

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*



ГАНЖА ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СИСТЕМА МЕТОДОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ  
ПАРАМЕТРОВ СНЕГООЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
С ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

Специальность:

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Безбородов Юрий Николаевич

Красноярск – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	27
1.1. Основные физико-механические свойства снежно-ледяных отложений формирующихся или формируемых искусственно на дорожных и аэродромных покрытиях .....	27
1.2. Классификация прочных снежно-ледяных отложений как пресноводных льдов природного происхождения и их основные физико-механические свойства .....	36
1.2.1. Удельный вес (плотность) и пористость льда.....	40
1.2.2. Прочностные свойства льда.....	41
1.2.3. Вязкость льда.....	44
1.2.4. Коэффициент внешнего трения льда.....	45
1.3. Основные закономерности деформирования и разрушения льда .....	46
1.3.1. Деформирование монокристаллов льда.....	47
1.3.2. Деформирование поликристаллов льда.....	48
1.4. Известные методы и средства контроля основных эксплуатационных показателей автомобильных дорог и аэродромов при их зимнем содержании под слоем уплотненного снега .....	49
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.....	54
1.5. Основные сведения о технологии зимнего содержания дорожных и аэродромных покрытий, средствах и методах предотвращения и устранения снежно-ледяных отложений.....	63
1.5.1. Недостатки распространенных методов и средств очистки дорожных и аэродромных покрытий от снежно-ледяных отложений.....	69
1.6. Обоснование потребности в методах и средствах измерительного контроля силовых параметров высокоэффективного снегоочистительного ра-	

бочего оборудования на стадии его проектирования. Постановка цели и задач исследования .....	76
1.7. Выводы по главе .....	82
ГЛАВА 2. МЕТОД И ПРИБОР КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ (НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ) УПЛОТНЕННОГО СНЕЖНО-ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА .....	85
2.1. Методы и средства контроля физико-механических свойств твердых сред посредством пенетрации и зондирования .....	85
2.2. Обоснование выбора прототипа прибора контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых аэродромов и автодорог .....	91
2.2.1. Основные результаты обзора зарубежного опыта в области полевых испытаний природных сред методами пенетрации и зондирования .....	96
2.2.2. Результаты анализа известных средств контроля ФМС различных твердых сред методами динамического зондирования и пенетрации .....	104
2.2.3. Описание конструкции прототипа прибора контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова .....	108
2.3. Измерительный прибор твердомер и метод оперативного полевого контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова на дорожных и аэродромных покрытиях .....	110
2.3.1. Обоснование выбора величины угла при вершине конического индентора и его высоты .....	117
2.4. Метод контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых аэродромов и автодорог, реализуемый посредством использования твердомера, предложенной конструкции .....	127
2.4.1. Натурные и лабораторные испытания нового твердомера. Обработка и анализ результатов испытаний прибора .....	131
2.5. Модернизированный твердомер для оперативного полевого контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова на дорожных и аэродромных покрытиях .....	140
2.6. Выводы по главе .....	148

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	150
3.1. Обоснование выбора режущего инструмента для разрушения проч- ных снежно-ледяных отложений.....	150
3.2. Конструкция измерительной установки – лабораторного стенда для испытания рабочих органов дорожных машин.....	156
3.2.1. Методика лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой с ис- пользованием стенда предлагаемой конструкции.....	170
3.3. Конструкции измерительных преобразователей – тензометрических элементов ИП-1 и ИП-2.....	174
3.3.1. Измерительный преобразователь – тензометрический элемент ИП-1 для контроля силы сопротивления разрушению прочных твердых сред полноразмерным рабочим инструментом.....	177
3.3.2. Система методов измерительного контроля силы сопротивле- ния прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным дис- ковым режущим инструментом с использованием измерительного преобразо- вателя ИП-1.....	199
3.3.3. Измерительный преобразователь – тензометрический элемент ИП-2 для контроля силы сопротивления разрушению твердых сред масштаб- ными моделями отвальных рабочих органов.....	204
3.3.4. Метод измерительного контроля силы сопротивления твер- дых менее прочных сред механическому разрушению масштабными моделями отвальных рабочих органов с использованием измерительного преобразователя ИП-2.....	212
3.4. Измерительная установка – стенд для градуировки тензометриче- ских элементов.....	215
3.4.1. Метод градуировки тензометрических элементов с использо- ванием измерительной установки – стенда предлагаемой конструкции.....	220
3.5. Информационно-измерительный комплекс.....	224
3.5.1. Анализ точности измерений.....	231



3.6. Учебно-научная лаборатория «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур».....	238
3.7. Выводы по главе.....	247
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С РАЗРУШАЕМОЙ СРЕДОЙ ПОСРЕДСТВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕДЛАГАЕМЫХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ.....	250
4.1. Определение необходимого числа опытов.....	251
4.2. Обоснование конструкции и основных геометрических параметров дискового режущего инструмента для разрушения прочных снежно-ледяных отложений.....	254
4.2.1. Испытания модернизированного лабораторного стенда и измерительного преобразователя ИП-1 на парафиновой пробе.....	255
4.2.2. Экспериментальные лабораторные исследования процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с прочными снежно-ледяными отложениями при поиске рациональных геометрических параметров инструмента.....	265
4.2.3. Обработка и анализ результатов первого этапа экспериментальных исследований.....	269
4.3 Обоснование рациональных скоростных режимов работы дискового режущего инструмента при механическом разрушении прочных снежно-ледяных отложений.....	286
4.3.1. Обработка и анализ результатов второго этапа экспериментальных исследований.....	291
4.4. Оценка влияния температуры окружающей среды и разрушаемого материала на величину силы сопротивления прочных СЛО резанию дисковым инструментом.....	296
4.4.1. Обработка и анализ результатов третьего этапа экспериментальных исследований.....	300

4.5 Оценка степени влияния радиуса закругления рабочей (режущей) кромки дискового инструмента на силовые и энергетические показатели процесса разрушения льда таким инструментом.....	306
4.5.1. Обработка и анализ результатов четвертого этапа экспериментальных исследований.....	312
4.6 Экспериментальные лабораторные исследования процессов взаимодействия снегоочистительного оборудования отвального типа с уплотненным снегом.....	319
4.6.1. Обработка и анализ результатов пятого этапа экспериментальных исследований.....	323
4.7. Выводы по главе.....	331
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОЧНЫХ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕЗАНИЮ ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ .....	334
5.1. Краткое описание математической модели процесса взаимодействия дискового резца с разрушаемой средой .....	335
5.2. Методика расчета значений силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым инструментом.....	340
5.2.1. Основные рекомендации к расчету значений составляющих силы сопротивления прочных СЛЮ резанию дисковым резцом типа <i>A</i> в заблокированном режиме.....	340
5.2.2. Пример расчета значений составляющих силы сопротивления прочных СЛЮ резанию дисковым резцом типа <i>A</i> в заблокированном режиме.....	346
5.2.3. Пример расчета составляющих силы сопротивления прочных СЛЮ резанию дисковым резцом типа <i>A</i> в полублокированном режиме.....	349
5.3. Выводы по главе.....	352
ГЛАВА 6. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СНЕГООЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ОСНАЩАЕМОГО ДИСКОВЫМ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ.....	354
6.1. Применение метода измерительного контроля прочности (несущей способности) снежно-ледяных покрытий автодорог и аэродромов.....	354

6.2. Применение методики лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой с использованием измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда.....	355
6.3. Применение системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП-1.....	356
6.3.1. Применение метода «А».....	356
6.3.2. Применение метода «В».....	357
6.3.3. Применение метода «С».....	358
6.3.4. Применение метода «D».....	359
6.4. Применение метода измерительного контроля силы сопротивления твердых менее прочных сред механическому разрушению масштабными моделями отвальных рабочих органов с использованием измерительного преобразователя ИП-2.....	360
6.5. Применение метода градуировки тензометрических элементов.....	361
6.6. Использование результатов реализации методов измерительного контроля силовых параметров режущего инструмента применительно к конструкциям высокоэффективного снегоочистительного оборудования.....	362
6.6.1. Конструкция сменного рабочего органа отвального типа оснащенного дисковым режущим инструментом.....	362
6.6.2. Конструкция рабочего органа с дисковым инструментом для разрушения снежно-ледяного наката на дорожных покрытиях.....	371
6.7. Выводы по главе.....	382
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	385
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	390
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	413
Приложение А. Классификация и основные физико-механические свойства снежно-ледяных отложений.....	413
Приложение Б. Результаты испытаний твердомера на ледяных блоках .....	417

Приложение В. Основные технические и метрологические характеристики фольговых константановых одиночных тензорезисторов производства предприятия ООО УК «Сибтензоприбор» г. Кемерово.....	418
Приложение Г. Электрические параметры микросхем 140УД17.....	422
Приложение Д. Методика расчета усилий резания льда дисковым режущим инструментом.....	423
Приложение Е. Акты внедрения основных результатов диссертационной работы в производство и в учебный процесс.....	439

## Введение

**Актуальность темы исследования.** Транспортная система, объединяющая все регионы Российской Федерации, обеспечивает ее территориальную целостность, единство экономического пространства, а также является основой обеспечения внешнеэкономических связей нашего государства, его обороноспособности и национальной безопасности.

