

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 629.115.8: 629.4.033

**КУЛАБУХОВ**  
Артем Владимирович

**УЛУЧШЕНИЕ ТЯГОВО-СЦЕПНЫХ КАЧЕСТВ ГУСЕНИЧНЫХ  
ТЯГАЧЕЙ ПУТЕМ ВЫБОРА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ГРУНТОЗАЦЕПОВ**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**по специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины»**

Могилев, 2008

Работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»

**Научный руководитель – Берестов Евгений Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
проректор по учебной работе,  
Государственное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет».

**Официальные оппоненты: Гуськов Валерий Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор,  
Учреждение образования «Белорусский  
национальный технический университет»,  
профессор кафедры «Тракторы»;

**Мащенский Александр Александрович,**  
кандидат технических наук, профессор,  
Учреждение образования «Белорусский  
государственный аграрно-технический  
университет», профессор кафедры  
«Тракторы и автомобили».

**Оппонирующая организация – РУП «Научно-практический центр НАН  
Беларуси по механизации сельского  
хозяйства».**

Защита состоится « 6 » июня 2008 г. в 13<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций К 02.18.02 при ГУВПО «Белорусско-Российский университет» по адресу: 212005, г. Могилев, пр. Мира, 43, корп. 1, а.323, bru@bru.mogilev.by, телефон ученого секретаря совета: +37529 687 51 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусско-Российского университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2008 г.

Ученый секретарь совета по защите  
диссертаций, кандидат технических  
наук, доцент

\_\_\_\_\_ М.Е. Лустенков

## ВВЕДЕНИЕ

Развиваемая гусеничным тягачом сила тяги ограничивается сцеплением движителя с грунтом, которое во многом определяется параметрами грунтозацепов. Предлагается метод анализа взаимодействия траков гусеничного движителя с грунтом, позволяющий выбирать геометрические параметры грунтозацепов, обеспечивающие улучшение тягово-сцепных качеств тягачей на стадии проектирования без проведения дорогостоящих экспериментальных исследований. Такое направление исследований является актуальным, поскольку обеспечивает выбор параметров грунтозацепов аналитическим методом при минимальных затратах.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Работа выполнялась по госбюджетной теме ГБ-0602 (номер госрегистрации 2006563) “Методы проектирования, модернизации и эксплуатации строительных, дорожных, подъемно-транспортных машин с целью улучшения их характеристик”, утвержденной ГУ “Белорусский институт системного анализа и информации обеспечения научно-технической сферы”.

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы является разработка аналитического метода анализа взаимодействия траков гусеничного движителя с грунтом, обеспечивающего выбор геометрических параметров грунтозацепов, улучшающих тягово-сцепные качества движителей гусеничных тягачей.

Для достижения сформулированной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- выявить и исследовать особенности физической природы разрушения грунта траком гусеничных движителей;
- разработать аналитический метод анализа взаимодействия траков гусеничных движителей с грунтом на любой стадии их нагружения;
- исследовать взаимодействие грунтозацепов гусеничного движителя с грунтом и определить направления совершенствования их геометрических параметров.

Объектом исследования являются тягово-сцепные качества гусеничного движителя, от которых во многом зависит эффективность использования машины. Предметом исследования являются закономерности влияния геометрических параметров грунтозацепов на тягово-сцепные качества движителя.

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся научные результаты, полученные впервые:

– новый аналитический метод анализа взаимодействия грунта с траком гусеничного движителя, учитывающий многофазность и альтернативные варианты разрушения грунта на любой стадии нагружения, позволяющий оптимизировать геометрические параметры грунтозацепов с целью увеличения силы тяги по сцеплению;

– новые результаты экспериментальных исследований и разработанные на их основе рекомендации по расчету пассивного давления грунта на подпорные стенки с большим и промежуточным углом наклона, позволяющие повысить точность расчетов;

– результаты исследований влияния геометрических параметров грунтозацепов на процесс разрушения грунта, позволившие установить взаимосвязь между величиной силы, действующей на трак, геометрическими параметрами грунтозацепов и физическими процессами, протекающими в грунте;

– рекомендации по выбору геометрических параметров грунтозацепов движителей гусеничных тягачей.

**Личный вклад соискателя.** Автор самостоятельно получил основные результаты диссертационной работы. Опубликовал 21 научную работу, из которых 7 без соавторства. Участвовал в совместных работах: составление планов статей и докладов и написание их с соавторами, подача идей для заявок на изобретения. Оценка сходимости экспериментальных результатов с аналитическими проведена совместно с канд. техн. наук., доцентом Лесковцом И.В. Общая концепция исследований разработана совместно с научным руководителем д-ром. техн. наук, проф. Берестовым Е.И. Результаты, отраженные в диссертационной работе, получены соискателем самостоятельно: проведены экспериментальные исследования разрушения грунта подпорной стенкой при промежуточных и больших углах ее наклона и экспериментальные исследования взаимодействия гусеничных траков с грунтом; разработан метод анализа взаимодействия траков гусеничного движителя с грунтом, в котором учтены многофазность разрушения грунта грунтозацепом, особенности расчета угла сдвига грунта под траком, альтернативные варианты разрушения грунта.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях (НТК): республиканских НТК «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2004–2006); «IX Республиканская научная конференция студентов и аспирантов Республики Беларусь “НИРС-2004”» (Гродно, 2004); международных НТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2004–2006, 2008); «Современные научно-технические проблемы транспорта» (Ульяновск, 2005); «Интерстроймех» (Москва, 2006; Самара, 2007). Результаты исследований обсуждались на заседаниях кафедр «СДПТМиО» Белорусско-Российского университета (протокол №13

от 26.06.07) и «Тракторы» Белорусского национального технического университета (протокол № 15 от 08.04.08).

**Опубликованность результатов диссертации.** По теме диссертации опубликована 21 печатная работа: 5 статей в журналах из перечня изданий ВАК Беларуси общим объемом 1,57 авторских листа (из них 2 статьи в журналах Российской Федерации), 12 тезисов докладов в материалах конференций. Получено 4 патента Республики Беларусь.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 4-х глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 180 листов машинописного текста. Работа содержит 71 рисунок (31 л.), 6 таблиц (4 л.), 5 приложений (34 л.). Библиографический список включает 128 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, дана краткая характеристика исследуемых вопросов и предлагаемых подходов к их решению, показана практическая ценность работы.

**В первой главе** представлен обзор и анализ работ, посвященных влиянию геометрических параметров грунтозацепов гусеничных движителей на реализуемую ими силу тяги по сцеплению. Из них следует отметить труды Ксеневи́ча И.П., Гуськова В.В., Скотникова В.А., Васильева А.В., Докучаевой Е.Н., Уткина-Любовцова О.Л. и многих других. Большинство этих работ носит экспериментальный характер. Авторы утверждают, что правильный выбор шага и высоты грунтозацепов может значительно повысить силу тяги по сцеплению.

Проведен анализ известных методов расчета силы тяги, развиваемой движителями гусеничных машин. Эти методы предложены отечественными и зарубежными исследователями, большинство из которых определяют силу тяги по сцеплению как сумму сил трения и сцепления, действующих между «кирпичиками» грунта, зажато́го между грунтозацепами, и опорным грунтом. Это работы Платонова В.Ф., Леиашвилли Г.Р., Беккера М.Г., Леонтьева Г.В., Рииса А.Р., Гуськова В.В., Кацыгина В.В., Львова Е.Д. и других авторов.

