

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**  
**MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS**

УДК 629.114.2:621.828.6  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-181-191>

Поступила в редакцию 18.01.2018  
Received 18.01.2018

**Е. И. Берестов, А. В. Кулабухов**

*Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь*

**НАГРУЖЕНИЕ ГРУНТА ТРАКАМИ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН:  
ОБЗОР РАСЧЕТНЫХ СХЕМ**

**Аннотация.** Приведены результаты исследований в области существующих схем нагружения грунта траками гусеничных машин и их влияния на реализуемую гусеничным движителем силу тяги по сцеплению. Проведенный обзор показывает, что большинство исследователей подчеркивают немаловажную роль грунтозацепов в создании тягового усилия. Однако большая часть существующих методов расчета силы тяги по сцеплению базируется на определенной расчетной схеме, не зависящей от нагрузок, действующих на траки, от сочетания параметров грунтозацепов и от физико-механических свойств грунта. Использование этих методов не позволяет рассмотреть последовательность и альтернативные варианты разрушения грунта, а также установить взаимосвязь величины касательной силы, действующей на трак, с широким спектром сочетаний геометрических параметров грунтозацепов и связать ее с физическими процессами, протекающими в грунте. Следовательно, эти методы не в полной мере описывают взаимодействие грунтозацепов гусеничного движителя с грунтом, что затрудняет их использование для оптимизации геометрических параметров грунтозацепов. Авторами предложен аналитический метод анализа взаимодействия грунта с траком гусеничного движителя, основанный на закономерностях теории предельного состояния грунтовых масс и основных положений, используемых в теории резания грунта, учитывающий выявленные особенности этого взаимодействия. Данный метод позволяет проводить исследование взаимодействия траков гусеничного движителя с грунтом с учетом многофазности и альтернативных вариантов разрушения грунта, находящегося между грунтозацепами, а также выбирать параметры грунтозацепов, которые обеспечивают улучшение тягово-цепных качеств гусеничных тягачей.

**Ключевые слова:** гусеничный движитель, трак, геометрические параметры грунтозацепов, грунт, сила тяги по сцеплению, схема нагружения грунта

**Для цитирования.** Берестов, Е. И. Нагружение грунта траками гусеничных машин: обзор расчетных схем / Е. И. Берестов, А. В. Кулабухов // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – Т. 63, № 2. – С. 181–191. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-181-191>

**E. I. Berestov, A. V. Kulabukhov**

*Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus*

**GROUND LOADING BY TRACKS OF TRACK MACHINES: REVIEW OF DESIGN SCHEMES**

**Abstract.** The results of investigations in the field of existing soil loading schemes by tracks of tracked vehicles and their effect on the traction force realized by a caterpillar propulsion device are presented. The review shows that most researchers emphasize the important role of lugs in the creation of tractive effort. However, most of the existing methods of calculating the traction force on the clutch are based on one or another specific design scheme that does not depend on the loads acting on the tracks, on the combination of the parameters of the grousers and on the physical and mechanical properties of the soil. The use of these methods does not allow us to consider the sequence and alternative variants of soil disruption, and also to establish a relationship between the magnitude of the tangential force acting on the tract with a wide range of combinations of geometric parameters of the grousers, and to link it to the physical processes taking place in the soil. Consequently, these methods do not fully describe the interaction of the crawler tracks with the ground, which makes it difficult to use them to optimize the geometric parameters of the lugs. The authors proposed an analytical method for analyzing the interaction of soil with a track of a caterpillar engine based on the regularities of the theory of the limiting state of ground masses and the main provi-

sions used in the theory of cutting soil, taking into account the revealed features of this interaction, which makes it possible to investigate the interaction of tracks of a caterpillar propulsion with soil, taking into account the multiphase and alternative options for the destruction of soil between the grousers. This method allows you to choose the parameters of the lugs, providing an improvement in traction and coupling properties of crawler tractors.

**Keywords:** caterpillar propulsion, traction, geometric parameters of soil lugs, ground, traction force on the clutch, ground loading scheme

**For citation.** Berestov E. I., Kulabukhov A. V. Ground loading by tracks of track machines: review of design schemes. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 181–191 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-181-191>

**Введение.** Многие известные методы расчета силы тяги гусеничных машин, хотя и учитывают большинство параметров, характеризующих взаимодействие движителя с грунтом, однако основываются, как правило, на одной расчетной схеме – срезе «кирпича» грунта, находящегося между грунтозацепами. Такие методы не рассматривают альтернативных вариантов разрушения грунта под траком, а также не позволяют установить взаимосвязь между величиной силы, действующей на трак, геометрическими параметрами грунтозацепов и физическими процессами, протекающими в грунте.

**Исследования процесса сдвига грунта гусеничным траком.** Как известно, сопротивление грунта разрушению движителем определяется процессами, происходящими в грунте. Поэтому некоторые исследователи [1–5] уделяли этому вопросу особое внимание.

Большой вклад в развитие гусеничных движителей внес Ф. А. Опейко [3, 4], который создал научную школу этого направления. Представители этой школы В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов отмечают, что под гусеницами, траки которых имеют грунтозацепы, происходит резание грунта в специфических условиях [5]. Эта специфика обусловлена четырьмя причинами: наличием нормальной пригрузки грунта силой  $Q_{TP}$  со стороны трака; замкнутым объемом грунта ( $V = htb$ , где  $h$ ,  $t$ ,  $b$  – соответственно высота, длина и ширина объема грунта, находящегося под траком), сдвигаемого силой  $T_{TP} = P/z$  ( $P$  – касательная сила тяги,  $z$  – количество грунтозацепов в пятне контакта) в сторону так называемой открытой стенки; предварительным разрушением части грунтового объема при внедрении грунтозацепа; непостоянством нормального давления на грунт.

Нормальная нагрузка со стороны трака не позволяет грунту выпирать вверх при сдвиге-резании его грунтозацепом, как это происходит при резании грунта плоскими профилями. Существование замкнутого объема с «открытой стенкой», в сторону которой происходит сдвиг, ограничивает сопротивление грунта. Внедрение грунтозацепа в замкнутый объем грунта разрушает часть этого объема и делает распределение нормальных давлений между вершиной грунтозацепа и опорной частью трака неопределенным.

