

---

**СНЕГОХОДНЫЕ  
МАШИНЫ**

---

ББК 39.336  
УДК 629.113.03  
С 53

Рецензент д-р техн. наук, проф. Ю. А. Брянский

Коллектив авторов:

Барахтанов Л. В., Ершов В. И.,

Куляшов А. П., Рукавишников С. В.

**Снегоходные машины.** — Горький: Волго-Вятское  
С 53 кн. изд-во, 1986. — 191 с., ил.

1 руб.

Изложены вопросы теории взаимодействия гусеничного движителя со снежным полотном пути. Рассматривается среда (снег), ее физико-механические свойства, их влияние на несущую способность системы машина—среда, процессы, происходящие при сдвиге снега. Показано влияние конструктивных параметров гусеницы на сопротивление движению, дан расчет упорной реакции гусеницы, запас силы тяги, произведена оценка и дан анализ проходимости снегоходных машин. Рассматриваются вопросы выбора основных параметров движителя снегоходных машин.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся теорией и проектированием снегоходного транспорта. Может быть полезна студентам технических вузов, обучающимся по специальности «Автомобили и тракторы».

С 3603030000—028  
М 140(03)—85

ББК 39.336

© Горьковский политехнический институт им. А. А. Жданова, 1986.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года и других директивных документах партии и правительства поставлены задачи по разработке конструкций специальных автомобилей высокой проходимости, расширению сферы применения транспортных средств в северных и восточных районах страны, в том числе и специального транспорта для передвижения по снегу.

Следует отметить, что около 80% территории Советского Союза на длительный срок покрывается снегом. На Крайнем Севере, на побережье Ледовитого океана снежный покров лежит 8—10 месяцев в году. В ряде районов Севера (р-н Туруханска) среднемесячная максимальная высота снежного покрова достигает 1,2 м. Такая длительность, устойчивость и весьма большая глубина залегания снежного покрова является существенной особенностью климата нашей страны и оказывает большое влияние на ее экономику и образ жизни населения.

В этих условиях движение автомобилей не только затрудняется, но даже в большинстве случаев исключается совсем, поэтому наземный бездорожный транспорт является иногда единственно возможным средством при осуществлении транспортных операций.

Если теория колесных и гусеничных машин при движении по грунтам хорошо разработана отечественными и зарубежными учеными, то вопросы передвижения машин по снегу освещены пока еще явно недостаточно. Специфические условия работы требуют уточнения и пересмотра целого ряда положений, особенно в области взаимодействия движителя со снежным полотном пути.

Книга посвящена основным вопросам теории взаимодействия движителя со снегом. В ней на основании теоретических и экспериментальных исследований, проведенных авторами в отраслевой научно-исследовательской лаборатории вездеходных машин (ОНИЛВМ) и опытно-конструкторском бюро по разработке льда, снега и мерзлого грунта (ОКБ «РАЛСНЕМГ») Горьковского политехнического института им. А. А. Жданова, даются обоснования особенностей взаимодействия системы: движитель — снежное по-

лотно пути, рассматриваются вопросы распределения давления, определения сил сопротивления и тяги, проводятся анализ и оценка проходимости снегоходных машин и даны некоторые рекомендации по выбору параметров движителя. Сделана попытка сформулировать основные предпосылки для расчета динамического взаимодействия гусеничного движителя со снежным полотном пути. Рассмотрены особенности взаимодействия роторно-винтового движителя со снегом и льдом. Представлены зависимости для определения сил сопротивления движению и тяги.

Обязанности авторов распределены следующим образом.

А. П. Куляшовым написана глава VII.

Остальные главы написаны Л. В. Барахтановым и В. И. Ершовым, учениками покойного ныне научного руководителя ОНИЛВМ С. В. Рукавишника. Идея написания книги принадлежит С. В. Рукавишникову.

При написании глав I, III, IV было использовано учебное пособие С. В. Рукавишника «Особенности взаимодействия гусеничного движителя снегоходных машин с полотном пути» (1979 г.), материалы для которого были разработаны им совместно с В. И. Ершовым. Они дополнены новыми результатами теоретических и экспериментальных исследований. Главы II, V, VI разработаны и написаны авторами заново.

Совместно с В. Г. Налоевым и Н. П. Шерстневой написан материал 5.3.2, с А. В. Князевым — 6.1.

Авторы благодарят В. И. Панова за любезно предоставленные результаты эксперимента для написания 4.3.

Авторы приносят глубокую признательность профессору Ю. С. Лёзину за помощь, оказанную при подготовке данной книги.

Авторы благодарны сотрудникам ОНИЛВМ за техническую помощь, оказанную при подготовке рукописи.

## ГЛАВА I

### СНЕГ КАК ПОЛОТНО ПУТИ

#### 1.1. Формирование снежного покрова и физические процессы, протекающие в нем

Полотном пути для гусеничного движителя снегоходных машин служит в основном снежный покров в своем естественном состоянии либо в виде уплотненного укатанного слоя.

Снежный покров складывается в результате ряда снегопадов, отделенных друг от друга иногда значительным промежутком времени, причем прирост высоты снежного покрова, вызванный снегопадом средней интенсивности, обычно не превышает 0,02—0,04 м за сутки. Весьма интенсивные снегопады дают суточное увеличение снежного покрова на 0,10—0,15 м и в очень редких случаях — 0,20—0,25 м.

Снег является морфологической средой и представляет собой комплекс из трех фаз: твердой (кристаллы льда), газообразной (воздух, пары воды) и жидкой (гигроскопическая вода). Состояние снежного покрова зависит от термодинамического равновесия твердой, газообразной и жидкой фаз. Изменение одной из фаз под влиянием метеорологических факторов, собственного веса и различного рода механических воздействий обуславливает колебание физико-механических свойств снега в весьма широких пределах. Так, например, свежавывавший снег отличается малой плотностью (0,06—0,20 г/см<sup>3</sup>) и большой подвижностью. Однако в своем первоначальном виде он может сохраняться очень не продолжительное время. В течение нескольких часов под воздействием собственного веса, температуры и небольшой силы ветра (4—5 м/сек) свежавывавший рыхлый снег превращается в метелевый с плотностью 0,20—0,45 г/см<sup>3</sup>. Более сильные ветры при продолжительном

их воздействии способствуют созданию ветрового наста, выдерживающего тяжесть человека.

Под влиянием постоянно происходящих в толще снежного покрова различных физических процессов (режеляции, сублимации, рекристаллизации и т. д.) происходит процесс перекристаллизации, в результате чего снег приобретает зернистую структуру. Характер и интенсивность протекания этих процессов зависят от поверхностной энергии частиц и их взаимного расположения.

Большое влияние на формирование снежного покрова оказывают как климатические (температура окружающей среды, характер и количество выпадающих осадков, скорость ветра и т. д.), так и природные (характер рельефа, наличие растительного покрова и т. д.) условия. Продолжительность залегания снега, его характер и свойства различны для большинства районов нашей страны. На Крайнем Севере число дней в году со снегопадом превышает 135, а на юге страны в некоторые годы снег совсем не выпадает. На севере и в горах снег лежит, не растаивая, 10—11 месяцев в году (в некоторых районах круглый год), а на юге и западе снег не образует устойчивого покрова. Не менее разнообразно и распределение мощности снежного покрова. В ряде районов (р-н Туруханска) среднегоголетняя максимальная высота снежного покрова достигает 1—2 м, в то время как в Якутии и Забайкалье, несмотря на длительность залегания, среднегоголетняя высота снежного покрова составляет лишь 0,3—0,5 м.

Весьма различны также и физико-механические свойства снега по различным районам СССР. На западе и юго-западе, где среди зимы наблюдаются частые оттепели, а также на Крайнем Севере, где часты метели, плотность снега в период снеготаяния достигает значений 0,5—0,6 г/см<sup>3</sup>, а в районах Центральной и Восточной Сибири, где в течение многих зимних месяцев держится устойчивая морозная безветренная погода, плотность снега, как правило, не превышает 0,2—0,3 г/см<sup>3</sup>.

Ниже приведен характер распределения средних плотностей (в г/см<sup>3</sup>) снега в течение зимнего периода по различным районам СССР.

**Июль.** Распределение плотности по заснеженным районам Союза более или менее равномерно и определяется приблизительно в 0,15. Несколько

выше плотность лишь на Крайнем Севере (0,20—0,25), где снег сразу же после выпадения уплотняется сильными ветрами с метелями.

**Декабрь.** Средняя плотность на большей территории СССР колеблется в пределах 0,16—0,20.

**Январь.** Средняя плотность снега по европейской части СССР около 0,20, повышаясь к северу и юго-востоку до 0,25—0,26. В Арктике средняя плотность превышает 0,30. Наименьшая плотность (около 0,15) в Восточной Сибири, где в это время почти совершенно отсутствуют метели и оттепели.

**Февраль.** Средняя плотность снега в европейской части СССР около 0,23—0,24. Более высокая средняя плотность наблюдается на западе (0,25—0,26) благодаря частым оттепелям, на Среднерусской возвышенности (около 0,26—0,27), на юго-востоке и на севере (0,27—0,28), где в этом месяце часты метели, уплотняющие снег. Еще выше плотность в Арктике (0,30—0,32). Наименьшая плотность наблюдается в Центральной и Восточной Сибири (около 0,15).

**Март.** Средняя плотность снега в большинстве районов территории европейской части СССР достигает 0,28, на юго-западе и западе, где уже начинается интенсивное снеготаяние, средняя плотность увеличивается до 0,30. Примерно той же величины плотность снега в Арктике (0,30—0,33). В Восточной Сибири плотность около 0,20.

**Апрель.** В большинстве районов СССР в этом месяце происходит интенсивное уплотнение и таяние снега и плотность достигает 0,35; той же величины достигает средняя плотность в Арктике. Наименьшая плотность (около 0,22) наблюдается в Восточной Сибири.

**Май—июнь.** Снег сохраняется лишь на Крайнем Севере и в Арктике, где он достигает максимальной средней плотности (0,4—0,6).

Как видим, средняя плотность снега по различным районам СССР в течение зимне-весеннего периода меняется от 0,15 до 0,6 г/см<sup>3</sup>. Причем высота снега с плотностью 0,15 г/см<sup>3</sup>, как правило, не превышает 0,30 м. Снег достигает плотности 0,4—0,6 г/см<sup>3</sup> в период снеготаяния, а также в районах с умеренным морским кли-

матом, где оттепели чередуются с морозами. Высота снега в период снеготаяния резко уменьшается, а в районах с умеренным морским климатом она, как правило, не превышает 0,30 м.

Из сказанного можно сделать следующий вывод.

При высоте покрова больше 0,30 м средняя плотность снега в течение зимних месяцев (отрицательные круглосуточные температуры) колеблется в пределах от 0,20 до 0,35 г/см<sup>3</sup>. Другие значения плотности представляют меньший интерес, так как ввиду небольшой высоты снежного покрова он не является серьезным препятствием для гусеничных машин.

Точных количественных связей между метеорологическими факторами, временем и соответствующим состоянием снежного покрова до сих пор не установлено, поэтому обычно пользуются качественным описанием видов снега, классифицируя их в основном по внешним признакам (структуре) и по плотности.

Исследования, проведенные нами в ОНИЛВМ, показали, что если рассматривать снег как полотно пути, все многочисленное разнообразие его видов удобнее будет классифицировать, положив в основу способность снега к различным типам деформации при взаимодействии с движителем транспортных средств. В связи с этим снег как полотно пути можно классифицировать следующим образом:

- фрикционно-связной;
- фрикционный;
- связной;
- корковый (наст, лед).

Разновидности этих комплексных групп сведены в табл. 1.1, которая в основном согласуется с классификацией других авторов и увязывается с принципами классификации, принятыми в механике грунтов [21].

К фрикционно-связному типу относится в основном сухой снег (с влажностью до 12%). Этот снег в большинстве случаев встречается по всей территории Советского Союза и включает в себя свежеснеживший, уплотненный, перекристаллизованный и смерзшийся виды.

Свежеснеживший снег имеет очень короткую продолжительность существования, так как спустя несколько часов уплотняется под действием собственного веса и внешних факторов. Высота свежеснежившего снега, как правило, не превышает 0,05—0,10 м и на работу движителя из-за малой высоты слоя практически существенно влияния не оказывает.

Уплотненный снег образуется из свежеснежившего. Его высота, плотность, твердость и другие механические свойства имеют очень широкий диапазон в зависимости от условий и места залегания. Этот вид снега оказывает существенное влияние на работу движителя, особенно для машин с большим удельным давлением.

Зернистый снег образуется в результате перекристаллизации уплотнившегося снега, он составляет основную массу снежного покрова и существенно влияет на работу движителя снегоходных машин всех весовых категорий.

Смерзшийся снег образуется в результате резкого похолодания после непродолжительных оттепелей и обладает высокой несущей способностью и хорошими тягово-сцепными свойствами.

К фрикционному относится снег, который характеризуется прежде всего своей сыпучестью, т. е. практически отсутствием механической связи между кристаллами. При взаимодействии с движителем снегоходной машины этот тип снега ведет себя приблизительно так же, как сухой песок, т. е. обладает высокой несущей способностью и склонностью к повышенному буксованию в системе движитель — снег.

К связному снегу относятся все виды снега с повышенной влажностью ( $W > 12\%$ ). Характеризуются они прежде всего высокой пластичностью, и их свойства при взаимодействии с движителем напоминают свойства пластичной глины. Образуется снег при длительном действии положительных температур окружающего воздуха (продолжительные оттепели и весеннее снеготаяние), имеет широкий диапазон плотности, твердости и несущей способности. Следует отметить, что в снегах такого вида между плотностью, с одной стороны, твердостью и несущей способностью — с другой существует обратная зависимость, т. е. чем выше плотность (больше влаги), тем ниже твердость и несущая способность. Низкая несущая способность и налипание снега на движитель обуславливают повышенное сопротивление этих видов снега движению.

Существо протекающих в снежной толще процессов, формирующих тип снега с определенными физико-механическими свойствами, сводится к взаимодействию между собой кристаллов льда, которое осуществляется путем режелеяции, рекристаллизации, возгонки и сублимации,

Классификация снега

Таблица 1.1

Тип	Вид	Разновидность	Состояние	Характеристика	Условия образования	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость, НС, МПа	Несущая способность, $\gamma$ , МПа/м	Связность, С, МПа	Коэффициент внутреннего трения, $\operatorname{tg}\varphi$
Фрикционно-связной	свежепавший	пушистый	сухой	звездочки и хлопья	температура 0—(-15)°С	до 0,10	0	0	0,0001—0,0002	0,20
		игльчатый		точкайшие иглы	ниже -15°С	до 0,10				
Угло-ненный	уло-ненный	порошко-видный		кристаллы различной формы	ниже 0°С	до 0,15	0,001	0,01—0,02	0,0001—0,0005	0,20
		мучнистый		снег-крута	около 0°С	0,1—0,15	0,001	0,01—0,02	0,0001—0,0005	0,20
		снег-изморозь		рыхлые разветвленные, смерзшиеся кристаллы	образуются оседанием тумана на холодную поверхность	0,1—0,15				
Фрикционно-связной	перекристаллизованный	средне-зернистый	сухой	рыхлый, рассыпчатый	уплотняется под влиянием тяжести при температуре ниже 0°С	0,10—0,21	0,0015—0,005	0,01—0,025	0,0005—0,0016	0,25
		метелевый		мелкие обломки кристаллов	образуется при наличии ветра во время снегопада	0,23—0,30 (до 0,52)	до 0,16	до 0,005	0,002	
Фрикционно-связной	перекристаллизованный	мелкозернистый	сухой	наибольший размер кристаллов до 1 мм	образуется из уплотнившегося снега путем фирнизации	0,16—0,26	0,0046—0,008	0,015—0,05	0,0002—0,0016	0,30
		средне-зернистый		наибольший размер кристаллов 1—2 мм	образуется из мелкозернистого в результате продолжительнейшей герметизации кристаллизации	0,19—0,28	0,00155—0,0087	0,018—0,11	0,0002—0,002	0,25—0,35
Фрикционно-связной	перекристаллизованный (эриксонный)	крупно-зернистый	сухой	угловатые кристаллы размером 2—5 мм	образуется из среднего зернистого	0,20—0,32	0,0017—0,0115	0,02—0,15	0,001—0,004	0,27—0,35
		смерзшийся			образуется из влажного снега любой разности при отрицательных температурах	0,26—0,35	0,0412 и больше	до 0,52	0,001—0,0043	0,20—0,40

Продолжение

Тип	Вид	Разновидность	Состояние	Характеристика	Условия образования	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость, НС, МПа	Несущая способность, $\gamma$ , МПа/м	Связность, С, МПа	Коэффициент внутреннего трения, $\mu$ , %
фрикционный	фирновый	сухопластичатый (сегплыун)	сухой сыпучий	острореберные прямые угольные пластинки шириной до 5 мм, длиной 10—15 мм	образуется из крупнозернистого	0,24—0,35	0,002—0,0143	0,66—0,75	0,0005—0,0045	0,30—0,40
		трубчатый		пустотелые кристаллы в виде гранчатых трубочек	образуется из пластинчатого					
		повторнофирнованный	сухой сыпучий	многогранные кристаллы размером 5—10 мм	образуется из бесформенной массы влажного, уплотненного и фирнизованного снега после оттепелей	0,35—0,40			0,009—0,018	0,60—0,70
связной	уплотненный	метелевый	влажный слипшийся	мелкие обломки кристаллов	образуется при очень низких температурах из снега	0,26	0,006—0,0139	0,07—0,13	0,001—0,003	0,30
					любой разновидности при температуре 0°C	0,50			0,002—0,006	0,25
						0,70			0,007—0,015	0,2

а также в процессе повторного замерзания и таяния снега. Суть этих явлений кратко можно охарактеризовать следующим образом.

Режеляция (повторное замерзание) заключается в явлении плавления и последующего смерзания тех частей ледяных кристаллов, которые находятся в местах повышенных давлений.

Рекристаллизация представляет собой изменение размеров и формы кристаллов льда за счет перехода атомов и молекул с кристаллической решетки одного кристалла на решетку другого и срастания отдельных кристаллов.

Возгонка и сублимация. Это явление заключается в том, что свободная поверхность каждой частицы льда (снежинки) одновременно отдает молекулы воды (возгонка), минуя жидкую фазу, и поглощает их (сублимация). Образовавшийся над выступами снежинок водяной пар устремляется во впадины (из-за разной величины упругости насыщенного водяного пара) и, перенасыщая воздух, осаждается в них. В результате этого поверхность снежных кристаллов сглаживается (округляется). Более ускоренное испарение мелких кристаллов приводит к увеличению размеров крупных кристаллов. В результате этого с течением времени снег становится крупнозернистым. Чаще всего перенос молекул воды осуществляется в условиях постоянного температурного перепада от более

нагретых нижних к менее нагретым верхним слоям снега. Поэтому в нижних слоях (у почвы) происходит отбор крупных зерен, так как испаряются преимущественно мелкие. Связи между кристаллами нарушаются, снег становится разрыхленным, менее плотным.

Повторное таяние и смерзание. Колебания температуры около 0°C, сопровождающиеся повторным таянием и смерзанием снега, значительно ускоряют превращение свежеснежавшего или метелевого снега в массу бесформенных ледяных кристаллов, сначала мелких, а затем более крупных. Этот процесс называется фирнизацией. С наступлением периода снеготаяния снег успевает перекристаллизироваться во всей толще в течение нескольких дней таяния.

Предлагаемая классификация позволяет несколько сузить исследуемый диапазон изменений физико-механических свойств снега, характеризующих снежный покров как полотно пути, и изложить вопросы взаимодействия движителя снегоходной машины со средой с новых позиций, учитывающих основные положения теории механики грунтов.

## 1.2. Физико-механические свойства снега

Физико-механические свойства снега характеризуются многими параметрами. Однако если рассматривать снег как полотно пути, т. е. как среду, с которой взаимодействует движитель, то к основным физико-механическим свойствам следует отнести следующие: плотность, твердость, коэффициент жесткости, фрикционные свойства, связность, прилипание и примерзание, влажность, температуру, структуру и текстуру снега.

Кратко рассмотрим эти физико-механические свойства и некоторые их зависимости.

### 1. Плотность снега в ненарушенном снежном покрове.

Плотностью снега называется отношение объема полученной из снега воды к взятому объему снега. Практически под плотностью понимается вес единицы объема снега, включая объем, занимаемый минеральными частицами (лед-минерал) и промежутками (порами) между ними. Плотность является одной из важнейших характеристик снежного покрова, так как непосредственно связана с жесткостью, твердостью, влажностью и т. д. Плотность снега зависит от многих факторов и меняется в очень

Таблица 1.2

Значение плотности различных видов снега

Характеристика снега	Плотность снега, г/см <sup>3</sup>
Пушистый, сухой, сразу после выпадения	0,01—0,03
Свежеснежавший, рыхлый	0,05—0,065
Оседающий (рыхлый)	0,07—0,19
Осевший	0,2—0,5
Уплотненный (ветром)	0,2—0,3
Ветровой наст	0,35—0,4
Талый фирновый (весенний)	0,6—0,7
Лед	0,92—0,99

широких пределах. По данным Б. П. Вейнберга [16] и нашим наблюдениям, плотность снега может быть в пределах от 0,01 до 0,7 г/см<sup>3</sup> (табл. 1.1, 1.2).

Плотность снега зависит от места его залегания. Например, в лесу, при отсутствии уплотняющего действия ветра, плотность всегда будет меньше, чем на открытых местах. Плотность изменяется и по глубине снежного покрова. Это происходит за счет микросублимационных процессов, происходящих под влиянием температуры в снежном покрове. Одним из существенных факторов, влияющих на изменение плотности, является температура воздуха и, как следствие, температура снега. С повышением температуры плотность снега увеличивается.

Плотность пресного льда составляет 0,92÷0,99 г/см<sup>3</sup>.

Плотность морского льда зависит от температуры и солености. Зимний лед имеет плотность 0,8÷0,92 г/см<sup>3</sup>. Летом плотность падает до 0,5÷0,7 г/см<sup>3</sup>.

### 2. Твердость снега в ненарушенном снежном покрове.

Твердостью снега называется способность снега сопротивляться проникновению в него другого тела, не producing остаточных деформаций. Твердость определяется как отношение усилия, необходимого для внедрения наконечника в снег, к площади его отпечатка:

$$HC = \frac{P}{S},$$

где  $HC$  — твердость снега, МПА;

$P$  — нагрузка, Н;

$S$  — площадь отпечатка, мм<sup>2</sup>.

В настоящее время наибольшее распространение получили наконечники конусные и сферические.



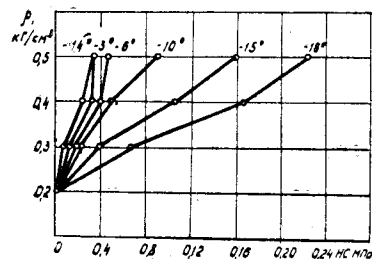


Рис. 1.1. Зависимость влияния температуры снега на его сопротивление деформации

Твердость, так же как и плотность снега, зависит от целого ряда факторов и характеризует прочность снежного покрова, компактность расположения кристаллов, поддерживающую способность и другие физико-механические свойства снега.

Из графика (рис. 1.1) видно, что чем больше плотность  $\rho$ , тем больше твердость НС зависит от температуры. Резкое увеличение твердости плотного снега при понижении температуры и небольшое увеличение твердости рыхлого объясняется тем, что твердость снега в основном зависит от прочности самих снежинок и лишь в незначительной степени от прочности связи между ними.

**3. Коэффициент жесткости снега.** Под коэффициентом жесткости снега понимается величина удельной нагрузки, необходимой для деформирования снежного покрова на единицу длины.

Коэффициент жесткости на основе вдавливания в снег плоского штампа определяется по формуле:

$$K_{жк} = \frac{q}{h},$$

где  $K_{жк}$  — коэффициент жесткости снега, Н/м<sup>3</sup>;  
 $q$  — удельная нагрузка на штамп, Па;  
 $h$  — величина перемещения штампа, м.

В общем случае коэффициент жесткости является величиной переменной (рис. 1.2). Однако при допущении, что между удельной нагрузкой на штамп и его перемещением существует прямолинейная зависимость (до точки  $L$ ), коэффициент жесткости будет постоянной величиной. Следует отметить, что оценка состояния снежного покрова по коэффициенту жесткости является весьма условной, поскольку величина деформации снега зави-

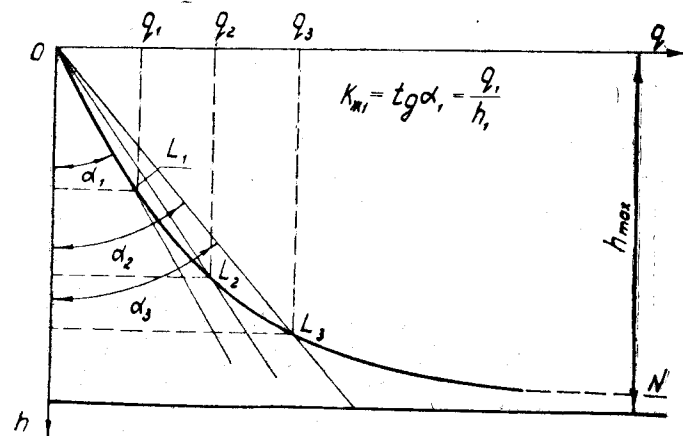


Рис. 1.2. Зависимость деформации снега от величины удельного давления

сит не только от давления, но и от размеров штампа. Исходя из этого, можно считать, что величина давления какой-либо машины, находящейся на снежном покрове, отнесенная к глубине осадки этой машины, по сути дела характеризует жесткость снега, однако это относится только к данной машине. Такая характеристика не может быть распространена при оценке погружаемости в снежный покров других машин, имеющих отличные от данной машины опорные площади.

Значения коэффициента жесткости меняются в зависимости от состояния снега. В таблице 1.3 приведены значения жесткости снега по исследованиям И. В. Крагельского и А. А. Шахова [11].

Исследования влияния температуры снега на его сопротивление деформации показали [10], что чем ниже температура снега, тем больше коэффициент жесткости, т. е. больше сопротивление снега деформации.

**4. Фрикционные свойства снега.** Фрикционные свойства снега характеризуются сопротивлением трению различных поверхностей. Для оценки фрикционных свойств служит коэффициент трения, который зависит от материала и качества скользящей поверхности, от состояния снежного покрова и других факторов.

Таблица 1.2  
Влияние типа снежного полотна пути на его жесткость и плотность

Характеристика снега	Исходная плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Коэффициент жесткости $K_{ж}$ , Н/м
Рыхлый снег	0,23	$1 \cdot 10^6$
Слабоуплотненный снег	0,28	$2,8 \cdot 10^6$
Слабоукатанная дорога	0,5	$8,0 \cdot 10^7$
Прочная снеговая дорога	0,6	$4,0 \cdot 10^8$

Многочисленные исследования показали, что коэффициент трения о снег различных материалов зависит от давления, как это показано на рис. 1.3. Эти результаты противоречат определению коэффициента трения, который зависит от материала и физического состояния поверхностей трущихся тел.

Изменение коэффициента трения при увеличении давления объясняется следующими факторами. При повышении давления увеличиваются деформации, происходит измельчение кристаллов и нарушение связей между ними. Острые кромки кристаллов разрушаются и сглаживаются, а сами кристаллы под воздействием внешних сил, например скользящей опорной поверхности, поворачиваются и занимают положение, при котором внешнее воздействие, обуславливающее силу трения, становится минимальным.

В результате взаимодействия опорной поверхности с кристаллами снега возникают зоны сверхвысоких давлений, что вызывает плавление части кристаллов. Таким образом под скользящей поверхностью образуется тончайшая водяная пленка и трение из сухого превращается в полусухое. Степень оплавления кристаллов в точках контакта и количество водяной пленки возрастают при увеличении удельного давления и повышении температуры снега. Соответственно уменьшается и сила трения.

Отмеченная природа зависимости показывает, что указанное выше противоречие может исчезнуть, если ввести понятие распределенной по поверхности скольжения удельной силы трения  $\tau_a$ . Так как сила трения  $F_{тр}$  определяется по зависимости

$$F_{тр} = \mu G = \tau_a S,$$

то нетрудно видеть, что

$$\tau_a = \mu q.$$

Перестроенный для этой величины график представлен на рис. 1.4. Полученный результат хорошо описывается законом Кулона—Мора

$$\tau_a = c_a + q \operatorname{tg} \varphi_a,$$

где  $c_a$  — связность трущихся поверхностей, природа которой описана выше (МПа);

$\operatorname{tg} \varphi_a$  — истинный коэффициент трения, теперь уже не зависящий от нагрузки.

Полученные по методу наименьших квадратов значения  $c_a$  и  $\operatorname{tg} \varphi_a$  дали следующие зависимости:

для углеродистой стали

$$\tau = 0,000221 + 0,167 q,$$

для легированной стали

$$\tau = 0,000121 + 0,115 q,$$

для дюралюминия

$$\tau = 0,000220 + 0,121 q.$$

Кроме внешнего трения, определяемого трением инородных тел, различают еще коэффициент внутреннего трения, определяемый трением снега по снегу (табл. 1.1).

5. **Связность снега.** Связность снега, так же как и коэффициент внутреннего трения, характеризует сопротивление снега сдвигу. Связность — это сила сцепления, связывающая кристаллы снега капиллярным действием пленок влаги и другими сложными физическими явлениями, не изменяющимися от внешнего давления. Эту силу можно сравнить с действием клея, удерживающим вместе частицы независимо от давления, которое они могут оказать одна на другую. Сила, необходимая для того, чтобы произвести сдвиг по такой склеенной площади, будет пропорциональна этой площади и связности частиц.

Связность снега характеризуется коэффициентом связности с МПа. Коэффициент связности с определяется его максимальным сопротивлением срезу снежного па-

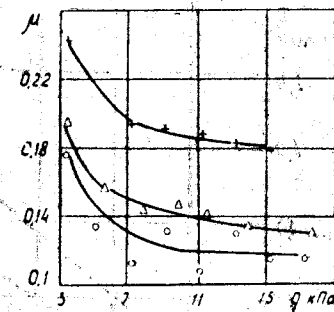


Рис. 1.3. Зависимость коэффициента трения от давления

○ — легированная сталь  
△ — дюралюминий  
+ — углеродистая сталь

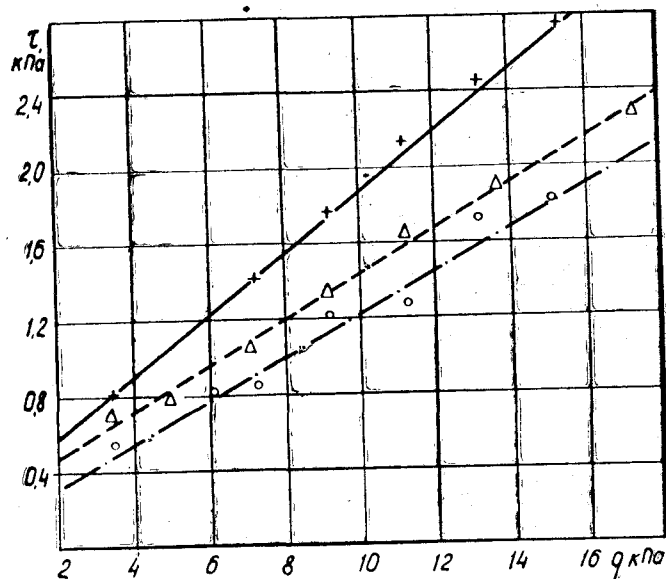


Рис. 1.4. Зависимость удельной силы трения от давления

раллелизме педа (ограниченного рамкой прибора) при давлении  $q=0$ .

В табл. 1.4 приведен характер изменения коэффициента связности снега в зависимости от условий формирования снежного покрова.

**6. Прилипание и примерзание снега.** Прилипание и примерзание снега увеличивает сопротивление движению. Прилипание происходит наиболее интенсивно при температуре окружающего воздуха  $+1,5^{\circ}\text{C}$ . При более низкой температуре оно может перейти в примерзание. Прилипание тем сильнее, чем менее теплопроводен материал опорной поверхности и чем он более шероховат.

**7. Влажность снега.** Одним из весьма существенных факторов, влияющих на физико-механические свойства снега, является наличие в снеге воды.

Значительные признаки появления воды в снеге в жидкой фазе бывают при температуре  $-4^{\circ}\text{C}$ . При температурах  $-1^{\circ}\text{C} \div -0,5^{\circ}\text{C}$  влажность составляет 1,5—2%.

Такое количество влаги весьма незначительно влияет на свойства снежного покрова. При температуре  $0^{\circ}\text{C}$  происходит интенсивный процесс таяния и увлаж-

Таблица 1.4

Влияние структуры, плотности и температуры снежного покрова на его связность

	Характеристика снега	Связность, МПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Температура снежного покрова, °С
Фрикционно-связной	Свежевыпавший Уплотненный	0—0,0001	0,10	-2+—15
		0,0001—0,0005	0,15	-4+—8
		0,0004—0,0007	0,22	-2+—18
		0,0006—0,0015	0,26	-6+—18
		0,0017—0,0019	0,30	-2+—28
Фрикционно-связной	Фирновый	0,0017—0,0043	0,35	-2+—28
		0,0026—0,0095	0,40	-2+—28
		0,0006—0,0016	0,25	-4+—10
		0,0019—0,0045	0,30	-4
		0,008—0,0140	0,40	-4+—8
Фрикционно-связной	Влажный	0,0016—0,002	0,20	+2
		0,0025—0,003	0,26	+2
		0,0041	0,35	+2
		0,001—0,008	0,40	+2
		0,013—0,015	0,45	+2

нения. При этом физико-механические свойства снега начинают изменяться существенно. Исследования, проведенные В. И. Пановым в ОНИЛВМ [15], показали, что в первую очередь влажность влияет на плотность снега. Во всех случаях с увеличением влажности плотность снега увеличивается.

На рис. 1.5 показаны результаты исследования влияния влажности на плотность, проведенного на трех участках, имевших до начала таяния влажность  $W=0$  и плотность на I участке  $\rho_1=0,23$  г/см<sup>3</sup>, на II участке  $0,32$  г/см<sup>3</sup> и на III участке  $\rho_3=0,43$  г/см<sup>3</sup>. Кривые иллюстрируют увеличение плотности снега одновременно с увеличением влажности. Также можно сделать вывод, что по мере увеличения влажности разница в плотностях снега на различных участках постепенно уменьшается.

Влажность в значительной мере влияет на сопротивление снега сдвигу. Испытания, проведенные ОНИЛВМ в различных районах страны [15], показали, что существует критическая влажность, определяющая характер изменения сопротивления снега сдвигу. На рис. 1.6 показаны результаты испытаний в районе г. Горького, про-

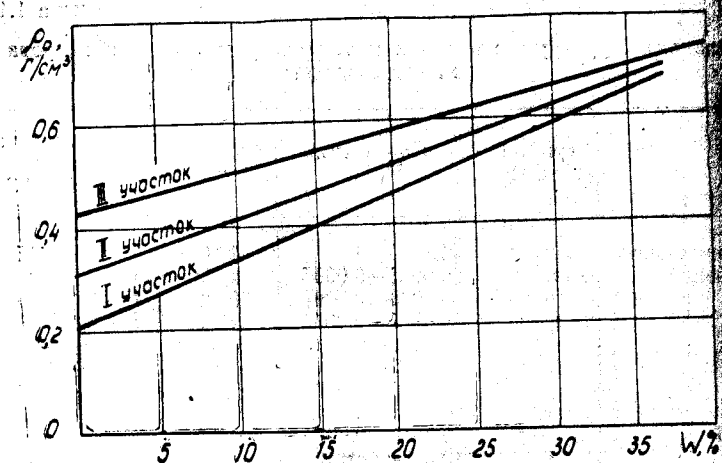


Рис. 1.5. Зависимость влияния влажности снега на его плотность

веденных на трех участках, имевших различную плотность сухого снега ( $W=0$ ):  $\rho_1=23 \text{ г/см}^3$ ,

$$\rho_2=0,32 \text{ г/см}^3, \quad \rho_3=0,43 \text{ г/см}^3.$$

Замеры выполнены при постоянном давлении. Анализируя полученные кривые, можно сказать, что с увеличением влажности от 0 до 12—15% сопротивление снега сдвигу  $\tau_{cp}$  возрастает, при дальнейшем увеличении влажности — падает. Таким образом, влажность снега в пределах 12—15%, очевидно, является критической, после которой сцепные качества снега сильно ухудшаются. Влажность влияет также и на жесткость снега.

В табл. 1.5 приведен характер изменения коэффициента жесткости в зависимости от влажности. Как видно из таблицы, коэффициент жесткости увеличивается пропорционально увеличению плотности и соответственно влажности. Очевидно, дальнейшее увеличение коэффициента жесткости по аналогии со сдвигом снега будет происходить лишь до критической влажности  $W=12-15\%$ , после чего жесткость снега будет уменьшаться.

8. Температура снега и окружающего воздуха. Как было сказано выше, от температуры окружающего воз-

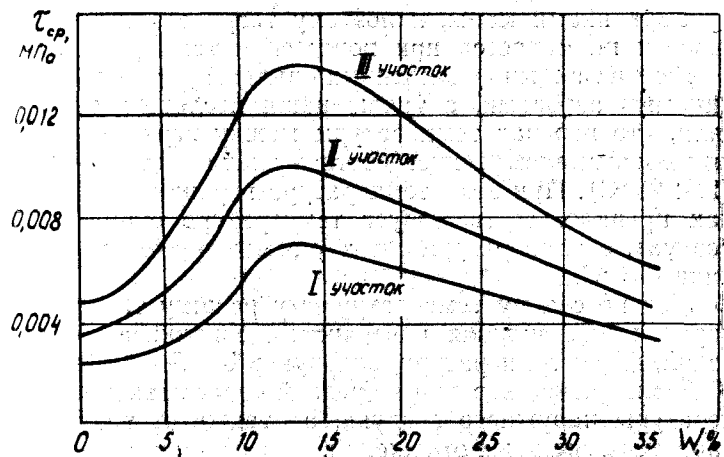


Рис. 1.6. Зависимость влияния влажности снега на его сопротивление сдвигу

духа зависят физико-механические свойства снежного полотна пути.

Исследования по определению влияния температуры снега на его сопротивление деформации (рис. 1.1) показали, что чем ниже температура, тем больше сопротивление снега деформации (больше коэффициент жесткости и больше твердость). При этом чем больше плотность снега, тем больше твердость зависит от температуры.

Резкое увеличение твердости плотного снега при понижении температуры и небольшое увеличение твердости рыхлого снега объясняется тем, что твердость снега зависит как от прочности снежинок, так и от прочности связей между ними. В рыхлом снеге связи меж-

Таблица 1.5  
Изменение жесткости снега в зависимости от влажности

Влажность, $W, \%$	Плотность, $\rho, \text{ г/см}^3$	Температура снега, $t^\circ\text{C}$	Коэффициент жесткости, $K_{ж}, \text{ Н/м}^3$
1,0	0,220	-0,5	$7,5 \cdot 10^5$
2,0	0,275	0	$1,16 \cdot 10^6$
5,0	0,320	0	$1,38 \cdot 10^6$

ду снежинками малы, и поэтому твердость снега практически не меняется при понижении температуры.

Результаты многочисленных опытов, проведенных различными авторами, а также наши исследования показали, что перепад температуры между верхним и нижним слоями снега может достигнуть значительных величин (20–25 °С). При этом температура верхних слоев снега как правило, соответствует температуре окружающего воздуха, а температура снега у земли редко опускается ниже –5 °С.

Лед по своему температурному режиму также неоднороден. Его нижняя поверхность, соприкасающаяся с водой, имеет температуру, близкую к 0 °С.

Температура верхней и средней части зависит от температуры наружного воздуха, а также от толщины и характера снеговых отложений.

В зимний период зависимость температуры от толщины льда близка к линейной. В весенний период верхние слои имеют более высокую температуру за счет повышения температуры наружного воздуха и влияния солнечной радиации.

В зависимости от температуры и вида деформации пределы прочности льда изменяются практически линейно.

**9. Структура и текстура снега.** Под структурой снега подразумевают обусловленное характером внутренних связей закономерное расположение различных по размеру и форме твердых частиц льда. Иными словами, структура снега характеризуется размером и формой твердых частиц льда, их взаимным расположением (упаковкой) и характером связей между ними (сыпучий снег, смерзшийся и т. д.). Чем плотнее «упакованы» зерна снега, тем, естественно, меньше пористость и выше плотность снега.

Теоретически возможный предел уплотнения снега за счет только «упаковки» зерен снега будет находиться в границах изменения плотности снега от 0,480 до 0,678 г/см<sup>3</sup>. Максимальная зафиксированная плотность, полученная посредством интенсивной вибрации в сочетании с утрамбовкой частиц снега поршнем, составляет 0,58 г/см<sup>3</sup>.

Эта критическая плотность представляет собой предел, за которым упаковка зерен теряет свою эффективность. Дальнейший процесс уплотнения снега может

происходить только в результате процессов, вызывающих изменение размеров и форм зерен.

Все это относится к «сыпучему снегу», естественно, что снег, имеющий включение воды, будет иметь большую плотность.

Под текстурой снежного покрова понимают совокупность признаков, характеризующих неоднородность его сложения.

Ярко выраженная слоистая текстура снежного покрова делает его анизотропным, т. е. таким, при котором свойства снежного покрова (например, жесткость, сопротивление сдвигу и др.) будут различны в различных направлениях.

Рассмотренные выше физические процессы, протекающие в снеге, и его физико-механические свойства позволяют сделать вывод, что снег может быть рассмотрен как дисперсное тело. В терминологии механики грунтов дисперсное тело называют грунтом.

Итак, в указанном выше смысле слова снег является грунтом. Это позволяет (после тщательного анализа возможности применения) использовать ряд положений и методов, разработанных механикой грунтов. В частности, учитывая высокую дисперсность снега, можно считать, что газообразная фаза всегда сообщается с атмосферой. Следовательно, эта компонента не участвует в распределении нагрузок между частицами скелета.

Однако снег имеет целый ряд особенностей по сравнению с рассматриваемыми в классической механике грунтами. Основной особенностью снега является тот факт, что скелет его является другим агрегатом состояний воды. А это придает своеобразие строению и структурным связям снега как грунта. Следуя классификации академика П. А. Ребиндера, можно считать, что в снеге, как в обычном грунте, действуют кристаллизационные (хрупкие, жесткие, необратимые) и водно-коллоидные (пластичные, мягкие, обратимые) связи. Но в отличие от классических грунтов в снеге очень быстро (практически в течение нескольких секунд) возникают новые кристаллизационные связи (в естественных грунтах это происходит в течение значительно большего времени). В чем причина возникновения водно-коллоидных связей в снеге? В естественных грунтах эти связи возникают вследствие наличия свободной воды, заполня-

ющей все его поры. В снеге коллоидные связи образуются вследствие плавления кристаллов от трения при перемещении их относительно друг друга. Образующаяся вода при отрицательной температуре быстро переходит в снег (лед), образуя кристаллизационные связи. Такое своеобразие твердой фазы обуславливает особенности компрессии снега как грунта.

В естественных грунтах влажность может достигать весьма высоких величин. В механике грунтов и в теории проходности вездеходных машин по торфяникам и ледяным грунтам чаще всего рассматривается грунт, поры которого полностью заполнены водой, — грунтовая масса, в терминологии механики грунтов. Относительная влажность таких грунтов достигает 80—100%. Наличие свободной воды при некоторых дополнительных условиях приводит к тому, что часть давления, приложенного к грунтовой массе, воспринимается водой, что согласно теории фильтрационной консолидации приводит к некоторому запаздыванию распространения напряжений в толще грунта по сравнению с законом изменения прилагаемой нагрузки. Это изменение обычно учитывается с помощью уравнения Терцаги—Герсеванова. В отличие от естественного грунта, как было показано выше, влажность снега не может достигать таких значительных величин, поэтому данное уравнение нельзя использовать для описания процессов деформации в снеге. В этом случае можно считать, что напряжения, возникающие в скелете, передаются по толще практически одновременно с прилагаемой нагрузкой. Это позволяет воспользоваться другой идеей Н. М. Герсеванова и определять напряжение по теории сплошных сред.

### 1.3. Несущая способность снежного полотна пути

#### 1.3.1. Зависимость деформации снега от величины нагрузки и высоты снежного покрова

Понятие «несущая способность» включает в себя совместное взаимодействие системы снег—машина.

Движение снегоходной машины по снежному покрову сопровождается его деформацией.

Зависимость между деформациями и напряжениями

впервые была применена к грунтам, а затем использована для снежного покрова:

$$q = ch,$$

где  $q$  — давление, МПа;  
 $c$  — коэффициент пропорциональности, МН/м<sup>3</sup>;  
 $h$  — величина деформации, м.

Позднее А. А. Крживицкий вместо коэффициента пропорциональности предложил ввести «коэффициент жесткости»  $K_{ж}$ :

$$K_{ж} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{q}{h}, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  — угол наклона компрессионной кривой, показывающий закон увеличения деформации при возрастании удельного давления (рис. 1.2).

Как показали дальнейшие исследования, указанная зависимость справедлива лишь для некоторых определенных фазовых состояний грунта и снега. В применении к снежной целине она справедлива лишь для узкого диапазона рабочих давлений, как правило, не превышающих 0,02 МПа. В наиболее общем виде закон изменения сопротивления грунта деформации был сформулирован Берштейном—Летошневым

$$q = \kappa \cdot h^n, \quad (1.2)$$

где  $\kappa$  и  $n$  — параметры, зависящие от свойства грунта (снега).

Характер зависимости между нагрузкой и деформацией может быть выведен из компрессионной кривой, приведенной на рис. 1.7, где

$e$  — коэффициент пористости грунта (снега), т. е. отношение объема пор к объему скелетной части грунта (снега);

$p$  — давление, равномерно распространенное в грунте;

$p_0$  — давление, при котором снег превращается в лед.

Сплошная линия соответствует условию полного отсутствия структурной прочности скелета (т. е. структурных связей) и равномерного распределения плотности по всему объему грунта. Вообще говоря, оба эти условия в снеге, как было показано выше, нарушаются.

