

О ПОВЫШЕНИИ СЦЕПЛЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН С ГРУНТОМ

Берестов Е.И., докт. техн. наук, Кулабухов А.В., канд. техн. наук
(Белорусско-Российский университет, г. Могилев)

До настоящего времени вопросы взаимодействия гусеничной цепи с грунтом нельзя считать окончательно решенными. Известно, что гусеничные тракторы, работающие в странах СНГ практически во всех климатических зонах, вне зависимости от вида грунтовых условий и времени использования, оснащены одними и теми же гусеницами. Это приводит к тому, что на многих типах грунта гусеничные тракторы не в полной мере используют свои тяговые возможности, что снижает их эксплуатационные показатели.

При взаимодействии гусеничной цепи с грунтом способность последнего сопротивляться нагрузкам будет зависеть не только от его физико-механических свойств, но и от схемы его нагружения, которая во многом зависит от параметров трактора и гусеничного движителя (вес трактора, высота и шаг грунтозацепов). При этом в области грунта, находящейся под траком в напряженном состоянии, возникают разнообразные по своему виду напряжения и деформации. В зависимости от совокупного действия этих факторов и будет в конечном итоге формироваться опорный объем грунта, несущая способность которого будет определять тяговые возможности машины. Для улучшения тяговых возможностей необходимо изменять геометрические параметры и расположение грунтозацепов таким образом, чтобы поля напряжений охватывали по возможности большие области грунта при формировании опорного объема.

Однако чаще всего для увеличения тягово-сцепных качеств гусеничных машин конструкторы идут по наиболее простому пути увеличения веса машины.

Проанализируем эти варианты.

Принцип работы гусеничного движителя предполагает, что в зацеплении с грунтом находится разное количество грунтозацепов. Исследованиями [1] установлено, что при выходе из зацепления с грунтом последнего грунтозацепа, действовавшее на него тяговое усилие распределяется между остальными рабочими грунтозацепами. Таким образом, для того, чтобы грунт оказывал прежнее сопротивление, «подпрессовка» грунта на каждом грунтозацепе должна увеличиться. Поскольку для первого грунтозацепа эта «подпрессовка» будет единичной, то и усилие, действующие со стороны грунта на грунтозацеп, будет минимальным, и, соответственно, для последнего грунтозацепа эти параметры будут максимальными. Следовательно, каждый предыдущий грунтозацеп, находящийся в контакте с грунтом, нагружен меньше каждого последующего, при этом срез грунта

последним грунтозацепом приводит к полному буксованию всей машины. Поэтому расчетная схема, при которой распределение усилий, действующих на рабочие поверхности грунтозацепов, будет изменяться линейно по треугольной эпюре, является приемлемой.

Рассмотрим составляющие силы тяги по сцеплению, которая складывается из сил трения траков и грунтозацепов о грунт, и сил, действующих на передние грани грунтозацепов двух гусениц. Упрощенно силу тяги по сцеплению можно определить следующим образом

$$P_{сц} = G\mu + BTcn, \quad (1)$$

где G - вес трактора;

μ - коэффициент трения гусениц о грунт (коэффициент внешнего трения);

B - ширина гусеничной цепи;

T - шаг грунтозацепов;

c - удельное сцепление грунта;

n - количество взаимодействующих с грунтом грунтозацепов на одной гусеничной ленте.

Формула (1) образована на основе известного уравнения Кулона, характеризующего сопротивление грунта сдвигу. Первая часть формулы дает величину сил трения траков гусеницы о грунт, вторая – сопротивление от сил сцепления на поверхностях площадок сдвига, действующее на рабочие поверхности грунтозацепов двух гусеничных лент, при этом учитывается принятая треугольная эпюра распределения усилий между ними в момент среза грунта последним грунтозацепом.

