

УДК (UDC) 629.114.2:621.828.6

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА СИЛЫ ТЯГИ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ МНОГОФАЗНОГО АНАЛИЗА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУНТОЗАЦЕПОВ С ГРУНТОМ**IMPROVING TRACTIONAL FORCE CALCULATION FOR TRACKED VEHICLES BASED ON MULTIPHASE ANALYSIS OF LUGS-SOIL INTERACTION**Кулабухов А.В.
Kulabukhov A.V.Белорусско-Российский университет (Могилев, Республика Беларусь)
Belarusian-Russian University (Mogilev, Republic of Belarus)

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности гусеничных машин, для чего требуются усовершенствованные методы расчета их тягово-сцепных свойств. Существующие методики, основанные на модели сдвига «кирпича» грунта, обладают существенным недостатком – они не учитывают альтернативные сценарии разрушения грунта и не устанавливают явной связи между геометрией движителя, нагрузками и физическими процессами в грунте, что ограничивает их применение для оптимизации конструкций. Цель работы – разработка нового аналитического метода, позволяющего комплексно оценивать силу тяги с учетом многофазности и полиморфности процесса взаимодействия трака с грунтом. В основе метода лежит синтез положений теории предельного равновесия грунтов и механики резания. Методика предполагает пофазный анализ: от начального уплотнения и формирования первичной площадки скольжения до полного сдвига массива или выклинивания трака, с постоянной проверкой реализуемости альтернативных механизмов разрушения. В результате параметрического анализа для гусеничной машины Б14 установлено влияние шага грунтозацепов на силу тяги. Выявлены три режима взаимодействия: нерациональный ранний срез при малом шаге, двухфазное разрушение при среднем и выклинивание при большом шаге. Определен оптимальный шаг, при котором силы среза и выклинивания уравниваются, обеспечивая максимальное использование несущей способности грунта и достижение максимально возможной силы тяги. Ключевой вывод: разработанный метод формирует основу для алгоритмизированного проектирования и оптимизации геометрии гусеничного движителя, позволяя целенаправленно повышать его тяговые качества для конкретных условий эксплуатации.

Ключевые слова: гусеничный движитель, разрушение грунта, многофазное разрушение, грунтозацеп, выклинивание трака.

Abstract. The relevance of this study stems from the need to improve the efficiency of tracked vehicles, which requires improved methods for calculating their traction and grip properties. Existing methods based on the soil "brick" shear model have a significant drawback: they fail to consider alternative soil failure scenarios and do not establish an explicit relationship between the drive geometry, loads, and physical processes in the soil, limiting their use for design optimization. The objective of this study is to develop a new analytical method for comprehensively assessing traction force, taking into account the multiphase and polymorphic nature of the track-soil interaction process. The method is based on a synthesis of the principles of soil limit equilibrium theory and cutting mechanics. The methodology involves a phase-by-phase analysis: from initial compaction and formation of a primary slip plate to complete soil shear or track wedging, with continuous verification of the feasibility of alternative failure mechanisms. A parametric analysis of the B14 tracked vehicle revealed the influence of lug pitch on traction. Three interaction modes were identified: irrational early shear at a small pitch, two-phase failure at a medium pitch, and wedging at a large pitch. An optimal pitch was determined that balances shear and wedging forces, ensuring maximum utilization of the soil's bearing capacity and achieving the highest possible traction. Key conclusion: the developed method forms the basis for algorithmic design and optimization of track geometry, enabling targeted improvement of its traction performance for specific operating conditions.

Keywords: caterpillar track, soil destruction, multiphase destruction, lug pitch, track wedging.

Дата получения статьи:

Дата принятия к публикации:

Дата публикации:

21.10.2025

04.12.2025

25.12.2025

Сведения об авторе:

Кулабухов Артем Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортные и технологические машины», Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет»,
e-mail: kulabuhov1981@mail.ru.

ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7241-6041

† Date of manuscript reception:

† Date of acceptance for publication:

21.10.2025

† Date of publication:

04.12.2025

25.12.2025

† Author' information:

Artem V. Kulabukhov – PhD, Associate Professor, Associate Professor, Department of Transport and Technological Machines, Belarusian-Russian University,
e-mail: kulabuhov1981@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7241-6041>

1. Введение

Тягово-цепные свойства представляют собой одну из ключевых эксплуатационных характеристик гусеничных машин. Конструкция гусеничного трактора или тягача определяется целевыми условиями его применения: сельскохозяйственными, строительными, мелиоративными работами или эксплуатацией на переувлажненных грунтах. Широкий спектр решаемых задач обуславливает использование гусеничных тягачей в составе агрегатов с разнообразным рабочим оборудованием.

Среди всей номенклатуры спецтехники наибольшее распространение получили гусеничные бульдозеры, которые остаются базовым видом техники для производства земляных работ. Сфера их применения включает строительство (разработка котлованов, подготовка оснований под фундаменты), открытую добычу полезных ископаемых, производство строительных материалов и многие другие отрасли. Помимо бульдозеров, на гусеничной тяге работают рыхлители, трелевочные тракторы, толкачи скреперов и иные машины, общей чертой которых является необходимость создания значительных тяговых усилий.

В этой связи одной из первостепенных задач при проектировании является выбор параметров ходовой системы, гарантирующих достижение оптимальных тяговых показателей. Для тягачей, в частности, критически важно обеспечить надежное сцепление с опорной поверхностью, количественной мерой которого служит коэффициент сцепления. Следует констатировать, что отечественные образцы подобной техники по ряду

параметров, включая дефицит машин высокой мощности, уступают зарубежным аналогам.

Повышение тягового потенциала традиционно связывают с ростом массы машины, что увеличивает силу тяги по сцеплению. Однако вопрос её увеличения за счет оптимизации параметров самого гусеничного движителя остается недостаточно изученным ввиду отсутствия соответствующих теоретических расчетных методик. Создание подобных методов позволило бы оптимизировать геометрию грунтозацепов без проведения ресурсоемких натурных испытаний и обеспечить прирост тягового усилия на 10...15% без изменения массы машины, что определяет высокую актуальность данного направления исследований.

Повышение энергоэффективности и проходимости гусеничных машин напрямую связано с совершенствованием методик расчета и проектирования их движителей. Анализ существующих подходов, среди которых фундаментальные работы М.Г. Беккера [1], И.П. Ксеневича [2, 3] (рис. 1), В.А. Скотникова [4, 5] (рис. 2) и других, показывает, что доминирующей является модель сдвига условного «кирпича» грунта, заключенного между грунтозацепами.

Несмотря на свою распространенность, данная модель имеет ряд системных недостатков, ограничивающих ее практическую ценность для задач оптимизации:

1. Игнорирование полиморфности разрушения. Модель постулирует единственный механизм разрушения – срез по плоскостям, что противоречит экспериментальным данным [6, 7], свидетельствующим о возмож-



сти образования уплотненных ядер, выклинивания и других кинематик.

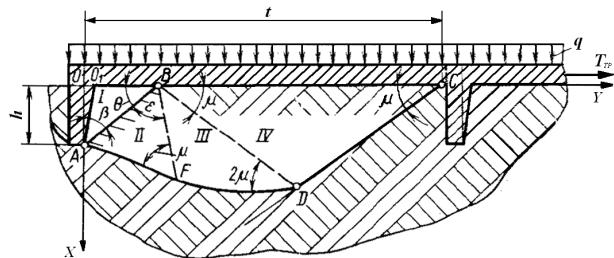


Рис. 1. Схема взаимодействия трака гусеницы с грунтом при образовании уплотненного ядра перед грунтозацепом

