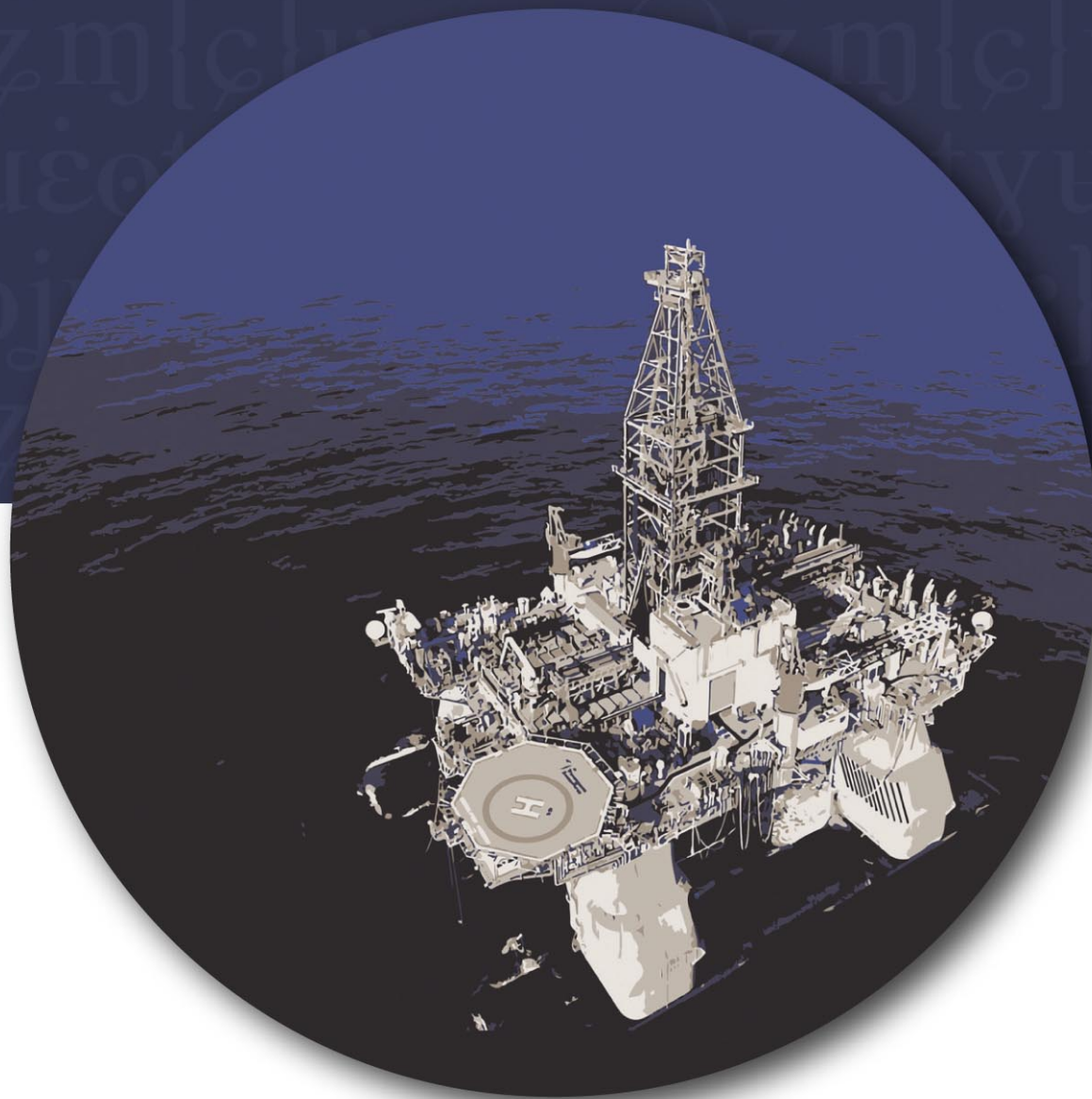




СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY



В. А. Ганжа, Ю. Н. Безбородов, А. С. Сатышев
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ
СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СНЕГООЧИСТИТЕЛЬНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ С ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

УДК 625.768.5:621.317.78(07)
ББК 39.311-082.09-5я73+31.221-5я73
Г190

Р е ц е н з е н т ы:

Н. И. Селиванов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тракторы и автомобили» ФГБОУ ВО КрасГАУ;

А. Ф. Осипов, заместитель генерального директора по развитию ЗАО «Спецтехномаш», г. Красноярск

Ганжа, В. А.

Г190 Методы и средства измерительного контроля силовых параметров снегоочистительного оборудования с дисковым инструментом : монография / В. А. Ганжа, Ю. Н. Безбородов, А. С. Сатышев. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2020. – 298 с.

ISBN 978-5-7638-4252-4

Представлена новая методология измерительного контроля силовых параметров дискового инструмента, взаимодействующего с разрушаемой средой. Описан подход, реализованный на комплексном использовании системы основных и ряда вспомогательных методов измерительного контроля, обеспечивающий получение наиболее полной измерительной информации, характеризующей силовые параметры дискового инструмента, с целью обоснования на стадии разработки рациональных с позиции минимизации энергозатрат и повышения производительности конструктивных и эксплуатационных параметров такого инструмента и оснащаемого им оборудования.

Предназначена для инженеров, разрабатывающих конструкции исполнительных органов дорожных машин, инженерно-технических работников аэродромов гражданской авиации и дорожных эксплуатационных организаций, а также студентов, магистрантов и аспирантов технических специальностей.

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 625.768.5:621.317.78(07)
ББК 39.311-082.09-5я73+31.221-5я73

ISBN 978-5-7638-4252-4

© Сибирский федеральный университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КАК РАЗРУШАЕМОГО ИЛИ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА.....	12
1.1. Основные физико-механические свойства снежно-ледяных отложений, формирующихся или формируемых искусственно на дорожных и аэродромных покрытиях.....	12
1.2. Классификация прочных снежно-ледяных отложений как пресноводных льдов природного происхождения и их основные физико-механические свойства	20
1.2.1. Удельный вес (плотность) и пористость льда	22
1.2.2. Прочностные свойства льда	23
1.2.3. Вязкость льда	26
1.2.4. Коэффициент внешнего трения льда.....	27
1.3. Основные закономерности деформирования и разрушения льда....	28
1.3.1. Деформирование монокристаллов льда	28
1.3.2. Деформирование поликристаллов льда	29
1.4. Известные методы и средства контроля основных эксплуатационных показателей автомобильных дорог и аэродромов при их зимнем содержании под слоем уплотненного снега.....	30
1.4.1. Методы и средства контроля основных показателей качества снежных (снежно-ледяных покрытий) автозимников, дорог с искусственным покрытием и аэродромов при их зимнем содержании под слоем уплотненного снега	34
1.5. Основные сведения о технологии зимнего содержания дорожных и аэродромных покрытий, средствах и методах предотвращения и устранения снежно-ледяных отложений	42
1.5.1. Недостатки распространенных методов и средств очистки дорожных и аэродромных покрытий от снежно-ледяных отложений	46
1.6. Обоснование потребности в методах и средствах измерительного контроля силовых параметров высокоэффективного снегоочистительного оборудования на стадии его проектирования.....	52

