

Министерство высшего и среднего специального образования  
С С С Р

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

БАЛМАХИТОВ ДИАС ГИЛЬМАНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ  
ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА С МЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ

Специальность 05.05.03 -  
„Автомобили и тракторы“

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск - 1974

Работа выполнена в Челябинском филиале Государственного союзного научно-исследовательского тракторного института (НАТИ) и на кафедре "Автомобили и тракторы" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научные руководители - доктор технических наук, профессор  
КАВЬЯРОВ И.С.,

кандидат технических наук, доцент  
ПАНИГИН Б.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
ЕСИН Г.Д.,

кандидат технических наук  
ГРОССОВ Л.Ф.

Ведущее предприятие - Челябинский завод дорожных машин  
им. Коллющенко.

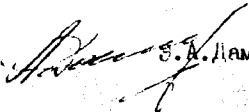
Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1974 г.

Защита диссертации состоится "18" декабря 1974 г., в 15 часов, на заседании Совета по присуждению ученых степеней машиностроительных факультетов Челябинского политехнического института (г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76, аудитория 244).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета или прислать отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 454044, г. Челябинск, 44, проспект им. В.И. Ленина, 76.

Ученый секретарь совета,  
доцент, кандидат технических наук

 С.А. Даммер

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ.** Претворение в жизнь решений XXIV съезда КПСС по развитию народного хозяйства на 1971-1975 гг. связано с выполнением большого объема работ, производимых тракторными агрегатами на мерзлых грунтах, особенно в связи с ускоренным развитием производительных сил районов Крайнего Севера и Северо-Востока. Эффективное производство работ в этих условиях требует усовершенствования применяющихся и создания новых высокопроизводительных мощных гусеничных тракторов, как основных базовых машин для землеройных и ряда других агрегатов.

Одними из важнейших показателей гусеничных тракторов, определяющих производительность агрегатов, являются их тягово-сцепные свойства, которые при работе на мерзлых грунтах снижаются в несколько раз. Вместе с тем исследований, направленных на повышение тягово-сцепных свойств тракторов на мерзлых грунтах, проведено крайне недостаточно.

Повышение тягово-сцепных свойств может быть достигнуто как приспособлением ходовой части серийно выпускаемых тракторов к работе на мерзлых грунтах, так и созданием принципиально новых движителей. В обоих случаях конструктивным разработкам должно предшествовать изучение взаимодействия движителей гусеничного трактора с мерзлыми грунтами. В связи с этим тема настоящей работы является актуальной.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** является установление основных закономерностей взаимодействия грунтозацепов движителей гусеничного трактора с мерзлыми грунтами и выявление путей повышения тягово-сцепных свойств тракторов класса Б(10) тс на мерзлых грунтах за счет изменения параметров грунтозацепов.

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИИ.** Для достижения поставленной цели применены следующие основные методы исследований:

- теоретический анализ механизма взаимодействия грунтозацепов движителей с мерзлыми грунтами с использованием результатов предварительных тяговых испытаний тракторов;
- аналитический метод исследования закономерностей взаимодействия грунтозацепов с мерзлыми грунтами;
- экспериментальные исследования образцов грунтозацепов на установке и на тракторах класса Б(10) тс для проверки достоверности установленных аналитических зависимостей и разработки рекомендаций.

**НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ.** Впервые исследован механизм взаимодействия грунтозацепов движителей с мерзлыми грунтами и установлены аналитические зависимости для определения сцепных свойств грунтозацепов на мерзлых грунтах.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ** работы заключается в предложенной методике расчета сцепных свойств грунтозацепов, которая может служить практическим руководством при разработке движителей промышленных тракторов, предназначенных для работы на мерзлых грунтах, а также в рекомендациях по выбору конструктивных параметров грунтозацепов шпор тракторов класса 6(10) тс.

**РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ.** Результаты исследований и рекомендации использованы ГСКБ Челябинского тракторного завода при разработке шпор трактора Т-130 для работы на мерзлых грунтах различной прочности и разрабатываются мероприятия по их внедрению в серийное производство. Годовой экономический эффект на один трактор от внедрения шпор составляет 257 рублей.

**АПРОВАЦИЯ РАБОТЫ.** Диссертационная работа одобрена на заседании кафедры "Автомобили и тракторы" Челябинского политехнического института и на научно-технических совещаниях ГСКБ ЧТЗ и ЧФ НАТИ в 1974 г. Кроме того, результаты работы докладывались и обсуждались:

1. На научно-технических конференциях молодых ученых НАТИ в 1971 и 1974 годах.
2. На научно-технической конференции МАДИ. Москва, 1973 г.
3. На Всесоюзном координационном совещании по вопросам эксплуатации машинно-тракторного парка в холодное время года. Челябинск, 1970 г.
4. На научно-технических конференциях ЧПИ и ЧИМЭСХ в 1970-1973 годах.

**ПУБЛИКАЦИЯ.** По результатам работы опубликовано 10 статей.

**ОБЪЕМ РАБОТЫ.** Работа изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка, 14 таблиц и 110 наименований использованной литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проанализированы работы, посвященные исследованию тягово-сцепных свойств гусеничных тракторов в различных грунтово-климатических условиях. Наиболее существенные работы в этой области принадлежат советским ученым А. А. Крживицкому, М. И. Медведеву, М. К. Кристи, Е. Д. Львову, А. С. Антонову, Д. А. Чудакову, М. Е. Мацелуро, Е. М. Харитончику, И. С. Кавьярову, О. Л. Уткину-Любозцеву, В. В. Кацыгину, В. В. Гуськову и другим. Из зарубежных исследований наибольший интерес представляют работы М. Г. Беккера (США), А. Солтынского (Польша), Джамоси и Хакимото (Япония).

Анализ литературных данных показал, что тягово-сцепные свойства тракторов исследованы главным образом на грунтах малой и средней прочности, на которых проводятся основные виды работ. Однако интенсификация трактороиспользования в зимний период вызывает необходимость проведения исследований, направленных на повышение тягово-сцепных свойств тракторов на мерзлых и обледенелых грунтах. В связи с этим проведены отдельные испытания тракторов в зимних условиях и разработаны зимние гусеницы, башмаки и шпоры, устанавливаемые на тракторы при работе на мерзлых и обледенелых грунтах.