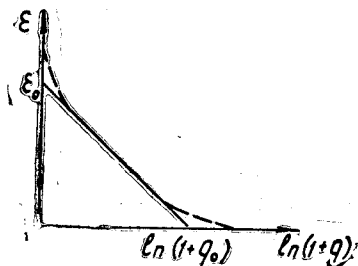


Рис. 1.7. Компрессионная кривая

Истинная линия компрессии будет не прямой, а кривой, как показано на графике пунктиром. Но поскольку реальные машины работают в режимах давлений, существенно отличающихся от нуля, и тех, при которых снег превращается в лед, можно пренебречь отклонениями от прямой в начальной и конечной областях кривой декомпрессии. Тогда уравнение прямой в наиболее

удобной форме можно записать так:

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_0}{\ln(1+p_0)} \ln(1+p).$$

Рассмотрим элементарный слой снега площадью  $F$  и высотой  $dz$ , деформируемый под плоским штампом. Его объем —  $Fdz$ , а масса —  $\rho Fdz$ , где  $\rho$  — начальная плотность снега. Вводя плотность льда  $\rho_{\text{л}}$  и учитывая указанное выше положение о том, что скелет снега есть лед, получим объем скелета  $\frac{\rho}{\rho_{\text{л}}} Fdz$ , а объем пор снега равен их разности, т. е.

$$Fdz - \frac{\rho}{\rho_{\text{л}}} Fdz.$$

Тогда начальный коэффициент пористости

$$\varepsilon_0 = \frac{Fdz - \frac{\rho}{\rho_{\text{л}}} Fdz}{\rho Fdz} = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{\text{л}}}.$$

После деформации элемента высотой  $dz$  на величину  $dh$  получим объем снега  $F(dz - dh)$ .

При этом (считаем лед (воду) несжимаемым) объем скелетной части остается без изменения. Тогда получим новый коэффициент пористости

$$\varepsilon = \frac{F(dz - dh) - \frac{\rho}{\rho_{\text{л}}} Fdz}{\rho Fdz} = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{\text{л}}} - \frac{1}{\rho} \frac{dh}{dz}$$

Подставляя полученные выражения для  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  в уравнение декомпрессии, получим:

$$dh = \frac{\rho \varepsilon_0}{\ln(1+p_0)} \ln(1+p) dz.$$

Итак, под давлением  $p$  элементарный  $dz$  получит осадку  $dh$ . Тогда снежный покров глубиной  $H$  получит осадку  $h$ , определяемую зависимостью

$$h = \int_0^H dh = \frac{1-\rho}{\ln(1+p_0)} \int_0^H \ln(1+p) dz. \quad (1.3)$$

Используя метод интегрирования по частям, получим:

$$h = \gamma \left( z \ln(1+p) \Big|_0^H - \int_0^H \frac{z dp}{1+p} \right),$$

где

$$\gamma = \frac{1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{л}}}}{\ln(1+p_0)}.$$

Если, как было обосновано выше, определять распределение давления  $q$  по толще снега по Герсеванову, т. е. по теории сплошных тел, то  $p(z) = \sigma_z$ , где  $\sigma_z$  — вертикальные напряжения. Задача распределения вертикальных напряжений по глубине решена для прямоугольной (Лав) и полособразной распределенных нагрузок (Прандль, Герсеванов и др.).

В любом случае напряжения в горизонтальных плоскостях могут быть выражены зависимостью

$$p(z) = \kappa q,$$

где  $q$  — интенсивность распределенной нагрузки;  $\kappa$  — функция от  $z$ , меняющая свой вид в зависимости от способа приложения нагрузки (полоса, прямоугольник, цилиндр, сфера и т. д.).

Известно, что  $k(z)$  — функция, быстро убывающая, поэтому в приведенной выше подстановке  $p(H) \ll 1$  и  $\ln(1+p(H)) \approx 0$ , т. к. имеет смысл рассматривать только большие значения  $H$ .

Тогда можно окончательную формулу осадки (или погружения) записать в виде

$$h = -\gamma \int_0^H \frac{z \kappa' q dz}{1 + \kappa q}$$

Пусть читателя не смущает минус перед интегралом  $\kappa'$  тоже отрицательна.

Воспользуемся теоремой о среднем для определенного интеграла, тогда

$$h = \gamma \frac{q \xi \kappa'(z_0) H}{1 + \kappa(z_0) q}; \quad (1.4)$$

где  $0 < z_0 < H$ ,

или 
$$h = \frac{B q}{A + q};$$

где  $A = \frac{1}{\kappa(z_0)}$ ,

$$B = \frac{\gamma z_0 \kappa'(z_0) H}{\kappa(z_0)} = \frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_n}\right) z_0 \kappa'(z_0) H}{\kappa(z_0) \ln(1 + \rho_0)}$$

Итак, при изложенных выше допущениях зависимость нагрузка—вертикальная деформация теоретически должна иметь гиперболический вид. Коэффициенты А и В малоприспособны для теоретического анализа характера протекания процесса вертикальной деформации.

Хотя характер влияния плотности на погружение выступает довольно выпукло, остальные величины являются взаимозависимыми и весьма неопределенными. Влияние глубины снежного покрова и характера приложения нагрузки практически не поддается анализу.

Кроме того, реальный процесс вертикальной деформации снежного покрова отличается от идеализированной модели, дающей компрессионную кривую. При сохранении общего характера гиперболической зависимости нагрузка—осадка физический смысл коэффициентов А и В и методы их вычисления могут отличаться от приведенных выше. Поэтому зависимость между нагрузкой и деформацией лучше определить экспериментально.

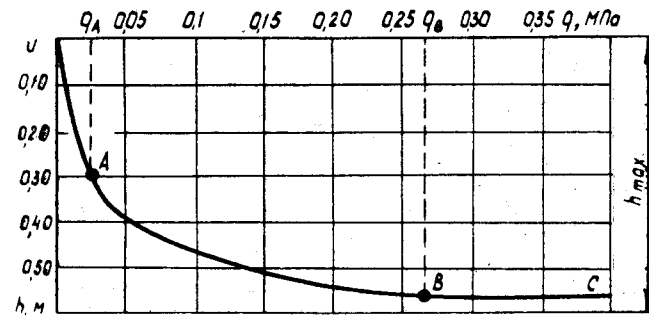


Рис. 1.8. Зависимость между нагрузкой на штамп и деформацией снега

В результате экспериментальных исследований, проведенных в ОНИЛВМ, В. А. Малыгиным была предложена следующая зависимость, характеризующая взаимозависимость между давлением  $q$  и деформацией снега  $h$  (рис. 1.8):

$$h = \frac{q}{\left(\frac{1}{h_{\max}}\right) q + \gamma}, \quad (1.5.)$$

$\gamma$  — коэффициент начальной жесткости снега, характеризующий удельное сопротивление деформации (МПа/м) в начальной стадии, представляет собой коэффициент жесткости при нагрузках и деформациях, близких к 0;

$h_{\max}$  — коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному его уплотнению (при сохранении зернистой структуры), м.

В результате испытаний, проведенных в ОНИЛВМ, установлено, что между коэффициентом начальной жесткости  $\gamma$  и жесткостью  $K_{ж}$  существует прямолинейная зависимость:

$$\gamma = c' K_{ж},$$

$c'$  — коэффициент пропорциональности. По данным В. А. Малыгина,  $c' = 0,735$ .



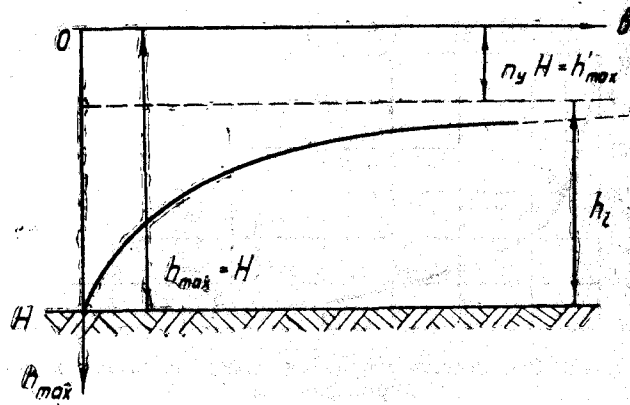


Рис. 1.9. Зависимость коэффициента  $h_{\max}$  от ширины гусеницы

Для определения  $h_{\max}$  примем ширину штампа близкой к нулю, тогда предельная величина  $h_{\max}$  будет равна высоте снежного покрова  $H$ . При увеличении ширины штампа предельная величина его заглабления будет уменьшаться за счет уменьшения выдавливания снега из-под штампа. Наименьшее значение  $h_{\max}$  будет в том случае, когда снег вообще не будет выдавливаться.

Таким образом, зависимость коэффициента  $h_{\max}$  от ширины штампа может быть представлена в виде кривой, одна ветвь которой пересекает ось ординат в точке равной величине  $H$ , а другая асимптотически приближается к прямой, характеризующей предельную деформацию снега при отсутствии его выдавливания из-под опорной поверхности (рис. 1.9.).

Приведенная на рис. 1.9. кривая может быть описана формулой:

$$h_{\max} = H \frac{n_y b + d}{b + d}, \quad (1.7)$$

где  $H$  — высота снежного покрова, м;  
 $b$  — ширина штампа, м;  
 $n_y$  — коэффициент уплотняемости снега;  
 $d$  — коэффициент, определяющий характер изменения кривой, м.

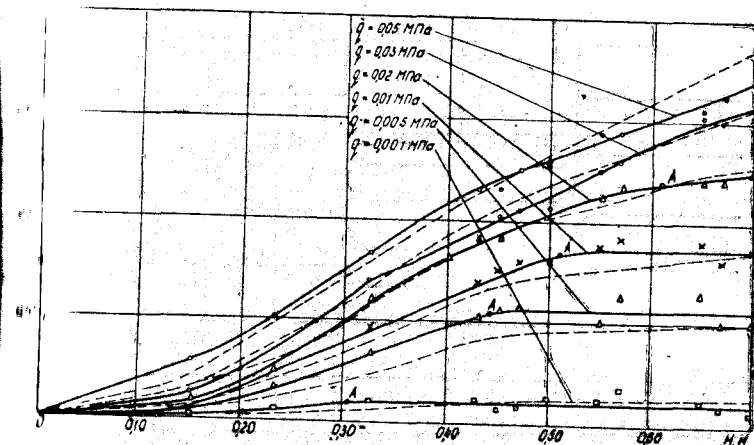


Рис. 1.10. График влияния высоты снежного покрова  $H$  на величину его деформации  $h$  под действием различных удельных нагрузок

Согласно экспериментальным исследованиям, проведенным В. А. Малыгиным в ОНИЛВМ,

$$n_y = \frac{a}{\rho_0 + a}, \quad (1.7)$$

где  $a = 0,3 \text{ г/см}^3$ .

На основании этих же экспериментальных данных зависимость  $d$  от  $H$  хорошо согласуется с выражением вида:

$$d = 0,0287 H^2.$$

Таким образом, зная легко определяемые параметры (начальную плотность снега  $\rho_0$  и его начальную жесткость  $\gamma$ ), можно определить глубину погружения плоского штампа на снежной целине заданной высоты  $H$  в зависимости от нагрузки.

$$h = \frac{q}{\left[ \frac{b+d}{H \left( \frac{a}{\rho_0 + a} b + d \right)} \right]^{q+\gamma}} \quad (1.8)$$

Как видно из формулы, высота снежного покрова  $H$  в значительной степени влияет на величину деформации. Однако из этой формулы (1.8) видно, что с уве-

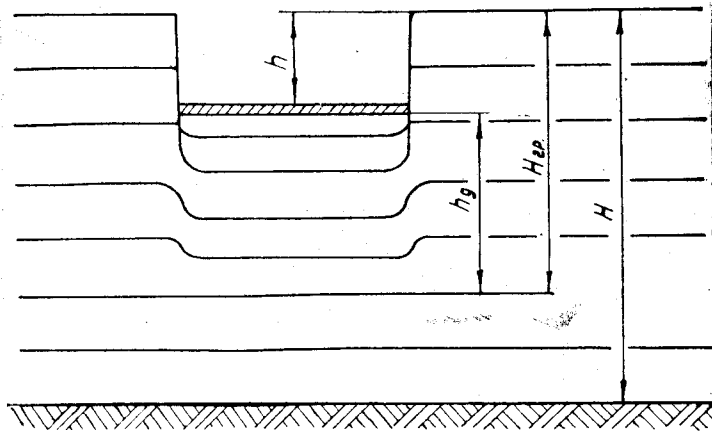


Рис. 1.11. Распространение зоны пластических деформаций снега

личением высоты снежного покрова величина деформации  $h$  увеличивается лишь до некоторого предела, после чего высота снежного покрова перестает влиять на величину погружения штампа. Экспериментальные кривые, приведенные на рис. 1.10, подтверждают сказанное.

Причем чем меньше величина удельной нагрузки  $p$  на штамп, тем меньше граничная высота снежного покрова, превышение которой не влияет на деформацию снега (точка А на кривых рис. 1.10).

На рис. 1.11 представлена схема распространения зоны пластической деформации снега. Как видно из рисунка, определенной нагрузке соответствует погружение штампа на определенную величину  $h$ . При этом под штампом снег деформируется на глубину  $h_d$ , соответствующую величине распространения зоны пластической деформации. Слой снега, лежащие ниже  $h+h_d = H_{gp}$ , очевидно, не испытывают напряжений, превышающих предел упругости снега, и пластическим деформациям смятия не подвергаются, а следовательно не оказывают практического влияния на величину погружения  $h$ . Иными словами, если высота снежного покрова больше, чем  $h+h_d$ , то она на погружение штампа не влияет. Полученный результат подтверждает правомочность использованного выше допущения

$$\ln(1+p(H)) \approx 0.$$

### 1.3.2. Характер протекания процессов при вертикальной деформации снега

При деформации снежного покрова опорными поверхностями снегоходных машин происходят два типа структурных преобразований.

1) Эволюционный: перемещение кристаллов относительно друг друга.

2) Сопровождающийся разрушением: нарушением структурных связей, изломом кристаллов.

В результате эволюционных преобразований происходит более плотная упаковка ледяных кристаллов, а следовательно, приобретает более плотную структуру. Немедленно под поверхностью штампа образуется достаточно прочная зона уплотненного снега, так называемое ядро уплотнения. При его движении происходит выдавливание снега из-под штампа.

Таким образом, погружение опорной поверхности в процессе эволюции происходит:

1) за счет уплотнения снега —  $h_y$ ;

2) за счет выдавливания снега из-под опорной поверхности в стороны  $h_b$ .

Суммарная величина погружения штампа

$$h = h_y + h_b.$$

Уплотнение снега под штампом, а следовательно, и перемещение  $h$  будет пропорционально величине напряжений смятия  $\sigma_{см}$ . На основании проведенных экспериментов известно, что снежная целина, имеющая высокую несущую способность (рыхлый снег), под воздействием вертикальной нагрузки деформируется в виде столбика. В общем случае схему реакции сил, действующих в любом сечении деформируемой зоны снега, можно представить в виде, изображенном на рис. 1.12.

Исходя из предложенной схемы, при внедрении в снежный покров штамп испытывает сопротивление перемещению со стороны снега за счет сил сопротивления смятию и сил сопротивления снега срезу  $R_{ср}$

$$P = R_{см} + R_{ср}. \quad (1.9)$$

Силы сопротивления смятию  $R_{см}$  действуют на поверхность штампа (в зоне, приблизительно ограниченной его габаритными размерами). В этом случае суммарную силу сопротивления смятию в

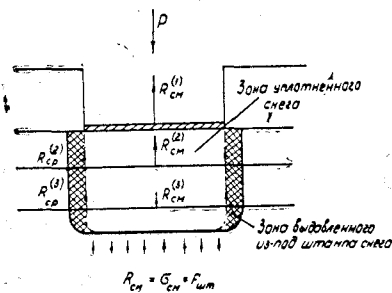


Рис. 1.12. Схема реакций, действующих в сечении деформируемой зоны

$n$ -м слое можно определить

$$R_{см}^n = \sigma_{см}^n \cdot S_{шт}, \quad (1.10)$$

где  $\sigma_{см}^n$  — напряжение смятия в  $n$ -м слое;  
 $S_{шт}$  — площадь штампа.

Сила сопротивления срезу  $R_{ср}$  по своему физическому смыслу является суммой сил трения и зацепления между кристаллами уплотненного снега и может быть выражена

$$R_{ср} = \Pi \Sigma \Delta \tau_{ср} \cdot \Delta h, \quad (1.11)$$

где  $\Delta \tau_{ср}$  — напряжение среза в элементарном слое снега;

$\Pi$  — периметр опорной поверхности (штампа);

$\Delta h$  — высота элементарного слоя сжатого снега.

Рассмотрим изменение действия этих сил по глубине снежного покрова. Для этого разобьем всю толщину снежного покрова на элементарные слои, как это показано на рис. 1.12. Силы смятия, действующие на 1-й и 2-й и т. д. элементарные слои, соответственно будут равны:

$$R_{см}^{(1)} = P;$$

$$R_{см}^{(2)} = P - R_{ср}^{(1)};$$

$$R_{см}^{(3)} = P - (R_{ср}^{(1)} + R_{ср}^{(2)});$$

$$R_{см}^{(n)} = P - (R_{ср}^{(1)} + R_{ср}^{(2)} + \dots + R_{ср}^{(n-1)}). \quad (1.12)$$

Из формулы (1.12) видно, что чем дальше слой снега отстоит от поверхности штампа, тем меньше будут силы смятия, действующие на этот слой, и тем меньше соответственно деформация этого слоя. При равномерном распределении напряжений смятия по площади уплотненной зоны будем иметь

$$\sigma_{см} = \frac{R_{см}}{S_{шт}} = \frac{P - \sum_{i=1}^{n-1} R_{ср}}{S_{шт}} = q - \frac{\Pi}{S_{шт}} \sum_{i=1}^{n-1} \Delta \tau_{ср} \Delta h. \quad (1.13)$$

Перемещение штампа за счет выдавливания снега из-под опорной поверхности  $h_в$  будет пропорционально массе снега, выдавленной в горизонтальном направлении по всему периметру боковой поверхности уплотненной зоны (рис. 1.12).

Если эту массу снега представить себе равномерно распределенной под штампом, то, очевидно, ее высота была бы равна перемещению штампа за счет выдавливания:

$$h_в = \frac{\Pi}{S_{шт}} S' \cdot K'. \quad (1.14)$$

Процессы смятия и выдавливания снега протекают одновременно. С одной стороны, при увеличении размеров опорной поверхности увеличивается ее погружение за счет большой величины напряжений смятия в слое (1.13), с другой стороны, с увеличением размеров опорной поверхности (1.14) уменьшается выдавливание снега из-под него, а следовательно, и погружение.

В процессе разрушения, обусловленного превышением напряжения в снеге предела прочности связей или кристаллов, происходит резкое падение несущей способности снега. Процесс протекания этого явления во времени зависит от способа нагружения. Обычно различают два типа нагружения: при постоянной скорости деформации и постоянной скорости нарастания силы. Если любая из этих скоростей согласована со скоростью перекристаллизации (т. е. скоростью образования новых связей), то теоретически возможно построить кривую, изображенную на рис. 1.8. Однако во время эксперимента эту скорость, зависящую к тому же от нагрузки, практически невозможно обеспечить. Поэтому результаты экспериментального погружения штампа в снег чаще всего предстают в виде области в координатах, напоминающей петлю гистерезиса и изображенную на рис. 1.13. На этом графике крестики обозначают момент разрушения, кружочки — усилие завершения перекристаллизации, т. е. восстановления связей. Данные построены при режиме нагружения с постоянной скоростью деформации. Верхняя огибающая является линией разрушения, нижняя — линией эволюционной несущей способности.

Если скорость деформации мала настолько, что успевает возникнуть новые кристаллизационные связи, то скорость сужается, подходя к кривой разрушения.

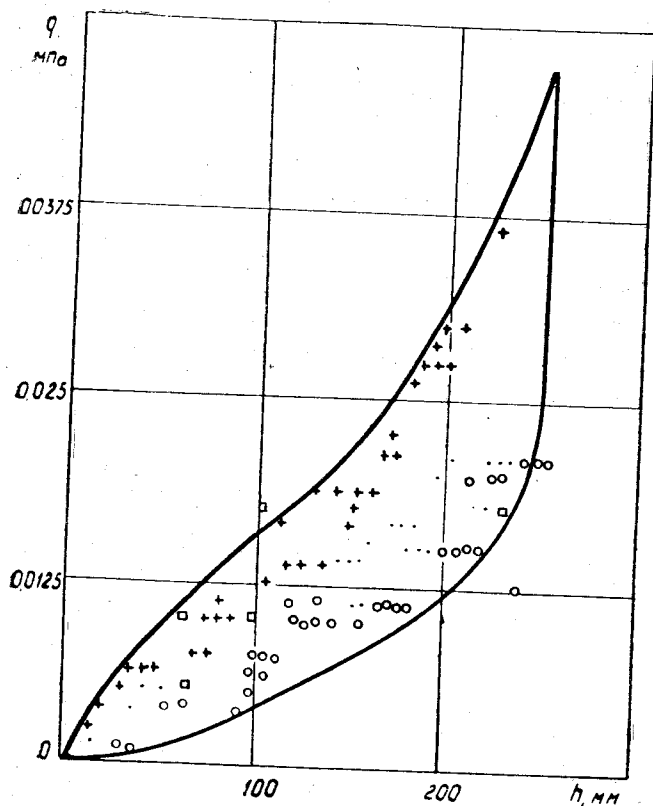


Рис. 1.13. Погружение плоского штампа

Если скорость деформации настолько велика, что новые кристаллизационные связи не успевают возникнуть, область сжимается к эволюционной кривой. Полностью исчезнуть петля в этом случае не может, т. е. напряжения разрушения с ростом нагрузки проникают более глубокие уплотненные слои с неразрушенными кристаллизационными связями.

На этом же графике квадратами нанесены точки соответствующие постоянной скорости возрастания нагрузки. Характер нарастания нагрузки — ступенчатый, низкой скоростью.

Из графика следует, что процесс погружения в этом случае состоит из двух этапов. Сначала нагрузка в

растает до величины, предельной для кристаллизационных связей в слое распространения напряжений. На этом этапе погружения практически не возникают. Затем происходит разрушение связей и развивается эволюционный процесс, характеризующийся развитием деформации без изменения нагрузки. Этот процесс происходит до тех пор, пока не возникнут новые связи, способные выдержать установленную нагрузку. Затем опять повторяется рост нагрузки без развития деформаций и разрушение связей, сопровождающееся деформацией без роста нагрузки. Здесь также развитие процесса зависит от скорости нарастания нагрузки. При малой скорости развитие деформаций должно происходить по эволюционной кривой, если в снежном покрове нет слоистости. Как было показано выше, слоистость отмечается только в верхней части снежного покрова. В средней и нижней части в результате перекристаллизации слоистость исчезает. При высокой скорости область сжимается, приближаясь к эволюционной кривой.

В общем случае петлеобразная область является исчезающей характеристикой данного снежного покрова. Однако характер постановки эксперимента, а также слоистость снега превращают процесс вертикальной деформации в случайную функцию, колеблющуюся между указанными кривыми: эволюционной и разрушения. В этом, по нашему мнению, заключается причина того, что эксперименты с различными методиками проведения зачастую дают малосопоставимые результаты. Мы считаем, что в качестве кривой погружения необходимо брать эволюционную кривую, как линию наибольшего погружения.

Рассмотренные выше количественные зависимости и характер протекания процессов при вертикальной деформации снега относятся к плоским штампам.

### 1.3.3. Деформация снега цилиндрической поверхностью

Опорные поверхности машин при движении их по снегу не являются плоскими. Гусеница, облегающая каток, гусенично-винтовой движитель, имеет цилиндрическую поверхность. Зависимость  $q-h$  для цилиндрического штампа отличается от зависимости, полученной для плоского штампа. Отличие возникает за счет более интенсивного выдавливания снега в стороны.

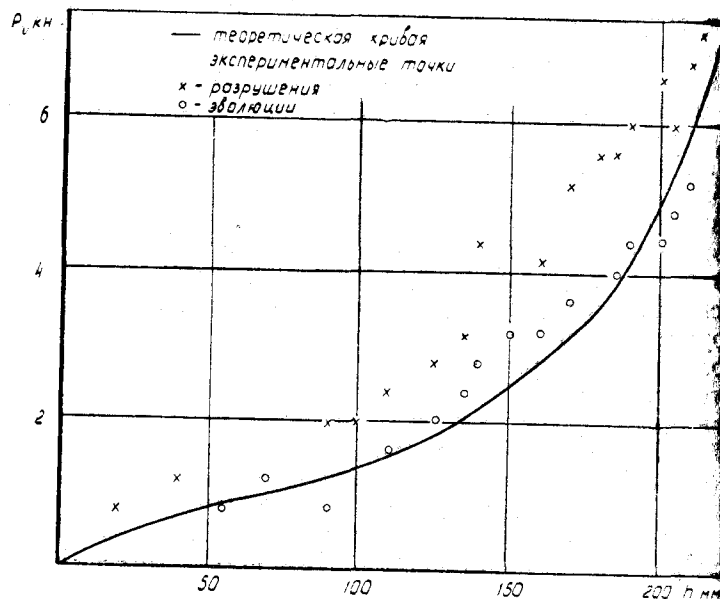


Рис. 1.14. Погружение цилиндрического штампа в ненарушенный снег

Рассмотрим, каким образом, имея сведения о погружении плоского штампа, можно получить зависимость для погружения цилиндрического штампа. Элемент цилиндрической поверхности в своей нижней части практически мало отличается от плоского штампа. Тогда предположим, что этот элемент погружается по закону, полученному для плоского штампа, т. е. зависимость  $q_0(h)$  определяется по выражению типа (1.5). Положим, что в остальных точках нормальные давления  $q_r$  распределены по цилиндрической поверхности по закону косинуса, как это принято в механике грунтов.

$$q_r = q_0 \cos \varphi, \quad (1.15)$$

где  $q_0$  — давление в нижней точке цилиндрической поверхности;  
 $\varphi$  — полярный угол точки на поверхности, отсчитываемый от вертикали.

Тогда вертикальное давление  $q_z$  запишется как

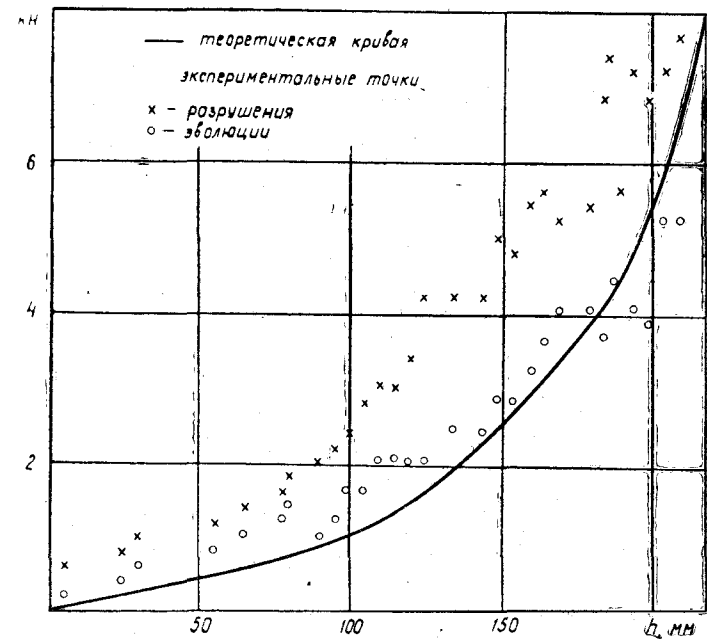
$$q_z = q_0 \cos^2 \varphi.$$


Рис. 1.15. Погружение цилиндрического штампа при предварительной осадке 120 мм

Нагрузка, которую несет цилиндрический штамп, определится как поверхностный интеграл первого рода по поверхности штампа  $\sigma$ .

$$P = \iint_{\sigma} q_0 \cos^2 \varphi d\sigma.$$

После вычисления этого интеграла для цилиндрической поверхности радиусом  $R$ , длиной  $b$  и дугой погружения в снег  $2d$  получим

$$P = q_0 b R (\alpha + \sin \alpha \cdot \cos \alpha), \quad (1.16)$$

так как  $q_0$  и  $\alpha$  зависят от  $h$ , то (1.16) описывает погружение цилиндрического штампа в снежный покров. Таким образом, полученное выражение является формулой перехода от кривой осадки плоского штампа к кривой осадки для цилиндрического штампа.

Результаты проверки этой формулы для эволюци-

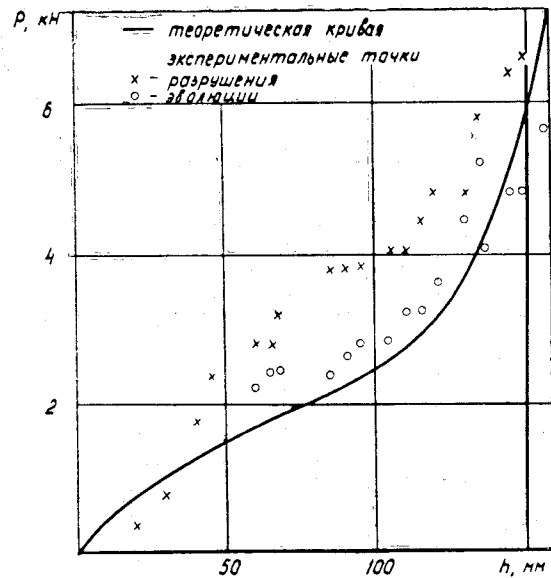


Рис. 1.16. Погружение цилиндрического штампа при предварительной осадке 220 м

онной кривой, представленные на рис. 1.14, 1.15 и 1.16 показывают удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных данных.

#### 1.4. Сопротивление снежного полотна пути сдвигу

##### 1.4.1. Исследование процессов, происходящих в снеге при горизонтальном сдвиге

Одним из параметров, оценивающих проходимость гусеничной машины по снегу, является тяговое усилие, которое может реализовать движитель в контакте с полотном пути. С одной стороны, величина этого усилия определяется физико-механическими свойствами снега, с другой — конструктивными параметрами гусеничного движителя.

Тяговое усилие, реализуемое движителем в контакте с полотном пути, прежде всего связано с процессами

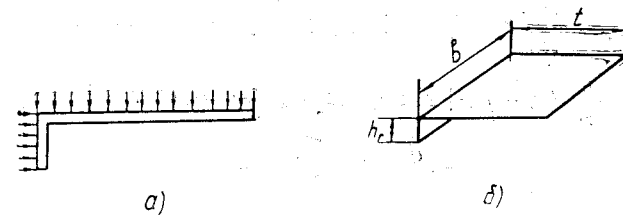


Рис. 1.17. Схема нагружения трака гусеничного движителя

сопротивления грунта сдвигу, с возникающими при этом напряжениями и деформациями.

Горизонтальное перемещение определяет схему нагружения, представленную на рис. 1.17. Считается, что вертикальная нагрузка на грунт передается через жесткую горизонтальную плиту шириной  $b$  и длиной  $t$  и поэтому равномерно распределена по ее поверхности. Сопротивление сдвигу воспринимается вертикальной плитой высотой  $h_c$  и шириной  $b$  (рис. 1.17), жестко связанной с горизонтальной, и поэтому горизонтальная нагрузка распределена аналогично. Данная схема нагружения позволяет решать вопрос определения напряжений в условиях плоской задачи.

При принятой схеме нагружения согласно классической теории механики грунтов [3, 19]

под действием приложенной вертикальной нагрузки снежный массив испытывает сложное напряженное состояние. Напряжения, возникающие при этом в произвольной точке  $A$  поперечного сечения, как это представлено на рис. 1.18, могут быть подсчитаны [19] по зависимости

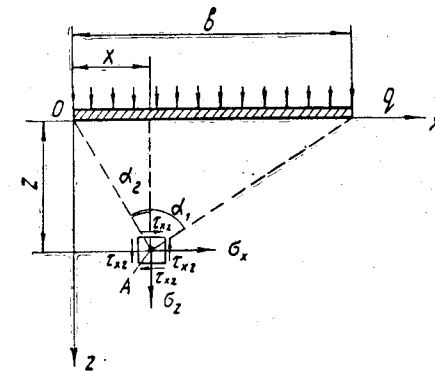


Рис. 1.18. Напряжения, возникающие в произвольной точке поперечного сечения

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{q}{\pi} (\alpha_2 - \alpha_1 - \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1); \\ \sigma_z &= \frac{q}{\pi} (\alpha_2 - \alpha_1 + \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 - \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1); \\ \tau_{xz} &= \frac{q}{\pi} (\sin^2 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_1),\end{aligned}\quad (1.17)$$

или, учитывая зависимость между углами  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и координатами  $x$ ,  $z$ ,

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{q}{\pi} \left( \operatorname{arctg} \frac{b-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{x}{z} - \frac{(b-x)z}{(b-x)^2 + z^2} - \frac{zx}{z^2 + x^2} \right); \\ \sigma_z &= \frac{q}{\pi} \left( \operatorname{arctg} \frac{b-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{x}{z} + \frac{(b-x)z}{(b-x)^2 + z^2} + \frac{zx}{z^2 + x^2} \right); \\ \tau_{xz} &= \frac{q}{\pi} \left( \frac{x^2}{z^2 + x^2} - \frac{(b-x)^2}{(b-x)^2 + z^2} \right).\end{aligned}\quad (1.18)$$

В выражении (1.17) угол  $\alpha$ , измеряемый в радианах, откладываемый от вертикали по часовой стрелке считается положительным, против — отрицательным. В процессе сдвига, пока приложенные горизонтальные нагрузки воспринимаются внутренними связями в снежном покрове, деформации сдвига отсутствуют. Когда приложенные нагрузки превышают уровень, который могут воспринимать внутренние связи снега, возникает сдвиг некоторой массы снега. При этом возникают новые связи, обусловленные физико-механическими свойствами снежного полотна пути, его структурой и т. д. Кроме того, между перемещаемой и неподвижной частями снежного массива возникают силы трения, также препятствующие передвижению.

Таким образом, в начальный момент сдвиг происходит в тех точках снежного пространства, где напряжения достигают предельного состояния. На характер поверхности сдвига оказывают влияние новые возникающие связи и процессы трения. Из теории механики

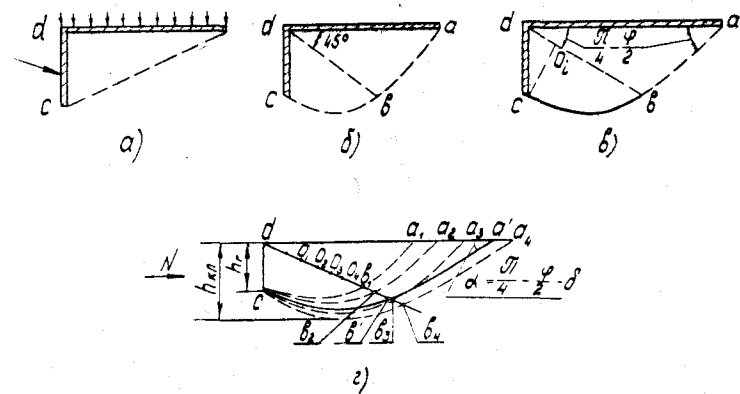


Рис. 1.19. Характер поверхности сдвига для разных типов снега

грунтов известно, что данную поверхность можно считать:

а) плоской для чисто фрикционных грунтов (случай нулевой связности), рис. 1.19а; б) состоящей из плоскости части  $ab$  и поверхности прямого кругового цилиндра в случае чисто связного грунта (угол трения равен нулю), рис. 1.19б; в) составленной из плоской части  $ab$  и цилиндрической поверхности с образующей в виде логарифмической спирали  $bc$  в общем случае связного фрикционного грунта, рис. 1.19в.

Доказано [19], что поверхность скольжения образуется таким образом (т. е. логарифмическая спираль имеет такой центр  $O_1$  на прямой  $bd$ , что получающаяся при этом реакция имеет минимальное значение (рис. 1.19г). На фотографии рис. 1.20 показан продольный разрез поверхности скольжения для снега, полученный при сдвиге штампа в естественных условиях. Эксперимент, зафиксированный на фотографии, проводился в диапазоне удельных давлений 0,005—0,02 МПа под опорной поверхностью. Разрез снежного массива производился после сдвига штампа на величину от 15 до 200 мм.

Поверхность скольжения массы сдвигаемого снега определяется тремя группами факторов.

В первую группу входят физико-механические свойства снежного полотна пути, определяющие внутреннее трение и связность снежного массива (предельное соп-

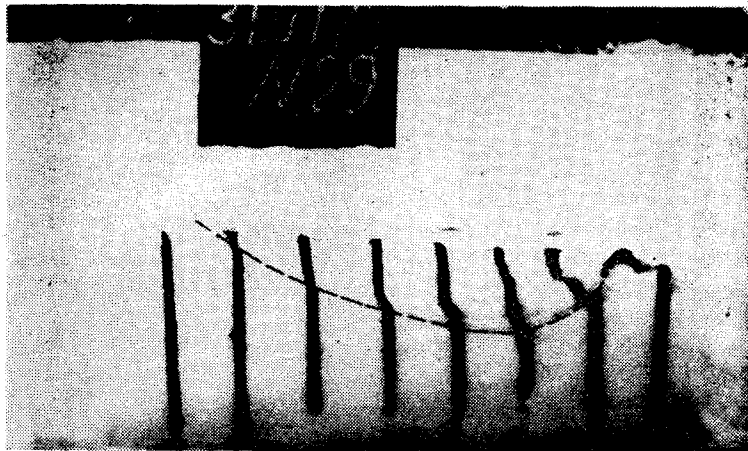


Рис. 1.20. Образование клина скольжения при сдвиге снега (штриховой линией показана поверхность скольжения)

противление разрушению связей, образование новых связей, структурность и т. д.).

Во вторую группу факторов входят нагрузки, которым подвергается снежное полотно пути.

Третью группу факторов составляют параметры устройства (штампа), через которое нагрузки передаются на снежный массив. Поэтому все характеристики сопротивления снежного массива сдвигу прежде всего приходится связывать со штампом, при помощи которого проводятся исследования. Авторами были экспериментально определены:

- 1) форма поверхности скольжения массы сдвигаемого снега;
- 2) геометрические параметры поверхности скольжения;
- 3) влияние на поверхность скольжения вертикальной нагрузки;
- 4) поведение самой массы снега (клина скольжения) при сдвиге.

В результате анализа данных эксперимента были получены следующие выводы.

1. Поверхности скольжения близки по форме к теоретическим (рис. 1.19):

— для снегов сыпучих, фрикционных — плоская;

для снегов влажных (связных) — цилиндрическая и плоская;

для снегов сыпучесвязных — близкая к логарифмической спирали.

Все эти выводы действительны при условии, что снежный покров однороден на достаточно большую глубину (3—4 высоты снегозацепа). Эта глубина рассматривается от горизонтальной плоскости штампа после вертикальной деформации. Поверхность скольжения образуется ниже горизонтальной плоскости, проходящей через нижнюю кромку грунтозацепа. Если в снежном массиве отмечается слоистость, т. е. неоднородность, на глубине, не превышающей указанные выше пределы, то возможно искажение поверхности скольжения. При этом поверхность скольжения проходит по границе между слоями. В поперечном сечении поверхность скольжения для снегов с малой несущей способностью (рыхлый, свежевывающий снег) имеет форму, близкую к прямоугольнику, на других наиболее часто встречающихся случаях — форму, близкую к параболе с вершиной на оси симметрии сечения.

2. Максимальная высота клина скольжения находится в пределах двух-трех высот снегозацепа. Эта величина может быть несколько меньше или больше, если в области максимальной высоты клина проходит граница между слоями снега (при неоднородном, слоистом снеге). Длина клина скольжения чаще всего оказывается связанной не с высотой снегозацепа, а с максимальной высотой клина  $h_{кл}$ . На основании полученных экспериментальных данных можно рекомендовать соотношение

$$L_{кл} = (4 \div 4,5) h_{кл}. \quad (1.19)$$

Таким образом, зависимость между высотой снегозацепа и длиной клина скольжения может быть выражена формулой

$$L_{кл} = (8 \div 13) h_{г}.$$

Организационные сложности постановки экспериментов в полевых условиях затрудняют определение с малой погрешностью углов, характеризующих формирующиеся клины. Однако можно с уверенностью утверждать, что угол клина  $\alpha$  (рис. 1.19) был получен меньше теоретического угла, равного  $\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ . Дополнительные



эксперименты, проведенные в лабораторных условиях, показали, что кривая отклоняется от теоретической. Угол трения материала штампа (стали) по снегу  $\delta$  (рис. 1.19, кривая  $cb'a'$ ). Анализ данных полевых и лабораторных испытаний показал, что теоретический конус клина скольжения хорошо совпадает с экспериментальным, если принять угол трения сталь—снег  $\delta = 10^\circ$ , а угол внутреннего трения снега  $\varphi = 18 \div 20^\circ$  (как было при проведении эксперимента).

Тогда

$$\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} - \delta = 45^\circ - (9^\circ \div 11^\circ) - 10^\circ = 24^\circ \div 26^\circ.$$

3. Вертикальное давление влияет в основном на скорость формирования клина. При давлениях меньше 0,005 МПа высота клина принимает наименьшее значение  $h_{кл} = 2h_r$ , при более высоких давлениях высота клина мало меняется и находится в пределах  $h_{кл} = 2,5h_r$ . Соответственно меняется и длина клина.

4. При горизонтальных перемещениях штампа свыше 30 мм первичный клин начинает разрушаться, при дальнейшем перемещении образуется новый клин, затем и он разрушается, образуется следующий клин и т. д.

#### 1.4.2. Сопротивление сдвигу с горизонтальной деформацией

Исследования показали, что сопротивление снегу сдвигу в значительной мере зависит от горизонтальных перемещений [3]. Эта зависимость обычно снимают на специальных устройствах и представляется в виде диаграммы сдвига, построенной в координатах  $\tau - x$ , где  $\tau$  — условное напряжение сдвига, полученное делением силы сопротивления сдвигу на площадь опорной поверхности штампа;  $x$  — горизонтальные перемещения штампа. На рис. 1.21 показаны два наиболее характерных типа диаграммы сдвига. Процесс сдвига можно разделить на три или два этапа, в зависимости от типа снега. Кривая I рис. 1.21 характеризуется наличием всех трех этапов.

На первом этапе происходит частичное уплотнение снежной массы в области контакта со штампом, деформация связей и формирование поверхности скольжения.

Сопротивление сдвигу на этом этапе, как правило, резко возрастает. Завершается этап формирования поверхности скольжения. В массиве снега, который находится между указанной поверхностью штампа и поверхностью клина, будем в дальнейшем называть «клином скольжения».

На втором этапе происходит разрушение первичных связей в снежном массиве, нарушение структуры снега, возникает скольжение сформированного клина. Величина сопротивления сдвигу резко падает.

На третьем этапе происходит постоянное возникновение и разрушение новых связей, формирование и разрушение нового клина скольжения. Деформации на этом этапе достигают максимальных значений, сопротивление сдвигу может находиться в равновесии (оставаться постоянным) или уменьшаться с деформацией. Эта кривая в основном относится к связным и фрикционно-связным типам. Вторая кривая характеризуется непосредственным переходом от первого этапа процесса сдвига к третьему и представляет в основном фрикционные сдвиги.

К основным характеристикам диаграммы сдвига относят следующие:

- $\tau_{max}$  — максимальное значение напряжений сдвига;
- $\tau_{уст}$  — установившееся значение напряжений сдвига;
- $x_0$  — значение перемещения при максимальном напряжении.

В ОНИЛВМ была проведена работа по экспериментальному определению этих характеристик для снега. Было выяснено (рис. 1.22), что максимальное значение напряжений в большинстве случаев возникает при перемещениях  $x_0$  порядка 10—30 мм.

Таким образом, формирование клина скольжения на снежном массиве может завершаться довольно быст-

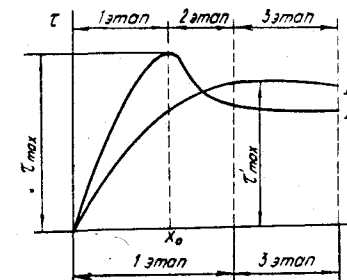


Рис. 1.21. Диаграмма сдвига для типов снега: I — имеющих 3 этапа сдвига, II — характеризующихся непосредственным переходом от первого этапа к третьему

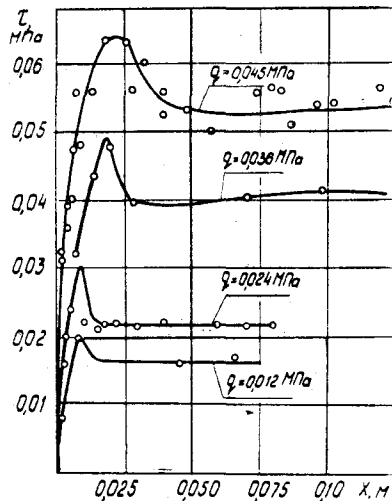


Рис. 1.22. Зависимость горизонтальных напряжений сдвига от величины перемещений макета при различных вертикальных давлениях

давления величина  $x_0$  возрастает (рис. 1.22).

Значения  $\tau_{\max}$  и  $\tau_{\text{уст}}$  зависят от физико-механических свойств снега и формы штампа. Более того, известно [21], что соотношения между  $\tau_{\max}$  и  $\tau_{\text{уст}}$  зависят также от способа нагружения штампа. Так, при постепенном возрастании нагрузки на снегах, отнесенных к первой группе (кривая 1, рис. 1.21), может возникнуть диаграмма сдвига типа II. Кривая типа I, как правило, возникает в случае постоянной скорости горизонтальной деформации, что является лучшим приближением к действительным процессам, происходящим при взаимодействии движителя снегоходных машин с снежным полотном пути. В этом случае можно придерживаться соотношения, полученного нами экспериментальным путем

$$\tau_{\text{уст}} = (0,78 \div 0,83) \tau_{\max}.$$

Обычно кривые типа I (рис. 1.21) аппроксимируются аналитическим выражением

$$\tau = A \tau_{\max} \left[ e^{-\kappa_1 a x} - e^{-\frac{\kappa_1 x_0}{a}} \right], \quad (1.21)$$

ро, если учесть, что при нормальном режиме движения снегоходной машины, вследствие буксования (примерно 10—15%) гусеничного движителя относительно снежного полотна пути, указанные перемещения достигаются уже по первому катком. Величина  $x_0$  зависит от вертикального давления и от плотности снежного полотна. При одном и том же вертикальном давлении большие значения величины  $x_0$  относятся к снегу с малой плотностью, меньшие — более уплотненному снегу. При увеличении

$$A = \left[ e^{-\kappa_1 a x_0} - e^{-\frac{\kappa_1 x_0}{a}} \right]^{-1};$$

$x_0$  — абсцисса, соответствующая  $\tau_{\max}$ ;  
 $\kappa_1, a$  — эмпирические коэффициенты;  
 $\tau_{\max}$  — максимальное напряжение.