Глава 2. МЕТОД И ПРИБОР КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ (НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ) УПЛОТНЕННОГО СНЕЖНО-ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА	56
2.1. Методы и средства контроля физико-механических свойств природных твердых сред посредством пенетрации и зондирования	56
2.2. Обоснование выбора прототипа прибора контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых аэродромов и автодорог	61
2.2.1. Основные результаты обзора зарубежного опыта в области полевых испытаний природных сред методами пенетрации и зондирования.....	65
2.2.2. Результаты анализа известных средств контроля ФМС различных твердых сред методами динамического зондирования и пенетрации	72
2.2.3. Описание конструкции прототипа прибора контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова	75
2.3. Измерительный прибор твердомер и метод оперативного полевого контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова на дорожных и аэродромных покрытиях	76
2.3.1. Обоснование выбора величины угла при вершине конического индентора и его высоты	82
2.4. Метод контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых аэродромов и автодорог, реализуемый посредством использования твердомера предложенной конструкции	90
2.4.1. Натурные испытания нового твердомера. Обработка и анализ результатов испытаний прибора	93
2.5. Модернизированный твердомер для оперативного полевого контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова на дорожных и аэродромных покрытиях	100
Глава 3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	107
3.1. Обоснование выбора режущего инструмента для разрушения прочных снежно-ледяных отложений.....	107
3.2. Конструкция измерительной установки – лабораторного стенда для испытания рабочих органов дорожных машин.....	111
3.2.1. Методика лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой с использованием стенда предлагаемой конструкции.....	123

3.3. Конструкции измерительных преобразователей – тензометрических элементов ИП-1 и ИП-2.....	126
3.3.1. Измерительный преобразователь – тензометрический элемент ИП-1 для контроля силы сопротивления разрушению прочных твердых сред полноразмерным рабочим инструментом.....	128
3.3.2. Система методов измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП-1.....	145
3.3.3. Измерительный преобразователь – тензометрический элемент ИП-2 для контроля силы сопротивления разрушению твердых менее прочных сред масштабными моделями отвальных рабочих органов.....	149
3.3.4. Метод измерительного контроля силы сопротивления твердых менее прочных сред механическому разрушению отвальным рабочим органом с использованием ИП-2	155
3.4. Измерительная установка – стенд для градуировки тензометрических элементов	157
3.4.1. Метод градуировки тензометрических элементов с использованием измерительной установки – стенда предлагаемой конструкции	160
3.5. Информационно-измерительный комплекс	164
3.5.1. Анализ точности измерений.....	169
3.6. Учебно-научная лаборатория «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур».....	176
 Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С РАЗРУШАЕМОЙ СРЕДОЙ	184
4.1. Определение необходимого числа опытов.....	185
4.2. Обоснование конструкции и основных геометрических параметров дискового режущего инструмента для разрушения прочных снежно-ледяных отложений.....	187
4.2.1. Испытания модернизированного лабораторного стенда и измерительного преобразователя ИП-1 на парафиновой пробе.....	188
4.2.2. Экспериментальные лабораторные исследования процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с прочными снежно-ледяными отложениями при поиске рациональных геометрических параметров инструмента	197
4.2.3. Обработка и анализ результатов первого этапа экспериментальных исследований	200

4.3. Обоснование рациональных скоростных режимов работы дискового режущего инструмента при механическом разрушении прочных снежно-ледяных отложений.....	214
4.3.1. Обработка и анализ результатов второго этапа экспериментальных исследований	217
4.4. Оценка влияния температуры окружающей среды и разрушаемого материала на величину силы сопротивления прочных СЛО резанию дисковым инструментом	221
4.4.1. Обработка и анализ результатов третьего этапа экспериментальных исследований	224
4.5. Оценка степени влияния радиуса закругления рабочей (режущей) кромки дискового инструмента на силовые и энергетические показатели процесса разрушения льда таким инструментом.....	228
4.5.1. Обработка и анализ результатов четвертого этапа экспериментальных исследований	233
 Глава 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОЧНЫХ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕЗАНИЮ ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ	240
5.1. Краткое описание математической модели процесса взаимодействия дискового резца с разрушаемой средой	241
5.2. Методика расчета значений силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым инструментом	245
5.2.1. Основные рекомендации к расчету значений составляющих силы сопротивления прочных СЛО резанию дисковым резцом типа <i>A</i> в заблокированном режиме.....	245
5.2.2. Пример расчета значений составляющих силы сопротивления прочных СЛО резанию дисковым резцом типа <i>A</i> в заблокированном режиме.....	249
5.2.3. Пример расчета составляющих силы сопротивления прочных СЛО резанию дисковым резцом типа <i>A</i> в полублокированном режиме.....	252
 Глава 6. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СНЕГООЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ДИСКОВЫМ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ	256
6.1. Применение метода измерительного контроля прочности (несущей способности) снежно-ледяных покрытий автодорог и аэродромов.....	256
6.2. Применение методики лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой с использованием измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда	257

6.3. Применение системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом с использованием ИП-1	258
6.3.1. Применение метода «А»	258
6.3.2. Применение метода «В»	259
6.3.3. Применение метода «С»	260
6.3.4. Применение метода «D»	261
6.4. Применение метода измерительного контроля силы сопротивления твердых менее прочных сред механическому разрушению отвальным рабочим органом с использованием ИП-2	262
6.5. Применение метода градуировки тензометрических элементов	263
6.6. Использование результатов реализации методов измерительного контроля силовых параметров режущего инструмента применительно к конструкциям высокоэффективного снегоочистительного оборудования.....	264
6.6.1. Конструкция сменного рабочего органа отвального типа, оснащенного дисковым режущим инструментом	264
6.6.2. Конструкция рабочего органа с дисковым инструментом для разрушения снежно-ледяного наката на дорожных покрытиях	271
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	280
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	281

– Глава 1 – ХАРАКТЕРИСТИКИСНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КАК РАЗРУШАЕМОГО ИЛИ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ---

1.1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ ИЛИ ФОРМИРУЕМЫХ ИСКУССТВЕННО НА ДОРОЖНЫХ И АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Снежно-ледяные отложения, или образования (СЛО), формирующиеся на дорожных и аэродромных покрытиях, – это природная среда, основой которой является снег, попадающий на эти покрытия в результате снегопадов и ветрового снеготранспорта [13, 50, 51].

Снег и снежный покров представляют собой кристаллы льда, кристаллическая решетка которого имеет ярко выраженную шестигранную форму, что связано со строением молекулы воды, состоящей из одного атома кислорода и двух атомов водорода. Строение кристалла льда показано на рис. 1.1: атомы – окружности, связи между ними – прямые линии [50].