Количество выполненных работ, касающихся темы физического обоснования процесса сдвига гусеничного трака в грунте, не так уж и велико. Из них следует отметить труды Беккера М.Г., Денисова А.Б., Зеленина А.Н., Цытовича Н.А., в которых акцентируется внимание на образовании уплотненных ядер грунта перед грунтозацепами. Ксеневи́ч И.П. и Ляско М.И. для определения формы тела и положения поверхности скольжения при взаимодействии «крутых» подпорных стенок с грунтом используют теорию Соколовского В.В. В работах же Скотникова В.А., Пономарева А.В., Климанова А.В. отмечается, что

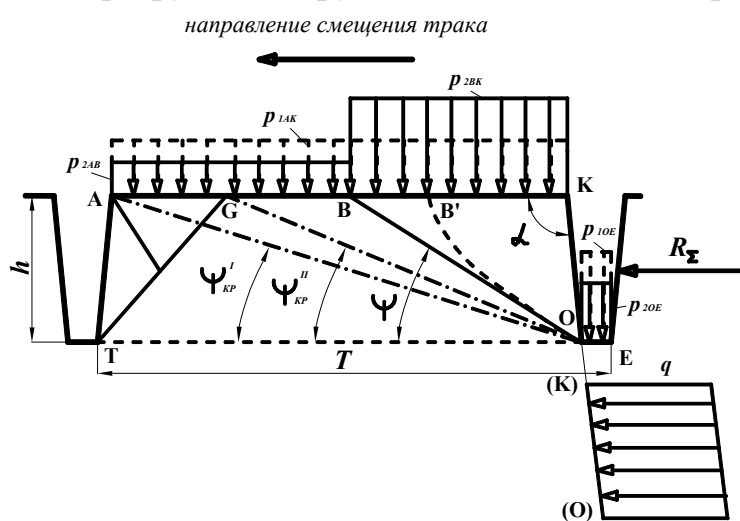
между грунтозацепами происходит резание грунта в специфических условиях.

Исходя из анализа работ вышеперечисленных авторов, можно сделать вывод, 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, которая недостаточно полно учитывает параметры грунтозацепов и физико-механические свойства грунта, а также не рассматривает последовательность и альтернативные возможности разрушения грунта при увеличении нагрузки. Следовательно, эти методы не в полной степени описывают такое взаимодействие, что ограничивает их использование.

Это заключение позволяет поставить вопрос о необходимости разработки такого метода расчета, который мог бы на любой стадии нагружения грунтозацепов дать численные значения силовых и геометрических параметров взаимодействия грунтозацепов с грунтом и обеспечивать выбор их рациональных параметров при проектировании.

**Во второй главе** изложен разработанный автором метод анализа взаимодействия трака гусеничного движителя с грунтом.

Теоретическое обоснование взаимодействия грунтозацепа гусеничного движителя с грунтом базируется на современных представлениях о многофазности разрушения грунта. Такой подход впервые был использован и хорошо зарекомендовал себя при расчете



**Рисунок 1 – Общая схема разрушения грунта**

сил сопротивления грунта в процессе его резания, который во многом аналогичен исследуемому процессу в данной работе.

Общая схема взаимодействия полностью погруженного грунтозацепа с грунтом изображена на рисунке 1. Смещение трака относительно опорной поверхности грунта начнется тогда, когда приложенная к нему внешняя касательная сила превысит величину силы трения трака о грунт. При этом дополнительное сопротивление на грунтозацеп начнет оказывать сила, возникающая вследствие деформации грунта. При определенной величине деформации наступит первая фаза разрушения грунта, при которой образуется площадка скольжения.

При расчете первой фазы разрушения рассматриваются два возможных варианта образования площадки скольжения (рисунок 1):

- образование площадки скольжения  $OT$  на плоскости вершин грунтозацепов, по которой происходит срез всего “кирпича” грунта;
- образование первичной площадки скольжения  $OB'$ , выходящей к опорной поверхности трака.

Величина касательной силы, действующей на переднюю грань грунтозацепа при разрушении по первому варианту, определяется по формуле

$$R^0 = B(T - l_{OE})(c + p_{1AK} \operatorname{tg} \rho) + 2S_{ТАКО} (c + \xi p_{1AK} \operatorname{tg} \rho),$$

где  $B$  – ширина трака;  $T$  – шаг грунтозацепов;  $l_{OE}$  – длина вершины грунтозацепа;  $c$  – удельное сцепление грунта;  $p_{1AK}$  – нормальное давление, действующее со стороны опорной поверхности трака  $AK$  на грунт (рисунок 1);  $\rho$  – угол внутреннего трения грунта;  $S_{ТАКО}$  – площадь бокового торца “кирпича” грунта;  $\xi$  – коэффициент бокового давления.

В этой формуле учитываются силы трения и сцепления, действующие по основанию и двум боковым торцам грунтового “кирпича”.

С учетом трения вершины грунтозацепа о грунт можно получить силу, действующую на трак,

$$R_{\Sigma}^0 = R^0 + p_{1OE} l_{OE} B \operatorname{tg} \omega,$$

где  $p_{1OE}$  – нормальное давление, действующее на грунт со стороны вершины грунтозацепа;  $\omega$  – угол внешнего трения грунта.

Аналогичный подход используется и в других работах.

При образовании первичной площадки скольжения, выходящей к опорной поверхности трака, величина предельного давления  $q^0$ , действующего на переднюю грань грунтозацепа, и положение первичной площадки скольжения определяются согласно теории пассивного давления грунта на подпорную стенку, разработанной Соколовским В.В.

Особенностью тракторных грунтозацепов является большой угол наклона их передней грани. Пассивное давление грунта на подпорные стенки с такими углами наклона исследовалось недостаточно полно. Для выяснения особенностей взаимодействия этих подпорных стенок с грунтом была проведена серия экспериментов. Исходя из анализа экспериментальных результатов, разработаны следующие рекомендации по учету направления сил трения на поверхностях подпорных стенок.

При больших углах их наклона  $\alpha > \frac{\pi}{2} + \omega$  силы трения будут направлены к основаниям подпорных стенок.

Для подпорных стенок с промежуточными углами наклона  $\frac{\pi}{2} - \omega < \alpha < \frac{\pi}{2} + \omega$  угол отклонения давления, действующего на их поверхности, следует определять по формуле

$$\delta_\delta = \left| \alpha - \frac{\pi}{2} \right| \leq \omega.$$

В частном случае, при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  давление будет нормальным ( $\delta_\delta = 0$ ). При  $\frac{\pi}{2} - \omega < \alpha < \frac{\pi}{2}$  касательные напряжения на поверхностях подпорных стенок будут направлены к их вершинам, а в диапазоне  $\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2} + \omega$  – к их основаниям.

При расчете касательной силы, действующей на переднюю грань грунтозацепа, кроме давления  $q^\circ$  дополнительно учитываются сопротивления, действующие по боковым торцам отделенной призмы грунта:

$$R^I = q^\circ S_{ок} + 2S_{об'к} (c + \xi q^\circ \operatorname{tg} \rho),$$

где  $S_{ок}$  – площадь передней грани грунтозацепа;  $S_{об'к}$  – площадь боковой поверхности отделенной призмы  $OB'K$  грунта (рисунок 1).

Величина касательной силы, действующей на трак гусеничной цепи с учетом трения вершины грунтозацепа и опорной части трака о неподвижный грунт, будет равна

$$R^I_\Sigma = R^I + p_{1AK} (T - l_{OE}) B \operatorname{tg} \omega + p_{1OE} l_{OE} B \operatorname{tg} \omega.$$

При увеличении внешней касательной силы после образования первичной площадки скольжения наступит последующая фаза разрушения грунта. Во время этой фазы происходит переформирование первичной площадки скольжения до ее нового положения  $OB$ , при котором обеспечивается устойчивость грунта к дальнейшему разрушению от действующей на него нагрузки (рисунок 1).

Методика расчета второй фазы разрушения заключается в следующем [4, 5]. Для определения угла  $\psi$  наклона площадки скольжения  $OB$  используется аналитический метод расчета угла сдвига по граничным условиям.

Применительно к рассматриваемому случаю, угол  $\psi$  можно определить по уравнению

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1) - \frac{\operatorname{ctg} \rho}{2} \ln(A) \quad (1)$$

при  $q \geq p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)} \cos \rho$ .