Переходя к коэффициенту сцепления, получим

$$\varphi = \frac{P_{сц}}{G} = \mu + \frac{BTcn}{G}, \quad (2)$$

Рассмотрим взаимодействие движителя трактора Т-170 с грунтом, имеющем удельное сцепление $c \approx 60 \text{ кПа}$, угол внутреннего трения $\rho = 28^\circ$ и угол внешнего трения $\omega = 25^\circ$ ($\mu \approx 0,47$). Принятые свойства грунта соответствуют II-III категории, наиболее распространенной в карьерах. Трактор Т-170 имеет следующие исходные параметры: $G = 170 \text{ кН}$ – вес трактора без навесного оборудования; $L = 3,2 \text{ м}$ – длина рабочей поверхности гусеницы; $B = 0,5 \text{ м}$ – ширина гусеницы, $T = 0,205 \text{ м}$ – шаг грунтозацепов.

Расчеты показывают, что при увеличении веса трактора на 17,6%, со 170 кН до 200 кН (например, при установке навесного оборудования бульдозера), сила тяги по сцеплению, рассчитанная по выражению (1) увеличивается на 8,1% (с $P_{сц} = 178 \text{ кН}$ до $P_{сц} = 192,4 \text{ кН}$), но при этом коэффициент

сцепления, рассчитанный по выражению (2) снижается на 8,8% (с $\varphi = 1,05$ до $\varphi = 0,96$).

Уравнения (1) и (2), хотя и являются достаточно упрощенными, позволяют сделать вывод о том, что, несмотря на увеличение максимально возможной силы тяги по сцеплению за счет увеличения сцепного веса машины, коэффициент сцепления даже не остается на прежнем уровне, а уменьшается. Это во многом обуславливается тем, что при увеличении сцепного веса увеличиваются в основном силы трения гусеничной цепи о грунт, а часть тягового усилия, реализуемая передними гранями грунтозацепов, затрачиваемая на срезание «кирпичиков» грунта между грунтозацепами, играет все меньшую роль в общем балансе тягово-сцепных сил движителя.

Это заставляет задуматься о том, является ли путь увеличения силы тяги по сцеплению гусеничной машины за счет увеличения ее сцепного веса рациональным. Особенно с учетом того, что на передвижение более тяжелых машин при их эксплуатации требуются дополнительные затраты топлива, что актуально в настоящее время при его дороговизне. По этим причинам такие машины становятся менее конкурентоспособными.

К сожалению, существовавшие до настоящего времени аналитические методы расчета силы тяги по сцеплению не позволяют нам оценить в полной мере влияния геометрических параметров грунтозацепов на тягово-сцепные качества гусеничной машины, а также выявить наиболее рациональные их значения при различном весе машины и разных условиях ее работы.

Для решения такой задачи авторами разработан метод [2] анализа взаимодействия трака гусеничного движителя с грунтом, основанный на современных представлениях о многофазности разрушения грунта. Такой подход впервые был использован и хорошо зарекомендовал себя при расчете сил сопротивления грунта в процессе его резания [3], который во многом аналогичен исследуемому процессу, хотя и решает противоположную задачу. При резании необходимо снижать, а не увеличивать сопротивление.

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

При расчете первой фазы разрушения рассматриваются два возможных варианта появления площадки скольжения:

- образование площадки скольжения OT , совпадающей с плоскостями вершин грунтозацепов;
- образование первичной площадки скольжения OB' , выходящей к опорной поверхности трака.