В этой же работе отмечается, что при наличии грунтозацепов сила тяги связана с сопротив-

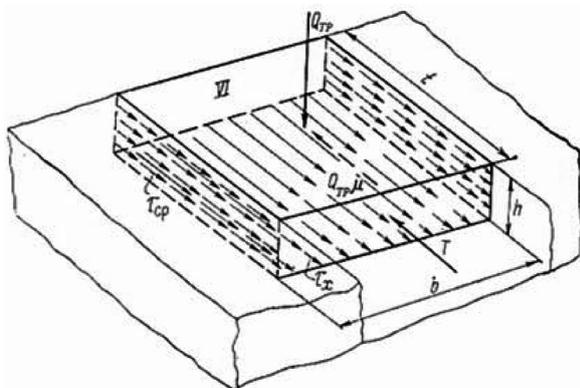


Рис. 1. Схема нагружения грунтового «кирпича»

Fig. 1. Diagram of loading of a soil “brick”

лением грунта срезом по трем поверхностям шестигранного «кирпича»: по нижней поверхности на глубине, равной высоте погружения грунтозацепа, где действуют напряжения  $\tau_x$ , и по двум боковым поверхностям грунтозацепа, где действуют напряжения  $\tau_{cp}$ . Верхняя (четвертая) поверхность, как и в случае, когда нет грунтозацепа, нагружена силами  $(1-n)Q_{TP}$  и  $(1-n)\mu Q_{TP}$ , где  $\mu$  – коэффициент трения сцепления материала движителя с грунтом;  $n$  – часть нагрузки  $Q_{TP} = btp_{cp}$ , передаваемая на вершины грунтозацепа;  $p_{cp}$  – среднее давление. На торцевую (пятую) поверхность действует сила  $T$  со стороны грунтозацепа. Шестая же поверхность (напротив пятой) ничем не нагружена (рис. 1).

Исходя из равновесия сил, действующих на грунт, расположенный между соседними грунтозацепами, уравнение, определяющее силу, которая действует на грунтовый «кирпич» со стороны передней грани грунтозацепа, имеет вид

$$T = bt \left[ c + p_{cp} (\operatorname{tg} \rho - \mu) + 2 \left( c + \varepsilon p_{cp} \operatorname{tg} \rho \frac{h}{b} \right) \right],$$

где  $\rho$  – угол внутреннего трения грунта,  $\varepsilon$  – коэффициент, численное значение которого зависит от закона распределения продольных реакций грунта по грунтозацепам гусеничной цепи.

В [5] также рассматривается механизм образования касательной силы тяги одного гусеничного трака следующим образом. Грунт между соседними грунтозацепами и ниже находится в сложном напряженном состоянии под действием сил  $T_{TP}$  и  $Q_{TP}$ . От силы  $Q_{TP}$  весь грунт между грунтозацепами 1 и 2 (рис. 2) нагружается нормальным давлением  $p$ , которое вызывает во всех его слоях от точки  $O$  до точки  $П$  напряжения сжатия  $\sigma$ . На силу  $T_{TP}$  грунт реагирует касательными реакциями  $\tau_x = c + \sigma \operatorname{tg} \rho$ , распределенными по глубине сжимаемого слоя от точки  $O$  до точки  $П$  по закону треугольника. Примерно по такому же закону грунт деформируется в горизонтальном направлении. Кроме этих двух полей напряжений ( $\sigma$  и  $\tau_x$ ) при скольжении  $\Delta S$  грунтозацепа, возникают локальные напряженные зоны, где действуют и другие напряжения.

В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов предполагают существование трех локальных зон между двумя грунтозацепами при буксовании  $\delta \ll 100\%$ , которые показаны на рис. 2.

Первая зона – это зона (за зацепом 1) сжатия-уплотнения грунта грунтозацепом в горизонтальном направлении. В [6–8] принимается, что до начала сдвига-среза грунтового «кирпича» происходит его компрессионное сжатие в горизонтальном направлении силой  $T = \sigma hb$ , где  $\sigma$  – напряжение сжатия грунта.

Вторая зона – это основная зона между грунтозацепами. Здесь действуют не только напряжение  $\sigma$ , вызванное нормальным давлением  $p$ , но и касательное напряжение  $\tau_x$ , обусловленное трением о грунт материала движителя между грунтозацепами. Влияние напряжения  $\sigma$  в этой зоне невелико, если  $S < S_0$ .

Третья зона – это зона  $A$  и  $\Delta A$  у заднего грунтозацепа 2. При любом скольжении  $\Delta S$  этот грунтозацеп отодвигается от объема  $A$  грунта, сжатого давлением  $p$  и нагруженного трением  $\tau_x = \mu p$ . Под действием  $p$  и  $\tau_x$  в грунте у грунтозацепа 2 образуется поверхность обрушения в объеме, равном  $A$ .

Таким образом, при скольжении грунтозацепов (см. рис. 2) в передней части происходит уплотнение грунта, а в задней части (у грунтозацепа 2) – разрушение, сопровождающееся увеличением его пористости. Авторы также предполагают, что это явно должно вызвать дополнительное погружение обоих грунтозацепов в грунт.

При скольжении  $S = S_0$  реакция  $T$  достигает значения, при котором по плоскости сдвига грунтового «кирпича» образуется касательное напряжение, равное пределу прочности грунта  $\tau_x = c + (p + \Delta p) \operatorname{tg} \rho + 2\tau_c$ , где  $\Delta p$  – давление от веса грунта на глубине  $h$ . При  $S = S_0$  начинается сдвиг всего «кирпича» по поверхности  $c$  и по боковым поверхностям из-за нарушения сцепления-связности. При дальнейшем скольжении грунтозацепа все связи сцепления грунтовых частиц (молекулярные, капиллярные, адсорбционные и др.) по поверхности  $c$  от грунтозацепа 1 до грунтозацепа 2 разруша-

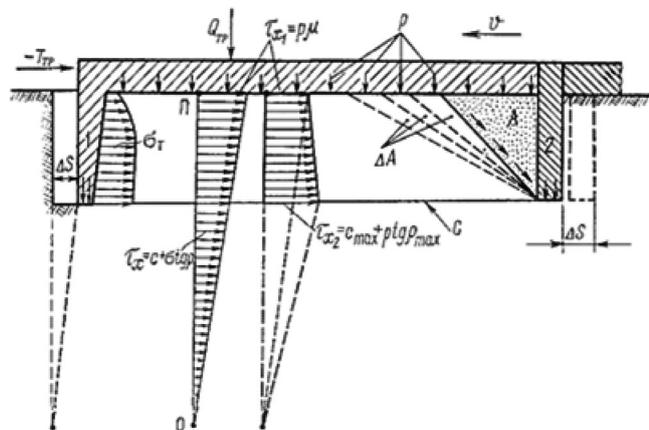


Рис. 2. Плоскостная схема нагружения грунта между двумя соседними грунтозацепами

Fig. 2. Planar scheme of loading of soil between two adjacent lugs

ются, и сдвигающая сила  $T$  падает до значения, соответствующего продолжающему действовать внутреннему трению в грунте:

$$T = (p + \Delta p) \operatorname{tg} \rho b t + \tau h t.$$

По мнению М. Г. Беккера [9], А. В. Васильева, Е. Н. Докучаевой, О. Л. Уткина-Любовцова [10], грунтозацепы могут вызвать упорную реакцию грунта по площади  $bh$  благодаря созданию сопротивления на шестой грани «кирпича» грунта. Для этого авторы предлагают увеличить шаг грунтозацепов до значения, при котором не сказывается влияние «открытой стенки», то есть ближнего расположения соседнего грунтозацепа.