Доля автомобильного транспорта в общем объеме перевозок грузов составляет 56%, а в общем объеме пассажирских перевозок транспортом общего пользования – 60,8%. Общая протяженность российской сети автодорог составляет по состоянию на конец 2017 года составляет 1, 508 млн. км [1, 2]. Этого явно недостаточно для государства, с площадью занимаемых территорий более 17 млн. кв. км. Для сравнения: общая протяженность сети автодорог США составляет 6,6 млн.км, Китая – 4,1 млн. км, Индии – 4,7 млн. км [2].

В настоящее время в Российской Федерации реализуется Федеральная программа «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года», в соответствии с которой прогнозируется увеличение общей протяженности российской сети автодорог в 1,5 раза. Предполагаемый объем капитальных вложений на реконструкцию существующих и строительство новых автомобильных дорог в период 2013 – 2020 гг. составит 6601 млрд. рублей, а в период 2021-2030 гг. – от 21624 до 25957 млрд. рублей при инновационном варианте развития транспортной системы [1].

Другим стратегическим документом Российской Федерации в области транспорта является Федеральная целевая программа «Развитие транспортной системы России (2010 – 2020 годы)» в рамках которой заявлены подпрограммы «Автомобильные дороги» и «Гражданская авиация» [3].

Основными задачами подпрограммы «Автомобильные дороги» являются увеличение протяженности автомобильных дорог федерального значения, соответствующих нормативным требованиям, а также обеспечение их устойчивого и безопасного функционирования.

Подпрограмма «Гражданская авиация», наряду с прочими важнейшими задачами, предусматривает развитие сети крупных международных и внутренних узловых аэропортов, а также развитие региональных сетей аэропортов в т.ч. и в районах Севера, Сибири и Дальнего Востока.

Необходимость этого обусловлена ежегодно возрастающими объемами перевозок грузов и пассажиров, а также стремительным развитием предприятий нефтегазового комплекса в указанных регионах. В связи с этим запланировано восстановление и реконструкция сети старых и строительство новых аэродромов и вертолетных площадок как с искусственным, так и с грунтовым и ледовым покрытиями. При строительстве указанных наземных авиационных объектов будет одновременно расширяться и сеть автомобильных дорог местного значения, в том числе и автозимников, обеспечивающих движение автотранспорта, строительных, дорожных машин и механизмов при комплексном освоении новых территорий и обустройстве месторождений полезных ископаемых, в том числе нефтяных и газовых.

Мероприятия по активному освоению Арктических территорий Российской Федерации предписанные документом «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» [4] предусматривают модернизацию и дальнейшее развитие инфраструктуры арктической транспортной системы с целью эффективного использования и развития ресурсной базы Арктической зоны Российской Федерации для обеспечения потребностей нашей страны в углеводородных, водных биоресурсах и других видах стратегического сырья.

Расширению сети городских автомобильных дорог способствуют высокие темпы жилищного строительства.

Увеличение протяженности автомобильных дорог различных категорий, а также расширение сети действующих аэропортов повлечет за собой и увеличение объемов работ по содержанию этих объектов в пригодном для безопасной эксплуатации состоянии. Нормативными документами [5–12] рег-

ламентируются высокие значения основных показателей эксплуатационного состояния покрытий: чистоты, ровности, прочности (несущей способности), коэффициента сцепления и др., оказывающих решающее влияние на уровень безопасности дорожного движения, аварийности на автодорогах, травматизма участников дорожного движения, безопасности выполнения воздушными судами взлетно-посадочных операций.

Наиболее ответственным и сложным этапом сезонной эксплуатации дорог и аэродромов является зимнее содержание покрытий, которое может осуществляться двумя способами: первый – содержание покрытий *в накате* – под слоем выпадающего и искусственно уплотняемого снега и второй – предотвращение образования и устранение образовавшихся на искусственных покрытиях снежно-ледяных отложений (СЛО).

Физико-механические свойства этой природной среды: плотность, температура, прочность, сопротивление срезу, толщина слоя СЛО и др. имеют нестабильный характер и непрерывно изменяются во времени в зависимости от количества выпадающего снега, температуры и влажности воздуха, кристаллографической структуры СЛО, интенсивности и скорости движения транспортных средств и воздушных судов, величины уплотняющей нагрузки и др.

Эффективная организация мероприятий зимнего содержания дорожных и аэродромных покрытий в накате возможна только при осуществлении систематического оперативного контроля основных физико-механических свойств уплотненного снежного покрова, перечисленных выше, для чего необходимо использование современных средств и методов измерительного контроля. Наличие такой информации будет способствовать рациональному планированию мероприятий по поддержанию покрытий в пригодном для безопасной эксплуатации состоянии и продлению сроков сезонной эксплуатации данных техногенных объектов.

При зимнем содержании очищаемых покрытий наибольшую трудоемкость составляют мероприятия, по разрушению сильно уплотненных и проч-

ных СЛЮ с последующим их удалением которые в настоящее время в основном выполняются химико-механическим, тепловым и комбинированным методами (на автодорогах также применяется фрикционный метод борьбы с зимней скользкостью).

Термином «Прочные снежно-ледяные отложения (образования)», характеризуются снежно-ледяной накат и лед плотностью  $\rho = 0,6 - 0,9 \text{ г/см}^3$ , пределом прочности на сжатие  $\sigma = 1,8 - 2,8 \text{ МПа}$  при температуре окружающей среды от минус 2 до минус 10 °С, толщиной слоя  $h \leq 100 \text{ мм}$ , разрушение и удаление которых с очищаемых дорожных покрытий представляет наибольшую сложность при их зимнем содержании.

Данные методы оперативны и высокоэффективны, но имеют ряд существенных недостатков. Это необходимость приобретения и содержания специальных машин для распределения химических, фрикционных или комбинированных противогололедных материалов (ПГМ), большой сезонный расход ПГМ и их высокая стоимость, строительство и содержание складских помещений, вредное влияние ПГМ на покрытия, дорожные сооружения, окружающую среду и др.

Являющийся более экономичным и экологически чистым механический способ зимнего содержания широко используется при уборке свежеевыпавшего и слабоуплотненного снега. Разрушение сильно уплотненного снега существующими рабочими органами дорожных машин сопряжено с высокими затратами энергии, а при разработке прочных снежно-ледяных отложений использование механического способа ограничено в силу конструктивной непригодности этих рабочих органов к данному виду работ.

Адаптация существующего и разработка нового рабочего оборудования для механического разрушения прочных СЛЮ возможна за счет группового оснащения одиночным режущим инструментом, например дисковыми резцами.



Для определения на стадии проектирования рациональных конструктивных и эксплуатационных параметров разрабатываемого высокоэффективного снегоочистительного оборудования, при которых будет обеспечиваться механическое разрушение прочных СЛО с высокой производительностью при минимальной энергоемкости процесса, необходимо использование соответствующих средств и методов измерительного контроля силовых параметров рабочего инструмента и оснащаемых им рабочих органов.

Практическое использование таких рабочих органов позволит эксплуатационным организациям выполнять работы зимнего содержания дорог и аэродромов в установленные сроки и в полном объеме с обеспечением при этом нормативных значений основных показателей эксплуатационного состояния покрытий: чистоты, ровности, прочности, коэффициента сцепления. Это в свою очередь будет способствовать повышению уровня эксплуатационной и экологической безопасности данных техногенных объектов.

Высокие темпы роста объемов работ зимнего содержания дорожных и аэродромных покрытий, сжатые сроки реализации мероприятий, обеспечивающих их эксплуатационную и экологическую безопасность, обуславливают **актуальность** работ, направленных на решение **научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение** – создание методологии измерительного контроля силовых параметров рабочего инструмента и оборудования машин, предназначенных для высокоэффективного механического разрушения прочных снежно-ледяных отложений на очищаемых дорожных и аэродромных покрытиях.