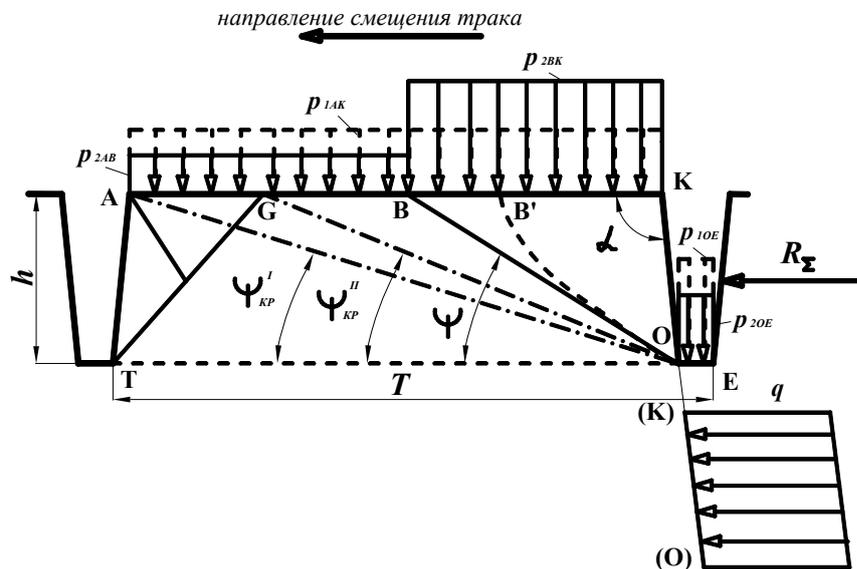


Рисунок 1 – Общая схема разрушения грунта

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

$$R^0 = B(T - l_{OE})(c + p_{1AK} \operatorname{tg} \rho) + 2S_{ТАКО} (c + \xi p_{1AK} \operatorname{tg} \rho), \quad (3)$$

где l_{OE} – толщина грунтозацепа;

p_{1AK} – нормальное давление, действующее со стороны опорной поверхности трака AK на грунт;

$S_{ТАКО}$ – площадь бокового торца “кирпича” грунта;

ξ – 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

$$R_{\Sigma}^0 = R^0 + p_{1OE} l_{OE} B \operatorname{tg} \omega, \quad (4)$$

где p_{1OE} – нормальное давление, действующее на грунт со стороны вершины грунтозацепа.

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 с использованием теории пассивного давления грунта на подпорную стенку.

При расчете касательной силы, действующей на переднюю грань грунтозацепа, кроме давления q^0 дополнительно учитываются сопротивления, действующие по боковым торцам отделенной призмы грунта

$$R' = q^0 S_{OK} + 2S_{OB'K} (c + \xi q^0 \operatorname{tg} \rho), \quad (5)$$

где S_{OK} – площадь передней грани грунтозацепа;

$S_{OB'K}$ – площадь боковой поверхности отделенной призмы $OB'K$ грунта.

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

$$R'_{\Sigma} = R' + p_{1AK} (T - l_{OE}) B \operatorname{tg} \omega + p_{1OE} l_{OE} B \operatorname{tg} \omega. \quad (6)$$

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 от дальнейшего разрушения действующей на него нагрузкой.

Методика расчета второй фазы разрушения заключается в следующем. Для определения угла ψ наклона площадки скольжения OB используется аналитический метод [2] расчета угла сдвига по граничным условиям.

Применительно к рассматриваемому случаю, угол ψ можно определить по уравнению

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \frac{1}{2} (\Delta_1 - \delta_1) - \frac{\operatorname{ctg} \rho}{2} \ln(A) \quad (7)$$

в том случае, если

$$q \geq p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)} \cos \rho. \quad (8)$$

В противном случае

$$\psi = \frac{3}{4} \pi - \frac{\rho}{2} - \frac{1}{2} (\Delta_1 - \delta_1) + \Delta_p, \quad (9)$$

где $A = \frac{q \sin(\Delta_1 - \delta_1)}{p \sin \Delta_1 \cos \rho}$;

$$\Delta_p = \arcsin\left(\frac{\sin \delta_p}{\sin \rho}\right);$$

$$\Delta_1 = \arcsin\left(\frac{\sin \delta_1}{\sin \rho}\right);$$

$$\delta_p = \mp \arccos\left(\frac{\cos \rho (1 + A)}{2 \sqrt{A}}\right);$$

δ_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 грунта OBK соответственно;

δ_1 – угол отклонения давления p .

Уравнения для определения давлений p и q можно получить из схемы, изображенной на рисунке 2

$$p = \sqrt{(p_{AB}^0 \sin \omega)^2 + (p_{AB}^0 \cos \omega + H)^2}; \quad (10)$$

$$q = e + \frac{c}{\sin \rho} = \frac{E_{OB} \sin \psi}{Bh} + \frac{c}{\sin \rho}, \quad (11)$$

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 .