Выражение 1.21 может быть преобразовано к виду

$$\tau = B \tau_{\max} e^{-\kappa_1 x} (1 - e^{-\kappa_2 x}), \quad (1.21a)$$

где  $\kappa_1, \kappa_2, B$  — эмпирические коэффициенты;  
 $x$  — перемещение грунтозацепа, м.

Кривые типа II аппроксимируются зависимостью:

$$\tau = \tau'_{\max} [1 - e^{-\kappa_2 x}], \quad (1.22)$$

где  $\kappa_2$  — эмпирический коэффициент.

Выражение (1.22) в отличие от (1.21) не учитывает уменьшение упорной реакции на третьем этапе деформации, реально существующее в действительности. Однако это уменьшение невелико, и при практических расчетах можно применять как ту, так и другую формулу. Диаграмма сдвига, таким образом, дает возможность определить максимальное значение напряжений сдвига в данном снежном массиве при установленном вертикальном давлении. Как показано выше, при изменении вертикального давления изменяется и сопротивление снежного массива сдвигу. Связь между этими величинами описывается диаграммой предельных состояний.

### 1.4.3. Диаграмма предельных состояний

Согласно общей теории прочности, скольжение (разрушение) начинается тогда, когда напряжения достигают своих предельно допустимых значений. В соответствии с этим рассмотрим предельное сопротивление снежного полотна сдвигу. Из теории механики грунтов известно, что в снежном массиве возникают два типа сопротивления, препятствующие горизонтальному перемещению: внутреннее трение и связность.

Внутреннее трение препятствует перемещению частей или областей относительно друг друга. Связность

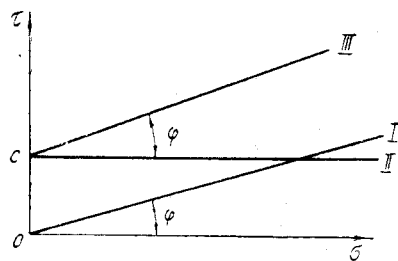


Рис. 1.23. Диаграмма предельных состояний для разных типов снегов

называемое кольцо сдвига [3], в котором поверхность скольжения считается известной. Кольцо сдвига состоит из двух соосных круговых цилиндров, между которыми расположены радиальные лопасти. При погружении в снег и повороте вокруг оси кольцо сдвигает снег, заключенный между цилиндрами, при этом скольжение снежного кольца происходит по тангенциальной плоскости, заключенной между двумя цилиндрами. Площадь плоскости скольжения нетрудно подсчитать, а усилие, требуемое для поворота кольца, зафиксировать. Таким образом получается напряжение, препятствующее горизонтальному смещению. Горизонтальный сдвиг осуществляется при различных вертикальных нагрузках (давлениях), поэтому можно построить диаграмму зависимости горизонтальных напряжений от вертикальных, которая и называется диаграммой предельных состояний для данного снега.

Диаграмма предельных состояний имеет следующий характер (рис. 1.23). Диаграмма 1-го типа получается для снегов (в соответствии с табл. 1.1), характеризующихся наличием только фрикционных свойств. Диаграмма 2-го типа характерна для снега чистосвязного. Диаграмма 3-го типа получается в том случае, если снежное полотно пути обладает обоими перечисленными выше свойствами, т. е. для фрикционно-связного снега.

Уравнения полученных прямых обычно аппроксимируются выражениями

$$\begin{aligned} \text{1-й тип} & \quad \tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi; \\ \text{2-й тип} & \quad \tau = c; \end{aligned}$$

обусловлена силами сцепления, вызывающими слипание частиц снега, причем в процессе сдвига связи между частичками постоянно разрушаются и возникают вновь, так, что этот процесс находится в некотором равновесии.

Для замера характеристик трения и связности используется так

$$\begin{aligned} \text{3-й тип} & \quad \tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.23) \\ \text{где} & \quad c — коэффициент связности; \\ & \quad \operatorname{tg} \varphi — коэффициент трения. \end{aligned}$$

Полученные зависимости в механике грунтов носят название закона Кулона (иногда Кулона—Мора для прямой 3-го типа).

Следует отметить, что полученные коэффициенты только для прямой 2-го типа действительно характеризуют вид сопротивления, а в остальных случаях являются только математическими коэффициентами аппроксимации. Дело в том, что связность, возникающая в снежном массиве, во многом зависит от плотности снега, которая, в свою очередь, зависит от давления, поэтому коэффициент  $C$  характеризует связность только неуплотненного снега. Таким образом, часть сопротивления сдвигу, обусловленная связностью, зависящей от давления, входит во второе слагаемое, и поэтому полученный угол  $\varphi$  не является углом трения в общепринятом смысле (т. е. не является углом естественного откоса).

Указанные показатели физико-механических свойств снега, вообще говоря, зависят от плотности, влажности и т. д. Результаты широких исследований этих свойств снега, проведенные в ОНИЛВМ, приведены в 1.4.

В отличие от классических прямых в теории механики грунтов для снежного полотна пути возможны и другие типы диаграмм предельных состояний, представленные на рис. 1.24 (а—г). Ломаная на рис. 1.24а характеризует случаи предварительного уплотнения снега давлением, соответствующим вертикальным напряжениям в зоне скольжения  $\sigma_1$ . Затем давление снимается, и производятся опыты для построения диаграммы предельных состояний. Указанные условия сдвига возникают под гусеничным движителем снегохода тогда, когда нагрузка на последующие катки меньше, чем на предыдущие. Такое поведение ломаной характерно для сухого смерзшегося снега. Диаграмма характерна для снега влажного ( $W < 12\%$ ).

На рис. 1.24б при схеме нагружения, аналогичной предыдущей диаграмме, ломаная имеет противоположный вид.

В обоих случаях предварительное уплотнение создает новую структуру снега, которая (в диапазоне

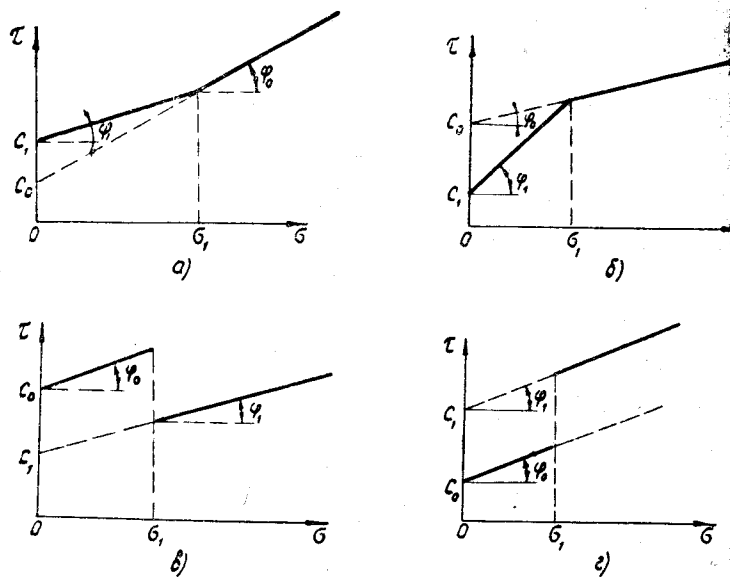


Рис. 1.24. Возможные виды диаграмм предельных состояний для различного снежного полотна пути

0 —  $\sigma_1$ ) не образовалась бы при постоянном росте вертикального давления. В результате в этом диапазоне изменилась связность снежного массива, изменился характер влияния на нее нормальных напряжений, соответственно коэффициент внутреннего трения. В влажном снегу произошло уплотнение снега (увеличилась связность  $c_0$ ), а коэффициент трения за счет влажности уменьшился. В сухом смерзшемся снеге первичное уплотнение нарушило кристаллическую решетку снега, прочность его уменьшилась и, естественно, уменьшилась связность, в то время как трение между кристаллами возросло. Случай на рис. 1.24в соответствует уплотненному верхнему слою снежного полотна пути, что бывает, когда поверхностный слой покрыт тепловым или ветровым настом.

Для значения вертикального давления  $\sigma_1$ , соответствовавшего несущей способности плотного слоя, диаграмма предельных состояний остается неизменной. После разрушения слоя резко изменяется структура снега под кольцом сдвига, и диаграмма при значениях давлений выше  $\sigma_1$  изменяется.

Аналогичная картина происходит в том случае, если снег состоит из нескольких слоев, различных по физико-механическим свойствам. На рис. 1.24г представлена диаграмма предельных состояний, когда под верхним слоем с относительно малым сопротивлением сдвигу находится плотный слой снега с более высокими показателями сдвига. В этом случае внедрение в данный слой при давлениях, превышающих  $\sigma_1$ , дает изменение диаграммы предельных состояний.

Диаграмма предельных состояний, построенная для штампа, может иметь более сложный вид. На сопротивление сдвигу штампа влияет не только вертикальное давление, но и параметры самого штампа. В результате образуется более сложная, чем под кольцом сдвига, поверхность скольжения.

С учетом диаграммы предельных состояний можно дать новый анализ условий возникновения скольжения под штампом.

Как было показано в 1.4.1, массив снега под штампом испытывает состояние, характеризующееся напряжениями  $\sigma_z$ ,  $\sigma_x$  и  $\tau_{xz}$ . В результате подсчета величин этих напряжений можно получить в каждой точке возможную площадку скольжения и, как их совокупность, возможные поверхности скольжения. Как уже отмечалось, из возможных поверхностей скольжения (рис. 1.19) движение произойдет по той, которая обеспечивает минимум общей результирующей горизонтальной реакции на штамп.

При изменении вертикального давления изменяются условия возникновения клина скольжения, поэтому зависимость между вертикальным давлением и горизонтальной реакцией штампа может отклоняться от линейной. Кроме того, при работе со штампом может возникнуть нелинейность указанной зависимости за счет перехода грунтозацепа в слой снежного массива с другими физико-механическими характеристиками.

На рис. 1.25 показан график этой зависимости для одного и того же штампа на влажном снегу, на рис. 1.26 — для штампов с разной высотой грунтозацепов, на рис. 1.27 — для штампов с двумя грунтозацепами с разными шагами между ними. Последние два графика построены для сухого снега.

Анализ графиков показывает, что во всех случаях зависимость между сопротивлением сдвигу и вертикаль-

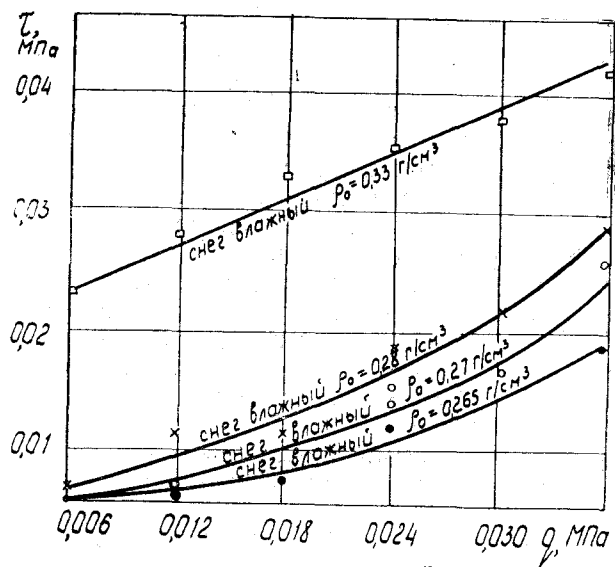


Рис. 1.25. Зависимость горизонтальных напряжений  $\tau$  от вертикальных нагрузок  $q$  для различных снегов

ним давлением может быть принята линейной до давления  $q=0,02$  МПа для сухого и влажного снега высокой плотности. Для более высоких давлений, а также для рыхлого влажного снега возможны отклонения от линейности.

На рис. 1.28 приведены результаты серии замеров и полученная при статистической обработке диаграмма предельных состояний (кривая 1), а также изменение горизонтальной реакции штампа при снятом вертикальном давлении в зависимости от предварительного уплотнения давлением, отложенного по оси абсцисс. Вторая кривая этого графика характеризует сопротивление сдвигу клина скольжения, сформированного только под влиянием связности. Анализ графика показывает, что в данной серии замеров исследовалось снежное полотно пути, связность которого с увеличением давления растет. Это характерно для фрикционно-связных, влажных снегов ( $W < 12\%$ ).

Таким образом, реализация тягового усилия при горизонтальном сдвиге на снежном полотне пути зависит

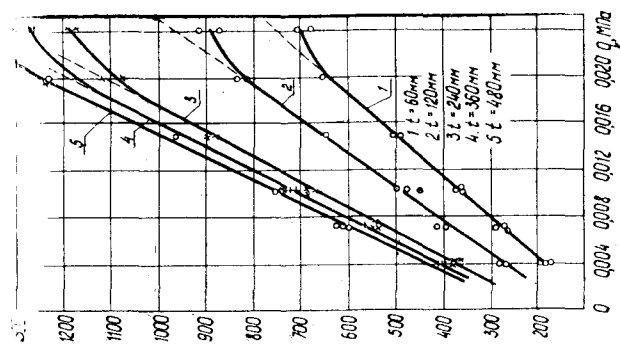


Рис. 1.27. Зависимость горизонтальной силы  $P$  от вертикального давления  $q$  при различных расстояниях между грунтозацепами

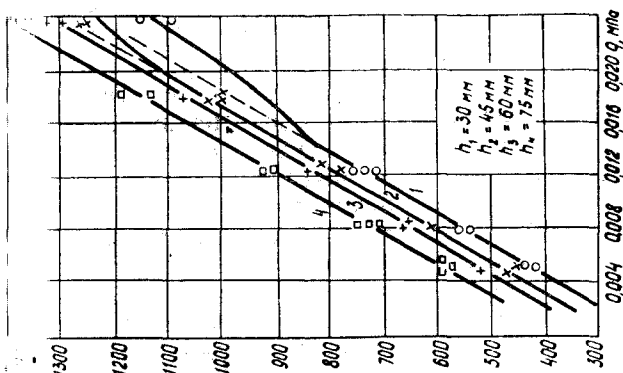


Рис. 1.26. Зависимость горизонтальной силы  $P$  от вертикального давления  $q$  для различной высоты грунтозацепов

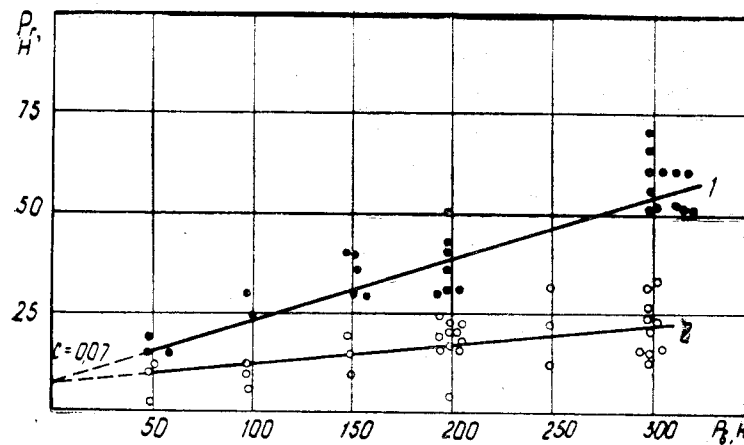


Рис. 1.28. Диаграмма предельных состояний — кривая 1. Сопровождение сдвигу только за счет связности снега — кривая 2.

как от состояния снежного покрова (физико-механических качеств), так и от конструктивных характеристик гусеничного движителя и машины в целом.

### 1.5. Общее представление о снежном покрове

Приведенные выше показатели дают представление о внутреннем состоянии снежного полотна пути, достаточное для описания его статического взаимодействия с движителем снегоходной машины. При рассмотрении динамических процессов большую роль начинает играть внешнее состояние снежного покрова, под которым мы понимаем геометрические характеристики его поверхности и глубины.

Очевидно, поверхность снежного полотна пути носит случайный характер. Поскольку твердое основание на которое ложится снег, также должно рассматриваться с вероятностных позиций, то снежный покров есть физическое тело, геометрически ограниченное сверху снизу случайными поверхностями.

Приведенная модель наглядна, но неудобна для использования в расчетах. Более удачным в этом случа

является представление снежного покрова как физического тела, имеющего случайные поверхности и глубину. Тогда он может быть математически описан с помощью аппарата теории случайных функций как двумерный случайный вектор двух независимых переменных  $x$  и  $y$ , т. е. как случайное векторное поле.

Состояние полотна пути как случайной поверхности разработано хорошо [5, 7]. Осуществляя построение новой теории для снежного покрова, целесообразно сохранить традиционные понятия, используемые в спектральной теории поддрессоривания транспортных машин. Тогда необходимо выделить следующие компоненты снежного покрова: рельеф снежного полотна пути, т. е. его поверхность; профиль снежного полотна пути, т. е. сечение рельефа по трассе движения; рельеф твердого основания местности; профиль твердого основания по трассе движения.

Введем криволинейную координату пути  $l$ , пройденного по трассе движения; координату профиля снежного полотна пути  $Q$  и координату профиля твердого основания  $q_n$ , отсчитываемые от единого условно взятого уровня; глубину снежного покрова  $H$ . Тогда все три обозначенные величины  $Q$ ,  $q_n$  и  $H$  будут функциями одного аргумента  $l$ .

В профиле обычно принято различать три составляющих: макропрофиль, микропрофиль и шероховатость. Макропрофиль состоит из длинных плавных составляющих. С точки зрения динамики снегоходных машин, длинными могут считаться волны в 30 и более метров. Шероховатость обычно понимается как составляющая с длиной волны менее 10 см. Обе эти составляющие практически не оказывают влияния на процессы, происходящие при взаимодействии системы среда — машина, и могут быть без ущерба исключены из рассмотрения. Тогда микропрофиль снежного полотна пути, микропрофиль твердого основания и их разность — глубина снежного покрова могут быть рассмотрены как стационарные функции аргумента  $l$ . Очевидно, характеристики снежного покрова будут отличаться большим разнообразием. Поэтому среди всех возможных участков снежного покрова целесообразно выделить однородные, отвечающие требованиям стационарности. При этом вся возможная трасса движения снегоходной машины будет представлена как совокупность однородных участков. Полное

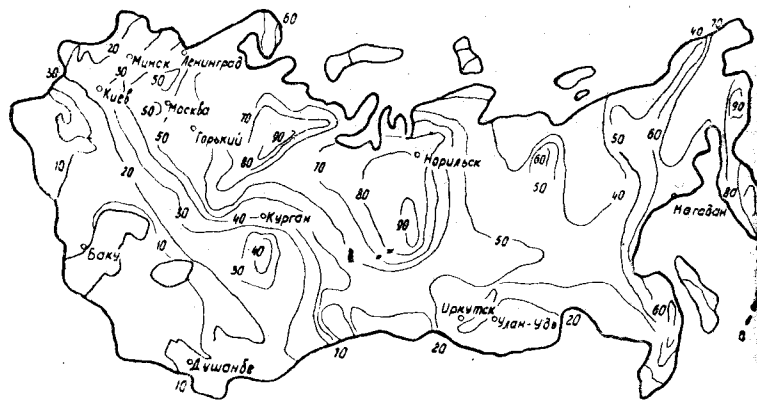


Рис. 1.29. Распределение глубины снежного покрова по территории СССР

описание такой совокупности включает в себя частные и общие характеристики. Под частными мы понимаем характеристики однородного участка как стационарного случайного поля: соответствующие математические ожидания, дисперсии, корреляционные функции и спектральные плотности.

Общие характеристики дают представление о распределении этих участков по стране в целом и трассе движения в частности (рис. 1.29).

Для рассмотрения динамических процессов взаимодействия движителя снегоходной машины со снежным покровом достаточно описать последний как двумерный случайный вектор одной переменной  $l$ .

Его составляющими можно выбрать  $H$  и  $q_n$  или  $H$  и  $Q$ .

Внутренние и внешние характеристики можно объединить. Вводя компонентами случайного вектора, кроме названных  $H$  и  $Q$ , все перечисленные выше в п. 1.2 характеристики физического состояния снега, будем считать функциями независимых переменных:  $x, y$  — координаты длины, ширины,  $h$  — координаты по глубине,  $t^\circ$  — температуры,  $W$  — влажности и т. д.

Тогда получим общее представление о снежном покрове как о случайном  $n$ -мерном поле, заданном на  $m$ -мерном пространстве.

### 1.5.1. Математические модели снежного покрова

Рассмотрим вертикальное сечение снежного покрова, представленное на рис. 1.30. Глубина покрова  $H$  определится через ординаты поверхности снега  $Q$  и поверхности твердого основания  $q_n$ .

$$H = Q - q_n,$$

где  $Q$  и  $q_n$  — случайные стационарные функции аргумента  $l$ .

Тогда и  $H$  — случайная стационарная функция.

Математическое ожидание этой функции  $M_H$ , в предположении совпадения начала отсчета с математическим ожиданием твердого основания, т. е.  $M_{q_n} = 0$ , совпадает с математическим ожиданием  $Q$ , т. е.  $M_H = M_Q$  и по вероятностному смыслу является средней глубиной снежного покрова. Эта величина была проанализирована выше — в п. 1.1.

Корреляционная функция глубины снежного покрова  $R_H(l)$ , согласно положениям теории вероятности, определится зависимостью

$$R_H(l) = R_Q(l) + R_{q_n}(l) - R_{Qq_n}(l) - R_{q_nQ}(l),$$

где  $R_Q(l)$  — корреляционная функция поверхности снежного покрова;

$R_{q_n}(l)$  — корреляционная функция твердого основания;

$R_{Qq_n}(l)$  и  $R_{q_nQ}(l)$  — взаимные корреляционные функции.

Если эти функции четные, то  $R_{Qq_n}(l) = R_{q_nQ}(l)$ .

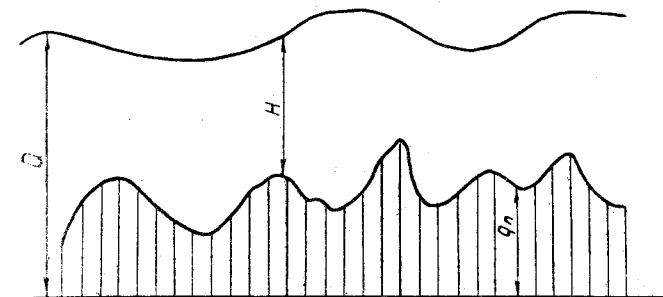


Рис. 1.30. Вертикальное сечение снежного покрова

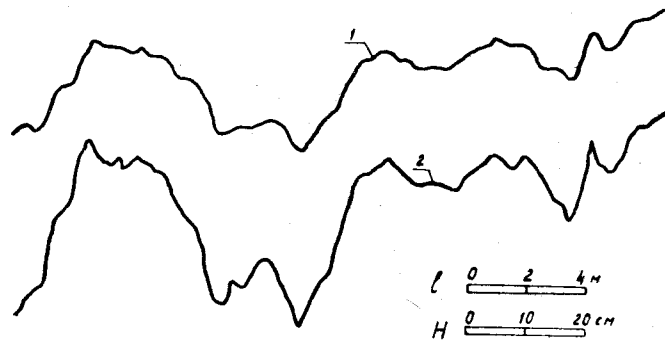


Рис. 1.31. Вертикальное сечение при малой глубине снега

Соответственно дисперсия глубины  $D_H$  определится из соотношения

$$D_H = D_Q + D_{q_n} - 2R_{q_n}(0).$$

Примем нормальный закон распределения поверхности снежного полотна пути, тогда, учитывая нормальность распределения твердого основания  $q_n$  [7], разность нормальных функций также будет распределена нормально.

Таким образом, глубина снежного покрова  $H$  является стационарной нормальной случайной функцией с приведенными выше параметрами  $M_H$  и  $D_H$ .

Характеристики твердого основания в настоящее время изучены достаточно хорошо [5], [6], [7], а поверхность снежного полотна пути практически не исследована. Предварительные исследования, проведенные аспирантом В. А. Шапкиным, позволяют предполагать, что при малых значениях  $M_H$ ,  $Q$  и  $q_n$  будут сильно стохастически связаны (рис. 1.31). Это означает, что поверхность  $Q$  будет практически повторять поверхность  $q_n$ , фильтруя высокочастотные составляющие и несколько уменьшая дисперсию (заполнение впадин местности). При значениях  $M_H = 90-100$  см можно ожидать практическую независимость  $q_n$  и  $Q$  для твердого основания с малой высотой неровностей (рис. 1.32). Отсутствие такой зависимости наблюдается многоснежной зимой на хорошо известной по летним замерам пе-

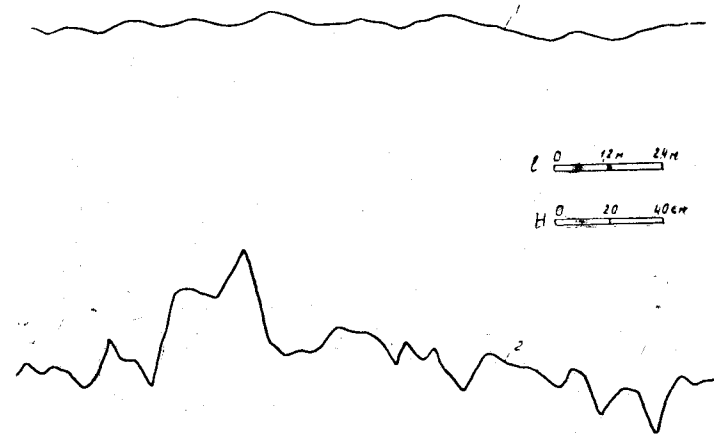


Рис. 1.32. Вертикальное сечение при большой глубине снега

ресеченной местности, когда полутораметровые «валы» покрывал ровный снег.

Отсутствие полных статистических данных по рельефу снежного покрова не позволяет использовать предложенную выше модель. На первом этапе можно рассмотреть упрощенную модель, у которой поверхность снежного покрова считается горизонтальной плоской. Такое упрощение принимается для микропрофиля, т. е. профиля, из которого вычтена низкочастотная составляющая (уклоны, подъемы). Упрощение не приведет к существенным погрешностям в системе среда—машина, если рассматривать малые скорости движения. Однако оно не позволит достаточно точно рассмотреть динамические процессы, связанные с колебаниями машины на подвеске.

Характеристики глубины снежного покрова, определяемые по такой модели, должны статистически сходиться к реальным, т. к. обычно неровности на поверхности глубокого снежного покрова незначительны. Но, естественно, как всякая идеализация, такая модель будет иметь больше погрешностей, чем предложенная выше. Упрощенная модель подкупает своей простотой, т. к. для нее

$$M_H = Q,$$

$$D_H = D_{q_n}, \text{ т. е. } \sigma_H = \sigma_{q_n},$$

$$R_H(l) = R_{q_n}(l).$$



И таким образом, если известны характеристики твердого основания, то автоматически становятся известными внешние статистические характеристики габариты снежного покрова.

#### 1.5.2. Характеристики твердого основания снежного покрова

В 60-х годах авторами в ОНИЛВМ были проведены исследования бездорожья на территории Советского Союза с позиций их влияния на колебания вездеходных (снегоходных) машин. Выбор зон исследования, наиболее характерных для эксплуатации снегоходных машин, был осуществлен в соответствии с региональным обзором. При этом выбраны следующие зоны:

зона тундр и лесотундр с базой в г. Норильске;  
равнины лесной зоны с базой в г. Горьком и Пайде;  
зоны степей и лесостепей с базой в г. Кургане.

Было исследовано 150 участков местности общей протяженностью около 31 км.

В качестве статистической характеристики микропрофиля была принята корреляционная функция, которая аппроксимировалась зависимостью типа

$$R_{q_n}(l) = R_{q_n}(0) \sum_{i=1}^n A_i e^{-\alpha_i(l)} \cos \beta_i l, \quad (1.24)$$

где  $n=1, 2, 3$  в зависимости от графика функции.

Вычисленные значения величин  $R_{q_n}(0)$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ , а также подсчитанные по известным зависимостям преобладающие длины и высоты неровностей позволили систематизировать бездорожье следующим образом.

По ровным лугам, степям, лесостепям, тундрам, лесотундрам\* движение вездеходного транспорта в данных условиях ограничивается в основном тяговыми показателями машин и не ограничивается по плавности хода.

Малопересеченные луга — к данной группе бездорожья относятся участки, движение вездеходной машины на которых может быть ограничено по скорости уровнем максимально допустимых ускорений.

Среднепересеченные луга — к данной группе отне-

\* В дальнейшем для краткости изложения вид бездорожья, к которому относятся луга, степи, лесостепи, тундра и лесотундра, именуется просто лугами.

ны участки, на которых скорость движения вездеходной машины резко ограничивается уровнем ускорений колебаний корпуса на подвеске.

Сильнопересеченные луга — движение вездехода в данных условиях происходит на минимально устойчивых скоростях.

Валы — данный вид бездорожья характеризуется ограничением проходимости вездехода.

Кочки — к этой группе относятся высохшие болота средней полосы, кочки полупустыни, тундровые кочки. Движение вездеходной машины резко ограничено по скорости уровнем допустимых ускорений.

Результаты вышеприведенной систематизации приведены в табл. 1.6. Анализ данной систематизации и графиков спектральных плотностей показывает, что в рамках рассматриваемых групп можно выделить следующие частотные диапазоны.

Низкая частота. К данной составляющей отнесены слабые корреляционные функции, обуславливающие длину преобладающей неровности

$$l_n = 13 \div 35 \text{ (м)}.$$

Вариации частоты соответственно

$$\beta = 0,17 \div 0,50 \text{ (1/м)}.$$

Среди имеющихся данных наблюдается значительный разброс. Поэтому имеет смысл произвести дополнительное разделение частотного диапазона.

Вариация частоты:

$$\beta = 0,17 \div 0,30 \text{ (1/м)};$$

$$\beta = 0,30 \div 0,50 \text{ (1/м)}$$

и соответственно

$$l_n = 20 \div 35 \text{ (м)};$$

$$l_n = 13 \div 20 \text{ (м)}.$$

Средняя частота. Данный диапазон обусловлен преобладающей длиной неровности

$$l_n = 4 \div 13 \text{ (м)}$$

и соответственно вариацией частот

$$\beta = 0,5 \div 1,5 \text{ (1/м)}.$$

Данный диапазон было принято целесообразным разделить на три части.

Таблица 1.6

Статистические хар-ки	Низкая											
	I						II					
	$M_a$ 1/м	$\sigma_a$ 1/м	$M_z$ 1/м	$\sigma_z$ 1/м	$M_\sigma$ см	$\sigma_\sigma$ см	$M_a$ 1/м	$\sigma_a$ 1/м	$M_z$ 1/м	$\sigma_z$ 1/м	$M_\sigma$ см	$\sigma_\sigma$ см
Группа дорожного полотна пути	0,09	0,03	0,24	0,03	3,4	0,8	0,12	0,02	0,40	0,03	2,4	0,5
	0,09	0,03	0,24	0,03	6,5	0,55	0,12	0,02	0,40	0,03	8,2	0,7
	0,09 0,21 0,13	0,14 — 0,05	0,20 0,26 0,18	0,03 — 0,03	13,6 15,7 27,2	1,5 — 1,0	0,12 0,13 0,16	— 0,02 0,02	0,41 0,36 0,40	— 0,01 0,03	8,9 17,0 27,7	— 1,2 0,7
Кочки	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Статистические хар-ки	Средняя												Высокая					
	Средняя						Высокая											
	$M_a$ 1/м	$\sigma_a$ 1/м	$M_\beta$ 1/м	$\sigma_\beta$ 1/м	$M_\sigma$ см	$\sigma_\sigma$ см	$M_a$ 1/м	$\sigma_a$ 1/м	$M_z$ 1/м	$\sigma_z$ 1/м	$M_\sigma$ см	$\sigma_\sigma$ см						
Группа дорожного полотна пути	0,2	0,05	0,6	0,03	2,27	0,36	0,85	0,2	2,0	0,15	1,3	0,3						
	0,3	0,09	0,8	0,03	2,07	0,175	1,15	0,2	3,0	1,0	1,55	0,25						
	0,38	0,09	1,0	1,0	2,0	0,195	0,85	0,2	2,0	0,15	4	1,25						
Малопересеченные луга	0,20	0,05	0,6	0,03	5	0,6	1,15	0,2	3,0	1,0	1,55	0,25						
	0,3	0,09	0,8	0,03	5	0,56	—	—	—	—	—	—						
	0,38	0,09	1,0	0,1	4	0,42	—	—	—	—	—	—						
Среднепересеченные луга Сильнопересеченные луга Валы Кочки	0,25	0,07	0,8	0,02	7,35	0,3	—	—	—	—	—	—						
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						
	—	—	—	—	—	—	3,4	0,2	8,0	2,0	8,0	2,0						

Вариация частоты:

$$\beta = 0,5 \div 0,7 \quad (1/m);$$

$$\beta = 0,7 \div 0,9 \quad (1/m);$$

$$\beta = 0,9 \div 1,5 \quad (1/m)$$

и соответственно

$$l_n = 9 \div 13 \quad (m);$$

$$l_n = 6 \div 9 \quad (m);$$

$$l_n = 4 \div 6 \quad (m).$$

Такое разделение, на наш взгляд, необходимо еще и потому, что данный частотный диапазон при определенных скоростях движения становится резонирующим для подвесок большинства вездеходных машин.

Высокая частота. Данный диапазон также было признано целесообразным разбить на две части.

$$\beta = 1,5 \div 2,5 \quad (1/m); \quad l_n = 2,5 \div 4 \quad (m);$$

$$\beta = 2,5 \div 6 \quad (1/m); \quad l_n = 1,0 \div 2,5 \quad (m).$$

Результаты статистической обработки параметров корреляционных функций приведены в табл. 1.6,

где  $M_\alpha, M_\beta, M_\sigma$  — средние значения соответствующих параметров корреляционных функций

$\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\sigma$  — среднеквадратичные отклонения этих параметров.

Проведенный частотный анализ рассматриваемых групп позволил дать расчетные формулы для каждого вида бездорожья. Расчетные формулы сведены в табл. 1.7.

В табл. 1.6. показано, что для каждого вида бездорожья в зависимости от спектрального состава микропрофиля можно назвать среднюю величину дисперсии преобладающей частоты и характеристики рассеивания частот вокруг преобладающей. В связи с этим встает вопрос о возможности связать для каждого вида бездорожья параметры расчетных корреляционных функций единой зависимостью.

На рис. 1.33 построен график зависимости среднеквадратического отклонения ординат микропрофиля от преобладающей частоты для участков, входящих

Расчетные формулы

Виды полотна пути	Инфранизкая	Низкая	Средняя	Высокая
Частота				
Ровные луга	$12e^{-0,09l} \cos 0,24l$	$5,76e^{-0,12l} \cos 0,4l$	$5,2e^{-0,20l} \cos 0,6l$ $4,3e^{-0,3l} \cos 0,8l$ $4e^{-0,20l} \cos 1,0l$	$1,69e^{-0,85l} \cos 2,0l$ $2,54e^{-1,15l} \cos 3,0l$
Малопересеченные луга	$42e^{-0,09l} \cos 0,24l$	$67e^{-0,12l} \cos 0,4l$	$25e^{-0,40l} \cos 0,6l$ $25e^{-0,30l} \cos 0,8l$ $16e^{-0,40l} \cos 1,0l$	$16e^{-0,85l} \cos 2,0l$ $11e^{-1,15l} \cos 3,0l$
Среднепересеченные луга	$184e^{-0,09l} \cos 0,26l$	$80e^{-0,12l} \cos 0,41l$	$54e^{-0,25l} \cos 0,82l$	—
Сильнопересеченные луга	$245e^{-0,12l} \cos 0,26l$	$289e^{-0,13l} \cos 0,36l$	—	—
Валы	$760e^{-0,13l} \cos 0,18l$	$760e^{-0,16l} \cos 0,4l$		
Кочки				$64e^{-3,4l} \cos 8,0l$

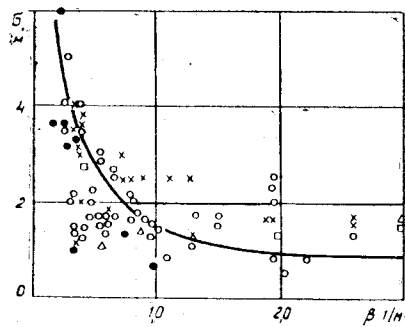


Рис. 1.33. Зависимость среднеквадратичного отклонения ординат микропрофиля от преобладающей частоты

группу «ровные луга». Эту зависимость можно аппроксимировать аналитическим выражением вида

$$\sigma = \frac{k}{\beta} + b, \quad (1.26)$$

где  $b=0,5$ ;  
 $K=1 \text{ см/м}$   
 $\beta=1/\text{м}$ .

Аналогично можно аппроксимировать в тех же координатах указанные зависимости для остальных

групп бездорожья. Для малопересеченных лугов получено значение  $b=3$ , среднепересеченных —  $b=6$ , сильнопересеченных —  $b=13$ , валов —  $b=24$ .

Для участков «кочки» данная зависимость не определялась из-за ограниченности данных. Ориентировочно эта зависимость может быть представлена в виде

$$\sigma = \frac{60K}{\beta} - 3,3. \quad (1.26)$$

Для определения связи между коэффициентами  $\alpha$  и  $\beta$  были построены графики в координатах  $\alpha - \beta$ . В области высокочастотного возмущения (рис. 1.34) уравнение, аппроксимирующее зависимость между  $\alpha$  и  $\beta$  может быть записано в виде

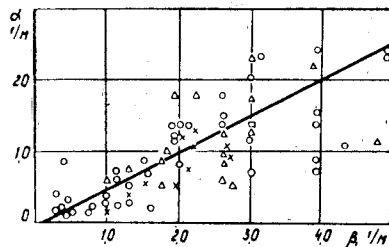


Рис. 1.34. Зависимость между параметрами корреляционных функций  $\alpha$  и  $\beta$

$$\alpha = 0,42(\beta - 0,14). \quad (1.27)$$

Для остальных частот диапазонов (рис. 1.35) зависимость между параметрами корреляционной функции принимает вид:

$$\alpha = 0,36(\beta - 0,085). \quad (1.28)$$

В табл. 1.8 приведены данные, полученные расчетом по выражениям (1.24—1.28). Анализ табл. 1.7 и 1.8

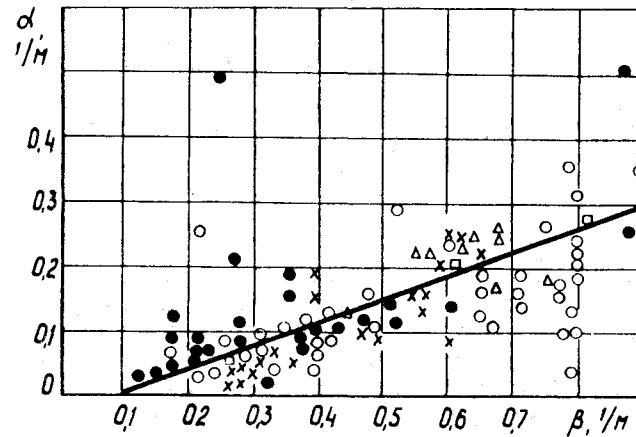


Рис. 1.35. Зависимость между параметрами корреляционных функций  $\alpha$  и  $\beta$

показывает удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных.

Таким образом, вышеприведенные данные полностью характеризуют весь диапазон возмущения, который испытывает бездорожная машина при движении в реальных условиях бездорожья.

Таблица 1.8

Вид дорожно-го полотна	$\beta$	0,21	0,4	0,6	0,8	1	2	3	6	8
	$\alpha$	0,05	0,11	0,19	0,27	0,31	0,72	1,1	2,1	—
Число точек	ровные	22	9	4,8	3,2	2,3	1,0	0,65	0,45	—
	малопересеченные	52	30	22	18	16	12	11	10	—
	среднепересеченные	$R_q(0)$ 104	72	60	53	49	42	40	38	—
	сильнопересеченные	300	240	—	—	—	—	—	—	—
	кочки	700	660	—	—	—	—	280	45	18

Согласно модели, изложенной в п. 1.5.2, характеристики, приведенные в таблицах, являются показателями глубины снежного покрова, если выполняется условие

$$M_H \gg 6\sigma_{q_n}$$

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВИЖИТЕЛЯ  
С ПОЛОТНОМ ПУТИ**

Рассмотрим распределение вертикальных и горизонтальных нагрузок по опорной поверхности гусеничного движителя. Под вертикальной нагрузкой понимаем вертикальное давление, оказываемое опорной поверхностью гусеничного движителя на полотно пути, или реакция снега на это давление. При этом вес опорной части гусеничного движителя условно приводится к силе давления опорного катка на гусеничный движитель. Под горизонтальной нагрузкой понимается реакция снега на горизонтальный сдвиг.

Обе нагрузки непрерывно распределены по опорной поверхности. Предложенная модель сводится к определению непрерывного распределения этих нагрузок по опорной поверхности. Для этого опорная поверхность условно разделяется на участки, находящиеся под катком, и на участки, находящиеся между катками.

**2.1. Взаимодействие  
с полотном пути части движителя,  
расположенного под катком**

Распределение нагрузок, действующих на часть гусеничного движителя, расположенного под  $j$ -ым катком показано на рис. 2.1. На рисунке обозначены:

- $P_{gj}$  — сила, передаваемая на гусеничный движитель через  $j$ -ый каток;
- $T_{1j}$  — сила натяжения в набегающей на каток ветви гусеничного движителя;
- $T_{2j}$  — сила натяжения в сбегающей с катка ветви гусеничного движителя.

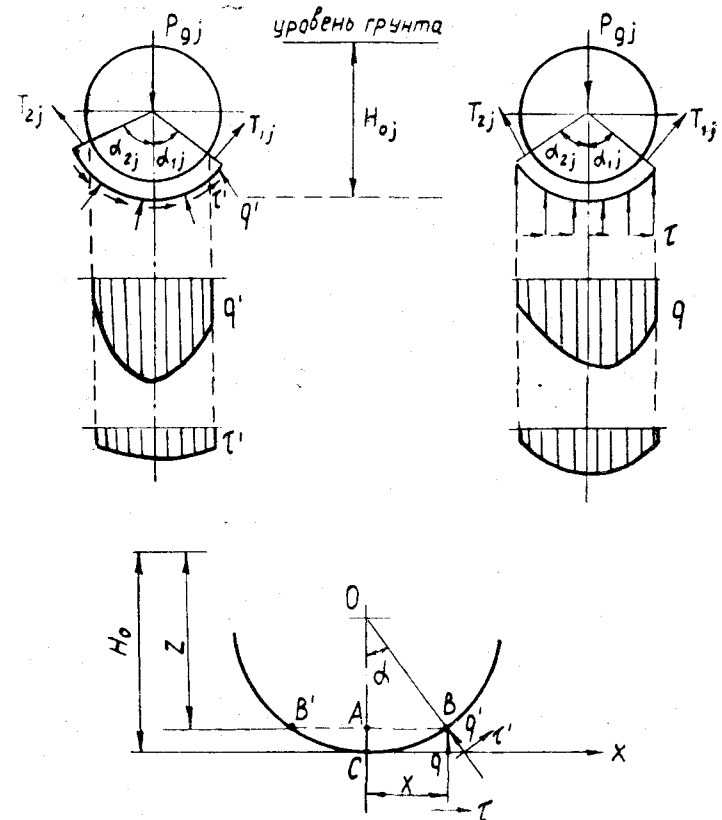


Рис. 2.1. Распределение нагрузок под  $i$ -ым катком

Для первого и последнего  $n$ -ого катка эти усилия известны

$$T_{11} = T_{дн},$$

где  $T_{дн}$  — сила натяжения направляющей ветви гусеницы.

$$T_{2n} = T_{дв},$$

где  $T_{дв}$  — сила натяжения ведущей ветви гусеницы;  
 $\alpha_{1j}, \alpha_{2j}$  — углы охвата катка набегающей и сбегающей ветвями гусеницы, т. е. угол между вертикальной осью и нормалью к гусеничному обводу.

Вертикальная нагрузка, передаваемая на гусеницу через каток, уравнивается в основном реакцией грунта. Реакцию грунта можно представить в двух формах: совокупность нормальных и касательных реакций или совокупность вертикальных и горизонтальных реакций. На рис. 2.1 обозначены:

$q'$  и  $\tau'$  — соответственно нормальная и касательная реакции;

$q$  и  $\tau$  — соответственно вертикальное давление и горизонтальная реакция.

Необходимость введения этих двух совокупностей реакций диктуется следующими факторами.

Если известно расстояние от нижней точки катка до уровня недеформированного грунта  $H_{0j}$  (см. рис. 2.1а) и величину деформации грунта в каждой точке гусеничного движителя под катком можно выразить по формуле

$$z = H_{0j} - R_k + \sqrt{R_k^2 - x^2} \quad (2.1)$$

или

$$z = H_{0j} - R_k(1 - \cos \alpha), \quad (2.2)$$

где  $R_k$  — радиус опорного катка. Будем полагать, что все опорные катки имеют одинаковый радиус. В противоположном случае не сложно учесть этот факт введением индекса  $R_{kj}$ ;

$x$  — расстояние рассматриваемой точки по горизонтали от центра катка. Эта координата положительна справа от точки отсчета  $C$  и отрицательна слева (рис. 1.1б);

$\alpha$  — угол между нормалью к гусеничному обводу в рассматриваемой точке  $B$  и вертикальной осью. Отклонение нормали от вертикали считается положительным против часовой стрелки и отрицательным по часовой стрелке.

Соотношения (1.3) со всей очевидностью следуют из чертежа на рис. 1.1б.