Вместе с тем из обзора видно, что имеющиеся сведения ограничиваются только результатами тяговых испытаний тракторов класса 3,0 тс на зимних дорогах и заснеженных грунтах, которые показали недостаточную эффективность зимних гусениц. Конструктивные параметры зимних башмаков и шпор выбраны без научного обоснования, так как закономерности взаимодействия движителей с мерзлыми грунтами пока не исследованы и отсутствуют практические рекомендации для их расчета и проектирования.

Во второй главе изложены результаты предварительных испытаний тракторов класса 6-15 тс на мерзлых и обледенелых грунтах, проведенных нами с целью более четкого формулирования задач научного исследования.

При испытаниях тракторов использовалась динамометрическая лаборатория ДД-30. Тяговые характеристики снимались по методике ускоренных тяговых испытаний, разработанной НАТИ. Для более полного раскрытия особенностей работы трактора на мерзлых грунтах были выполнены опыты по определению максимального тягового усилия  $P_{кр\max}$  и сопротивлений перекачиванию, поперечному и про-

дольному сдвигам тракторов с вариантами гусениц, имеющими разные формы и площади опорной поверхности грунтозацепов. Испытания проводились при разных температурах воздуха  $t_g$  и свойствах мерзлых грунтов (по гранулометрическому составу, влажности  $\omega$  и прочности в числах ударов  $C$  ударника ДорНИИ).

В результате проведенных испытаний установлено, что на мерзлых грунтах прочностью  $C = 60 \pm 330$  и на льду тракторы с гусеницами общего назначения имеют очень низкие тягово-сцепные свойства и поперечную устойчивость: максимальные тяговые усилия на мерзлых грунтах в 1,5-2,0 раза, а на льду в 3,0-4,0 раза ниже, чем на немерзлых грунтах (табл. 1), статический угол поперечного скольжения составляет лишь  $6-11^\circ$  на мерзлых грунтах и  $4-6^\circ$  на льду. Никакие показатели объясняются тем, что удельные давления, создаваемые трактором на грунтозацепы (при  $q_{cp} = 10 \pm 11 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ ), недостаточны для внедрения их в мерзлые грунты.

Тяговое усилие создается только силами трения в плоскости контакта грунтозацепов с мерзлым грунтом, возникающими за счет молекулярных и механических сил сцепления. Последние возникают в основном при срезании шероховатостей грунта. Максимальное тяговое усилие составляет 0,2-0,6 массы трактора и зависит от свойств грунта. Величина  $R_{кр\max}$  уменьшается с повышением влажности и понижением температуры мерзлого грунта, что вызвано сложным поведением в плоскости контакта льда и воды, входящих в многофазную систему мерзлого грунта.

Испытания показали также, что при отсутствии грунтозацепов ( $q_{cp} = 2 \text{ кгс/см}^2$ ) тяговые свойства трактора резко снижаются (табл. 2), так как в этом случае практически отсутствуют механические силы сцепления.

Эффективность от установки на гусеницы зимних башмаков и шпор, которые в несколько раз повышают среднее удельное давление трактора на мерзлый грунт ( $q_{cp} = 38 \pm 66 \text{ кгс/см}^2$ ), зависит от прочности мерзлых грунтов (табл. 2; в скобках даны значения  $R_{кр\max}$  трактора с гусеницами общего назначения). Испытания показали, что грунтозацепы зимних башмаков трактора НД-7Ж и серийных шпор тракторов Т-100М и Т-130 внедряются частично при прочности мерзлых грунтов ориентировочно до  $C = 130$ . Процесс взаимодействия частично внедренных грунтозацепов с мерзлыми грунтами при реализации трактором максимальных тяговых усилий характеризуется разрушением мерзлого грунта рабочими поверхно-

Таблица 1

$t_c, ^\circ\text{C}$	Трактор, грунт	$\rho_{cp\ max}, \text{кгс}$	$\varphi_{кр}$
<u>Трактор Т-100М (<math>\rho_{cp} = 10 \text{ кгс/см}^2</math>)</u>			
+20,0	Средний суглинок $\omega = 29,5\%$ ; $C = 4+6$	11200	0,93
-15,0	Средний суглинок $\omega = 31,3\%$ ; $C = 143$	5120	0,43
-25,0	Средний суглинок $\omega = 31,3\%$ ; $C = 250$	4500	0,37
-8,0	Тяжелый суглинок $\omega = 19\%$ ; $C = 124$	5300	0,44
-5,5	Тяжелый суглинок $\omega = 28\%$ ; $C = 135$	4200	0,35
-10,0	Тяжелый суглинок $\omega = 28\%$ ; $C = 168$	4175	0,35
-10,0	Тяжелый суглинок $\omega = 28\%$ ; $C = 168$ (покрыт слоем льда толщиной 2-5 см)	2640	0,22
-17,0	Лед озера	2610	0,22
<u>Трактор Т-130 (<math>\rho_{cp} = 11 \text{ кгс/см}^2</math>)</u>			
+25,0	Тяжелый суглинок $\omega = 20\%$ ; $C = 5-9$	11700	0,85
-5,5	Глина $\omega = 30\%$ ; $C = 114$	4765	0,40
-10,0	Глина $\omega = 30\%$ ; $C = 145$	4575	0,38
-3,0	Тяжелый суглинок $\omega = 17,8\%$ ; $C = 98$	8350	0,60
-16,0	Тяжелый суглинок $\omega = 17,8\%$ ; $C = 247$	7280	0,52
-14,0	Тяжелый суглинок $\omega = 17,8\%$ ; $C = 205$ (покрыт слоем снега толщиной 3-5 мм)	5600	0,40
<u>Трактор Т-140 (<math>\rho_{cp} = 10,5 \text{ кгс/см}^2</math>)</u>			
+18,0	Тяжелый суглинок $\omega = 20\%$ ; $C = 5+7$	14500	0,91
-3,5	Средний суглинок $\omega = 23\%$ ; $C = 60$	8200	0,51
-13,0	Средний суглинок $\omega = 23\%$ ; $C = 116$	7150	0,44
-28,0	Тяжелый суглинок $\omega = 17,8\%$ ; $C = 330$	4950	0,31
-28,0	Лед озера	3100	0,18