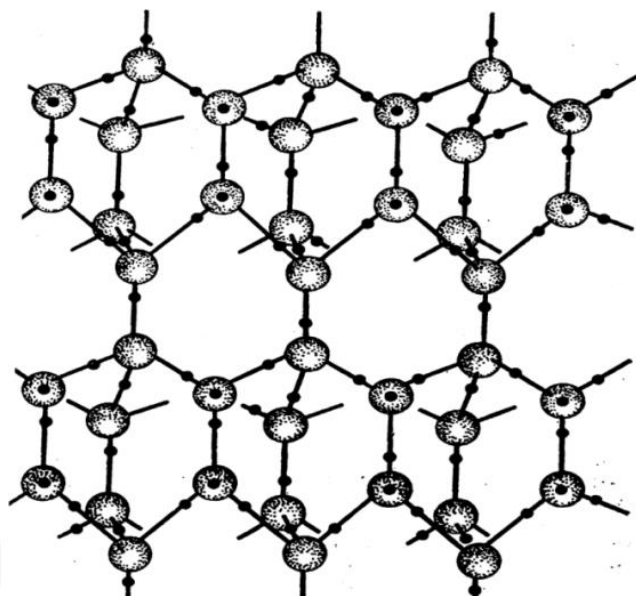


Рис. 1.1. Вид кристаллической решетки льда

Все виды снежно-ледяных отложений, образующихся на дорожном покрытии, в соответствии с их дорожной классификацией, представленной в документе [6], по внешним признакам подразделяют на рыхлый снег, снежный накат и стекловидный лед.

Рыхлый снег откладывается на дорожном покрытии в виде ровного (по толщине от 0,01 до 0,3 м) слоя. Плотность свежевыпавшего снега может изменяться от 0,06 до 0,20 г/см³. Вследствие переноса ветром ранее выпавшего снега формируются значительно более плотные снежные отложения, плотность которых зависит от скорости ветра. Так, при скорости ветра более 10 м/с плотность снега может достигать 0,25–0,35 г/см³.

При наличии слоя рыхлого снега на дорожном покрытии коэффициент сцепления шин с покрытием составляет около 0,2.

Снежный накат представляет собой слой снега, уплотненного колесами проходящего автотранспорта. Толщина наката может быть от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров, плотность – от 0,3 до 0,6 г/см³. Коэффициент сцепления шин с поверхностью снежного наката составляет от 0,1 до 0,25.

Стекловидный лед появляется на покрытии в виде гладкой стекловидной пленки толщиной от 1 до 3 мм и изредка в виде матово-белой шероховатой корки толщиной до 10 мм и более. Отложения стекловидного льда имеют плотность от 0,7 до 0,9 г/см³, а коэффициент сцепления составляет от 0,08 до 0,15. Этот вид зимней скользкости является наиболее опасным. Отложения льда в виде матово-белой корки имеют плотность от 0,5 до 0,7 г/см³.

Отложения *рыхлого снега* на дорожном покрытии образуются при выпадении твердых осадков в безветренную погоду. Сохранение снега в рыхлом состоянии наиболее вероятно при температуре воздуха *ниже минус 10 °С*, так как при низких температурах воздуха процесс уплотнения снега автотранспортом замедляется, а при температуре воздуха *от минус 6 до минус 10 °С* снег не будет уплотняться при относительной влажности воздуха менее 90 %.

Образование *снежного наката* происходит при наличии влажного снега на дорожном покрытии под действием автомобильного транспорта и определенных метеорологических условий. Наибольшая вероятность образования снежного наката существует при следующих погодных условиях: выпадение снега при температуре воздуха *от 0 до минус 6 °С*; при температуре воздуха *от минус 6 до минус 10 °С* образование снежного наката происходит при влажности воздуха выше 90 %; при положительных температурах снежный накат образуется при высокой интенсивности снегопада (более 0,6 мм/ч), когда снег не успевает растаять на покрытии и легко уплотняется транспортными средствами.

Образование *стекловидного льда* может иметь различные причины и возможно при различных погодных условиях. Замерзание влаги, имеющейся на дорожном покрытии при резком понижении температуры воздуха, называют гололедицей. Источниками увлажнения покрытия могут быть дождь, тающий снег, снег с дождем, выпадающие при положительной, но близкой к нулю температуре воздуха, а также влага, оставшаяся после обработки дорожного покрытия антигололедными химическими реагентами. Процессу образования скользкости в этом случае предшествуют следующие погодные условия: устойчивое повышение атмосферного давления на фоне выпадающих осадков; установление ясной, безоблачной погоды после прекращения выпадения осадков; пониженная относительная влажность воздуха; понижение температуры воздуха от положительных до отрицательных значений.

Образование скользкости наиболее вероятно при температуре воздуха *от минус 2 до минус 6 °С*, относительной влажности воздуха от 65 до 85 %. При этих погодных условиях температура дорожного покрытия всегда выше температуры воздуха в силу тепловой инерции дорожной конструкции.

Очевидно, что при наличии на дорожных покрытиях СЛО различных видов значения коэффициента сцепления покрытий значительно ниже нормативных, обеспечивающих безопасные условия движения транспортных средств со скоростью, разрешенной Правилами дорожного движения РФ [10]. В соответствии с требованиями документа [5] значения коэффициента сцепления, определенные прибором ПКРС-2 (ТУ 78.1.003-83), должны быть не менее 0,3 при его измерении шиной без рисунка протектора и 0,4 – шиной, имеющей рисунок протектора.

Приведенная выше дорожная классификация СЛО лаконична и не отражает всего многообразия видов этой природной среды, формирование которых (естественным или искусственным путем) на дорожных и аэродромных покрытиях происходит или производится наиболее часто.

В силу этого ученые и специалисты в области зимнего содержания дорог и аэродромов в своих работах и нормативных документах предлагают либо расширенную версию данной классификации, либо самостоятельные классификации СЛО, не зависящие от приведенной выше.

Так, И. А. Афанасьев в работе [41] дополняет дорожную классификацию [6] таким видом СЛО, как «*зернистый лед*», образующимся в условиях густого тумана при температуре воздуха *от 0 до минус 2 °С*. Характерными участками для формирования такого вида СЛО являются мостовые переходы, дороги (улицы), расположенные в низинных местах, заболоченной (ранее заболоченной) местности. Зернистый лед имеет шероховатую поверхность, плотность 0,5–0,7 г/см³.

К виду «*снежный накат*» следует также отнести и *снежное* или *снежно-ледяное покрытие* сухопутных автозимников или грунтовых аэродромов, сооружаемых на подготовленном грунтовом основании путем послойного уплотнения выпадающего снега в течение всего зимнего периода.