Погружение машины связано с вертикальным давлением. Часть опорной поверхности гусеничного движителя под катком является призматической в случае звенчатой гусеницы и цилиндрической в случае ленточной гусеницы. Если гусеница мелкозвенчатая, то можно счита-

ть опорную поверхность под катком также цилиндрической. У большинства снегоходных машин используются мелкозвенчатая или ленточная гусеницы. Считая в дальнейшем часть опорной поверхности под катком цилиндрической, применим выведенные в предыдущей главе зависимости для погружения данной поверхности. Для этого введем систему координат с вертикальной осью  $z$ , проходящей через ось катка и направленной вниз, и горизонтальную ось  $x$ . Начало координат находится на поверхности снежного покрова, которую полагаем строго горизонтальной. Тогда вертикальная нагрузка  $q$  есть функция координаты  $z$ :

$$q = \begin{cases} q(z) & z \geq 0 \\ 0 & z < 0 \end{cases}. \quad (2.3)$$

Сила тяги определяется горизонтальными реакциями грунта. А упорная реакция грунта, из которой находят горизонтальные реакции, связана зависимостью между касательными нормальными реакциями. Эта реакция была представлена выше в виде модифицированного закона Кулона—Мора

$$\tau' = C + A q' \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.4)$$

где  $q'$  и  $\tau'$  — соответственно нормальные и касательные реакции (в частном случае на штампе совпадающие с вертикальными и горизонтальными реакциями).

При этом полагаем, что в силу малости углов охвата гусеничной лентой катка характеристика снега  $C$ ,  $A$  и  $\varphi$  такая же, как и в случае горизонтального сдвига.

Следует отметить, что в случае неплоской опорной поверхности (участок гусеничного движителя под катком в отличие от плоского штампа) зависимость (2.3) не справедлива для нормальных реакций, а (2.4) не справедлива для горизонтальных и вертикальных реакций. Отсюда следует необходимость выделения двух совокупностей реакций.

Нормальные и касательные реакции могут быть использованы для нахождения горизонтальных и вертикальных реакций по зависимости, вытекающей из рассмотрения рис. 1.1б.

$$\begin{cases} q = q' \cos \alpha + \tau' \sin \alpha, \\ \tau = -q' \sin \alpha + \tau' \cos \alpha. \end{cases} \quad (2.5)$$

Распределение нормальных реакций по длине чашечного движителя под катком носит симметричный характер в силу геометрической симметрии катка относительно точки  $C$ . Касательные реакции также распределены симметрично в силу зависимости (2.4). Однако для горизонтальных и вертикальных реакций симметрия в силу справедливости зависимости (2.5) нарушается.

В выражении (2.5) угол  $\alpha$  взят с учетом знака, т. е. если угол откладывается от вертикали против часовой стрелки, он берется положительным и отрицательным в противоположном случае. Если предположить, что упорная реакция грунта полностью используется, т. е. касательные реакции принимают максимально возможные значения, то, подставляя (2.4) в (2.5), получим

$$\begin{aligned} q &= C \sin \alpha + q' (\cos \alpha + A \operatorname{tg} \varphi \sin \alpha), \\ \tau &= C \cos \alpha + q' (-\sin \alpha + A \operatorname{tg} \varphi \cos \alpha). \end{aligned} \quad (2.6)$$

Если теперь рассмотреть на линии контакта с грунтом точки, симметричные относительно вертикальной оси ( $B$  и  $B'$  на рис. 2.1.б) и, следовательно, отличающиеся только знаком угла  $\alpha$ , то из зависимости (2.6) трудно вывести следующие закономерности.

Вертикальная реакция перед катком принимает большие значения, чем за катком (в точке  $B$  они по величине больше, чем в точке  $B'$ ), т. е. происходит смещение вертикальной эпюры давления под катком по ходу движения машины — факт, отмеченный Беккером.

Горизонтальные реакции, наоборот, принимают максимальные значения за катком. А перед катком могут иметь даже отрицательные значения. Последнее происходит в точках, где удовлетворяется соотношение

$$\operatorname{tg} \alpha > A \operatorname{tg} \varphi + \frac{C}{q}, \quad (2.7)$$

полученное из условия  $\tau < 0$  и выражающее следующее положение. Если угол набегания гусеничного движителя на каток много больше угла внутреннего трения грунта, то создается неудовлетворительное распределение горизонтальных реакций, возникают предпосылки для «бульдозерного эффекта» и т. д. Этот вывод еще раз подтверждает с новой точки зрения рекомендации лаборатории делать угол наклона передней ветви гусе-

ничного движителя близким к углу внутреннего трения или меньше его. Для средних катков выполнение неравенства (2.7) маловероятно.

Отмеченные закономерности распределения вертикальных и горизонтальных реакций отмечены на эпюрах, приведенных на рис. 2.1 а и б.

Учитывая связь между тригонометрическими функциями угла и горизонтальной координатой, вытекающей из рис. 2.1в,

$$\sin \alpha = \frac{x}{R_k}, \quad (2.8)$$

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{R_k^2 - x^2}}{R_k},$$

зависимости (2.6) можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} q &= \frac{cx}{R_k} + \\ &+ \frac{\gamma h_{\max} H_{0j} (\sqrt{R_k^2 - x^2} + A_x \operatorname{tg} \varphi) \sqrt{R_k^2 - x^2}}{R_k^2 (h_{\max} - H_{0j})} \\ \tau &= \frac{c \sqrt{R_k^2 - x^2}}{R_k} + \\ &+ \frac{\gamma h_{\max} H_{0j} (A \sqrt{R_k^2 - x^2} \operatorname{tg} \varphi - x) \sqrt{R_k^2 - x^2}}{R_k^2 (h_{\max} - H_{0j})} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Данные зависимости получены следующим образом. Было учтено, что

$$q' = q_0 \cos \alpha,$$

что в соответствии с (1.8)

$$q_0 = \frac{\gamma h_{\max} H_{0j}}{h_{\max} - H_{0j}}$$

Далее из первого уравнения (2.6) выражена величина  $q'$ , подставлена во второе уравнение, произведены преобразования (2.8). В итоге получена зависимость (2.9) вертикальных и горизонтальных реакций от координаты  $x$ .

Таким образом, получено распределение вертикальных и горизонтальных реакций под катком. Задача бу-

дет полностью решена, если известны величины  $H_{0j}$ , углы  $\alpha_{1j}$  и  $\alpha_{2j}$ .

Рассмотрим условия равновесия части гусеницы катком

$$\left. \begin{aligned} P_{gj} - T_{1j} \sin \alpha_{1j} - T_{2j} \sin \alpha_{2j} - b \int_{-R_K \sin \alpha_{2j}}^{R_K \sin \alpha_{1j}} g(x) dx &= 0, \\ T_{2j} \cos \alpha_{2j} - T_{1j} \cos \alpha_{1j} - b \int_{-R_K \sin \alpha_{2j}}^{R_K \sin \alpha_{1j}} \tau(x) dx &= 0, \\ (T_{2j} - T_{1j}) R_K - b \int_{-R_K \sin \alpha_{2j}}^{R_K \sin \alpha_{1j}} (g(x)x + \tau(x) \sqrt{R_K^2 - x^2}) dx &= 0. \end{aligned} \right\} (2.1)$$

Все величины, входящие в систему, определены ранее,  $b$  — ширина гусеничного движителя. Нетрудно видеть, что первое уравнение является условием равенства нулю проекций всех сил на вертикальную ось, второе — соответственно на горизонтальную ось, третье уравнение — условие равенства нулю всех моментов относительно точки  $O$  — центра катка.

В систему вошли дополнительные неизвестные силы  $T_{1j}$ ,  $T_{2j}$  — силы натяжения при трех уравнениях. Система разрешима только для первого катка, для которого будем считать известными величины  $T_{11} = T_{дн}$  и  $\alpha_{11}$  — равный углу наклона передней ветви гусеничного движителя.

Так как рассматриваются условия квазистатического взаимодействия, эти величины могут считаться постоянными в данном режиме движения

$$T_{дн} = f(T_0, P_K) = \text{const}, \quad (2.1)$$

где  $T_0$  — усилие предварительного натяжения гусеничного обвода

$$P_K = \frac{M_K}{R_{зв}};$$

где  $M_K$  — крутящий момент на звездочке;  
 $R_{зв}$  — радиус звездочки.

В дальнейшем полагаем, что  $T_{дн} \geq 0$ .

При данных предпосылках система (2.10) содержит только три неизвестных и, следовательно, разрешима для первого катка. Неизвестными, подлежащими определению, являются величины  $H_{0j}$ ,  $T_{21}$  и  $\alpha_{21}$ . Если эти величины известны, то, следовательно, задано распределение вертикальных и горизонтальных реакций грунта под первым катком (2.9). Чтобы сделать систему (2.10) разрешимой и для других катков, рассмотрим взаимодействие межкаткового участка гусеничного движителя с полотном пути.

## 2.2. Взаимодействие с полотном пути части движителя, расположенного между катками

Распределение нагрузок, действующих на часть гусеничного движителя, расположенного между катками  $(j-1)$ -ым и  $j$ -ым, показано на рис. 2.2. На рисунке межкатковый участок гусеничного движителя разбит на две части: прилежащий к  $(j-1)$ -му катку и прилежащий к  $j$ -му катку. Тогда введенные обозначения определяют

- $T_{2,j-1}$  — сила натяжения в сбегавшей с предыдущего катка ветви гусеничного движителя;
- $T_{1j}$  — сила натяжения в набегающей на следующий каток ветви гусеничного движителя;
- $T_j$  — сила натяжения в гусеничном движителе в наивысшей точке межкаткового пространства.

Величина  $T_{2,j-1}$  определена при расчете участка, находящегося под  $(j-1)$ -ым катком.

$\alpha_{2,j-1}$ ,  $\alpha_{1j}$  — углы охвата сбегавшей с  $(j-1)$ -го катка и набегающей на  $j$ -ый каток ветвей гусеницы соответственно.

Величины  $q$ ,  $q'$ ,  $\tau$ ,  $\tau'$  имеют те же обозначения, что и в предыдущем случае. Будем предполагать, что известен закон связи вертикальных давлений и ординат положения каждой точки гусеничного движителя относительно уровня недеформированного грунта, заданный в виде, аналогичном (2.3). Связь между величинами  $\tau$ ,  $\tau'$ ,  $q$ ,  $q'$  по-прежнему определяется соотношениями (2.5) и (2.6).



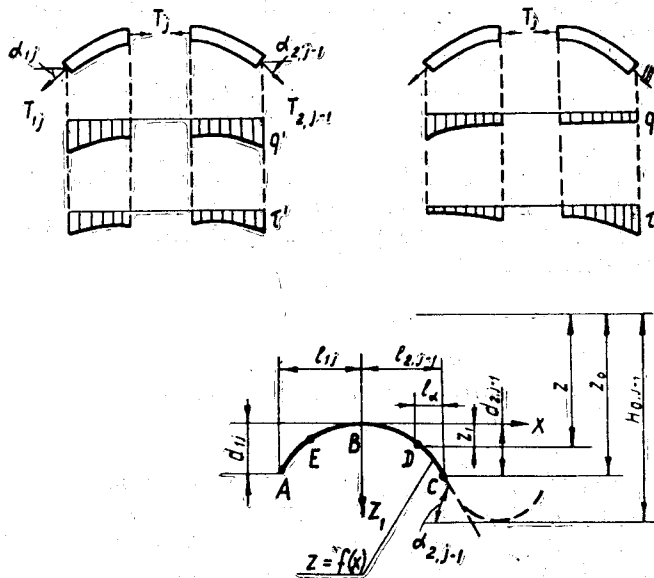


Рис. 2.2. Распределение нагрузок в межкатковом пространстве

Необходимо получить зависимость ординаты погружения гусеничного движителя на данном участке от расположения произвольной точки ( $D$  на рис. 2.2  $в$ ). Если ввести оси координат  $z_1, O_x$ , показанные на рис. 2.2, то нетрудно получить зависимость

$$z = z_0 - (\alpha_{2,j-1} - z_1), \quad (2.12)$$

где

$$z_0 = H_{0,j-1} - R_H (1 - \cos \alpha_{2,j-1}), \quad (2.13)$$

причем величина угла  $\alpha_{2,j-1}$  известна из расчетов участка гусеничного движителя под  $j-1$ -ым катком, таким образом величина (2.13) полностью определена.

Смысл величин  $\alpha_{2,j-1}$  и  $l_{2,j-1}$  ясен из рис. 2.2. Значения этих величин, как и зависимость

$$z_1 = f(x), \quad (2.14)$$

не известны заранее, однако если зависимость (2.14) известна, то величина  $\alpha_{2,j-1}$  может быть получена из соотношения

$$\alpha_{2,j-1} = f(l_{2,j-1}). \quad (2.15)$$

Если известна зависимость (2.14), то из известного соотношения

$$\operatorname{tg} \alpha = z_1' \quad (2.16)$$

получаются зависимости для  $\sin \alpha$  и  $\cos \alpha$ , входящие в выражения (2.5) и (2.6).

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{1}{\sqrt{1+(z_1')^2}}; \\ \sin \alpha &= \frac{z_1'}{\sqrt{1+(z_1')^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

Тогда выражения (2.6) дадут зависимость между  $\tau$  и  $q$

$$\tau = c \frac{\cos \varphi'}{\cos(\varphi' - \alpha)} + q \operatorname{tg}(\varphi' - \alpha), \quad (2.18)$$

где  $\varphi'$  определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi' = A \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.19)$$

В частности, при  $A=1$ ,  $\varphi' = \varphi$ .

Выражения (2.18) по известным тригонометрическим соотношениям в зависимости (2.16) могут быть записаны в виде

$$\tau = c \frac{\sqrt{1+(z_1')^2}}{1+z_1' \operatorname{tg} \varphi'} + q \frac{\operatorname{tg} \varphi' - z_1'}{1+\operatorname{tg} \varphi' z_1'}. \quad (2.20)$$

Итак, если известна зависимость  $q(x)$  и  $z_1 = f(x)$ , то по полученному выражению определится распределение горизонтальных максимально возможных реакций в межкатковом пространстве. В случае задания зависимости типа (2.3) для межкаткового пространства будет также известно и распределение вертикальных реакций. Поэтому основная задача сводится к определению зависимости (2.14).

Известно [2-4, 8], что межкатковый участок гусеничного обвода обычно имеет форму цепной линии, уравнение которой для данного случая может быть представлено в виде

$$z_1 = c \left( \operatorname{ch} \frac{x}{a} - 1 \right). \quad (2.21)$$

Таким образом, данная функция имеет два неизвестных параметра  $a$ ,  $c$  и полностью определяется их значениями.

Рассмотрим условия равновесия обоих участков моточной катковой части гусеничного движителя

$$\left. \begin{aligned} T_{2,j-1} \cos \alpha_{2,j-1} - T_j + b \int_0^{l_{2,j-1}} \tau(x) dx &= 0, \\ T_{2,j-1} \sin \alpha_{2,j-1} - b \int_0^{l_{2,j-1}} q(x) dx &= 0, \\ T_{1j} \cos \alpha_{1j} - T_j - b \int_0^{l_{1j}} \tau(x) dx &= 0, \\ T_{1j} \sin \alpha_{1j} - b \int_0^{l_{1j}} q(x) dx &= 0. \end{aligned} \right\} (2.22)$$

Нетрудно видеть, что первые два уравнения являются уравнениями равновесия для первого участка, вторые — для второго. Система содержит следующие неизвестные:

- $l_{2,j-1}$  — часть межкаткового пространства, забираемая первым участком;
- $l_{1j}$  — часть межкаткового пространства, забираемая вторым участком;
- $T_{1j}$  — натяжение в ветви гусеничного обвода, набегающей на  $j$ -ый каток;
- $\alpha_{1j}$  — угол набегающей ветви на  $j$ -ый каток;
- $T_j$  — натяжение гусеничной ветви в верхней части межкаткового участка гусеницы;
- $c_{j-1}, a_{j-1}$  — параметры цепной линии для правого участка;
- $c_j, a_j$  — то же для левого участка.

Итого девять неизвестных при четырех уравнениях. Составим дополнительные уравнения из следующих предположений.

1) При квазистатическом режиме движения расстояние между осями катков  $\Delta L_{j,j-1}$  не меняется, тогда

$$\Delta L_{j,j-1} = R_R \sin \alpha_{2,j-1} + R_R \sin \alpha_{1j} + l_{2,j-1} + l_{1j}. \quad (2.23)$$

В точках  $C$  и  $A$  (см. рис. 2.2в) производные для участков между катками и под катками (т. е. тангенсы углов наклона касательной и, следовательно, сами углы) совпадают, т. е. справедливы равенства:

$$\operatorname{tg} \alpha_{2,j-1} = z_1'(D),$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{1j} = z_1'(A).$$

Учитывая, что  $z_1 = c_{1j} \left( \operatorname{ch} \frac{x}{a_{1j}} - 1 \right)$  для первого участка и  $z_1 = c_{2j} \left( \operatorname{ch} \frac{x}{a_{2j}} - 1 \right)$  для второго участка, получаем уравнения связи

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_{2,j-1} &= \frac{c_{2,j-1}}{a_{2,j-1}} \operatorname{sh} \frac{l_{2,j-1}}{a_{2,j-1}} \\ \operatorname{tg} \alpha_{1j} &= \frac{c_{1j}}{a_{1j}} \operatorname{sh} \frac{l_{1j}}{a_{1j}} \end{aligned} \right\} (2.24)$$

Число уравнений (2.22—2.24) равно семи, а число неизвестных равно девяти. Необходимо получить два дополнительных уравнения.

Первое уравнение получим из условия подчинения прогиба первого участка гусеничного движителя между катками законам статического прогиба.

Известно [3], что линия прогиба подчиняется дифференциальному уравнению

$$T_j z'' = b q(z), \quad (2.25)$$

где  $q(z)$  — закон изменения деформации грунта в межкатковом участке.

Во-первых, рассматривается начальный участок кривой деформации, во-вторых, следует учесть, что участок грунта между катками уже деформирован предыдущим участком. Поэтому можно аппроксимировать этот участок линейной зависимостью

$$q(z) = \gamma_g z + q_0,$$

где  $\gamma_g, q_0$  — параметры аппроксимации, которые необходимо определить экспериментально.

Тогда решение рассматриваемого дифференциального уравнения запишется в виде

$$z = \frac{g_0}{\gamma_g} \left( ch \sqrt{\frac{b \gamma_0 x}{T_j}} - 1 \right).$$

Для того чтобы учесть динамический характер взаимодействия межкаткового участка ветви с грунтом предположим, что вместо величины  $q_0$  действует другая константа  $c_{2,j-1}$ .

Тогда в первом уравнении выражения (2.24) величина  $a_{2,j-1}$  определена и равна

$$a_{2,j-1} = \sqrt{\frac{T_j}{b \gamma_0}}.$$

Теперь первое уравнение системы (2.24) и первые два уравнения системы (2.22) замкнуты относительно неизвестных. Три неизвестных  $l_{2,j-1}$ ,  $T_j$ ,  $c_{2,j-1}$  полностью определяются тремя уравнениями.

Оставшиеся четыре уравнения: вторая пара систем (2.22) (2.23) и второе уравнение системы (2.24) — имеют пять неизвестных:

$$c_{1j}; a_{1j}; \alpha_{1j}; T_{1j}; l_{1j}.$$

Однако заметим, что если эти неизвестные определены, то становится известной величина  $H_{0j}$ , определяемая по зависимости

$$H_{0j} = H_{0,j-1} - \alpha_{2,j-1} + \alpha_{1j} + R_K (1 - \cos \alpha_{1j}), \quad (2.26)$$

где 
$$\alpha_{1j} = C_{1j} \left( ch \frac{l_{1j}}{a_{1j}} - 1 \right).$$

Одно уравнение системы (2.10) становится «лишним». Его можно использовать для определения одного «лишнего» оставшегося неизвестного  $\alpha_{1j}$  или  $T_{1j}$ .

Таким образом, для следующих за первым катков участков гусеничного движителя можно предложить две системы

$$\left. \begin{aligned} T_{2,j-1} \cos \alpha_{2,j-1} - T_j + b \int_0^{l_{2,j-1}} \tau(x) dx &= 0; \\ T_{2,j-1} \sin \alpha_{2,j-1} b - \int_0^{l_{2,j-1}} q(x) dx &= 0; \\ \operatorname{tg} \alpha_{2,j-1} &= \frac{c_{2,j-1}}{a_{2,j-1}} \operatorname{sh} \frac{l_{2,j-1}}{a_{2,j-1}}, \end{aligned} \right\} (2.27)$$

где величина  $a_{2,j-1}$  определяется соотношением (2.25), а зависимость  $z(x)$  — соотношением (2.21); и систему

$$\left. \begin{aligned} l_{1j} \cos \alpha_{1j} - T_j - b \int_0^{l_{1j}} \tau(x) dx &= 0; \\ l_{1j} \sin \alpha_{1j} b - \int_0^{l_{1j}} q(x) dx &= 0; \\ l_{1j} + R_K \sin \alpha_{1j} &= \Delta L_{j,j-1} - R_K \sin \alpha_{2,j-1} - l_{2,j-1}; \\ \operatorname{tg} \alpha_{1j} &= \frac{c_{1j}}{a_{1j}} \operatorname{sh} \frac{l_{1j}}{a_{1j}}; \\ l_{2j} - T_{1j} \sin \alpha_{1j} - T_{2j} \sin \alpha_{2j} - b \int_{-R_K \sin \alpha_{2j}}^{R_K \sin \alpha_{1j}} q(x) dx &= 0; \\ l_{2j} \cos \alpha_{2j} - T_{1j} \cos \alpha_{1j} - b \int_{-R_K \sin \alpha_{2j}}^{R_K \sin \alpha_{1j}} \tau(x) dx &= 0; \\ (T_{2j} - T_{1j}) R_K - b \int_{-R_K \sin \alpha_{2j}}^{R_K \sin \alpha_{1j}} (q(x)x + \tau \cdot \sqrt{R^2 - x^2}) dx &= 0. \end{aligned} \right\} (2.28)$$

Причем в первых двух уравнениях значения  $\tau$  и  $q$  определяются соотношениями (2.12), (2.13), (2.20), (2.21) и (2.14), а в последних трех соответственно (2.3) и (2.9).

Таким образом, решение полностью указано для всех участков гусеничного движителя.

Для последнего катка  $T_{2n}$  дает величину упорной реакции снега, которую можно реализовать в контакте с полотном пути, заданного указанными выше физическими характеристиками. Если сила тяги по двигателю  $P_K$  больше силы, которую может реализовать гусеничный движитель, то разовьется буксование, которое приведет к дополнительному погружению в снег, увеличит сопротивление движению, одним словом, ухудшит тягово-сцепные характеристики машины и поэтому крайне

нежелательно. Система (2.28) составлена для малых значений коэффициента буксования, когда коэффициент трения практически равен единице. При больших значениях коэффициента буксования следует ввести коррекцию на  $\tau$  и  $q$ .

Рассматривая уравнения равновесия под катком (2.1) можно получить следующие выводы. Из первого уравнения системы (и из рис. 2.1) видно, что гусеничный обвод воспринимает часть вертикальной нагрузки от катка и, следовательно, на снег передается не весь вес машины, приходящийся на каток. Одновременно в гусеничном движителе возникают дополнительные растягивающие усилия.

Определим изменение этих усилий по длине гусеничного обвода под катком. Полагая для этого во втором или третьем уравнении  $\alpha_{2j} = \alpha$  — текущее значение угла, причем  $-\alpha_{2j} \leq \alpha \leq \alpha_{1j}$ , получим выражение для определения натяжения в части гусеничного обвода под катком. Удобнее анализировать второе уравнение, из него получим:

$$T = \frac{T_{1j} \cos \alpha_{1j} + b \int_{R_K \sin \alpha}^{R_K \sin \alpha_{1j}} \tau(x) dx}{\cos \alpha} \quad (2.29)$$

Анализ полученного выражения показывает, что с уменьшением угла  $\alpha$  первое слагаемое в числителе остается постоянным, второе растет (как интеграл от положительной функции), а знаменатель увеличивается при уменьшении  $\alpha$  до величины, равной 0, и уменьшается при дальнейшем уменьшении угла  $\alpha$  до величины  $-\alpha_{2j}$ .

При изменении величины  $\alpha$  от  $\alpha_{1j}$  до 0 необходимо выяснить, что быстрее растет — числитель или знаменатель. Очевидно, это зависит от физических свойств снега и конструктивных параметров движителя.

Расчеты показали, что в большинстве случаев числитель растет быстрее, чем знаменатель, поэтому на сбегавшей ветви отмечается рост натяжения в гусеничном обводе.

В сбегавшей ветви усилия натяжения резко растут, т. к. числитель увеличивается, а знаменатель уменьшается.

Рассмотрим изменение натяжения гусеничного обвода в межкатковом пространстве. Для этого из системы выберем первое и третье уравнения и перепишем их для участков  $CD$  и  $BE$  соответственно.

Получим для первого участка

$$T_{j\alpha} = \frac{T_{2j-1} \cos \alpha_{2,j-1} + b \int_{l_\alpha}^{l_{2,j-1}} \tau dx}{\cos \alpha} \quad (2.30)$$

Так как  $l_\alpha$  в данном случае уменьшается при изменениях  $\alpha$  от значения  $\alpha_{2,j-1}$  до 0, то знаменатель увеличивается (см. рис. 2.2в). Числитель также увеличивается (см. рис. 2.2б), поскольку первое слагаемое постоянно, а второе увеличивается, как интеграл от неотрицательной функции. Расчеты показали, что, поскольку уровень горизонтальных реакций здесь очень мал, рост усилий замедляется, а возможно и некоторое падение уровня натяжений.

Для второго участка получим

$$T_{j,\alpha} = \frac{T_j + b \int_0^b \tau dx}{\cos \alpha} \quad (2.31)$$

На данном участке характер изменения натяжений еще в большей мере зависит от физических свойств грунта и конструкции движителя, и наблюдается замедленный рост натяжений в гусеничном обводе или возможно даже падение натяжений.

Таким образом, в результате теоретического исследования можно сделать следующий вывод. Натяжения в гусеничном движителе растут от направляющей ветви гусеничного обвода к ведущей не по линейному закону, как это часто отмечается в литературе. Характер изменения натяжения приведен на рис. 2.3. Экспериментальные данные по записи натяжений в гусеничном обводе подтвердили результаты расчетов.

Как показывает рисунок, наибольший рост натяжений отмечается в сходящей с катка ветви.

Кроме того, становится очевидным, что за счет до-

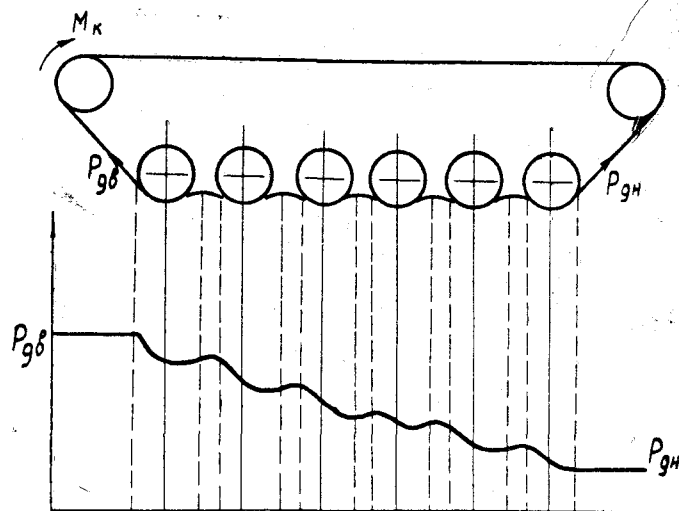


Рис. 2.3. Характер изменения натяжения

полнительного натяжения гусеничного движителя частотной вертикальной нагрузки от катков передается на межкатковые участки. Поэтому, изменяя натяжение в гусеничном обводе, можно частично перераспределять вертикальное давление по длине гусеницы.

Аналогичное явление отметил В. П. Аврамов при рассмотрении распределения нормального давления вдоль опорной поверхности гусеницы при движении по неровной поверхности.

### 2.3. Эпюра давления гусеничного движителя на снег

Одним из самых распространенных показателей, которыми пользуются для оценки взаимодействия гусеничного движителя со снегом (уплотнение снега, образование колеи, проходимость, сцепные свойства и т. д.), является среднее удельное давление на грунт, определяемое по общеизвестной формуле

$$q_{\text{ср}} = \frac{G}{2L_6 b}, \quad (2.32)$$

где  $G$  — вес машины;

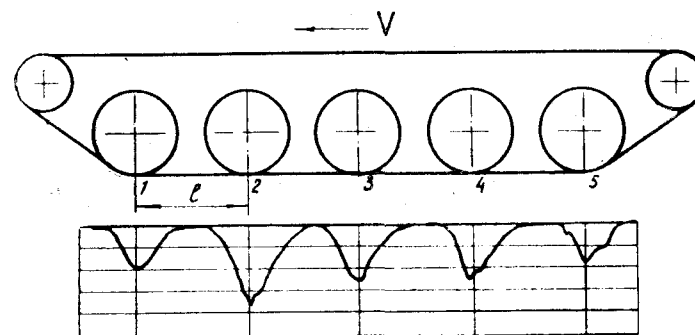


Рис. 2.4. Характер эпюры давления под опорной поверхностью гусеницы

$b$  — ширина гусеницы;  
 $L_6$  — база машины.

Использование данного показателя предполагает равномерное распределение нагрузки по опорной поверхности. Однако данное допущение настолько искажает действительную картину распределения давления, что может привести к грубым ошибкам при прогнозировании.

Расчеты показали: эпюра давления неравномерна, носит ярко выраженный пиковый характер; давление на межкатковых участках гусеничного движителя настолько мало, что его условно можно считать равным нулю. Экспериментально полученное распределение давления по опорной поверхности подтверждает эти явления (рис. 2.4). Проведенные исследования показали, что с достаточной степенью точности можно считать, что давление под катками распределено по закону треугольника. Вершина треугольника совпадает с осью катка, высота пропорциональна нагрузке на каток, а основание равно примерно половине межкаткового расстояния. Тогда максимальное пиковое давление под катком определяется формулой

$$q_{\text{пик}}^k = \frac{2P}{b \Delta L_k}, \quad (2.33)$$

где  $P$  — нагрузка на каток  $\left(P = \frac{G}{2m}\right)$ ;

$\Delta L_k$  — активная длина опорной поверхности, проходящая на каток.

Если расстояние между катками по длине машины незначительно отличается от диаметра катка (плотная компоновка катков по опорной поверхности) и вес машины равномерно распределен по каткам, можно пользоваться упрощенной зависимостью

$$\Delta L_k = \Delta L = \frac{L_6}{2(m-1)} \quad (2.31)$$

где  $m$  — число катков по борту машины.

Если расстояние между катками значительно превышает диаметр катка (неплотная компоновка катков) можно использовать зависимость типа

$$\Delta L = \varepsilon R_k, \quad (2.32)$$

где  $R_k$  — радиус опорного катка;  
 $\varepsilon = 0,785-1,2$  — эмпирический коэффициент

Величина  $\varepsilon$  имеет сложную зависимость от нагрузки на опору, свойств грунта и конструктивных параметров гусеничного движителя. Величина  $\varepsilon$  была рассчитана для различных типов снега при различных нагрузках на катки.

Полученные результаты были проанализированы для различных гусеничных машин. Проведенный анализ показал, что для снежного полотна пути при мелкозвенчатой металлической или для резинометаллической гусеницы, обеспечивающих плотное облежание катка,  $\varepsilon$  меняется в пределах от 0,78 до 1,2, причем нижний предел относится к уплотненным снегам, верхний — к рыхлым (имеющим небольшую плотность). Если ввести понятие коэффициента перегрузки опоры (показывающего, во сколько раз максимальная нагрузка на опору больше того значения, которое возникает при равномерном распределении веса машины по ним), определяемого соотношением

$$\xi = \frac{2 P_{\max} m}{G} \geq 1, \quad (2.33)$$

где  $P_{\max}$  — максимальная из нагрузок, приходящаяся на каток машины,

то, используя выражения (2.32) — (2.34), можно получить следующую связь между действительным максимальным пиковым давлением под катком и средним давлением под опорной поверхностью гусеницы:

$$q^k_{\max} = q_{\text{ср}} 4 \xi \frac{m-1}{m} \quad (2.37)$$

Анализ приведенной зависимости показывает, что максимальное пиковое давление под катком даже при равномерном распределении нагрузок по опорам ( $\xi = 1$ ) более чем в 3 раза превышает среднее давление под гусеницей.

Учитывая, что при принятой нами плотной компоновке катков ( $\Delta L \approx R$ ),

$$L_6 = 2(m-1)R; \quad m = \frac{L_6}{2R} + 1.$$

Суммарная активная часть гусеницы

$$L_a = \sum \Delta L = mR = \frac{L_6}{2} + R,$$

откуда видно, что с увеличением количества катков и уменьшением их диаметра (при сохранении базы, равной  $L_6$ ) величина активной части гусеницы будет уменьшаться до значения:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum \Delta L = \frac{L_6}{2}.$$

Таким образом, активная часть гусеницы составляет около половины базы машины при плотной компоновке катков и меньше половины базы при неплотной компоновке.

Пиковое давление  $q^k_{\text{пик}}$  будет соответственно увеличиваться

$$q^k_{\text{пик}} = \frac{G}{m R b} = \frac{2 G}{(L_6 + 2R) b}$$

и в пределе достигнет

$$\lim_{m \rightarrow \infty} q^k_{\text{пик}} = \frac{2 G}{L_6 b} = \frac{G}{\frac{L_6}{2} b},$$

превысив  $q_{\text{ср}}$  в четыре раза. Так как рассматривается предельный случай, то гусеница считается абсолютно гибкой.

Это соотношение еще больше увеличится при неравномерном распределении нагрузок по опорам.

При работе вездеходной машины в транспортном или

Таблица  
 Распределение нагрузок по каткам снегоболотохода ГПИ-37  
 в статике и движении

Состояние машины	Нагрузка на каток, Н				
	Номера катка				
	1	2	3	4	5
Статическое положение	2550	2550	2550	2550	2550
Движение	1755	2495	3050	3450	2000

\* Последний (пятый) каток при движении разгружается за счет поджатия его гусеничной лентой.

буксирующем режиме происходит перераспределение нагрузок по опорам, поэтому эпюра давления в этом случае может значительно отличаться от статического распределения давлений.

Наши исследования, а также исследования других авторов показывают, что приложенный к корпусу машины реактивный момент, кинематика работы последних катков с задними наклонными ветвями гусеничных цепей, действие крюковой нагрузки ведут к значительному перераспределению нагрузок по опорным каткам. Из этого во время движения машины ее корпус получает заметный дифферент на корму, наиболее нагруженным оказывается предпоследний опорный каток, а центр давления смещается к корме машины. Характер перераспределения нагрузок для одной из машин (экспериментальный снегоболотоход ГПИ-37) с задней ведущей звездочкой показан в табл. 2.1.

Величина перераспределения зависит в основном от базы машин: чем меньше база машины, тем больше перераспределение.

Рассмотренные особенности распределения давлений по опорной поверхности гусеничной машины справедливы при статическом положении или при движении машины на низких скоростях, когда рассматриваемые нагрузки практически не меняются со временем.

С повышением скорости движения начинается активное взаимодействие различных систем машины между собой и со средой. В результате резко растет динамическая составляющая нагрузки на каток. Динамическая

составляющая зависит в основном от параметров подвески (жесткости упругих элементов, затухания в системе колебаний, соотношения подрессоренной и нерессоренной масс) и определяется условиями движения (скоростью машины, характером полотна пути и т. д.), поэтому эпюра давления является динамической характеристикой машины (в различные моменты времени эпюры давления могут отличаться как значениями пиковых давлений, так и их распределением по опорам).

Рассматриваемые в настоящей главе вопросы перемещения машины с точки зрения максимальной проходимости по снежной целине, которая практически полностью достигается, как правило, лишь на малых скоростях, позволяют рассматривать нагрузки на катки во времени постоянными и не учитывать их изменения за счет динамических составляющих, которые на малых скоростях малы.

#### 2.4. Образование колен

Образование колеи при движении гусеничной машины по снежному покрову определяется следующими основными факторами: осадка снега под действием вертикальной нагрузки, экскавация снега за счет буксования, выдавливание. Рассмотрим выдавливание снега, т. к. первые два фактора рассмотрены в литературе.

Формально если считать снег абсолютно неупругим телом, то после нижней точки первого катка (точка С на рис. 2.1в) поверхность должна быть горизонтальной, т. к. давление, передаваемое на снег после этой точки, меньше, чем в точке С, и в силу неупругости снега после данной точки не происходит восстановления, т. е. частички снега остаются в положении, которое заняли под точкой С. Если такие рассуждения проводить дальше, то межкатковый участок гусеничного движителя должен быть горизонтальным. На следующем катке зона его опорного давления была бы такова, что бы давление было больше, чем под первым, и т. д. Однако экспериментальные данные и результаты наших расчетов показывают, что и первый и последующие катки погружаются так, что дуга контакта со снегом захватывает за точку С по направлению к точке В', т. е. происходит горизонтальное перемещение снега. Следующие катки, если нагрузки на них меньше, чем на первый, также

погружаются в снег, даже если пиковое давление под ними меньше, чем пиковое давление под первым катком. Гусеничный движитель не только деформирует снег в вертикальном направлении, но и перемещает его в горизонтальном направлении, поднимает его в межкатковом пространстве, затем опять деформирует его следующим катком, опять поднимает и т. д.

Горизонтальное перемещение происходит за счет сдвига валика перед катком и дальнейшего переноса в зону за катком. Таким образом, общее количество снега, участвующего в деформации, под катком остается неизменным. Сходное явление обнаружил Дж. Вонг при рассмотрении качения ведущего колеса по песку.

Если дополнительно учесть оговоренные выше малую скорость движения машины и малое буксование движителя, то погружение машины будет определяться зависимостью, выведенной в главе 1.

Описанным явлениям полностью отвечает изложенная в данной главе расчетная модель.

В качестве примера была рассчитана глубина колеи снегоходной машины ГПИ-22 при движении по снегу  $\rho = 0,25 \text{ г/см}^3$ ,  $\gamma = 0,05 \text{ МПа/м}$ . Сравнение приведенных в табл. 2.2 теоретических и экспериментальных данных показало удовлетворительную сходимость результатов.

Следует отметить, что расчет глубины колеи без учета неравномерного пикового характера и активной длины опорной поверхности приводит к тому, что глубина колеи в 2 раза и более превышает расчетную.

Обычно условие проходимости в наиболее простом виде определяют так:

$$\kappa \geq h,$$

где  $\kappa$  — дорожный просвет;  
 $h$  — глубина колеи.

Таблица 2

Глубина колеи		
Глубина снега, $H$ , см	Глубина колеи, $h$ , см	Результаты эксперимента, $h_a$ , см
60	28	25—28—30
70	32,1	34—35—38
80	35,8	38—40
90	39,3	40

Однако, по нашим наблюдениям, потеря проходимости при движении по снегу не всегда наступает, если машина деформирует снежный покров днищем. Это объясняется тем, что верхний слой снежного покрова часто имеет низкую несущую способность. Отсюда вытекает необходимость рассмотреть погружение машины с учетом деформации снежного покрова днищем.

Если использовать зависимости (1.8), (2.33), то погружение днища определится из уравнения

$$c = \frac{A}{h_x - \kappa} + \frac{B_1}{h_x}$$

$$h_x = h_{\max} - h_{\text{дн}};$$

$h_{\text{дн}}$  — погружение днища;

$$A = 2 b \gamma h_{\max} \frac{\Delta L}{2} m;$$

$$B_1 = B - b;$$

$B$  — коlea машины;

$$C = \frac{G}{h_{\max}} + \gamma L_0 \left( B - \frac{1}{2} b \right).$$

При этом часть веса машины, приходящаяся на гусеничный движитель, определяется так:

$$G_{\text{гус}} = \frac{\gamma h_{\max} b / L_0}{2} \left( \frac{h_g + \kappa}{h_{\max} - h_g - \kappa} \right).$$

В таблице 2.3 приведены результаты около 100 замеров глубины колеи и деформации снежного покрова днищем машины ГТС с дорожным просветом 38 см. Заме-

Таблица 2.3

Глубина колеи и деформация снежного покрова днищем

$H$ , см	57—62	62—67	67—72	72—77	77—82	82—87	87—92
30 см	34—40	33—45	33—45	36—44	34—49	41—49	43—49
40 см; $\rho = 0,30$	1—4	0—6	0—6	0—7	4—14	7—14	7—15
50 см; $\rho = 0,25$	30	31	34	36	38	40	42
60 см; $\rho = 0,20$	36	40	43	46	49	52	55
70 см; $\rho = 0,15$	38	42	46	49	54	56	60
80 см; $\rho = 0,15$	42	46	50	54	58	63	66



Таблица 2

Соотношение между глубиной колеи и деформацией днища

$H$ , см	57—67	67—77	77—87	87—92
$h$ , см	34 39 40	36 39 44	40 45 49	41 43 47
$h_{дн}$ , см	1 1 4	4 7 8	9 10 13	7 8 14

ры выполнены на трассе прямолинейного движения протяженностью 1000 м по снежному покрову, не однородному по глубине. Поэтому результаты сгруппированы по интервалам. Выборочные замеры плотности снега по длине трассы и глубине дали диапазон плотности  $\rho=0,1-0,30$  г/см<sup>3</sup>. Теоретические расчеты выполнены для характеристик снега:

$\rho=0,15$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma=0,02$
$\rho=0,20$	$\gamma=0,03$
$\rho=0,25$	$\gamma=0,05$
$\rho=0,30$	$\gamma=0,1$

Анализ результатов замеров показал следующее. Следует отличать глубину осадки снежного покрова под машиной и глубину колеи. Глубина колеи меньше глубины погружения, что видно из таблицы, где разность  $h-h_{дн}$  иногда оказывается меньше дорожного просвета. Этот факт объясняется выдавливанием снега за последний катком.

Представление о величинах выдавливания дают выборочные данные в таблице 2.4.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные в таблицах, а также наблюдения за эксплуатацией гусеничных машин на снегу показывают, что условие проходимости  $k \geq h$  завышено. Наш взгляд, более правильным будет условие

$$k \geq h + \Delta h.$$

Можно принять величину  $\Delta h=10$  см. При этом проходимость гусеничных машин по большинству видов снегов обеспечивается с некоторым запасом.

## ГЛАВА 3

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ  
ГУСЕНИЧНОЙ СНЕГОХОДНОЙ МАШИНЫ

Сопротивление движению, как известно, сопровождается расходом энергии на преодоление этого сопротивления и измеряется силой суммарного сопротивления

$$P_c = P_f + P_f';$$

где  $P_f, P_f'$  — внешнее и внутреннее сопротивление движению.

Внутреннее сопротивление включает в себя потери на перекачивание опорных катков по гусенице, потери на трение в шарнирах (или гистерезисные потери в резинометаллических гусеницах) и другие потери, возникающие вследствие вибрации гусеницы, нерационального расположения снегозацепов и т. д.

Потери такого вида в основном учитываются коэффициентом полезного действия гусеничного движителя и при движении на малых скоростях по снежной целине составляют незначительную часть от общего сопротивления движению. Методика определения их достаточно хорошо разработана [2, 4] и поэтому рассматриваться не будет.

Основную долю в сопротивлении движению собственно гусеничной машины составляет первое слагаемое. Внешняя сила сопротивления движению (в дальнейшем для краткости просто сила сопротивления) включает в себя следующие составляющие:

$$P_f = P_{дг} + P_{ддн} + P_{тр} + P_6 + P_{ш},$$

где  $P_{дг}$  — сопротивление движению машины за счет вертикальной деформации снега гусеницами;

$P_{ддн}$  — сопротивление движению за счет вертикальной деформации снега днищем машины;

- $P_{тр}$  — сопротивление движению за счет трения днища о снег;  
 $P_б$  — сопротивление движению за счет бульдозерного эффекта гусениц;  
 $P_{п}$  — прочие сопротивления за счет попадания снега на беговую дорожку гусениц, прилипание и примерзания снега к элементам ходовой системы.

### 3.1. Сила сопротивления движению машины, обусловленная вертикальной деформацией снежного покрова гусеницами

Эта сила определяется как работа, затраченная на деформацию снега при перемещении машины на величину  $L$ , отнесенная к  $L$ . Для этого принимаются следующие допущения, не противоречащие наблюдаемой физической картине при движении с малыми скоростями по относительно ровному горизонтальному участку снежного полотна пути:

- движение происходит без колебаний корпуса;
- деформация снега под катками обусловлена приложением только вертикальной нагрузки; перемещение массы снега под гусеницей вследствие буксования и возникновения при этом потери должны быть учтены при рассмотрении упорных реакций грунта; деформация снега под гусеницей подчиняется закономерностям, рассмотренным в главах 1, 2;
- движение происходит по полотну пути с достаточной (но конечной) глубиной снежного покрова (чтобы не учитывать влияние твердого грунта);
- первый каток деформирует снежное полотно пути на глубину  $h$ ; за счет выдавливания снега за первый катком глубина колеи будет  $h_1 - \Delta h_1$ ; дополнительная деформация снега вторым катком будет равна  $h_2 - (h_1 - \Delta h_1)$  и т.д.; если нагрузка меньше, то будем считать выдавливание достаточным, чтобы при погружении на величину  $\Delta h$  была воспринята полная нагрузка на каток; при заданной длине контакта катка с полотном пути  $\Delta L$ .

Деформация снежного покрова под опорной поверхностью при перечисленных допущениях и принятой эпюре приведена на рис. 3.1.