Аналогичную расстановку грунтозацепов В. А. Скотников и др. [2, 5] считают целесообразным применять на болотоходных машинах с широкими резинометаллическими лентами. Авторы также подчеркивают, что гусеница Беккера с разнесенными грунтозацепами между ними содержит грунт, не нагруженный силой  $Q_{TP}$  на длине  $l_{откр}$ . Вследствие этого грунт в объеме  $l_{откр}hb$  перед каждым грунтозацепом может сопротивляться сжатию-срезанию в горизонтальном направлении (рис. 3), нагружать шестую поверхность грунтового «кирпича». В замкнутом объеме  $V$  обычных сплошных гусениц грунт лишен такой возможности, поэтому шестая поверхность не нагружена так, как это изображено на рис. 1.

Сопротивление сжатию-сдвигу грунта на шестой поверхности грунтового «кирпича» при разнесенных грунтозацепах В. А. Скотников предлагает определять по формуле В. П. Горячкина [11] – как сопротивление резанию плоским профилем высотой  $h$  и шириной  $b$  (с учетом расположения открытой стенки на длине  $l_{откр}$ ). Тогда на площадке грунтозацепа возникает дополнительная упорная реакция  $\Delta T = k_1 b h$ , где  $k_1$  – удельное сопротивление грунта разрушению. Или, по формуле А. Н. Зеленина [12],  $\Delta T = ch(1 + 0,1b)k$ , тогда

$$P = \iint_{F_{он}} \tau_x dF + \sum_1^n \tau_{cp} dF_1 + \sum_1^n \Delta T.$$

Для определения касательной силы тяги предлагается множество формул [9, 13–23 и др.], в которых учитываются физико-механические свойства грунта и параметры движителей. Большинство этих уравнений основано на том, что срез грунта при взаимодействии с ним гусеничных движителей происходит по плоскости вершин грунтозацепов.

В [5] указано на то, что на связных грунтах при предельных величинах сцепления отделяемый грунтозацепом объем грунта представляет собой трехгранную призму. Основная и боковые поверхности скалывания этой призмы расположены под углом, близком к  $45^\circ$ . Однако указанное явление действительно для малых углов постановки передней грани грунтозацепов и грунтов невысокой влажности.

В общем виде для переувлажненной минеральной почвы авторы [5] предлагают определять касательную силу тяги, реализуемую тракком гусеницы, по формуле

$$P_i = \sqrt{\frac{S}{S_2}} [c(F_1 + 2F_2) + \sigma_{y4} \varepsilon 2F_2 \operatorname{tg} \varphi + \sigma_{y4} F_1 \operatorname{tg} \varphi + \sigma_{y4} F_3 \mu_0] + T,$$

где  $S$  – перемещение трака в пределах  $0 \leq S \leq S_2$ ,  $c$  – связность грунта,  $F_1, F_2$  – площади основания и бокового сдвига,  $\sigma_{y4} = a_4 x^2$ ,  $a_4$  – погонный объемный вес,  $\varepsilon$  – коэффициент бокового расширения грунта,  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта,  $\mu_0$  – коэффициент трения стали о грунт,  $T$  – упорная реакция грунтозацепа.

Они считают, что касательная сила тяги распределена между грунтозацепами равномерно, суммарное ее значение для гусеничного трактора равно

$$P = \sum_{i=1}^n P_i,$$

где  $n$  – число грунтозацепов.

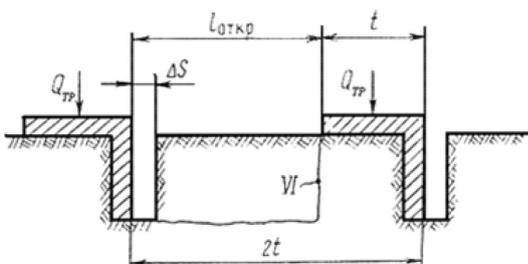


Рис. 3. Схема гусеницы с разнесенными грунтозацепами

Fig. 3. Scheme of a caterpillar with loose lugs

Предложенные в [5] схемы разрушения грунта хотя и более полно характеризуют процессы, протекающие в грунте при его разрушении траком, однако не учитывают другие возможные варианты разрушения грунта и никак не связывают схему разрушения с параметрами грунтозацепов и нагрузками, действующими на грунт, что ограничивает использование этих схем для определения силы тяги по сцеплению.

Процесс сдвига гусеничного трака И. П. Ксеневиц, В. А. Скотников и М. И. Ляско [1, 20] объясняют следующим образом. Объем грунта под траком находится в состоянии пространственного (трехосного) сжатия. В процессе этого сжатия при некотором соотношении главных напряжений происходит разрушение объема грунта как следствие сдвигов внутри него, когда по поверхности разрушения возникают касательные напряжения, превышающие сопротивления грунтового «кирпича» сдвигу. Условие прочности грунтового «кирпича» представляет собой условие предельного равновесия при сдвиге. Предельное напряжение сдвига определяет максимальный коэффициент сцепления и силу сцепления трака гусеницы с грунтом. Авторами принято допущение о плоской поверхности сдвига грунтового «кирпича» под траком, вследствие чего предельное касательное напряжение для плоской поверхности сдвига вычисляется по закону Кулона. Однако, основываясь на экспериментальных данных [10], они утверждают, что поверхность сдвига грунтового «кирпича» под траком не плоская. Также авторы отмечают, что необходимо учитывать образование уплотненного ядра перед грунтозацепом.

