

УДК 629.114.2+621.828.6  
doi:10.18720/SPBPU/2/id25-585

## О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГУСЕНИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ

Артем Владимирович Кулабухов, канд. техн. наук

*Белорусско-Российский университет*

Беларусь, 212000, Могилев, пр-т Мира, 43

E-mail: [kulabuhov1981@mail.ru](mailto:kulabuhov1981@mail.ru)

**Аннотация.** В статье исследуются особенности силового взаимодействия гусеничного движителя с грунтом. Опровергается устоявшееся мнение о безусловной пользе увеличения количества и высоты грунтозацепов для повышения тяговых характеристик. Представлена аналитическая модель, учитывающая явление перераспределения нагрузки («подпрессовки») по грунтозацепам гусеничной ленты, приводящее к тому, что на предельном режиме лишь последний грунтозацеп реализует полную несущую способность грунта. На основе разработанного двухфазного метода расчета разрушения грунта определены оптимальные соотношения геометрических параметров грунтозацепов для трактора Б14, позволяющие повысить коэффициент сцепления. Показано значительное влияние динамики нагружения на величину реализуемого коэффициента сцепления. Предложены практические рекомендации по оптимизации конструкции движителя.

**Ключевые слова:** гусеничный движитель; машины для земляных работ; сила сцепления; грунтозацепы; коэффициент сцепления; буксование; оптимизация параметров; механика грунта.

### 1. Введение

Повышение эффективности машин на гусеничном ходу напрямую связано с улучшением их тягово-сцепных качеств. Традиционный конструкторский подход заключается в увеличении количества и высоты грунтозацепов на гусеницах, что, по мнению разработчиков, должно повысить силу тяги за счет большего сопротивления грунта сдвигу. Однако сравнительный анализ показывает, что преимущество гусеничных движителей перед колесными с шинами низкого давления по коэффициенту сцепления ( $\phi$ ) не является столь значительным. Например, на рыхлом грунте коэффициент сцепления гусениц равен 0,5...0,7 против этого же коэффициента у шин равного 0,4...0,6, а на уплотненном – 0,8...1,0 против 0,5...0,7. Это указывает на неполное использование потенциала многочисленных грунтозацепов (например,

трактор Б14) и необходимость более глубокого изучения механизма их работы.

Целью данной работы является анализ процесса взаимодействия грунтозацепов с грунтом, разработка уточненной расчетной модели и обоснование рациональных геометрических параметров движителя для максимизации силы тяги по сцеплению.

## 2. Основные положения и методика исследования

Ключевой проблемой является характер распределения продольной нагрузки по грунтозацепам. Установлено, что при выходе из зацепления последнего грунтозацепа его продольная нагрузка перераспределяется на оставшиеся. В случае жесткой гусеничной ленты это приводит к необходимости дополнительной подпрессовки грунта под каждым предыдущим грунтозацепом для сохранения величины сопротивления. Для  $i$ -го грунтозацепа эта дополнительная осадка описывается зависимостью:  $\Delta i = id$ , где  $d$  – единичная подпрессовка. Это означает, что нагрузка на каждый последующий грунтозацеп выше, чем на предыдущий, а срез грунта под последним зацепом приводит к полному буксованию машины.

Для предварительного анализа принята линейная модель с треугольной эпюрой распределения усилий по грунтозацепам. На ее основе выведены формулы для оценки силы тяги по сцеплению и коэффициента сцепления, учитывающие как трение гусеницы о грунт, так и сопротивление грунта срезу. Расчеты для грунтов I-III категорий (удельное сцепление  $c = 5 \dots 60$  кПа) показывают значения  $\varphi = 0,54 \dots 0,99$ , что хорошо согласуется с экспериментальными данными и подтверждает адекватность модели.

Для более точного решения задачи оптимизации параметров был разработан метод, основанный на механике грунтов и теории резания грунта. Его особенностью является расчет угла наклона площадки скольжения, ограничивающей зону предельного состояния грунта перед грунтозацепом, расчет устойчивости призмы грунта ненарушенной структуры, расположенной между грунтозацепами, и методику расчета силовых параметров. Учтено, что процесс разрушения грунта является двухфазным:

1. Первичная фаза: образование площадки сдвига, рассчитываемой по теории давления грунта на подпорные стенки.

2. Вторая фаза: быстрое переформирование этой площадки в новое устойчивое положение, сопровождаемое «течением» грунта.

Метод позволяет оценить различные сценарии разрушения: срез призмы грунта между зацепами, разрушение у задней грани предыдущего зацепа и вытеснение трака из грунта.

### 3. Анализ результатов и рекомендации

Исследовано влияние шага ( $T$ ) и высоты ( $H$ ) грунтозацепов на силу тяги для трактора Б14 ( $H = 65$  мм,  $T = 203$  мм) на грунте III категории.