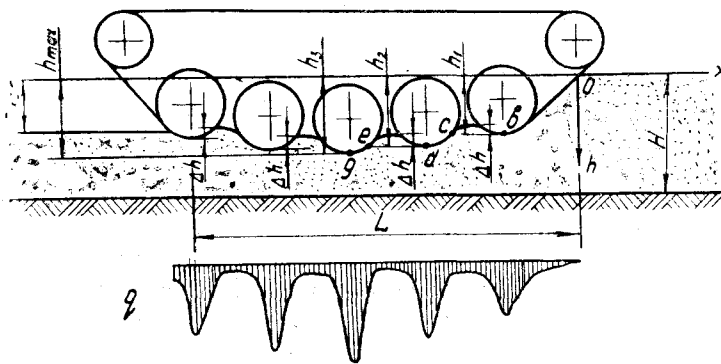


Рис. 3.1. Распределение деформаций под опорной поверхностью в соответствии с принятой эпюрой давления

Работа, затраченная на деформацию снега  $A_{д.сн}$ , в общем виде определяется по зависимости

$$A_{д.сн} = 2b \int_0^L dx \int_0^{h(x)} q(h) dh. \quad (3.1)$$

Из рис. 3.1 видно, что площадь деформированного снега равна площади, деформированной при поступательном движении нисходящей лентой гусеничного обвода по кривой  $o b c d e g$ , плюс площадь криволинейных трапеций, полученных от деформации выдавленного за катком снега. Тогда можно получить упрощение приведенного интеграла

$$A_{д.сн} = 2Lb \int_0^{h_{\max}^{деф}} q(h) dh + 2Lb \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 1}}^m \int_{h_{i-1} - \Delta h_i}^{h_i} q(h) dh, \quad (3.2)$$

где  $i_{q_{\max}}^k$  — номер катка с наибольшим давлением (и следовательно, максимальным погружением),

и соответственно сила сопротивления движению от вертикальной деформации снега будет

$$P_{д.сн} = P_{д.сн}^{(1)} + P_{д.сн}^{(2)} =$$

$$= 2b \int_0^{h_{\max}^{\text{деф}}} q(h) dh + 2b \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq i_k}}^m \int_{h_i - \Delta h_i}^{h_i} q(h) dh, \quad (3.2)$$

где  $P_{\text{д.сн}}^{(1)}$  — сила сопротивления, обусловленная деформацией снежного полотна пути под катком с наибольшим пиковым давлением;  $P_{\text{д.сн}}^{(2)}$  — сила сопротивления, обусловленная дополнительной деформацией снега, выделенного в межкатковое пространство;  $h$  — максимальная деформация снега опорной поверхностью, которая в соответствии с принятыми допущениями может быть определена из зависимости  $q = f(h)$ .

Для качественного анализа в расчетах удобнее принять степенную зависимость

$$q = kh^n,$$

а для количественного — зависимость, полученную ОНИЛВМ, приведенную к виду

$$q = \frac{\gamma h}{1 - \frac{h}{h_{\max}}}. \quad (3.3)$$

Соответствующие зависимости для  $h_{\text{деф}}$  принимают вид

$$h_{\text{деф}} = \left( \frac{q_{\max}^k}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.4)$$

и для второго случая

$$h_{\text{деф}} = \frac{q_{\max}^k \cdot h_{\max}}{q_{\max}^k + \gamma h_{\max}}. \quad (3.5)$$

Решение первого слагаемого интеграла (3.3) для выражения дает следующую формулу для определения силы сопротивления:

$$P_{\text{д.сн}}^{(1)} = \frac{2q_{\max}^k b}{n+1} \left( \frac{q_{\max}^k}{k} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (3.6)$$

При использовании зависимости (3.4) получаем формулу

$$P_{\text{д.сн}}^{(1)} = 2b \gamma h_{\max}^2 \left[ -\ln \frac{\gamma h_{\max}}{\gamma h_{\max} + q_{\max}^k} - \frac{q_{\max}^k}{q_{\max}^k + \gamma h_{\max}} \right]. \quad (3.7)$$

Выражения (3.7) и (3.8) описывают один и тот же процесс, но при разных аналитических аппроксимациях одной и той же кривой, поэтому влияние параметров, входящих в обе формулы, одинаково. Однако влияние максимального давления проще рассматривать по выражению (3.7), а влияние физико-механических свойств снега — по выражению (3.8). В ряде случаев проще рассматривать влияние отдельных факторов непосредственно по диаграмме: деформация — давление (рис. 1.8), так как интеграл (3.1) пропорционален площади под этой кривой. Величина  $q_{\max}^k$  определяется при решении численными методами системы уравнений (2.10), (2.28). При этом затрудняется анализ влияния параметров гусеничного движителя на сопротивление движению. Этот анализ удобнее проводить при использовании введенных выше упрощенных зависимостей, связывающих максимальное пиковое давление с параметрами гусеничного движителя.

При использовании зависимостей (2.33), (2.34), (2.36) получим следующие соотношения:

$$P_{\text{д.сн}}^{(1)} = \frac{2}{n+1} \left( 2\xi \frac{n_1-1}{m} \right)^{1+\frac{1}{n}} \cdot \left( \frac{G}{L_6} \right)^{1+\frac{1}{n}} \cdot \left( \frac{1}{b_k} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (3.8)$$

для второго случая:

$$P_{\text{д.сн}}^{(1)} = 2b \gamma h_{\max}^2 \left[ \ln \left( 1 + \frac{2\xi(m-1)G}{m b L_6 h_{\max} \gamma} \right) - \frac{2\xi(m-1)G}{2\xi(m-1)G + m b L_6 \gamma h_{\max}} \right]. \quad (3.9)$$

Если конструкция ходовой части такова, что предпосылка в отношении плотной компоновки катков по опорной поверхности не выполняется, то на основании соотношений (2.33), (2.35), (2.36) и (3.7) можно полу-

чить зависимость, включающую длину опорной поверхности. Аналогом выражения (3.9) при этом будет являться следующая формула

$$P_{д.сн.}^{(1)} = \frac{2}{n+1} \left( \frac{1}{b_{\kappa}} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left( \frac{G}{L_a} \right)^{1+\frac{1}{n}} \cdot \xi^{(1+\frac{1}{n})}, \quad (3.10)$$

где  $L_a = \varepsilon R_{\kappa} m$ .

Подобным образом можно вывести аналог и для зависимости (3.10):

$$P_{д.сн.}^{(1)} = 2b \gamma h_{\max}^2 \left[ \ln \left( 1 + \frac{\xi G}{b L_a h_{\max} \gamma} \right) - \frac{\xi G}{\xi G + L_a G \gamma h_{\max}} \right]. \quad (3.11)$$

Таким образом, сила сопротивления от деформации снега определяется в основном тремя факторами (см. выражения (3.7), (3.8):

- физико-механическими свойствами снега (величины  $k$  и  $n$  в (3.7) или  $h_{\max}$  и  $\gamma$  в (3.8);
- максимальным пиковым давлением под опорной поверхностью ( $q_{\max}^{\kappa}$ );
- шириной гусеницы ( $b$ ).

Учитывая, что максимальное пиковое давление свою очередь зависит от распределения нагрузок по опорам (коэффициент  $\xi$ ) и величины площади активной опорной поверхности ( $L_a$ ,  $b$ ), то в соответствии с выражениями (3.11) и (3.12) можно считать, что при заданных массе машины  $G$  и условиях движения ( $k$ ,  $n$  в формуле (3.11) или  $h_{\max}$  и  $\gamma$  в (3.12) сопротивление движению определяется двумя факторами:

- распределением нагрузок по опорам ( $\xi$ );
- размерами, определяющими площадь активной части опорной поверхности ( $L_a$ ,  $b$ ).

Последние показатели определяют среднее из пиковых давлений под опорной поверхностью гусеницы

$$q_{пик}^{ср} = \frac{\sum_1^m q_{пик}^{\kappa}}{m} = \frac{G}{L_a b}. \quad (3.13)$$

Аналогичные зависимости определим и для второго

слагаемого (3.3). При указанных выше предпосылках для формулы

$$P_{д.сн.}^{(2)} = 2b \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq i}}^m \int_{q_{\max}^{\kappa} h_i}^{h_i} \kappa h^m dh = \\ = 2b \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq i}}^m \frac{\kappa}{n+1} [h_i^{n+1} - (h_i - \Delta h_i)^{n+1}].$$

Разлагая функцию в круглых скобках в степенной ряд и ограничиваясь тремя первыми членами, получим выражение, дающее погрешность порядка 5%:

$$P_{д.сн.}^{(2)} = 2b \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq i}}^m q_{\max}^{\kappa} \Delta h_i \left( 1 - \frac{n}{2} \cdot \frac{\Delta h_i}{h_i} + \frac{n(n-1)}{6} \cdot \frac{\Delta h_i^2}{h_i^2} \right). \quad (3.14)$$

Для анализа влияния параметров гусеничного движителя на силу сопротивления движению выражение в круглых скобках можно принять равным единице. Учитывая, что  $\frac{\Delta h_i}{\Delta L_i} \approx \text{const}$ , и формулу (2.33), получим,

что данное выражение практически не зависит от параметров гусеничного движителя и определяется для данного снега в основном весом машины. Тогда основное влияние на величину сопротивления движению при различных варьированиях параметров движителя будет оказывать изменение первого слагаемого.

Для формулы (3.14)

$$P_{д.сн.}^{(2)} = 2b \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq i}}^m \gamma h_{\max}^2 \left\{ \ln \left[ 1 + \frac{\Delta h_i}{h_{\max}} \left( 1 + \frac{q_{пик}^{\kappa}}{\gamma h_{\max}} \right) \right] - \frac{\Delta h_i}{h_{\max}} \right\}. \quad (3.15)$$

Используя в первом приближении для малых  $\Delta h_i$  и больших  $h_{\max}$  разложение  $\ln(1+\alpha) \approx \alpha$  при  $0 < |\alpha| \ll 1$ ,

нетрудно убедиться, что замечание к предыдущей формуле справедливо и в данном случае.

Таким образом, анализ влияния параметров гусеничного двигателя на сопротивление движению можно проводить по зависимостям (3.7) — (3.12).

### 3.2. Сопротивление движению за счет бульдозерного действия лобового участка гусеницы

При движении машины лобовой участок гусеницы (рис. 3.2) воздействует на снег. Данное сопротивление движению определяется из следующих соображений [1]. Если бы между поверхностью гусеницы и снегом отсутствовало трение, то реакция снега и соответственно деформация его была бы направлена по нормали к поверхности лобового участка гусеницы. Но при движении машины происходит перематывание гусеницы, и между гусеницей и снегом создается трение, за счет которого действующая со стороны лобового участка на снег сила  $R$  отклоняется от нормали на угол трения. Так как поверхность гусеницы имеет снегозацепы, промежутки между которыми заполнены снегом, то фактически происходит трение снега по снегу, и следовательно, угол трения будет равен углу внутреннего трения снега  $\varphi$ .

Таким образом, действительно действующую со стороны лобового участка на снег силу  $R$  можно разложить на составляющие (рис. 3.2): силу, действующую по нормали  $N = R \cos \varphi$ , и силу  $F = R \sin \varphi$ , затрачиваемую на протаскивание лобового участка ленты на пути АВ.

В свою очередь, сила  $N$  раскладывается на составляющие: по горизонтали  $N_r = N \sin \alpha = R \cos \varphi \cdot \sin \alpha$  — силу, сдвигающую снег, т. е. производящую бульдозерное действие, и силу  $N_b = N \cdot \cos \alpha$ , сжимающую снег. Соответственно после разложения силы  $F$  получим  $F_r = F \cdot \sin \alpha$  — силу, сжимающую снег, и силу, направленную по горизонтали,  $F_t = R \sin \varphi \cos \alpha$ . В соответствии с рис. 3.2 суммарная сила, сжимающая снег под лобовым участком гусеницы  $N_{\text{сум}} = N_b + F_b$ , учтена при определении сопротивления движению первым слагаемым интеграла (3.10).

Суммарная сила в горизонтальном направлении, производящая бульдозерный эффект, т. е. сдвигающая снег будет

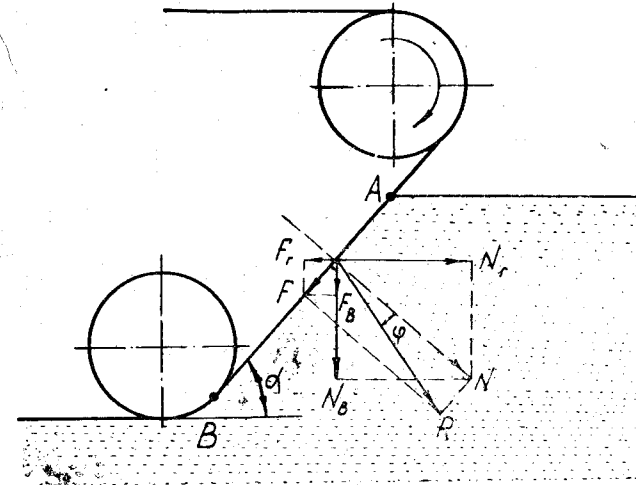


Рис. 3.2. Силы, действующие на лобовой участок гусеницы

$$P_\delta = N_r - F_t = R (\cos \varphi \cdot \sin \alpha - \sin \varphi \cos \alpha). \quad (3.16)$$

Очевидно, что сила сопротивления от бульдозерного действия гусеницы будет равна нулю, когда угол наклона лобового участка гусеницы будет равен углу внутреннего трения снега ( $\alpha = \varphi$ ).

Из проведенных в ОНИЛВМ опытов и по данным литературных источников [1, 18], наиболее часто встречающийся для различных снегов угол внутреннего трения снега можно принять  $\varphi = 18 \div 24^\circ$ . Таким образом, задавая при проектировании угол наклона лобового участка гусеницы в указанных пределах, мы обеспечиваем минимальное сопротивление от бульдозерного действия гусеницы.

### 3.3. Сопротивление движению за счет днища машины

Это сопротивление в основном складывается из затрат на вертикальную деформацию снега днищем машины и трения днища о полотно пути. Сопротивление движению за счет вертикальной деформации снега днищем

Таблица

## Сопротивление движению

Машина	Глубина снега, см	$P^1_{дн}$	$P^2_{дн}$	$P_{дсн н}$	Экс м Р
ГПИ-37	35	1980	2900	4980	53
	45	2900	3500	6400	5
ГТ-СМ	35	6300	2410	8710	80
	45	7250	3520	10770	104

машины подсчитывается по зависимости

$$P_{д-дн} = b_{дн} \int_0^{h_{дн}} q_{дв} dh. \quad (3.17)$$

Удельное давление днища машины на снег, как правило, мало и не превышает 0,02 МПа. В этом случае зависимость давления от деформации может быть принята линейной (1.1):

$$q_{дн} = \kappa h_{дн}.$$

Подставляя (1.1) в (3.17), после интегрирования получим

$$P_{д-дн} = \frac{1}{2} b_{дн} \kappa (h_{кол} - h_{дор пр})^2. \quad (3.18)$$

Сопротивление движению машины за счет трения днища о поверхность полотна пути определяется как

$$P_{тр} = (C_{\alpha} + q_{дн} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\alpha}) \cdot F_{дн}, \quad (3.19)$$

где  $C_{\alpha}$ ,  $\operatorname{tg} \varphi_{\alpha}$  — параметры, характеризующие трение материала корпуса о снег (см. главу 1);  $F_{дн}$  — площадь днища.

Зависимости (3.18), (3.19) получены для случая движения машины без дифферента.

При движении с дифферентом сопротивление будет меньше.

Расчеты сопротивления движению, выполненные по формулам (3.12), (3.15), и результаты эксперимента приведены в таблице 3.1.

Анализ расчетных и экспериментальных данных показывает удовлетворительное совпадение результатов

### 3.4. Влияние конструктивных параметров гусеничного движителя на сопротивление движению

Полученные зависимости позволяют исследовать влияние конструктивных параметров на сопротивление движению и сформулировать соответственно некоторые требования к проектированию снегоходных машин.

При определении конструктивных параметров снегохода следует исходить из наиболее тяжелых условий движения, на которые предположительно рассчитывается машина. При этом, естественно, должны быть известны физико-механические свойства снега (среды), характеризующие данные условия.

Выше было показано, что при заданных физико-механических свойствах снега сопротивление движению будет определяться двумя основными показателями: средним пиковым давлением под опорной поверхностью гусеницы  $q^{ср}_{пик}$  и коэффициентом перегрузки  $\xi$ .

$$q^{ср}_{пик} = \frac{\sum_1^m q^{пик}}{m} = \frac{q^{пик}_{max}}{\xi}.$$

Среднее пиковое давление при равномерном распределении нагрузок по каткам ( $\xi = 1$ ) является одновременно как бы максимальным пиковым давлением и определяет, таким образом, минимальное сопротивление движению, которое можно достичь на данной машине. Поскольку коэффициент перегрузки  $\xi$  всегда больше единицы, то на реальной машине сопротивление будет больше.

Таким образом, в период проектирования необходимо решать две задачи: а) получить в конструкции по возможности минимальное среднее пиковое давление и б) предусмотреть конструктивные мероприятия по снижению коэффициента перегрузки в различных режимах движения.

Рассмотрим возможные пути решения указанных вопросов. К параметрам, изменяющим среднее пиковое давление под опорной поверхностью гусеницы, можно отнести геометрические размеры гусеничного движителя, число опорных катков и их радиус. При принятом допущении о равномерном распределении нагрузки по каткам, т. е.  $\xi = 1$ , так, как было показано выше, пиковое давле-

ние под катком, а следовательно, и среднее пиковое давление может быть записано одной из следующих формул:

$$q_{\text{пик}}^{\text{ср}} = q_{\text{пик}}^{\text{к}} = \frac{G}{L_a b}; \quad (3.20)$$

$$q_{\text{пик}}^{\text{к}} = \frac{G}{\Delta L \cdot m b}; \quad (3.21)$$

$$q_{\text{пик}}^{\text{к}} = \frac{2G(m-1)}{L_6 m b}; \quad (3.22)$$

$$q_{\text{пик}}^{\text{к}} = \frac{G}{R \varepsilon m b}. \quad (3.23)$$

Из приведенных выражений видно, что среднее пиковое давление под опорной поверхностью гусеницы определяется активной поверхностью гусеничного движителя и его статическое значение не зависит от коэффициента перегрузки  $\xi$ .

Таким образом, выбранные показатели  $q_{\text{пик}}^{\text{ср}}$  и  $q_{\text{пик}}^{\text{к}}$  взаимно независимы. Формула (3.20) показывает, что пиковое давление зависит от активной длины опорной поверхности и ширины гусеничного движителя. Вторая формула (3.21) уточняет, что активная часть длины опорной поверхности складывается из несущих участков под катками (в предположении, что все они одинаковы  $L_a = m \Delta L$ ). Третья формула (3.22) составлена для случая плотной компоновки катков по длине опорной поверхности, и тогда часть активной поверхности под катком можно принять равной половине межкаткового расстояния ( $\Delta L = \frac{L_6}{2(m-1)}$ ). Четвертая формула (3.23) принята для неплотной компоновки катков, тогда справедливы соотношения

$$\Delta L = R \varepsilon, \quad L_a = m R \varepsilon.$$

В дальнейшем будем рассматривать плотную компоновку катков по опорной поверхности. Если это условие не соблюдается, то каждый такой случай оговаривается отдельно. Анализ влияния параметров гусеничного движителя будем проводить по зависимостям (3.7) — (3.12), так как второе слагаемое интеграла 3.3 практически

зависит от изменения параметров гусеничного движителя. Учитывая ранее принятое предположение, что нагрузки по опорным каткам распределены равномерно ( $\xi = 1$ ),

$$q_{\text{пик}}^{\text{к}} = q_{\text{max}}^{\text{к}} = q_{\text{пик}}^{\text{ср}}$$

Выражение 3.9 может быть переписано в следующем виде:

$$q_{\text{пик}}^{\text{к}} = \frac{2}{n+1} \left( 2 \frac{m-1}{m} \right)^{1+\frac{1}{n}} \cdot \left( \frac{G}{L_6} \right)^{1+\frac{1}{n}} \cdot \left( \frac{1}{b_n} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (3.24)$$

Допустим, конструктивно меняется только ширина гусеницы, например увеличивается. Тогда по формулам (3.20) — (3.23) уменьшается пиковое давление. Формула (3.24) показывает, что при этом сопротивление уменьшается. Однако это уменьшение будет незначительным. Например, при показателе  $n=3$ , чтобы уменьшить сопротивление в 2 раза, надо в 8 раз увеличить ширину гусеницы. Ясно, что такой прием для снижения сопротивления движению не может быть признан удовлетворительным.

Рассмотрим изменение базы  $L_6$ , например, ее увеличение. Пусть остальные параметры остаются без изменения, в том числе и количество катков. Тогда нарушится плотная компоновка катков, формула (3.22) не справедлива, выражение (3.23) показывает, что пиковое давление под катком при этом не изменится. Отсюда следует, что простое увеличение базы не изменяет сопротивление движению.

Увеличим базу, сохранив плотную компоновку катков, не изменяя их размеров добавлением еще одного катка радиусом  $R$ . В этом случае увеличится активная часть опорной поверхности  $L_a$  и в соответствии с формулой (3.20) уменьшится пиковое давление, а значит, и сопротивление движению.

Увеличим базу, изменяя число катков и их размеры. Выражения (3.20) и (3.22) показывают, что пиковое давление изменится, если изменится длина активной части опорной поверхности, т. е. величина  $L_a = m R \varepsilon$  или  $L_a = \Delta L m$ . Если эта величина увеличится, то пиковое давление (и следовательно, сопротивление) уменьшится, и наоборот. Отсюда следует, что при выборе числа катков и их радиуса можно использовать критерий актив-

ной опорной поверхности. Если  $m_1 R_1 = R_2 m_2$ , то так две схемы ходовой части эквивалентны по сопротивлению. Например, схемы 5 катков с радиусом каждого катка по 350 мм и 7 катков с радиусом по 250 мм эквивалентны.

Если  $m=6$ , а  $R=250$ , то сопротивление деформации снега увеличится, при  $m=6$ ,  $R=350$ , наоборот, уменьшится, что нетрудно показать, подсчитав длину активной опорной поверхности. Если рассматривать ходовую систему с катками различных диаметров, то при условии распределения нагрузок по каткам пропорционально радиусу длину активной поверхности можно рассчитать по зависимости

$$L_a = \sum_{i=1}^m m_i R_i \varepsilon.$$

Тогда, очевидно, будут эквивалентны схемы

$$\sum_{i=1}^{m_1} m_{1i} R_{1i} = \sum_{i=1}^{m_2} m_{2i} R_{2i}. \quad (3.20)$$

Например, схемы: 5 катков с  $R$  по 400 мм и сочетание 2 катков с  $R$  по 400 мм и 6 катков с  $R$  по 200 мм эквивалентны по сопротивлению деформации снега. Схема ходовой части  $2 \times 400$  и  $5 \times 300$  будет иметь меньшее сопротивление, чем у предыдущих схем.

Очевидно, условие распределения нагрузок пропорционально радиусам является условием постоянства коэффициента  $\varepsilon$ . Если данное условие нарушается, необходимо использовать схему расчетов по формуле

$$\sum_{i=1}^{m_1} m_{1i} R_{1i} \varepsilon_{1i} = \sum_{i=1}^{m_2} m_{2i} R_{2i} \varepsilon_{2i}. \quad (3.21)$$

Все рассмотренные случаи приводили к изменению пикового давления. Рассмотрим случаи изменения конструктивных параметров при неизменном пиковом давлении. Тогда при анализе можно воспользоваться зависимостями (3.20), (3.21) и (3.7). Эти зависимости показывают, что снижение сопротивления движению можно достичь только за счет уменьшения ширины гусеничного движителя при одновременном увеличении длины активной поверхности, при этом должна оставаться постоянной величина  $Rmb$ , а следовательно, должна увеличиваться величина  $Rm$ .

Этого можно добиться за счет увеличения либо размеров катка, либо числа катков, либо того и другого сразу. Следует отметить, что увеличение величины  $R_m$  ведет к увеличению базы машины  $L_6$  и, следовательно, ухудшает поворачиваемость машины. Отсюда вытекает, что для уменьшения сопротивления за счет деформации снега, при неизменном пиковом давлении, целесообразно выбирать максимально возможную по условиям поворота длину гусеничного движителя, так как при этом получается минимально допустимая ширина и по формулам (3.7) — (3.12) минимальное сопротивление при данном пиковом давлении.

Таким образом, все мероприятия по снижению пикового давления уменьшают сопротивление, обусловленное деформацией снежного покрова. При выбранном пиковом давлении дальнейшее снижение сопротивления можно получить за счет подбора соотношения между шириной гусеничного движителя и длиной активной части опорной поверхности. Минимальное сопротивление дает максимально возможная по условиям поворота длина опорной части гусеничного движителя  $L_6$ .

К конструктивным особенностям машины, изменяющим коэффициент перегрузки  $\xi$ , относятся распределение нагрузок по каткам, их перераспределение при движении (за счет крутящего момента) и крюковая нагрузка (за счет опрокидывающего момента).

При  $\xi \neq 1$  можно проанализировать выражение (3.11), из которого следует, что всякая перегрузка увеличивает сопротивление движению. Очевидно, минимальным будет сопротивление при  $\xi = 1$ . При статическом положении это соответствует равномерному распределению нагрузок по каткам. Однако при движении вследствие действия реактивного момента от трансмиссии происходит перераспределение нагрузок по опорным каткам.

Аналогичное перераспределение происходит при использовании снегоходной машины в качестве тягача, когда нагрузка на крюке также может вызвать (в зависимости от расположения сцепного устройства) значительное увеличение нагрузок на задние катки. Оба эти вида перераспределений связаны с угловой жесткостью подвески, а также с длиной опорной поверхности машины и числом опорных катков. На рис. 3.3 изображены силы, действующие на корпус снегоходной машины при



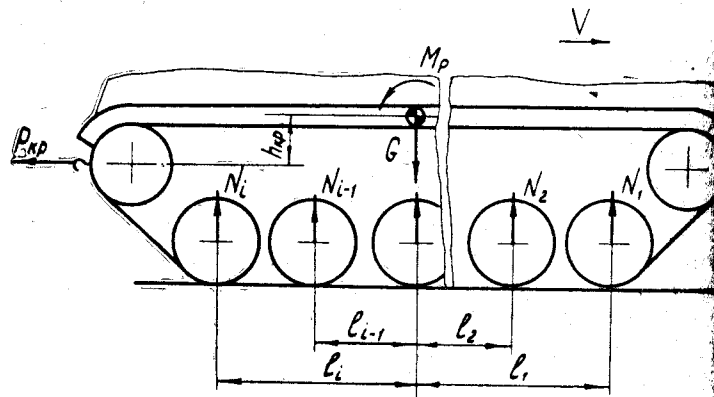


Рис. 3.3. Силы, действующие на машину при движении

движении (действие сил тяги и сопротивления приводит к реактивному моменту  $M_p$ ). Если в статическом положении распределение нагрузок по каткам таково,

$$\sum P_i l_i = 0,$$

где  $P_i$  — нагрузки на опорные катки, передаваемые через подвеску на корпус;  
 $l_i$  — расстояние осей опорных катков до центра тяжести (от носовой части с плюсом, от кормовой с минусом),

то при движении должно произойти перераспределение нагрузок таким образом, чтобы выдерживалось соотношение

$$\sum (P_i + \Delta P_i) l_i = M_p \pm P_{кр} h_{кр}. \quad (3.27)$$

В общем случае ясно, что чем дальше отстоят крайние катки от центра тяжести, тем происходит меньше перегрузка крайнего катка (в данном случае последнего). Отсюда также видна целесообразность расположения тягового крюка несколько ниже центра тяжести. Тогда второе слагаемое в формуле (3.27) войдет со знаком минус и перераспределение нагрузок уменьшится.

Таким образом, действительная эпюра давления при движении и, следовательно, сопротивление оказываются связанными не только с конструкцией ходовой части

Таблица 3.2

Распределение нагрузок (Н) по каткам на снегоболотоходе ГПИ-37 при различных положениях центра тяжести при движении и статическом положении

Положение центра тяжести	Позиция	Номера катков от носовой части				
		1	2	3	4	5
Движение	$0,55L_0$	2100	2550	2900	3120	2100
	$0,35L_0$	2180	2550	3200	3280	1550
	$0,45L_0$	1370	1920	3280	3850	2370
	$0,65L_0$	1095	1095	2370	3650	4570

также с положением центра тяжести машины, приложенными нагрузками, расположением крюка и т. д. В связи с сопротивлением движению с действительной эпюрой давления при движении была проверена экспериментально на машинах ГПИ-37 и ГТС (табл. 3.2, рис. 3.4).

Анализ данных таблицы иллюстрирует положение о перераспределении нагрузок в движении по сравнению со статическим состоянием. Растет нагрузка на задние катки, уменьшается на передние. В таблице наглядно представлено изменение распределения нагрузок в зависимости от положения центра тяжести.

Коэффициент сопротивления движению, график которого представлен на

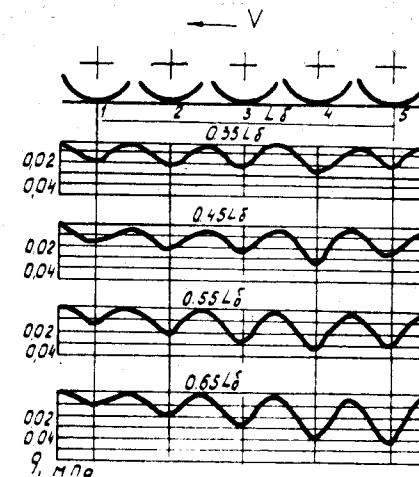


Рис. 3.4. Эпюры давления снегоболотохода ГПИ-37 при различных положениях центра тяжести

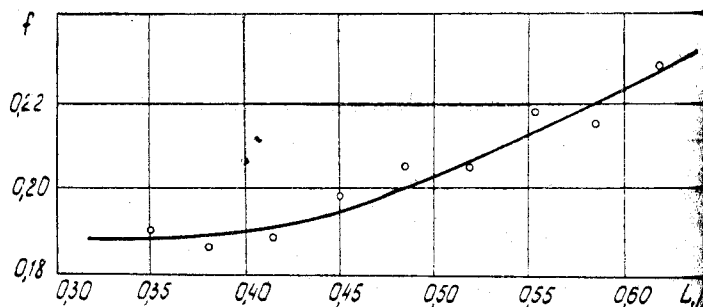


Рис. 3.5. Зависимость коэффициента сопротивления движения от положения центра тяжести машины

рис. 3.5, подсчитывается по формуле

$$f = \frac{P_{д-сн}^{(1)} + P_{д-сн}^{(2)}}{G} \quad (3.5)$$

График показывает, что для данной машины целесообразно перемещать центр тяжести к носовой части. При этом уменьшится сопротивление движению. Учитывая современную тенденцию конструировать ходовую часть таким образом, чтобы распределение нагрузок было симметрично относительно центра тяжести в статическом положении, следует для неплавающих машин рекомендовать некоторую перегрузку на носовую часть таким образом, чтобы в движении эпюра выравнивалась.

## ГЛАВА 4

### СИЛА ТЯГИ, РАЗВИВАЕМАЯ ГУСЕНИЧНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ НА СНЕЖНОМ ПОЛОТНЕ ПУТИ

#### 4.1. Особенности взаимодействия гусеничного движителя со снежным полотном пути при формировании горизонтальной реакции

Основы физической сущности взаимодействия движителя со снежным полотном пути даны в главе 1. Изложенные материалы создают предпосылки для определения горизонтальной реакции, которую снеговая машина может реализовать в контакте с полотном пути.

Гусеничный движитель можно представить в виде совокупности траков, каждый из которых работает при сдвиге в режиме штампа. Выше было показано, что к такой схеме может быть приведена и жесткая и упругая гусеница. Однако траки, расположенные в различных точках опорной поверхности, находятся в разных условиях: часть траков находится под катками, часть — в межкатковом расстоянии. Кроме того, существуют особенности работы гусеничного движителя как единого целого.

К первой особенности взаимодействия гусеничного движителя с полотном пути следует причислить тот факт, что не все траки опорной поверхности реализуют максимально возможную или установившуюся упорную реакцию.

Упорная реакция грунта, реализуемая движителем, согласно фундаментальным законам динамики, устанавливается такой, чтобы преодолевалось сопротивление движению, обеспечивался необходимый запас на силу тяги на крюке и обеспечивалось ускорение движения машины. Роль автоматического регулятора принадлежит в данном случае буксованию.

На рис. 4.1, 4.2 показана диаграмма сдвига, отнесенная к опорной поверхности машины при различных значениях коэффициента буксования  $\delta$ . Если направить вдоль поверхности ось  $l$  с началом в передней точке опор-

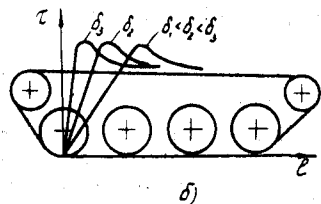
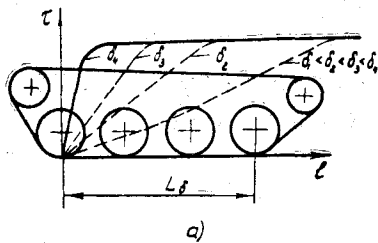


Рис. 4.1. Диаграмма сдвига, отнесенная к опорной поверхности машины при различных значениях коэффициента буксования

раммы сдвига типа I и II. Анализ этой диаграммы показывает, что с увеличением буксования суммарная реакция траков под опорной поверхностью сначала быстро растет, затем несколько стабилизируется или даже уменьшается. В каждом случае существует какое-то оптимальное буксование, при котором обеспечивается максимальная горизонтальная упорная реакция. Если при этом сопротивление движению окажется больше, чем упорная реакция движителя, то наступает потеря проходности. В этих условиях движение машины невозможно.

Существующие снегоходы обычно имеют на снежном полотне пути такое буксование, при котором большинство траков работают в режиме за пиком диаграммы сдвига, т. е. в установившемся режиме.

Постоянное давление на опорной поверхности движителя обеспечивается только в случае применения ходовой части системы Неждановского. При наиболее распространенной схеме гусеничного движителя (с опорными катками) распределение давления по опорной поверхности неравномерно и имеет, как показано выше, пи-

ной поверхности, то величину перемещения трака относительно снежного полотна пути  $x$  к тому моменту, когда он займет на опорной поверхности положение, соответствующее координате  $l$ , можно подсчитать по зависимости

$$x = \delta l. \quad (4.1)$$

По диаграмме сдвига, построенной для трака, можно получить ту реакцию, которую трак реализует в данной точке опорной поверхности. Таким образом, можно построить диаграмму, называемую распределением этих реакций по длине опорной поверхности. Она представлена на рис. 4.1 а, б для диа-

граммы сдвига типа I и II. Анализ этой диаграммы показывает, что с увеличением буксования суммарная реакция траков под опорной поверхностью сначала быстро растет, затем несколько стабилизируется или даже уменьшается. В каждом случае существует какое-то оптимальное буксование, при котором обеспечивается максимальная горизонтальная упорная реакция. Если при этом сопротивление движению окажется больше, чем упорная реакция движителя, то наступает потеря проходности. В этих условиях движение машины невозможно.

Существующие снегоходы обычно имеют на снежном полотне пути такое буксование, при котором большинство траков работают в режиме за пиком диаграммы сдвига, т. е. в установившемся режиме. Постоянное давление на опорной поверхности движителя обеспечивается только в случае применения ходовой части системы Неждановского. При наиболее распространенной схеме гусеничного движителя (с опорными катками) распределение давления по опорной поверхности неравномерно и имеет, как показано выше, пи-

ковский характер, поэтому упорные реакции не совпадают с изображенными на рис. 4.1. В этом случае, вследствие действия закона Кулона, эпюра горизонтальных реакций подобна эпюре давлений на опорную поверхность и с учетом диаграммы сдвига (рис. 1.21) представлена на рис. 4.2 в случае, когда все катки нагружены одинаково.

В противоположном случае упорные реакции отклоняются от огибающей (рис. 4.2), поскольку она построена для равных нагрузок на опорные катки. Таким образом, распределение упорных реакций, которые могут реализовать траки по длине опорной поверхности, неравномерно, оно подобно, с одной стороны, эпюре давления, с другой — диаграмме сдвига.

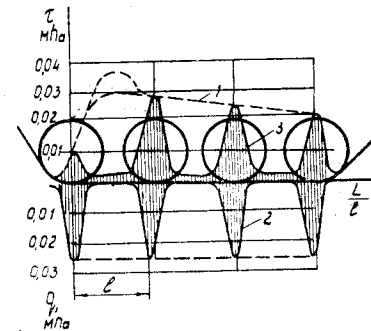


Рис. 4.2. Эпюра распределения действительных упорных реакций под опорной поверхностью гусеницы — 3 (диаграмма сдвига — 1, эпюра удельных давлений — 2)

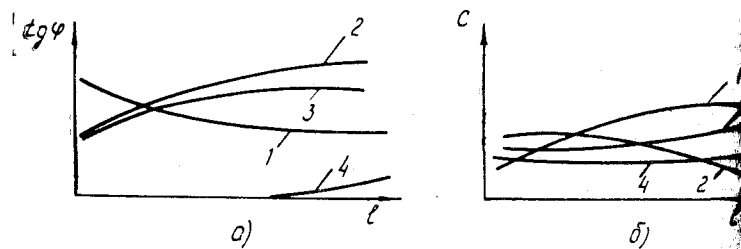


Рис. 4.3. Характер изменения связности и трения для наиболее характерных типов снега

фрикционно-связных сухих снегов — кривые 3, для сильно влажных снегов (связных) — кривые 4. Таким образом, переменный характер вертикальных нагрузок приводит к изменению по длине опорной поверхности физико-механических свойств снега, характеризующих сопротивление сдвигу.

Третьей особенностью взаимодействия гусенично-двигателя с полотном пути является тот факт, что трение между катками, хотя и работает практически без давления, но взаимодействует со снегом уже нарушенной структуры. Вопросы, рассмотренные в связи с текстурой, касаются взаимодействия со снегом траков находящихся под катками. В межтраковом пространстве возникает другая закономерность изменения связности и трения. В данном случае характерным является новая уже уплотненная (катком) структура снега (практически со снятым вертикальным давлением) с измененной связностью и трением (в межтраковом пространстве по сравнению с этими величинами на поверхности снега). Таким образом, для определения упорной реакции трака в межкатковом пространстве в выражении (1.23) нельзя пользоваться теми же коэффициентами, так как в этом случае плотность снега (и другие физико-механические свойства) и, следовательно, связность и трение грунта изменены.

При исследовании этих сторон взаимодействия гусенично-двигателя с полотном пути возникают вопросы:

1. Каковы характеристики кривой  $\tau - x$  при начальной нагрузке: абсцисса максимума, соотношение максимума и установившегося значения, коэффициенты аппроксимации

в выражениях (1.21) и (1.22) и их зависимость от физико-механических свойств снега для модели трака гусеницы.

2. Каковы характеристики текстурности: соотношение между характеристиками кривой  $\tau - x$  при начальной и повторной нагрузках.

3. Как меняются характеристики снега, уплотненной нагрузкой: соотношение между параметрами кривой  $\tau - x$  при первоначально большой нагрузке и затем при меньших вертикальных нагрузках (между катками).

Эти вопросы нельзя рассматривать в отрыве от структуры снега, его слоистости и физико-механических свойств. В лаборатории ОНИЛВМ с целью исследования перечисленных выше особенностей взаимодействия движителя с грунтом были проведены эксперименты с макетами гусеничных движителей транспортера ГТСМ и опытного снегоболотохода. В обоих случаях кусок гусеницы был жестко связан с единым основанием. Нагрузка осуществлялась специальным устройством, смонтированным на тракторе Т-50.

Исследования показали, что для макетов гусеницы справедливы те же закономерности, которые в главе 1 были отмечены для штампов и кольца сдвига. В частности, максимальная упорная реакция возникает при перемещениях 10—30 мм. Для реальных режимов буксования такие перемещения возникают, как правило, в зоне первого катка. Поэтому при анализе упорной реакции гусеничного движителя при описании диаграммы сдвига достаточно выбрать кривую типа II, заменив значение максимальной реакции ее установившимся значением. В этом случае  $\tau_{\max}$  можно заменить на  $\tau_{\text{уст}} = 0,8 \tau_{\max}$ . Тогда уравнение кривой на диаграмме сдвига с учетом зависимостей, приведенных в главе 1, можно записать в виде:

$$\tau = 0,8 \tau_{\max} (1 - e^{-\kappa_2 x}), \quad (4.2)$$

где  $x$  — перемещение, рассчитываемое по зависимости (3.1), м;

$\tau_{\max}$  — предельное напряжение для данного трака и данного снега;

$\kappa_2$  — эмпирический коэффициент.

Значение величины  $\kappa_2$  определяется экспериментально и может быть принято (согласно данным ОНИЛВМ) для большинства снегов равным 250 1/м.

Исследования процесса текстропии для снежного полотна пути проводились на опытном образце снегоочистительной машины. Испытания показали, что текстропия сложной формы зависит от физико-механических свойств снежного полотна пути, буксования, распределения вертикальных давлений по длине опорной поверхности и других факторов. Учесть явление текстропии можно путем умножения выражения (4.2) на убывающую экспоненту.

$$\tau = 0,8 \tau_{\max} e^{-\kappa_1 x} (1 - e^{-\kappa_2 x}). \quad (4.3)$$

Данная формула учитывает явление текстропии в наиболее неблагоприятной форме, когда изменение физико-механических свойств снега ведет к уменьшению упорной реакции трака по длине опорной поверхности.

Для влажного снега получено экспериментальное значение  $\kappa_1 = 0,425$  1/м при буксовании  $\delta = 5\%$ . Действительная зависимость несколько отличается от убывающей экспоненциальной. Исследования на макетах показали, что при повторении нагрузки характер кривой меняется: если при первом нагружении характер кривой представляется кривой типа I, то при повторном нагружении характерной является кривая типа II (рис. 1.16).

Для ответа на вопросы третьей группы были проведены следующие эксперименты: после снятия диаграммы сдвига при некотором давлении  $q$  снималась диаграмма для снега со структурой, образованной этим давлением. Для этого после достижения величины  $q$  вертикальное давление снималось, и вновь получали диаграмму сдвига при  $q=0$  (кривая 2 рис. 4.4).

При приложенной вертикальной нагрузке диаграмма сдвига выражается кривой типа I, при снятой вертикальной нагрузке характерной является кривая типа II (на рис. 4.4 соответственно кривые 1 и 2).

На рис. 4.5 наряду с обычной диаграммой предельных состояний (кривая 1) нанесена кривая 2 значений упорных реакций при снятом вертикальном давлении  $q$ . Эти значения характеризуют коэффициент связности снега со структурой, нарушенной первоначально приложенным давлением  $q$ . Если построить диаграмму предельных состояний для снега со структурой, нарушенной давлением  $q_1, q_2, q_3$ , то она будет выражаться соответствующими ломаными  $a_1 b_1 c$ ;  $a_2 b_2 c$  и  $a_3 b_3 c$ . График построен для влажного снега ( $W < 15\%$ ). Таким образом, коэффици-

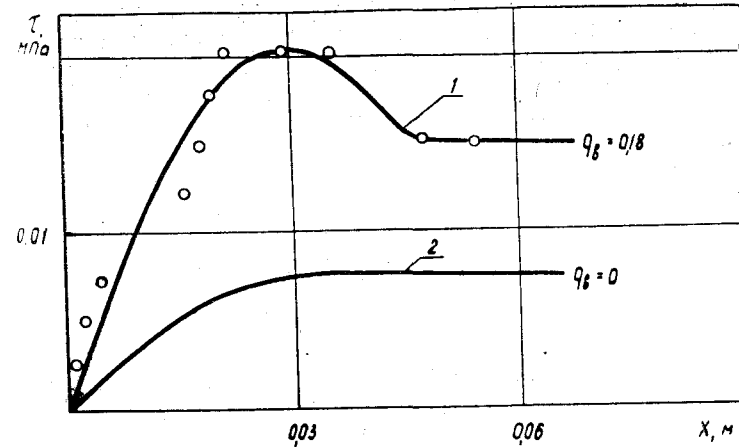


Рис. 4.4. Диаграмма сдвига: 1 — при давлении  $q = 0,018$  МПа, 2 — при  $q = 0$  на снеге со структурой, образованной первоначальным давлением

ент трения (но не трение) в нарушенном массиве снега будет меньше, чем в ненарушенном, а коэффициент связности больше. На снегах с другими физико-механическими свойствами изменения значений коэффициентов  $c$  и  $\tan \varphi$  будут подчиняться другим закономерностям (рис. 1.24).

Наконец, еще одной особенностью взаимодействия гусеничного движителя со снежным полотном пути является своеобразие условий возникновения клина скольжения. По сравнению со штампом, где весь клин фор-

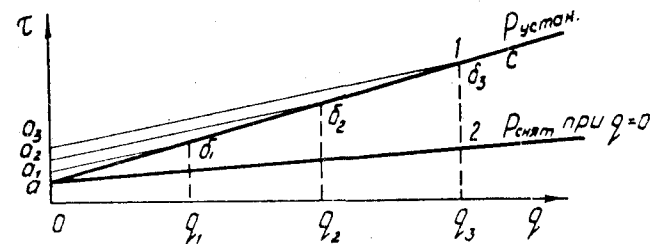


Рис. 4.5. Диаграмма предельных состояний (1), значения упорных реакций при снятой нагрузке (2)

мируется в снежном массиве, перед траком гусеничного движителя находится грунтозацеп предыдущего трака. Таким образом, клин скольжения образуется в ограниченном пространстве, и возникает вопрос, как в этих условиях рассчитывать максимальную реакцию одного трака.