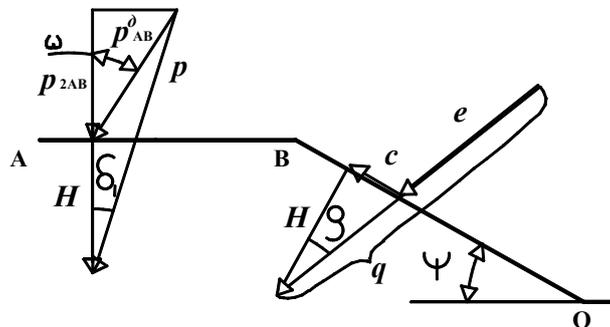


Рисунок 2 – Схема давлений при определении угла наклона площадки скольжения

Величина силы E_{OB} , входящей в уравнение (11), определяется из условий равновесия вытесняемой призмы грунта (рисунок 3)

$$E_{OB} = \frac{R_{OK} - C_{OB} \cos \psi}{\sin(\rho + \psi)}, \quad (12)$$

$$P_{BK} = E_{OB} \cos(\rho + \psi) - C_{OB} \sin \psi, \quad (13)$$

где $C_{OB} = Bh / \sin \psi$ – сила сцепления по площадке OB ;

h – высота грунтозацепа;

P_{BK} – сила, действующая со стороны опорной части трака;

R_{OK} – сила, действующая со стороны передней грани грунтозацепа.

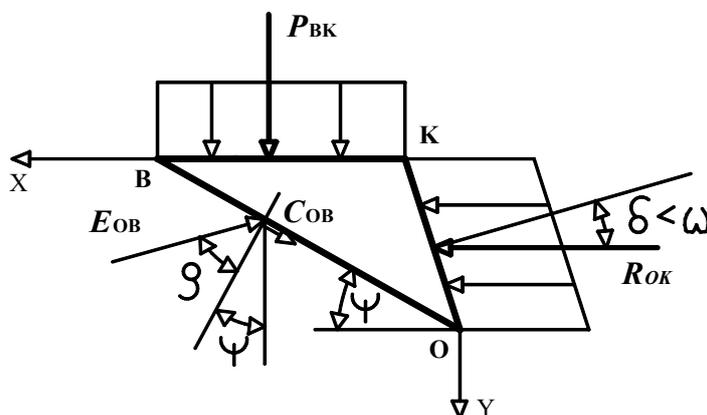


Рисунок 3 – Расчетная схема сил, действующих на вытесняемую призму грунта

Уравнения (12) и (13) позволяют рассчитать величины сил P_{BK} и E_{OB} при заданных значениях силы R_{OK} .

Использование этих уравнений при решении системы уравнений (7)...(11) позволяет получить искомое значение угла ψ для любого заданного значения силы R_{OK} , начиная со значения, при котором образуется первичная площадка скольжения. Тогда полная величина касательной силы R^II , действующей во время второй фазы разрушения на переднюю грань грунтозацепа, будет определяться по уравнению

$$R^II = R_{OK} + 2S_{OBK} (c + \xi q_R \operatorname{tg} \rho), \quad (14)$$

где $q_R = R_{OK} \sin \alpha / (Bh)$ – давление от силы R_{OK} , действующее на площадку OK ;

S_{OBK} – площадь бокового торца призмы OBK (рис. 3).

В уравнении (14) дополнительно учитываются сопротивления по боковым торцам вытесняемой призмы.

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

$$R''_{\Sigma} = R'' + B \operatorname{tg} \omega (p_{2AB} l_{AB} + p_{2OE} l_{OE}), \quad (15)$$

где p_{2AB} , p_{2OE} – нормальные давления, действующие на площадки грунта AB и OE соответственно;

l_{AB} – длина участка грунта AB (рис. 1).