Документом [11] *снег уплотненный* определяется как снег, который спрессовывается в твердую массу, не поддающуюся дальнейшему уплотнению. При отрыве от поверхности такой снег не рассыпается или ломается на большие куски, а его плотность составляет $0,5 \text{ г/см}^3$ и выше. Максимальная толщина слоя уплотненного снега на сухопутных автозимниках составляет 0,3 м, на покрытиях грунтовых аэродромов: 0,06–0,08 см.

По данным работы [13], при зимнем содержании в накате автомобильных дорог IV, V категории с усовершенствованными облегченными или переходными типами покрытий плотность уплотненного снега может составлять $0,4\text{--}0,65 \text{ г/см}^3$ при толщине слоя от 50 до 150 мм.

В городских условиях при высокой интенсивности транспортных потоков, на подходах к остановочным пунктам городского пассажирского транспорта (ГПТ), а также к перекресткам в результате интенсивного торможения транспортных средств образуется *снежно-ледяной накат* (СЛН), представляющий собой уплотненный снег, содержащий прослойки льда. Плотность такого снежно-ледяного наката возрастает по мере приближения к перекресткам и заездным остановочным карманам. Перед линией пешеходных переходов и на остановочных пунктах из уплотненного снега при повышении температуры воздуха до положительной и последующем резком ее понижении образуется лед. Плотность СЛН и льда изменяется в диапазоне значений $0,55\text{--}0,9 \text{ г/см}^3$ [41]. *Четко разграничить показатели физико-механических свойств СЛН и льда крайне сложно, а плотность и прочность СЛН могут достигать значений, характерных для льда.*

Из сказанного выше следует, что основным классификационным признаком в дорожной классификации СЛО принята их плотность, по величине значений которой можно *косвенно* судить и о прочности таких покрытий. Предполагается, что чем выше плотность снежно-ледяного покрытия при определенной температуре, тем выше и его прочность.

Так как данное предположение не является однозначным, а зависимость прочности снежно-ледяного покрытия от его плотности и температуры не является линейной (рис. 1.2), законодатель предусмотрел необходимость контроля при строительстве и эксплуатации сухопутных автозимников и грунтовых аэродромов, а также и при зимнем содержании дорожных и аэродромных покрытий под слоем уплотненного снега, целого комплекса основных показателей качества снежных (снежно-ледяных) покрытий этих объектов.

Это плотность и температура снега в покрытии, толщина покрытия, *прочность снежного* (снежно-ледяного) дорожного полотна, определяющая его несущую способность. Наряду с данными параметрами контролируют ровность и чистоту снежных (снежно-ледяных) покрытий, несущую способность оснований, учитывают при этом температуру окружающего воздуха, его влажность и т. д.

В рамках данной работы СЛО рассматриваются авторами и как *строительный материал, в случае зимнего содержания дорожных и аэродромных покрытий под слоем уплотненного снега, и в качестве материала для разрушения, при содержании покрытий методом механического разрушения СЛО с их последующим удалением*. В обоих случаях приоритетными являются *прочностные* характеристики исследуемой среды: в первом как определяющие несущую способность покрытий, во втором – как оказывающие существенное влияние на энергоемкость процесса механического разрушения СЛО рабочими органами уборочных (снегоочистительных) машин.

В соответствии с положениями документа [11] несущая способность снеговых покрытий характеризуется условной *прочностью (твердостью)* снега, которая зависит от его плотности и температуры. Под *твердостью* понимается способность материала сопротивляться проникновению в него другого, не получающего остаточных деформаций, тела [16, 52]. *Величина прочности тем больше, чем больше плотность и ниже температура снега*.

Зависимость условной прочности снега от его плотности и температуры *приближенно* определяется следующим выражением:

$$\sigma = 8\rho^2 \times \sqrt{1+t}, \text{ кгс/см}^2, \quad (1.1)$$

где ρ – плотность снега в долях единицы,
 t – температура снега без учета знака, °С.

Например, при плотности снега в покрытии $\rho = 0,4 \text{ г/см}^3$ и температуре снега $t = 10 \text{ °С}$ условная прочность (твердость) снегового покрова составит $4,2 \text{ кгс/см}^2$, что соответствует нормативному значению данного параметра, достаточному для приема на такую взлетно-посадочную полосу (ВПП) воздушных судов четвертого класса: Ан-2, М-15, Л-410М и т. д. [20].

Данная зависимость не является линейной, и однозначно судить о прочности (твердости) снегового покрова по его плотности не корректно, даже если температура последнего неизменна. Прочность связей между снеговыми кристаллами зависит не только от плотности снега и температуры, но и от его пористости, влажности, структуры, которая обуславливается, в частности, *степенью перемешивания* снега.

В работе [16] И. В. Крагельский приводит графики зависимости твердости снега от его температуры и плотности, относящиеся к перемешанному снегу (рис. 1.2).

Для плотности $0,5 \text{ г/см}^3$ дана пунктирная кривая, относящаяся к перемешанному снегу. Очевидно, что при температуре $t = -20^\circ\text{C}$ твердость перемешанного снега практически в два раза ниже твердости снега перемешанного.

Пределы изменения прочности для различного состояния снега в зависимости от его плотности, по данным Д. А. Шальмана, приведены в табл. 1.1 [52].

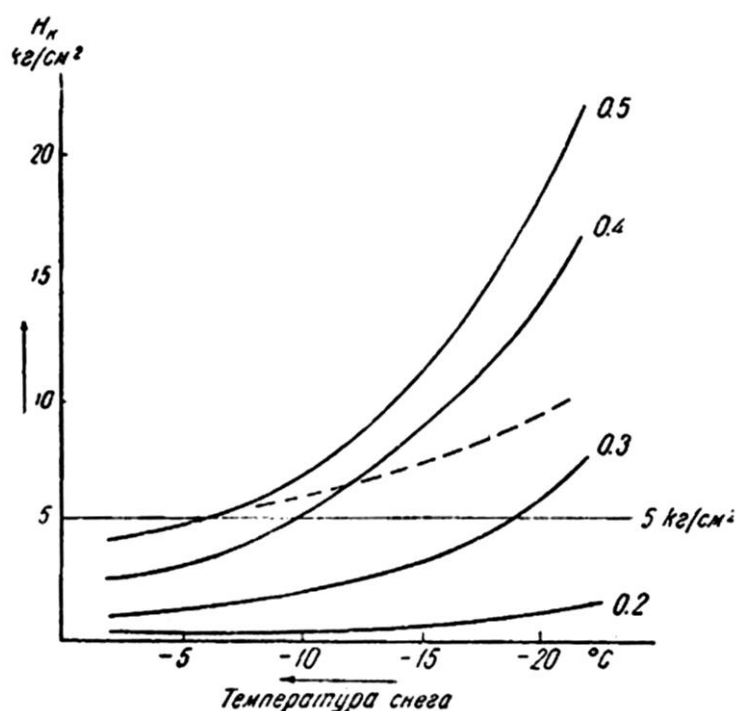


Рис. 1.2. Зависимость твердости снега от температуры и плотности (пунктиром показана кривая для перемешанного снега плотностью $0,5 \text{ г/см}^3$)

Таблица 1.1

Твердость снега в зависимости от его состояния и плотности

Вид снега	Плотность снега, г/см^3	Твердость снега, кг/см^2 (при температуре от -1 до -20°C)
Рыхлый	Менее 0,25	До 0,5
Слабоуплотненный	0,26–0,35	0,6–1,0
Плотный	0,36–0,50	2,1–20
Очень плотный	0,51–0,60	3,8–30

На величину плотности и прочности уплотненного снежного покрова существенное влияние также оказывают величина уплотняющей нагрузки, количество проходов уплотнительного оборудования, толщина уплотняемого снежного слоя и время выдержки покрытия после уплотнения. Нарастание прочности снежного покрова продолжается примерно семь часов по окончании уплотнения в соответствии с табл. 1.2 [11].

