классических и пространственных моделей.

Результаты сравнительного анализа подходов

Классические подходы: модель мгновенного среза

Исторически первые математические модели, описывающие тангенциальное взаимодействие ходовых систем НТТК с грунтом, сформированы в трудах отечественных школ В.В. Гуськова, М.И. Ляско и ряда зарубежных исследователей. Данные модели базировались на феноменологическом подходе механики сплошных сред. В основе этих методик лежит допущение о квазистатическом характере нагружения, при котором разрушение опорного массива происходит в форме мгновенного сдвига жесткого монолитного объема грунта, так называемого «грунтового кирпича», по фиксированной горизонтальной плоскости, проходящей строго по вершинам или кромкам грунтозацепов [2].

В рамках этой концепции аналитическое выражение для определения предельного тягового усилия $F_{тяги}$ по условиям сцепления с основанием традиционно описывается уравнением знаковой суперпозиции сил трения $F_{тр}$ и чистого сдвига $F_{сд}$, адаптированным из закона Кулона:

$$F_{тяги} = F_{тр} + F_{сд} = f \cdot N + c \cdot A, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения материала звена о грунт; N – интегральная нормальная нагрузка на опорную поверхность обвода; c – удельное сцепление грунтовой среды; A – геометрическая площадь активной поверхности сдвига, рассчитываемая как произведение габаритной ширины звена на общую продольную длину контакта гусеничного движителя.

Критический анализ структуры уравнения и заложенных в него допущений позволяет эксплицировать фундаментальные научно-методические ограничения классического подхода, такие как инвариантность площади деформации – модель оперирует константным значением площади A , полностью абстрагируясь от дискретного характера расстановки грунтозацепов. В реальных условиях шаг звеньев и высота профиля напрямую определяют, произойдет ли срез единым массивом или среда будет разрушаться изолированными локальными блоками [2]. Принимаемая схема жесткого плоского сдвига игнорирует кинематические трансформации, исключая возможность математического моделирования альтернативных физических сценариев, таких как послойное забивание межзвеньевое пространства, выклинивание подстилающей среды или ранний локальный срез [3]. Использование интегральной нормальной силы N предполагает гипотетическую равномерность распределения нормальных напряжений по всей длине обвода. В действительности неравномерность эпюры давлений – наличие пиковых напряжений под опорными катками – кардинально меняет локальную сопротивляемость грунта сдвигу. Ввиду отсутствия в расчетном аппарате явных функциональных связей между геометрическими параметрами зацепа и деформационными характеристиками грунта, данные модели принципиально неприменимы для решения задач оптимизации. Они не содержат внутреннего математического критерия для поиска наилучших конструктивных параметров и могут быть задействованы лишь на этапе поверочных тягово-сцепных расчетов общего характера [3, 8].

Метод области предельного равновесия Алябьева – Калинина

Существенным шагом в преодолении ограничений феноменологических моделей мгновенного сдвига стали исследования А.Ф. Алябьева и С.Ю. Калинина, в которых авторы перешли от плоской фиксированной поверхности разрушения к аналитическому моделированию области предельного равновесия грунта, формирующейся в подстилающем массиве под совместным воздействием вертикальной нагрузки и сдвигающего усилия от движителя [3]. Геометрические контуры и глубина распространения этой зоны деформации определяются прочностными характеристиками среды – углом внутреннего трения и удельным сцеплением, а также высотой вертикального элемента грунтозацепа [3, 9].

Научно-методическое значение такого подхода заключается в математическом описании условий сохранения несущей способности опорной части движителя для предотвращения эффекта «закапывания» в процессе взаимодействия гусениц с поверхностью движения. В рамках физической концепции модели критически важным является строгое разграничение масштабов геометрических параметров движителя. Условие предотвращения лавинообразного выпора грунта базируется на сопоставлении размеров формирующейся зоны предельного равновесия с полной продольной длиной опорной поверхности гусеничного обвода, находящейся в непрерывном контакте с грунтом, а не с шагом или длиной отдельного изолированного звена.

Когда глубина или продольный вектор наведенной области предельного напряженного состояния выходят за пространственные границы общей подошвы гусеничного контакта, в массиве активизируется деструктивный процесс выклинивания. Среда теряет сопротивляемость сдвигу, происходит срыв потока грунтовых масс, и транспортное средство переходит в режим полного буксования независимо от величины подводимого крутящего момента.

Для идеальных сыпучих сред, когда $c = 0$, граничное условие устойчивости, исключающее лавинообразный сдвиг под подошвой обвода, формализуется в виде безразмерного геометрического критерия:

$$\frac{h}{L_{\text{нод}}} \leq \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

где h – высота профиля; $L_{\text{нод}}$ – длина опорной поверхности движителя; φ – угол внутреннего трения.