Анализ процесса взаимодействия трака с грунтом, выполненный М. И. Ляско [24, 25] и А. Б. Денисовым [26], а также исследования взаимодействия трака решетчатой гусеницы с грунтом, проведенные М. Г. Беккером [27, 28], показали, что в зоне перед грунтозацепом в момент сдвига формируется уплотненное ядро, которое оказывает существенное влияние на протекание процесса сдвига и формирование площадок скольжения.

Данные [26, 30] показывают, что уплотненные ядра начинают формироваться уже при упругой деформации грунта и полностью сформировываются к моменту его разрушения (предельного равновесия). В зоне уплотненного ядра перемещения частиц грунта весьма незначительны по сравнению с перемещением ядра вместе с деформатором, то есть уплотненное ядро начинает исполнять роль деформирующего элемента, существенно изменяя и форму деформатора.

В работе [31] рассматривался трак с прямым углом между передней гранью грунтозацепа и основанием трака. С использованием методов статики сыпучей среды в [32] установлено, что если область предельного равновесия выходит за габариты подошвы трака, то трактор будет буксовать при любом тяговом усилии, при котором возникает область предельного равновесия. Если область предельного равновесия не выходит за габариты подошвы трака, то трактор будет буксовать при превышении нормальной составляющей нагрузки, которая уравнивает тяговое усилие трактора, веса трактора, приходящегося на основание трака (то есть будет происходить выклинивание области предельного равновесия).

В соответствии с данными проведенных экспериментальных исследований и с учетом теории В. В. Соколовского [32] о форме тела и поверхности скольжения при взаимодействии крутых подпорных стенок с грунтом картину расположения площадок скольжения и форму тела скольжения грунта под траком гусеницы в момент предельного равновесия И. П. Ксеневиц и др. [1] представляют в следующем виде (рис. 4). Одна сторона уплотненного ядра  $AO_1B$  прилегает к передней грани грунтозацепа, а другая – к опорной поверхности трака. Наибольшая сторона играет роль упорной поверхности грунтозацепа. Форма и размеры уплотненного ядра обусловлены физико-механическими свойствами грунта и высотой грунтозацепа, а угол наклона  $\beta$  упорной поверхности  $AB$  ядра к вертикали не зависит

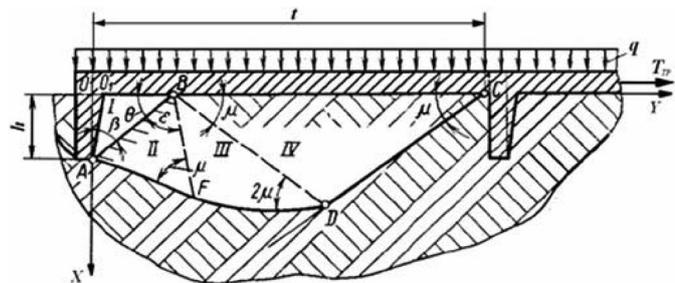


Рис. 4. Схема взаимодействия трака гусеницы с грунтом при образовании уплотненного ядра перед грунтозацепом

Fig. 4. Scheme of the interaction of the track of a caterpillar with soil when a compacted core is formed before the lug

от угла наклона упорной грани грунтозацепа в исследуемом диапазоне от 0 до  $15^\circ$  и значениях давления 32–65 кПа.

Тело скольжения авторы разделяют на четыре зоны: I – уплотненное ядро, имеющее форму треугольника  $AO_1B$  с углами  $\theta$  и  $\beta$ , прилегающими к грани  $AB$ , которая взаимодействует с грунтом зоны II и исполняет роль упорной поверхности грунтозацепа при сдвиге; зона II – треугольник  $ABF$ , прилегающий к уплотненному ядру (площадки скольжения в этой зоне направлены параллельно стороне  $AF$ , при этом  $\mu = \pi/4 - \delta/2$ , а  $\varepsilon = \pi/2 - \mu - \rho/2$ ); зона III – фигура  $FBD$  (линии скольжения направлены вдоль криволинейного отрезка  $FD$  – отрезка логарифмической спирали); зона IV – линии скольжения направлены параллельно стороне  $CD$  треугольника  $BDC$  под углом  $\mu = \pi/4 - \delta/2$  к горизонтальной поверхности грунта.

К сожалению, эта схема не рассматривает другие возможные варианты разрушения и не учитывает наиболее опасный случай нагружения, при котором устойчивость грунта между грунтозацепами будет минимальной, а также не связывает дальнейшее разрушение грунта с последующим увеличением внешней касательной силы, приложенной к тракту. Этот случай возникает после образования площадки скольжения  $AB$  (первая фаза) и сопровождается второй фазой, при которой последовательно разрушаются слои грунта, примыкающие к площадке  $AB$  до формирования ее устойчивого положения.

Проведенный обзор показывает, что большинство исследователей подчеркивают немаловажную роль грунтозацепов в создании тягового усилия. Однако большая часть существующих методов расчета силы тяги по сцеплению базируется на той или иной определенной расчетной схеме, не зависящей от нагрузок, действующих на траки, от сочетания параметров грунтозацепов и от физико-механических свойств грунта. Использование этих методов не позволяет рассмотреть последовательность и альтернативные варианты разрушения грунта, а также установить взаимосвязь между величиной касательной силы, действующей на трак, с широким спектром сочетаний геометрических параметров грунтозацепов и связать ее с физическими процессами, протекающими в грунте. Следовательно, эти методы не в полной мере описывают взаимодействие грунтозацепов гусеничного движителя с грунтом, что затрудняет их использование для оптимизации геометрических параметров грунтозацепов.

**Теоретическое обоснование взаимодействия грунтозацепа гусеничного движителя с грунтом.** Нами предложен новый аналитический метод анализа взаимодействия грунта с трактом гусеничного движителя [39], основанный на закономерностях теории предельного состояния грунтовых масс и основных положений, которые используются в теории резания грунта. Данный метод учитывает выявленные особенности этого взаимодействия и позволяет проводить исследование взаимодействия траков гусеничного движителя с грунтом с учетом многофазности и альтернативных вариантов разрушения грунта, находящегося между грунтозацепами. Разработанный метод позволяет выбирать параметры грунтозацепов, обеспечивающие улучшение тягово-сцепных качеств гусеничных тягачей.

Поскольку линейный закон распределения продольных реакций грунта по передним граням грунтозацепов, расположенных на одной гусенице, является наиболее распространенным, он получил наибольшее применение. Использование иного закона не изменит сути расчетов взаимодействия траков с грунтом, и он может быть учтен на их заключительной стадии.