Уравнения (7)...(15) позволяют 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 между грунтозацепами (рис. 4). Из условий равновесия этой призмы можно получить предельную величину силы E_{OB} , действующей на нее со стороны площадки скольжения

$$E_{OB}^n = \frac{C_{OT} + P_{AB} \cos \omega \operatorname{tg} \rho - C_{OB} \operatorname{tg} \rho \sin \psi - C_{OB} \cos \psi - P_{AB} \sin \omega + 2C_{TABO} + 2E_{TABO} \sin \rho}{\sin(\psi + \rho) - \operatorname{tg} \rho \cos(\psi + \rho)}, \quad (16)$$

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 (16), определяются по уравнениям

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

Срез по площадке вершин грунтозацепов произойдет, когда сила E_{OB} достигнет предельного значения. В этом случае внешняя касательная сила, полученная по уравнению (16), 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

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

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

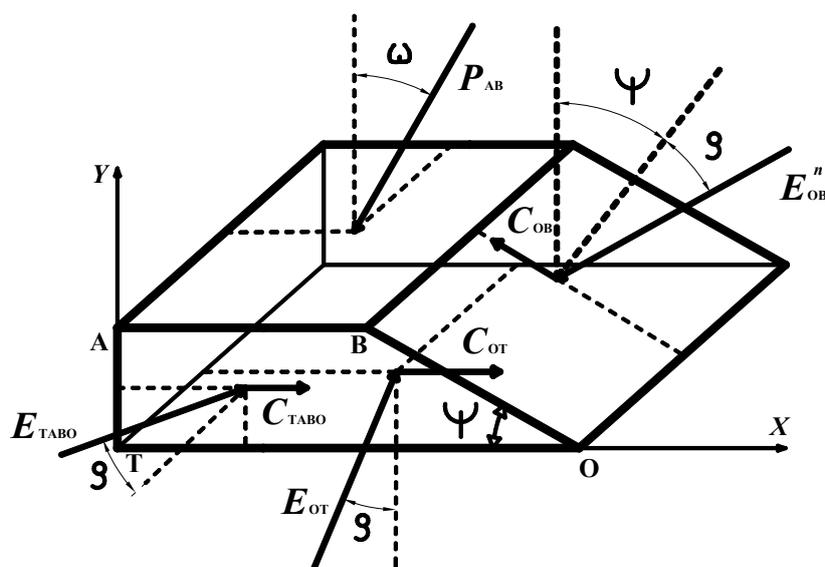


Рисунок 4 – Схема сил, действующих на грунт ненарушенной структуры

При $\psi = \psi^I_{кр}$ удерживающей поверхностью будет являться поверхность AT , свободная от давлений из-за смещения предыдущего грунтозацепа в грунте. В этом случае несущая способность грунта уменьшится, поэтому и уменьшение угла ψ 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 (рис. 1). Для определения предельной величины этого давления и положения образующейся площадки скольжения используются теория пассивного давления грунта на подпорные стенки. 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 $TGBO$. 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, приводящая к его срезу между соседними грунтозацепами по той или иной схеме, либо – выклинивание трака вытесняемой призмой грунта.