Таблица 2

Трактор	Г р у н т	$\rho_{кр\ max}$ , кгс
<u>Т-100М:</u>		
с гладкими башмаками ( $q_{ср} = 2$ кгс/см <sup>2</sup> )	Тяжелый суглинок, $\omega = 22+24\%$ ; $C = 220-240$	1800(5250)
с установкой дополнительных грунтозацепов ( $q_{ср} = 44$ кгс/см <sup>2</sup> )	Средний суглинок, $\omega = 31,3\%$ ; $C = 91+143$	71000(52000)
- "-	Лед озерный чистый, $t_c = -17^{\circ}C$	5460(2610)
с установкой полного комплекта серийных шпор ( $q_{ср} = 66$ кгс/см <sup>2</sup> )	Тяжелый суглинок, $\omega = 22+24\%$ ; $C = 220+240$	6600(5250)
с установкой половины комплекта серийных шпор (через один башмак) ( $q_{ср} = 132$ кгс/см <sup>2</sup> )	Тяжелый суглинок, $\omega = 22+24\%$ ; $C = 220+240$	7900(5250)
<u>Т-130:</u>		
с установкой дополнительных грунтозацепов ( $q_{ср} = 38$ кгс/см <sup>2</sup> )	Тяжелый суглинок, $\omega = 18\%$ ; $t_c = -11,5^{\circ}C$	9850(7280)
- "-	Тяжелый суглинок, $\omega = 18\%$ ; $t_c = -21^{\circ}C$	7600(7280)
- "-	Лед (со включением снега, $t_c = -18^{\circ}C$ )	3885(2675)
<u>Т-140:</u>		
скальная гусеница с наваренными грунтозацепами ( $q_{ср} = 12,6$ кгс/см <sup>2</sup> )	Средний суглинок, $\omega = 23\%$ ; $C = 200+260$	7800(7200)
- "-	Лед озерный, чистый $t_c = -15^{\circ}C$	3420(2900)
<u>НД-7Ж:</u>		
с зимними башмаками ( $q_{ср} = 44$ кгс/см <sup>2</sup> )	Мерзлая глина, $\omega = 17\%$ ; $C = 220$	10100(8300)
- "-	Лед озерный чистый, $t_c = -18^{\circ}C$	4770(2860)



стями грунтозацепов. Изучение этого процесса и результатов работ по разрушению мерзлых грунтов элементарными профилями показало, что характер протекания процесса стружкообразования, вид стружки и внешний вид образовавшегося реза (колеи) в грунте аналогичны таковым в процессе разрушения мерзлых грунтов реза-нием элементарными профилями. Этот вывод имеет большое значение для проведения теоретического анализа взаимодействия грунтозацепов с мерзлым грунтом.

Вследствие разрушения мерзлого грунта работа тракторов в зоне максимальных тяговых усилий сопровождается буксованием, величина которого колеблется в широких пределах (в наших испытаниях от 13 до 46%) в зависимости от состояния мерзлых грунтов. При последующем увеличении нагрузки буксование возрастает до полной остановки трактора.

При прочности мерзлых грунтов  $C > 130$  создаваемые тракторами удельные давления на грунтозацепы рассматриваемых серийных шпор и зимних башмаков недостаточны для внедрения их в грунт, и процесс взаимодействия движителей происходит без разрушения мерзлого грунта.

Таким образом, полученный характер зависимости сцепных свойств тракторов от прочности мерзлого грунта позволяет сделать вывод, что для каждого состояния мерзлого грунта существует критическое удельное давление, при достижении которого происходит значительное внедрение грунтозацепов.

На мерзлых грунтах высокой прочности, где внедрение грунтозацепов незначительное, существенное влияние на сцепные свойства трактора оказывает ширина грунтозацепов. Так, грунтозацепы с большей шириной при практически одинаковом внедрении обеспечивают лучшие сцепные свойства. При значительном внедрении грунтозацепов в грунт влияние ширины сказывается меньше. В этом случае сцепные свойства грунтозацепов зависят, в первую очередь, от глубины внедрения, обусловливаемой величиной удельного давления.

Испытания показали также, что на обледенелых мерзлых грунтах грунтозацепы шпор скалывают хрупкий и менее прочный лед и фактически взаимодействуют с подстилающим мерзлым грунтом.

На основании анализа состояния вопроса и результатов проведенных нами тяговых испытаний были определены следующие задачи настоящего исследования:

1. Исследовать механизм взаимодействия грунтозацепов гусеничного движителя с мерзлыми грунтами.

2. Установить основные закономерности взаимодействия грунтозацепов гусеничного движителя с мерзлыми грунтами.

3. Разработать практические рекомендации по выбору параметров грунтозацепов гусениц тракторов класса 6(10) тс для работы на мерзлых грунтах различной прочности.

В третьей главе изложены аналитические исследования и методика постановки эксперимента. В соответствии с результатами предварительных тяговых испытаний тракторов рассмотрены три характерных случая взаимодействия грунтозацепов гусеничного движителя с мерзлыми грунтами при работе трактора с нагрузкой на крюке:

- без внедрения в мерзлый грунт;
- при частичном внедрении и отсутствии буксования трактора;
- при частичном внедрении и буксовании трактора.

В первом случае взаимодействия касательное усилие создается только за счет сил трения в плоскости контакта грунтозацепа с мерзлым грунтом. Отсюда предельная величина касательного усилия определяется по формуле:

$$P_{k \max} = \mu Q, \quad (1)$$

где  $\mu$  - коэффициент внешнего трения;

$Q$  - вертикальная нагрузка.

При движении трактора с частично внедренными грунтозацепами без буксования мерзлый грунт подвергается упругопластической деформации и разрушается при выходе грунтозацепов из грунта. В этом случае касательное усилие, развиваемое грунтозацепами гусеницы, определяется силами внешнего трения и горизонтальной реакцией мерзлого грунта (рис. 1), т.е.

$$P_k = \mu(Q - R_y) + R_x, \quad (2)$$

где  $R_x$ ;  $R_y$  - горизонтальная и вертикальная реакции мерзлого грунта.