Задача разработки и использования, нового метода и прибора оперативного измерительного контроля прочности (несущей способности) снежно-ледяного покрова дорог и аэродромов, позиционируется в рамках данной работы как вспомогательная, но дающая результаты, способствующие успешному решению основных задач, что также делает ее актуальной.

### **Степень разработанности темы.**

Существенный вклад в развитие теории и практики испытания твердых сред пенетрацией и зондированием внесли П.А. Ребиндер, Н.А. Цытович, В.Г. Березанцев, В.Ф. Разоренов, И.В. Крагельский, Г.Г. Болдырев, А.Н. Зеленин, В.И. Баловнев, И.П. Керов, В.З. Иофик, С. Киношита, В.С. Далин и др.

В работах вышеупомянутых авторов дается четкое толкование терминов «пенетрация» и «зондирование», а также двух видов зондирования: статического и динамического. Отмечается, что общим недостатком методов статического зондирования является необходимость приложения к зонду значительных усилий вдавливания для погружения его на заданную глубину, а также и для последующего извлечения зонда из тела исследуемого грунтового массива. Для успешной реализации этой группы методов необходимо применение установок большой грузоподъемности.

Методы динамического зондирования менее энергоемки и менее трудозатратны, а средства для реализации этой группы методов имеют меньшие массово-габаритные характеристики по сравнению со средствами статического зондирования.

В результате анализа литературно – патентных источников в данной области исследований, автором данной диссертации определены наиболее значимые технические решения, которые могли бы быть использованы в конструкции нового измерительного пенетрационного прибора – твердомера для оперативного полевого контроля прочности (несущей способности) снежно-ледяных дорожных и аэродромных покрытий.

Результаты анализа конструкций рабочих органов снегоуборочных дорожных машин, получивших наиболее широкое практическое применение, свидетельствуют о том, что наиболее эффективным оборудованием являются рабочие органы отвального типа, конструктивно приспособленные для разрушения снега большой плотности и прочности с последующим сдвигом продуктов разрушения в сторону. Однако при взаимодействии таких рабочих

органов с прочными снежно-ледяными отложениями при малой толщине их слоя (до 100 мм) процесс зарезания рабочей кромки ножа в разрушаемый массив с последующим заглублением крайне осложнен или невозможен вообще.

Опыт разработки, создания и эксплуатации рабочих органов интенсифицирующего действия, имеющий освещение в работах В.И. Баловнева, А.Н. Зеленина, А.П. Крившина, А.З. Шарца, В.Я Дворкового, Г.Г. Воскресенского и др., свидетельствует о том, что адаптация рабочих органов снегоочистительных машин к различным условиям эксплуатации может быть осуществлена путем их оснащения одиночным режущим инструментом, при его групповом размещении по схемам, обеспечивающим механическое разрушение разрабатываемых сред с малой энергоемкостью процесса и высокой производительностью оборудования.

В рамках данной диссертационной работы как способ адаптации существующих и разрабатываемых рабочих органов к высокоэффективному разрушению прочных снежно-ледяных отложений предлагается оснащение такого оборудования дисковым режущим инструментом.

Известно о широком применении такого инструмента в конструкциях сельскохозяйственных орудий, в проходческих комбайнах, а также в рабочих органах буровых, землеройных машин и на бульдозерных рыхлителях. Основные результаты исследований процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с упомянутыми средами изложены в работах А.С. Союнова, С.Н. Доздова, А.Ю. Несмияна, Л.И. Барона, Л.Б. Глатмана, С.Л. Загорского, А.А. Хорешка, Л.Е. Маметьева, А.Ю. Борисова, Р.Б. Желукевича и др.

Результаты исследований процессов взаимодействия различного снегоочистительного оборудования, рабочих органов ледорезных машин с разрушаемыми средами, опыт разработки такого высокоэффективного оборудования широко представлены в работах ученых Нижегородского государствен-

ного технического университета им. Р.Е. Алексеева: А.П. Куляшова, Ю.И. Молева, В.А. Шапкина, А.Р. Пуртова, А.М. Соколова, У.Ш. Вахидова и др.

В силу недостаточной изученности процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с прочными СЛЮ при их механическом разрушении, и связанных с этим затруднений в выполнении расчетов при проектировании новых и совершенствовании существующих конструкций снегоочистительного оборудования, с целью повышения их эффективности, имеет место необходимость проведения экспериментальных исследований.

Актуальной задачей этих исследований является установление закономерностей изменения силовых параметров разрабатываемого оборудования в зависимости от таких факторов как величина угла заострения дискового режущего инструмента, скорость резания, температура окружающей среды, влияющая на прочность разрушаемого материала, радиус закругления рабочей кромки, изменяющиеся параметры среза и др.

Успешная реализация на практике исследований такого рода, а также и регистрация, хранение и обработка результатов этих исследований, возможны только при использовании соответствующих методов и средств измерительного контроля исследуемых параметров.

**Цель исследования** – создание новой методологии измерительного контроля силовых показателей тангенциального дискового режущего инструмента, взаимодействующего с разрушаемой средой, отличающейся возможностью получения наиболее полной измерительной информации, для обоснования на стадии разработки, рациональных с позиции минимизации энергозатрат и повышения производительности конструктивных и эксплуатационных параметров такого инструмента и оснащаемого им оборудования.

**Идея работы** заключается в комплексном использовании для получения необходимой измерительной информации, результатов последовательной реализации каждого из системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым ин-

струментом с использованием измерительных преобразователей и установок, в основе функционирования которых лежит электротензометрический метод измерения сил.

### **Задачи исследований**

1. Разработать метод оперативного полевого контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых аэродромов и автодорог с использованием нового измерительного прибора – твердомера.

2. Разработать методику лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемой средой посредством использования новой измерительной установки – лабораторного стенда.

3. Обосновать конструкцию и основные параметры измерительного преобразователя – тензометрического элемента ИП-1 для работы в составе измерительных установок – стендов.

4. Разработать метод градуировки тензометрических элементов, реализуемый посредством использования новой измерительной установки – градуировочного стенда.

5. Осуществить построение информационно-измерительного комплекса для работы в составе измерительных установок: стендов, измерительных преобразователей.

6. Разработать систему методов измерительного контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию полноразмерным тангенциальным дисковым инструментом, реализуемых посредством использования измерительного преобразователя ИП-1 в составе лабораторного стенда.

7. Исследовать экспериментально, процесс взаимодействия полноразмерного тангенциального дискового режущего инструмента с прочными снежно-ледяными отложениями при различных значениях угла заострения

инструмента, скорости резания, температуры окружающей среды, влияющей на прочность разрушаемого материала и радиуса закругления рабочей кромки инструмента.

8. Разработать методику расчета сил, возникающих на дисковом резце при резании прочных снежно-ледяных отложений, при изменяющихся геометрических, технологических параметрах инструмента и параметрах среза.

#### **Методология и методы исследования.**

При решении поставленных задач применен комплексный подход, включающий научный анализ и обобщение опыта разработки, создания и эксплуатации ряда технических систем: измерительных приборов пенетрационного и зондирующего действия; измерительных установок и информационно-измерительных комплексов, реализующих электротензометрический метод измерения сил; рабочих органов, оснащаемых дисковым инструментом в составе машин, используемых в различных областях техники. В ходе исследования применялись методы численного математического моделирования исследуемых процессов, а также анализ напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов измерительных преобразователей средствами САПР. При обработке экспериментальных данных применялись методы математической статистики: регрессионный анализ, проверка гипотез, точечные и интервальные оценки параметров распределений. При выполнении теоретических и экспериментальных исследований использовались положения теории упругости, пластичности, хрупкого разрушения материалов, теоретической механики, динамики, электроники и электротехники.

#### **Научная новизна работы**

1. Разработан метод оперативного полевого контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых автодорог и аэродромов, реализуемый посредством использования нового измерительного прибора – твердомера, **отличающийся** от известных возможностью получения достоверных значений контролируемой величины и ис-

ключающий влияние на результаты измерений, массы выполняющего их оператора, а также силы трения скольжения в сопрягающихся элементах прибора.