Под воздействием нагрузки плотность снега наиболее интенсивно увеличивается в начале процесса уплотнения. Затем ее рост постепенно замедляется и, достигнув предельного значения, соответствующего данной температуре, стабилизируется. Для каждого вида снега существует критическая нагрузка, дальнейшее увеличение которой практически не приводит к увеличению плотности. Установлено, что предельное значение плотности снега тем выше, чем выше его температура. Следовательно, снег целесообразно уплотнять при температуре, близкой к нулю [52].

Кроме того, в соответствии с рекомендациями документа [8] при строительстве сухопутных автозимников плотность снега более $0,6 \text{ г/см}^3$ может быть достигнута поливом полотна водой после уплотнения. Количество воды при этом зависит от требуемой плотности снега в соответствии с табл. 1.3.

Таблица 1.2

Нарастание прочности уплотненного снега со временем

Время после окончания уплотнения, ч	Нарастание прочности уплотненного снега, %
1,0	5
1,5	11
2,0	20
2,5	33
3,0	48
3,5	63
4,0	77
4,5	88
5,0	95
5,5	100
6,0	103
6,5	105

Таблица 1.3

Количество воды для смачивания уплотненного снега

Требуемая плотность снега в полотне, г/см^3	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
Количество воды, % к массе уплотняемого снега	0	5	12	20	28

К поливу полотна следует приступать не ранее чем через 12–14 часов после уплотнения и производить его по всей ширине проезжей части, используя для этого различные мобильные средства транспортирования воды на колесном, гусеничном или санном ходу, оснащаемые цистернами и устройствами для забора и слива воды. Расход воды в среднем составляет 2–4 л/м². Операции взрыхления и перемешивания снега способствуют интенсивному смещению снежных кристаллов друг относительно друга и заполнению пустот, имеющих между ними, что позволяет увеличить плотность и прочностные характеристики уплотненного снежного покрова. В таблице 1.4 приведены значения предела прочности на сжатие взрыхленного и перемешанного снега с выдержкой в течение 2 ч при температуре от минус 5 до минус 20 °С. При выдерживании до 4 ч предел прочности возрастает в 1,3–1,4 раза, до 6 ч – в 1,4–1,8 раза.

Таблица 1.4

Значения предела прочности на сжатие рыхлого снега

Состояние снега	Численные значения параметров			
Начальная плотность свежевыпавшего снега, г/см ³	0,02–0,04	0,03–0,06	0,06–0,09	0,13–0,28
Начальная плотность лежалого снега, г/см ³	0,01–0,03	0,02–0,05	0,05–0,07	0,08–0,11
Предел прочности на сжатие рыхлого снега, МПа	0,25	0,30	0,35	0,40

Термином «Прочные снежно-ледяные отложения (образования)» характеризуются такие виды СЛО, как снежно-ледяной накат и лед плотностью $\rho = 0,6–0,9$ г/см³, пределом прочности на сжатие $\sigma = 1,8–2,8$ МПа, толщиной слоя $h \leq 100$ мм, при температуре окружающей среды от минус 2 до минус 10 °С, разрушение и удаление которых с очищаемых дорожных покрытий представляет наибольшую сложность при их зимнем содержании.

Для решения задач исследований, связанных с разработкой средств и методов измерительного контроля силовых параметров снегоочистительного оборудования дорожных машин, предназначенных для механического разрушения прочных СЛО, необходимо изучить их классификацию и основные физико-механические свойства.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЧНЫХ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КАК ПРЕСНОВОДНЫХ ЛЬДОВ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ИХ ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Основоположником физики льда (гляциологии) по праву считается Б. П. Вейнберг, в трудах которого [53, 54] обобщены результаты многолетних наблюдений и исследований по физике и географии природных льдов, полученные российскими и зарубежными учеными в XIX и первой трети XX века. На работу [54] ссылаются многие авторы более поздних исследований [50, 55, 56–62] и др.

Лед, по Б. П. Вейнбергу, представляет собой всякую воду в твердом состоянии, независимо от того, где она встречается и в какой форме: иней, снег, град, ледники, снежный покров, лед водоемов, вечная мерзлота и т. п. [54].

Существует большое количество классификаций льдов [50, 56–61], что объясняется различными принципами такого деления. Одной из распространенных является классификация природных льдов, предложенная И. С. Песчанским [58], который, исходя из потребностей инженерной льдотехники, подразделил льды на восемь классов:

- атмосферные льды;
- поверхностные льды акваторий;
- внутриводные льды;
- материковые льды;
- льды многолетней мерзлоты;
- погребенные льды;
- льды особых образований;
- искусственные льды.

К первому классу И. С. Песчанским отнесены снег, иней, град, гололед. Ко второму – льды, покрывающие в зимнее время океаны, моря, реки, озера и небольшие водоемы. Физико-механические свойства льдов именно этих двух классов необходимо изучить более подробно по следующим причинам. Атмосферный лед, образуемый осадками, покрывает значительную часть земной поверхности. К этому классу следует отнести и различные виды СЛО, формирующиеся или формируемые искусственно на дорожных и аэродромных покрытиях, описанные выше. Поверхностные льды акваторий могут служить основой при строительстве зимников, ледовых аэродромов и вертолетных площадок.

При разработке средств и методов контроля силовых параметров рабочего оборудования, предназначенного для высокоэффективного механического разрушения прочных СЛО на дорожных и аэродромных покрыти-

ях, наибольший интерес представляет классификация льда как *объекта разрушения*, предложенная учеными Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, представленная в работе [55]. Авторами дается характеристика структуры льда, складывающаяся из оценки ряда особенностей его строения: кристалличности, зернистости, структурного рисунка, пространственной ориентировки и оптических констант кристаллов льда и фигуры удара. С учетом структурно-генетической классификации льдов природных водоемов Н. В. Черепанова [56] предложены изображения и описания каждого из одиннадцати видов структур льда.