Определяя горизонтальную реакцию мерзлого грунта при его предельно напряженном состоянии путем использования теории разрушения мерзлых грунтов, разработанной А.Н. Зелениным, получаем формулу для определения максимального касательного усилия грунтозацепа:

$$P_{x \max} = \mu Q + (1 - \mu \psi) \alpha Ch \sqrt{B}, \quad (3)$$

где  $\psi$  - коэффициент, характеризующий соотношение между вертикальной и горизонтальной реакциями мерзлого грунта при сдвиге;

$\alpha$  - коэффициент, характеризующий влияние конструктивных форм грунтозацепа;

$h$  - глубина внедрения грунтозацепа в мерзлый грунт;

$B$  - ширина грунтозацепа.

Для движения трактора с частично внедренными грунтозацепами с буксованием характерными являются:

- периодическое скалывание мерзлого грунта непосредственно у рабочей поверхности грунтозацепов с образованием стружки, состоящей из отдельных элементов с более или менее закономерными формами;

- глубина внедрения грунтозацепов увеличивается по мере приближения их к задней части опорной поверхности.

Исходя из этих предпосылок, механизм взаимодействия грунтозацепа с мерзлым грунтом может быть представлен следующим образом (рис. 2). В начальный период сдвига происходит упруго-пластическая деформация массива грунта рабочей поверхностью грунтозацепа. Касательное усилие растет до максимальной величины, соответствующей предельно напряженному состоянию мерзлого грунта. При дальнейшем сдвиге грунтозацепа деформация массива грунта завершается скалыванием крупных элементов стружки. Усилие резко падает до наименьшей величины, определяемой силой трения опорной поверхности грунтозацепа и сопротивлением грунта смятию нижней частью рабочей поверхности грунтозацепа. Дальнейшее продвижение грунтозацепа вызывает постепенное увеличение контакта его рабочей поверхности с грунтом, до образования нового предельно напряженного состояния, сопровождаемое смятием и скалыванием сравнительно мелких неровностей и выступов на дне колеи. Возрастание касательного усилия до максимальной величины при этом происходит с местными падениями, соответствующими моментам трещинообразования и промежуточным сколам. Последующее продвижение грунтозацепа ведет к новому крупному сколу грунта по всей его рабочей поверхности и падению усилия до минимума, после чего цикл повторяется.

Вследствие специфического характера взаимодействия частично внедренных грунтозацепов с мерзлым грунтом происходит постоянное изменение удельного давления в зоне контакта их с грунтом и по мере сдвига увеличивается глубина их внедрения.

Среднее значение касательного усилия за данное перемещение грунтозацепа можно выразить через максимальное его значение:

$$P_{\kappa} = k_{\rho} P_{\kappa \max}, \quad (4)$$

где  $k_{\rho}$  - коэффициент, зависящий от характера стружкообразования.

Из формулы (3) следует, что величина  $P_{\kappa \max}$  в значительной степени определяется глубиной внедрения грунтозацепов. Закономерности внедрения грунтозацепов рассмотрены исходя из того, что мерзлый грунт деформируется нижним основанием грунтозацепов, как плоским штампом постоянной площади, и наклонными поверхностями, как плоскими штампами переменной площади. При этом принято, что зависимость между удельным давлением  $q$  и глубиной внедрения  $h$  штампа (грунтозацепа) с достаточным приближением может быть представлена функцией вида

$$q = q_n (1 - e^{-\frac{h}{h_0}}), \quad (5)$$

а изменение предела прочности мерзлых грунтов  $q_n$  в зависимости от площади штампа  $F$  функцией вида

$$q_n = \frac{B}{F + A}, \quad (6)$$

где  $e$  - основание натуральных логарифмов;

$h_0$  - постоянная упруго-пластической деформации мерзлого грунта;

$A, B$  - эмпирические коэффициенты.

В результате теоретического анализа установлено, что зависимость между вертикальной нагрузкой и глубиной внедрения грунтозацепа можно выразить следующей формулой:

$$Q = 6t q_n (1 - e^{-\frac{h}{h_0}}) + \frac{kB(1 - e^{-\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{h_0} h})}{1 + \frac{A \cos \frac{\alpha}{2}}{6h}}, \quad (7)$$

где  $t$  - толщина грунтозацепа в нижнем основании;

$$k = 2(\sin \frac{\alpha}{2} + \mu \cos \frac{\alpha}{2});$$

$\alpha$  - угол между наклонными поверхностями грунтозацепа.

Формула (7) является универсальным по отношению к грунтозацепам различного элементарного профиля. Так, при прямоугольном профиле грунтозацепа ( $\alpha = 0$ ) вторая часть формулы равна нулю, т.е. имеем случай внедрения плоского штампа постоянной площади; при треугольном профиле грунтозацепа ( $t = 0$ ) первая часть формулы равна нулю. Для конического грунтозацепа путем некоторых преобразований получим

$$Q = \frac{kB \left(1 - e^{-\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{h_0} h}\right)}{1 + \frac{2A \cos \frac{\alpha}{2}}{\pi \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} h^2}} \quad (8)$$

Коэффициент  $\psi$  в формуле (3) определяется из выражения:

$$\psi = -\operatorname{ctg}(\gamma - \rho), \quad (9)$$

где  $\gamma$  - угол наклона рабочей поверхности грунтозацепа к горизонтальной плоскости;

$$\rho = \alpha \operatorname{ctg} \mu \quad - \text{ угол трения.}$$

Таким образом, получены аналитические зависимости, описывающие закономерности взаимодействия грунтозацепов с мерзлыми грунтами. Установлено, что сцепные свойства грунтозацепов определяются силами внешнего трения и сопротивлением мерзлого грунта разрушению, величина которого находится в прямопропорциональной зависимости от глубины внедрения и прочности мерзлого грунта и в степенной зависимости от ширины грунтозацепа. При данных конкретных параметрах грунтозацепов и свойств мерзлого грунта сцепные свойства грунтозацепов определяются глубиной их внедрения, обусловленной удельным давлением. Зависимость между глубиной внедрения и удельным давлением может моделироваться с помощью плоских штампов. Следует также отметить, что полученные зависимости могут быть использованы в качестве методики расчета сцепных свойств грунтозацепов.