Суть метода сводится к следующему. При увеличении внешней силы до величины силы трения опорной части трака и вершины грунтозацепа о грунт смещения траков не происходит. При превышении этой величины начнется смещение трака, и дополнительное воздействие на грунтозацеп начнет оказывать сила, возникающая вследствие деформации грунта.

Для расчета силы, действующей на переднюю грань грунтозацепа, можно использовать современные представления о разрушении грунта [33]двигающимся на него элементом. Такое разрушение состоит, по крайней мере, из двух фаз: первичного разрушения давлением со стороны внедряемого в грунт элемента, при этом формируется начальная неустойчивая площадка скольжения, которая из-за изменения давления переформируется до устойчивого в данных условиях положения при дальнейшем перемещении элемента (последующая фаза разрушения).

Для расчета начальной фазы разрушения можно использовать положения теории пассивного давления грунта на подпорные стенки [34–36]. В этом случае подпорной стенкой будет являться

передняя грань грунтозацепа. Суть расчетов сводится к определению давления, действующего со стороны передней грани грунтозацепа, и положения появившейся в грунте первичной площадки скольжения.

При первичном разрушении грунта возможен случай, когда сразу произойдет срез всего «кирпича» грунта, расположенного между грунтозацепами. Это возможно, если сила, необходимая для среза «кирпича» грунта, будет меньше силы, при которой образуется первичная площадка скольжения  $OB'$ . Если первичная площадка скольжения выйдет за пределы удерживающей поверхности  $AK$  грунта, то есть  $\psi < \psi_{KP}^I$ , то в этом случае также произойдет срез грунта между грунтозацепами вследствие того, что удерживающей поверхностью будет являться менее устойчивая поверхность  $AT$  [36, 37] (рис. 5).

Если среза «кирпича» грунта не происходит, то необходимо рассмотреть последующую фазу разрушения грунта.

Во время этой фазы происходит перераспределение неустойчивой первичной площадки скольжения  $OB'$  до такого положения  $OB$ , при котором обеспечивается устойчивость грунта от дальнейшего разрушения [37]. При этом за счет увеличения давления на более крутых участках площадки скольжения происходит ее значительное спрямление.

При расчетах второй фазы следует, во-первых, контролировать положение площадки скольжения  $OB'$ , определяемое углом ее наклона  $\psi$ , относительно критического значения  $\psi_{KP}^I$ .

Во-вторых, необходимо проверять возможность среза оставшейся части грунта ненарушенной структуры  $TABO$ . Такой срез может произойти, когда сила, действующая со стороны вытесняемой призмы грунта  $OBK$ , превысит силы трения и сцепления, удерживающие призму  $TABO$  от среза. Поэтому этот вариант разрушения необходимо постоянно рассматривать при расчете второй фазы.

В-третьих, надлежит проверять устойчивость грунта у задней грани грунтозацепа. Разрушение грунта у этой грани может произойти от давления, действующего со стороны опорной части трака. Одновременно снижается и устойчивость оставшейся части грунта, а также увеличивается критическое значение угла  $\psi_{KP}^I$  до значения  $\psi_{KP}^{II}$ . Возможность такого разрушения отмечена в [38].

Таким образом, внешняя касательная сила, приложенная к траку, может увеличиваться до тех пор, пока не произойдет одно из событий: либо полностью будет использована несущая способность грунта и осуществится его срез между соседними грунтозацепами, либо произойдет выклинивание трака на вытесняемой призме грунта при условии, что сила, действующая со стороны вытесняемой призмы  $OBK$  на опорную часть трака, превысит силу тяжести трактора, приходящуюся на один трак [15, 36, 37]. Возможность выклинивания гусеничных траков из грунта отмечена во многих работах [5, 31, 38, 39], этот процесс наблюдался авторами настоящей статьи при проведении экспериментальных исследований (рис. 6).

С помощью разработанного авторами метода исследовалось влияние шага грунтозацепов на силу тяги по сцеплению на суглинке (грунт III категории с углом внутреннего трения  $\rho = 280^\circ$  и удельным сцеплением  $c = 60$  кПа). В ходе проведенного эксперимента изменялся шаг грунтозацепов в диапазоне от  $T = 0,06$  м до  $T = 0,56$  м при неизменных остальных геометрических параметрах гусеничного движителя трактора Т10М.

На рис. 7 вертикальным отрезком  $LL$  отделена область, в которой происходит срез грунта по плоскости, проходящей через вершины грунтозацепов, на самой ранней стадии до окончания формирования предельной зоны и образования первичной площадки скольжения, выходящей на поверхность грунта.

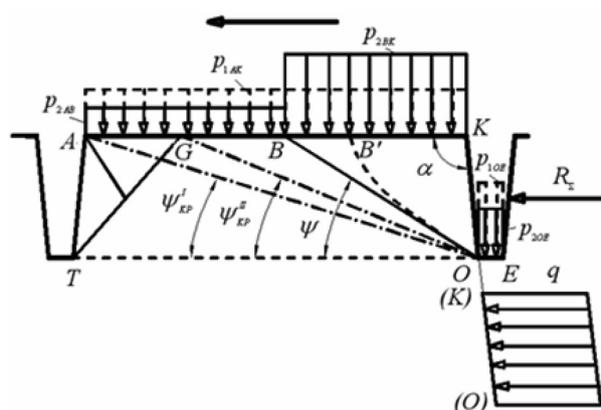


Рис. 5. Общая схема разрушения грунта между грунтозацепами

Fig. 5. General scheme of soil disintegration between grousers

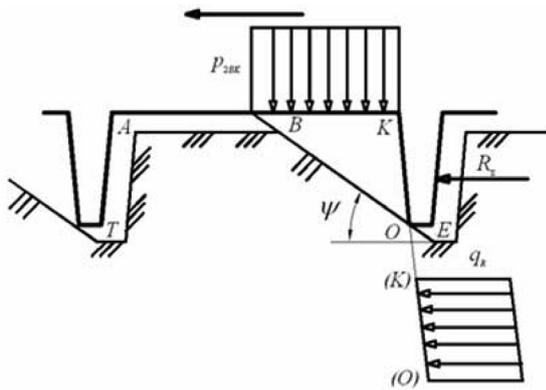


Рис. 6. Схема выклинивания трака из грунта  
Fig. 6. Scheme of wedging the track out of the ground

Такое разрушение появляется тогда, когда для среза всего грунта, находящегося между грунтозацепами, требуется меньшая сила (кривая 1), чем для образования первичной площадки скольжения (кривая 2). На основании этого можно утверждать, что грунтозацепы трактора Т10М с малым шагом (до 0,19 м) разрушают грунт по схеме, не являющейся рациональной.