Данный критерий обладает высокой инженерной ценностью на этапе эскизного проектирования транспортного средства, поскольку позволяет жестко лимитировать максимальную высоту грунтозацепов исходя из общих габаритов ходовой части и преимущественного типа грунта в предполагаемых условиях эксплуатации.

Метод Алябьева – Калинина при этом характеризуется внутренними методическими допущениями. Рассматривая стационарное предельное состояние грунтового массива под всей проекцией машины, математическая модель принципиально не учитывает дискретный шаг расстановки грунтозацепов на смежных звеньях, влияние конфигурации профиля зацепа и нестационарную динамику пофазного развития деформаций во времени по мере продвижения гусеничного обвода [3, 8].

Метод многофазного анализа А.В. Кулабухова

Наиболее полным аналитическим решением, связывающим параметры локальной геометрии зацепа с динамикой разрушения опорного основания, является метод многофазного анализа, разработанный А.В. Кулабуховым [4, 5, 9]. В отличие от статических схем, данный подход осуществляет синтез положений теории предельного состояния грунтовых масс и базовых уравнений механики резания сред. Контактное взаимодействие единичного грунтозацепа с массивом моделируется как нестационарный дискретно-временной процесс, дифференцированный на четыре последовательные стадии:

1. Формирование и первоначальное уплотнение застойного клина грунта непосредственно перед набегающей гранью зацепа.

2. Зарождение устойчивой локальной площадки скольжения, наклоненной к горизонту под углом, зависящим от физико-механических свойств среды.

3. Реализация макродеформаций и пространственного сдвига отсекаемого массива.

4. Динамическое выклинивание гусеничного звена, сопровождающееся вертикальным выносом и экструзией грунтовой массы вверх.

Математический аппарат модели позволяет представить результирующую тангенциальную силу тяги $F_{тяги}$ в виде балансовой разности движущих сил и реакций сопротивления элементов движителя:

$$F_{тяги} = F_{упл} + F_{сдв} + F_{выкл} + F_{сопр}, \quad (3)$$

где $F_{упл}$, $F_{сдв}$, $F_{выкл}$ – аналитические составляющие усилий, генерируемых соответственно на стадиях уплотнения ядра, сдвига массива и его выклинивания; $F_{сопр}$ – совокупное сопротивление перемещению опорных элементов.

Все компоненты уравнения выражаются через варьируемые параметры геометрии звена – высоту h , шаг расстановки грунтозацепов t , угол наклона профиля зацепа θ и физические константы грунта – угол внутреннего трения ϕ , удельное сцепление c и объемный вес γ [5, 9].

Важнейшим достоинством метода Кулабухова является способность прогнозировать три альтернативных физических режима разрушения среды в пространстве между звеньями в зависимости от шага грунтозацепов:

1. Ранний срез – наблюдается при избыточно малом шаге звеньев гусеницы и характеризуется замыканием плоскости скалывания по вершинам грунтозацепов, забиванием межгусеничного пространства уплотненным грунтом и падением реализуемого сцепления до минимума.

2. Выклинивание – фиксируется при чрезмерно большом шаге t – сопровождается преждевременной потерей устойчивости массива и неэффективным выталкиванием грунта вверх до момента полной реализации потенциала сдвига.

3. Двухфазное разрушение – представляет собой искомый экстремум, при котором обеспечивается максимальное вовлечение несущей способности грунта в процесс восприятия сдвигающих нагрузок.

Математический критерий оптимизации геометрии в рамках данной модели формулируется как условие строгого балансового равенства мгновенных сил среза $F_{ср}$ и сил выклинивания массива $F_{выкл}$:

$$F_{ср}(h, t, \phi, c) = F_{выкл}(h, t, \phi, c). \quad (4)$$

Оценка достоверности расчетного аппарата Кулабухова требует строгого учета граничных условий верификации. Согласно экспериментальным данным, полученным на специализированных лабораторных стендах при взаимодействии с однородными песчаными и суглинистыми основаниями в диапазоне скоростей 0,5-1,0 м/с и влажности среды 8-12%, расхождение между теоретическими и опытными значениями силы тяги колеблется в узком коридоре от 3 до 9% [4, 9]. Однако в инженерной практике необходимо учитывать, что указанный уровень точности не является инвариантным. При переходе к сложным многофазным средам, например, торфяным залежам, переувлажненным пластичным глинам – погрешность аналитических зависимостей без предварительной эмпирической калибровки коэффициентов может возрастать до 15-20%, что обусловлено латеральной изменчивостью структуры реальных почвогрунтов.