#### 4.2. Расчет упорной реакции снега от одного трака

Для грунтов с малой несущей способностью полуэмпирическое решение данной задачи может быть получено, если придерживаться следующих допущений, не противоречащих результатам экспериментов и приводящих к простому методу расчета упорной реакции. Кривая  $cb'$  (рис. 1.19) заменяется прямой  $c_0b$ , опущенной на величину  $h \cong 1,5h_r$  (рис. 4.6), прямая  $ba$  отклоняется от теоретической (как было сказано в 1.4.1) дополнительно на угол трения материала подошвы трака о грунт

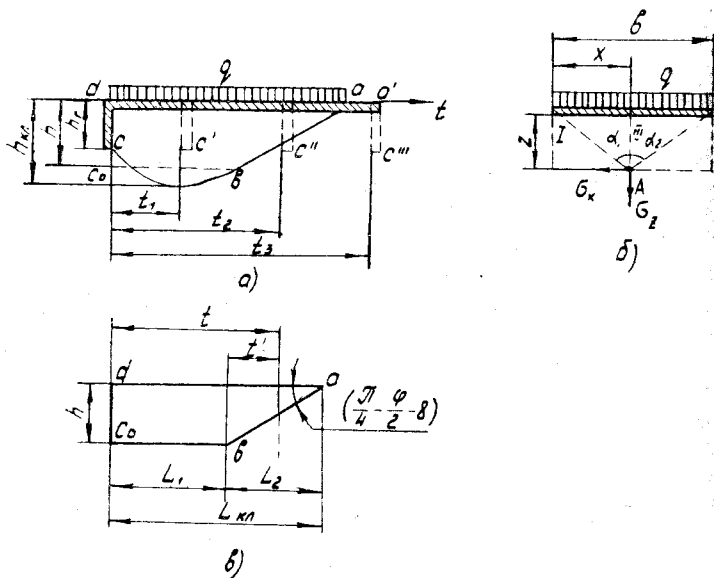


Рис. 4.6. Расчетная схема для определения упорной реакции снега для одного трака

В классической механике грунтов рассматривается свободная поверхность грунта, и поэтому в треугольнике  $dba$  углы определяются только внутренним трением грунта. Особенности работы трака требуют изменения этого положения.

Как уже было показано, длину клина скольжения, который может образоваться, можно принять равным 10 высотам грунтозацепа трака. Согласно рис. 4.6 б, силу, реализуемую единственным траком движителя в контакте со снежным полотном пути, можно представить в виде суммы составляющих, обусловленных следующими видами трения:

- 1) поверхностей снег — снег по ломаной  $c_0ba$ ;
- 2) поверхностей снег — движитель по прямой  $aa'$ ;
- 3) боковых поверхностей снег — снег по плоскости  $dc_0ba$ ;
- 4) снег — движитель по боковым поверхностям  $cd$  и  $da'$ ;
- 5) снег — движитель по горизонтальной плоскости  $c$  (основание грунтозацепа).

В общем случае на гусеничном движителе состояние клина скольжения зависит от расстояния между снегозацепами. Если предположить, что изменение положения следующего снегозацепа лишь «отсекает» клин, который может образоваться под единственным траком, то могут возникнуть три варианта, иллюстрированные на рис. 4.6 а ( $c'$ ,  $c''$ ,  $c'''$ ).

Учитывая зависимость горизонтальных и вертикальных напряжений под подошвой штампа, приведенных в I главе, можно нормальное напряжение, действующее на горизонтальной плоскости  $c_0b$ , определить из формулы (1.23) при  $z=h=1,5h_r$  (где  $h$  — условная высота преобразованного клина,  $h_r$  — высота снегозацепа):

$$\sigma_n' = \frac{q}{\pi} \left[ \arctg \frac{b-x}{h} + \arctg \frac{x}{h} + \frac{(b-x)h}{(b-x)^2 + h^2} + \frac{xh}{x^2 + h^2} \right]. \quad (4.4)$$

Нормальное напряжение, действующее по боковым поверхностям (I или II рис. 4.6 б) в какой-то точке на высоте  $z$ , определяется при условиях  $x=0$  или  $x=b$

$$\sigma_n'' = \frac{q}{\pi} \left( \arctg \frac{b}{z} - \frac{zb}{z^2 + b^2} \right). \quad (4.5)$$

Элементарная касательная сила, действующая по  
ковым поверхностям на полосу шириной  $dt$ , опреде-  
ся в соответствии с законом Кулона—Мора.

$$dF_{бок} = \left\{ 2 \int_0^z \left[ c + \frac{q \operatorname{tg} \varphi}{\pi} \left( \operatorname{arctg} \frac{b}{z} - \frac{bz}{z^2 - b^2} \right) \right] dz \right\} dt.$$

Соответственно для поверхности скольжения  $c_0 b$   
полосу шириной  $dt$  действует элементарная сила

$$dF_{гор} = \left\{ \int_0^x \left[ c + \frac{q \operatorname{tg} \varphi}{\pi} \left( \operatorname{arctg} \frac{b-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{x}{z} + \frac{(b-x)z}{(b-x)^2 - z^2} + \frac{x \cdot z}{(x^2 + z^2)} \right) \right] dx \right\} dt,$$

где  $z=h$  по поверхности  $c_0 b$ , а на поверхности  $ba$  яв-  
ляется функцией от  $t$ .

Или, вычисляя интеграл в квадратных скобках,

$$dF_{бок} = 2 \left( cz + \frac{a \operatorname{tg} \varphi}{\pi} z \operatorname{arctg} \frac{b}{z} \right) dt,$$

$$dF_{гор} = \left( cb + \frac{2q \operatorname{tg} \varphi}{\pi} b \operatorname{arctg} \frac{b}{z} \right) dt.$$

Дальнейшие расчеты существенно зависят от рас-  
стояния между грунтозацепами. Если расстояние мень-  
ше величины  $L_1$ , то соответствующие силы могут быть  
ределены по формулам (при  $z=h$ ):

$$F_{бок} = 2cht + \frac{2q \operatorname{tg} \varphi}{\pi} h \left( \operatorname{arctg} \frac{b}{h} \right) t,$$

$$F_{гор} = cbt + \frac{2qb \operatorname{tg} \varphi}{\pi} \left( \operatorname{arctg} \frac{b}{h} \right) t.$$

Если следующий грунтозацеп расположен в т-  
угольной зоне клина, то эти силы могут быть расче-  
нены:

$$F_{бок} = 2chL_1 + \frac{2q \operatorname{tg} \varphi}{\pi} hL_1 \operatorname{arctg} \frac{b}{h} +$$

$$+ 2 \int_0^{t_1} \left\{ cz + qz \operatorname{tg} \varphi \frac{\operatorname{arctg} \frac{b}{z}}{\pi} \right\} dt;$$

$$F_{гор} = cbL_1 + 2qbL_1 \operatorname{tg} \varphi \frac{\operatorname{arctg} \frac{b}{h}}{\pi} +$$

$$+ \int_0^{t_1} \left\{ cb + 2qb \operatorname{tg} \varphi \frac{\operatorname{arctg} \frac{b}{z}}{\pi} \right\} dt, \quad (4.10)$$

где  $t' = t - L_1$ ;  $z = \frac{h}{L_2} (L_2 - t')$ ;

$t$  — расстояние между грунтозацепами  
(рис. 4.6 в);

$L_1$  — длина прямоугольной части клина.

Или после взятия интегралов в правой части:

$$F_{бок} = 2ch[L_1 + L_2(z - \xi)] +$$

$$+ 2q \operatorname{tg} \varphi \frac{\operatorname{arctg} \frac{b}{h}}{\pi} \left[ L_1 + \frac{L_2}{2} \right] -$$

$$- qhL_2 \operatorname{tg} \varphi \frac{\operatorname{arctg} \frac{b}{h(1-\xi)}}{\pi} (1-\xi)^2 + qbL_2 \frac{\xi}{\pi} \operatorname{tg} \varphi -$$

$$- \frac{b^2 L_2}{h} q \operatorname{tg} \varphi \frac{\operatorname{arctg} \frac{b}{h(1-\xi)} - \operatorname{arctg} \frac{b}{h}}{\pi}; \quad (4.11)$$

$$F_{гор} = cb(L_1 + L_2 \xi) + 2q \operatorname{tg} \varphi \frac{\operatorname{arctg} \frac{b}{h}}{\pi} b(L_1 + L_2) +$$

$$+ 2q \frac{b^2 L_2}{2h} \operatorname{tg} \varphi \cdot \ln \frac{b^2 + h^2}{b^2 + h^2(1-\xi)^2} -$$

$$- 2q \operatorname{tg} \varphi \frac{\operatorname{arctg} \frac{b}{h(1-\xi)}}{\pi} \cdot bL_2(1-\xi),$$

где  $\xi = \frac{t'}{L_2}$ .

В частности, при  $t = L_1 + L_2$  или  $\xi = 1$

$$F_{бок} = 2ch[L_1 + L_2] + 2q \operatorname{tg} \varphi \frac{\operatorname{arctg} \frac{b}{h}}{\pi} \left[ L_1 + \frac{L_2}{2} \right] h +$$

$$+q \frac{b L_2}{\pi} \operatorname{tg} \varphi - \frac{b^2 L_2}{h} q \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{b}{h} \right] \operatorname{tg} \varphi,$$

$$F_{\text{гор}} = cb [L_1 + L_2] + 2q \operatorname{tg} \varphi \frac{\operatorname{arctg} \frac{b}{h}}{\pi} [L_1 + L_2] b +$$

$$+ 2q \frac{b^2 L_2}{2h} \ln \left( 1 + \frac{h^2}{b^2} \right) \operatorname{tg} \varphi. \quad (4.16)$$

Величины  $L_1$  и  $L_2$  могут быть получены на основании положения (1.20) и рис. 4.6в

$$L_1 = (8 \div 10) h - h \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} - \delta \right). \quad (4.17)$$

$$L_2 = h \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} - \delta \right). \quad (4.18)$$

При стремлении к нулю высоты грунтозацепа (имеется в виду, что  $q = kh^n$ ) выражения (4.12) стремятся соответственно к значениям

$$F_{\text{бок}} = 0; \quad F_{\text{гор}} = 0.$$

Если расстояние между грунтозацепами  $t$  больше величины клина ( $L_1 + L_2$ ) (см. рис. 3.6а положение грунтозацепа), то к указанным силам следует добавить силу трения подошвы штампа о снег.

Сила по поверхностям  $aa'$  может быть подсчитана

$$F_{\text{под}} = (c_\alpha + q \operatorname{tg} \varphi_\alpha) (t - L_1 - L_2) \cdot b. \quad (4.19)$$

Кроме перечисленных сил, в равнодействующую реакции грунта входит в качестве составляющих также сила трения боковой поверхности трака о снег. Эта сила состоит из суммы сил трения по поверхностям  $cd$ ,  $c$  и  $d$ .

Если учесть, что в соответствии с выражением (1.17) на поверхности  $da'$  нормальные напряжения  $\sigma_x$  равны  $q/2$ , так как  $\alpha_1 = 0$ ;  $\alpha_2 = \frac{\pi}{2}$  (или наоборот), то соответствующая сила равна

$$F_{da'} = (2c_\alpha + q \operatorname{tg} \varphi_\alpha) \delta_1 \cdot t, \quad (4.16)$$

где  $\delta_1$  — толщина подошвы трака;  
 $t$  — расстояние между грунтозацепами.

Распределение нормальных реакций по поверхности  $cd$  определяется выражением (4.5). Повторяя для него выкладки, приводящие к результату, аналогичному (4.6), (4.8) и (4.9), окончательно получим

$$F_{cd} = 2c_\alpha h_r \delta_2 + 2q \delta_2 h_r \operatorname{tg} \varphi_\alpha \frac{\operatorname{arctg} \frac{b}{h}}{\pi}, \quad (4.17)$$

где  $\delta_2$  — толщина грунтозацепа.

Нормальные напряжения в основании грунтозацепа (поверхность  $c$ ) подсчитываются по зависимостям, аналогичным (4.4), (4.7) и (4.8). Окончательная формула может быть записана в виде

$$F_c = c_\alpha b \delta_2 + 2qb \delta_2 \operatorname{tg} \varphi_\alpha \frac{\operatorname{arctg} \frac{b}{h}}{\pi}. \quad (4.18)$$

Таким образом, суммарная реакция со стороны снега, реализуемая единичным грунтозацепом (траком), равна

$$F_T = F_{\text{гор}} + F_{\text{бок}} + F_{\text{под}} + F_{da'} + F_{cd} + F_c. \quad (4.19)$$

В заключение необходимо отметить степень и основную причину приближенности выведенных зависимостей. Формулы выведены в предположении плоских поверхностей скольжения. В действительности ни боковая, ни поверхность  $cba$  не являются плоскими.

Данное допущение может привести к тому, что упорная реакция снега будет подсчитана по поверхности, где еще не наступило скольжение (при этом подсчитанная реакция будет занижена по сравнению с действительной), или по поверхности, лежащей за пределами поверхности скольжения (при этом результат расчета превысит реальную упорную реакцию снега).

Полученные формулы показывают, что упорная реакция, реализуемая единичным траком гусеничного движителя, кроме свойств снежного полотна пути, определяется еще конструктивными параметрами трака. Поэтому проведенные зависимости позволяют решать ряд вопросов по выбору оптимальных параметров гусеничного движителя с целью обеспечения максимально возможной упорной реакции снега.



### 4.3. Влияние конструктивных параметров элементов гусеницы на упорную реакцию снега

Среди конструктивных параметров трака, определяющих упорную реакцию снега, следует выделить высоту снегозацепа, ширину трака и расстояние между снегозацепами, а также связать расстояние между снегозацепами с длиной опорной поверхности, т. е. учесть число траков находящихся в зацеплении. В ОНИЛВМ были проведены [15] исследования на штампе длиной 100 мм, шириной 20 мм. На штампе помещалось два снегозацепа, менялась их высота и расстояние между ними (шаг). Эксперимент проводился при различных удельных давлениях. Результаты влияния указанных параметров на упорную реакцию приведены ниже.

**Влияние расстояния между снегозацепами.** Графики на рис. 4.7. дают возможность оценить соответствие между результатами эксперимента и теоретическими кривыми, полученными на основании предпосылок в п. 4.2. С точки зрения положений, сформулированных

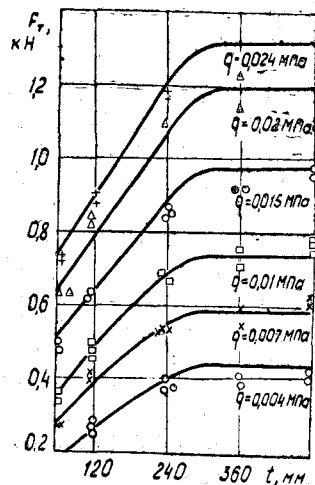


Рис. 4.7. Влияние шага между снегозацепами на упорную реакцию снега от единичного трака (при различных удельных давлениях)

п. 1.4.1 при выборе соотношения  $L_a = 10h_r$  ( $h_r = 30$  мм) до значения шага несколько меньше 220 мм, второй грунтозацеп находится в зоне, соответствующей положению  $c'$ , 300 мм (соответственно в зоне  $c''$  и выше 300 мм в зоне  $c'''$ ) (рис. 3.6 а). Теоретическая кривая зависимости упорной реакции от шага снегозацепа состоит из отрезков прямой, кривой (близкой к параболе) и горизонтали (рис. 4.7).

Из рисунка видно, что увеличение шага целесообразно до тех пор, пока сохраняется прямолинейная зависимость, т. е. в пределах горизонтальной части кривой. Последнее позволяет сформулировать след-

ующее теоретическое требование: наиболее рациональное расстояние между снегозацепами сверху ограничено величиной

$$t_{\max} = \left[ 10 - 1,5 c \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} - \delta \right) \right] h_r. \quad (4.20)$$

Для снежного полотна пути можно подобрать такое состояние снега (такие его физико-механические свойства), которое является предельным (т. е. такие условия, при которых исключается движение машины). Тогда верхнюю границу между снегозацепами можно установить из предложенного выше соотношения (4.20).

Если известно, что длина части гусеницы, соприкасающейся со снегом, ограничена величиной  $L_6$ , то при шаге  $t$  на этой длине можно разместить  $n = \frac{L_6}{t}$  тра-

ков. При условии равномерного распределения нагрузки по опорной поверхности на длине  $L_6$  (схема Неждановского,  $L_a = L_6$ ) упорные реакции снега, которые могут реализовать различные траки, одинаковы и зависят от расстояния  $t$  (обозначим эту силу  $F_T(t)$ ). Тогда упорную реакцию снега, которую может реализовать гусеница  $F_r$ , можно подсчитать

$$F_r = \frac{L_a}{t} F_T(t). \quad (4.21)$$

Поскольку на начальном этапе изменения при  $t < t_{\max}$  зависимость  $F_T(t)$  линейна, то в этом случае  $F_r$  постоянна и не зависит от  $t$  (см. рис. 4.8). Следовательно, задавать при проектировании величину расстояния между снегозацепами меньше  $t_{\max}$  просто нецелесообразно с точки зрения металлоемкости конструкции. При увеличении расстояния между снего-

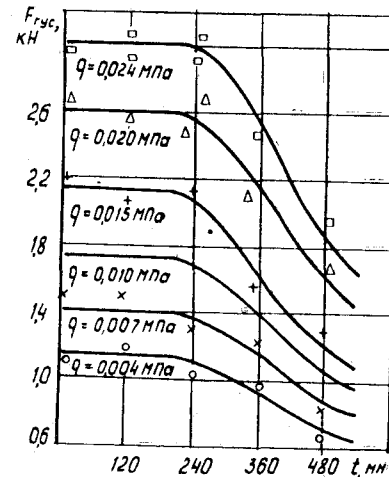


Рис. 4.8. Влияние шага  $t$  между снегозацепами на упорную реакцию снега со стороны всей гусеницы

зацепами упорная сила  $F_r(t)$  растет меньше, чем в линейной зависимости, поэтому общая реакция гусениц уменьшается. Если  $t > 10h_r$ , то  $F_r(t) = \text{const}$  (рис. 4.8) и поэтому упорная реакция гусеницы  $F_r$  будет уменьшаться по гиперболе (т. е. обратно пропорциональн зависимости) рис. 4.8. Таким образом, стремиться к увеличению расстояния между снегозацепами ( $t > t_{\max}$ ) также нецелесообразно.

Исходя из сказанного, следует считать, что оптимальным расстоянием между снегозацепами следует считать  $t \cong t_{\max}$ . При этом получится гусеница наименьшей таллоемкости и обладающая наилучшими тяговыми свойствами на снежной целине.

**Влияние высоты снегозацепа.** Результаты теоретических расчетов (кривые) и эксперимента (точки) нанесены на график рис. 4.9. Теория показывает, что при увеличении высоты снегозацепа уменьшается часть реакции  $F_{\text{гор}}$  (так как вертикальные напряжения с увеличением глубины уменьшаются) и увеличивается  $F_{\text{гор}}$  (из-за увеличения общей поверхности скольжения). Поэтому в целом упорная реакция снега изменится мало. Однако следует учесть, что эксперимент был поставлен для случая, когда  $t = t_{\max}$ . В случае  $t > t_{\max}$  увеличение высоты снегозацепа приведет к более существенному увеличению упорной реакции (так как увеличатся размеры клина скольжения).

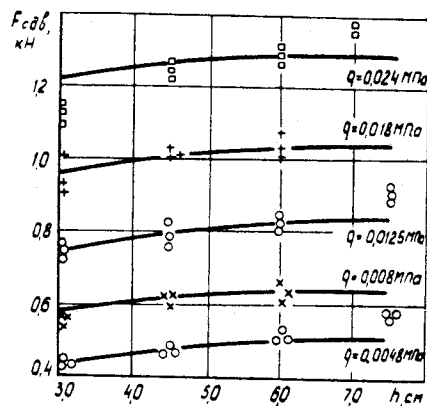


Рис. 4.9. Влияние высоты снегозацепа на упорную реакцию снега

на тракам эта реакция распределяется равномерно. Ответ на этот вопрос можно дать, если рассмотреть следующую схему.

Допустим, при заданном  $h_r$  шаг меньше  $t_{\max}$ . Увеличение шага до максимального значения не изменит упорной реакции, которую может реализовать гусеница (см. рис. 4.8). Если увеличить высоту снегозацепа, не изменяя шага, то, в соответствии с рис. 4.9, у каждого трака и, следовательно, у гусеницы реакция, которую можно реализовать, увеличится. При этом шаг  $t$  станет меньше максимального. Если теперь увеличить шаг до максимального, то опять в соответствии с рис. 4.8 возможная реакция гусеницы не изменится. Этот процесс можно продолжить и в дальнейшем. Таким образом, увеличение высоты снегозацепа увеличивает упорную реакцию, которую может реализовать гусеница. Этот процесс не может продолжаться до бесконечности, так как при больших значениях высоты грунтозацепа изменятся условия работы гусеничного движителя (см. главу 3), при этом возрастут потери, связанные с экскавацией снега, увеличением осадки, текстурности и т. д., и поэтому средняя реакция, которую может реализовать гусеница, уменьшается.

Увеличение высоты снегозацепов может даже уменьшить возможную упорную реакцию снега при движении машины по твердой корке или по двуслойному снежному полотну пути с твердой разделительной коркой, так как в этом случае снегозацепы будут разрушать корку в степени, пропорциональной их высоте.

Увеличение высоты снегозацепа в целом дает сравнительно незначительное увеличение тяги (рис. 4.9) и, следовательно, не является радикальным решением вопроса. Проведенные в ОНИЛВМ эксперименты показывают (рис. 4.9), что увеличение высоты снегозацепа в 2,5 раза дает прирост тяги не выше 8—10% при малых удельных давлениях порядка  $q = 0,005$  МПа и 4—5% — при удельных давлениях порядка  $q = 0,024$  МПа.

Таким образом, увеличение высоты снегозацепа как средство увеличения тяги может быть рекомендовано для машин с малым удельным давлением или там, где другие мероприятия невозможны.

Полученные зависимости решают задачу получения только максимально возможной реакции снега. Они позволяют построить диаграмму предельных состояний для

Экспериментальные точки, в целом подтверждающие вывод теории, дают отклонения от теоретической кривой для больших значений  $t$ .

В связи с изложенным выше вызывает интерес вопрос, как влияет одновременное изменение величин  $h_r$  и  $t$  на упорную реакцию, которую может реализовать гусеница в контакте с снегом в предположении, что

трака гусеничного движителя, т. е. определить коэффициенты  $c$  и  $\operatorname{tg} \varphi$  диаграммы для данного трака гусеницы. Сопоставляя эту диаграмму с диаграммой сдвигов и эпюрой давлений, можно построить распределение упорных реакций по длине опорной поверхности гусеничного движителя.

#### 4.4. Расчет упорной реакции гусеничного движителя

Результаты, полученные для штампов и макетов гусеницы, можно обобщить на весь гусеничный движитель. В любой фиксированный момент катки находятся в определенном положении относительно траков гусеницы. При этом каждый трак испытывает определенную вертикальную нагрузку, что обуславливает некоторое вертикальное давление (постоянное по длине трака) оказываемое им на снег. В любой другой момент (даже очень близкий к предыдущему) вертикальное давление трака на грунт меняется, так как при движении машины происходит изменение его положения относительно катки, снега и т. д. Оно характеризуется эпюрой давлений развернутой по времени. Рассчитанная для каждого момента упорная реакция трака и гусеницы (как сумма упорной реакции траков, участвующих в зацеплении с грунтом) дает в результате величину, зависящую от времени. Эта зависимость определяется изменением вертикальной нагрузки, физико-механических свойств снега и его геометрических характеристик (микропрофиль полотна пути, глубина снежного покрова и т. д.). Таким образом, упорная реакция в силу природы своей возникновения является функцией случайной. Поэтому целесообразно, говоря об упорной реакции гусеничного движителя при взаимодействии со снежным полотном пути, рассматривать некоторое усредненное значение этой функции за некоторый промежуток времени. Если считать, что полотно пути более или менее однородно, движение происходит стационарно и на малой скорости (т. е. исключить из рассмотрения изменение физико-механических свойств снега, колебания машины при движении и изменение ее скорости на заданном участке), тогда усреднение по времени можно заменить усреднением по длине контакта гусеничного движителя с грунтом.

Назовем приведенным горизонтальным напряжением под траком величину  $\tau_{\text{тр}}$ , определяемую соотношением

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{r}{bt}, \quad (4.22)$$

т. е. как бы условно распределив упорную реакцию по опорной поверхности трака.

Тогда, в соответствии со сказанным выше, эпюре давления под опорной поверхностью будет соответствовать эпюра приведенных горизонтальных напряжений под опорной поверхностью, подсчитываемых по зависимости

$$\tau = 0,8 \tau_{\text{тр}} e^{-\kappa_1 x} (1 - e^{-\kappa x}). \quad (4.23)$$

Следует заметить, что это напряжение не равно действительному, возникающему в снеге при его сдвиге (по плоскостям скольжения клина). Значение, вычисленное в соответствии с выражением (4.23), меняется по длине машины. Величина  $x$  зависит от буксования машины и может быть определена по зависимости (4.1). Тогда полученное приведенное касательное напряжение в некоторой точке опорной поверхности будет зависеть от положения этой точки на гусеничном движителе. Общая упорная реакция гусеницы может быть получена суммированием всех элементарных реакций, т. е. интегрированием по длине опорной поверхности. Элементарную реакцию можно получить следующим образом.

Схема нормальных и касательных реакций при рассмотрении гусеничной ленты, упруго облегающей каток, показана на рис. 2.1.

Тогда общая упорная реакция гусеницы будет равна

$$F_2 = b \int_0^{L_{\text{оп}}} \tau^2 dl, \quad (4.24)$$

где  $L_{\text{оп}}$  — длина опорной поверхности гусеницы;  
 $l$  — текущая координата по длине опорной поверхности.

Как видно, окончательная упорная реакция, реализуемая гусеничным движителем в контакте с дорожным полотном пути, тесно связана с вертикальным давлением не только через формулу Кулона—Мора, но и через вертикальную деформацию грунта (влияние угла  $\alpha$ ). Решение интеграла 4.24 в общем случае выполняется численными методами, т. к. подинтегральная функция очень сложна.

Для упрощения расчетов и облегчения анализа можно дополнить предположение о треугольной эпюре давления (см. п. 2.3) допущением о том, что текстурный коэффициент не меняет только пиковое значение касательных напряжений под катками, сохраняя характер распределения этих напряжений под катками по закону треугольника. Тогда при условии (4.20) и достаточном буксовании (т. е.  $1 - e^{-250} = 1$ ) можно считать, что пиковое значение касательного напряжения под  $i$ -м катком определяется в соответствии с (4.23)

$$\tau_i = 0,8 \tau_{\text{тр}} e^{-\kappa_1 l_i \delta}, \quad (4.23)$$

где  $l_i$  — расстояние до оси  $i$ -го катка от оси ведущего (м);  
 $\delta$  — коэффициент буксования.

В соответствии с выражениями (4.19), (4.22) и (4.23) получим

$$\tau_i = 0,8 e^{-\kappa_1 l_i \delta} \frac{1}{bt} (F_{\text{бок}} + F_{\text{гор}} + F_{da'} + F_{cd} + F_c).$$

Величинами  $F_{da'}$ ,  $F_{cd}$ ,  $F_c$  можно пренебречь, так как они малы и сумма их практически не зависит от параметров движителя.

Тогда с учетом (4.9) получим:

$$\tau_i = 0,8 e^{-\kappa_1 l_i \delta} \left[ c \left( \frac{2h}{b} + 1 \right) + \frac{2 \arctg \frac{b}{L} \text{tg} \varphi}{\pi} \left( 1 + \frac{h}{b} \right) \right], \quad (4.24)$$

где  $q_i = q_{\text{пик}}^{\kappa_i}$  — пиковое давление под  $i$ -м катком.

Если не пренебрегать указанным выше слагаемым, касательные напряжения  $\tau_i$  запишутся в виде

$$\tau_i = 0,8 e^{-\kappa_1 l_i \delta} [c \cdot A + Bq \text{tg} \varphi],$$

где  $A$  и  $B$  — имеют сложную зависимость от конструктивных параметров гусеницы.

При различных предположениях коэффициенты  $A$  и  $B$  получались различными авторами (Беккер, Джаноззи, Хамото и др.).

Учитывая, что слагаемым  $c \frac{h}{b}$  можно пренебречь в силу его малости, окончательно получим

$$\tau_i = 0,8 e^{-\kappa_1 l_i \delta} \left( 1 + \frac{h}{b} \right) \left( c + q_i \text{tg} \varphi \frac{\arctg \frac{b}{h}}{\frac{\pi}{2}} \right).$$

Выражение  $\frac{\arctg \frac{b}{h}}{\frac{\pi}{2}} \cong 1$ .

Отсюда для упрощенных расчетов достаточную точность дает формула

$$\tau_i = 0,8 e^{-\kappa_1 l_i \delta} \left( 1 + \frac{h}{b} \right) (c + q_i \text{tg} \varphi), \quad (4.27)$$

Сила тяги под гусеницей может быть разделена на две составляющие:

$$P_T = F_{\text{тс}} + F_{\text{тq}},$$

где  $F_{\text{тс}}$ ,  $F_{\text{тq}}$  — силы тяги за счет связности грунта и за счет его фрикционных свойств.

Связность грунта создает реакцию и в межкатковом пространстве, поэтому величина  $F_{\text{тс}}$  определяется:

$$F_{\text{тс}} = 0,8 \left( 1 + \frac{h}{b} \right) b c \Delta L_1 \sum_{i=1}^m e^{-\kappa_1 l_i \delta}, \quad (4.28)$$

где  $\Delta L_1$  — часть опорной поверхности гусеницы, приходящаяся на один каток.

Фрикционные свойства грунта создают реакцию в основном только под катками, поэтому, используя закон треугольника, получаем для величины  $F_{\text{тq}}$

$$F_{\text{тq}} = 0,8 \left( 1 + \frac{h}{b} \right) \frac{b \Delta L}{2} \text{tg} \varphi \sum_{i=1}^m q_i e^{-\kappa_1 l_i \delta}. \quad (4.29)$$

Окончательно для силы тяги получаем применимую в упрощенных расчетах зависимость

$$P_T = 0,8 \left( 1 + \frac{h}{b} \right) \sum_{i=1}^m \left[ c \Delta L_1 b + q_i \frac{b \Delta L}{2} \text{tg} \varphi \right] e^{-\kappa_1 l_i \delta} \quad (4.30)$$

или для плотной компоновки катков, учитывая, что для тинную длину опорной поверхности гусеничного движителя  $L_{оп}$  можно подсчитать по зависимости

$$L_{оп} = L_6 + \Delta L = L_6 + \frac{L_6}{2(m-1)} = L_6 \frac{2m-1}{2(m-1)}$$

Тогда

$$\Delta L_1 = L_6 \frac{2m-1}{2m(m-1)},$$

и силу тяги определяем

$$P_T = 0,8 \left( 1 + \frac{h}{b} \right) \frac{b L_6}{4m(m-1)} \sum_{i=1}^m [2c(2m-1) + q_i m \operatorname{tg} \varphi] e^{-\kappa_1 l_i \delta} \quad (4.35)$$

Для анализа могут быть более удобны другие формулы.

Учитывая, что

$$L_6 \cong m \Delta L_1$$

и при равномерном распределении нагрузок по каткам

$$G_i = \frac{q_i b \Delta L}{2} = \frac{G_1}{m} = \operatorname{const},$$

где  $G_1$  — половина веса машины, получаем

$$F_{Tc} = 0,8 \left( 1 + \frac{h}{b} \right) c \cdot S \frac{\sum_{i=1}^m e^{-\kappa_1 l_i \delta}}{m}, \quad (4.36)$$

где  $S = L_6 \cdot b$  — площадь опорной поверхности гусеницы

$$F_{Tq} = 0,8 \left( 1 + \frac{h}{b} \right) G_1 \operatorname{tg} \varphi \frac{\sum_{i=1}^m e^{-\kappa_1 l_i \delta}}{m}. \quad (4.37)$$

Если ввести коэффициент текстурности  $\psi$ , определяемый зависимостью

$$\psi = \frac{\sum_{i=1}^m e^{-\kappa_1 l_i \delta}}{m}, \quad (4.38)$$

окончательно получим тягу на гусенице

$$P_T = 0,8 \left( 1 + \frac{h}{b} \right) \psi (cS + G_1 \operatorname{tg} \varphi). \quad (4.39)$$

Анализ силы тяги не представляет большого самостоятельного интереса, т. к. при оценке проходимости с точки зрения тягово-сцепных свойств решающую роль играет запас тяги.

#### 4.5. Запас силы тяги

Рассмотрим разность между упорной реакцией грунта, которую может реализовать гусеничный движитель в контакте с полотном пути, и сопротивлением движению, обусловленным деформацией снега. В соответствии с зависимостями (4.30), (3.7) и (3.15) получим для равномерного распределения нагрузок по каткам

$$P_T - P_c = 2 \cdot 0,8 \left( 1 + \frac{h}{b} \right) \left( bc \Delta L_1 + q_i \frac{b \Delta L}{2} \operatorname{tg} \varphi \right) \sum_{i=1}^m e^{-\kappa_1 l_i \delta} - \frac{2 q_{\max}^n b}{n+1} \left( \frac{q_{\max}}{k} \right)^{\frac{1}{n}} - P_{д.св}^{(2)}. \quad (4.36)$$

Для этого случая

$$q_i = q_{\max}^n.$$

Проведем анализ влияния параметров гусеничного движителя на исследуемую разность, которую в дальнейшем будем называть запасом силы тяги. При проведении анализа вспомним выражение (3.15), которое показало, что  $P_{д.св}^{(2)}$  практически не зависит от параметров движителя.

Будем считать, что параметры гусеничного движителя меняются таким образом, что величина пикового давления остается постоянной. Это означает, что при некотором заданном пиковом давлении перед конструктором ставится задача подобрать параметры  $b$  и  $L_6$  (или число катков  $m$ ,  $\Delta L$  и  $\Delta L_1$ ). Так как при неизменном пиковом давлении величина произведения  $b \Delta L$  остается постоянной (3.21), сила тяги может изменяться только за счет множителя  $\sum_{i=1}^m e^{-\kappa_1 l_i \delta}$  и слагаемого  $\frac{h}{b}$ , которое

обычно не превышает 0,1 (т. е. его влияние незначительно).

Рассмотрим влияние множителя  $\sum_{i=1}^m e^{-\kappa_i L_i^{\delta}}$ . При увеличении ширины гусеницы для сохранения пикового давления можно снизить величину  $\Delta L$  (т. е. уменьшить согласно выражению (3.23) радиус катка). Если при этом сохранить плотную компоновку катков, то множитель, а следовательно, и сила тяги увеличатся. Если оставить межкатковое пространство неизменным, сила тяги вообще практически не изменится.

Расчеты показали, что в наихудших условиях движения, когда максимально возможная сила тяги и сопротивление движению являются силами одного порядка, увеличение на 25% ширины гусеницы привело к увеличению силы тяги на 8, а силы сопротивления — на 25% (при условии плотной компоновки катков и неизменном пиковом давлении). Поэтому запас силы тяги уменьшится. При этом даже может наступить потеря проходимости по тягово-цепным качествам.

Следовательно, увеличение ширины гусеницы при постоянном пиковом давлении отрицательно сказывается на запасе силы тяги. Здесь также получается вывод, аналогичный сделанному раньше в п. 3.4: при выбранном максимальном пиковом давлении целесообразно выбирать максимально возможную по условию поворота длину гусеницы и соответствующее ей число катков и их радиус. По условиям допустимого пикового давления рассчитывается ширина гусеницы.

Рассмотрим случай, когда изменение конструктивных параметров гусеницы изменяет пиковое давление на катком. Допустим, что изменяется только длина (за счет числа катков и их радиуса) или ширина гусеничного движителя. В данном случае для анализа удобнее воспользоваться выражением для запаса силы тяги, полученным из зависимостей (4.35) и (3.11) и (3.24),

$$P_r - P_c = 2 \cdot 0,8 \left( 1 + \frac{h}{b} \right) (cL_0 b + G_1 \operatorname{tg} \varphi) \psi - \left. \frac{2}{n+1} \left( \frac{2(m-1)}{m} \right)^{1+\frac{1}{n}} \left( \frac{G}{L_0} \right)^{1+\frac{1}{n}} \left( \frac{1}{b_r} \right)^{\frac{1}{n}} - P_{\text{д.сн.}}^{(2)} \right\} (4.35)$$

Анализ этого выражения показывает, что если есть возможность увеличить активную длину опорной поверхности или ее ширину, т. е. по сути дела снизить пиковое давление, это приведет к увеличению запаса силы тяги. Это увеличение гораздо эффективнее за счет изменения длины, так как сила сопротивления уменьшается больше при увеличении длины, чем ширины (сравнить показатели степени в формуле 4.37). Полученные результаты позволяют в общем виде определить тягово-цепные свойства машины.

**ОЦЕНКА ПРОХОДИМОСТИ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН  
ПО СНЕЖНОМУ ПОКРОВУ  
И ПУТИ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ**

**5.1. Основные предпосылки для оценки  
проходимости снегоходных машин**

Проходимость — это характеристика, относящаяся одновременно к среде (снегу) и к машине, к их взаимному действию. Это характеристика комплексная, она включает в себя ряд факторов, среди которых основными являются: физико-механические свойства полотна пути, конструктивные параметры движителя машины, ее механические характеристики. В данном разделе рассматривается один из аспектов проходимости. Считается, что произошла потеря проходимости, если машина остановилась.

Указанное явление может происходить по различным причинам. Рассмотрим некоторые основные из них.

Если физико-механические свойства снега и параметры машины допускают касание днищем машины по пути, то может произойти потеря проходимости. Данное явление в данных условиях определяется несущей способностью системы движитель — среда.

Такая ситуация обычно называется ограничением проходимости по несущей способности. Часто в качестве условия потери проходимости в данном случае принимают неравенство

$$h_{\text{кол}} \geq K, \quad (5.1)$$

где  $h_{\text{кол}}$  — глубина колеи;  
 $K$  — дорожный просвет машины.

Однако, если снежное полотно пути имеет небольшую плотность, а движитель (гусеница) высокие сцепные свойства, то нарушение условия (4.1) не приведет к потере проходимости, пока выполняется условие

$$P_T > P_C. \quad (5.2)$$

На практике этот случай наблюдается достаточно часто. При этом днище деформирует полотно пути, со-

ответственно увеличивая сопротивление движению, а упорная реакция достаточна для преодоления этого сопротивления. Именно это обстоятельство было нами учтено при выборе условия потери проходимости в 2.4. В этом случае условие проходимости по несущей способности

$$h_{\text{деф}} < K \quad (5.3)$$

обладает запасом.

Потеря проходимости произойдет, если

$$P_T \leq P_C. \quad (5.4)$$

Данное неравенство может возникнуть и в случае, когда условие (5.1) выполняется. Такая ситуация обычно называется ограничением проходимости по тяге (по сцеплению). Это может произойти, когда снегоходная машина работает в режиме тягача. Тогда условие потери проходимости выразится неравенством

$$P_T < P_C + P_{\text{кр}}. \quad (5.5)$$

Использование выражения (5.3) предполагает, что сила тяги, которая может быть реализована в контакте с полотном пути, обеспечивается двигателем, установленным на машине, т. е.

$$P_d = P_T.$$

При нарушении равенства вместо ограничения по тяге (5.5) получим недостаток тяги по двигателю

$$P_d \leq P_C. \quad (5.6)$$

Очевидно, что этот случай характеризует ограничение проходимости по двигателю.

Опыт эксплуатации снегоходных машин показывает, что условие (5.2) практически всегда выполняется, если выдерживается неравенство (5.3). Следовательно, для большинства типов снежного полотна пути проходимость по несущей способности является определяющей.

**5.2. Оценка проходимости  
по несущей способности полотна пути**

Рассматриваемая оценка может быть произведена по зависимости (5.3) с учетом формул.

Анализ типов снежного полотна пути, проведенный в главе 1, позволяет выбрать следующие расчетные ус-

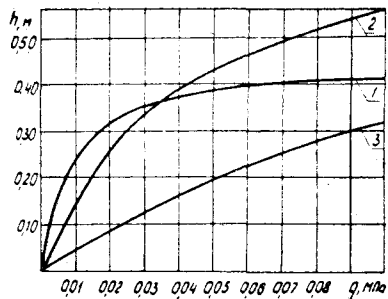


Рис. 5.1. Зависимость деформации снега от величины удельного давления

$$\rho = 0,35 \text{ г/см}^3; \quad \gamma = 0,1 \text{ МПа/м}; \\ c = 0,001 \text{ МПа} \quad (\text{рис. 5.1, кривая 2}).$$

Приведенные характеристики снегов с указанной глубиной залегания встречаются редко, поэтому они приняты граничными, т. е. характеризующими предел проходности.

Для сравнения приведем характеристику снега, типичного для средней полосы европейской части.

3. Фрикционно-вязкой, перекристаллизованный (затвердевший), сухой.

$$\rho = 0,35 \text{ г/см}^3; \quad \gamma = 0,2 \text{ МПа/м}; \quad c = 0,02 \text{ МПа}; \\ \text{tg } \varphi = 0,4 \quad (\text{рис. 5.1, кривая 3}).$$

Графики кривых погружения для снежного полотна этих трех типов, рассчитанных по зависимости (1), приведены на рис. 5.1 для значения ширины гусеницы  $b = 0,3 \text{ м}$ .

По приведенному графику можно получить погружение машины —  $h_{\text{кол}}$ , если известно максимальное пиковое давление  $q^{\text{max}}$ .

Аналогичные графики могут быть построены для различных значений. Величина  $q^{\text{max}}$  может быть определена по формуле:

$$q^{\text{max}} = \frac{2N_{\text{max}}}{b \Delta L};$$

где  $N_{\text{max}} = \frac{G}{2m} \xi$  — максимальная нагрузка на катки

ловия движения, связанные с точки зрения проходности.

1. Фрикционно-вязкой снег, свежий, сухой. Его пиковая характеристика:

$$\rho \cong 0,15 \text{ г/см}^3; \\ \gamma \cong 0,02 \text{ МПа/м}; \\ c \cong 0,0002 \text{ МПа}; \\ \text{tg } \varphi \cong 0,2, \quad H = 0,8 \text{ м} \\ (\text{рис. 5.1, кривая 1}).$$

2. Фрикционно-вязкой, зернистый, сухой, рыхлый. Примерная характеристика:

Величина  $\Delta L$  может быть рассчитана по одной из вышеприведенных формул (2.34) или (2.35). Если использовать зависимость (2.34), то окажется, что при известных значениях  $G$  и  $L_6$  (т. е. параметрах, известных по техническому заданию и ограниченных по конструктивным соображениям) погружение машины зависит только от ширины гусеницы. Таким образом, можно использовать зависимость

$$q^{\text{max}} = \frac{D}{b}, \quad (5.7)$$

где  $D$  — величина, рассчитываемая по конструктивным данным

$$D = \frac{2G \xi (m-1)}{m L_6}. \quad (5.8)$$

Графики зависимости (5.8) приведены на рис. 5.2. Построены они для различных значений  $D = 0,005$ — $0,090 \text{ МПа}$ . На этом же графике сплошными линиями нанесены кривые равных погружений. Эти кривые получены из графиков типа приведенных на рис. 5.1 для различных значений ширины гусеницы  $b$ .

Рассмотрим пример построения кривой, характеризующей погружение на  $0,40 \text{ м}$ .

Из графика рис. 5.1 для ширины гусеницы  $b = 0,30 \text{ м}$  получаем максимальное пиковое давление  $q^{\text{max}} = 0,04 \text{ МПа}$ , которое и вызывает погружение (образование колеи)  $h_{\text{кол}} = 0,40 \text{ м}$ . Аналогично получаем значения для  $q^{\text{max}}$  при  $b = 0,40 \text{ м}$ ,  $b = 0,50 \text{ м}$  и т. д. При этом следует иметь в виду, что для малых погружений ( $h_{\text{кол}} < 0,35 \text{ м}$ ) точки следует

брать с кривой 1, при больших погружениях — с кривой 2.

Соединяя точки, получим кривую равных погружений  $h_{\text{кол}} = 0,40 \text{ м}$  для различных значений ширины гусеницы. Таким же методом получаем остальные кривые. При помощи данных графиков можно решать следующие задачи:

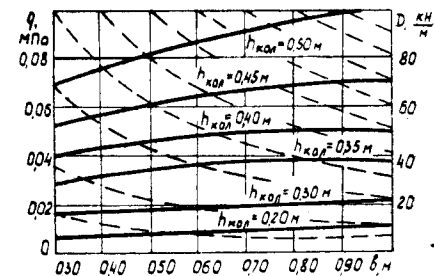


Рис. 5.2. Номограмма определения оценки проходности машины — кривые зависимости  $q(b)$  — кривые равных погружений



1. Оценить проходимость данной машины по снежному полотну пути.

2. Выбрать параметры, обеспечивающие заданную проходимость для проектируемой машины.

Рассмотрим первую задачу. Для оценки проходимости в этом случае необходимы следующие данные:

$M$  — масса машины, кг;

$L_0$  — база машины, м;

$b$  — ширина гусеничного движителя, м;

$k$  — дорожный просвет, м.

Последовательность проведения анализа:

1. Рассчитывается величина  $D$ , например, по формуле (5.8).

2. По пунктирной кривой для расчетного  $D$  при данном значении ширины гусеницы  $b$  получают максимальное пиковое давление  $q^k_{\max}$ .

3. Сплошные кривые равных погружений дают представление о деформации снега движителем данной машины.

4. По неравенству (5.3) проводится оценка проходимости.

В соответствии со сказанным выше были проанализированы данные по большому количеству вездеходов (снегоходных) машин. Большинство из них не отвечает предъявляемым требованиям. Поэтому были дополнительно рассчитаны следующие величины:

$q^k_{\text{доп}}$  — максимально допустимое пиковое давление, которое обеспечивает проходимость по несущей способности при данных параметрах машины по установленному критерию;

$b_{\text{доп}}$  — расчетная ширина гусеницы, требуемая для клиренсу данной машины;

$k_{\text{доп}}$  — требуемый для данной машины клиренс.

Результаты расчета приведены в табл. 5.1. Их анализ позволяет получать следующие выводы.

1. Допускаемые максимальные пиковые давления рассмотренных машин довольно невелики (не превышают 0,06 МПа, что соответствует среднему удельному давлению 0,02 МПа). Исключение составляет «Харьковчанка», у которой высокое давление допускается по критерию. Очевидно, следует ориентироваться на пиковое давление не выше данной цифры.