2. **Впервые** использована измерительная установка – стенд позволяющая экспериментально получать значения силы сопротивления разрушаемой прочной среды резанию испытуемым инструментом, имеющим различные геометрические параметры при изменяющихся значениях скорости, глубины, шага резания и рациональном расходе полезного объема лабораторных образцов разрушаемой среды.

3. Разработана методика лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемой средой с использованием предлагаемой измерительной установки – лабораторного стенда, **отличающаяся** от известных возможностью получения измерительной информации, характеризующей силовые параметры режущего инструмента при изменяющихся значениях скорости, глубины и шага резания.

4. **Впервые** использован измерительный преобразователь ИП-1, имеющий обоснованные форму, размеры, выбор материала упругого элемента, мест размещения на нем тензорезисторов, позволяющий экспериментально получать достоверные значения силы сопротивления разрушаемой прочной среды резанию полноразмерным дисковым тангенциальным инструментом одновременно по трем составляющим: горизонтальной, вертикальной и боковой, при сведенном к минимуму их взаимном влиянии, посредством использования соответствующих конструктивных и схемных решений.

5. Разработан метод градуировки тензометрических элементов, реализуемый посредством использования предлагаемой в работе измерительной установки – стенда для градуировки тензометрических элементов, **отличающийся** от известных возможностью выполнения тарировки тензометрического элемента по трем составляющим силы сопротивления резанию с ми-

нимальными затратами труда и времени при использовании только одного эталонного прибора – динамометра растяжения.

6. Разработана «Система методов «А», «В», «С», «D» измерительного контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию полноразмерным дисковым тангенциальным инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП-1», **отличающаяся** от известных тем, что позволяет при последовательной реализации каждого из методов системы устанавливать закономерности изменения значений контролируемого параметра в зависимости от величины угла заострения инструмента, скорости резания, температуры окружающей среды, влияющей на прочность разрушаемого материала и радиуса закругления рабочей кромки инструмента.

7. **Впервые** экспериментально, с использованием, представленных в данной работе методов измерительного контроля и средств их реализации, установлены рациональные с позиции минимизации энергозатрат и повышения производительности, конструктивные и эксплуатационные параметры такого инструмента и оснащаемого им оборудования.

8. **Впервые** предложена методика расчета значений силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым режущим инструментом, позволяющая с учетом физико-механических свойств разрушаемой среды, изменяющихся глубине и шаге резания вычислять на стадии проектирования, значения контролируемой силы и определять рациональные конструктивные параметры дискового инструмента, обеспечивающие протекание данного процесса с минимальной энергоемкостью.

#### **Теоретическая значимость работы:**

– получено аналитическое выражение для расчета показателя прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых автодорог и аэродромов в зависимости от глубины погружения в испытуемый материал индентора конической формы, геометрические параметры которого также обоснованы в рамках данной работы;



– разработана методика расчета силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым инструментом, основой, которой являются аналитические выражения, позволяющие на стадии проектирования оборудования рассчитывать значения горизонтальной, вертикальной и боковой составляющих контролируемой силы;

– сформировано новое направление в области методов и средств измерительного контроля силовых параметров технических систем, в частности силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию полно-размерным тангенциальным дисковым инструментом, предполагающее получение наиболее полной измерительной информации с последующим ее использованием при разработке и создании высокоэффективного снегоочистительного оборудования, оснащаемого таким инструментом.

#### **Практическая значимость работы:**

– разработан комплекс средств измерительного контроля природной среды и изделий, методы и методики их использования, обеспечивающие получение достоверных значений показателя прочности (несущей способности) снежно-ледяных покрытий, а также значений силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию полноразмерным дисковым тангенциальным инструментом, имеющим различные геометрические параметры, при изменяющихся значениях скорости, глубины и шага резания;

– установлены экспериментально, закономерности изменения силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию полноразмерным дисковым режущим инструментом в зависимости от величины угла заострения инструмента, скорости резания, температуры окружающей среды, влияющей на прочность разрушаемого материала и радиуса закругления рабочей кромки инструмента при изменяющихся параметрах среза. Полученные результаты позволяют в лабораторных условиях, на стадии разработки, определять рациональные конструктивные и эксплуатационные параметры режущего инструмента и оснащаемого им снегоочистительного оборудования,

обеспечивающие механическое разрушение данной среды с малой энергоемкостью процесса при высокой производительности.

– создано новое структурное подразделение Сибирского федерального университета – учебно-научная лаборатория «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур», основой материально-технической базы, которой стали средства измерительного контроля природной среды и изделий, представленные в данной работе. Состав оборудования лаборатории позволяет реализовывать на ее базе большие программы исследований различной тематики в широком диапазоне температур, в рамках диссертационных и выпускных квалификационных работ обучающихся, разрабатывать новые лабораторные работы и практикумы для использования в учебном процессе.

#### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Результатами практической реализации метода оперативного полевого контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых аэродромов и автодорог с использованием нового измерительного прибора – твердомера **обеспечивается** получение достоверных значений контролируемой величины без влияния на результаты измерений, массы оператора и силы трения в сопрягающихся элементах прибора.

2. Результатами практической реализации методики лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемой средой с использованием новой измерительной установки – лабораторного стенда, **обеспечивается** возможность получения измерительной информации, характеризующей силовые параметры режущего инструмента, при изменяющихся значениях скорости, глубины и шага резания.

3. Использование измерительного преобразователя ИП-1 при соответствующем обосновании его формы, размеров, выбора материала упругого

элемента, мест размещения на нем тензорезисторов, **обеспечивается** получение достоверных значений силы сопротивления разрушаемой прочной среды резанию дисковым инструментом одновременно по горизонтальной, вертикальной и боковой составляющим.

4. Результатами реализации метода градуировки тензометрических элементов, с использованием нового градуировочного стенда, **обеспечивается возможность** выполнения тарировки тензометрического элемента по трем составляющим силы сопротивления резанию с минимальными затратами труда и времени при использовании только одного эталонного прибора – динамометра растяжения.

5. Результатами экспериментальных исследований процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с прочными снежно-ледяными отложениями при последовательной реализации каждого из методов «А», «В», «С», «D» Системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым инструментом с использованием ИП-1 **могут быть установлены** закономерности изменения значений контролируемого параметра в зависимости от величины угла заострения инструмента, скорости резания, температуры окружающей среды, и радиуса закругления рабочей кромки, с последующим определением **рациональных**, с позиции минимизации энергозатрат и повышения производительности, конструктивных и эксплуатационных параметров такого инструмента и оснащаемого им оборудования.

6. Методика расчета значений силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым режущим инструментом, **позволяет** с учетом физико-механических свойств разрушаемой среды, изменяющихся глубине и шаге резания вычислять на стадии проектирования, значения контролируемой силы и определять рациональные конструктивные параметры дискового инструмента, обеспечивающие протекание данного процесса с минимальной энергоемкостью.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций в диссертационной работе обеспечивается необходимым объемом экспериментальных исследований, удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментально полученных зависимостей, непротиворечивостью результатам исследований других авторов.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих мероприятиях:

1. Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: начало XXI века» (Красноярск, 2007);

2. Международной научно-технической конференции «Проблемы эксплуатации и обслуживания транспортно-технологических машин» (Тюмень, 2007);

3. V Всероссийской научно-технической конференции «Политранспортные системы» (Красноярск, 2007);

4. VII и VIII Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Механики – XXI веку» (Братск, 2008, 2009);

5. III Международной научно-практической конференции «Проблемы диагностики и эксплуатации автомобильного транспорта» (Иркутск, 2011);

6. VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука» (Красноярск, 2011);

7. LXV Всероссийской научно-технической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» с международным участием «Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России» (Омск, 2011);

8. I и II Международных научно-практических конференциях «Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса», (Новокузнецк, 2011, 2012);

9. VII Международной научно-практической конференции «Современные концепции научных исследований», (Москва, 2014);

10. XVI, XVII, XVIII и XIX международных научно-технических конференциях «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2015, 2016, 2017, 2018);

11. Международной научно-практической конференции к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ» «Архитектура, строит-во, транспорт» (Омск, 2015);

12. Международной научно-практической конференции «Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы» (Новокузнецк, 2017).

### **Реализация результатов работы**

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, используются на ГП КК «Дорожно-эксплуатационная организация» и в ООО «Аэропорт Емельяново» при модернизации существующего и разработке нового высокоэффективного снегоочистительного оборудования. Техническое решение – твердомер, внедрено в ФГКУ «СПСЧ ФПС по Красноярскому краю» для использования в рамках мероприятий технического обеспечения подразделений, базирующихся в районах с суровыми климатическими условиями, а также в ЗАО «Спецтехномаш», как изделие, имеющее потенциал для серийного производства.