В области, расположенной между вертикальными отрезками LL и MM, разрушение грунта происходит по следующей схеме. Во время первой фазы появляется первичная площадка скольжения, выходящая на поверхность грунта, о чем свидетельствует положение кривой 2. При переформировании этой площадки скольжения во время второй

фазы происходит срез оставшейся призмы грунта ненарушенной структуры по плоскости, проходящей через вершины грунтозацепов, о чем свидетельствует кривая 1.

При значении шага  $T = 0,4$  м для среза грунта ненарушенной структуры или выклинивания трака из грунта требуется одинаковая величина внешней касательной силы, равная  $R_{\Sigma} = 176,8$  кН. Это свидетельствует о максимальном использовании несущей способности грунта в данных условиях.

При относительно больших значениях шага (свыше 0,4 м), расположенных в области, находящейся правее отрезка MM, сила, необходимая для среза грунта (кривая 1), оказывается больше силы, необходимой для выклинивания трака (кривая 3). Поэтому в этой области площадка скольжения переформируется до такого положения, при котором происходит выклинивание трака на вытесняемой призме грунта. Максимально возможная величина касательной силы в этом случае соответствует выделенному участку кривой 3. При такой схеме разрушения несущая способность грунта реализуется не полностью, поскольку часть грунта между грунтозацепами остается неразрушенной.

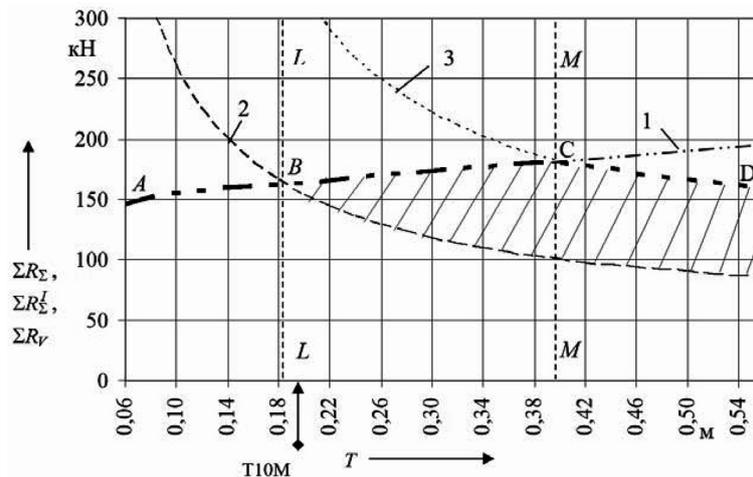


Рис. 7. Влияние шага грунтозацепов на силы, характеризующие взаимодействие рабочих поверхностей гусениц с грунтом: 1 – касательная сила, необходимая для среза грунта ( $\Sigma R_{\Sigma}$ ); 2 – условная касательная сила, при которой появляется первичная площадка скольжения ( $\Sigma R_{\Sigma}^I$ ); 3 – условная касательная сила, при которой траки выклиниваются из грунта ( $\Sigma R_V$ ); /// – область протекания второй фазы

Fig. 7. Influence of the groove pitch on the forces characterizing the interaction of the working surfaces of caterpillars with soil: 1 – the tangential force required to cut the soil ( $\Sigma R_{\Sigma}$ ); 2 – conditional tangential force, at which the primary slip surface appears ( $\Sigma R_{\Sigma}^I$ ); 3 – conditional tangential force, at which the tracks are wedged out from the ground ( $\Sigma R_V$ ); /// – the second phase flow area

**Заключение.** Проанализировав проведенные исследования в области существующих схем нагружения грунта траками гусеничных машин, можно сказать, что большинство исследователей подчеркивают немаловажную роль грунтозацепов в создании тягового усилия. Расчеты показывают, что в приведенных условиях наиболее рациональным будет являться шаг  $T = 0,4$  м. Это обосновывается тем, что при таком шаге ограничения, накладываемые на величину внешней касательной силы, являются равноценными (кривые 1 и 3 пересекаются в точке С).

Эти выводы получены для конкретных условий, поэтому их не стоит автоматически применять к гусеничным машинам с другими размерами траков или к гусеницам, работающим в иных условиях. Однако подобные задачи можно решать, используя программное обеспечение, разработанное на основе предложенного авторами метода анализа взаимодействия траков гусеничного движителя с грунтом, которое позволяет адаптировать геометрические параметры грунтозацепов гусеничных машин к реальным условиям той местности, где будет эксплуатироваться машина. Программное обеспечение в виде готового программного продукта используется в учебном процессе и научных исследованиях кафедры «Транспортные и технологические машины» ГУВПО «Белорусско-Российский университет».

