

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

630.377.44

А.Ф. Алябьев, В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, А.А. Котов

ВЛИЯНИЕ ШАГА ГРУНТОЗАЦЕПОВ НА ТЯГОВЫЕ СВОЙСТВА ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Целью работы является изучение процесса образования поверхности сдвига при взаимодействии одиночного трака с почвой с учетом наличия соседнего трака. Установлено, что при нагружении трака внешней касательной силой, возникает первичная область предельного равновесия, размер которой не зависит от величины действующих на трак сил. При увеличении внешней касательной силы до величины порядка 80-85 % от предельной, в нижней части грунтозацепа образуется вторичная область предельного равновесия. С ростом внешней касательной силы она увеличивается, но не выходит на дневную поверхность почвы. Если приложенная внешняя касательная сила достигает предельных значений, а расстояние между траками больше, чем размер вторичной области предельного равновесия, сдвиг почвы происходит вдоль линии скольжения первичной области предельного равновесия. Если расстояние между траками меньше, чем размер вторичной области предельного равновесия, происходит сдвиг почвы между траками, при этом внешняя касательная сила уменьшается на 10-20 %.

Ключевые слова: трак гусеницы трактора, коэффициент сцепления трака с почвой, поверхность сдвига.

Введение

Гусеничные тракторы используются в лесном хозяйстве для вывозки древесины, обработки почвы под создание лесных культур, устройства противопожарных минерализованных полос и других операциях, где требуется значительные тяговые усилия. Одним из способов повышения тяговых свойств гусеничного трактора является совершенствование гусеничного движителя. Существует мнение, что каждому типу грунта и высоте грунтозацепов соответствует определенный шаг гусеницы, позволяющий получить максимальный коэффициент сцепления [1]. Известно большое число математических моделей взаимодействия трака гусеницы с почвой [2-4], основанных на разных подходах математического описания грунта. При взаимодействии одиночного трака с почвой формой сечения сдвигаемой почвы в продольно-вертикальной плоскости является треугольник; при наличии второго трака форма сечения сдвигаемой почвы – прямоугольник [2]. Если для одиночного трака процесс образования поверхности сдвига понятен [3-6], то при наличии второго трака процесс образования поверхности сдвига требует уточнения.

Целью работы является изучение процесса образования поверхности сдвига при взаимодействии одиночного трака с почвой с учетом наличия соседнего трака.

Экспериментальное определение влияния шага грунтозацепов на тяговые свойства трака

Целью экспериментальных исследований является получение исходных данных для построения модели процесса образования поверхности сдвига при взаимодействии одиночного трака с почвой с учетом соседних траков.

Исследования проводились с использованием оборудования, позволяющего определять предельную внешнюю касательную силу на модели трака (рис. 1). Оборудование состоит из рамы 1, грузовой платформы 2, блоков 3, тормоза 4, троса с цепью 5, модели трака с грузами 6, измерительной платформы с индикаторной головкой часового типа 7. Тормоз используется для фиксации троса 5 при установке грузов на грузовую платформу 2.

Работа проводилась в 26 квартале Хотьковского участкового лесничества Сергиево-Посадского филиала ГКУ «Мособллес». В одном месте определялись физические и прочностные характеристики почвы [5, 6]. Полученные результаты приведены в табл. 1.