Методика экспериментальных исследований включила следующие задачи:

- проверить достоверность теоретических положений и установленных аналитических зависимостей;

- получить систематизированные сведения о пределе прочности мерзлых грунтов и определить значение коэффициентов  $h_0, A, B, \alpha, \psi, \mu$ , необходимых для практического применения результатов исследований;
- определить конструктивные параметры грунтозацепов гусениц тракторов класса 6(10) тс для работы на мерзлых грунтах различной прочности.

Исследования проводились в полевых условиях на характерных для работы тракторов категориях грунтов: на тяжелом суглинке и опесчаненной глине ненарушенного сложения.

Эксперименты выполнялись на передвижной установке, позволяющей определять прочностные свойства грунтов с помощью различных штампов и исследовать взаимодействие с грунтами грунтозацепов с различными конструктивными параметрами. Установка имеет гидропривод механизмов нагружения и сдвига, оборудована тензодатчиком башмаком и тяговым звеном для замера вертикальной нагрузки и усилия сдвига, а также приборами для замера глубины внедрения и пути сдвига опытных элементов.

В соответствии с поставленными задачами эксперименты проводились с плоскими и коническими штампами, грунтозацепами различного элементарного профиля, с серийными и опытными шпорами трактора Т-130. С целью проверки основных результатов экспериментальных исследований проводились тяговые испытания тракторов класса 6(10) тс с установкой на гусеницы опытных грунтозацепов и шпор.

Обработка результатов исследований и расчеты проводились на ЭЦМ с применением математического аппарата и методов математической статистики.

Принятые методики постановки опытов и обработки опытных данных позволили получить определяемые величины с относительной ошибкой не более 10%.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований. В первом этапе исследований в мерзлые грунты внедрялись штампы и грунтозацепы для получения величин  $q_n, h_0, A, B$  и проверки достоверности аналитических зависимостей (7) и (8).

Деформацию мерзлого грунта в процессе внедрения плоских штампов можно охарактеризовать тремя периодами. В первом периоде быстрому росту нагрузки соответствует незначительная дефор-

мация грунта. Причем, в начале процесса внедрения штампа практически отсутствует. Во втором периоде происходит менее интенсивное возрастание нагрузки при значительных деформациях. Третий период характеризуется тем, что при дальнейшем внедрении штампа нагрузка стремится к постоянному значению. Установлено, что значительное влияние на описанный процесс оказывает образование уплотненного ядра под опорной поверхностью штампов. Сформировавшись во втором периоде, уплотненное ядро стремится принять такую форму, при которой давление под основанием штампа выравнивается, т.е. усилие внедрения принимает примерно постоянное значение.

Эксперименты подтвердили, что процесс внедрения штампов наиболее точно описывается формулой (5), выбранной для аналитического рассмотрения взаимодействия грунтозацепов с мерзлыми грунтами.

Мерзлый грунт в зависимости от температуры, влажности и гранулометрического состава имеет различную прочность. Из-за сложных процессов, происходящих при образовании и упрочнении мерзлых грунтов прочность в разных точках грунтового массива оказывается неодинаковой даже при неизменных погодных условиях. Из гистограмм распределения следует, что среднее квадратическое отклонение предела прочности мерзлых грунтов находится в пределах 0,12-0,20 (0,12 получено при  $C \leq 50$ ; 0,20 - при  $C = 200 \div 240$ ).

В практике разработки мерзлых грунтов широко используется оценка прочности их числом ударов  $C$  ударника ДорНИИ, поэтому практическое значение имеет установление взаимосвязи между пределом прочности  $q_n$  и числом  $C$ . Опыты показали (рис. 3), что между пределом прочности мерзлых грунтов при внедрении плоских штампов и показаниями ударника существует прямолинейная зависимость:

$$q_n = k_n C \quad (10)$$

Коэффициент корреляции между величинами  $q_n$  и  $C$  находится в пределах 0,786-0,957 при среднем значении 0,9.

Из опытных данных следует (табл. 3), что коэффициент  $k_n$  зависит от гранулометрического состава грунта и площади штампа. Наиболее существенное изменение величины коэффициента происходит при площади штампа до 3 см<sup>2</sup>.

Постоянная упруго-пластической деформации мерзлых грунтов  $h_0$  связана со многими факторами, в том числе и с образованием

Таблица 3

Грунт	Площадь штампа, см <sup>2</sup>					
	1	2	3	5	10	20
Суглинок тяжелый ( $\omega = 13,6 \div 24,5\%$ )	4,15	3,37	2,88	2,73	2,06	1,67
Глина ( $\omega = 23\%$ )	3,65	2,84	2,27	2,14	1,65	1,20

уплотненного ядра при внедрении штампов. Для различных штампов и состояний мерзлых грунтов среднее значение постоянной составляет 0,9 см при среднем квадратическом отклонении  $\pm 0,22$  см. Такое колебание значения (коэффициент вариации равен 23%) объясняется в основном сложной системой строения и неоднородной структурой мерзлых грунтов, что безусловно влияет на процесс внедрения штампов и, в первую очередь, на интенсивность изменения функции  $q(h)$ , характеризующую данную постоянную.

При оценке прочности мерзлых грунтов учитывалось влияние площади штампа. Результаты экспериментов показали, что зависимость предела прочности мерзлых грунтов от площади штампа имеет вид семейства гиперболических кривых и достаточно точно описывается формулой (6).

Для суглинка и глины соответственно получены зависимости

$$q_n = \frac{B}{F+14,7}, \quad q_n = \frac{B}{F+7,5} \quad (11)$$

Между коэффициентом  $B$  и числом ударов  $C$  существует прямопропорциональная зависимость:

$$B = \lambda C, \quad (12)$$

где  $\lambda$  - эмпирический коэффициент, зависящий от вида грунта. Установлено, что для суглинка  $\lambda = 54$ , для глины  $\lambda = 28$ .

Результаты экспериментальных исследований внедрения плоских штампов в мерзлые грунты позволяют получить расчетным путем зависимости  $Q(h)$  для грунтозацепов различного профиля по формулам (7) и (8). Сравнение опытных данных с расчетными показывает (рис. 4), что аналитические зависимости с достаточным приближением описывают взаимодействие грунтозацепов с мерзлыми грунтами при внедрении вертикальной нагрузкой.