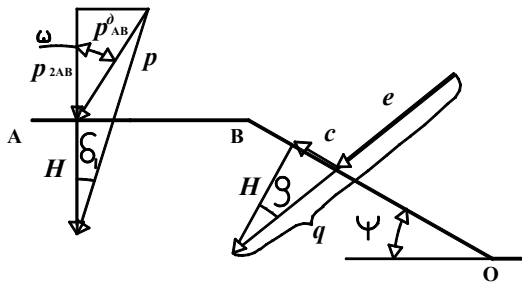
В противном случае

$$\psi = \frac{3}{4} \pi - \frac{\rho}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1) + \Delta_p, \quad (2)$$

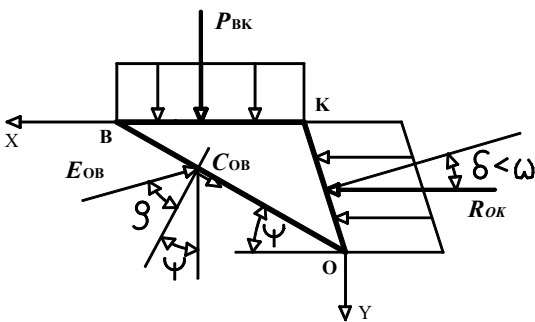
где  $A = \frac{q \sin(\Delta_1 - \delta_1)}{p \sin \Delta_1 \cos \rho}$ ;  $\Delta_p = \arcsin\left(\frac{\sin \delta_p}{\sin \rho}\right)$ ;  $\Delta_1 = \arcsin\left(\frac{\sin \delta_1}{\sin \rho}\right)$ ;  $\delta_p = \mp \arccos\left(\frac{\cos \rho (1+A)}{2\sqrt{A}}\right)$ ;

$\delta_p$  – угол отклонения приведенного давления на поверхности разрыва;  $p$  и  $q$  – приведенные давления, действующие на площадку  $AB$  со стороны трака и на площадку  $OB$  со стороны вытесняемой призмы  $OBK$  грунта соответ-





**Рисунок 2 – Схема давлений при определении угла наклона площадки скольжения**



**Рисунок 3 – Расчетная схема сил, действующих на вытесняемую призму грунта**

венно (рисунок 1);  $\delta_1$  – угол отклонения давления  $p$ .

Уравнения для определения давлений  $p$  и  $q$  можно получить из схемы на рисунке 2:

$$p = \sqrt{(p_{AB}^0 \sin \omega)^2 + (p_{AB}^0 \cos \omega + H)^2}$$

$$q = e + \frac{c}{\sin \rho} = \frac{E_{OB} \sin \psi}{Bh} + \frac{c}{\sin \rho}, \quad (3)$$

где  $p_{AB}^0$  – действительное давление, действующее на площадку  $AB$  со стороны трака;  $H = c \cdot \operatorname{ctg} \rho$  – давление связности;  $e$  – действительное давление от силы  $E_{OB}$ , действующей со стороны вытесняемой призмы грунта на площадку  $OB$ .

Величина силы  $E_{OB}$ , входящей в уравнение (3), определяется из условий равновесия вытесняемой призмы грунта (рисунок 3):

$$E_{OB} = \frac{R_{OK} - C_{OB} \cos \psi}{\sin(\rho + \psi)}, \quad (4)$$

$$P_{BK} = E_{OB} \cos(\rho + \psi) - C_{OB} \sin \psi, \quad (5)$$

где  $C_{OB}$  – сила сцепления по площадке  $OB$ ,  $C_{OB} = Bch / \sin \psi$ ;  $h$  – высота грунтозацепа (рисунок 1);  $P_{BK}$  – сила, действующая со стороны опорной части трака;  $R_{OK}$  – сила, действующая со стороны передней грани грунтозацепа.

Уравнения (4) и (5) позволяют рассчитать величины сил  $P_{BK}$  и  $E_{OB}$  при заданных значениях силы  $R_{OK}$  и угла  $\psi$  наклона площадки скольжения.

Использование этих уравнений при решении системы уравнений (1)...(3) позволяет получить искомое значение угла  $\psi$  для любого заданного значения силы  $R_{OK}$ , начиная со значения, при котором образуется первичная площадка скольжения. Тогда полная величина касательной силы  $R''$ , действующей во время второй фазы разрушения на переднюю грань грунтозацепа, будет определяться по уравнению

$$R'' = R_{OK} + 2S_{OBK} (c + \xi q_R \operatorname{tg} \rho), \quad (6)$$

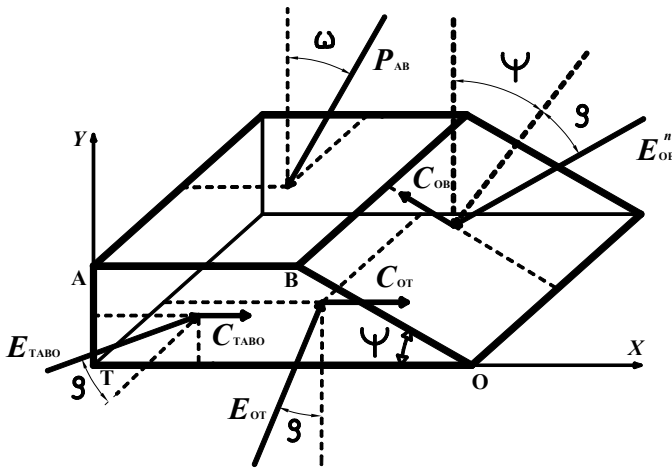
где  $q_R$  – давление от силы  $R_{OK}$ , действующее на площадку  $OK$ ,  $q_R = R_{OK} \sin \alpha / (Bh)$ ;  $S_{OBK}$  – площадь бокового торца призмы  $OBK$  (рисунок 3).

В уравнении (6) дополнительно учитываются сопротивления по боковым торцам вытесняемой призмы.

При определении касательной силы  $R''_{\Sigma}$ , действующей на трак гусеничного движителя, дополнительно учитывается трение трака о неподвижный грунт:

$$R''_{\Sigma} = R'' + B \operatorname{tg} \omega (p_{2AB} l_{AB} + p_{2OE} l_{OE}), \quad (7)$$

где  $p_{2AB}$ ,  $p_{2OE}$  – нормальные давления, действующие на площадки грунта  $AB$  и  $OE$  соответственно;  $l_{AB}$  – длина участка грунта  $AB$  (рисунок 1).



**Рисунок 4 – Схема сил, действующих на грунт ненарушенной структуры**

между грунтозацепами (рисунок 4). Из условий равновесия этой призмы можно получить предельную величину силы  $E_{OB}^n$ , действующей на нее со стороны площадки скольжения:

$$E_{OB}^n = \frac{C_{OT} + P_{AB} \cos \omega \operatorname{tg} \rho - C_{OB} \operatorname{tg} \rho \sin \psi - C_{OB} \cos \psi - P_{AB} \sin \omega + 2C_{TABO} + 2E_{TABO} \sin \rho}{\sin(\psi + \rho) - \operatorname{tg} \rho \cos(\psi + \rho)}, \quad (8)$$

где  $C_{OT}$  – сила сцепления по площадке  $OT$ ;  $P_{AB}$  – сила, действующая со стороны опорной поверхности трака;  $C_{TABO}$  – сила сцепления по боковому торцу рассматриваемой призмы;  $E_{TABO}$  – сила, действующая на боковой торец призмы, полученная с учетом того, что за главное напряжение принято нормальное давление от силы  $E_{OB}^n$ .

Силы сцепления, входящие в уравнение (8), определяются по уравнениям

$$C_{OT} = cB(T - l_{OE}) \text{ и } C_{TABO} = ch(l_{AB} + T - l_{OE})/2.$$

Срез по площадке вершин грунтозацепов произойдет, когда сила  $E_{OB}^n$  достигнет предельного значения. В этом случае внешняя касательная сила, полученная по уравнению (7), будет максимально возможной.