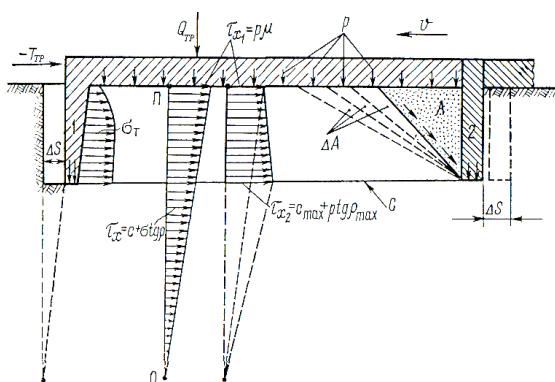


Рис. 2. Плоскостная схема нагружения грунта между двумя соседними грунтозацепами

2. Не учитывается многофазность процесса. Взаимодействие не рассматривается как развивающийся во времени процесс, включающий стадии уплотнения, формирования зон скольжения и их переформирования. Это не позволяет точно определить момент достижения предельного состояния.

3. Отсутствие явных связей. Существующие методы слабо отражают влияние конкретных комбинаций геометрических параметров грунтозацепов (высота, шаг, угол наклона передней грани) и внешних нагрузок на формирование той или иной картины разрушения и величину предельной силы тяги.

4. Не адаптивность. Большинство расчетных схем являются жесткими и не позволяют оценить, какой из возможных механизмов разрушения реализуется в первую очередь при заданном сочетании параметров.

Таким образом, актуальной является задача разработки более гибкого и комплекс-

ного расчетного метода, который бы устранил указанные ограничения. Такой метод должен не только вычислять силу тяги, но и прогнозировать доминирующий механизм взаимодействия, обеспечивая тем самым инженера-конструктора инструментом для осознанного выбора оптимальных параметров движителя.

2. Разработанный метод

Для преодоления ограничений классических подходов был разработан аналитический метод, основанный на синтезе принципов механики грунтов и теории резания. Ключевой идеей метода является рассмотрение взаимодействия трака с грунтом как многофазного процесса, на каждой стадии которого возможна реализация альтернативных сценариев разрушения.

Концептуальная основа метода:

1. Начальная стадия нагружения. Приложение к траку внешней касательной силы. Пока эта сила не превышает суммарную силу трения опорной поверхности и вершин грунтозацепов о грунт, смещение трака отсутствует. Превышение этого порога инициирует процесс активной деформации грунтового массива.

2. Фаза I. Первичное разрушение и формирование зоны предельного равновесия. Для анализа этой фазы применяется аппарат теории пассивного давления грунта, где передняя грань грунтозацепа рассматривается как подпорная стенка [8]. В результате расчета определяются: величина пассивного отпора, действующего на грань грунтозацепа, а также положение и ориентация первичной поверхности скольжения, возникающей в грунтовом массиве.

Анализ альтернативных сценариев в фазе I:

Сценарий А (Мгновенный срез). Если расчетное сопротивление срезу всего объема грунта между грунтозацепами оказывается ниже усилия, необходимого для формирования и развития первичной площадки скольжения, происходит хрупкое разрушение – мгновенный срез «кирпича» по плоскостям, проходящим через вершины зацепов.

Сценарий Б (Потеря устойчивости). Если первичная площадка скольжения (OB') при своем развитии выйдет за пределы условной верхней границы устойчивого массива (линию KA), это также приведет к срезу грунта между зацепами, так как удерживающей поверхностью в этом случае уже будет являться менее прочная поверхность (AT) (рис. 3).

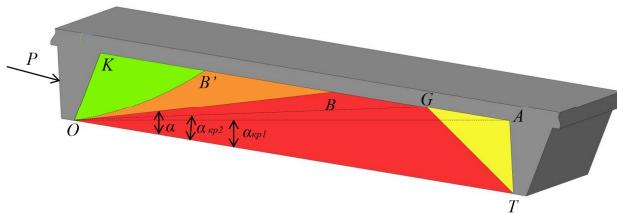


Рис. 3. Разрушение грунта между грунтозацепами

3. Фаза II. Переформирование и развитие зоны разрушения. Если в фазе I срез «кирпича» не произошел, система переходит в следующую стадию. Неустойчивая первичная площадка скольжения эволюционирует, стремясь к новому, более устойчивому положению (OB). Этот процесс сопровождается значительным спрямлением поверхности скольжения. На данной фазе осуществляется постоянный контроль по трем критическим критериям:

Критерий 1: Контроль угла наклона α формирующейся площадки скольжения относительно его критического значения α_{kp1} .