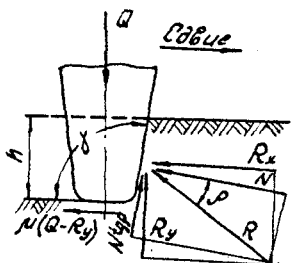


Рис. 1. Схема сдвига ерунтозацепы, частично внедренного в твердый ерунт

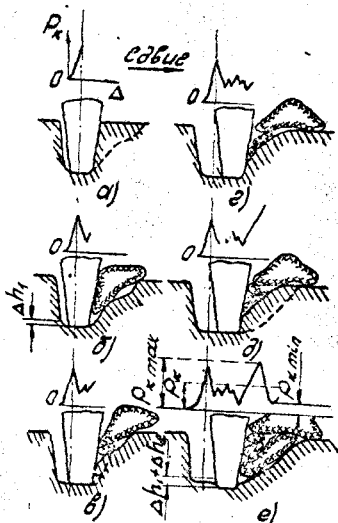


Рис. 2. Схемы взаимодействия ерунтозацепы с твердым ерунтом и стружкообразования при работе движителя с буксированет

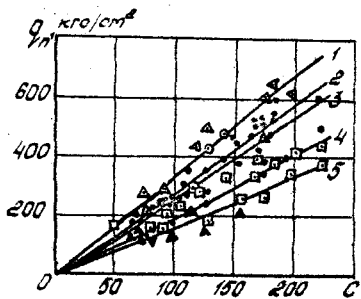


Рис. 3. Зависимость тенду пределот прочности мерло-го суелника ( $\omega = 13 \pm 25\%$ ) и числом ударов  $C$ :

1- $F = 2 \text{ cm}^2$ ; 2- $F = 3 \text{ cm}^2$ ;  
3- $F = 5 \text{ cm}^2$ ; 4- $F = 10 \text{ cm}^2$ ;  
5- $F = 20 \text{ cm}^2$

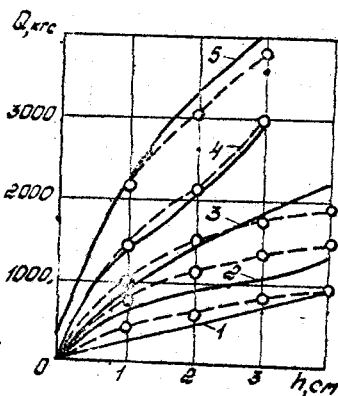


Рис. 4. Опытные (сплошные линии) и расчетные зависимости  $Q(h)$  для ерунтозацепов:

1, 2, 3 - трапецидального профюля шириной 3, 8 и 10 см на алине ( $\omega = 23\%$ ;  $b = 88$ );  
4, 5 - ерунтозацепы серийной шпоры на суелнике ( $\omega = 21,5\%$ ;  $C = 87$  и  $C = 135$ )

Во втором этапе исследовалось взаимодействие грунтозацепов с мерзлыми грунтами при сдвиге.

Плоские башмаки и грунтозацепы с плоским нижним основанием при удельных давлениях в плоскости контакта, недостаточных для внедрения их в мерзлый грунт, скользят по поверхности грунта, производя смятие и срезание шероховатостей и небольших неровностей. Величина касательного усилия в течение опыта остается практически постоянной с незначительной амплитудой колебания.

Сдвиг внедренного грунтозацепа сопровождается разрушением мерзлого грунта непосредственно у его рабочей поверхности с образованием стружки и колеи (реза). Стружкообразование наблюдается независимо от ширины и формы грунтозацепа, его глубины внедрения и физико-механических свойств мерзлого грунта. Вид стружки зависит от прочности мерзлого грунта: на мерзлых грунтах пониженной прочности (при температуре выше  $-4^{\circ}\text{C}$ ), у которых преобладают пластические свойства, стружка получается гладкой со стороны грунтозацепа и ступенчатой снаружи; на мерзлых грунтах средней и высокой прочности (при температуре ниже  $-5^{\circ}\text{C}$ ), они ведут себя как хрупкие тела, поэтому образуется элементная стружка, состоящая из отдельных кусков грунта с более или менее закономерными формами.

Таким образом, взаимодействие частично внедренных грунтозацепов с мерзлым грунтом принципиально отличается от взаимодействия их с немерзлыми связными грунтами при передаче вертикальной нагрузки всей опорной поверхностью гусеницы. Если в первом случае имеет место скалывание грунта в сторону свободной поверхности, то во втором случае происходит сдвиг "кирпичиков" грунта, заключенных между грунтозацепами, как правило, в плоскости, проходящей по вершинам грунтозацепов.

Периодическое выкалывание элементов стружки вызывает колебание величины касательного усилия в пределах от минимального до максимального (рис. 5). Для определения среднего значения касательного усилия по формуле (4) были найдены опытные значения коэффициента  $K_p$  (табл. 4) путем математического описания диаграмм сдвига с помощью рядов Фурье с последующей обработкой на ЭЦВМ "М-222".

Исходя из полученных данных можно отметить, что на величину коэффициента  $K_p$  оказывает влияние в основном прочность мерзлого грунта.

Таблица 4

Вариант грунтоза- цепа	Вид и прочность мерзлого грунта в числах ударов С					
	С у г л и н о к			Г л и н а		
	150+70	190+120	160+200	50+60	170+90	120+160
Трапецеидаль- ного профиля: $b=3+10$ см; $t=1$ см	0,80	0,76	0,65	0,84	0,82	0,79
$b=20$ см; $t=0,5$ см	0,81	0,74	0,66	0,83	0,79	0,74
Ступенчатый с выступающими коническими элементами	0,85	0,76	0,73	0,89	0,81	0,76

Рассмотренное при аналитических исследованиях увеличение глубины внедрения грунтозацепов при буксовании гусениц подтвердилось при опытах по сдвигу грунтозацепов (см. рис. 5).