Реальный ледяной покров большинства пресных водоемов содержит одновременно несколько видов структур, выделенных в предложенной классификации, располагающихся в ледовом массиве горизонтальными слоями (рис. 1.3).

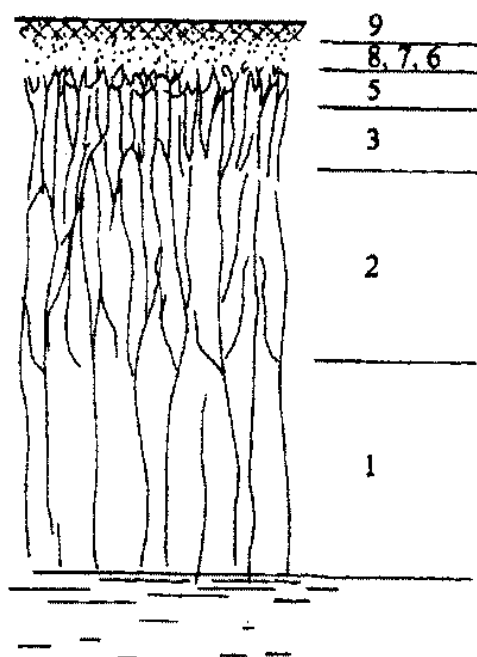


Рис. 1.3. Совокупность структур льда в вертикальном сечении ледяного покрова большинства рек и озер

Самый верхний слой на начальном этапе формирования покрова имеет структуру 8. Позднее, когда на русловых участках, где полыньи чередуются с неподвижными полями, происходит нарастание структур льда 7 и 6 или 5. Дальнейшее нарастание толщины происходит за счет структур 2 и 3. Так как лед в ледяном покрове имеет температуру, близкую к темпе-

ратуре плавления, во всех структурах происходит перекристаллизация, заключающаяся в укрупнении кристаллов, переориентации их оптических осей в вертикальном направлении. При укрупнении кристаллов примеси выдавливаются в межкристаллические полости, что способствует постоянному преобразованию в направлении от структуры 9 к структуре 1. Структура 9 может образовываться вплоть до периода таяния льда от попадания воды через термические трещины в покрывающий снежный покров.

Таким образом, реальный ледяной покров большинства рек и озер имеет сложный набор структур. *На покрытиях автомобильных дорог и аэродромов преобладает лед, имеющий структуру 9 [55].*

При разработке средств и методов измерительного контроля силовых параметров снегоочистительного оборудования дорожных машин, предназначенных для механического разрушения прочных СЛО на покрытиях дорог и аэродромов, необходимо учитывать целый комплекс физико-механических свойств такого вида отложений: плотность, прочность, адгезия льда к искусственным покрытиям, абразивность, теплоемкость, теплопроводность, скрытая теплота плавления и т. д.

Следует отметить, что не все физико-механические свойства льда одинаково влияют на характер его взаимодействия с рабочим органом уборочной машины, разрушающей лед механическим способом. Так, пластические свойства – вязкость, ползучесть, релаксация – не успевают проявляться за время действия нагрузки, прилагаемой к разрушаемой среде, и поэтому не оказывают существенного влияния на контролируемые силовые параметры этого процесса.

Влияние удельного веса (плотности) и пористости льда, его прочностных свойств (пределов прочности при сжатии, растяжении, изгибе и срезе), вязкости льда, коэффициента внешнего трения на характер исследуемого процесса может быть весьма существенным.

1.2.1. Удельный вес (плотность) и пористость льда

Пористостью льда называется отношение общего объема пузырьков и полостей к объему чистого, лишенного пузырьков льда, выраженное в процентах. Удельный вес (плотность) чистого пресноводного льда, лишенного пузырьков, составляет $917,6 \text{ кг/м}^3$ при температуре 0°C и $937,7 \text{ кг/м}^3$ при температуре минус 25°C . В реальных условиях эти величины уменьшаются за счет пузырьков воздуха и полостей во льду. По этой же причине плотность льда всегда меньше плотности воды.

Удельный вес чистого льда при 0°C и давлении $0,1 \text{ МПа}$ составляет $916,8 \text{ кг/м}^3$, а удельный объем – $1,0908 \text{ см}^3/\text{г}$, тогда как для воды удельный

вес и объем равны соответственно $999,863 \text{ кг/м}^3$ и $1,000132 \text{ см}^3/\text{г}$. Расширение объема воды при замерзании составляет 9 %. Отклонение от указанных величин свидетельствует о наличии во льду включений (пор, полостей и примесей).

Результаты вычислений Н. Н. Зубовым зависимости удельного веса льда от его пористости, приведенные в работе [55], представлены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Зависимость удельного веса льда от его пористости

Пористость, %	89	78	67	56	46	35	24	13	2
Плотность, т/м^3	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

На плотность льда в значительной мере влияют условия льдообразования. Так, при таянии льда его плотность несколько возрастает, но по мере вытекания жидкой фазы и освобождения пор и полостей она уменьшается. Такой лед встречается в период весеннего таяния и называется «гнилым», вследствие его малой прочности. Чем медленнее происходит замерзание, тем более плотным, с меньшей степенью солёности образуется лед. На плотность льда покрова водоемов также влияет волнение воды: чем оно больше, тем больше воздуха проникает в поры льда. В зависимости от условий образования льда, температуры, солёности, различных примесей и структуры лед может иметь плотность от $760,0$ до $950,0 \text{ кг/м}^3$ [55]. Изменение плотности льда под действием давления незначительно. Коэффициент сжимаемости равен $2 \cdot 10^{-5}$.

1.2.2. Прочностные свойства льда

Показатели, характеризующие механические свойства льда, приводятся во многих работах как отечественных, так и зарубежных авторов, проводивших исследования при различных видах деформации и условиях испытаний. Систематизации и обобщению имеющихся результатов исследований физико-механических свойств льда посвящены труды А. Н. Комаровского, Б. П. Вейнберга, П. А. Шумского, К. Ф. Войтковского, К. Н. Коржавина, Б. А. Савельева и др. Анализ работ разных авторов приводит к выводу о разнородности характеристик механических свойств льда.

Большой разброс данных по прочности льда, приводимый в различных литературных источниках, объясняется тем, что его прочность зависит

от целого ряда факторов, и прежде всего от температуры этой среды, которая, в свою очередь, зависит от географического положения района, гидрометеорологических условий, определяемых общей циркуляцией атмосферы, солнечной деятельностью и сезонами года.

Кроме температуры на прочность льда влияют также условия льдообразования, его структура, наличие в нем примесей, скорость приложения нагрузки, условия проведения эксперимента и др. Кроме того, во льду непрерывно происходит рекристаллизация, проявляющаяся в пространственном перемещении границы между кристаллами, в изменении размеров, формы и общего количества кристаллов, в изменении ориентации кристаллов, особенно на границе раздела жидкой и твердой фаз.