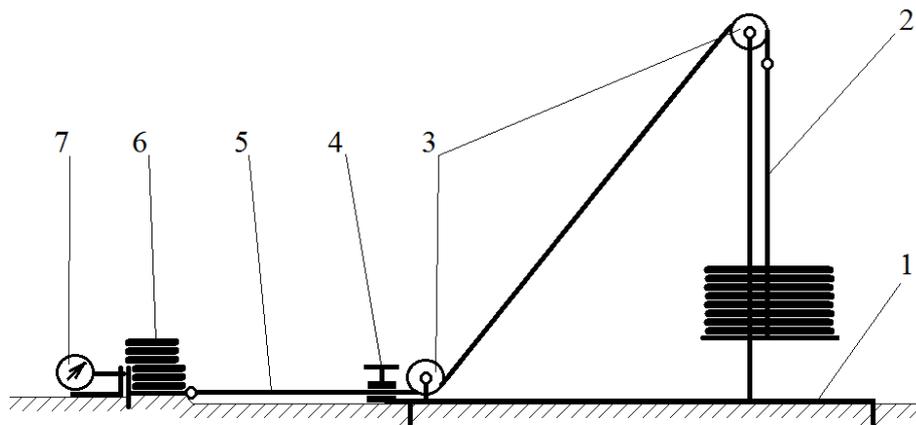


Рис. 1. Схема оборудования

Таблица 1

Физические и прочностные свойства почвы

Тип почвы	Дерново-подзолистая, суглинистая
Число пластичности	12
Плотность частиц почвы, г/см ³	2.33
Влажность почвы в слое 0 – 5 см, %	36.81
Плотность почвы, г/см ³	1.54
Плотность сухой почвы, г/см ³	1.12
Относительная влажность почвы, %	80.24
Угол внутреннего трения ρ , град/рад	21.8/0.38
Сцепление почвы C , даН/см ²	1.0
Угол трения поверхности трака о почву ω , град/рад	26.4/0.461

Влажность почвы определяется методом высушивания до постоянной массы; плотность почвы – режущим кольцом; плотность сухой почвы – расчетным методом; плотность частиц почвы – пикнометрическим методом с водой; влажность на границе текучести – пенетрацией конусом; влажность на границе раскатывания – раскатыванием в жгут; угол внутреннего трения и удельное сцепление почвы – методом одноплоскостного среза [7, 8]. Коэффициент трения трака о почву $tg\omega$ определяется протаскиванием пластины из материала трака по почве.

В месте определения свойств почвы проводились исследования физической модели трака. Размер модели: ширина $b = 30$ см; высота грунтозацепа $h = 4$ см; длина опорной поверхности $l = 21$ см. Рабочая поверхность трака обработана наждачной бумагой Р800, зернистость абразива которой соответствует размерам частиц суглинистой почвы.

Работа проводилась следующим образом. Удалялся дерн, площадка выравнивалась, вырезалась шель глубиной 4 см под грунтозацеп и на расстоянии шага грунтозацепов срезалась почва на глубину 4 см. Этим имитировалось влияние соседнего грунтозацепа. Устанавливался трак и нагружался пластинами (рис. 2). Грузовая платформа 2 (рис. 1) нагружалась грузами до срыва трака.

Регистрировались шаг грунтозацепов, вес трака с грузами, вес грузов на тяговом тросе (внешняя касательная сила на траке), перемещение трака и форма продольно-вертикального сечения сдвигаемой почвы (прямоугольная или треугольная). Полученные результаты представлены в табл. 2.



Рис. 2. Исходное положение трака

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

Шаг грунтозацепов, см	Вес трака с грузами, даН	Предельная внешняя касательная сила на траке, даН	Форма сечения сдвигаемой почвы
15	47	110	Прямоугольник
20	47	126	Середина трака – прямоугольник, края – треугольник
25	47	128	Треугольник
25	55	153	Середина трака – прямоугольник, края – треугольник

В результате наблюдений установлено, что при малом шаге грунтозацепов форма сечения сдвигаемой почвы – прямоугольник, а предельная внешняя касательная сила, необходимая для сдвига почвы, минимальна. При увеличении шага грунтозацепов предельная внешняя касательная сила на траке растет до тех пор, пока форма сечения сдвигаемой почвы не станет треугольной (рис. 3). При весе трака с грузами 47 даН наличие второго трака оказывает влияние на формирование формы сечения сдвигаемой почвы на расстоянии до 20 см,

при весе трака с грузами 55 даН – на расстоянии до 25 см. Определим механизм, за счет которого происходит формирование формы сечения сдвигаемой почвы в виде прямоугольника.



Рис. 3. Зависимость предельной внешней касательной силы на траке от шага грунтозацепов при весе трака с грузами 47даН

Построение математической модели взаимодействия одиночного трака с почвой с учетом наличия соседнего трака

При построении модели будем использовать методы статики сыпучей среды [9]. Рассматриваем плоское предельное равновесие почвы при его взаимодействии с траком гусеницы. Предельно допустимые касательные напряжения на площадке скольжения определяются по закону Кулона. Процесс заглубления грунтозацепа в почву не рассматривается; масса почвы не учитывается.