Представленные в работе измерительные установки и преобразователи в составе новой учебно-научной лаборатории используются в учебном процессе Сибирского федерального университета.

**Личный вклад автора.** Автору принадлежат: постановка цели и формулирование задач научной работы, разработка методов измерительного контроля природной среды и изделий, создание и ввод в эксплуатацию ряда

средств реализации указанных методов, формулирование тем и разработка методики экспериментальных исследований, организация и личное участие в их проведении, математическая и статистическая обработка экспериментальных данных, формулирование основных выводов и рекомендаций.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 65 печатных работах, из них 4 монографии, 17 статей, опубликованных в изданиях, входящих в перечень ВАК, 36 работ в материалах международных и всероссийских конференций, а также 8 патентов РФ на изобретение теме диссертации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 214 наименований и шести приложений. Основная часть работы изложена на 412 страницах машинописного текста. Работа содержит 139 рисунков и 43 таблицы.

## ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 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 снегопереноса [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].

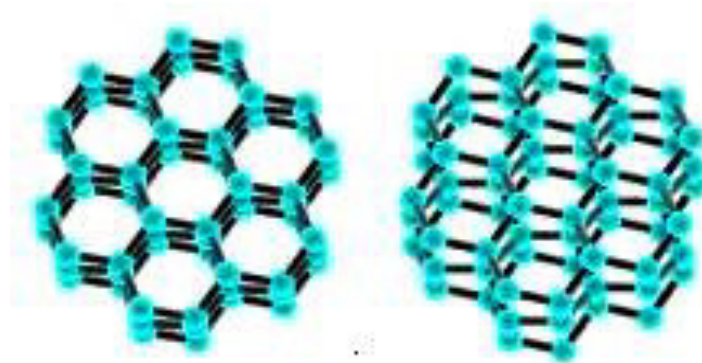


Рисунок 1.1. – Вид кристаллической решетки льда

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 свежесвыпавшего снега может изменяться от 0,06 до 0,20 г/см<sup>3</sup>. 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/см<sup>3</sup>.

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/см<sup>3</sup>. 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 матовой белой шероховатой корки толщиной до 10 мм и более. Отложения стекловидного льда имеют плотность от 0,7 до 0,9 г/см<sup>3</sup>, 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/см<sup>3</sup>.

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 СЛЮ 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 *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/см<sup>3</sup>.

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 г/см<sup>3</sup> 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 – 0,65 г/см<sup>3</sup> 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 ÷ 0,9 г/см<sup>3</sup> [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 СЛЮ 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 (рисунок 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 диссертационной работы СЛО рассматриваются автором 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 (твёрдостью)* снега, которая зависит от его плотности и температуры. Под *твёрдостью* понимается способность материала сопротивляться проникновению в него другого, не получающего остаточных деформаций, тела [16, 52].

*Примечание: 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  $\rho$  – плотность снега в долях единицы,

$t$  – температура снега без учета знака, °C

Например, при плотности снега в покрытии  $\rho = 0,4 \text{ г/см}^3$  и температуре снега  $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , 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 (рисунок 1.2).

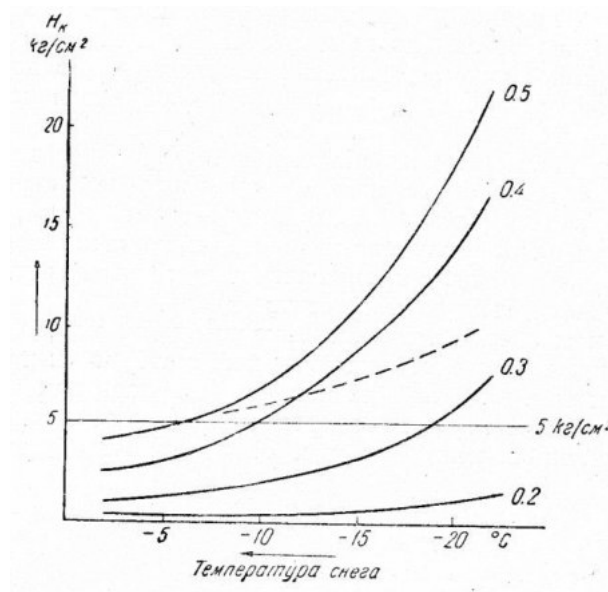


Рисунок 1.2. – Зависимость твердости снега от температуры и плотности (пунктиром показана кривая для перемешанного снега, плотностью  $0,5 \text{ г/см}^3$ )

Для плотности  $0,5 \text{ г/см}^3$  дана пунктирная кривая, относящаяся к неперемешанному снегу. Очевидно, что при температуре  $t = -20 \text{ }^\circ\text{C}$  твердость неперемешанного 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. Шалмана, приведены в табл. 1.1 [52].

Таблица 1.1. – Твердость снега в зависимости от его состояния и плотности

Вид снега	Плотность снега, $\text{г/см}^3$	Твердость снега, $\text{кг/см}^2$ (при температуре от $-1$ до $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ )
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 (таблица. 1.2) [11].

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

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 (таблица 1.3).

Таблица 1.3. – Количество воды для смачивания уплотненного снега

Требуемая плотность снега в полотне, $\text{г/см}^3$	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/м<sup>2</sup>.

Операции взрыхления и перемешивания снега способствуют интенсивному смещению снежных кристаллов друг относительно друга и заполнению пустот, имеющих между ними, что способствует увеличению плотности и прочностных характеристик 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 <sup>3</sup>	0,02 – 0,04	0,03 – 0,06	0,06 – 0,09
Начальная плотность лежалого снега, г/см <sup>3</sup>	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/см<sup>3</sup>, 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 данной диссертационной работы, 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 покрытиях, 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 описания каждого вида структуры льда. Описание насчитывает 11 видов структур, краткие характеристики которых приведены в таблице П. А.1.

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

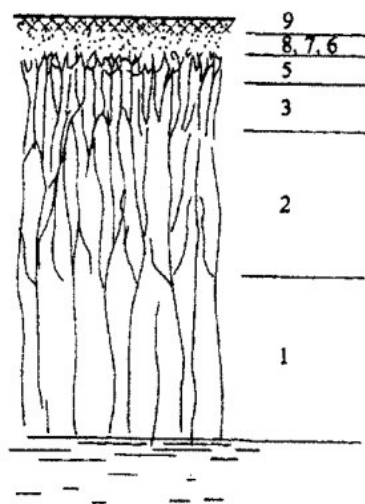


Рисунок 1.3. – Совокупность структур льда в вертикальном сечении ледяного покрова большинства рек и озер

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, адгезию льда к искусственным покрытиям, абразивность, теплоемкость, теплопроводность, скрытую теплоту 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 силовые параметры этого процесса, подлежащие контролю в соответствии с задачами данной диссертационной работы.

Влияние же на характер исследуемого процесса, удельного веса (плотности) и пористости льда, его прочностных свойств (пределов прочности при сжатии, растяжении, изгибе и срезе), вязкости льда, коэффициента внешнего трения, 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  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $937,7 \text{ кг/м}^3$  при температуре минус  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . 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  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  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 таблице 1.5.

Таблица 1.5. – Зависимость удельного веса льда от его пористости

Пористость, %	89	78	67	56	46	35	24	13	2
Плотность, $\text{т/м}^3$	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 кг/м<sup>3</sup> [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 льда, 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, структура льда, 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)  $\sigma$  – 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  $\sigma_p$  льда на растяжение при кратковременном приложении нагрузки к образцам примерно одного размера приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6. – Прочность льда на растяжение в зависимости от его температуры

Показатели	Пресноводный лед			Морской лед	
	$t, ^\circ\text{C}$	$t, ^\circ\text{C}$	$t, ^\circ\text{C}$	$t, ^\circ\text{C}$	$t, ^\circ\text{C}$
$t, ^\circ\text{C}$	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  $\sigma_p$  от скорости деформации  $V_d$  образца выражается в уменьшении значений  $\sigma_p$  в 6 – 7 раз при увеличении скорости  $V_d$  от 2,5 до 50 см/мин. Установлено, что при растяжении вдоль осей кристаллов значение  $\sigma_p$  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

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

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

Расчет прочности на изгиб для консольной балки производится по формуле

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

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

Значения прочности пресноводного льда на изгиб по данным работы [56] приведены в таблице П. А.2.