– Влияние шага: Выявлено три характерных диапазона. Наиболее рациональным является диапазон  $T \approx 0,4$  м, при котором сила для среза «кирпичика» грунта во второй фазе близка к силе вытеснения трака. Меньший шаг приводит к неблагоприятному срезу всего грунта под траком в первой фазе, а больший – к неполному использованию несущей способности грунта;

– Влияние высоты: В реальном диапазоне высот (около 65 мм) этот параметр оказывает незначительное влияние на силу тяги. Это позволяет существенно уменьшить высоту грунтозацепов для облегчения их заглубления и снижения сопротивления движению.

Установлено, что типовые параметры грунтозацепов трактора Б14 близки к оптимальным, если рассматривать только первую фазу разрушения. Однако учет второй фазы открывает пути для оптимизации. Показано, что повышение шага до  $\sim 0,4$  м при той же высоте позволяет увеличить коэффициент сцепления с 0,83 до 0,91.

Предложены два практических способа модернизации:

1. Установка грунтозацепов через один трак для увеличения эффективного шага.

2. Уменьшение высоты грунтозацепов при сохранении шага, что положительно скажется на других эксплуатационных показателях.

Отдельно исследовано влияние динамики нагружения. Показано, что при быстром («пиковом») приложении нагрузки все грунтозацепы включаются в работу одновременно, а эпюра распределения усилий становится прямоугольной. Это приводит к кратковременному значительному росту коэффициента сцепления (до 1,6–1,8 для трактора Б14), что важно учитывать при расчетах на прочность и анализе работы машин в условиях ударных нагрузок.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования демонстрируют, что потенциал повышения силы тяги гусеничных машин за счет оптимизации параметров грунтозацепов далеко не исчерпан. Разработанный метод расчета, учитывающий двухфазный характер разрушения грунта и явление перераспределения нагрузки, позволяет научно обоснованно выбирать рациональные геометрические параметры гусеничного движителя для конкретных условий эксплуатации. Установлено, что ключевым параметром является шаг грунтозацепов, в то время как их высота может быть уменьшена для улучшения общих эксплуатационных качеств машины. Полученные результаты имеют практическую значимость для конструкторских бюро, занимающихся проектированием и модернизацией гусеничной техники.

#### Список использованных источников

1. *Bekker M. G.* Off-the-Road Locomotion: Research and Development in Terramechanics. – Ann Arbor: The Univ. of Michigan Press, Mich., 1960. – 220 p.
2. *Bekker M. G.* Theory of land locomotion. Michigan University, 1955. – 268p.
3. *Gong R.N.* Soil deformations and slip relative to grouser shape and spacing / Gong R.N. and others // Journal of Terramechanics – 1978. – № 3. – Ppp. 129-144.
4. Машины для земляных работ / под ред. Д. П. Волкова. – Москва : Машиностроение, 1992. – 447 с.
5. *Алябьев А. Ф., Калинин С. Ю.* Модель взаимодействия гусеницы трактора с грунтом / А. Ф. Алябьев, С. Ю. Калинин // Лесоинженерное дело. – 2016. – № 2. – С. 173–178.
6. *Баловнев В. И.* Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин // Москва : Высшая школа, 1981. – 336 с.
7. *Берестов Е. И., Лесковец И. В., Кулабухов А. В.* Оптимизация параметров грунтозацепов гусеничных машин // Механизация строительства. – 2006. – № 10. – С. 25–28.
8. *Берестов Е. И.* Сопротивление грунтов резанию // Известия вузов. Строительство. – 1997. – № 10. – С. 102-107.
9. *Гуськов В. В.* Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов // Москва : Машиностроение, 1966. – 196 с.
10. *Забавников Н. А.* Основы теории транспортных гусеничных машин // Москва : Машиностроение, 1975. – 448 с.
11. *Алябьев А. Ф., Калинин С. Ю.* Модель взаимодействия гусеницы трактора с грунтом // Лесоинженерное дело. – 2016. – № 2. – С. 173-178.

## ABOUT THE FEATURES OF INTERACTION OF TRACKED MOVES WITH GROUND BASE

**Artem V. Kulabukhov, Ph. D.**

*Belarusian-Russian University*

Republic of Belarus, 212000, Mogilev, Mira Ave., 43

E-mail: [kulabuhov1981@mail.ru](mailto:kulabuhov1981@mail.ru)

**Abstract.** The article examines the features of the force interaction between a tracked mover and the soil. The established opinion about the absolute benefit of increasing the number and height of lugs for improving traction characteristics is refuted. An analytical model is presented that takes into account the phenomenon of load redistribution ("compression") along the lugs of the track, leading to the fact that in the limit mode only the last lug realizes the full bearing capacity of the soil. Based on the developed two-phase method for calculating soil destruction, optimal ratios of the geometric parameters of the lugs for the B14 tractor are determined, allowing to increase the adhesion coefficient. A significant influence of the loading dynamics on the value of the realized adhesion coefficient is shown. Practical recommendations for optimizing the design of the mover are proposed.

**Keywords:** tracked mover; earthmoving machines; adhesion force; lugs; adhesion coefficient; slipping; parameter optimization; soil mechanics.