Сравнительный анализ и систематизация теоретических подходов

Для аналитического сопоставления рассмотренных математических моделей сформирована категориальная матрица (табл. 1). Классификация выполнена по признаку декомпозиции пространственно-временных масштабов граничных условий, что позволяет разграничить области эффективного инженерного применения каждого метода.

Сопоставление данных таблицы 1 указывает на эволюцию расчетного аппарата от макроскопического усреднения параметров контакта к прецизионному моделированию локальных дискретных деформаций во времени.

Табл. 1. Ограничения и применимость аналитических моделей взаимодействия движителя с грунтом

Метод и базовая математическая модель	Масштабный фактор геометрии движителя	Характер отображения реологии и фаз деформации	Оптимизационный базис и критериальные ограничения	Область практической применимости в проектировании
Классическая модель мгновенного среза	Интегральная площадь контакта	Статический, одномоментный сдвиг по фиксированной плоскости	Линеаризация области напряжений по Кулону	Предварительные тягово-цепные расчеты общего характера
Пространственная модель предельного равновесия	Высота зацепа и полная длина опорного обвода	Статический, фиксация пространственных контуров зоны выпора	Геометрический критерий невыхода призмы выпора за контур опорной поверхности	Эскизный этап, проверка глобальных параметров для исключения закапывания машины
Метод многофазного анализа	Высота, шаг расстановки траков, угол наклона профиля	Динамический; дискретно-временной учет 4 последовательных фаз разрушения	Балансовое равенство мгновенных сил скола и выклинивания	Этап проектирования, расчет геометрии зацепления и минимизация буксования

Выводы

Проведенный анализ выявил разрыв между макроуровневыми критериями устойчивости ходовой части и микроуровневыми параметрами геометрии единичного звена. В связи с этим наиболее перспективным вектором развития теории гусеничного движителя является создание интегрированной двухуровневой методики сквозного проектирования.

Суть подхода заключается в последовательном совмещении граничных условий: глобальный безразмерный критерий Алябьева – Калинина h/L_{nod} задает верхний предел высоты грунтозацепа для исключения общей потери опорной способности машины, после чего многофазные уравнения Кулабухова используются как оптимизационный фильтр для нахождения точного шага и угла в рамках заданных габаритов. Дополнительным фактором повышения точности аналитических моделей является учет пространственной анизотропии прочностных характеристик грунта [7] и импульсного характера динамического нагружения массива катками ходовой системы.

Перспективными также считаются разработка активных грунтозацепов с изменяемой геометрией (поворотные, выдвижные) и внедрение методов машинного обучения для калибровки коэффициентов модели под конкретные типы оснований.

Заключение

В ходе анализа установлено, что классические расчетные схемы, базирующиеся на концепции монолитного плоскостного сдвига «грунтового кирпича», обладают неустраняемыми методическими ограничениями. Ввиду инвариантности принимаемой площади деформации и полного игнорирования шага расстановки траков, данные модели принципиально неприменимы для оптимизации геометрических параметров элементов гусеничного звена. Их использование допустимо лишь для поверочных тягово-цепных расчетов общего характера.

Метод области предельного равновесия Алябьева – Калинина показал его высокую физическую достоверность при решении задач макроскопического проектирования ходовых систем. Доказано, что безразмерный критерий $h/L_{nod} \leq \text{tg}\varphi$ требует жесткого отнесения геометрического параметра L_{nod} к полной продольной длине опорного обвода машины. Подмену данного параметра шагом единичного звена в инженерных расчетах можно рассматривать как грубую методологическую ошибку, приводящую к искажению контуров зоны предельного напряженного состояния грунта.

Метод многофазного анализа Кулабухова определен как наиболее адекватный математический инструмент для прецизионного обоснования локальных параметров звена. Модель успешно описывает динамическую кинематику деформирования межтракового пространства от уплотнения ядра до экструзии массы и позволяет дифференцировать режимы взаимодействия. Установлено, что заявленную сходимость метода с экспериментом на уровне 3-9% можно достигнуть исключительно на однородных песчаных и суглинистых грунтах в контролируемых лабораторных условиях при скорости в диапазоне 0,5-1,0 м/с и влажности 8-12%, тогда как на связных переувлажненных почвах погрешность может возрасти до 15-20%, требуя введения поправочных эмпирических коэффициентов.

В качестве рекомендации к практическому применению в инженерно-проектировочной деятельности можно предложить следующий алгоритм: на этапе концептуального проектирования наземной транспортно-технической машины проверку параметров макрогеометрии обвода достаточно проводить по пространственным критериям Алябьева – Калинина, но на этапе технического проектирования ходовой части оптимизацию шага и профиля грунтозацепов лучшим вариантом уже станет использование аппарата многофазной динамики Кулабухова.