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 испытываемых 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  $\sigma_{сж}$  увеличивается с понижением температуры льда и имеет большие значения при нагрузке, приложенной перпендикулярно к оси кристаллов. Величина  $\sigma_{сж}$  уменьшается при скорости нагружения  $V_d > 0,2$  МПа/с и при увеличении размеров образцов. Отмечено увеличение  $\sigma_{сж}$  с ростом  $V_d$  при малых ее значениях и последующее медленное увеличение прочности с возрастанием  $V_d$ . Данные о прочности льда на сжатие, приведенные в работе [56], представлены в таблице П. А.3., из которой следует, 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  $\sigma_c$  (МПа) приведены в таблице П. А.4.

### 1.2.3. Вязкость льда

Вязкость характеризует сопротивление твердого тела развитию остаточной деформации под действием внешних сил. Количественно коэффициент вязкости (коэффициент внутреннего трения)  $\eta$  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  $\varepsilon$ , равной единице [56]:



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

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

Статическими методами коэффициент вязкости льда определялся многими авторами при деформациях кручения, сдвига, растяжения, сжатия и изгиба. Основные результаты этих измерений представлены в табл. П. А.5.

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. 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]. В таблице П.А.5. для сравнения приведены значения динамической вязкости.

#### 1.2.4. Коэффициент внешнего трения льда

При взаимодействии режущего инструмента рабочих органов спецмашин со льдом происходит трение стали по льду. На рисунке 1.4 показана зависимость коэффициента динамического трения стали  $\mu_{\text{ст}}$  от удельной нагрузки при различных температурах льда и скорости скольжения 0,139 м/с. Из графиков следует, что для температур до минус 20 °С при малых удельных давлениях величина  $\mu_{\text{ст}}$  с увеличением удельного давления уменьшается. При дальнейшем росте удельного давления значение  $\mu_{\text{ст}}$  становится постоянным. При более низких температурах (близких к минус 100 °С) с увеличением удельного давления  $\mu_{\text{ст}}$  продолжает снижаться.

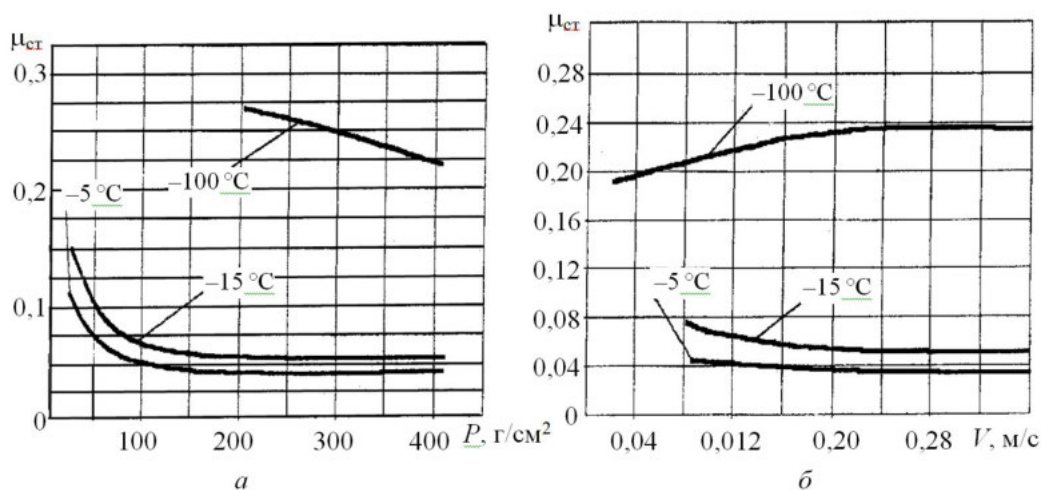


Рисунок 1.4. – Зависимость коэффициента динамического трения стали по льду при удельной нагрузке  $0,2 г/см^2$ :  $a$  – от удельной нагрузки;  $b$  – от скорости скольжения

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 рисунке 1.5.

Если плоскость сдвига совпадает с базисной плоскостью (рисунке 1.5, *a*), 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 (рисунок 1.5 *б*), то элементарные пластинки кристалла изгибаются. При этом имеют место небольшие относительные сдвиги пластинок по базисным плоскостям. После того как деформирование напряжения в элементарных пластинках достигнут некоторого предела, последние ломаются. Деформация является упругопластической и при возрастании деформирующего напряжения сменяется разрушением.

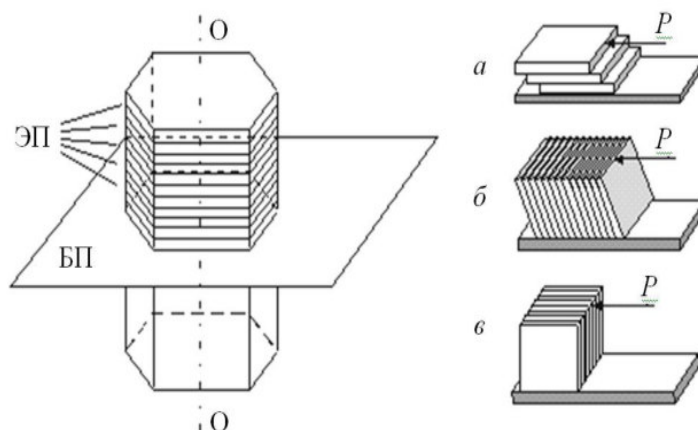


Рисунок 1.5. – Основные направления сдвигающих усилий относительно базисной плоскости кристалла: *a* – плоскость сдвига совпадает с базисной плоскостью; *б* – сдвигающее усилие направлено перпендикулярно базисной плоскости; *в* – направление сдвигового усилия совпадает с базисной плоскостью; ЭП – элементарные 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 (рисунок 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].

#### 1.4. Известные методы и средства контроля основных эксплуатационных показателей автомобильных дорог и аэродромов при их зимнем содержании под слоем уплотненного снега

Зимнему содержанию под слоем выпадающего и искусственно уплотняемого снега подлежат зимние автодороги – автозимники, дороги и аэродромы с твердыми искусственными покрытиями, грунтовые аэродромы.

Автозимники – дороги с полотном и дорожной одеждой из снега, льда и мерзлого грунта. Классификация автозимников представлена на рисунке 1.6. Регулярные и временные автозимники в свою очередь делятся на три категории в соответствии с данными таблицы 1.7.

Ведомственными строительными нормами [8] предусмотрены тридцать конструктивных решений (типов) автозимников. Выбор типа автозимника определяется рядом факторов. Это природно-климатические условия района строительства: интенсивность снегопадов, частота и интенсивность метелей; изменения температуры и влажности воздуха; ледовый режим водоемов: сроки ледостава и ледохода, толщина естественного ледового покрова, наличие наледей, торосов, полыней.



Рисунок 1.6. – Классификация автозимников

Таблица 1.7. – Категории регулярных и временных автозимников

Показатели	Категория автозимника		
	I	II	III
Грузонапряженность перспективная (на 3 – 5 лет), тыс. т нетто в год	$\geq 100$	50÷100	$\leq 50$
Расчетная интенсивность движения, приведенная к автомобилю грузоподъемностью 5 т, авт/сут	$\geq 500$	150÷500	$\leq 150$

Также учитывается характер рельефа местности, ее почвенно-грунтовые условия, наличие болот, мари, термокарстовых процессов и т.д.

Сухопутные автозимники могут устраиваться на прочном грунтовом основании, на вечномерзлых грунтах или торфяниках, а также на болотах и мари. Ледовые автозимники и переправы прокладываются по льду рек, озер, морей, через водотоки на сухопутных автозимниках и постоянных автодорогах.

На завершающей стадии строительства и в процессе эксплуатации автозимников *контролируют ряд показателей их качества*, обеспечивающих безопасную эксплуатацию этих объектов. Это ровность и чистота снежных (снежно-ледяных) покрытий, их твердость (прочность), коэффициент сцепления шин автомобилей с покрытием, плотность и температура снега в слое износа, *несущая способность оснований* и др. Последний показатель является наиболее важным для автозимников, проложенных по болотам, мари и торфяникам, а также для ледовых автозимников и переправ.

Для автозимников, проложенных по болотам и мари, несущая способность определяется толщиной промороженного слоя болота, а для автозимников на торфяном основании – шириной и толщиной этого промерзающего основания.