Эксперименты показали, что влияние вертикальной нагрузки на сцепление грунтозацепов с мерзлым грунтом зависит от их конструктивных параметров и прочности мерзлого грунта. При отсутствии внедрения с увеличением удельного давления коэффициент сцепления грунтозацепов уменьшается, что объясняется наличием в мерзлых грунтах льда, который с повышением давления интенсивно тает. Образовавшийся в пятнах касания тонкий слой воды выполняет роль смазки, снижая величину коэффициента сцепления.

Для грунтозацепов с плоским нижним основанием установлено, что для каждого состояния мерзлого грунта от прочности существует диапазон удельных давлений, при которых практически не происходит внедрение грунтозацепов. Причем, с увеличением прочности мерзлого грунта этот диапазон расширяется. При  $q > 0,2q_{кр}$  происходит частичное внедрение грунтозацепов. Только после достижения критических значений удельных давлений  $q_{кр}$ , величина которых составляет ориентировочно  $0,6q_{н}$ , начинается интенсивное внедрение грунтозацепов.

Сравнительные опыты показали, что ступенчатые грунтозацепы с выступающими коническими элементами обладают более высокими сцепными свойствами на грунтах средней и высокой прочности, чем другие варианты, в том числе грунтозацепы серийной шпору трактора Т-130 (рис. 6), так как для конических грунтозацепов значение  $q_{кр}$  незначительное.

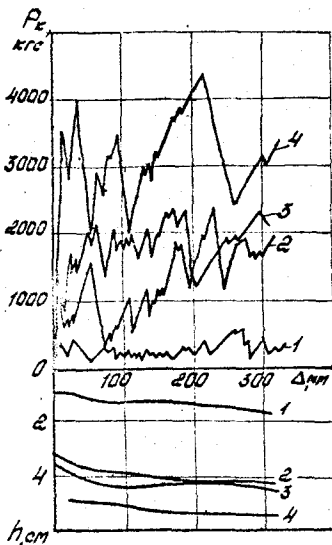


Рис. 5. Зависимости  $P_k(\Delta)$  и  $h(\Delta)$  на терзлот суглинке ( $\omega = 21,5\%$ ,  $C = 106$ ) для грунтозацепов опытной шпору:  
 1 -  $Q = 330$  кгс; 2 -  $Q = 900$  кгс  
 3 -  $Q = 1650$  кгс; 4 -  $Q = 3300$  кгс

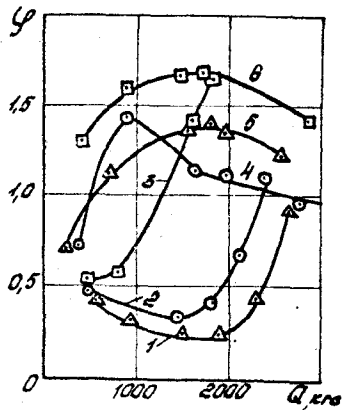


Рис. 6. Зависимости  $\varphi(Q)$  для серийной (1, 2, 3) и опытной (4, 5, 6) шпору на терзлот суглинке ( $\omega = 21,5\%$ ) различной прочности:  
 □ -  $C = 65$ ; ○ -  $C = 106$ ;  
 △ -  $C = 180$

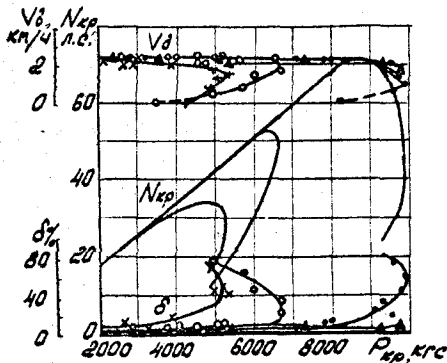


Рис. 7. Тяговая характеристика трактора Т-100М на 1 передаче на суглинке ( $\omega = 22\%$ ;  $C = 240$ ):  
 x - гусеница общего назначения;  
 ● - гусеница с установкой на баштаки конических грунтозацепов; △ - гусеница с установкой опытных шпору; ○ - гусеница с установкой серийных шпору

Для возможности практического применения формулы (3) были определены опытные значения коэффициентов  $\alpha$ , которые составили:

- для грунтозацепов трапецеидального профиля шириной 3-10 см . . . . . 1,65-1,85
- для грунтозацепа серийной шпору . . . . . 2,00
- для конического грунтозацепа и грунтозацепа опытной шпору . . . . . 2,20.

Значения коэффициента определялись для грунтозацепов с  $\alpha = 7^\circ$ . Установлено, что они находятся в пределах 0,32-0,51 и в среднем составляют 0,4, что близко совпадает с расчетными данными по формуле (9). Следовательно, при расчетах можно пользоваться указанной формулой.

В табл. 5 приведены обобщенные значения коэффициентов внешнего трения  $\mu$ , при составлении которой использованы опытные данные, полученные при сдвиге грунтозацепов и продольного сдвига тракторов Т-100М, Т-130, Т-140 при отсутствии внедрения их грунтозацепов, а также данные исследований других авторов.

Таблица 5

Грунт	Влажность в %	$\mu$	
Супесь	до 22,5	0,30-0,55	
	Суглинок	до 25	0,35-0,65
		30	0,30-0,50
		40	0,28-0,45
Глина	70	0,15-0,20	
	до 30	0,45-0,65	
	50	0,35	
		0,30	

Таким образом, в результате экспериментов получены данные, позволяющие расчетным путем определить сцепные свойства грунтозацепов гусениц по формулам (3) и (4). Расчетные и опытные значения максимального касательного усилия, полученные для различных случаев сдвига, показывают, что расхождение между ними составляет в среднем 10% и не превышает 18%.

В третьем этапе экспериментальных исследований проведены тяговые испытания тракторов Т-100М и Т-130 с опытными грунтозацепами с целью выдачи практической рекомендации и экономической оценки ее использования.

Из результатов испытаний следует (рис. 7), что на мерзлых грунтах различной прочности наиболее эффективными являются шпоры, имеющие ступенчатый грунтозацеп с выступающими коническими элементами, которые повышают тяговые свойства тракторов на прочных мерзлых грунтах на 45-50%.