### Список использованных источников

1. Ксеневиц, И. П. Ходовая система – почва – урожай / И. П. Ксеневиц, В. А. Скотников, М. И. Ляско. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.
2. Скотников, В. А. Исследование проходимости гусеничных болотных тракторов / В. А. Скотников. – Минск: Выш. шк., 1964. – 19 с.
3. Опейко, Ф. А. Колесный и гусеничный ход / Ф. А. Опейко. – Минск: Акад. с.-х. наук БССР, 1960. – 228 с.
4. Опейко, Ф. А. Наиболее выгодное распределение давления на грунт при разных положениях центра давления у гусеничного трактора / Ф. А. Опейко // Вопросы сельскохозяйственной механики. – Минск, 1962. – Т. 8. – С. 169–188.
5. Скотников, В. А. Проходимость машин / В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов. – Минск: Наука и техника, 1982. – 328 с.
6. Скотников, В. А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля / В. А. Скотников, А. А. Мащенко, А. С. Солонский. – М.: Агропромиздат, 1986. – 383 с.
7. Терцаги, К. И. Строительная механика грунта / К. И. Терцаги. – М.: Госстройиздат, 1933. – 123 с.
8. Орнатский, Н. В. Механика грунтов / Н. В. Орнатский. – М.: МГУ, 1962. – 186 с.
9. Беккер, М. Г. Введение в теорию систем местность – машина / М. Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
10. Васильев, А. В. Влияние конструктивных параметров гусеничного трактора на его тягово-сцепные свойства / А. В. Васильев, Е. Н. Докучаева, О. Л. Уткин-Любовцов. – М.: Машиностроение, 1969. – 192 с.
11. Мацелуро, М. Е. Вопросы сельскохозяйственной механики / М. Е. Мацелуро, Б. Н. Янушкевич. – Минск: Выш. шк., 1965. – 132 с.
12. Зеленин, А. Н. Резание грунтов / А. Н. Зеленин. – М.: Акад. наук СССР, 1959. – 256 с.
13. Агейкин, Я. С. Вездеходные колесные и комбинированные движители / Я. С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 234 с.
14. Антонов, А. С. Теория гусеничного движителя / А. С. Антонов. – М.: Машгиз, 1949. – 214 с.
15. Бородачев, И. П. Гусеничные и колесные тракторы и тягачи как базовые машины для бульдозеров / И. П. Бородачев, А. А. Яркин. – М.: ЦБТИ ВНИИстройдормаш, 1959. – 76 с.
16. Волчка, Л. Я. Тракторы / Л. Я. Волчка. – 2-е изд., перераб. – Минск: Выш. шк., 1977. – 413 с.
17. Гуськов, В. В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов / В. В. Гуськов. – М.: Машиностроение, 1966. – 196 с.
18. Забавников, Н. А. Основы теории транспортных гусеничных машин / Н. А. Забавников. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.
19. Карельских, Д. К. Теория, конструкция и расчет тракторов / Д. К. Карельских, М. К. Кристи. – Л.: Машгиз, 1940. – 520 с.
20. Ксеневиц, И. П. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И. П. Ксеневиц, В. В. Гуськов, Н. Ф. Бочаров. – М.: Машиностроение, 1991. – 544 с.
21. Медведев, М. И. Теория гусеничных систем / М. И. Медведев. – М.: Машгиз, 1934. – 194 с.
22. Носов, Н. А. Расчет и конструирование гусеничных машин / Н. А. Носов, В. Д. Галышев, А. П. Харченко. – Л.: Машиностроение, 1972. – 560 с.
23. Рубенчик, Е. В. Испытания трактора ДТ-75Б с гусеницами с различным шагом / Е. В. Рубенчик, В. М. Столяров // Пути снижения удельного давления ходовых систем гусеничных сельскохозяйственных тракторов на почву. – М.: ЦНИИТЭИтракторсельхозмаш, 1979. – Вып. 7. – С. 17–21.
24. Ляско, М. И. Испытание трактора ДТ-75С с гусеницей увеличенного шага / М. И. Ляско, Л. Н. Кутин, П. Л. Щупак // Пути снижения удельного давления ходовых систем гусеничных сельскохозяйственных тракторов на почву. – М.: ЦНИИТЭИтракторсельхозмаш, 1979. – Вып. 7. – С. 22–31.

25. Ляско, М. И. Исследование влияния некоторых конструктивных параметров на тягово-сцепные свойства гусеничного трактора с землеройным оборудованием: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / М. И. Ляско; МАДИ. – М., 1971. – 17 с.
26. Денисов, А. Б. Исследование влияния некоторых конструктивных параметров гусеницы на тягово-сцепные свойства сельскохозяйственного трактора: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / А. Б. Денисов; НАТИ. – М., 1982. – 25 с.
27. Bekker, M. G. *Off-the-Road Locomotion: Research and Development in Terramechanics* / M. G. Bekker. – Michigan: University of Michigan Press, 1960. – 400 p.
28. Bekker, M. G. *Theory of land locomotion* / M. G. Bekker. – Michigan: University of Michigan Press, 1962. – 263 p. <https://doi.org/10.3998/mpub.9690401>
29. Зеленин, А. Н. Разрушение мерзлых грунтов резанием, ударом и вибрацией / А. Н. Зеленин. – М.: ЦИНТИАМ, 1962. – 42 с.
30. Цытович, Н. А. *Механика грунтов* / Н. А. Цытович. – М.: Госстройиздат, 1963. – 636 с.
31. Алябьев, А. Ф. Модель взаимодействия гусеницы трактора с грунтом / А. Ф. Алябьев, С. Ю. Калинин // Лес. вестн. – 2016. – Т. 20, № 2. – С. 173–178.
32. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – М.: Гостехиздат, 1965. – 274 с.
33. Артемьев, К. А. Теория резания грунтов землеройными машинами: учеб. пособие / К. А. Артемьев. – Новосибирск: Изд. Новосибир. ун-та, 1978. – 104 с.
34. Берестов, Е. И. Пассивное давление грунта на ломаные подпорные стенки. Ч. 1 / Е. И. Берестов // Вес. Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1996. – № 1. – С. 47–54.
35. Берестов, Е. И. Пассивное давление грунта на ломаные подпорные стенки. Ч. 2 / Е. И. Берестов // Вес. Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1997. – № 2. – С. 60–71.
36. Берестов, Е. И. Предельное равновесие в грунтовом массиве / Е. И. Берестов // Проблемы качества и надежности машин: материалы респ. науч.-техн. конф., Могилев, 17–18 апр. 1994 г.: в 2 ч. / редкол.: В. И. Ходырев [и др.]. – Могилев, 1994. – Ч. 2. – С. 74.
37. Берестов, Е. И. Сопrotивление грунтов резанию / Е. И. Берестов // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. – 1997. – № 10. – С. 102–107.
38. Барский, И. Б. Конструирование и расчет тракторов / И. Б. Барский. – М.: Машиностроение, 1968. – 375 с.
39. Берестов, Е. И. О повышении сцепления движителей гусеничных машин с грунтом / Е. И. Берестов, А. В. Кулабухов // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 5. – С. 50–56.