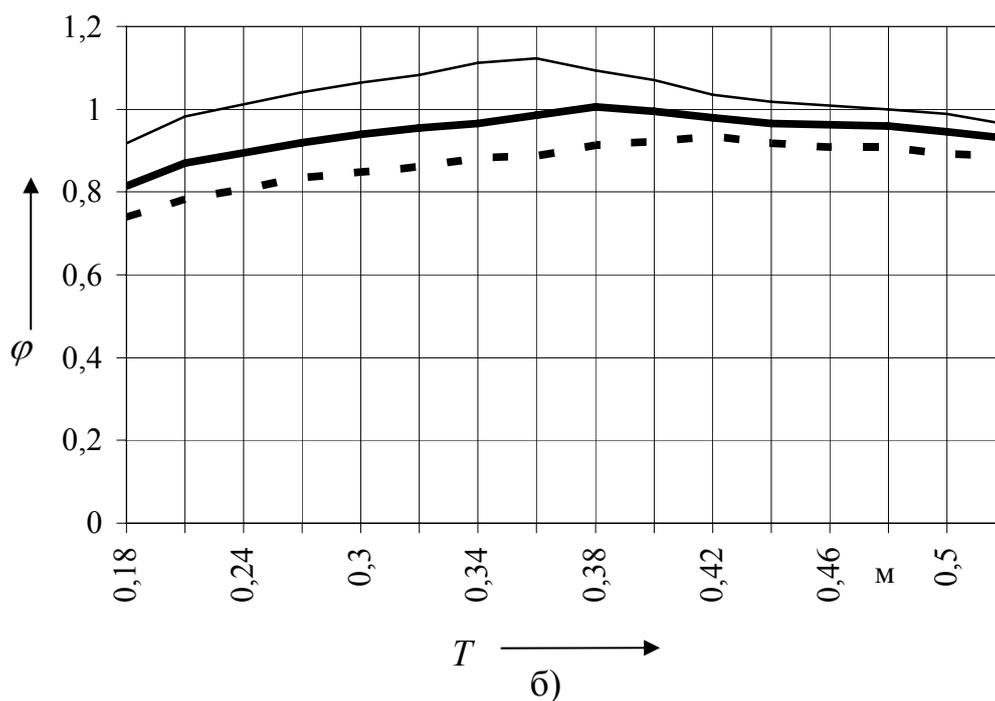
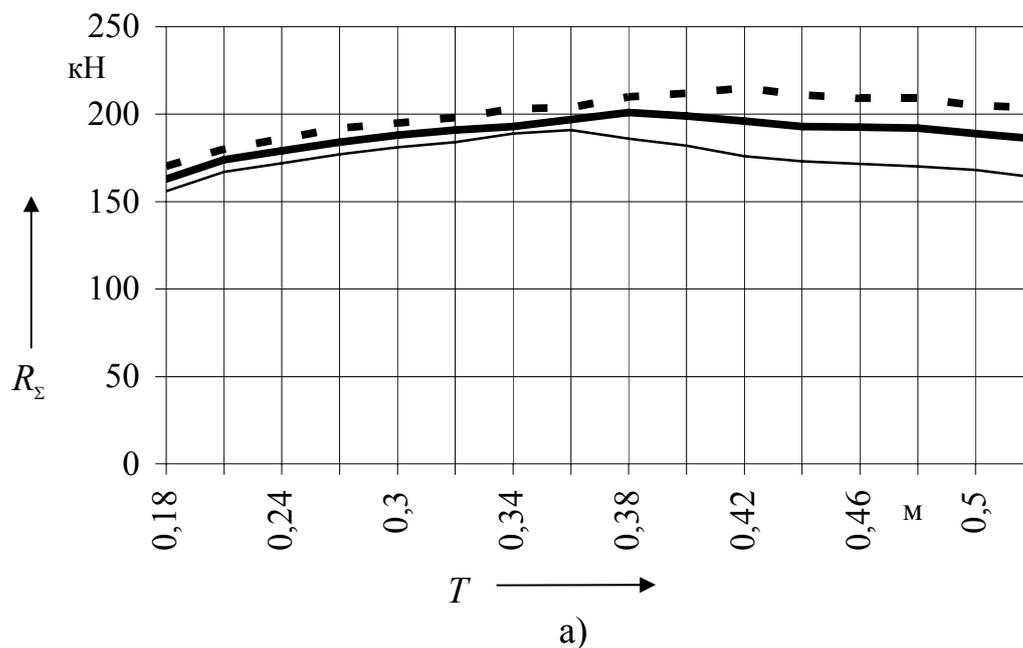
Изложенный выше метод анализа взаимодействия траков гусеничного движителя с грунтом рассматривает последовательность взаимодействия трака с грунтом и позволяет определять параметры такого взаимодействия при увеличении внешней касательной силы, приложенной к траку, начиная с ее начального значения, соответствующего первой фазе разрушения грунта, до предельного значения. Важной особенностью этого метода является возможность выявить и установить рациональные соотношения между шагом и высотой грунтозацепов, обеспечивающие максимальную величины силы тяги, реализуемую траком.

Расчеты по изложенному методу являются итерационными и поэтому достаточно трудоемкими. Они осуществляются на ПЭВМ при помощи разработанного программного обеспечения.

На рисунке 5 изображены результаты исследования влияния веса машины на максимально возможную силу тяги по сцеплению, развиваемую машиной, и коэффициента сцепления в зависимости от шага грунтозацепов, для грунта, свойства которого приведены выше. Численные значения результатов для характерных точек графиков приведены в таблице 1.