Народнохозяйственный экономический эффект на зимний сезон работ на мерзлых грунтах прочностью  $C = 180+220$ , наиболее типичных для средней полосы СССР, на один трактор Т-100М составит 257,2 рублей, а от применения опытных шпор только на годовом выпуске бульдозеров на базе тракторов Т-100М составит 2 млн. 830 тыс. рублей.

## ВЫВОДЫ

1. Исследованиями установлено, что характер взаимодействия грунтозацепов с мерзлыми грунтами определяется соотношением между удельным давлением  $q$  в плоскости контакта и пределом прочности мерзлых грунтов. Так, при  $q \leq 0,2 q_n$  взаимодействие их с мерзлым грунтом происходит без внедрения, а при  $q > 0,2 q_n$  - с частичным внедрением. Глубина внедрения грунтозацепов существенно возрастает при  $q > 0,6 q_n$ .

2. При отсутствии внедрения грунтозацепов сцепление движителей происходит за счет сил внешнего трения. Величина коэффициента сцепления грунтозацепов при этом в зависимости от свойств и состояния поверхности мерзлых грунтов составляет 0,20-0,65. Согласно результатам тяговых испытаний коэффициент сцепления тракторов класса 6-15 тс с гусеницами общего назначения на мерзлых грунтах прочностью  $C = 60 + 330$  находится в тех же пределах, что в 2-4 раза ниже, чем в летних условиях.

3. При частичном внедрении сцепление грунтозацепов определяется силами внешнего трения и сопротивлением мерзлого грунта разрушению, величина которого находится в прямопропорциональной зависимости от глубины внедрения грунтозацепа и

прочности мерзлого грунта и в степенной зависимости от ширины грунтозацепа.

В случае отсутствия буксования движителей мерзлый грунт подвергается упруго-пластической деформации. Максимальное касательное усилие, которое соответствует предельно-напряженному состоянию мерзлого грунта может определяться по установленной зависимости (3).

При наличии буксования движителей происходит периодическое скалывание мерзлого грунта непосредственно у рабочей поверхности грунтозацепов с образованием элементной стружки и увеличение глубины внедрения грунтозацепов по мере приближения их к задней части опорной поверхности. В этом случае происходит непрерывное колебание касательного усилия, максимальные значения которого соответствуют предельно-напряженному состоянию мерзлого грунта, а минимальные - моментам отделения элементов стружки. Среднее значение касательного усилия можно выразить зависимостью  $P_k = K_p P_k \text{ max}$ , где значения  $K_p$  изменяются в пределах 0,65-0,89 в зависимости от вида и прочности мерзлого грунта.

4. Аналитически установлены зависимости (7) и (8), позволяющие определить глубину внедрения грунтозацепов в мерзлые грунты различной прочности и, следовательно, произвести расчет сцепных свойств грунтозацепов по формуле (3).

5. Деформацию мерзлых грунтов при внедрении грунтозацепов можно моделировать с помощью штампов. Экспериментальные исследования показали, что принятые при моделировании закономерности (5) и (6) справедливы для мерзлых суглинков и глин различной прочности. При этом получено, что значение постоянной упруго-пластической деформации  $\epsilon_0$  составляет в среднем 0,9;  $A=7; 8$ ; и  $B=28C$  - для глин;  $A=14,7$  и  $B=54C$  - для суглинков.

6. Установлена эмпирическая прямопропорциональная зависимость между пределом прочности мерзлых грунтов  $q_n$  и числом ударов  $C$ , а также значения коэффициента пропорциональности при изменении площади штампа в пределах  $1-20\text{см}^2$ , что позволяет использовать для определения  $q_n$  известную шкалу сопротивления мерзлых грунтов разрушению, разработанную А. Н. Зелениным.

7. Результаты выполненных исследований могут служить в качестве методики расчета, которая позволяет с достаточной

точностью определить конструктивные параметры грунтозацепов, обеспечивающих на мерзлых грунтах заданные сцепные свойства.

8. Установлено, что реализация рекомендаций и использование предложенного метода расчета позволяет разработать шпоры, обеспечивающие, например, трактору класса 6(10) тс повышения тягово-сцепных свойств на 45-50% и боковой устойчивости в 3-4 раза по сравнению с серийными.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Кавьяров И.С., Пинигин Б.Н., Павлов В.Н., Валиахметов Д.Г. К вопросу взаимодействия грунтозацепов с мерзлыми грунтами. Материалы XXIII научно-технической конференции института ЧПИ, Челябинск, 1970.

2. Кавьяров И.С., Пинигин Б.Н., Павлов В.Н., Валиахметов Д.Г., Доскалович И.Н.: О тягово-сцепных качествах гусеничного трактора на мерзлом грунте. В сб. "Автомобили, тракторы и двигатели". Вып. 87, Челябинск, 1971.

3. Кавьяров И.С., Павлов В.Н., Валиахметов Д.Г. О влиянии удельного давления на сцепление гусеницы с мерзлым грунтом. В сб. "Совершенствование конструкций тракторов, автомобилей и двигателей". Труды ЧИЖЭСХ. Вып. 54, Челябинск, 1972.

4. Валиахметов Д.Г., Доскалович И.Н. Применение сменных башмаков на тракторе "Аллис-Чалмерс" НД-7 А. - "Тракторы и сельхозмашины", 1972, № 3.

5. Валиахметов Д.Г., Карабанов И.Н., Малофеев О.В. Установка шпор на гусеницы трактора при работе на мерзлом грунте. - "Кольма", 1972, № 5.

6. Кавьяров И.С., Пинигин Б.Н., Валиахметов Д.Г., Павлов В.Н. Исследование влияния подрессоривания на сцепные качества гусеничного трактора на модели и натуре. В сб. "Вопросы конструирования и исследования тракторов и тракторных двигателей". Вып. 2 Челябинск, 1973.

7. Валиахметов Д.Г., Малофеев О.В. Об эффективности применения шпор на гусеничном тракторе при работе на мерзлых грунтах. В сб. "Вопросы конструирования и исследования тракторов и тракторных двигателей". Вып. 2. Челябинск, 1973.

8. Валиахметов Д.Г., Павлов В.Н. Определение сцепных качеств грунтозацепов при взаимодействии с мерзлыми грунтами. Труды НАИТА, Вып. 221. М., СИНТА-НАИТА, 1970.