Основной характеристикой материалов, разрушающихся при малых пластических деформациях, является предел прочности (временное сопротивление разрушению) σ – наибольшее внутреннее напряжение (определяемое по отношению действующей силы к исходной площади поперечного сечения образца), соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца. В зависимости от вида деформации различают пределы прочности: *при сжатии, растяжении, изгибе и срезе*.

Прочность льда на *растяжение* и *изгиб* определяется на образцах в лаборатории, на ледяных пластинках, балках и консолях в естественных условиях на плаву. Прочность на *растяжение* определяется экспериментами двух типов: ледяные образцы гантелевидной формы растягиваются на испытательной машине до разрушения, либо полые ледяные цилиндры сжимаются по диаметру к центру [56]. Обобщенные (по опубликованным работам) данные о прочности σ_p льда на растяжение при кратковременном приложении нагрузки к образцам примерно одного размера приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Прочность льда на растяжение в зависимости от его температуры

Показатели	Пресноводный лед			Морской лед	
$t, ^\circ\text{C}$	0...–10	–10...–20	–20...–35	0...–10	–10...–20
$\sigma_p, \text{МПа}$	0,9–1,2	1,2–1,5	1,4–1,8	0,6–1,1	1,4–1,8

Зависимость σ_p от скорости деформации V_d образца выражается в уменьшении значений σ_p в 6–7 раз при увеличении скорости V_d от 2,5 до 50 см/мин. Установлено, что при растяжении вдоль осей кристаллов значение σ_p примерно в 2,6 раза больше, чем при растяжении в поперечном направлении [56].

Расчет прочности на изгиб для балки на двух опорах производится по формуле

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{3}{2} \frac{Pl}{bh^2}, \quad (1.2)$$

где P – разрушающая нагрузка;
 l – расстояние между опорами;
 b – ширина образца;
 h – высота образца.

Расчет прочности на изгиб для консольной балки производится по формуле

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{6Pl}{bh^2}, \quad (1.3)$$

где l – расстояние от места закрепления балки до точки приложения нагрузки.

Прочность льда на сжатие является величиной условной. Разрушение льда не обусловлено однозначно определенным пределом напряжений. Вследствие ползучести льда начало разрушения льда и соответствующее этому моменту значение внутренних напряжений существенно зависят от скорости приложения нагрузки, условий деформирования, размеров испытуемых образцов и других факторов. Это является одной из причин *больших различий в значениях предела прочности льда*, полученных разными исследователями.

Многочисленные экспериментальные значения предела прочности льда при сжатии получены в основном на образцах кубической и реже цилиндрической формы при высоких скоростях нагружения. Установлено, что $\sigma_{\text{сж}}$ увеличивается с понижением температуры льда и имеет большие значения при нагрузке, приложенной перпендикулярно к оси кристаллов. Величина $\sigma_{\text{сж}}$ уменьшается при скорости нагружения $V_{\text{д}} > 0,2$ МПа/с и при увеличении размеров образцов. Отмечено увеличение $\sigma_{\text{сж}}$ с ростом $V_{\text{д}}$ при малых ее значениях и последующее медленное увеличение прочности с возрастанием $V_{\text{д}}$. Данные о прочности льда на сжатие, приведенные в работе [56], свидетельствуют о том, что сопротивление льда меняется в широких пределах в зависимости от структуры льда, ориентации кристаллов относительно направления сжатия, температуры и других факторов.

Прочность льда на срез изучена значительно меньше, чем при растяжении, сжатии или изгибе. В работе [56] для вычисления прочности льда на срез предлагается формула

$$\sigma_c = P / S, \quad (1.4)$$

где P – разрушающая нагрузка;
 S – площадь среза.

Значения σ_c (МПа) приведены в работе [56].

1.2.3. Вязкость льда

Вязкость характеризует сопротивление твердого тела развитию остаточной деформации под действием внешних сил. Количественно коэффициент вязкости (коэффициент внутреннего трения) η определяется касательной силой F , которая должна быть приложена к единице площади S сдвигаемого слоя, чтобы поддержать в этом случае ламинарное течение с постоянной скоростью относительного сдвига ε , равной единице [56]:

$$\eta = \frac{F}{S} \frac{1}{\varepsilon} = \frac{\sigma_{сдв}}{\varepsilon}, \quad (1.5)$$

где $\sigma_{сдв}$ – напряжение сдвига.

Статическими методами коэффициент вязкости льда определялся многими авторами при деформациях кручения, сдвига, растяжения, сжатия и изгиба. Экспериментальные значения коэффициента вязкости льда, полученные статическими методами, настолько разноречивы (от 10^9 до 10^{15} Па·с), что трудно установить какую-либо закономерность его изменения.

Исследователи В. В. Лавров и К. Ф. Войтковский пришли к выводу, что коэффициент вязкости льда практически условная величина, характеризующая отношение напряжения сдвига к скорости ползучести в заданных условиях деформирования и в заданный момент времени, а вязкость льда не удовлетворяет закону вязкости Ньютона из-за отсутствия линейной зависимости между напряжением и скоростью деформации [56].

1.2.4. Коэффициент внешнего трения льда

При взаимодействии режущего инструмента рабочих органов спецмашин со льдом происходит трение стали по льду. На рис. 1.4 показана зависимость коэффициента динамического трения стали $\mu_{ст}$ от удельной нагрузки при различных температурах льда и скорости скольжения 0,139 м/с.

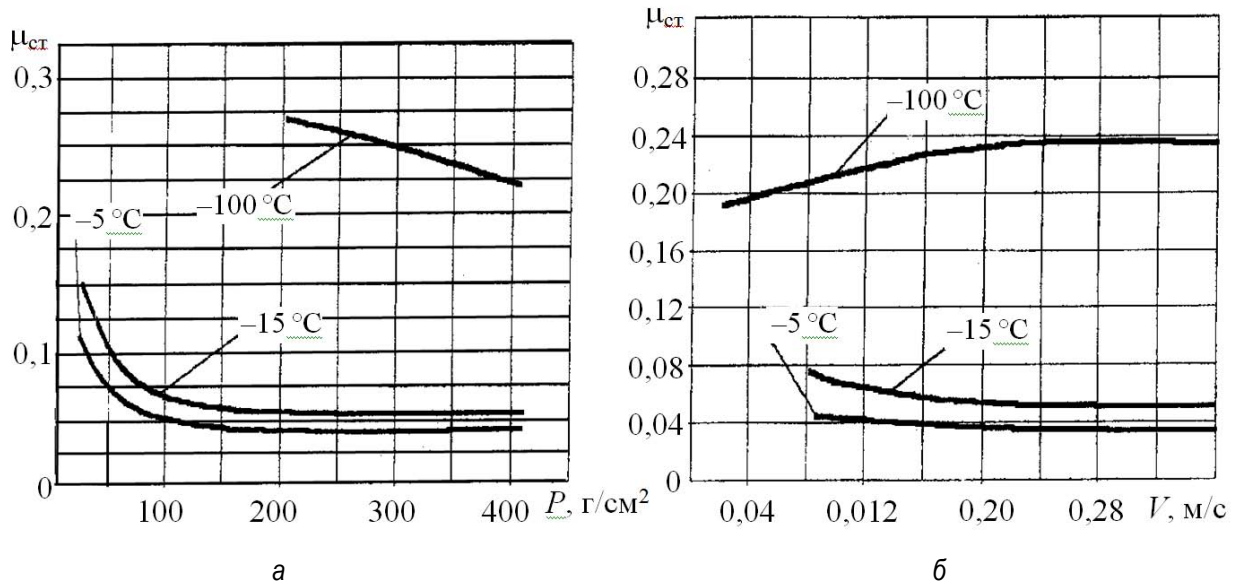


Рис. 1.4. Зависимость коэффициента динамического трения стали по льду при удельной нагрузке 0,2 $г/см^2$: а – от удельной нагрузки; б – от скорости скольжения