Критерий 2: Проверка прочности оставшейся нетронутой призмы грунта ($OBAT$). Срез этой призмы возможен, если выталкивающее усилие от деформируемой зоны (OKB) превысит силы сцепления и трения, удерживающие призму $OBAT$.

Критерий 3: Оценка устойчивости грунта в зоне задней грани грунтозацепа GAT . Наличие нормального давления от опорной части трака может инициировать локальное разрушение в этой области, что снижает общую устойчивость системы и повышает критический угол α_{kp2} .

Критерием достижения предельного состояния для трака является наступление одного из двух событий:

1. Исчерпание несущей способности грунта – полный срез массива между соседними грунтозацепами;

2. Выклинивание трака – подъем опорной поверхности на вытесняемой призме грунта O_1KB_1 , происходящий, когда вертикальная составляющая давления со стороны призмы превышает удерживающую силу, определяемую весом машины, приходящимся на данный трак (рис. 4).

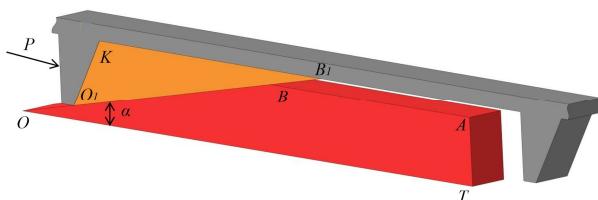


Рис. 4. Выклинивание трака из грунта

3. Результаты и их анализ

Верификация и демонстрация возможностей разработанного метода проведена на примере расчета силы тяги гусеничного бульдозера Б14. Основным варьируемым параметром был выбран шаг грунтозацепов (T), который изменялся в широком диапазоне от 0.05 м до 0.55 м. (рис. 5).

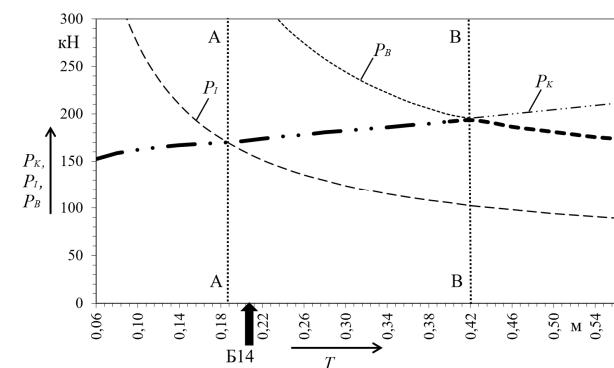


Рис. 5. Влияние шага грунтозацепов на силы, характеризующие взаимодействие рабочих поверхностей гусениц с грунтом

Результаты расчета представлены в виде зависимостей трех ключевых сил от шага T :

Кривая P_k – касательная сила, требуемая для осуществления полного среза грунтового «кирпича» между зацепами.

Кривая P_1 - условная касательная сила, соответствующая моменту возникновения первичной площадки скольжения в фазе I.

Кривая P_b - условная касательная сила, при которой происходит выклинивание трака из грунтового основания.

Анализ полученных зависимостей позволил идентифицировать три четко выраженные области, соответствующие разным качественным режимам взаимодействия:

1. Область малых шагов ($T < 0.185$ м, левее линии АА). В этой зоне кривая P_k (срез) проходит ниже кривой P_1 (первичное разрушение). Это означает, что для реализации среза всего грунта между близко расположенными зацепами требуется меньшее усилие, чем для инициирования локальной зоны скольжения. Следовательно, разрушение происходит по нерациональной схеме преждевременного среза. Объем вовлекаемого в работу грунта мал, его несущая способность используется не полностью, что приводит к заниженным значениям реализуемой силы тяги.