Ранее была построена математическая модель взаимодействия одиночного трака с почвой [4, 6], которая позволяет определить предельную внешнюю касательную силу на трака при форме сечения сдвигаемой почвы в виде треугольника (соседнего трака нет). При построении этой модели рассматривалась часть области предельного равновесия, которая образуется между грунтозацепом и подошвой трака. Рассмотрим полную область предельного равновесия. На плоскости характеристик развернутая область предельного равновесия изображена на рис. 4а. Так как угол между грунтозацепом и подошвой трака 90° , то области $O_2O_1E_2E_1$ вырождаются, а области $O_1B_1CE_2$ и $O_2A_1A_2E_1$ «наползают» друг на друга [4] (рис. 4б). В области предельного равновесия образуется линия разрыва среднего приведенного нормального напряжения OE . Для размеров исследуемого трака при весе с грузами 47 даН среднее приведенное нормальное напряжение в области OA_1F σ_{OAF} будет удовлетворять неравенству:

$$\sigma_{OAF} \leq \frac{H}{1 - \sin \rho},$$

где H – временное сопротивление всестороннему равномерному растяжению $H = C * \cot \rho$; ρ – угол внутреннего трения почвы; C – сцепление грунта.

Выполнение неравенства означает, что в области предельного равновесия образуется линия разрыва среднего приведенного нормального напряжения AB [9]. Области $A_1A_2B_2B_1$ вырождаются, а области OB_1A_1 и A_2B_2CE «наползают» друг на друга. Получившаяся область предельного равновесия на плоскости характеристик представлена на рис. 4в.

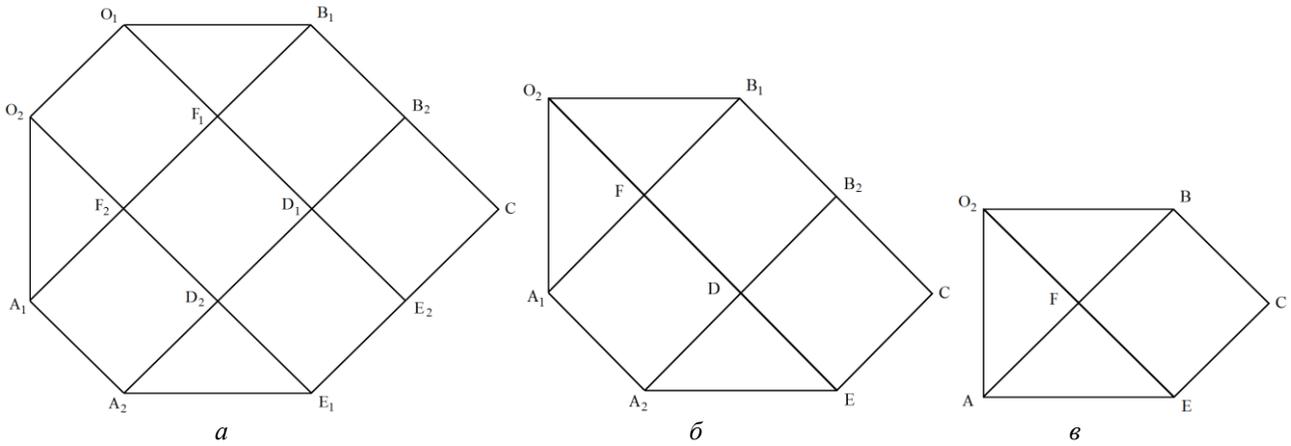


Рис. 4. Развернутая область предельного равновесия на плоскости характеристик:
 а) общий случай; б) общий случай при угле между подошвой трака и грунтозацепом 90°;
 в) при весе трака с грузами 47 даН

Граничные условия на грунтозацепе OA и подошве трака OB приведены в [4], по характеристикам AE , EC и BC граничные условия записывается в виде [9]

$$\sigma = \frac{H}{1 - \sin \rho}, \quad dy = dx \tan \varphi. \tag{1}$$

Полученная в результате расчетов область предельного равновесия представлена на рис. 5.