При устойчивом положении призмы площадка скольжения может достигнуть верхнего ребра грунта у основания предыдущего грунтозацепа. При этом угол ее наклона уменьшится до значения

$$\psi^I_{кр} = \operatorname{arctg} \frac{h}{(T - l_{OE})},$$

которое является критическим и определяется геометрическими параметрами трака (рисунок 1).

При  $\psi = \psi^I_{кр}$  удерживающей поверхностью будет являться поверхность  $AT$ , свободная от давлений из-за смещения трака в грунте. Поскольку грунт при

Изложенный метод расчета (уравнения (1)–(7)) позволяет определять параметры взаимодействия трака с грунтом во время второй фазы. Процесс переформирования площадки скольжения во время этой фазы может быть ограничен разными причинами.

При определенном значении внешней касательной силы может произойти срез оставшейся призмы грунта ненарушенной структуры  $TABO$ , расположенной

новой расчетной схеме будет менее устойчивым, то уменьшение угла  $\psi$  возможно только до критического значения, после чего произойдет срез оставшейся части грунта по плоскости вершин грунтозацепов.

Уменьшение устойчивости призмы грунта ненарушенной структуры может произойти и при разрушении ее части  $TAG$ , находящейся у задней грани предыдущего грунтозацепа, давлением, действующим со стороны опорной поверхности трака (рисунок 1). Для определения предельной величины этого давления и положения образующейся площадки скольжения использовалась теория пассивного давления грунта на подпорные стенки с учетом предложенных выше рекомендаций. В этом случае подпорной стенкой является опорная поверхность трака, а удерживающей – площадка  $AT$ .

Если такое разрушение происходит, то необходим перерасчет устойчивости оставшейся ненарушенной части грунта  $TGBO$  (рисунок 1).

Если устойчивость призмы  $TGBO$  не нарушена, необходимо оценить угол наклона площадки скольжения по отношению к новому критическому углу:

$$\psi''_{кр} = \text{arctg} \frac{h}{(T - l_{OE} - l_{AG})},$$

где  $l_{AG}$  – длина отрезка  $AG$ .

При  $\psi < \psi''_{кр}$  происходит срез грунта по плоскости вершин грунтозацепов вследствие причин, рассмотренных выше.

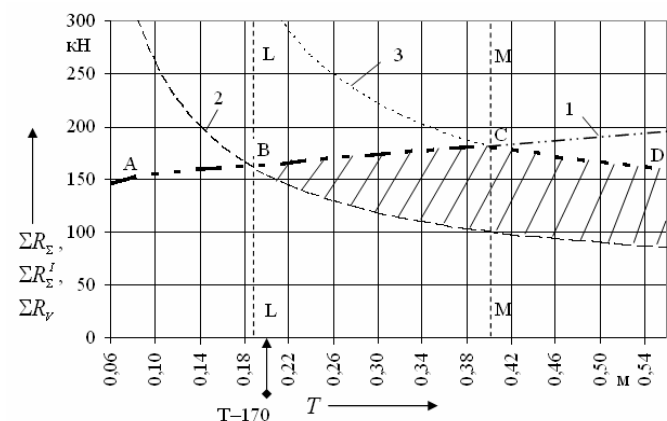
Еще одно ограничение внешней касательной силы связано с возможностью выклинивания трака из грунта. Оно происходит в том случае, когда сила, действующая со стороны вытесняемой призмы грунта на опорную часть трака, превышает вес трактора, приходящийся на один трак.

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 произойдет его срез между соседними грунтозацепами по той или иной схеме, либо – выклинивание трака вытесняемой призмой грунта.

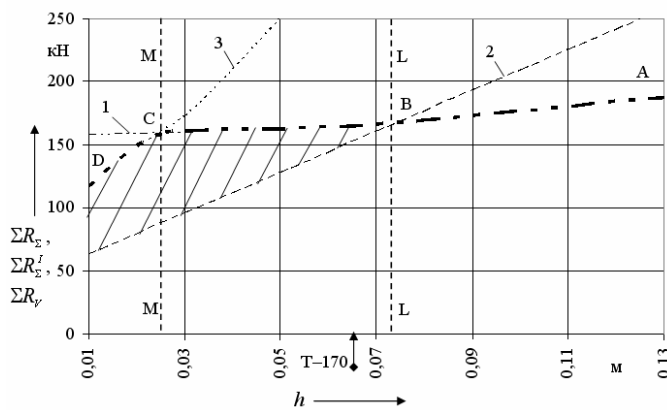
В трудах Селицкого С.С., Ляско М.И., Забавникова Н.А. и многих других авторов предлагается определять силу тяги движителя по сцеплению как сумму горизонтальных реакций грунта, действующих на каждый грунтозацеп гусеницы в отдельности. Такой подход сохранен и в данной работе. Принятый линейный закон распределения касательных реакций грунта по грунтозацепам позволил проанализировать напряженное состояние грунта перед каждым грунтозацепом в зависимости от его положения по длине гусеницы.

Изложенный в работе метод анализа взаимодействия траков гусеничного движителя с грунтом рассматривает последовательность взаимодействия трака с грунтом и позволяет определять параметры такого взаимодействия при увеличении внешней касательной силы, приложенной к траку, начиная с ее на-

чального значения, соответствующего первой фазе разрушения грунта, до предельного значения, при котором происходит либо срез грунта между грунтозацепами, либо выклинивание трака.



а)



б)

1 – касательная сила, необходимая для среза грунта ( $\Sigma R_{\Sigma}$ ); 2 – условная касательная сила, при которой появляется первичная площадка скольжения ( $\Sigma R_{\Sigma}'$ ); 3 – условная касательная сила, при которой траки выклиниваются из грунта ( $\Sigma R_v$ ); /// – зона протекания второй фазы

**Рисунок 5 – Влияние шага (а) и высоты (б) грунтозацепов на силы, характеризующие взаимодействие гусениц с грунтом**

на своя конечная схема разрушения грунта.

При относительно малом шаге (диапазон значений до отрезка LL) во время первой фазы происходит срез всего «кирпича» грунта, находящегося под гусеничным траком. Такой вариант является наиболее неблагоприятным.

При значениях шага, находящихся в диапазоне от 0,19 м до 0,4 м, расположенном между отрезками LL и MM, по мере увеличения внешней касательной силы, действующей на трак, происходит переформирование первичной

Решение уравнений, входящих в изложенный метод, является достаточно трудоемким вследствие использования итерационных способов расчета. Поэтому их решение осуществляется на ПЭВМ при помощи программного обеспечения, разработанного на основе предлагаемого метода.

*В третьей главе* приведены результаты теоретических исследований взаимодействия грунтозацепов гусеничных машин с грунтом. Расчеты выполнены применительно к трактору Т-170 с типовыми размерами грунтозацепов  $T=0,203$  м,  $H=0,065$  м. Рассматривался грунт III-ей категории с углом внутреннего трения  $\rho=28^0$  и удельным сцеплением  $c=60$  кПа.

Исследовано и проанализировано влияние шага грунтозацепов на максимальную силу тяги по сцеплению, реализуемую гусеничным движителем (жирно выделенная линия на рисунке 5, а). Установлено, что в рассматриваемых условиях существует три диапазона значений шага грунтозацепов, для каждого из которых характерна своя конечная схема разрушения грунта.

площадки скольжения до тех пор, пока не произойдет срез оставшейся призмы грунта между грунтозацепами.

При значениях шага свыше 0,4 м (диапазон правее отрезка ММ) переформирование площадки скольжения продолжается до выклинивания трака вытесняемой призмой грунта. При таком варианте не полностью реализуется несущая способность грунта, поскольку часть грунта между грунтозацепами остается неразрушенной.

Таким образом, при увеличении шага грунтозацепов величина максимальной силы тяги по сцеплению гусеничного движителя может увеличиваться до определенного значения.