2. Область средних шагов ($0.185 \text{ м} < T < 0.42 \text{ м}$, между линиями АА и ВВ). В данном диапазоне процесс становится двухфазным. Сначала, при достижении усилия, соответствующего кривой P_1 , формируется первичная площадка скольжения, выходящая на поверхность грунта. Затем, в фазе II, при перформировании этой площадки происходит срез оставшейся призмы ненарушенного грунта (кривая P_k). Это свидетельствует о более глубоком и полном вовлечении грунтового массива в процесс создания тягового усилия.

3. Область больших шагов ($T > 0.42 \text{ м}$, правее линии ВВ). В этой области сила, требуемая для выклинивания трака (кривая P_b), становится лимитирующим фактором, так как ее значения оказываются ниже сил среза (кривая P_k). Предельное состояние наступает по механизму выклинивания: трак «въезжает» посредством вытесняемой призмы грунта на грунт ненарушенной структуры ОВАТ и теряет полный контакт с опорной поверхностью. При этом значительная часть грунта между зацепами остается неразрушенной, что указывает на неполную реализацию потенциала сцепления.

Определение оптимальных параметров. Анализ графиков показывает, что максимальная сила тяги, при которой происходит одновременное исчерпание несущей способности по обоим механизмам, достигается при шаге $T = 0.42$ м. В этой точке кривые P_k и P_b пересекаются, а величина силы тяги составляет $P = 195$ кН. Это означает, что при данном шаге грунтозацепов несущая способность грунтового основания используется максимально полно и равномерно по обоим возможным критериям (срез и выклинивание). Следовательно, для данных конкретных условий (тип грунта, нагрузка, геометрия зацепа) шаг 0.42 м является оптимальным.

4. Заключение

В рамках проведенного исследования разработан и апробирован новый аналитический метод расчета силы тяги гусеничных машин. Его принципиальное отличие от традиционных подходов заключается в учете многофазности процесса взаимодействия и полиморфности возможных механизмов разрушения грунта под траком. Метод не является жесткой расчетной схемой, а представляет собой алгоритм, позволяющий определить, какой из сценариев взаимодействия (мгновенный срез, двухфазное разрушение, выклинивание) будет доминировать при заданной комбинации параметров.

На примере бульдозера Б14 продемонстрирована практическая значимость метода. Установлена качественная и количественная зависимость между шагом грунтозацепов и реализуемой силой тяги, выявлены три различных стадии и определен оптимальный шаг, обеспечивающий максимальное использование несущей способности грунта.

Важно подчеркнуть, что полученные оптимальные значения носят частный характер и справедливы для конкретных условий моделирования. Однако предложенная методика обладает универсальностью и может быть применена для анализа и оптимизации гусеничных движителей других типов машин, работающих в различных грунтовых средах.

Перспективным направлением дальнейших исследований является формализация



метода в виде специализированного программного комплекса. Это позволит автоматизировать процесс поиска оптимальных геометрических параметров грунтозацепов (высоты, шага, угла наклона) и режимов на-

гружения, существенно сократив время и затраты на проектирование высокоэффективных гусеничных движителей, адаптированных к реальным условиям эксплуатации.