Оценка некоторых конструктивных параметров снегоходных машин, характеризующих проходимость

Марка машины	Масса, кг	База, $L_0$ , м	Ширина гусеницы, м		Максимальное пиковое давление, $q^k_{\max}$ , МПа	Дорожный просвет, $k$ , м
			действительная	допустимая		
«Snow-Passer» «Nordwell» RN 25/35 «Nordwell» RN 75	2060	2,18	0,91	1,20	0,027	0,31
	3750	2,44	0,84	1,10	0,050	0,34
	4509	—	—	—	—	—
«Flex-Track» 500 «Flex-Track» 675 «Flex-Track» 800 «Bombardier Macker-cerier» M 29C	4900	2,05	1,02	1,32	0,070	0,41
	3410	2,42	0,86	—	0,048	0,43
	4230	2,26	0,91	1,10	0,067	0,40
	8170	3,23	1,02	1,60	0,1	0,41
«Харьковчанка» ГПИ-22 ГТ-С ГПИ-37	2720	2,16	0,71	1,40	0,072	0,43
	2710	2,00	0,51	—	0,054	0,45
	13400	7,50	1,02	—	0,090	0,50
ГТ-С ГПИ-37	3100	3,00	0,44	0,44	0,063	0,60
	4650	3,35	0,36	0,63	0,045	0,45
ГТ-С ГПИ-37	1500	1,985	0,36	0,36	0,077	0,40
					0,042	0,40

2. Уменьшение данного давления за счет ширины гусеницы нецелесообразно. В таблице видно, что требуется 1,5—2-кратное увеличение, что не может быть принято конструктивным решением.

3. У тех машин, давление которых находится в указанных пределах, проходимость ограничена недопустимо малым клиренсом. Данные таблицы показывают, что практически у всех машин обеспечиваются требования проходимости по несущей способности при клиренсе 0,50—0,55 м. Этот вывод можно принять как основное требование при проектировании снегоходных машин.

4. Имеющиеся у нас данные по оценке проходимости исследованных машин совпадают с результатами оценки по таблице.

Рассмотрим задачу выбора параметров движителя снегоходной машины, обеспечивающих заданную проходимость. Выше было показано, что для снегоходной машины наиболее желательным является использование длинной гусеницы. Это требование входит в противоречие с требованием маневренности, которое можно записать в виде

$$L_6 = (1,2 \div 1,8) B, \quad (5)$$

где  $B$  — колея машины.

Исходя из изложенного, можно сразу положить  $L_6 = 1,8B$ . Тогда база машины будет известна, если колея ее установлена. Ограничения на колею назначают обычно из условия габаритных ограничений на перевозку железнодорожным и другими видами транспорта, также регламентами Госавтоинспекции по условиям движения на дорогах. Поэтому будем полагать, что в качестве исходных данных на проектирование получены в машине  $G$  и ее колея, а следовательно, и база  $L_6$ . Если по конструктивным соображениям данную длину базы невозможно реализовать в конструкции, можно принять в дальнейших расчетах приемлемое значение  $L_6$ . Требуется определить ширину гусеничного движителя  $b$ , дорожный просвет  $K$  (клиренс), число катков, их радиус, шаг гусеничной цепи и высоту грунтозацепа, т. е. все остальные параметры. Ниже следует изложение методики расчета. Пример рассматривается для заданных  $M = 3240$  кг, колея  $B = 1,80$  м.

1. Рассчитать длину базы машины по формуле (5.9)

$$L_6 = 1,8 \cdot 1,80 = 3,24 \text{ (м)}, \quad L_a \cong 1,62 \text{ (м)}.$$

2. Определить коэффициент  $D = \frac{G}{L_a}$ .

$$D = \frac{32400}{7,62} \cong 20000 \text{ Па} \cdot \text{М} = 0,020 \text{ МПа} \cdot \text{М}.$$

3. По графикам номограммы на рис. 4.2 выбираются приемлемые сочетания ширины гусеницы  $b$  и клиренса  $K$ . Попутно выясняется максимально допустимое пиковое давление  $q^*_{\text{пик}}$ . Например, в нашем случае возможны сочетания:

$$1) \quad b = 0,40 \text{ м}, \quad q^*_{\text{пик}} = 0,051 \text{ МПа}, \quad K = 0,43 \div 0,45 \text{ (м)};$$

$$2) \quad b = 0,50 \text{ м}, \quad q^*_{\text{пик}} = 0,040 \text{ МПа}, \quad K = 0,38 \div 0,40 \text{ (м)}.$$

4. В первом приближении назначаем радиус катков равным клиренсу 1)  $R_K = 0,45$  м; 2)  $R_K = 0,40$  м.

Тогда на опорной поверхности уместится число катков.

$$m = \left[ \frac{L_6}{2R_K} \right] + 1.$$

где  $\left[ \frac{L_6}{2R_K} \right]$  — целая часть  $\frac{L_6}{2R_K}$ .

$$1) \quad m = \left[ \frac{3,24}{0,90} \right] + 1 = 4;$$

$$2) \quad m = \left[ \frac{3,24}{0,80} \right] + 1 = 5.$$

Если конструктора не устраивает указанный радиус катков, то можно уменьшить его, но при этом следует придерживаться методики, изложенной в разделе 3.4.

### 5.3. Некоторые пути повышения проходимости снегоходных машин

Рассмотренная выше теория взаимодействия гусеничного движителя со снегом, анализ особенностей его работы, оценка влияния параметров гусеничного движителя позволили указать некоторые пути повышения проходимости снегоходных машин.

### 5.3.1. Снижение пиковых давлений и увеличение активной поверхности

Особенности взаимодействия гусеничного движителя со снегом показали, что один из путей повышения проходимости заключается в снижении максимальных пиковых давлений и увеличении активной длины опорной поверхности.

Это в свою очередь может быть достигнуто за счет увеличения обратной жесткости.

Исследования, проведенные на образце машины гусеницей, имеющей повышенную обратную жесткость, показали, что эпюра давления движителя на снег значительно выравнивается, резко снижаются пиковые давления. Из графиков на рис. 5.3 видно, что коэффициент

неравномерности эпюры давления  $\xi_q = \frac{q_{\max}^k}{q_{\text{ср}}} = 1$  что в 3 раза меньше, чем у серийной гусеницы.

Анализ коэффициента использования опорной поверхности  $\alpha_a = \frac{L_a}{L_b}$  показывает, что активная длина опорной поверхности у гусеницы с повышенной обратной жесткостью примерно в 3 раза выше, чем у серийной, работающей тех же условиях.

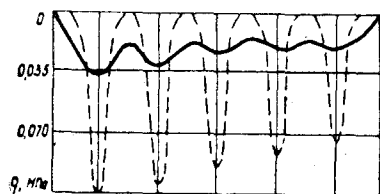


Рис. 5.3. Эпюра распределения вертикальных давлений  
 — — — — — серийная гусеница  
 ————— экспериментальная

Это привело к существенному уменьшению глубины колеи, снижению сопротивления движению, и следовательно, повышению проходимости машины.

### 5.3.2. Использование уширителей гусениц

Одним из перспективных, на наш взгляд, путей повышения проходимости является применение уширителей гусениц. Идея применения уширителей не является новой. Они использовались для повышения проходимости машин по снежной целине. Однако применяемые металлические уширители обладают существенными недостатками.

При работе гусениц с уширителями возникают нежелательные побочные эффекты, связанные с изменением габаритных размеров и условий работы движителя. Уширители, имеющие по целям использования значительный консольный вылет и высокую жесткость, не могут по очевидным причинам обладать достаточной прочностью. Они быстро выходят из строя при наездах на единичные препятствия (валун, пень и т. д.) или на вертикальные боковые препятствия (дерево, стена). В этом случае возможно попадание уширителей на беговую дорожку, что приводит к нежелательным последствиям (спад гусеницы, распор движителя, повреждение бандажей опорных катков и т. д.). В связи с этим возникла идея использования эластичных уширителей, выполненных из резины, армированной кордом. Эластичные элементы должны обеспечить практически такое же уменьшение сопротивления движению и тот же прирост силы тяги, но в отличие от жестких уширителей свободно деформироваться при наездах на указанные выше препятствия.

Для выбора конструктивных параметров необходимо решить задачу об определении деформированного состояния резинового уширителя, провести расчет сопротивления движению и тягово-сцепных качеств.

Составим модель расчета уширителя при наезде его на вертикальное единичное препятствие. Рассмотрим резиновый уширитель гусеницы, имеющий форму призмы с трапециевидальными основаниями. Благодаря тому, что резина обладает низким модулем Юнга, при рабочих нагрузках перемещение крайних точек на свободном конце уширителя будет одного порядка с размерами самого тела. Кроме того, соотношение размеров уширителя не дает права при определении его деформированного состояния воспользоваться такими простейшими моделями упругого тела, как балка или пластина.

Все сказанное заставляет нас в конечном счете решать задачу об определении деформированного состояния резинового уширителя как задачу теории упругости в геометрически и физически нелинейной постановке. Решать такую задачу целесообразнее всего численными методами с применением ЭВМ. В настоящее время наибольшее распространение получили методы физической дискретизации и, в частности, метод конечных элементов (МКЭ).

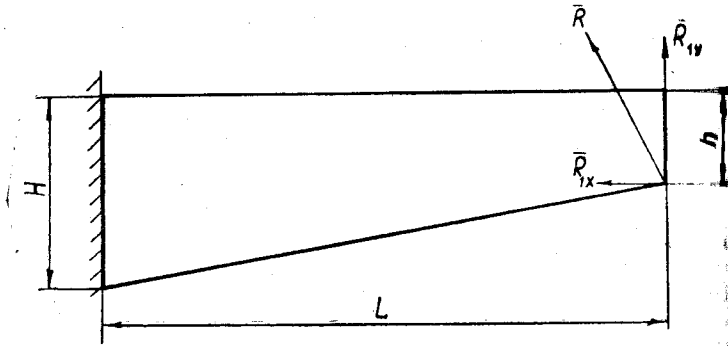


Рис. 5.4. Схема погружения

Известная процедура МКЭ в варианте метода перемещений и положена в основу дальнейших расчетов.

В качестве первого этапа решения задачи рассмотрим простой изгиб уширителя, вызванный сосредоточенной силой (рис. 5.4). Материал уширителя на данном этапе решения задачи будем считать линейно упругим как при малых, так и при больших деформациях. Такой упрощенный предварительный вариант постановки задачи позволит нам путем сопоставления теоретических и экспериментальных результатов апробировать выбранную методику ее решения.

Если не ставить перед собой строгую задачу определения напряженного состояния по всему объему уширителя и пренебречь отдельными эффектами локального характера, то общую картину деформации можно установить с достаточной степенью точности из решения плоской задачи.

Разобьем поле уширителя на  $N$  конечных элементов треугольной формы (рис. 5.5). Напряженно-деформированное состояние каждого конечного элемента определяется шестью обобщенными координатами — линейными перемещениями узловых точек — вектор  $\{q\}$  (рис. 5.6).

$$\{q\} = \{u_1 v_1, u_2 v_2, u_3 v_3\}. \quad (5.10)$$

Для аппроксимации поля перемещений в пределах элемента используются полиномы первой степени относительно текущих координат — матрица  $[F]$ . Компоненты

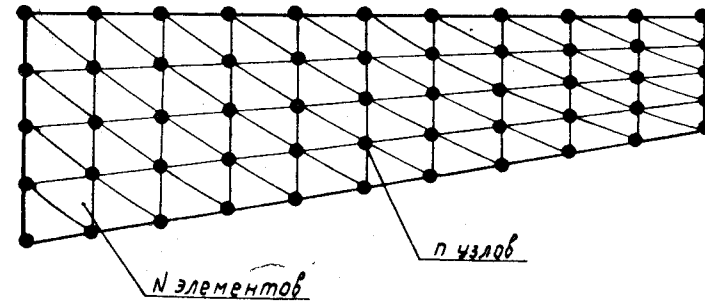


Рис. 5.5. Разбиение уширителя на элементы

напряжений  $\{\sigma\}$  связаны с компонентами деформаций  $\{\varepsilon\}$  обобщенным законом Гука.

$$\{\sigma\} = [\Theta] \{\varepsilon\}, \quad (5.11)$$

где  $[\Theta]$  — матрица физических констант.

После ряда преобразований вектор  $\{\varepsilon\}$  выражается через вектор  $\{q\}$  и матрицу геометрических характеристик конечного элемента  $[\Phi]$ :

$$\{\varepsilon\} = [\partial] \{uv\} = [\Phi] \{q\}, \quad (5.12)$$

где

$$[\Phi] = \frac{1}{S} \begin{bmatrix} -y_{32} & 0 & -y_{13} & 0 & -y_{21} & 0 \\ x_{32} & -y_{32} & x_{13} & -y_{13} & x_{21} & -y_{21} \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

$$S = x_{13} y_{21} - x_{21} y_{13},$$

$$i, j = 1, 2, 3,$$

$$x_{ji} = x_j - x_i,$$

$$y_{ji} = y_j - y_i.$$

Для получения разрешающей системы уравнений относительно узловых перемещений обратимся к известной теореме Лагранжа—Дирихле, согласно которой в положении устойчивого равновесия потенциальная энергия консервативной механиче-

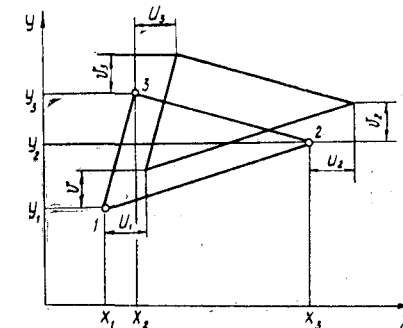


Рис. 5.6. Деформации конечного элемента

ской системы имеет минимальное значение. В нашем случае общая потенциальная энергия системы складывается из двух составляющих

$$E = W + \Pi, \quad (5.14)$$

где  $W$  — потенциальная энергия деформации;  
 $\Pi$  — потенциальная энергия внешних сил.

Потенциальная энергия деформации каждого конечного элемента  $W_N$  определится через его узловые перемещения  $\{q\}_N$  и матрицу жесткости  $[G]_N$

$$W_N = \frac{1}{\alpha} \{q\}_N^T [G]_N \{q\}_N, \quad (5.15)$$

$$[G]_N = t_N A_N [\Phi]_N^T [\Theta] [\Phi]_N, \quad A_N = \frac{S_N}{2}.$$

Потенциальная энергия деформации всего ушрителя складывается из энергий деформации отдельных элементов и окончательно предстанет в виде произведения вектора обобщенных координат системы  $\{Q\}$  и матрицы жесткости всей системы  $[M]$ .

$$W = \frac{1}{2} \{Q\}^T [M] \{Q\}, \quad (5.16)$$

где  $M = \sum_{i=1}^n [G]_N$ ;  $\{Q\} = \{U_1 V_1 \dots U_n V_n\}$ .

Потенциальная энергия внешнего воздействия определяется как работа сил, сосредоточенных в узлах

$$\Pi = -\{Q\}^T \{P\}, \quad (5.17)$$

где  $\{P\} = \{P_{1x} P_{1y} \dots P_{nx} P_{ny}\}$  — вектор внешних сил.

После подстановки (5.16) и (5.17) в (5.14) и минимизации полной энергии по всем обобщенным координатам:

$$\frac{\partial E}{\partial Q_i} = 0, \quad i = 1, 2 \dots n.$$

Задача сводится к решению системы линейных неоднородных алгебраических уравнений относительно узловых перемещений

$$[M] \{Q\} = \{P\}.$$

Из решения этой системы находим конфигурацию ушрителя в деформированном состоянии

$$\{Q\} = [M]^{-1} \{P\}. \quad (5.18)$$

Учет геометрической нелинейности ведется методом поэтапного нагружения конструкции (реализуется так называемая шаговая процедура). Вся нагрузка разбивается на  $\alpha$  частей

$$\{\Delta P\} = \frac{1}{\alpha} \{P\}.$$

Величина  $\{\Delta P\}$  берется достаточно малой, чтобы всякий раз при догружении системы дополнительные перемещения узлов можно было определять из решения линейной задачи. И в то же время на каждом шаге заново переформируется разрешающая система уравнений с целью отразить те изменения, которые произошли в конструкции от всех предшествующих нагружений, иначе — с целью отразить нелинейность задачи в целом. Учет «предыстории» нагружения осуществляется двояким образом.

Во-первых, тем, что для каждого этапа нагружения заново пересчитывается матрица жесткости. Во-вторых, тем, что, начиная со второго шага, дополнительно учитывается работа внутренних усилий, накопившихся в системе от предыдущих нагружений, на перемещениях данного шага.

На первом шаге внешняя нагрузка равна  $\{\Delta P\}$ . Матрица жесткости каждого элемента

$$[G^0]_N = t_N A^0_N [\Phi^0]_N^T [\Theta] [\Phi^0]_N. \quad (5.19)$$

Матрица жесткости всей системы подсчитывается для так называемого «нулевого» деформированного состояния системы

$$[M^0] = \sum_{i=1}^n [G^0]_N.$$

Из системы

$$[M^0] \{\Delta Q^1\} = \{\Delta P\}.$$

Определяется вектор узловых перемещений на первом шаге нагружения —  $\{\Delta Q^1\}$ . Затем пересчитываются координаты узлов в новой конфигурации системы

$$x'_k = x^0_k + \Delta U'_k, \quad y'_k = y^0_k + \Delta V^1_k,$$

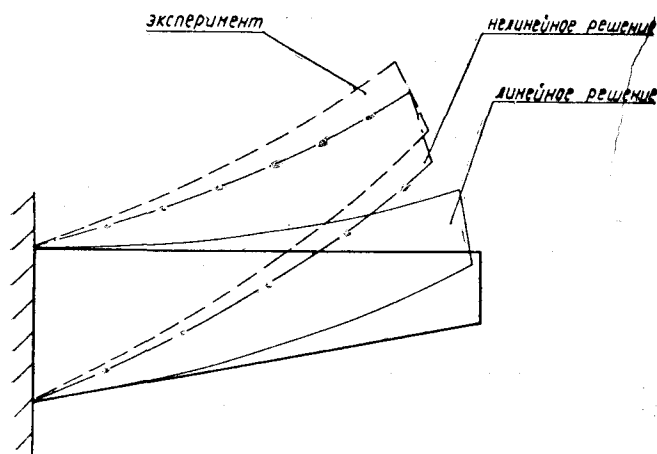


Рис. 5.7. Прогиб уширителя

и уже по ним формируется матрица жесткостей отдельных конечных элементов и вся левая часть  $[M^1]$  разрабатываемой системы уравнений для счета на втором шаге. Аналогичная процедура переформирования левой части повторяется перед каждым новым шагом нагружения.

Начиная со второго шага общая потенциальная энергия разбивается на две части. Первая часть условно обозначается буквой «Н» — «новая», а вторая буквой «С» — «старая».

$$E^{r+1} = W_H^{r+1} + W_C^{r+1} + \Pi_H^{r+1} + \Pi_C^{r+1}; \quad r=1, \dots, (\alpha-1) \quad (5.20)$$

Потенциальная энергия внутренних сил, непосредственно появляющихся на данном  $r+1$  шаге нагружения:

$$W_H^{r+1} = \frac{1}{2} \{\Delta Q^{r+1}\}^T [M^r] \{\Delta Q^{r+1}\}, \quad (5.21)$$

$$[M^r] = \Sigma [G^r]_M; \quad [G^r] = t_N A^r_N [\Phi^r]_N [\Theta] [\Phi^r]_N.$$

Потенциальная энергия внешних сил, непосредственно появляющихся на данном  $r+1$  шаге нагружения:

$$\Pi_H^{r+1} = -\{\Delta Q^{r+1}\} \{P\}. \quad (5.22)$$

Потенциальная энергия внутренних усилий, накопившихся в системе от всех предыдущих  $r$  шагов нагружения:

$$W_C^{r+1} = \{\Delta Q^{r+1}\}^T \{R^r\}, \quad (5.23)$$

где  $\{R^r\} = \sum_{i=1}^N \{R^r\}_N;$

$$\{R^r\}_N = t_n A^2_n [\Phi^r]_N^T [\Theta] (\Sigma [\Phi^{n-1}]_N \{\Delta q^n\}_N).$$

Потенциальная энергия внешнего воздействия от всех предыдущих  $r$  шагов нагружения

$$\Pi_C^{r+1} = -\{\Delta Q^{r+1}\}^T r \{P\}. \quad (5.24)$$

Подставляя (5.21—5.24) в (5.20) и минимизируя общую потенциальную энергию на данном шаге, определяем дополнительные перемещения из системы уравнений

$$[M^{r-1}] \{\Delta Q^2\} = (r-1) \{\Delta P\} - \{P^{r-1}\} + \{P\}. \quad (5.25)$$

Полный вектор узловых перемещений  $\{Q\}$  от всей нагрузки  $\{P\}$  определится как сумма узловых перемещений, найденных на каждом шаге нагружения

$$\{Q\} = \sum_{r=1}^{\alpha} \{\Delta Q^r\}. \quad (5.26)$$

Описанная выше модель была реализована численными методами на ЭВМ. Проведенное сравнение расчетной модели и эксперимента показало хорошую сходимость результатов (рис. 5.7).

Изложенная методика расчета позволяет провести оптимизацию размеров уширителя исходя из требований, с одной стороны, сохранения устойчивости работы гусеницы в обводе при наезде на единичное препятствие, с другой стороны, увеличение несущей способности гусеницы.

Рассмотрим возможность повышения проходимости за счет применения уширителей на примере гусеничной машины массой 12,5 т.

Результаты расчетов, проведенные для снега с  $\rho = 0,25$  г/см<sup>3</sup> и характеристиками, указанными в 5.2, показали, что машина с серийной гусеницей при движении по данной снежной целине теряет проходимость по несущей способности.

Машина с эластичными уширителями должна сохранять подвижность: ее максимальное пиковое давление равно 0,078 МПа и в соответствии с номограммой ее погружение меньше клиренса.

Экспериментальные исследования, проведенные на снежной целине с  $H$  80—90 см, показали, что применение эластичных уширителей существенно повышает проходимость.

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАШИНЫ  
С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

**6.1. Математическая модель машины**

При движении по снежному полотну пути снеговая машина как динамическая система испытывает возмущение, которым является снежный покров, выраженный как вектор—функция времени. Переход к функции времени  $t$  от функции расстояния в  $l$  осуществляется в общем случае по зависимости

$$l = vt,$$

где в целях сохранения стационарности  $V$  (скорость движения машины) считается постоянной. Если расчетная модель учитывает изменение скорости при движении по трассе движения, следует учитывать возникающую из-за этой нестационарности выходных процессов.

Снегоходная машина является динамической системой с обратной связью, т. к. в результате ее воздействия на возмущение оно изменяется (возникает колея). Предполагается, что динамическая система состоит из двух подсистем: движителя и подвески.

Динамическая подсистема движителя, описанная в главе 2, предполагает постоянство микропрофиля опорной поверхности движителя, т. е. не учитывает изменение перекоса опорной поверхности. Она полностью включается в модель, используемую здесь. Следует лишь учесть, что величины  $P_{gj}$ ,  $T_{11}$ ,  $T_{2n}$ ,  $\alpha_{11}$ , принятые в главе 2 постоянными, здесь являются функциями времени, рассчитываемыми в подсистеме подвески.

В описываемой ниже подсистеме контакт катка движителем считается точечным, т. е. все распределенные нагрузки сводятся к сосредоточенным.

Дифференциальные уравнения движения гусеничной машины получим из уравнений Лагранжа II рода с определенными множителями

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = \sum_{r=1}^l \lambda_r \cdot \frac{\partial f_r}{\partial \dot{q}_i} + R_i, \quad (6.1)$$

где  $T$  и  $\Pi$  — кинетическая и потенциальная энергия системы;

$\Phi$  — энергия рассеяния;

$q_i$  — обобщенная координата;

$f_r$  — уравнение кинематической связи;

$\lambda_r$  — неопределенный множитель Лагранжа;

$R_i$  — обобщенная сила, действующая по обобщенной координате.

Для описания движения используются три системы координат: неподвижная  $XOZ$  ( $\Sigma$  инерциальная),  $X_1O_1Z_1$  ( $\Sigma_1$ ) движется поступательно вместе с центром масс машины,  $X_2O_2Z_2$  ( $\Sigma_2$ ) совершает аффинное движение относительно системы  $X_1O_1Z_1$ . Матрица перехода

$$\text{от } \Sigma_2 \text{ к } \Sigma_1 A = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix},$$

$$\text{а от } \Sigma_1 \text{ к } \Sigma_2 A^{-1}; A^{-t} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}.$$

Центр масс задается вектором  $\bar{r}_c$  (рис. 6.1). В качестве обобщенных координат принимаем: координаты центра масс  $X_c$  и  $Z_c$ , угол поворота корпуса  $\varphi$ , углы поворота  $\psi_1$  и  $\psi_2$  ведущего и направляющего колес,  $\xi_j$  и  $\varphi_j$  — углы отклонения и поворота  $j$ -го балансира и катка (рис. 6.1).

В системе принято  $5+2 \cdot m$  обобщенных координат, где  $m$  — число катков по борту, причем при движении катков без отрыва от полотна пути и при условии идеальности связи только 5 из них независимы.

Введение системы координат  $\Sigma_1$  и  $\Sigma_2$  необходимо ввиду следующего:  $\Sigma_1$  позволяет применить теорему Кенига для определения кинетической энергии системы,  $\Sigma_2$  позволяет получить кинетическую энергию тел в отнесенном движении к  $\Sigma_1$ .

Согласно теореме Кенига о движении системы тел, кинетическая энергия в рассматриваемой модели состоит из следующих слагаемых: энергии движения масс  $M$ , энергии вращения конуса с главным центральным мо-

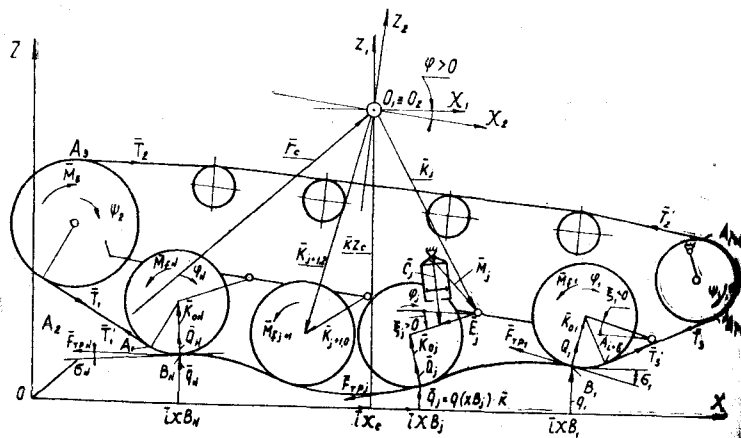


Рис. 6.1. Схема расчета

ментом инерции  $J_0$ , направляющего и ведущего колес с приведенными моментами инерции  $J_{п1}$  и  $J_{п2}$ , энергии поступательного и вращательного движения  $j$ -го катка и балансира с массами  $m_{кj}$  и  $m_{бj}$  и моментами инерции  $I_{кj}$  и  $I_{бj}$  (относительно оси вращения).

Таким образом, кинетическая энергия в плоском движении

$$T = T_c + T_v + T_{ок} + T_{об},$$

где  $T_c$  — энергия движения центра масс;  $T_v$  — энергия вращательного движения корпуса, приведенных масс направляющего и ведущего колес, катков и балансиров;  $T_{ок}$  и  $T_{об}$  — кинетическая энергия в относительном движении масс катков и балансиров.

Потенциальная энергия системы

$$П = П_т + П_л + П_с,$$

где  $П_т$ ,  $П_л$ ,  $П_с$  — потенциальные энергии тел системы в поле тяготения, упругой деформации растяжения гусеничной ленты и элементов подвески.

При условии идеальности связи (движение катка по ленте происходит без проскальзывания) для центра  $j$ -го

катка можно записать векторное уравнение неголономной кинематической связи

$$\dot{\vec{r}}_{c_j} - [\dot{\varphi}_j \times \vec{K}_{0j}] = 0.$$

В проекциях на координатные оси получаем

$$\lambda_{xj} \cdot |\dot{x}_c + x_2 K_j \cdot \sin \varphi \cdot \dot{\varphi} + z_2 K_j \cdot \cos \varphi \cdot \dot{\varphi} + b_j \cdot \sin \xi_j \cdot \dot{\xi}_j - \dot{\varphi}_j r_j \cdot a_j = 0, \quad (6.2)$$

$$\lambda_{zj} \cdot |\dot{z}_c - x_2 K_j \cdot \cos \varphi \cdot \dot{\varphi} - z_2 K_j \cdot \sin \varphi \cdot \dot{\varphi} - b_j \cdot \cos \xi_j \cdot \dot{\xi}_j - \dot{\varphi}_j r_j \cdot q_{po}(x B_j) \cdot a_j = 0, \quad (6.3)$$

где

$$a_j = \frac{1}{\sqrt{1 + (q_{po}(x B_j))^2}};$$

$x B_j$  — координата точки взаимодействия  $j$ -го катка с полотном пути;

$q_{po}(x) = \frac{dq_p(x)}{dx}$  — производная от функции микропро-

филя;

$\lambda_{xj}$  и  $\lambda_{zj}$  — неопределенные множители Лагранжа (горизонтальная и вертикальная проекции реакции грунта  $\lambda_j$  на каток).

$$\lambda_j = \sqrt{\lambda_{xj}^2 + \lambda_{zj}^2}.$$

Для определения  $x B_j$  записывается дополнительное алгебраическое уравнение

$$x_c + x_2 K_j \cdot \cos \varphi + z_2 K_j \cdot \sin \varphi - b_j \cdot \cos \xi_j - x B_j - r_j \cdot q_{po}(x B_j) \cdot a_j = 0, \quad (6.4)$$

где  $x_2 K_j$  и  $z_2 K_j$  — проекции вектора  $\vec{K}_j$  в системе координат  $\Sigma_2$ ;

$b_j$  — длина  $j$ -го балансира.

Множители  $\lambda_{xj}$  и  $\lambda_{zj}$  выражаются через нормальную  $Q_j$  и касательную  $F_{тpj}$  реакции полотна пути, при этом

$$\lambda_{xj} = -Q_j \cdot \sin \sigma_j - F_{тpj} \cdot \cos \sigma_j, \quad (6.5)$$

$$\lambda_{zj} = Q_j \cdot \cos \sigma_j - F_{тpj} \cdot \sin \sigma_j, \quad (6.6)$$

$$\sigma_j = \arctg q_{po}(x B_j).$$



Из (6.5) и (6.6) при условии, что  $F_{\text{тр}j} = Q_j \cdot f_{\text{тр}}$ , получаем

$$Q_j = \sqrt{\frac{\lambda_{xj}^2 + \lambda_{zj}^2}{1 + f_{\text{тр}}^2}} = \frac{\lambda_j}{\sqrt{1 + f_{\text{тр}}^2}} = \lambda_j \cdot b. \quad (6.7)$$

Обобщенные силы в системе присутствуют в виде момента сопротивления качению на  $j$ -м катке

$$M_{fj} = Q_j \cdot f_{\kappa j} = \frac{\lambda_j}{\sqrt{1 + f_{\text{тр}}^2}} f_{\kappa j},$$

где  $f_{\kappa j}$  — коэффициент трения качения катка по сенице;  
 $f_{\text{тр}}$  — коэффициент трения скольжения катка гусенице; момента на ведущем колесе и силы сопротивления воздуха  $F_{\text{в}} = \kappa \cdot \dot{x}^2$ .

Дифференцируя кинетическую и потенциальную энергии, энергию рассеяния, уравнения связей, учитывая обобщенные силы и обозначая растягивающие усилия в ветвях:

$T_{11}$  — передняя наклонная ветвь;

$T_2$  — верхняя ветвь;

$T_{2n}$  — задняя наклонная,

получим следующие уравнения

1. По координате  $x_c$

$$M \cdot \ddot{x}_c + \kappa \cdot \dot{x}_c^2 = \sum_{j=1}^{2m} \lambda_{xj}. \quad (6.8)$$

2. По координате  $z_c$

$$M \cdot \ddot{z}_c + M \cdot q = \sum_{j=1}^{2m} \lambda_{zj}. \quad (6.9)$$

3. По координате  $\varphi$

$$I_a \cdot \ddot{\varphi} + \sum_{j=1}^{2m} [m_{1j} \cdot K_j^2 \cdot \ddot{\varphi} + m_{2j} \cdot K_j \cdot b_j (\ddot{\xi}_j \cdot \sin(\varphi + \xi_j + A_{\kappa j})) + \ddot{\xi}_j^2 \cdot \cos(\varphi + \xi_j + A_{\kappa j}) - m_{1j} \cdot g \cdot (x_2 K_j \cdot \cos \varphi + z_2 K_j \cdot \sin \varphi) - C_{\xi j} \cdot (\xi_{j0} - \varphi - \xi_j)] + 2 \cdot \lambda_{1\varphi} \cdot T_{2n} + 2 \cdot \lambda_{3\varphi} \cdot T_{11} + \sum_{j=1}^{2m} \mu_{ij} \cdot P_j^2 \cdot (\varphi + \xi_j) = \sum_{j=1}^{2m} [\lambda_{xj} \cdot (z_2 K_j \cdot \cos \varphi - x_2 K_j \cdot \sin \varphi) - \lambda_{zj} \cdot (x_2 K_j \cdot \cos \varphi + z_2 K_j \cdot \sin \varphi)], \quad (6.10)$$

$$A_{\kappa j} = \arctg \frac{x_2 K_j}{z_2 K_j}, \quad (6.11)$$

где  $C_{\xi j}$  — угловая жесткость торсиона;  
 $m_{1j}, m_{2j}$  — приведенные массы катка и балансира для координаты  $\varphi$ ;

$\lambda_{1\varphi}, \lambda_{3\varphi}$  — коэффициенты, характеризующие силовое взаимодействие задней и передней наклонных ветвей с корпусом;

$\mu_{ij}$  — коэффициент затухания для  $j$ -го катка.

$$P_j = \frac{M_j \cdot E_j \cdot \sin(\varphi + \xi_j - \nu_{0j})}{\sqrt{M_j^2 + E_j^2 - 2 \cdot M_j \cdot E_j \cdot \cos(\varphi + \xi_j - \nu_{0j})}}; \quad (6.12)$$

$$\nu_{0j} = \arctg \frac{z_2 M_j}{x_2 M_j}; \quad (6.13)$$

4. По координате  $\psi_1$

$$I_{n1} \cdot \ddot{\psi}_1 = M_b + (T_{2n} - T_2) \cdot R, \quad (6.14)$$

где  $R$  — радиус ведущего колеса;

5. По координате  $\psi_2$

$$I_{n2} \cdot \ddot{\psi}_2 = (T_2 - T_{11}) \cdot \rho, \quad (6.15)$$

где  $\rho$  — радиус направляющего колеса;

6. По координате  $\varphi_1$

$$I_{\kappa 1} \cdot \ddot{\varphi}_1 = (T_{11} - T_{21}) \cdot r_2 - (\lambda_{x1} + \lambda_{z1} \cdot q_{p0}(x B_1)) \cdot r_1 \cdot a_1 - \lambda_1 \cdot b \cdot f_{\kappa 1}, \quad (6.16)$$

где  $r_1$  — радиус первого катка;

7. По координате  $\varphi_j$

$$I_{\kappa j} \cdot \ddot{\varphi}_j = (\lambda_{xj} + \lambda_{zj} \cdot q_{p0}(x B_j)) \cdot (-r_j) \cdot a_j - \lambda_j \cdot b \cdot f_{\kappa j} + (T_{1j} - T_{2j}) \cdot r_j; \quad (6.17)$$

8. По координате  $\varphi_m$

$$I_{\kappa m} \cdot \ddot{\varphi}_m = (T_{1m} - T_{2m}) \cdot r_m - (\lambda_{xm} + \lambda_{zm} \cdot q_{p0}(x B_m)) \cdot r_m \cdot a_m - \lambda_m \cdot b \cdot f_{\kappa m}; \quad (6.18)$$

9. По координате  $\xi_1$

$$m_{31} \cdot b_1^2 \cdot \ddot{\xi}_1 + m_{21} \cdot K_1 \cdot b_1 \cdot (\ddot{\varphi} \cdot \sin(\varphi + \xi_1 + A_{\kappa 1}) + \ddot{\varphi}^2 \cdot \cos(\varphi + \xi_1 + A_{\kappa 1})) - m_{21} \cdot g \cdot b_1 \cdot \cos \xi_1 -$$

$$-C_{\xi_1} \cdot (\xi_{10} - \varphi - \xi_1) + \lambda_{3\xi_1} \cdot T_{11} + \mu_{i1} \cdot P_1^2 \cdot (\varphi + \xi_1) = \\ = (\lambda_{x1} \cdot \sin \xi_1 - \lambda_{z1} \cdot \cos \xi_1) \cdot b_1, \quad (6.10)$$

где  $m_{31}, m_{21}$  — приведенные массы катка и балансира для координаты  $\xi_1$ ;

10. По координате  $\xi_j$

$$m_{3j} \cdot b_j^2 \cdot \ddot{\xi}_j + m_{2j} \cdot K_j \cdot b_j \cdot [\ddot{\varphi} \cdot \sin(\varphi + \xi_j + A_{kj}) + \\ + \varphi^2 \cdot \cos(\varphi + \xi_j + A_{kj})] - m_{2j} \cdot g \cdot b_j \cdot \cos \xi_j - \\ - C_{\xi_j} \cdot (\xi_{j0} - \varphi - \xi_j) + \mu_{ij} \cdot P_j \cdot (\varphi + \xi_j) = \\ = (\lambda_{xj} \cdot \sin \xi_j - \lambda_{zj} \cdot \cos \xi_j) \cdot b_j, \quad (6.20)$$

где  $m_{3j}, m_{2j}$  — приведенные массы катка и балансира для координаты  $\xi_j$ ;

11. По координате  $\xi_m$

$$m_{3m} \cdot b_m \cdot \ddot{\xi}_m + m_{2m} \cdot K_m \cdot b_m \cdot [\ddot{\varphi} \cdot \sin(\varphi + \xi_m + A_{km}) + \\ + \varphi^2 \cdot \cos(\varphi + \xi_m + A_{km})] - m_{2m} \cdot g \cdot b_m \cdot \cos \xi_m - \\ - C_{\xi_m} \cdot (\xi_{m0} - \varphi - \xi_m) + \mu_{im} \cdot P_m^2 \cdot (\varphi + \xi_m) + \\ + \lambda_{1\xi_m} \cdot T_{2n} = (\lambda_{xm} \cdot \sin \xi_m - \lambda_{zm} \cdot \cos \xi_m) \cdot b_m. \quad (6.21)$$

Таким образом, получено  $5 + 2 \cdot m$  дифференциальных уравнений второго порядка,  $2 \cdot m$  — дифференциальных уравнений связей первого порядка и  $m$  — алгебраических уравнений.

Для решения всех систем разработана программа, которая была реализована на ЕС-1045.

## 6.2. Динамическая эпюра давления

Величина  $\lambda_{zj}$ , получаемая в решении системы 6.1, есть не что иное, как  $P_{dj}$  в главе 2. В силу случайности микропрофиля полотна пути и глубины снежного покрова эта величина также является случайной. Отсюда как следствие вытекает случайность эпюры давления под опорной поверхностью гусеничного движителя, возникающей при движении снегоходной машины. Поэтому следует ввести понятие об эпюре давления как случайной функции двух переменных  $l$  и  $t$ , т. е. случайном поле. Математическим ожиданием этой функции является, очевидно, квазистатическая эпюра давления, которая получается

при движении с малой скоростью по относительно ровной поверхности с тем же приложенным моментом на звездочке.

Величина среднеквадратического отклонения эпюры давления может быть рассчитана только численными методами.

Для оценки рассеяния эпюры давления отметим, что для снегоходной машины, имеющей 5 катков, с межкатковым расстоянием 1 м и с центром тяжести над средним катком, при движении по участку с корреляционной функцией

$$R_0(l) = R_q(0) e^{-0,08l} \cos 0,24 l.$$

среднеквадратичное отклонение динамической составляющей силы давления первого катка на грунт  $\sigma_F$  может быть подсчитано по приближенной зависимости

$$\sigma_F = 1,7 C_1 \sigma_q.$$

Если принять жесткость подвески первого катка  $C_1$  равной 50 кН/м, а среднеквадратичное отклонение ординат микропрофиля  $\sigma_q = 3$  см, тогда  $\sigma_F = 2,55$  кН. Если статическая нагрузка равна 5 кН, то вероятность того, что нагрузка на первом катке в полтора раза выше статической, равна приблизительно 0,15, если воспользоваться «правилом трех сигм» и считать, что распределение  $P_{dj}$  подчиняется нормальному закону. С вероятностью 0,95 эта сила изменяется в интервале

$$P_{d1} = 0 \div 10 \text{ кН,}$$

т. е. может в два раза превышать статическую.

Следует отметить, что при интенсивных колебаниях корпуса снегоходной машины вид эпюры давления существенно меняется не только количественно, но и качественно.

Если преобладающими являются вертикальные колебания, то эпюра, сохраняя в целом свою форму, может менять лишь количественную оценку. Угловые колебания существенно меняют форму эпюры.

При этом максимальное пиковое давление может переместиться с одного катка на другой. Часто это оказываются крайние катки. Указанная закономерность образования эпюры давления привносит свои особенности в формирование сопротивления, тяги и образование колеи.

Отсюда следует вывод: сила сопротивления, затрачиваемая на деформацию грунта; сила тяги, которая может реализовать гусеничный движитель в контакте со снежным полотном пути; величина деформации снежного покрова являются случайными функциями. Поэтому оценка проходимости снегоходной машины должна быть построена на вероятностной основе.

Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение этих явлений представляют собой новое перспективное направление в теории снегоходных машин.

## ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РОТОРНО-ВИНТОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

### 7.1. Глубина погружения движителя

В отличие от гусеничного движителя, для которого увеличение глубины погружения ведет к повышению сопротивления движению, у роторно-винтового такой однозначности нет, так как с увеличением глубины увеличивается опорная поверхность контакта базового цилиндра и упорная поверхность винтовой лопасти.

При определении погружения приняты следующие допущения:

— нагрузка на движитель равномерно распределена по его длине;

— нормальная реакция грунта воспринимается только базовым цилиндром движителя без учета винтовой лопасти;

— для каждой элементарной площади контактной поверхности базового цилиндра существует определенная закономерность ее воздействия на снег, зависящая от глубины погружения; для точки, максимально погруженной в снег, выражение «нагрузка-осадка» имеет вид

$$q_{\max} = \kappa_1 h^n p_{\max};$$

— распределение удельного давления по контактной поверхности происходит:

1) при  $H > 3r$  и  $h_p > 0,5r$  по косинусоидальной зависимости

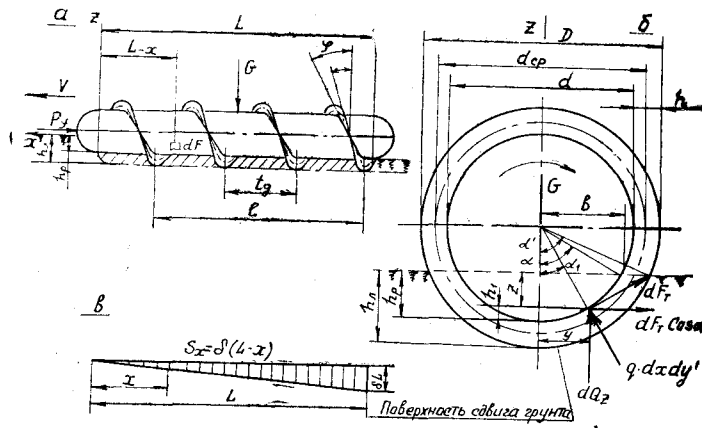
$$q = q_{\max} \cos \alpha_1, \quad \text{см стр } 40$$

2) при  $H \leq 3r$  и  $h_p \leq 0,5r$  по зависимости

$$q = \kappa z^n.$$

Вертикальная нагрузка  $G_p$  уравнивается нормальной реакцией  $Q_z$ , которая является суммой элементарных реакций грунта по площади контакта базового цилиндра.

*H - глубина снега стр 34*



7.1. Взаимодействие РВД со снегом

Выделим элемент поверхности (см. рис. 7.1) с координатами  $\alpha_1, x$  и площадью

$$dF = \frac{d}{2} d\alpha_1 dx,$$

удельное давление на котором равно  $q$ .

Проекция на ось  $z$  реакции грунта, действующей на элементарную площадку, равна

$$dQ_z = q dF \cos \alpha_1 = \frac{d}{2} q \cos \alpha_1 d\alpha_1 dx.$$

Расчетное условие 1.

Учитывая, что погружение базового цилиндра

$$h_p = \frac{d}{2} (1 - \cos \alpha),$$

нормальная реакция грунта будет

$$dQ_z = \kappa_1 \left(\frac{d}{2}\right)^{n+1} (1 - \cos \alpha)^n \cos^2 \alpha_1 d\alpha_1 dx.$$

Так как система находится в равновесии, то  $dQ_z = dG_p$ .

Тогда

$$G_p = \kappa_1 \left(\frac{d}{2}\right)^{n+1} (1 - \cos \alpha)^n \int_0^L \int_{-\alpha}^{+\alpha} \cos^2 \alpha_1 d\alpha_1 dx.$$

Проинтегрировав, получим

$$G_p = 2L\kappa_1 \left(\frac{d}{2}\right)^{n+1} (1 - \cos \alpha)^n \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\alpha\right). \quad (7.1)$$

Из рис. 7.1 видно, что

$$\sin \alpha = \frac{2\sqrt{d h_p - h_p^2}}{d};$$

$$\cos \alpha = 1 - \frac{2h_p}{d}.$$

После подстановки этих значений в (7.1) и преобразований получим

$$h_p^4 - \frac{1}{2} \kappa_1 L^2 r^6 \alpha^2 h_p^{n+2} - 3r^2 h_p^2 + 4G_p^2 \kappa_1 L r^5 \alpha h_p^n + 2r^3 h_p - 4G_p^2 r^4 = 0. \quad 7.2$$

Полученное выражение решается относительно  $h_p$  численными методами после подстановки параметров грунта  $\kappa_1$  и  $h$  значений  $G_p$  и  $r = \frac{d}{2}$ .

По расчетному условию угол  $\alpha \cong \frac{\pi}{2}$ . Поэтому после упрощения уравнения (7.2) значение глубины будет:

$$h_p = \frac{d}{2} \left(1 - \cos \frac{2^{n+1} G_p}{\kappa_1 d^{n+1} L}\right).$$

Расчетное условие 2.