Приведенные результаты подтверждают сделанные ранее выводы о влиянии веса машины на максимально возможную величину силы тяги по сцеплению и коэффициент сцепления. Так, при типовом шаге грунтозацепов $T=0,205$ м при увеличении веса на 17,6% максимально возможная сила

тяги увеличивается на 4,2%, а при увеличении веса на 35,3% сила тяги увеличивается на 7,8%.



— - вес трактора $G=170$ кН; ----- $G=200$ кН; - - - - - $G=230$ кН

Рисунок 5 – Влияние шага грунтозацепов и веса машины на:
а – максимальную силу тяги по сцеплению,
б – коэффициент сцепления.

При этом, по мере увеличения веса трактора, снижается величина коэффициента сцепления с $\varphi=0,98$ до $\varphi=0,87$ (при $G=200$ кН) и далее до значения $\varphi=0,78$ (при $G=230$ кН).

Таким образом, увеличение веса машины хотя и увеличивает максимально возможную силу тяги по сцеплению, однако такой путь нельзя считать рациональным, о чем свидетельствует снижение коэффициента сцепления.

Таблица 1 – Численные значения результатов расчетов.

| Вес трактора G , кН (в скобках – в процентах к весу $G=170$ кН) | Шаг грунтозацепов T , м | | | |
|--|---|---|--|--|
| | Типовой, $T=0,205$ м | Увеличенный, $T=0,36$ м | Увеличенный, $T=0,38$ м | Увеличенный, $T=0,42$ м |
| | Максимально возможная сила тяги по сцеплению $P_{сц}$, кН и коэффициент сцепления φ (в скобках – в процентах по отношению к их значениям при $G=170$ кН и $T=0,205$ м) | | | |
| 170 | $P_{сц}=167$ кН (100%) $\varphi=0,98$ (100%) | $P_{сц}=191$ кН (114,4%) $\varphi=1,12$ (114,3%) | | |
| 200 (117,6%) | $P_{сц}=174$ кН (104,2%) $\varphi=0,87$ (88,8%) | | $P_{сц}=201$ кН (120,4%) $\varphi=1$ (102%) | |
| 230 (135,3%) | $P_{сц}=180$ кН (107,8%) $\varphi=0,78$ (79,6%) | | | $P_{сц}=215$ кН (128,7%) $\varphi=0,94$ (96%) |

Другим путем повышения силы тяги по сцеплению является оптимизация геометрических размеров грунтозацепов. Это подтверждается результатами на рисунке 5 и в таблице 1, из которых видно, что при весе машины $G=170$ кН сила тяги достигает своего максимального значения при шаге грунтозацепов $T=0,36$ м, при весе машины $G=200$ кН максимальная сила тяги уже соответствует шагу грунтозацепов $T=0,38$ м, а при весе $G=230$ кН и вовсе шагу $T=0,42$ м. При этом, при типовом весе трактора $G=170$ кН, сила тяги по сцеплению увеличится по сравнению с шагом $T=0,205$ м на 14,4%, при весе $G=200$ кН – на 20,4%, а при весе $G=230$ кН – и вовсе на 28,7%. Значения коэффициента сцепления для рассмотренных случаев будет соответственно равно $\varphi=1,12$ ($G=170$ кН, $T=0,36$ м), $\varphi=1$ ($G=200$ кН, $T=0,38$ м) и $\varphi=0,93$ ($G=230$ кН, $T=0,42$ м).

Результаты по влиянию шага грунтозацепов на силу тяги по сцеплению, приведенные выше, хорошо согласуются с экспериментальными дан-

ными других исследователей, например А.В. Гуськова [4]. Конструктивно увеличить шаг грунтозацепов достаточно просто, для этого необходимо чередовать траки с грунтозацепами и без них. Однако следует подчеркнуть, что на характер разрушения грунта, находящегося между соседними грунтозацепами, будет оказывать влияние и их высота. Поэтому более правильным подходом к выбору их геометрических параметров будет оптимизация соотношения между шагом и высотой грунтозацепов.