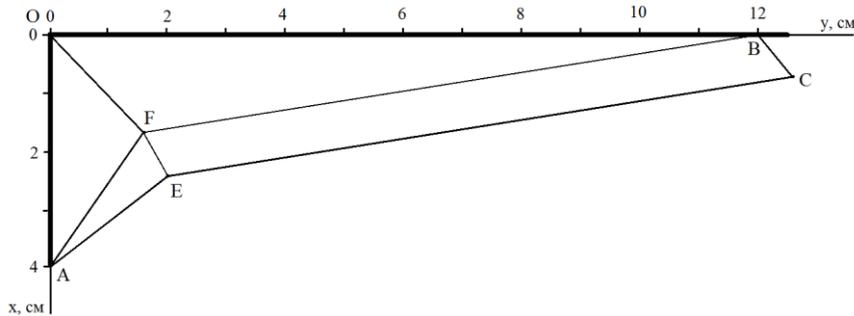


Рис. 5. Область предельного равновесия при весе трака с грузами 47 даН

На рис. 5 видно, что полученная область предельного равновесия не может быть причиной формирования формы сечения сдвигаемой почвы в виде прямоугольника. Эта область формирует форму сдвигаемой почвы в виде треугольника AOB . Это подтверждается наблюдениями (рис. 6). На рис. 6а трак с грузом до нагружения внешней касательной силой плотно лежит на почве. На рис. 6б трак с грузом в момент перед сдвигом почвы в форме прямоугольника «вывешивается» на области предельного равновесия.



а)



б)

Рис. 6. «Вывешивание» трака с грузом на области предельного равновесия

Рассмотрим следующий вариант формирования формы сечения сдвигаемой почвы в виде прямоугольника. При увеличении внешней касательной силы, действующей на трак, предельное равновесие, изображенное на рис. 5, нарушается. Вследствие того, что почва обладает упруго-вязкопластическими свойствами, разрушение происходит не мгновенно, и нагрузка, прикладываемая к траку, воспринимается линией скольжения AF . Построим образуюмую при этом вторичную область предельного равновесия.

На плоскости характеристик развернутая область предельного равновесия изображена на рис. 7а. Так как среднее приведенное нормальное напряжение в области AFJ_1 σ_{AFJ} будет удовлетворять неравенству $\sigma_{AFJ} > \frac{H}{1-\sin \rho}$, то линий разрыва не будет. Граничные условия по характеристикам AJ_5M и FJ_3M записывается в виде (1). Полученная в результате расчетов область предельного равновесия представлена на рис. 7б.

Из рис. 7 видно, что полученная область предельного равновесия не может быть причиной формирования формы сечения сдвигаемой почвы в виде прямоугольника. Определим размер площадки, воздействуя на которую образуется область предельного равновесия, обеспечивающая формирование формы сечения сдвигаемой почвы в виде прямоугольника. Будем уменьшать размер площадки на линии скольжения AF , оставляя точку A неподвижной. На плоскости характеристик область предельного равновесия не изменится (рис. 7а), граничные условия по характеристикам AJ_5M и FJ_3M останутся прежними (1). В результате расчетов установлено, что размер площадки на линии скольжения AF должен составлять 1,65 см. Область предельного равновесия приведена на рис. 8.