Список литературы

1. Хитров Е.Г., Андронов А.В., Хахина А.М., Григорьев Г.В. Математические модели взаимодействия движителей машин с грунтами (обзор) // *Resources and Technology*. – 2020. – Т. 17, №4. – С. 15-64.
2. Ляско М.И., Зайдельман Н.И., Слажинский В.О. Влияние шага и высоты грунтозацепов на величину коэффициента сцепления гусеничного трактора // *Труды МАДИ*. – М.: МАДИ, 1976. – С. 3-12.
3. Алябьев А.Ф., Калинин С.Ю. Модель взаимодействия гусеницы трактора с грунтом // *Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник*. – 2016. – Т. 20, №2. – С. 173-178.
4. Кулабухов А.В. Совершенствование расчета силы тяги гусеничных машин на основе многофазного анализа взаимодействия грунтозацепов с грунтом // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. – 2025. – №4. – С. 401-407.
5. Берестов Е.И., Кулабухов А.В., Печковская О.Е. Исследование разрушения грунта траками гусеничных машин // *Механизация строительства*. – 2014. – №10. – С. 21-25.
6. Берестов Е.И. Сопротивление грунтов резанию // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 1997. – №10. – С. 102-107.
7. Жаков А.О., Трояновская И.П. Влияние анизотропии на взаимодействие гусеничного движителя с грунтом при повороте машины // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. – 2020. – №2. – С. 43-49.
8. Лобанов В.Н., Растягаев В.И., Сухов С.С. Повышение опорных качеств гусеничных машин спасательной техники при их работе на слабых почво-грунтах // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. – 2016. – №1. – С. 53-58.
9. Кулабухов А.В. Улучшение тягово-сцепных качеств гусеничных тягачей путем выбора геометрических параметров грунтозацепов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Могилёв, 2008. – 21 с.
10. Трояновская И.П., Жаков А.О. Модель неуправляемого сдвига на примере строительно-дорожной техники // *Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ"*. – 2021. – Т. 18, №6. – С. 678-687.
11. Кулабухов А.В., Берестов Е.И. Взаимодействие рабочего оборудования и гусеничных траков землеройных машин с грунтом: монография. – Могилёв: Белорусско-Российский университет, 2015. – 179 с.

References

1. Khitrov E.G., Andronov A.V., Khakhina A.M., Grigoriev G.V. Mathematical models of interaction of vehicle propulsors with soils (review) // *Resources and Technology*. 2020, vol. 17, no. 4, pp. 15-64.
2. Lyasko M.I., Zaydelman N.I., Slazhinsky V.O. Influence of lug pitch and height on the traction coefficient of a tracked tractor // *Proceedings of MADI*. – M.: MADI, 1976. – P. 3-12.
3. Alyabyev A.F., Kalinin S.Yu. Model of interaction of a tractor track with soil // *Bulletin of Moscow State Forest University – Forest Bulletin*. 2016, vol. 20, no. 2, pp. 173-178.
4. Kulabukhov A.V. Improving the calculation of traction force of tracked vehicles based on multiphase analysis of lug interaction with soil // *Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University*. 2025, no. 4, pp. 401-407.
5. Berestov E.I., Kulabukhov A.V., Pechkovskaya O.E. Study of soil destruction by track links of tracked vehicles // *Construction Mechanization*. 2014, no. 10, pp. 21-25.
6. Berestov E.I. Resistance of soils to cutting // *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 1997, no. 10, pp. 102-107.
7. Zhakov A.O., Troyanovskaya I.P. Influence of anisotropy on the interaction of a tracked vehicle with soil during a turn // *Tractors and Agricultural Machines*. 2020, no. 2, pp. 43-49.

8. Lobanov V.N., Rastyagaev V.I., Sukhov S.S. Improving the supporting qualities of tracked rescue vehicles when operating on weak soils // Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University. 2016, no. 1, pp. 53-58.
9. Kulabukhov A.V. Improving traction and coupling qualities of tracked tractors by choosing geometric parameters of lugs: Abstract of diss. ... cand. of tech. sc. – Mogilev, 2008. – 21 p.
10. Troyanovskaya I.P., Zhakov A.O. Model of uncontrolled displacement on the example of road construction machines // The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021, vol. 18, no. 6, pp. 678-687.
11. Kulabukhov A.V., Berestov E.I. Interaction of working equipment and track links of earthmoving machines with soil: monograph. – Mogilev: Belarusian-Russian University, 2015. – 179 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Киц Иван Викторович – аспирант	Kits Ivan Viktorovich – postgraduate student
Воронцов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор	Vorontsov Ivan Ivanovich – doctor of technical sciences, professor
smorodnikoff@inbox.ru	

Получена 11.06.2026