Глубина погружения движителя будет равна

$$h_p = \left[ \frac{5 G_p}{\kappa L d^{0.5} (10 - 4.3n - n^2)} \right]^{\frac{2}{2n+3}}.$$

## 7.2. Сопротивление движению РВД

На движущийся по опорной поверхности винтовой ротор действуют две группы сил сопротивления движению. Силы, возникающие вследствие деформации среды движителем (затраты на образование колеи), и силы сопротивления трению поверхности ротора о грунт, т. е.

$$P_f = P_{II} + F_T,$$

где  $P_n$  — сила сопротивления вертикальной деформации грунта, которая определяется конструктивным исполнением и формой передней части движителя;

$F_T$  — сила сопротивления трению на контактируемой поверхности базового цилиндра.

**Определение сопротивления трению.** Силы трения на контактируемой поверхности базового цилиндра движителя определяются нормальной нагрузкой, а силы трения на винтовой лопасти — как нормальной, так и осевой нагрузками на ротор. На снегу величиной сил трения на винтовой лопасти можно пренебречь.

При движении на каждом элементе поверхности контакта базового цилиндра со снегом возникает сила трения, величина и направление которой изменяются в зависимости от положения элементарной площадки. Примечательно, что сила трения на элементе контактной поверхности пропорциональна величине давления и направлена противоположно вектору абсолютной скорости центра элементарной площадки.

Систему сил трения, действующих по всей контактной поверхности, можно привести к главному вектору  $F_T$  и главному моменту  $M_T$ .

Главный вектор будет:

$$F'_{Tp} = 2 \mu_{Tp} \int_{y=0}^{y=b} \int_{x=0}^{x=L} q dx dy.$$

В правую часть уравнения входит величина нормальной реакции грунта —  $Q_z$ , поэтому можно записать:

$$F'_T = \mu_{Tp} Q_z.$$

Величина главного момента сил трения относительно оси ротора определится следующим образом:

$$M_T = \mu_{Tp} d \cos \varphi \int_0^L \int_0^{Sp/2} q dx dy'.$$

Для движителей с большим диаметром базового цилиндра можно с малой погрешностью заменить выражение  $q dx dy'$  его проекцией на плоскость XOY, равной  $q dx dy$ . Отсюда

$$M_T = \mu_{Tp} d \cos \varphi \int_{y=0}^{y=b} \int_{x=0}^{x=L} q dx dy$$

или

$$M_T = \frac{\mu_{Tp} d}{2} Q \cos \varphi.$$

Рассматривая систему движитель — снег как винтовую пару, действие трения по контактной поверхности базового цилиндра движителя можно заменить эквивалентным в энергетическом отношении действием некоторой осевой силы сопротивления  $F_{Tx}$  [9].

После ряда преобразований окончательно получим

$$F_{Tx} = \mu_{Tp} Q_z \frac{\mu_{Tp} (a_n^2 - 1) \sin \varphi \cos \varphi + a_n}{a_n (a_n \mu_{Tp} \cos \varphi + \sin \varphi)}$$

**Сопротивление передней части роторно-винтового движителя.** Одной из основных составляющих общего сопротивления движению роторно-винтовой машины на снегу является сила, идущая на формирование колеи или деформацию сжатия грунта движителем. Превалирующее значение в образовании колеи имеет деформация грунта передней частью движителя. В известных работах взаимодействие передней части движителя со средой не рассматривалось, за исключением [9], в которой сопротивление передней части определялось с помощью полуэмпирических зависимостей при движении в жидкотекучих средах.

Величина сил сопротивления в значительной мере зависит от конструктивного исполнения носовой части движителя, формы которой могут быть весьма разнообразными: конусные и сферические вращающиеся головки, лыжеобразные кронштейны с различной кривизной поверхности, сочетание активных головок и кронштейнов.

Если установлены только кронштейны, изготовленные заодно с опорами, то в идеальном случае для каждого типа грунта наклон (или кривизна, или угол атаки) поверхности кронштейна должен быть вполне определенным, выбираемый из условий наименьшего бульдозерного сопротивления. Для движения по снежному покрову углы наклона и радиусы скругления можно выбирать в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [17] для гусеничных машин высокой проходимости.

Наиболее часто передняя часть движителя выполняется в виде конусной или полусферической вращающейся головки.

Рассмотрим взаимодействие конусной передней части роторно-винтового движителя с грунтом.

Каноническое уравнение части поверхности конуса, контактирующей со снегом, имеет вид

$$\frac{x^2}{c^2} = \frac{y^2}{d^2} + \frac{z^2}{d^2}; \quad x = \frac{c}{d} \sqrt{y^2 + z^2}.$$

Обозначим

$$\frac{dx}{dy} = p; \quad \frac{dx}{dz} = \rho;$$

$$P = \frac{c^2}{d^2} \cdot \frac{y}{x}; \quad \rho = \frac{c^2}{d^2} \cdot \frac{z}{x}.$$

Направляющие косинусы нормали к поверхности конуса определяются:

$$\cos(n; x) = \frac{1}{\sqrt{1+p^2+\rho^2}};$$

$$\cos(n; y) = \frac{p}{\sqrt{1+p^2+\rho^2}};$$

$$\cos(n; z) = \frac{\rho}{\sqrt{1+p^2+\rho^2}}.$$

На основании экспериментальных исследований [13] примем зависимость, описывающую взаимодействие РВД со снегом, в виде

$$q_n = \kappa \cdot z^n \cos(n; z),$$

где  $q_n$  — нормальное давление на поверхности ротора;

$\kappa, n$  — экспериментальные коэффициенты, характеризующие состояние грунта.

Отсюда проекция на ось  $x$  нормального давления на поверхность конуса

$$dP_x = q_n \cdot dF \cos(n; x) = \kappa \cdot z^n dF \cos(n; x) \cos(n; z),$$

где  $dF$  — площадь элементарной площадки на поверхности конуса, которая определяется

$$dF = \sqrt{1+p^2+\rho^2} dx dy.$$

Определим

$$\sqrt{1+p^2+\rho^2} = \frac{\sqrt{d^2+c^2}}{d}.$$

Тогда

$$\cos(n; z) = \frac{c^2}{d \sqrt{d^2+c^2}} \cdot \frac{z}{x},$$

$$\cos(n; x) = \frac{d}{\sqrt{d^2+c^2}}.$$

Следовательно, сила сопротивления движению от деформации снега конусной передней частью движителя будет равна

$$dP_x = \frac{\kappa r^{n+1} c^2}{x(d+c^2)} dF.$$

В полярных координатах имеем:

$$x = \frac{r \cdot c}{d}; \quad y = r \cos \alpha; \quad z = r \sin \alpha;$$

$$dx dy = r dr d\alpha,$$

где  $dr$  и  $d\alpha$  — текущие координаты.

Так как

$$dF = \sqrt{1+p^2+\rho^2} dx dy = \frac{r \sqrt{d^2+c^2}}{d} dr \cdot d\alpha,$$

получим

$$dP_x = \frac{\kappa \cdot c \cdot r^{n+1} \sin^{n+1} \alpha}{\sqrt{d^2+c^2}} dr d\alpha.$$

Проинтегрируем данное выражение по поверхности конуса

$$P_x = \frac{\kappa c}{\sqrt{d^2+c^2}} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \sin^{n+1} \alpha d\alpha \int_{\frac{R-hp}{\cos \alpha}}^R r^{n+1} dr =$$

$$= \frac{\kappa c}{(n+2) \sqrt{d^2+c^2}} \left[ R^{n+2} \int_{-\alpha_0}^{+\alpha_0} \sin^{n+1} \alpha d\alpha - \right.$$

$$\left. - (R-hp) \int_{-\alpha_0}^{+\alpha_0} \operatorname{tg}^{n+2} \alpha d\alpha \right].$$

Полученный интеграл не выражается в элементарных функциях, поэтому разложим подинтегральное выражение в ряд по степеням  $(\alpha - \frac{\pi}{4})$ , учитывая при этом члены не выше второй степени. Так как  $\alpha$  не превышает  $\frac{\pi}{2}$ , то при разложении можно использовать ряд Тейлора.

После интегрирования и преобразований получим:

$$P_x = \frac{0,7^{n+1} \kappa c}{(n+2) \sqrt{d^2 + c^2}} \left\{ R^{n+2} [2 + \alpha_0^2 (n+1)] + \frac{(R - h_p) \alpha_0}{0,7^{n+3}} [0,5 + \alpha_0 (n+2)] \right\}.$$

Угол  $\alpha_0$  определяется через глубину погружения движителя в грунт и радиус ротора

$$\alpha_0 = \arccos \frac{R - h_p}{R}.$$

Зная характеристики грунта ( $k$  и  $h$ ), а также геометрические параметры движителя, можно определить силу сопротивления от деформации грунта конусной передней частью ротора.

Определим силу сопротивления движению, возникающую при деформации грунта сферической передней частью движителя (см. рис. 7.2).

Уравнение сферы имеет вид

$$x^2 + y^2 + z^2 = \frac{d^2}{4}.$$

Проекция нормального давления на ось  $x$  будет

$$dP_x = \kappa \cdot z^n \frac{y}{r} \cdot dx \cdot dy.$$

В полярных координатах

$$x = r \cdot \sin \alpha; \quad y = r \cdot \cos \alpha; \quad z = \sqrt{\frac{d^2}{4} - r^2};$$

$$dx \cdot dy = r \cdot dr \cdot d\alpha.$$

Тогда

$$dP_x = \kappa \left( \frac{d^2}{4} - r^2 \right)^{0,5n} \cdot \frac{2r^2}{d} \sin \alpha \cdot dr \cdot d\alpha.$$

Откуда

$$P_x = \frac{2\kappa}{d} \int_0^{r_1} \left( \frac{d^2}{4} - r^2 \right)^{0,5n} \cdot r^2 \cdot dr \int_0^\pi \sin \alpha \cdot d\alpha,$$

где

$$r_1^2 = x^2 + y^2 = h_p (d - h_p).$$

Проинтегрировав по  $\alpha$ , получим

$$P_x = \frac{2\kappa}{d} \int_0^{r_1} \left( \frac{d^2}{4} - r^2 \right)^{0,5n} r^2 \cdot dr.$$

После разложения в ряд и интегрирования будем иметь

$$P_x = \frac{\kappa \cdot d^{n-1}}{4} \cdot h_p^{\frac{3}{2}} (d - h_p)^{3/2}.$$

Взаимодействие передней части движителя, выполненного в виде активной вращающейся головки, кроме указанного сопротивления, сопровождается затратами на захватывание частиц грунта и сдвига их в боковом направлении. При движении роторно-винтовых машин по снегу целесообразно повысить эффект от бокового сдвига грунта, что при больших погружениях значительно уменьшит бульдозерное сопротивление от деформации снега и сопротивление от трения базового цилиндра о верхний слой снега.

При удалении верхнего слоя грунта возникают следующие силы сопротивления:

- сила сопротивления от трения срезанного объема снега по основному массиву;
- сила сопротивления от среза снега лопатками;
- сила сопротивления от выброса частиц снега из колеи.

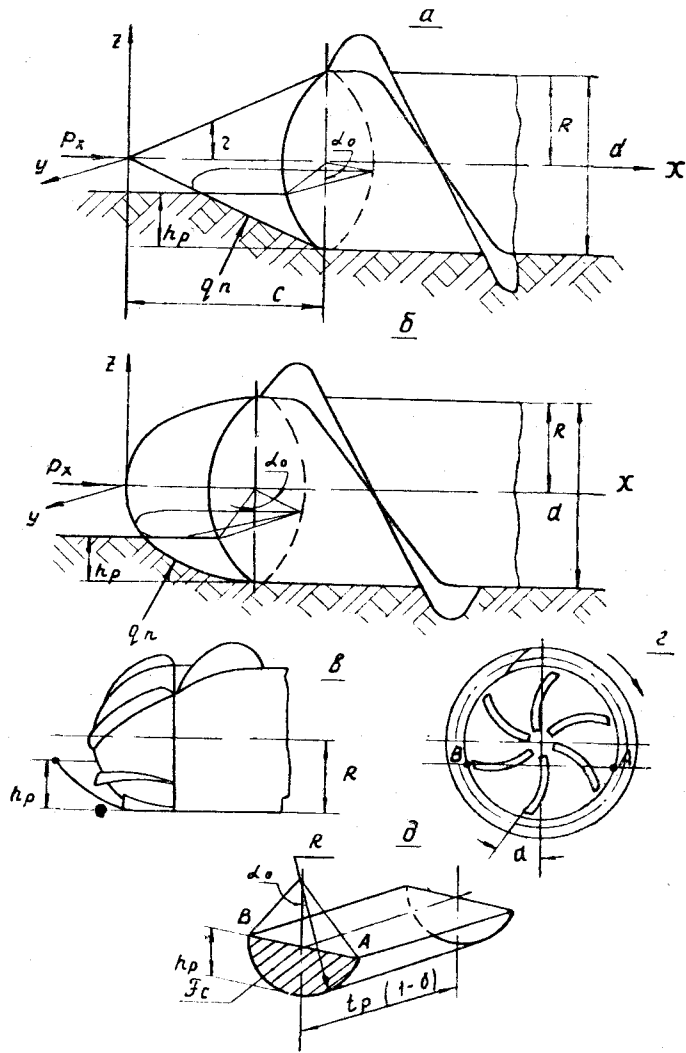
Наибольший вес снега на каждой лопатке будет в момент нахождения лопатки в точке В дуги АВ (см. рис. 7.2).

$$Q_{\max} = V_{\max} \cdot \gamma_r,$$

где  $V_{\max}$  — объем снега на лопатке в точке В;  
 $\gamma_r$  — удельный вес снега.

Наибольшая величина объема снега определяется

$$V_{\max} = \frac{V_H}{m \cdot n_{\text{л}}},$$



7.2. Взаимодействие передней части РВД со снегом

где  $V_n$  — объем снега, который вынимается за один оборот ротора.

$$m = \frac{\omega_p}{\omega_r},$$

где  $\omega_p$  — частота вращения ротора;  
 $\omega_r$  — частота вращения головки;  
 $n_{л}$  — количество лопаток.

Тогда

$$V_n = F_c \cdot t_p (1 - \delta),$$

где  $F_c$  — площадь сектора с дугой АВ и хордой АВ.

$$F_c = \frac{R^2}{2} (2\alpha_0 - \sin 2\alpha_0) t_p (1 - \delta),$$

где  $t_p$  — шаг винтовой лопасти ротора;  
 $\delta$  — коэффициент буксования.

Отсюда

$$V_{\max} = \frac{R^2}{2m n_{л}} (2\alpha_0 - \sin 2\alpha_0) t_p (1 - \delta).$$

Средний вес снега на лопатках равен

$$Q_{\text{ср}} = \frac{R^2 \cdot \gamma_r}{4m n_{л}} (2\alpha_0 - \sin 2\alpha_0) t_p (1 - \delta).$$

Поскольку лопатки расположены равномерно по поверхности головки ротора, примем силу нормального давления  $N = Q \cdot \cos \varphi$ , зависящую от положения лопатки в зоне контакта, равной

$$N = \frac{Q_{\text{ср}}}{2}.$$

Тогда сила сопротивления, возникающая при трении срезанного объема снега по основному массиву для лопаток, находящихся в контакте со снегом за время одного оборота ротора, примет вид

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{т.г.}} \cdot N \cdot n_{\text{к}},$$

где  $f_{\text{т.г.}}$  — коэффициент трения снега о грунт;  
 $n_{\text{к}}$  — число лопаток, находящихся в контакте со снегом.

$$n_{\text{к}} = \frac{n_{\text{л}} \cdot \alpha_0}{\pi}.$$

Отсюда сила сопротивления трения



$$F_{\text{тр}} = \frac{f_{\text{т.г.}} \cdot \gamma_{\text{г}} \cdot R^2 t_p (1-\delta) (2\alpha_0 - S 2\alpha_0)}{8\pi \cdot m}$$

Для определения силы сопротивления, возникающей при срезании снега лопатками, воспользуемся формулой А. Н. Зеленина

$$P_{\text{рез}} = \kappa_{\text{рез}} \cdot b \cdot h^\mu,$$

где  $P_{\text{рез}}$  — сила сопротивления резанию одной лопатки за один оборот головки;  
 $\kappa_{\text{рез}}$  — коэффициент сопротивления резанию;  
 $\mu$  — коэффициент, зависящий от физико-механических свойств снега;  
 $b$  — длина лопатки по винтовой линии.

$$b_{\text{л}} = \frac{L_{\text{в}} \cdot \alpha_0 \cdot l}{\pi},$$

где  $L_{\text{в}}$  — длина винтовой лопасти на одном шаге ротора.

$$L_{\text{в}} = \sqrt{(2\pi R)^2 + t_p^2};$$

$$l = \frac{R}{t_p}.$$

Тогда

$$b_{\text{л}} = \frac{\sqrt{(2\pi R)^2 + t_p^2} \cdot \alpha_0 \cdot R}{\pi \cdot t_p}.$$

Высота лопасти  $h$  обычно выбирается в пределах 0,3—0,4  $R$ .

Отсюда сила резания равна

$$P_{\text{рез}} = \kappa_{\text{рез}} \cdot \frac{\sqrt{(2\pi R)^2 + t_p^2} \cdot \alpha_0 \cdot R}{\pi \cdot t_p} \cdot (0,35 R)^\mu.$$

Учитывая, что в контакте со снегом находятся  $n_{\text{л}} = \frac{n_{\text{л}} \cdot \alpha_0}{\pi}$  лопаток и что частота вращения головки в  $m$  раз больше частоты вращения ротора, то за один оборот ротора сила резания будет

$$P_{\text{рез}} = \frac{\kappa_{\text{рез}} \sqrt{(2\pi R)^2 + t_p^2} \cdot \alpha_0^2 \cdot R^{\mu+1} \cdot n_{\text{л}} \cdot m \cdot 0,35^\mu}{\pi^2}$$

Величину  $\kappa_{\text{рез}}$  можно определить по рекомендации [14].

$$\kappa_{\text{рез}} = \frac{0,7 \rho^2 \sqrt{1-|t|}}{(0,5 t_c)^{0,4}},$$

где  $\rho$  — плотность снега;  
 $|t|$  — абсолютное значение температуры, °С;  
 $0,5 t_c$  — средняя толщина стружки.

При определении силы, расходуемой на отбрасывание снега, будем исходить из того, что нет необходимости отбрасывать его далеко, достаточно убрать из колеи,

$$F_{\text{л}} = m_{\text{с}} \cdot a_{\text{в}},$$

где  $F_{\text{л}}$  — сила сопротивления на одной лопатке;  
 $m_{\text{с}}$  — средняя масса снега на лопатке;  
 $a_{\text{в}}$  — ускорение массы снега в точке В.

$$m_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{ср}}}{g} = \frac{\gamma \cdot R^2 t_p (1-\delta) (2\alpha_0 - \sin 2\alpha_0)}{4m \cdot n_{\text{л}} \cdot g};$$

$$a_{\text{в}} = \frac{v_{\text{в}} - v_{\text{а}}}{t},$$

где  $v_{\text{в}}$  — скорость массы снега в точке В;  
 $v_{\text{а}}$  — скорость массы снега в точке А;  
 $t$  — время разгона массы снега на дуге АВ.

$$t = \frac{2\alpha_0}{\omega_{\text{г}}}; \quad v_{\text{в}} = \omega_{\text{г}} \cdot R.$$

Отсюда

$$a_{\text{в}} = R \cdot \frac{\omega_{\text{г}}^2}{2\alpha_0}.$$

Сила сопротивления на лопатке за один оборот головки

$$F_{\text{л1}} = \frac{\gamma R^3 \omega_{\text{г}}^2 t_p (1-\delta) (2\alpha_0 - \sin 2\alpha_0)}{8m \cdot n_{\text{л}} \cdot g \cdot \alpha_0}.$$

Сила сопротивления, расходуемая на отбрасывание снега, равна

$$F_{\text{л}} = \frac{\gamma \cdot R^3 \cdot m \cdot \omega_{\text{г}}^2 t_p (1-\delta) (2\alpha_0 - \sin 2\alpha_0)}{8n_{\text{л}} \cdot g \cdot \alpha_0}$$

Таким образом, суммарная сила сопротивления удалению верхнего слоя снега имеет вид

$$P_{\text{у}} = F_{\text{тр}} + P_{\text{рез}} + F_{\text{л}}.$$

Эффект от удаления верхнего слоя, подсчитанный по приведенным выражениям, дает снижение сопротивления движению на 15—20%, что позволяет повысить скорость движения и уменьшить затраты мощности. В дальнейшем эта идея была реализована и разработано устройство, представляющее переднюю активную головку с лопатками, изменяющимися по высоте и расположенными по винтовой линии, совпадающей по шагу с винтовой лопастью базового цилиндра ротора. Скорость вращения активной головки может бесступенчато изменяться и быть значительно больше скорости вращения базового цилиндра.

### 7.3. Тяговое усилие роторно-винтового движителя

Под силой сцепления роторно-винтового движителя с полотном пути понимается сила сопротивления сдвигу части грунта, находящейся в контакте с винтовой лопастью.

Примем допущения: винтовая лопасть представляет собой плоскую спиральную поверхность, навитую на базовый цилиндр ротора под углом  $\varphi$ ; глубина погружения постоянна по его длине; сдвиг снега лопастью происходит по цилиндрической поверхности; винтовой ротор работает подобно винту, нагруженному силой веса и осевой силой в гайке.

Реакция на витках винтовой лопасти, находящихся в контакте со снегом, может быть получена суммированием касательных напряжений по поверхности сдвига.

Реакция снега на витке винтовой лопасти равна

$$d P_{\max} = d P_{\text{в max}} \left( 1 - e^{-\frac{j}{\kappa_2}} \right),$$

где  $P_{\text{в max}}$  — максимальная реакция на виток, при которой происходит разрушение снега.

$$d P_{\text{в max}} = (c + q \operatorname{tg} \rho) F_s,$$

где  $F_s$  — поверхность сдвига снега, равная

$$d F_s = \frac{D}{2} t_p d \alpha_1,$$

где  $t_p$  — шаг винтовой лопасти.

Величина деформации  $j$  какой-либо точки зависит от положения точки на поверхности сдвига, так как поверхность при движении ротора перемещается непрерывно и включает участки снега с различной степенью деформации.

После ряда несложных преобразований величина реакции на витке запишется в виде

$$d P_{\text{в}} = (c + q \operatorname{tg} \rho) \frac{D}{2} t_p \left( 1 - e^{-\frac{\delta(L-x)}{\kappa_2}} \right) d \alpha_1, \quad (7.4)$$

где  $\delta$  — коэффициент буксования.

Расчетный случай 1.

$$q = \kappa_1 h_p^n \cos \alpha; \quad h_p > 0,5 r;$$

$$P_{\text{в}} = \int_{-\alpha_1}^{+\alpha_1} (c + \kappa_1 h_p^n \cos \alpha \operatorname{tg} \rho) \frac{D}{2} t_p \left( 1 - e^{-\frac{\delta(L-x)}{\kappa_2}} \right) d \alpha_1.$$

Проинтегрировав, получим

$$P_{\text{в i}} = \frac{D}{2} t_p (c 2\alpha_1 + \kappa_1 h_p^n \operatorname{tg} \rho 2 \sin \alpha_1) \left( 1 - e^{-\frac{\delta(L-x)}{\kappa_2}} \right).$$

$$\alpha_1 = \arccos \frac{\frac{D}{2} - h_p}{\frac{D}{2}},$$

где  $h_p$  — глубина погружения ротора;  
 $h$  — высота винтовой лопасти.

Расчетный случай 2.

$$q = \kappa \cdot z^n; \quad h_p \leq 0,5 r;$$

$$z = h_p - \frac{d}{2} (1 - \cos \alpha_1);$$

$$q = \kappa \left[ h_p - \frac{d}{2} (1 - \cos \alpha_1) \right]^n$$

Подставив значение  $q$  в выражение (7.4), получим

$$d p_{\text{в}} = \left\{ \left[ c + \kappa \left( h_p - \frac{d}{2} + \frac{d}{2} \cos \alpha_1 \right)^n \right] \operatorname{tg} \rho \right\} \times \\ \times \frac{D}{2} t_p \left( 1 - e^{-\frac{\delta(L-x)}{\kappa_2}} \right) d \alpha_1.$$

Откуда

$$P_{\text{в}} = \int_{-\alpha^1}^{+\alpha^1} d p_{\text{в}} d \alpha_1.$$

Полученное уравнение можно решить, разложив выражение  $f(\alpha_1) = \left[ h_p - \frac{D}{2} (1 - \cos \alpha_1) \right]^n$  в ряд Маклорена, так как  $\alpha^1$  не превышает  $90^\circ$ , тогда

$$f(\alpha_1) \approx \frac{h p^{n-1}}{4} (4 h p - d n) \alpha_1^2.$$

После интегрирования имеем

$$P_{\text{вз } i} = \frac{D}{2} t_p \left[ c 2 \alpha^1 + \frac{\kappa h p^{n-1}}{12} (4 h p - d n) 2 (\alpha^1)^3 \operatorname{tg} \rho \right] \times \\ \times \left( 1 - e^{-\frac{\delta(L-x)}{\kappa_2}} \right);$$

$$x_1 = t_p; \quad x_2 = 2 t_p \dots \text{ и т. д.}$$

Суммируя реакции на витках, получим силу сцепления винтового ротора

$$P_{\text{с1}} = \sum_{i=1}^{L/t_p} P_{\text{в1 } i};$$

$$P_{\text{с2}} = \sum_{i=1}^{L/t_p} P_{\text{в2 } i}.$$

Осевая составляющая силы сцепления витка со снегом (тяговое усилие) будет равна

$$P_{\text{с1,2}} = \sum_{i=1}^{L/t_p} P_{\text{в1,2 } i} \cdot \cos(\varphi_{\text{ср}} + \rho_{\text{тр}}),$$

$$\text{где } \varphi_{\text{ср}} = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{a_n};$$

$$\rho_{\text{тр}} = \operatorname{arctg} f_{\text{тр}}; \quad a_n = 1 + \frac{h}{d}$$

#### 7.4. Движение роторно-винтовых машин по льду

С наступлением зимнего периода много труда и времени у ремонтно-эксплуатационных предприятий занимают ледокольные работы по обеспечению безопасного отстоя и более раннего пуска в эксплуатацию речных и морских судов, драг, земснарядов, плавучих электростанций и других механизмов, работающих в водных бассейнах, а также работы по защите гидротехнических сооружений, при прокладке трубопроводов и кабелей связи через реки в зимнее время, при подледном лове рыбы.

Наибольшее применение получили методы разработки льда ледорезными машинами фрезерным способом.

Специфические особенности эксплуатации показали, что использование для этих целей обычных машин на колесном и гусеничном движителях ограничено их возможностями. Для эффективного осуществления процесса резания льда движитель ледофрезерных машин должен удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Обладать высокими тяговыми качествами, позволяя рабочему органу осуществлять силовой режим резания — наиболее рациональный с точки зрения энергоемкости процесса.

2. Иметь достаточно хорошее сцепление с заснеженной поверхностью льда, обеспечивая необходимую устойчивость прямолинейного движения в рабочем режиме.

3. Способствовать повышению надежности и безопасности эксплуатации в условиях, когда велика вероятность пролома льда и попадания машины в полынью.

4. Обеспечить не только плавучесть, но и иметь также достаточно высокие самоходные качества на воде и решать полностью вопросы самостоятельного выхода машины из полыньи на лед.

Анализ эксплуатации различных типов движителей показал, что в наибольшей степени выдвинутым требованиям может удовлетворить роторно-винтовой движи-

тель, который, совмещая в себе свойства гидравлического и сухопутного движителя, является в этом смысле универсальным типом движителя.

### 7.5. Тягово-цепные качества машин с РВД на льду

Процессы взаимодействия роторно-винтового движителя со льдом практически не рассматривались, причем даже в последних работах, посвященных исследованию ледорезных машин.

Движение роторно-винтовой машины по льду в значительной степени отличается от движения по перечисленным выше слабым грунтам.

При движении машины с РВД по льду винтовая лопасть выполняет не только тягово-цепные функции, но и является опорным элементом, несущим весь вес машины. Поэтому деформация льда лопастью происходит как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении одновременно. Экспериментальные исследования процессов деформации льда показали [14], что применение зависимости Кулона—Мора для их описания практически неприемлемо, так как деформация льда в зоне контакта с лопастью заключается в его смятии и последующем сколе, а не сдвиге с трением по поверхности. Для описания горизонтальных деформаций льда в зоне контакта винтовой лопасти можно использовать эмпирическую зависимость известного вида

$$\tau = \kappa \cdot x^m, \quad (7.5)$$

где  $\tau$  — давление на винтовой лопасти;  
 $\kappa, m$  — экспериментальные коэффициенты, характеризующие свойства льда при сдвиге (сколе);  
 $x$  — величина деформации льда в горизонтальном направлении.

Взаимодействие лопасти со льдом в вертикальном направлении можно описать зависимостью того же вида

$$q_z = \kappa_1 \cdot z^n. \quad (7.6)$$

Хотя вид зависимостей (7.5) и (7.6) одинаков, но так как характер процессов, протекающих при сдвиге

(сколе) и прессовании различен, отличаются и экспериментальные коэффициенты  $k$  и  $k_1, m$  и  $n$ .

Определим один из важнейших показателей тягово-цепных качеств машины — глубину погружения винтовой лопасти.

Выделим на поверхности лопасти элемент с координатами  $x, y, z$ , нормальное давление на котором равно  $q_n$  (рис. 7.3).

При решении поставленной задачи допустим, что глубина погружения движителя в лед не превышает высоты лопасти, т. е. внедряется в лед только винтовая лопасть ротора (в действительности так это и происходит).

Для упрощения задачи винтовую лопасть трансформируем в круговую.

В соответствии с принятыми допущениями представим поверхность лопасти, контактирующей со льдом в виде части поверхности кругового конуса (рис. 7.3).

Проекция на ось  $z$  нормального давления на лопасть со стороны льда равна

$$dQ_z = q_n \cdot dF \cos(n; z) = \kappa_1 z^n dF \cos(n; z),$$

где  $dF$  — площадь элементарной площадки на поверхности лопасти, определяемая выражением

$$dF = \sqrt{1 + p^2 + \rho^2} dy dz.$$

Определим

$$\sqrt{1 + p^2 + \rho^2} = \frac{\sqrt{R^2 + c^2}}{R},$$

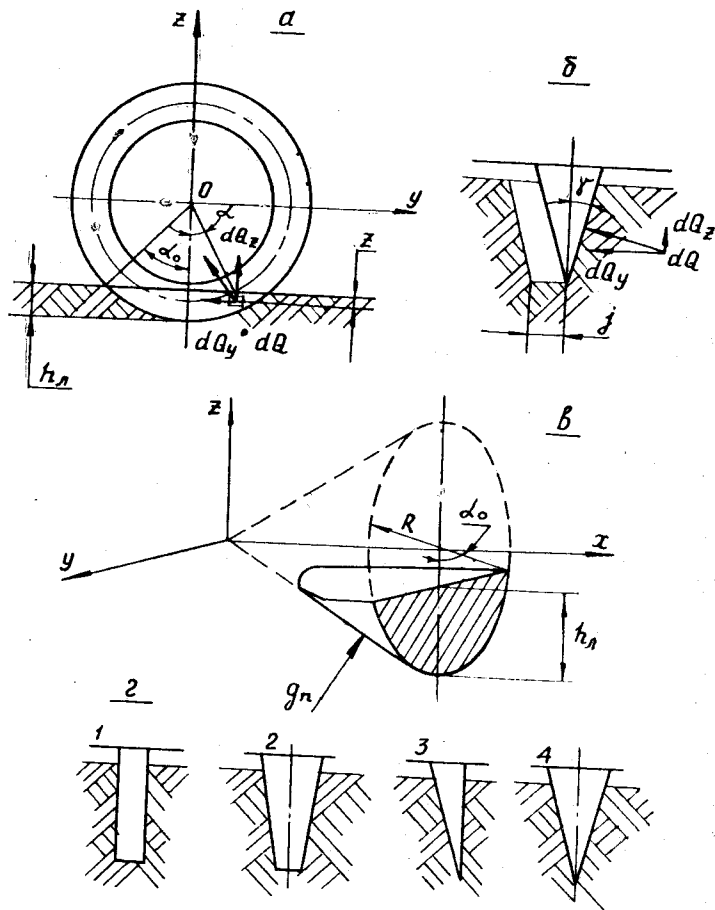
откуда получим

$$\cos(n; z) = \frac{h^2_{\pi}}{R \sqrt{R^2 + c^2}} \cdot \frac{z}{x};$$

$$\cos(n; x) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + c^2}}.$$

Проекция нормального давления на ось  $z$

$$dQ_z = \frac{\kappa_1 \cdot c^2 \cdot z^{n+1}}{R^2 \cdot x} dy \cdot dz.$$



7.3. Взаимодействие РВД со льдом

Перейдем к полярным координатам и проинтегрируем полученное выражение по заштрихованной поверхности (рис. 7.3)

$$Q_z = \int_{-\alpha_0}^{+\alpha_0} \int_{\frac{R-h_n}{\cos \alpha}}^R \kappa_1 \cos \gamma R^{n+1} \cos \alpha^{n+1} \cdot dR \cdot d\alpha.$$

После интегрирования получим

$$Q_z = \frac{\kappa_1 \cdot \cos \gamma}{n+1} [R^{n+2} \int_0^{\alpha_0} \cos^{n+1} \alpha \cdot d\alpha - (R-h_n)^{n+2} \ln(\alpha_0 + \operatorname{tg} \alpha_0)].$$

Так как полученное уравнение не выражается через элементарные функции, разложим подынтегральное выражение в ряд, учитывая при этом члены не выше второй степени. Можно использовать ряд Тейлора, так как

$$\text{угол } \alpha_0 \leq \frac{\pi}{2}.$$

После разложения в ряд, интегрирования и некоторых преобразований получим

$$Q_z = \frac{\kappa_1 \cdot \cos \gamma}{6(n+2)} \{ [6 - \alpha_0^2(n+1)] R^{n+2} \alpha_0 - 6 \ln(\operatorname{Sc} \alpha_0 + \operatorname{tg} \alpha_0) (R-h_n)^{n+2} \}.$$

Вертикальная реакция со стороны льда на лопасть уравнивает вес машины, поэтому

$$G_p = \frac{2}{\sin \varphi} \sum_1^{L/t_p} Q_z,$$

где  $G_p$  — вес, приходящийся на один винтовой ротор;

$L$  — длина ротора;

$t_p$  — шаг винтовой лопасти;

$\varphi$  — угол подъема винтовой лопасти.

Отсюда при известных характеристиках льда, параметрах движителя можно определить глубину погружения лопасти в лед  $h$ .

Определим сцепления движителя со льдом.

При движении машины реакции со стороны льда на лопасть действуют только на одну (упорную) сторону лопасти (со второго контактирующего витка), а значит, и глубина погружения движителя в движении несколько больше, чем в статике. Однако для треугольной формы лопасти (см. рис. 7.3) вертикальная составляющая силы сцепления уменьшает глубину погружения РВД в лед.

Спроектируем на ось  $x$  силу нормального давления (рис. 7.3) на лопасть со стороны льда

$$dQ_x = qx \cdot dF \cos(x; n) = \kappa \cdot x_1^m dy \cdot dz,$$

где  $x_1 = x + j$ .

Отсюда в полярных координатах

$$dQ_x = \kappa (j + R \cos \alpha)^{m+1} \cdot \cos^m \gamma \cdot dR \cdot d\alpha.$$

После разложения в ряд, интегрирования и некоторых преобразований получим

$$Q_x = \frac{2\kappa \cos^m \gamma}{(m+2)} \left[ (j+R-h_{л})^{m+2} \ln(S c \alpha_0 + \operatorname{tg} \alpha_0) - (j+R)^{m+1} \alpha_0 \left( j+R + \frac{\alpha_0^2}{6} (R+m+j+2) \right) \right]^1.$$

Сила сцепления машины на РВД со льдом определяется из выражения

$$P_{сц} = 2 \sum_1^{L/t_p} Q_x = \sum_1^{L/t_p} \frac{4\kappa \cdot \cos^m \gamma}{(m+2)} \left[ (\delta x_1 + R - h_{л})^{m+2} \times \ln(S c \alpha_0 + \operatorname{tg} \alpha_0) - (\delta x_1 + R)^{m+1} \alpha_0 \times \left( \delta x_1 + R + \frac{\alpha_0^2}{6} (R+m+\delta x_1+2) \right) \right],$$

где  $x_1$  — координата, определяющая положение лопасти по длине ротора, т. е.  $x_1 = t_p$ ,  
 $x_i$  ...  $x_2 = 2t_p$  и т. д.

Профиль винтовой лопасти в нормальном сечении может иметь различные конфигурации (рис. 7.3).

С точки зрения минимального усилия внедрения лопасти в лед предпочтительны сечения 1 или 3. Эти лопасти легко входят в лед, но в то же время такому сечению лопасти трудно обеспечить прочность, что немаловажно, так как при зацеплении за случайные препятствия происходит концентрация всей тяговой нагрузки на одной лопасти, перегружая ее. Сечение лопасти 2, имея притупления на вершине, обеспечивает уменьшение удельного давления и износа лопасти, но недостаточно эффективно при работе на льду.

Если лопасть выполнена треугольной формы — тип 4 (наиболее распространенный тип) при значительной крюковой нагрузке вертикальная составляющая также имеет большую величину, определяемую выражением

$$Q'_z = Q_x \cdot \operatorname{gt} \frac{\gamma}{2};$$

которая уменьшает вертикальную нагрузку на движитель, т. е.

$$Q_z = G_p - Q'_z = G_p - Q_x \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = G_p (P_f + P_{кр}) \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2},$$

где  $P_f$  — сила сопротивления движению.

Движение машины сопровождается «всплыванием» РВД, происходит уменьшение глубины погружения, а следовательно, и упорной поверхности лопасти, определяющей силу сцепления.

Исходя из этого, угол профиля должен выбираться из условия

$$\frac{\gamma}{2} \leq \operatorname{arctg} f_{тр},$$

где  $f_{тр}$  — коэффициент трения материала лопасти о лед.

Для льда величина  $\gamma$  должна быть 10—12°. В этом случае выталкивающая сила «всплывания» движителя вызывать не будет.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей. — М.: Машиностроение, 1981. — 227 с.
2. Антонов А. С. Теория гусеничного движителя. — М.: Машгиз, 1949. — 213 с.
3. Беккер М. Г. Введение в теорию систем местность—машина. М.: Машиностроение, 1973. — 520 с.
4. Гусеничные транспортеры — тягачи./В. Ф. Платонов, А. Ф. Белоусов, Н. Г. Алейников и др./— М.: Машиностроение, 1978. — 351 с.
5. Динамика системы дорога — шина — автомобиль — водитель. Под ред. Хачатурова А. А. — М.: Машиностроение, 1976. — 535 с.
6. Ершов В. И., Барахтанов Л. В. Классификация микропрофиля бездорожья территории Советского Союза. — Изв. вуз. Машиностроение, 1975, № 5, с. 13—15.
7. Ершов В. И., Барахтанов Л. В. Вероятностные характеристики микропрофиля пересеченной местности. — Изв. вуз. Машиностроение, 1971, № 4, с. 117—119.
8. Забавников Н. А. Основы теории транспортных гусеничных машин. — М.: Машиностроение, 1975. — 448 с.
9. Кошарный Н. Ф. — Техничко-эксплуатационные свойства автомобилей высокой проходимости. — Киев.: Вища школа, 1981. — 208 с.
10. Крживицкий А. А. Снегоходные машины. Г. Н. Т. — М.: Машгиз, 1949. — 235 с.
11. Кузьмин П. П. Физические свойства снежного покрова. — Л.: Гидрометеиздат, 1957. — 215 с.
12. Масленников В. А. Влияние угла наклона лобового участка гусениц на величину силы сопротивления движению снегоходной машины. Труды Горьковского политехнического института. — Т. XXIX, вып. 17. — Горький, 1973, с. 30—36.
13. Николаев А. Ф., Куляшов А. П., Колотин В. Е. Методика оценки проходимости снежного покрова роторно-винтовым движителем. — Сб.: Вопросы проходимости машин. — Благовещенск: Изд. СХИ, 1976. — с. 58—67.
14. Николаев А. Ф., Куляшов А. П., Янкович А. В. Модель льда как объект взаимодействия с движителем ледорезных машин. — Тезисы доклада на Всесоюзной научно-технической конференции «Совершенствование строительно-дорожных машин». Красноярск, 1981, с. 10—11.
15. Панов В. И. Исследование взаимодействия гусеничного движителя со снегом. Труды Горьковского политехнического института. — Т. XXI, вып. 1. — Горький, 1965. — с. 43—51.
16. Рихтер Г. Д. Снежный покров, его формирование и свойства. — М.: Изд-во АН СССР, 1945. — 120 с.
17. Рогожин В. П., Малыгин В. А. Определение ожидаемой глубины колеи гусеничных машин на слабых грунтах. Труды Горьковского политехнического института. — Т. XXIX, вып. 5. — Горький, 1973. — с. 47—53.
18. Рукавишников С. В. Некоторые особенности проектирования гусеничного движения снегоходных машин. Труды Горьковского политехнического института. — Т. XXIII, вып. 7. — Горький, 1967. — с. 11—19.
19. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. — М.: Госстройиздат, 1958. — 403 с.
20. Транспортные средства на высокоэластичных движителях./Н. Ф. Бочаров, В. И. Гусев, В. М. Семенов и др./— М.: Машиностроение, 1974. — 208 с.
21. Цитович Н. Я. Механика грунтов. — М.: Высшая школа, 1973. — 272 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3		
<b>Глава 1. Снег как полотно пути . . . . .</b>	<b>5</b>		
1.1. Формирование снежного покрова и физические процессы, протекающие в нем . . . . .	5		
1.2. Физико-механические свойства снега . . . . .	14		
1.3. Несущая способность снежного полотна пути . . . . .	26		
1.3.1. Зависимость деформации снега от величины нагрузки и высоты снежного покрова . . . . .	26		
1.3.2. Характер протекания процессов при вертикальной деформации снега . . . . .	35		
1.3.3. Деформация снега цилиндрической поверхностью . . . . .	39		
1.4. Сопротивление снежного полотна пути сдвигу . . . . .	42		
1.4.1. Исследование процессов, происходящих в снеге при горизонтальном сдвиге . . . . .	42		
1.4.2. Сопротивление сдвигу с горизонтальной деформацией . . . . .	48		
1.4.3. Диаграмма предельных состояний . . . . .	51		
1.5. Общее представление о снежном покрове . . . . .	58		
1.5.1. Математические модели снежного покрова . . . . .	61		
1.5.2. Характеристики твердого основания снежного покрова . . . . .	64		
<b>Глава 2. Взаимодействие движителя с полотном пути . . . . .</b>	<b>72</b>		
2.1. Взаимодействие с полотном пути части движителя, расположенного под катком . . . . .	72		
2.2. Взаимодействие с полотном пути части движителя, расположенного между катками . . . . .	79		
2.3. Эпюра давления гусеничного движителя на снег . . . . .	88		
2.4. Образование колен . . . . .	93		
<b>Глава 3. Сопротивление движению гусеничной снегоходной машины . . . . .</b>	<b>97</b>		
3.1. Сила сопротивления движению машины, обусловленная вертикальной деформацией снежного покрова гусеницами . . . . .	98		
3.2. Сопротивление движению за счет бульдозерного действия лобового участка гусеницы . . . . .	104		
		3.3. Сопротивление движению за счет днища машины . . . . .	105
		3.4. Влияние конструктивных параметров гусеничного движителя на сопротивление движению . . . . .	107
		<b>Глава 4. Сила тяги, развиваемая гусеничным движителем на снежном полотне пути . . . . .</b>	<b>115</b>
		4.1. Особенности взаимодействия гусеничного движителя со снежным полотном пути при формировании горизонтальной реакции . . . . .	115
		4.2. Расчет упорной реакции снега от одного трака . . . . .	122
		4.3. Влияние конструктивных параметров элементов гусеницы на упорную реакцию снега . . . . .	128
		4.4. Расчет упорной реакции гусеничного движителя . . . . .	132
		4.5. Запас силы тяги . . . . .	137
		<b>Глава 5. Оценка проходимости гусеничных машин по снежному покрову и пути ее повышения . . . . .</b>	<b>140</b>
		5.1. Основные предпосылки для оценки проходимости снегоходных машин . . . . .	140
		5.2. Оценка проходимости по несущей способности полотна пути . . . . .	141
		5.3. Некоторые пути повышения проходимости снегоходных машин . . . . .	147
		5.3.1. Снижение пиковых давлений и увеличение активной поверхности . . . . .	148
		5.3.2. Использование уширителей гусениц . . . . .	148
		<b>Глава 6. Динамическая задача взаимодействия машины с опорной поверхностью . . . . .</b>	<b>156</b>
		6.1. Математическая модель машины . . . . .	156
		6.2. Динамическая эпюра давления . . . . .	162
		<b>Глава 7. Особенности взаимодействия роторно-винтового движителя с опорной поверхностью . . . . .</b>	<b>165</b>
		7.1. Глубина погружения движителя . . . . .	165
		7.2. Сопротивление движению РВД . . . . .	167
		7.3. Тяговое усиление роторно-винтового движителя . . . . .	178
		7.4. Движение роторно-винтовых машин по льду . . . . .	181
		7.5. Тягово-снегоходные качества машин с РВД на льду . . . . .	182
		Список литературы . . . . .	188



Пг  
Глав

Глава :

### СНЕГОХОДНЫЕ МАШИНЫ

Редактор Н. А. Воронова  
Худож. редактор В. З. Вешапурн  
Техн. редактор М. И. Соколова  
Корректор Е. В. Филатова

ИБ № 1697

Глава 3

Сдано в набор 31.10.85. Подписано к печати 20.03.86. МЦ 0  
Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская № 1. Гарнитур  
«Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 10,08. Уч.-изд.  
Усл. кр.-отт. 10,29. Тираж 1000 экз. Заказ № 7983. Цена  
Заказное.

Волго-Вятское книжное издательство, 603019, г. Горький,  
Кремль, 4-й корпус.

Дзержинская типография Горьковского областного управл  
издательств, полиграфии и книжной торговли.  
606025, г. Дзержинск, проспект Циолковского, 15