Несущая способность ледовых автозимников и переправ определяется в основном толщиной естественного слоя ледового покрова, постепенно нарастающего в течение зимнего периода. Наряду с этим параметром одновременно контролируют и глубину водотока (подледного слоя воды).

На сухопутных автозимниках, имеющих прочное грунтовое основание, основание на вечномерзлых грунтах и торфяниках, а также на автозимниках с продленными сроками эксплуатации на мерзлых грунтовых основаниях сооружают снежное или снежно-ледяное дорожное полотно одним из следующих методов:

- послойное уплотнение выпадающего снега на подготовленном грунтовом основании в течение всего зимнего периода;

- устройство на подготовленном грунтовом основании снежных насыпей в начале зимы с последующим регулярным уплотнением выпадающего снега в течение всего зимнего периода;

- прокладка с использованием специальных многофункциональных машин (например, фрезерно-вибрационных снегоуплотняющих) временных автозимников по снежной целине без подготовки грунтового основания.

В этих случаях, несущая способность автозимников определяется преимущественно *прочностью* снежного или снежно-ледяного дорожного полотна. Наряду с данным параметром *контролируют* толщину снежного покрытия и плотность снега в нем, а также температуру окружающего воздуха и снега в покрытии.

Выбор способов уплотнения снега на полотне автозимников, а также используемых для этого средств механизации работ определяется в основном изначальной толщиной снежного покрова, нормативными значениями плотности снежного покрова после уплотнения и температурой воздуха в районе строительства.

Послойное уплотнение выпадающего снега на подготовленном грунтовом основании в течение всего зимнего периода (постепенное наращивание полотна) обеспечивается следующими мероприятиями.

При толщине снежного покрова до 10 см уплотнение снега осуществляется под воздействием колес движущихся автомобилей, а планировка снежного полотна осуществляется основным отвалом

автогрейдера или волокушами-гладилками.

При толщине слоя снега более 10 см его уплотнение рекомендуется осуществлять прицепными катками на пневматических шинах массой 10 – 15 т, пригруженными трейлерами, многополосными санями или волокушами-гладилками из труб за 1 проход по одному следу по всей ширине полотна автозимника. Доуплотнение снежного полотна происходит под воздействием колес движущихся автомобилей.

При толщине слоя снега более 25 см уплотнение производится после предварительного рыхления и перемешивания снега навесным тракторным оборудованием, оснащенным ребристыми металлическими катками. Нормативные значения плотности снега в слое при послойном наращивании снежного полотна в течение зимнего периода приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8. – Нормативные значения плотности снега в слое при послойном наращивании снежного полотна

Категория автозимника	I	II	III
Плотность снега в слое, г/см <sup>3</sup>	0,6	0,6	0,55

Общую толщину уплотненного снежного покрова на полотне автозимников, как правило, ограничивают значением 30 см с целью предотвращения образования на нем выбоин, ям, ухабов и прочих деформаций.

Формирование снежных насыпей на подготовленном грунтовом основании осуществляется при достаточной толщине снежного покрова (более 30 см) бульдозерами путем поперечной или продольной надвигки снега послойно или набрасыванием снега в тело насыпи шнекороторными снегоочистителями. Сформированную снежную насыпь толщиной 30 – 40 см планируют и частично уплотняют опущенным отвалом бульдозера при его движении задним ходом, а затем уплотняют катками на пневматических шинах за 2 – 3 прохода по одному следу. Плотность снега для нижних слоев



насыпи – не менее  $0,5 \text{ г/см}^3$ , для верхних – не менее  $0,6 \text{ г/см}^3$ .

При выборе средств механизации работ и уточнении технологии уплотнения снега руководствуются следующими положениями:

– плотность снега до  $0,45 \text{ г/см}^3$  достигается уплотнением его опущенным отвалом бульдозера при его движении задним ходом;

– плотность снега до  $0,55 \text{ г/см}^3$  (при температуре воздуха, до минус  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и до  $0,5 \text{ г/см}^3$  (при температуре ниже минус  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) достигается его уплотнением катками на пневматических шинах;

– плотность снега более  $0,6 \text{ г/см}^3$  достигается дополнительным поливом полотна водой после уплотнения (таблица 1.3).

*Необходимую прочность уплотненный снежный покров набирает в течение некоторого времени, необходимого для смерзания снега.* Например, по снежному полотну, плотностью  $0,5 \text{ г/см}^3$  движение механических транспортных средств допускается в тех случаях, когда оно после уплотнения выдержано при температуре воздуха минус  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  – не менее 24 часов, а при температурах ниже минус  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  – не менее 15 часов.

При строительстве временных автозимников на снежной целине без подготовки грунтового основания рекомендуется использование специальных фрезерно-вибрационных снегоуплотняющих машин, выполняющих за один проход рыхление и перемешивание снега, прогрев снежной массы и ее виброуплотнение [17–19]. Оптимальный режим уплотнения снега такими машинами выбирается в каждом конкретном случае индивидуально, в зависимости от состояния уплотняемого снега (начальная плотность, толщина слоя, температура воздуха и снега) по результатам пробного уплотнения.

Под слоем уплотненного снега толщиной до  $0,05 \text{ м}$ , могут содержаться и ледовые (не усиленные) автозимники. Слой снега в данном случае, предохраняет ледовый покров от морозного растрескивания, механического износа, обеспечивает лучшее сцепление колес с покрытием автозимника.

#### **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**

Материалы данного раздела относятся к сухопутным автозимникам, устроенным на прочном грунтовом основании, основании на вечномерзлых грунтах и торфяниках, а также к автозимникам с продленными сроками эксплуатации на мерзлых грунтовых основаниях, имеющим снежное или снежно-ледяное дорожное полотно. Это обусловлено тем, что свойства такого полотна аналогичны свойствам уплотненного снежного покрова на дорогах с искусственным покрытием и грунтовых аэродромах при их зимнем содержании под слоем уплотненного снега. Упомянутые типы дорожных полотен имеют общие показатели качества, для контроля которых могут использоваться одинаковые *средства и методы*. Показатели качества покрытий автозимников, проложенных по болотам и мариам, торфяникам, а также ледовых автозимников и переправ оцениваются иначе, и в дальнейшей работе не рассматриваются.

Основными *показателями качества* снежных (снежно-ледяных покрытий) автозимников являются плотность и температура снега в покрытии, толщина покрытия, прочность снежного (снежно-ледяного) дорожного полотна, определяющая его несущую способность.

*Плотность снега* определяют весовым методом с использованием плотномеров-снегомеров [8] или пружинного плотномера [11] (рисунок 1.7).

Метод измерения плотности снега плотномером включает следующие этапы.

1. На участке покрытия, подлежащем контролю, с помощью ножа-лопатки выравнивается площадка размером  $0,2 \times 0,2$  м. Выравнивание производится за счет срезания снега, без его уплотнения.

2. На подготовленную поверхность заостренной кромкой устанавливается мерный стаканчик и заглубляется в снег до соприкосновения днища стаканчика с выровненной поверхностью снега. Через отверстие в днище стаканчика контролируется окончание погружения (рисунок 1.8). В процессе заглубления контролируют сохранение вертикального положения стаканчика относительно поверхности площадки.

3. С помощью ножа-лопатки стаканчик с пробой откапывают, осторожно извлекают из снега, переворачивают вниз дном и выравнивают поверхность снега заподлицо с режущими кромками стаканчика.

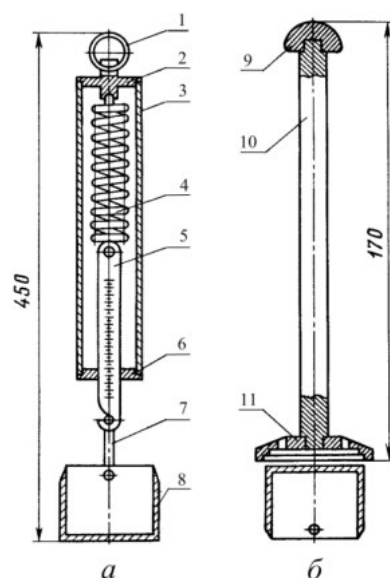


Рисунок 1.7. – Пружинный плотномер: *а* – пружинные весы с мерным стаканчиком; *б* – пробоотборник; 1 – кольцо; 2 – втулка; 3 – корпус; 4 – пружина; 5 – шкала; 6 – направляющая шкала; 7 – дужка; 8 – мерный стаканчик; 9 – головка; 10 – корпус пробоотборника; 11 – опорная площадка

4. Производится взвешивание отобранной пробы уплотненного снега при помощи пружинных весов.