## References

1. Ksenevich I. P., Lyasko M. I. *Running system – soil – harvest*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 304 p. (in Russian).
2. Skotnikov V. A. *Investigation of the patency of crawler marsh tractors*. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1964. 19 p. (in Russian).
3. Opeiko F. A. *Wheel and caterpillar drive*. Minsk, Academy of Agricultural Sciences of the BSSR, 1960. 228 p. (in Russian).
4. Opeiko F. A. The most favorable pressure distribution to the ground at different positions of the center of pressure of a tracked tractor. *Questions of agricultural mechanics*. Minsk, 1962, vol. 8, pp. 169–188 (in Russian).
5. Skotnikov V. A., Ponomarev A. V., Klimanov A. V. *Vehicle penetration*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 328 p. (in Russian).
6. Skotnikov V. A., Mashchenskii A. A., Solonskii A. S. *Fundamentals of the theory and calculation of a tractor and a car*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 383 p. (in Russian).
7. Tercagi K. I. *Building mechanics of soil*. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1933. 123 p. (in Russian).
8. Ornatkii N. V. *Soil mechanics*. Moscow, Moscow State University, 1962. 186 p. (in Russian).
9. Bekker M. G. *Introduction to the theory of local-machine systems*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 520 p. (in Russian).
10. Vasil'ev A. V., Dokuchaeva E. N., Utkin-Lyubovcov O. L. *Influence of design parameters of a caterpillar tractor on its traction-coupling properties*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 192 p. (in Russian).
11. Macepuro M. E., Yanushkevich B. N. *Questions of agricultural mechanics*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1965. 132 p. (in Russian).
12. Zelenin A. N. *Cutting of soils*. Moscow, Academy of Sciences of USSR, 1959. 256 p. (in Russian).
13. Ageikin Ya. S. *All-wheel drive and combined propellers*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 234 p. (in Russian).
14. Antonov A. S. *The theory of caterpillar propulsion*. Moscow, Mashgiz Publ., 1949. 214 p. (in Russian).
15. Borodachev I. P., Yarkin A. A. *Crawler and wheel tractors and tractors as basic machines for bulldozers*. Moscow, TsBTI VNIstroydormash Publ., 1959. 76 p. (in Russian).
16. Volchka L. Ya. *Tractors*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1977. 413 p. (in Russian).
17. Gus'kov V. V. *Optimal parameters of agricultural tractors*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 196 p. (in Russian).
18. Zabavnikov N. A. *The fundamentals of the theory of transport caterpillar vehicles*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 448 p. (in Russian).
19. Karel'skih D. K., Kristi M. K. *Theory, design and calculation of tractors*. Leningrad, Mashgiz Publ., 1940. 520 p. (in Russian).

20. Ksenevich I. P., Gus'kov V. V., Bocharov N. F. *Tractors. Design, construction and calculation*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 544 p. (in Russian).
21. Medvedev M. I. *The theory of caterpillar systems*. Moscow, Mashgiz Publ., 1934. 194 p. (in Russian).
22. Nosov N. A., Galyshev V. D., Harchenko A. P. *Calculation and design of caterpillar machines*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 560 p. (in Russian).
23. Rubenchik E. V., Stolyarov V. M. Tests of DT-75B tractor with tracks with different steps. *Puti snizheniya udel'nogo davleniya hodovykh sistem gusenichnykh sel'skohozyajstvennykh traktorov na pochvu* [Ways to reduce the specific pressure of running systems of caterpillar agricultural tractors on soil]. Moscow, Central Scientific Research Institute for Information and Techno-Economic Research on Tractor and Agricultural Machinery, 1979, iss. 7, pp. 17–21 (in Russian).
24. Lyasko M. I., Kutin L. N., Shchupak P. L. Test of DT-75C tractor with increased track caterpillar. *Puti snizheniya udel'nogo davleniya hodovykh sistem gusenichnykh sel'skohozyajstvennykh traktorov na pochvu* [Ways to reduce the specific pressure of running systems of caterpillar agricultural tractors on soil]. Moscow, Central Scientific Research Institute for Information and Techno-Economic Research on Tractor and Agricultural Machinery, 1979, iss. 7, pp. 22–31 (in Russian).
25. Lyasko M. I. *Investigation of the influence of some design parameters on the traction-coupling properties of a crawler tractor with earth-moving equipment*. Moscow, Moscow Automobile and Road Institute, 1971. 17 p. (in Russian).
26. Denisov A. B. *Investigation of the influence of some design parameters of the track on traction and coupling properties of an agricultural tractor*. Moscow, Research Tractor Institute, 1982. 25 p. (in Russian).
27. Bekker M. G. *Off-the-Road Locomotion: Research and Development in Terramechanics*. Michigan, University of Michigan Press, 1960. 400 p.
28. Bekker M. G. *Theory of land locomotion*. Michigan, University of Michigan Press, 1962. 263 p. <https://doi.org/10.3998/mpub.9690401>
29. Zelenin A. N. *Destruction of frozen soils by cutting, impact and vibration*. Moscow, Central Institute of Scientific and Technical Information on Automation and Mechanical Engineering, 1962. 42 p. (in Russian).
30. Cytovich, N. A. *Soil mechanics*. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1963. 636 p. (in Russian).
31. Alyab'ev A. F., Kalinin S. Yu. Model of interaction of a tractor caterpillar with a ground. *Lesnoj vestnik = Forestry Bulletin*, 2016, vol. 20, no. 2, pp. 173–178 (in Russian).
32. Sokolovskij V. V. *Static of the granular medium*. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1965. 274 p. (in Russian).
33. Artem'ev K. A. *Theory of cutting soils by excavating machines: a tutorial*. Novosibirsk, Novosibirsk University Publ., 1978. 104 p. (in Russian).
34. Berestov E. I. Passive ground pressure on broken retaining walls. Part 1. *Vestsi Akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 1996, no. 1, pp. 47–54 (in Russian).
35. Berestov E. I. Passive ground pressure on broken retaining walls. Part 2. *Vestsi Akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 1997, no. 2, pp. 60–71 (in Russian).
36. Berestov E. I. Limit equilibrium in the soil massif. *Problemy kachestva i nadezhnosti mashin: materialy resp. nauch.-tekhn. konf. Mogilev, 17–18 apr. 1994 g. Ch. 2* [Problems of quality and reliability of machines: materials rep. scientific-techn. conf., Mogilev, 17–18 April 1994. Part 2]. Mogilev, 1994, p. 74 (in Russian).
37. Berestov E. I. Resistance to cutting soil. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, 1997, no. 10, pp. 102–107 (in Russian).
38. Barskii I. B. *Design and calculation of tractors*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 375 p. (in Russian).
39. Berestov E. I., Kulabuhov A. V. About increase of coupling of engines of caterpillar cars with a ground. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny = Construction and Road Building Machinery*, 2010, no. 5, pp. 50–56 (in Russian).

### Информация об авторах

*Берестов Евгений Иванович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортные и технологические машины», Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212000, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: beres1948@mail.ru

*Кулабухов Артем Владимирович* – кандидат технических наук, доцент, декан инженерно-экономического факультета, Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212000, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: kulabuhov1981@mail.ru

### Information about the authors

*Evgenii I. Berestov* – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department “Transport and technological machines”, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212000, Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: beres1948@mail.ru

*Artem V. Kulabukhov* – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Economics, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212000, Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: kulabuhov1981@mail.ru