Исследовано влияние высоты грунтозацепов на максимальную силу тяги по сцеплению (жирно выделенная линия на рисунке 5, б).

При малых значениях высоты (диапазон до отрезка ММ) имеет место выклинивание трака на вытесняемой призме грунта. В этом случае величина шага оказывается относительно большой, вследствие чего часть грунта между грунтозацепами остается неразрушенной и его несущая способность полностью не реализуется.

При значениях высоты в диапазоне от 0,22 м до 0,72 м (между отрезками LL и ММ) происходит переформирование первичной площадки скольжения. Предельная зона грунта, примыкающая к грунтозацепу, увеличивается до тех пор, пока не произойдет срез оставшейся части грунта.

При значениях высоты грунтозацепов свыше 0,72 м (диапазон правее отрезка LL) происходит срез всего “кирпича” грунта, находящегося под гусеничным траком во время первой фазы разрушения. Такая схема разрушения аналогична схеме при малых значениях шага грунтозацепов.

Таким образом, максимальная сила тяги, реализуемая движителем, интенсивно увеличивается с ростом высоты грунтозацепов до определенного значения (0,22 м), соответствующего границе между первым и вторым диапазоном (отрезок ММ). При дальнейшем увеличении высоты сила тяги изменяется только за счет увеличения площадей боковых торцов грунта.

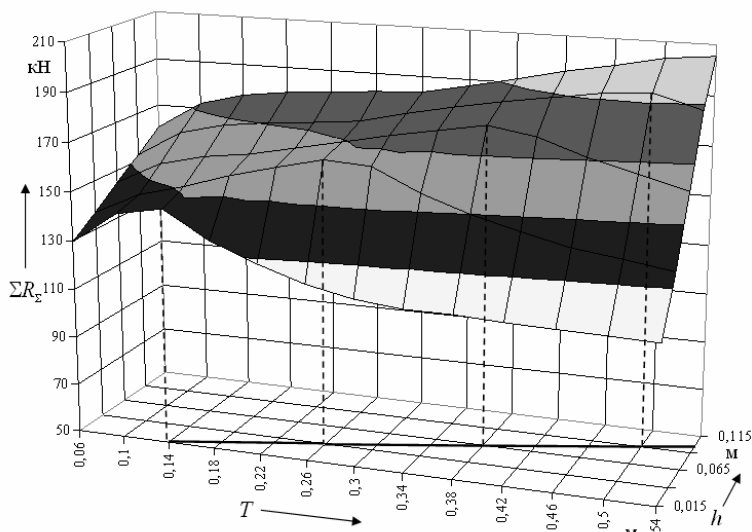
Аналитические исследования позволили установить рациональные соотношения между шагом и высотой грунтозацепов, при которых реализуемая траками сила тяги будет максимальной. Это соотношение для рассматриваемых выше условий изображено на рисунке 6 линией, расположенной в горизонтальной координатной плоскости, а для грунтов с различными физико-механическими свойствами – на рисунке 7.

Анализ влияния угла наклона грунтозацепов на силу тяги по сцеплению показал, что в диапазоне от  $\alpha = 70^\circ$  до  $\alpha = 110^\circ$  его влияние несущественно.

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить и установить рациональные соотношения между шагом и высотой грунтозацепов,

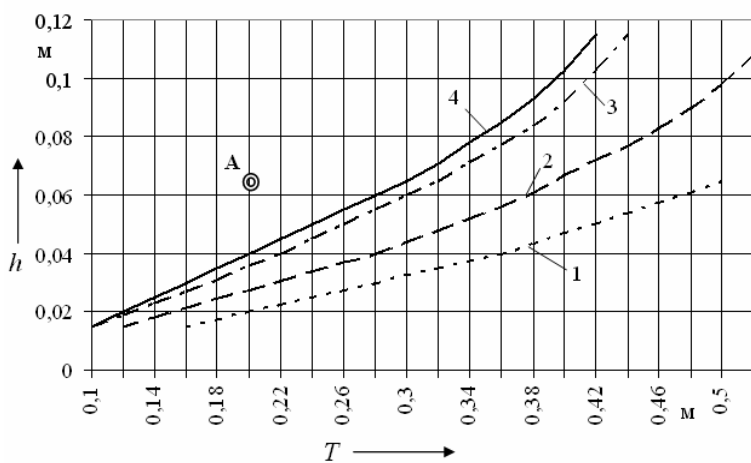
обеспечивающие максимальную величину силы тяги, реализуемой траком. Выявлены взаимосвязи между этими параметрами и схемами разрушения грунта.

**В четвертой главе** дано описание экспериментальных установок, приведены методики лабораторных исследований и методика определения необходимого числа опытов, представлены результаты экспериментальных исследований и сделан их сопоставительный анализ с теоретическими данными.



— линия рационального соотношения между шагом и высотой грунтозацепов

**Рисунок 6 – Влияние шага и высоты грунтозацепов на силу тяги по сцеплению**



1 – грунт с  $c=45$  кПа; 2 – грунт с  $c=60$  кПа; 3 – грунт с  $c=90$  кПа; 4 – грунт с  $c=105$  кПа; А – параметры грунтозацепов типовой конструкции движителя трактора Т-170

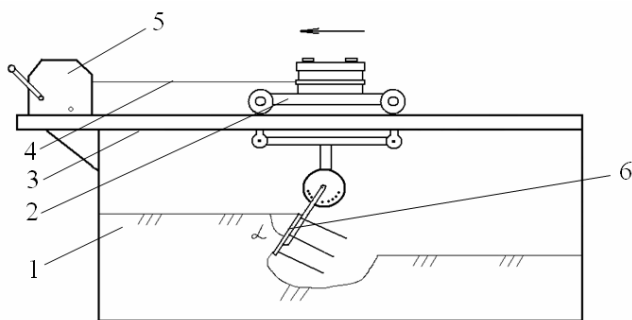
**Рисунок 7 – Рациональные соотношения между высотой и шагом грунтозацепов для разных грунтовых условий**

Установлено, что направление сил трения между грунтом и подпорной стенкой зависит от угла ее наклона. При надвигании подпорной стенки с малым углом наклона флюгеры отклоняются вниз, следовательно, грунт смещается относительно подпорной стенки к ее вершине (рисунок 9, а). Такое направление

даны методики лабораторных исследований и методика определения необходимого числа опытов, представлены результаты экспериментальных исследований и сделан их сопоставительный анализ с теоретическими данными.

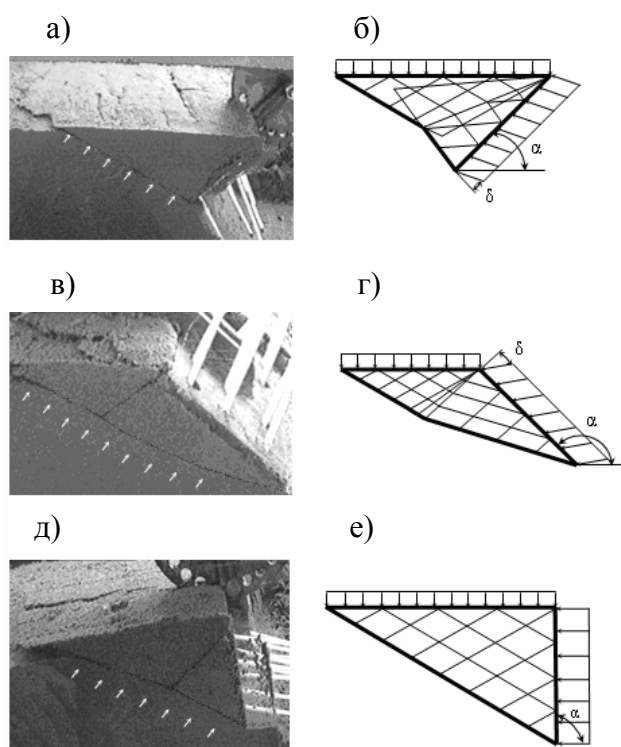
Для исследования разрушения грунта подпорной стенкой использовалась установка, изображенная на рисунке 8. Подпорная стенка устанавливалась на тележке, перемещаемой вдоль боковой стеклянной перегородки с малой скоростью. Это обеспечивало возможность визуального наблюдения за разрушением грунта.