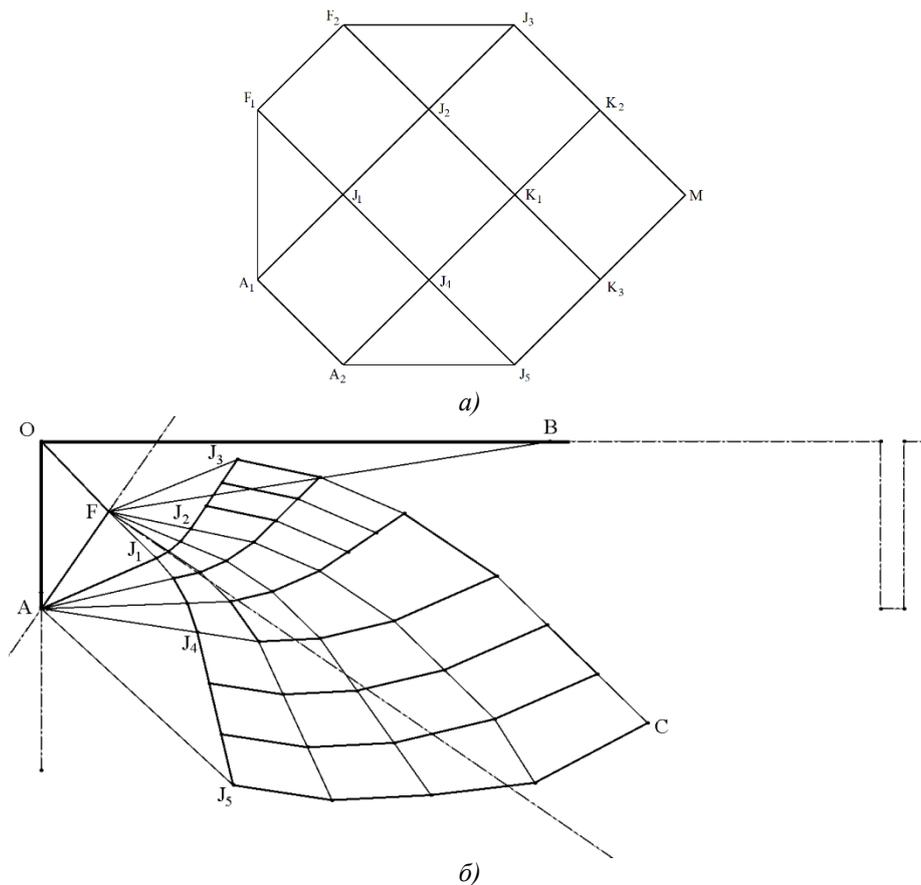


Рис. 7. Вторичная область предельного равновесия:
 а) на плоскости характеристик; б) в плоскости трака

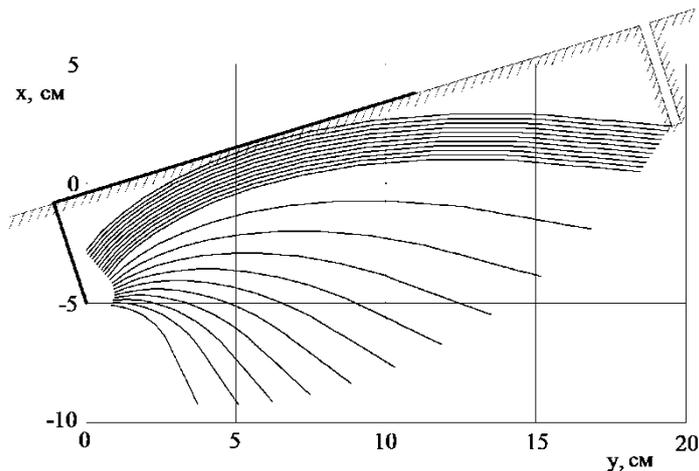


Рис. 8. Вторичная область предельного равновесия, соответствующая форме сечения сдвигаемой почвы в виде прямоугольника

Аналогичные расчеты были произведены при весе трака с грузом 55 даН. В результате было установлено, что размер площадки на линии скольжения AF должен также составлять 1,65 см.

Таким образом, получается следующая модель образования поверхности сдвига при взаимодействии одиночного трака с почвой с учетом соседних траков. В результате прикладывания к траку внешней касательной силы возникает первичная область предельного равновесия $OAFB$ (рис. 5), размер которой не зависит от величины действующих на трак сил [4]. При увеличении внешней касательной силы до величины порядка 80-85 % от предельной для одиночного трака в нижней части грунтозацепа образуется вторичная область предельного равновесия. При увеличении горизонтальной нагрузки она увеличивается, но не выходит на дневную поверхность почвы. Если приложенная внешняя касательная сила достигает предельных значений, а расстояние между траками больше, чем размер вторичной области предельного равновесия, то сдвиг почвы происходит вдоль линии скольжения AB (рис. 5). Если расстояние между траками меньше, чем размер вторичной области предельного равновесия, происходит сдвиг почвы между траками; при этом форма сечения сдвигаемой почвы имеет вид прямоугольника.