Из графиков следует, что для температур до минус $20^{\circ}C$ при малых удельных давлениях величина $\mu_{ст}$ с увеличением удельного давления уменьшается. При дальнейшем росте удельного давления значение $\mu_{ст}$ становится постоянным. При более низких температурах (близких к минус $100^{\circ}C$) с увеличением удельного давления $\mu_{ст}$ продолжает снижаться.

Скорость скольжения стали по льду при обычно встречающихся температурах ледяного покрова не влияет на величину коэффициента динамического трения. Лишь при очень низких температурах наблюдается ее незначительное влияние.

Наиболее существенное влияние на величину коэффициента динамического трения оказывает температура льда. По данным И. С. Песчанского, следует принимать значения коэффициентов статического и динамического трения для стали по льду равными 0,175 и 0,065 соответственно [58].

1.3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА

Под воздействием какой-либо силы, приложенной ко льду, последний начинает деформироваться. В зависимости от различных факторов лед деформируется упруго, пластически или хрупко разрушается. Область проявления чисто упругих свойств льда незначительна. Обычно при любой величине деформирующих напряжений одновременно наблюдаются пластические и упругие деформации. Хрупкое разрушение льда происходит при увеличении его внутренних напряжений до некоторого предела прочности, а также при действии динамических нагрузок.

Существенное влияние на характер деформирования льда оказывает его строение.

1.3.1. Деформирование монокристаллов льда

Характер деформации монокристалла зависит от направления сдвигающих усилий относительно базисной плоскости (плоскость, перпендикулярная оптической оси кристалла). К. Ф. Войтковский в работе [62] представляет структуру кристалла как совокупность многочисленных, очень тонких ($\approx 0,06$ мм), прочных, но гибких пластинок. При деформации льда скольжение наблюдается исключительно по базисным плоскостям. Когда направление сил, вызывающих сдвиг, не совпадает с базисной плоскостью, происходит одновременно изгиб элементарных пластинок и их относительные сдвиги. Три основных возможных направления сил, вызывающих сдвиг относительно базисной плоскости кристалла, показаны на рис. 1.5.

Если плоскость сдвига совпадает с базисной плоскостью (рис. 1.5, *а*), то происходит только трансляция элементарных пластинок и деформация является пластической.

Если сдвигающее усилие действует в направлении главной оси, т. е. направление силы и плоскости сдвига перпендикулярны базисной плоскости (рис. 1.5, *б*), то элементарные пластинки кристалла изгибаются.

При этом имеют место небольшие относительные сдвиги пластинок по базисным плоскостям. После того как деформирующие напряжения в элементарных пластинках достигнут некоторого предела, последние ломаются. Деформация является упругопластической и при возрастании деформирующего напряжения сменяется разрушением.

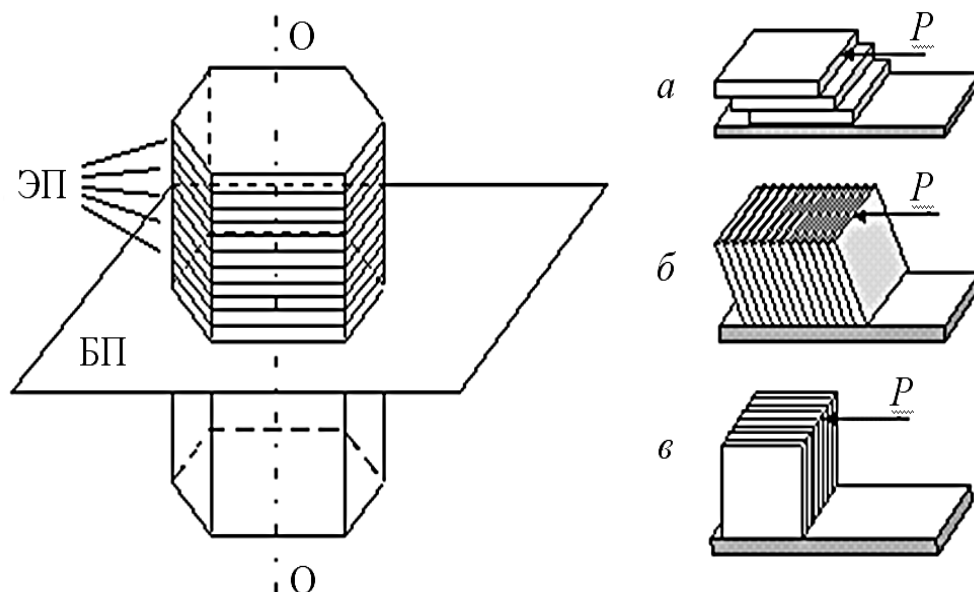


Рис. 1.5. Основные направления сдвигающих усилий относительно базисной плоскости кристалла:
 а – плоскость сдвига совпадает с базисной плоскостью; б – сдвигающее усилие направлено перпендикулярно базисной плоскости; в – направление сдвигового усилия совпадает с базисной плоскостью; ЭП – элементарные пластинки; БП – базисная плоскость; ОО – оптическая ось кристалла; P – сдвигающее усилие

Если направление сдвигающего усилия совпадает с базисной плоскостью, но плоскость сдвига перпендикулярна к ней (рис. 1.5, в), элементарные пластинки допускают только незначительную упругую деформацию. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к разрушению кристалла.

1.3.2. Деформирование поликристаллов льда

Поликристаллический лед при одинаковом направлении оптических осей кристаллов характеризуется анизотропией механических свойств. Характер деформации такого льда зависит от направления действия приложенной силы относительно направления оптических осей большинства кристаллов. Если лед состоит из беспорядочно ориентированных кристаллов, то его можно считать изотропным телом. К факторам, влияющим на деформацию поликристаллического льда, можно отнести: упругие и пластические деформации отдельных кристаллов, взаимные перемещения монокристаллов, разрушение кристаллов [50, 55, 62].