Направление смещения грунта по поверхности подпорной стенки фиксировалось при помощи флюгеров, которые были установлены сквозь отверстия в подпорной стенке. Через боковую стеклянную перегородку производилась видеосъемка, покадровый просмотр которой позволил определить положение образующихся площадок скольжения.



1 – стеклянная перегородка; 2 – тележка;  
3 – направляющие; 4 – тросик; 5 – барабан;  
6 – подпорная стенка с флюгерами

**Рисунок 8 – Схема  
экспериментальной установки**



а – с малым углом наклона ( $\alpha=45^0$ );  
в – с большим углом наклона ( $\alpha=135^0$ );  
д – с промежуточным углом наклона  
( $\alpha=90^0$ ); б, г, е – теоретическое положение  
площадок скольжения

**Рисунок 9 – Разрушение грунта  
подпорной стенкой**

ных стенок с промежуточными и большими углами наклона являются обоснованными и позволяют повысить точность вычислений пассивного давления грунта на подпорные стенки.

Для экспериментального подтверждения результатов, полученных по предлагаемому методу, проведены исследования взаимодействия грунтозаце-

смещения грунта является общепринятым.

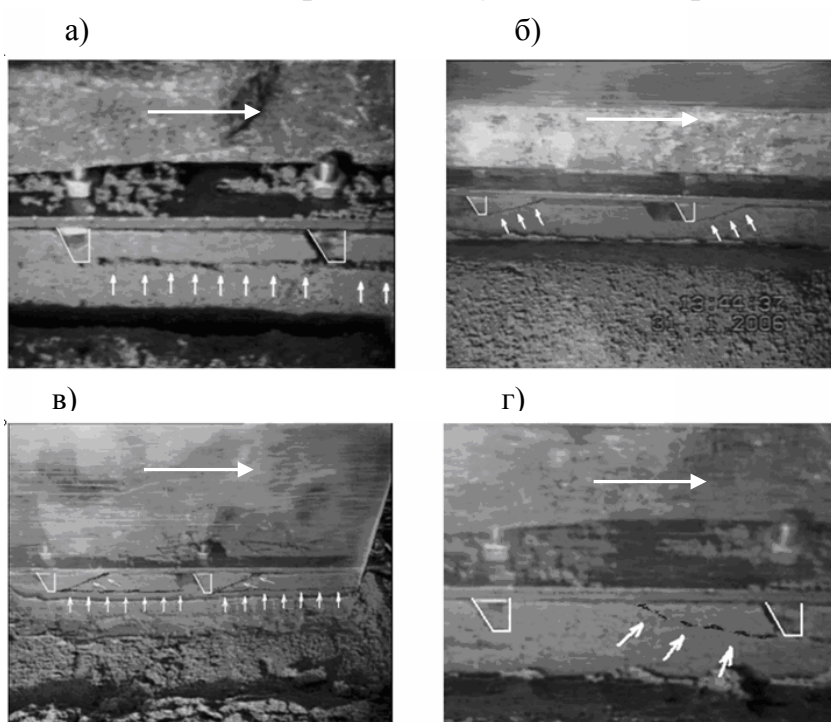
Иная картина наблюдается при надвигании подпорной стенки с большим углом наклона. В этом случае флюгеры отклоняются вверх, что свидетельствует о смещении грунта относительно подпорной стенки к ее основанию вплоть до момента его разрушения (рисунок 9, в).

При промежуточных углах наклона флюгеры не отклоняются до разрушения грунта. Очевидно, что и грунт не смещается относительно подпорной стенки. Такое смещение появляется лишь тогда, когда отделенная призма грунта будет вытесняться вверх, что и зафиксировано на рисунке 9, д.

Вывод о влиянии угла наклона подпорной стенки на направление сил трения подтверждается и положением площадок скольжения, построенных для условий эксперимента с учетом действительного направления сил трения (рисунок 9, б, г, е), определенного в ходе проведенных экспериментальных исследований. Из рисунка 9 видно, что угловое положение площадок скольжения, полученное экспериментально, совпадает с расчетным положением во всех случаях. Таким образом, предложенные рекомендации по учету направления сил трения для подпор-

пов гусеничного движителя с грунтом. Использовался грунтовый канал, в котором устанавливалось тяговое устройство с динамометром, служащее для перемещения модели траков гусеничного движителя. Для визуального исследования процессов, протекающих в грунте, вдоль боковой стороны модели траков устанавливалась стеклянная стенка. Модель траков позволяла изменять шаг грунтозацепов до 150 мм, а значение высоты выбирать из ряда 13 мм, 20,5 мм, 26 мм. Модель имитировала часть гусеничной цепи движителя трактора Т-170 в масштабе 1:5.

При проведении экспериментов динамометром измерялась касательная сила сопротивления, действующая со стороны грунта на модель траков при различных сочетаниях значений шага, высоты и угла наклона грунтозацепов. Для каждого эксперимента осуществлялся расчет параметров на ПЭВМ.



**Рисунок 10 – Разрушение грунта грунтозацепами**

Покадровый просмотр видеозаписей на компьютере позволил подтвердить варианты разрушения грунта, рассмотренные во второй главе, и их соответствие условиям нагружения трака (рисунок 10). К вариантам разрушения грунта относятся срез грунта по плоскости вершин грунтозацепов (а), выклинивание траков из грунта (б), образование вытесняемой призмы грунта с последующим срезом грунта ненарушенной структуры (в), отделение призмы грунта, находящейся у задней грани предыдущего грунтозацепа (г).

Таким образом, подтверждены теоретические положения о процессе разрушения грунта, находящегося между грунтозацепами гусеничного движителя. Следовательно, разработанный метод является идентификационным исследуемому процессу.

Сходимость результатов экспериментальных и расчетных значений касательной силы сопротивления грунта при варьировании параметров грунтозацепов в исследуемых диапазонах находится в пределах от 3% до 9%, что подтверждает адекватность результатов, полученных по разработанному методу, экспериментальным данным.

Покадровый просмотр видеозаписей на



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## Основные научные результаты диссертации

1. На основе закономерностей теории предельного состояния грунтовых масс и основных положений, используемых в теории резания грунта, разработан метод анализа взаимодействия грунта с траком гусеничного движителя, учитывающий многофазность и альтернативные варианты разрушения грунта, позволяющий имитировать на ПЭВМ это взаимодействие с целью определения рациональных геометрических параметров грунтозацепов [2, 4, 5, 7, 12, 13, 14].

2. Предложенный метод анализа, основные положения которого подтверждены экспериментальными исследованиями физических процессов разрушения грунта грунтозацепами, позволил научно обосновать [4, 5, 7, 13]:

- существование двух фаз разрушения грунта грунтозацепами;
- условия появления первичной площадки скольжения и ее переформирования во второй фазе;
- альтернативные варианты разрушения грунта траком:
  - срез грунта между грунтозацепами на ранней стадии взаимодействия;
  - срез грунта после образования перед грунтозацепом вытесняемой призмы;
  - срез грунта при наклоне площадки скольжения до критических значений;
  - выклинивание трака из грунта на вытесняемой призме;
  - разрушение грунта у задней грани предыдущего грунтозацепа;
- наиболее полное использование несущей способности грунта при его срезе во время второй фазы разрушения в условиях, близких к условиям выклинивания трака.

3. Исходя из теоретических исследований, проведенных на ПЭВМ с использованием разработанного программного обеспечения на основе универсального языка программирования высокого уровня, установлены взаимосвязи между геометрическими параметрами грунтозацепов и реализуемой ими силой тяги применительно к трактору Т-170 [4, 5, 16]:

- увеличение шага грунтозацепов до значений 390..410 мм позволяет увеличить силу тяги по сцеплению на 9–11%;
- уменьшение высоты грунтозацепов до значений 22..24 мм не оказывает существенного влияния на силу тяги по сцеплению.