Заключение

В результате наблюдений установлено, что при малом шаге грунтозацепов форма сечения сдвигаемой почвы – прямоугольник, а предельная внешняя касательная сила минимальна. При увеличении шага грунтозацепов предельная внешняя касательная сила на траке растет до тех пор, пока форма сечения сдвигаемой почвы не станет треугольной. Значение предельной внешней касательной силы при минимальном шаге составляет 85 % от максимального значения.

В результате прикладывания к траку внешней касательной силы возникает первичная область предельного равновесия, которая «вывешивает» трак с грузом и формирует форму сечения сдвигаемой почвы в виде треугольника. Значение предельной внешней касательной силы максимально.

При увеличении внешней касательной силы до величины порядка 80-85 % от максимальной, в нижней части грунтозацепа образуется вторичная область предельного равновесия. При увеличении внешней касательной силы она увеличивается, но не выходит на дневную поверхность почвы.

Если расстояние между траками меньше, чем размер вторичной области предельного равновесия, то происходит сдвиг почвы между траками, при этом форма сечения сдвигаемой почвы имеет вид прямоугольника.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания проект № 9.8996.2017/8.9.

Библиографический список

1. **Ляско, М.И.** Влияние шага и высоты грунтозацепов на величину коэффициента сцепления гусеничного трактора / М.И. Ляско, Н.И. Зайдельман, В.О. Слажинский // Труды МАДИ. – 1976. – Вып. 114. – С. 115-119.
2. **Антонов, А.С.** Теория гусеничного движителя. – М.: Машгиз, 1949. – 214 с.
3. **Берестов Е.И.** Исследование разрушения грунта траками гусеничных машин / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов, О.Е. Печковская // Механизация строительства. – 2014. – № 10. – С. 21-25.
4. **Алябьев, А.Ф.** Модель взаимодействия гусеницы трактора с грунтом / А.Ф. Алябьев, С.Ю. Калинин // Лесной вестник. – 2016. – № 2. – С. 173-177.
5. **Берестов, Е.И.** Об особенностях работы гусеничных движителей землеройно-транспортных машин / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов, И.В. Лесковец // Механизация строительства. – 2009. – № 10. – С. 15-18.
6. **Алябьев А.Ф.** Изменение тяговых свойств гусеничного движителя при замерзании-оттаивании почвы / А.Ф. Алябьев, А.А. Котов // Техника и оборудование для села. – 2018. – № 4. – С. 15-18.
7. ГОСТ 5180-84 Межгосударственный стандарт. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введ. 2016-04-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 20 с.
8. ГОСТ 12248-2010 Межгосударственный стандарт. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Введ. 2012-01-01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 76 с.
9. **Соколовский, В.В.** Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М.: Наука, 1990. – 272 с.

Дата поступления
в редакцию: 06.02.2019

A.F. Alyabiev, V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin, A.A. Kotov

THE INFLUENCE OF THE STEP OF THE CLEATS ON TRACTION CATERPILLAR TRACKS

Bauman Moscow state technical university

Purpose: the study of the formation of the shear surface in the interaction of a single track with the soil, taking into account the presence of a neighboring track.

Design/methodology/approach: the study of physical models on the ground and the construction of a mathematical model based on the results of experimental studies.

Findings: it is established that the primary and secondary regions of the limit equilibrium arise when the track is loaded with an external tangent force, the conditions for the formation of the shear surface along the slip lines of the primary and secondary regions of the limit equilibrium are determined.

Research limitations/implications: the carried out researches allow to apply the developed model for design and calculation of traction properties of the caterpillar engine.

Originality/value: for the first time studies of the formation of the shear surface in the interaction of a single track with the soil, taking into account the presence of a neighboring track.

Key words: caterpillar track, the coefficient of adhesion of the track with the soil, the surface shear.