Разработанный авторами метод анализа взаимодействия трака гусеничного движителя с грунтом позволяет решить эту задачу. Метод обеспечивает расчет рациональных соотношений между шагом и высотой грунтозацепов, обеспечивающие наилучшие тягово-сцепные качества гусеничной машины при ее работе на различных категориях грунта.

Результаты, приведенные в таблице 1 и на рисунке 5, снова подтверждают вывод о том, что при увеличении веса машины снижается коэффициент сцепления, а значит, и эффективность использования веса для увеличения силы тяги по сцеплению, и одновременно показывают что, во-первых, за счет выбора рациональных значений геометрических параметров грунтозацепов можно существенно увеличить силу тяги по сцеплению, и, во-вторых, рациональные геометрические параметры грунтозацепов в свою очередь будут зависеть от веса машины. В дополнение к этому можно отметить, что наиболее существенную роль для увеличения силы тяги по сцеплению будут играть грунтозацепы на тракторах с малым весом

Еще одной недостаточно изученной проблемой является поведение гусеницы при интенсивном увеличении крюковой нагрузки.

При незначительной нагрузке отсутствует «подпрессовка» грунта грунтозацепами, поскольку движение машины обеспечивается за счет трения движителя о грунт (первое слагаемое формулы 1).

Если при таком условии к трактору будет быстро приложена максимальная нагрузка, то все рабочие грунтозацепы начнут одновременно подпрессовывать грунт до его среза по всей поверхности гусеницы. Но в этом случае на каждый грунтозацеп будет действовать максимально возможная в данных условиях сила. Следовательно, эпюра распределения усилий по грунтозацепам станет прямоугольной, и сила тяги по сцеплению будет равна силе трения гусениц о грунт и сумме максимальных сил, действующих на каждый из грунтозацепов (удвоится второе слагаемое формулы 1).

Расчеты по разработанному авторами методу показывают, что на грунтах II-III категорий при внезапном приложении максимальной нагрузки коэффициент сцепления для трактора Т-170 с типовыми гусеницами может достигнуть величины $\varphi=1,6$, а для гусениц с шагом $t=0,4$ м и вовсе величины $\varphi=1,8$.

Безусловно, такие значения коэффициента сцепления являются пиковыми, действующими в малый, ограниченный промежуток времени, поскольку сразу после среза грунта всеми грунтозацепами сила тяги по сцеп-

лению будет определяться только трением между гусеницами и грунтом по вершинам грунтозацепов и трением смещаемого грунтозацепами «кирпичиками» грунта по грунту нижней и боковыми поверхностями.

Однако такой характер приложения нагрузки встречается, например, при ударе толкача в буфер скрепера, при непредвиденной встрече отвала бульдозера с трудно преодолимым препятствием, при наборе грунта скрепером с толкачом «клевками», и т.д. И отмеченные причины являются существенным источником увеличения силы тяги по сцеплению, наряду с силами инерции.

Таким образом, величина коэффициента сцепления для гусеничных машин, кроме достаточно изученных причин, будет зависеть и от интенсивности приложения внешней нагрузки к машине. Безусловно, эти особенности необходимо учитывать в соответствующих расчетах.

На основании изложенного можно утверждать, что проблема использования возможностей грунтозацепов для повышения силы тяги по сцеплению гусеничной машины до настоящего времени остается актуальной, а современные методы расчета позволяют улучшить потребительские свойства МЗР за счет подбора рациональных параметров гусеничных движителей.

Такой подход позволит не только сэкономить на материальных затратах при производстве гусеничных машин и на топливно-энергетических затратах при их эксплуатации, но и повысить тягово-сцепные качества движителей гусеничных тягачей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. - М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.
2. Берестов Е.И., Кулабухов А.В. Методика расчета параметров взаимодействия грунтозацепов гусеничных машин с грунтом. В журн.: Строительные и дорожные машины, 2008, №3, с. 46– 49.
3. Берестов Е.И. Соппротивление грунтов резанию. В журн.: Известия Вузов. Строительство. Новосибирск, 1997, N 10, с.102-107.
4. Гуськов В.В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов – М.: Машиностроение, 1966. – 196 с.