Получены рациональные соотношения между шагом и высотой, обеспечивающие наилучшие тягово-сцепные качества гусеничной машины при ее работе на различных категориях грунта.

4. Из анализа существующих методов расчета и проведенных экспериментальных исследований с фиксацией положения площадок скольжения в момент разрушения грунта видеосъемкой выявлена взаимосвязь между углом наклона подпорной стенки и направлением сил трения, на основании которой уточнена методика расчета пассивного давления грунта на подпорную стенку при промежуточных и больших углах ее наклона [1, 3, 6, 8, 9, 10, 11].

5. Сопоставительный анализ результатов, полученных по разработанному методу, с экспериментальными данными показал, что их расхождение не превышает 9%. При этом подтверждена качественная картина разрушения грунта. На основе сопоставления расчетных схем разрушения реальным схемам установлено, что предлагаемый метод может быть использован для выбора и оптимизации рациональных геометрических параметров грунтозацепов [15, 17].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанный метод анализа может использоваться в специализированных конструкторских отделах предприятий, разрабатывающих движители гусеничных тягачей. Возможно его применение и при проектировании гусеничных лент, одеваемых на пневматические колеса тракторов.

По результатам анализа проведенных исследований предложены устройства, позволяющие повысить силу тяги по сцеплению гусеничного движителя на 9–11%, новизна которых подтверждена авторскими свидетельствами на полезную модель [20, 21], а также предложены устройства, способствующие заглублению грунтозацепов, новизна которых подтверждена авторскими свидетельствами на изобретение [18, 19].

Программное обеспечение, разработанное на основе предлагаемого метода, принято к использованию РУП «Минский Тракторный завод» и в учебном процессе кафедры «СДПТМиО». Экономическая эффективность от использования программного обеспечения и полученных при его помощи результатов достигается за счет:

- снижения времени на проектирование при одновременном улучшении его качества посредством учета большего количества исходных параметров и проведения расчетов по современным методикам;

- снижения затрат на проведение экспериментальных исследований.

Дальнейшее развитие научных положений, изложенных в этой работе, целесообразно проводить по следующим направлениям:

- оптимизация формы и расстановки составных грунтозацепов по длине гусеничной цепи;

- совершенствование метода расчета тяговых усилий применительно к косорасположенным грунтозацепам.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### *Статьи в журналах из перечня изданий ВАК*

1. Кулабухов, А.В. Особенности расчета пассивного давления грунта на подпорную стенку / А.В. Кулабухов // Вестн. МГТУ. – 2005. – №1. – С. 147–151.
2. Берестов, Е.И. Моделирование взаимодействия грунтозацепов гусеничного движителя с грунтом / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов // Вестн. МГТУ. – 2005. – №2. – С. 21–26.
3. Берестов Е.И. Экспериментальные исследования пассивного давления грунта на подпорную стенку / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов // Вестн. Бел.-Рос. ун-та. – 2006. – №3. – С. 5–12.
4. Берестов, Е.И. О возможности оптимизации параметров грунтозацепов гусеничных машин / Е.И. Берестов, И.В. Лесковец, А.В. Кулабухов. // Механизация строительства. – 2006. – №10. – С. 25–28.
5. Берестов, Е.И. Методика расчета параметров взаимодействия грунтозацепов гусеничных машин с грунтом / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов. // Строительные и дорожные машины. – 2008. – №3. – С. 46–49.

### *Материалы научных конференций*

6. Кулабухов, А.В. Особенности методики определения пассивного давления грунта на подпорную стенку / А.В. Кулабухов // Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и оборудование: сб. науч. тр. молодых ученых / Белорусско-Российский ун-т; под ред. Л.А. Сиваченко. – Могилев, 2004. – С. 9–10.
7. Кулабухов, А.В. К вопросу взаимодействия грунтозацепов движителя с грунтом / А.В. Кулабухов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Могилев 29 янв. 2004 г. / Белорусско-Российский ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2004. – С. 109.
8. Берестов, Е.И. Особенности расчета пассивного давления грунта на подпорную стенку / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2004 г.: в 2 ч. / Белорусско-Российский ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2004. – Ч. 2. – С. 7–8.
9. Кулабухов, А.В. Применение ЭВМ для расчета пассивного давления на подпорную стенку / А.В. Кулабухов // НИРС-2004: материалы IX респ. научн. конф. студентов и аспирантов Республики Беларусь, Гродно 26–27 мая 2004 г.:

в 8 ч. / Гродн. гос. ун-т; редкол.: А.И. Жук [и др.]. – Гродно, 2004. – Ч. 3. – С. 124–126.

10. Кулабухов, А.В. Расчет подпорных стенок при пассивном давлении грунта / А.В. Кулабухов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Могилев 27 янв. 2005 г./ Белорусско-Российский ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – С. 10–12.

11. Кулабухов, А.В. Методика экспериментальных исследований пассивного давления грунта на подпорную стенку / А.В. Кулабухов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Могилев 27 янв. 2005 г. / Белорусско-Российский ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – С. 144.

12. Берестов, Е.И. Взаимодействие гусеничного движителя с грунтом / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2005 г.: в 2 ч. / Белорусско-Российский ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – Ч. 1. – С. 229.

13. Берестов, Е.И. Расчет сил действующих на грунтозацепы траков / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов // Современные научно-технические проблемы транспорта: сборник 3-й международной науч.-техн. конф., Ульяновск, 20–22 окт. 2005 г. / Ульян. гос. техн. ун-т.; редкол.: И.Ф. Дьяков [и др.]. – Ульяновск, 2005. – С. 3–5.

14. Кулабухов, А.В. К вопросу влияния геометрических параметров грунтозацепов гусеничных машин на их тяговые свойства / А.В. Кулабухов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Могилев 26 янв. 2006 г. / Белорусско-Российский ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2006. – С. 131.

15. Берестов, Е.И. Экспериментальные исследования влияния геометрических параметров грунтозацепов гусеничных машин на их тяговые свойства. / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апр. 2006 г.: в 2 ч. / Белорусско-Российский ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2006. – Ч. 2. – С. 7.

16. Берестов, Е.И. О возможности оптимизации параметров грунтозацепов гусеничных машин / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов // Интерстроймех-2006: сборник материалов междунар. науч.-техн. конф., Москва, 19–22 сент. 2006 г. / Московский гос. строит. ун-т; редкол.: Е.М. Кудрявцев [и др.]. – Москва, 2006. – С. 40–43.

17. Берестов, Е.И. Экспериментальные исследования процесса отделения стружки при резании грунта / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов // Интерстроймех-2007: сборник материалов междунар. науч.-техн. конф., Самара, 11–14 сент. 2007 г. / Самарск. гос. арх.-строит. ун-т; редкол.: М.И. Базальников [и др.]. – Самара, 2007. – С. 87–89.

### ***Патенты***

18. Гусеничный движитель: пат. 3253 Респ. Беларусь, МПК7 В 62 D 55/00 / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов; заявитель Бел.-Рос. ун-т. – № и 20060429; заявл. 27.06.06; опубл. 30.12.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 6. – С. 179.

19. Гусеничное транспортное средство: пат. 3296 Респ. Беларусь, МПК7 В 62 D 55/26 / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов, О.В. Пасюкова; заявитель Бел.-Рос. ун-т. – № и 20060463; заявл. 10.07.06; опубл. 28.02.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 1. – С. 167.

20. Гусеничное транспортное средство: пат. 9833 Респ. Беларусь, МПК6 В 62 D 55/00 / Е.И. Берестов, И.В. Лесковец, А.В. Кулабухов; заявитель Бел.-Рос. ун-т. – № а 20050521; заявл. 26.05.05; опубл. 30.10.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 5. – С. 85.