Список литературы

1. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность-машина. М.: Машиностроение, 1973. 520 с.
2. Скотников В.А. Исследование проходимости гусеничных болотных тракторов. Минск: Высшая школа, 1964. 19 с.
3. Ксеневич И.П., Гуськов В.В., Бочаров Н.Ф. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет:/ Под ред. И.П. Ксеневича. М.: Машиностроение, 1991. 544 с.
4. Ксеневич И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва – урожай / Под ред. И.П. Ксеневича. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
5. Скотников В.А., Пономарев А.В., Климанов А.В. Проходимость машин. Минск: Наука и техника, 1982. 328 с.
6. Ляско М.И., Кутин Л.Н., Щупак П.Л. Испытание трактора ДТ-75С м гусеницей увеличенного шага // Пути снижения удельного давления ходовых систем гусеничных сельскохозяйственных тракторов на почву. М., 1979. С. 22–31.
7. Ляско М.И. Исследование влияние некоторых конструктивных параметров на тягово-сцепные свойства гусеничного трактора с землеройным оборудованием: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. М.: МАДИ, 1971. 17 с.
8. Берестов Е.И., Партнов С.Б., Стригоцкая А.П. Сопротивление грунтов резанию // XIII. Didmattech 2000. 2001. № 2. С. 5–10.
9. Алябьев А.Ф., Калинин С.Ю. Модель взаимодействия гусеницы трактора с грунтом // Лесоинженерное дело. 2016. № 2. С. 173–178.
10. Бахтин П.У., Винокуров В.Н., Алябьев А.Ф. Технологические свойства почв: монография. М.: МГУЛ, 2014. 168 с.

References

1. Bekker M.G. *Vvedenie v teoriyu sistem mestnost-mashina* [Introduction to the Terrain-Vehicle Systems Theory]. Moscow, Mashinostroenie, 1973. 520 p. (In Russian)
2. Skotnikov V.A. *Issledovanie prokhodimosti gusenichnykh bolotnykh traktorov* [Study of the Cross-Country Capability of Swamp Crawler Tractors]. Minsk, Vysshaya shkola, 1964. 19 p. (In Russian)
3. Ksenevich I.P., Guskov V.V., Bocharov N.F. *Traktory. Proektirovanie, konstruirovaniye i raschet* [Tractors. Design, Construction and Calculation]. Ed. I.P. Ksenevich. Moscow, Mashinostroenie, 1991. 544 p. (In Russian)
4. Ksenevich I.P., Skotnikov V.A., Lyasko M.I. *Khodovaya sistema – pochva – urozhay* [Undercarriage System - Soil - Harvest]. Ed. by I.P. Ksenevich. Moscow, Agropromizdat, 1985. 304 p. (In Russian)
5. Skotnikov V.A., Ponomarev A.V., Klimanov A.V. *Prokhodimost mashin* [Vehicle Cross-Country Capability]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1982. 328 p. (In Russian)
6. Lyasko M.I., Kutin L.N., Shchupak P.L. *Ispytanie traktora DT-75S m gusenitsey uvelichenennogo shaga* [Testing of the DT-75S Tractor with an Increased Pitch Track]. In: *Puti snizheniya udelnogo davleniya khodovykh sistem gusenichnykh selskokhozyaystvennykh traktorov na pochvu* [Ways to Reduce the Specific Ground Pressure of Crawler Agricultural Tractor Undercarriages]. Moscow, 1979. pp. 22–31. (In Russian)
7. Lyasko M.I. *Issledovanie vliyanie nekotorykh konstruktivnykh parametrov na tyagovo-stsepnue svoystva gusenichnogo traktora s zemleroynym oborudovaniem* [Research on the Influence of Some Design Parameters on the Traction-Gripping Properties of a Crawler Tractor with Earthmoving Equipment]: diss. ... Cand. Sci.



- ‡ (Engineering): 05.05.03. Moscow, MADI, 1971. 17 p. (In Russian)
- ‡ 8. Berestov E.I., Partnov S.B., Strigotskaya A.P. *Soprotivlenie gruntov rezaniyu* [Soil Resistance to Cutting]. In: XIII. Didmattech 2000. 2001. No. 2. pp. 5–10. (In Russian)
- ‡ 9. Alyabev A.F., Kalinin S.Yu. *Model vzaimodeystviya gusenitsy traktora s gruntom* [Model of the Interaction of a Tractor Track with Soil]. *Lesoinzhenernoe delo* [Forest Engineering], 2016, No.2, pp. 173–178. (In Russian)
- ‡ 10. Bachtin P.U., Vinokurov V.N., Alyabev A.F. *Tekhnologicheskie svoystva pochvy* [Technological Properties of Soils]. Moscow, MGUL, 2014. 168 p. (In Russian)