21. Гусеничное транспортное средство: пат. 10144 Респ. Беларусь, МПК6 В 62 D 55/00 / Е.И. Берестов, В.А. Кулабухов, А.В. Кулабухов; заявитель Бел.-Рос. ун-т. – № а 20050520; заявл. 26.05.05; опубл. 30.12.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 6. – С. 77.

## РЭЗЮМЕ

Кулабухаў Арцём Уладзіміравіч

Павышэнне цягава-счэпных якасцей гусенічных цягачоў шляхам выбару геаметрычных параметраў грунтазацэпаў

**Ключавыя словы:** метадыка разліку; гусенічны рухач; трак; грунтазацэп; вугал нахілу пляцоўкі слізгання; сілавыя і геаметрычныя параметры.

**Мэта работы:** распрацоўка аналітычнага метаду аналізу ўзаемадзеяння тракаў гусенічнага рухача з грунтам, які забяспечвае выбар геаметрычных параметраў грунтазацэпаў, што паляпшаюць цягава-счэпныя якасці рухачоў гусенічных цягачоў.

**Стварэнне аналітычнага метаду аналізу базіравалася** на метадалагічных прынцыпах тэорыі гранічнага стану грунтавых мас і на базе сучасных уяўленняў пра механіку разбурэння грунту.

**Навуковая навізна атрыманых вынікаў.** Абгрунтавана тэарэтычна і пацверджана эксперыментальна палажэнне аб шматфазнасці разбурэння грунту, размешчанага пад тракам гусеніцы. Выяўлены альтэрнатыўныя варыянты разбурэння грунту і ўмовах іх цягання. На аснове аналізу фізічнага малюнка разбурэння грунту распрацаваны аналітычны метад разліку геаметрычных і сілавых параметраў, характарызуючых гэта разбурэнне, які ўлічвае фізіка-механічныя ўласцівасці грунту і геаметрычныя параметры грунтазацэпаў. Метад уключае ў сябе аналітычны разлік вугла нахілу пляцоўкі слізгання, якая абмяжоўвае зону гранічнага стану грунту перад грунтазацэпам, разлік устойлівасці грунту непарушанай структуры, размешчанага паміж грунтазацэпамі ў залежнасці ад нагрузак, дзейнічаючых на тракі, а таксама разлік сілавых параметраў. Выяўлены ўплыў на сілу цягі па счাপленню асноўных геаметрычных параметраў грунтазацэпаў, да якіх адносяцца іх вышыня, крок і вугал нахілу, устаноўлены рацыянальныя адносіны паміж крокам і вышыней грунтазацэпаў пры рабоце на грунтах з рознымі фізіка-механічнымі ўласцівасцямі.

Даследаваны асаблівасці разбурэння грунту падпорнай сценкай, на аснове якіх дадзены рэкамендацыі па разліку падпорных сцен з вялікім вуглом нахілу.

Прапанаваны метад можа выкарыстоўвацца для аналізу ўзаемадзеяння тракаў рухачоў гусенічных цягачоў з грунтам у залежнасці ад датычнай сілы цягі з мэтай выбару геаметрычных параметраў грунтазацэпаў, забяспечваючых павелічэнне цягава-счэпных якасцей гусенічных цягачоў.

**Галіна прымянення.** Праектаванне рухачоў гусенічных цягачоў.

## РЕЗЮМЕ

Кулабухов Артем Владимирович

Улучшение тягово-сцепных качеств гусеничных тягачей путем выбора геометрических параметров грунтозацепов

**Ключевые слова:** метод анализа; гусеничный движитель; трак; грунтозацеп; угол наклона площадки скольжения; силовые и геометрические параметры.

**Цель работы:** разработка аналитического метода анализа взаимодействия траков гусеничного движителя с грунтом, обеспечивающего выбор геометрических параметров грунтозацепов, улучшающих тягово-сцепные качества движителей гусеничных тягачей.

**Создание аналитического метода анализа базировалось** на методологических принципах теории предельного состояния грунтовых масс и на основе современных представлений о механике разрушения грунта.

**Научная новизна полученных результатов.** Обосновано теоретически и подтверждено экспериментально положение о многофазности разрушения грунта, расположенного под траком гусеницы. Выявлены альтернативные варианты разрушения грунта и условия их протекания. На основании анализа физической картины разрушения грунта разработан аналитический метод расчета геометрических и силовых параметров, характеризующих это разрушение, учитывающий физико-механические свойства грунта и геометрические параметры грунтозацепов. Метод включает в себя аналитический расчет угла наклона площадки скольжения, ограничивающей зону предельного состояния грунта перед грунтозацепом, расчет устойчивости грунта ненарушенной структуры, расположенного между грунтозацепами в зависимости от нагрузок, действующих на трак, а также расчет силовых параметров. Выявлено влияние на силу тяги по сцеплению основных геометрических параметров грунтозацепов, к которым относятся их высота, шаг и угол наклона, установлены рациональные соотношения между шагом и высотой грунтозацепов при работе на грунтах с различными физико-механическими свойствами.

Исследованы особенности разрушения грунта подпорной стенкой, на основании которых даны рекомендации по расчету подпорных стен с большим углом наклона.

Предлагаемый метод может использоваться для анализа взаимодействия траков движителей гусеничных тягачей с грунтом в зависимости от касательной силы тяги с целью выбора геометрических параметров грунтозацепов, обеспечивающих увеличение тягово-сцепных качеств гусеничных тягачей.

**Область применения.** Проектирование движителей гусеничных тягачей.

## RESUME

Kulabuhov Artem Vladimirovich

Improvement of traction and coupling properties of track-type tractors by choosing geometrical parameters of soil gears

**Key words:** analysis method; track-type propulsive agent; track; soil gear; sliding area incline angle; force and geometrical parameters.

**Purpose of the work:** creation of the analytical method of analysis of track-type tractors tracks with soil, providing to choose geometrical parameters of lugs, improving traction and coupling properties of propulsive agents of track-type tractors.

**Creation of analytical method of analysis was based** on methodological principles of limit soil mass condition and theory based on modern notions about soil destruction mechanics.

**Scientific newness of the results.** The proposition about polyphase of soil destruction which is under the track of the crawler has been theoretically substantiated and experimentally proved. Alternative variants of soil destruction and conditions of their progress have been found out. On the basis of soil destruction physical picture analysis an analytical method of calculation of geometrical and force parameters characterizing the destruction has been worked out. The method takes into account physical and mechanical soil properties and geometrical parameters of soil gears. The method includes analytical calculation of sliding area incline angle, limiting the limit condition zone of soil gear, soil firmness calculation of not broken structure, which is between soil gears depending on loads given to a track, and force parameters calculation. Influence on the main geometrical parameters of soil gears such as height, step and incline angle on traction force has been found. Rational relations between step and height of soil gears while operating on soils with different physical and mechanical properties have been stated.

Peculiarities of soil destruction by a breast-wall have been researched. Recommendations on breast-wall with a big inclination angle calculation have been given.

The method offered can be used for the analysis of the interaction of tracks of crawler tractor propellers with soil depending on the tangential force of the traction with the purpose of choosing grouser geometric parameters providing the increase in traction-engagement properties of crawler tractors.

**Application field.** Track-type tractors propulsive agent design.



**КУЛАБУХОВ** Артем Владимирович

**УЛУЧШЕНИЕ ТЯГОВО-СЦЕПНЫХ КАЧЕСТВ ГУСЕНИЧНЫХ  
ТЯГАЧЕЙ ПУТЕМ ВЫБОРА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ГРУНТОЗАЦЕПОВ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины»

Подписано в печать 25.04.2008 г. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать трафаретная. Усл.-печ. л. 1,63. Уч.-изд. л.1,5. Тираж 100 экз. Заказ №278

Издательство и полиграфическое исполнение  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет»  
ЛИ № 02330/375 от 29.06.2004 г.  
212030, г. Могилев, пр. Мира, 43