Взвешивание пробы в полевых условиях может осуществляться при помощи современных лабораторных электронных весов (например, ПВм –

3/32), имеющих автономное электрическое питание и возможность работы при низких температурах воздуха [46].

Плотность снега вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1.5)$$

где –  $M$  масса пробы, г;  $V$  – объем пробы снега, равный объему мерного стаканчика, см<sup>3</sup>

Например, опыт по измерению плотности снежного покрова, проведенный автором 14.03.2015, дал следующие результаты. При температуре окружающей среды минус 2 °С, влажности воздуха 80%, объеме  $V$  внутреннего пространства мерного стаканчика 217,8 см<sup>3</sup>, масса  $M$  снега в этом объеме составила 108 г, а значение плотности снега, в соответствии с выражением (1.1):  $\rho = 108/217,8 = 0,496$  г/см<sup>3</sup>. Внутренний диаметр мерного стаканчика составляет 68 мм, его глубина (от режущей кромки до дна) – 60 мм.

Взвешивание проб, отобранных на исследуемом покрытии, может осуществляться и в лабораторных условиях [13]. Для этого, пробы снега, отбираемые при помощи мерных стаканчиков, извлекают из них и помещают в сосуды с плотно закрывающимися крышками. В лабораторных условиях определяют массу  $M_1$  сосуда с водой, образовавшейся в результате таяния снега, и массу  $M_2$  пустого сосуда с крышкой. В этом случае значение массы  $M$  пробы снега в выражении (1.5) определяется разностью значений  $M_1$  и  $M_2$ .

Пробы для контроля плотности, в количестве не менее трех, отбирают по оси *дорожного полотна* и в 1,5 м от кромок его проезжей части: для снежного полотна, устроенного методом послойного уплотнения – через каждые 250-300 м, для снежного полотна, устроенного на снежной насыпи – через каждые 100м.

Значения плотности снега, замеренные при контроле, должны

соответствовать данным таблицы 1.8 для снежного полотна, устроенного методом послойного уплотнения.

Плотность снега в нижних слоях насыпи должна составлять не менее  $0,5 \text{ г/см}^3$ , а в верхних – не менее  $0,6 \text{ г/см}^3$ .



Рисунок 1.8. – Мерный стаканчик плотномера: *а* – внешний вид;  
*б* – отбор пробы уплотненного снега

Измерения прочности и относительной плотности снежного покрытия *летной полосы* необходимо производить на концевых участках по оси грунтовой взлетно-посадочной полосы (ГВП) через 50 м, а на средних участках через 200 м.

Измерение *температуры* снежного покрова может производиться ртутным термометром, например ТМЗ-1 по ГОСТ 112 – 78, с ценой деления  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , и пределами измерения от минус 35 до  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  [14, 15]. Контрольные измерения температуры уплотненного снега рекомендуется производить по оси *летной полосы* через  $200 \div 300 \text{ м}$  путем погружения термометра на половину толщины уплотненного снега. При толщине уплотненного снега менее 8 см температура снега *не измеряется*, а принимается равной температуре воздуха [11].

Полевой контроль прочности снежного (снежно-ледяного) полотна автозимников осуществляют при его толщине *более 10 см* [8]. Сначала замеряют толщину  $H_{\text{п}}$  (см) снежного (снежно-ледяного) покрытия. Затем с

помощью ударника-зонда Союздорнии (рисунок 1.9) определяют количество ударов гири, необходимое для полного погружения наконечника прибора в верхний и нижний (соприкасающийся с основанием) слои снежного полотна.

Вычисляют значение параметра  $m$  в соответствии с выражением

$$m = 0,6 \frac{N_{\text{в}}}{N_{\text{н}}} \quad (1.6)$$

где  $N_{\text{в}}$  – количество ударов ударника-зонда для верхнего слоя полотна;

$N_{\text{н}}$  – количество ударов ударника-зонда для нижнего слоя полотна.

Далее вычисляют отношение  $r/H_{\text{п}}$  (где  $r$  – радиус круга, равновеликого отпечатку колеса расчетного автомобиля (таблица 1.9);  $H_{\text{п}}$  – толщина снежного полотна (покрытия)).

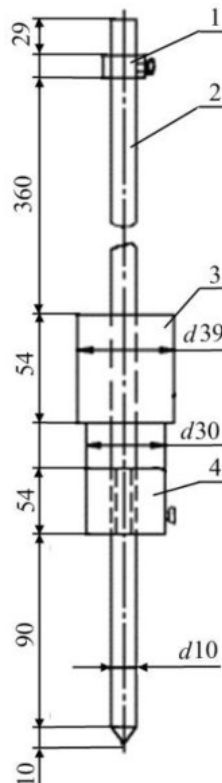


Рисунок 1.9. – Ударник-зонд Союздорнии: 1 – фиксирующая шайба; 2 – стальной стержень; 3 – гиря; 4 – упорная шайба

По номограмме (рисунок 1.10) находят допустимую удельную нагрузку на полотно с учетом интенсивности движения автомобилей следующим образом.

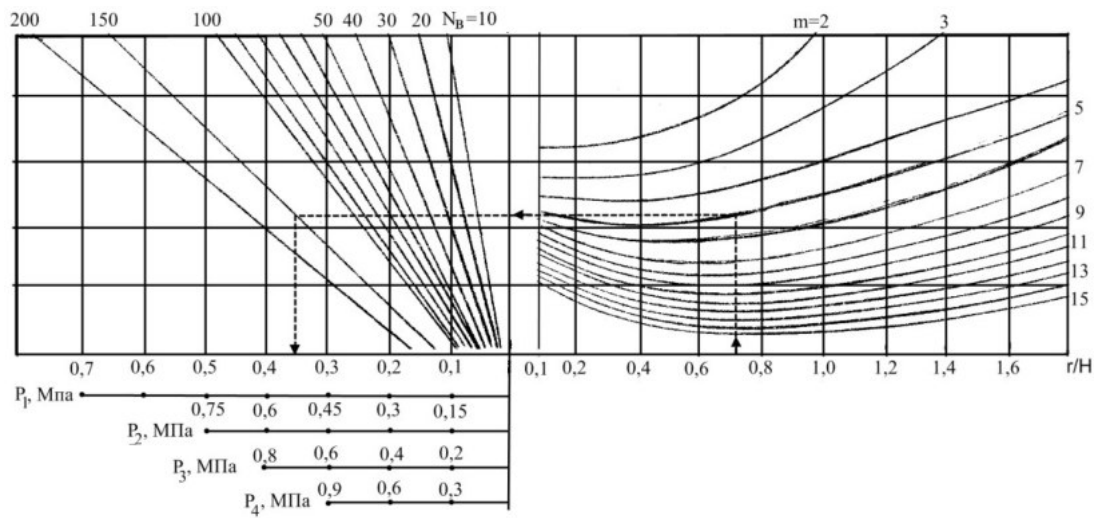


Рисунок 1.10. – Номограмма для определения допустимого давления  $P$  на снежное полотно:  $P_1$  – при интенсивности движения свыше 500 авт/сут;  $P_2$  – до 500 авт/сут;  $P_3$  – до 100 авт/сут;  $P_4$  – для единичных автомобилей

Из точки, соответствующей вычисленному значению  $r/H_{п}$  в правой части номограммы (рисунок 1.10) проводят вертикаль до пересечения с кривой, соответствующей рассчитанному значению  $m$ . Точку пересечения сносят горизонтальной линией на левую часть номограммы до пересечения с соответствующим лучом  $N_{ав}$ . Из полученной точки опускают вертикаль на одну из горизонтальных осей  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  или  $P_4$  в зависимости от расчетной интенсивности движения и устанавливают значение допустимой удельной нагрузки на снежное полотно.

Если определенные по номограмме удельные нагрузки меньше расчетных значений более чем на 10 %, необходимо предпринять меры по усилению полотна автозимника, например, оледенением его верхнего слоя или другие, в соответствии с рекомендациями документа [8]. При этом необходимо регулировать движение, пропуская на первом этапе (в период формирования снежного полотна) более легкие автомобили и в меньшем количестве.

Таблица 1.9. – Основные характеристики транспортных средств, пропускаемых по автозимникам

Марка автомобиля	Грузо-подъемность, т	Масса с полной нагрузкой, т	Наибольшая статическая нагрузка на одиночную ось, кН	Среднее удельное давление от заднего колеса на покрытие МПа	Габаритная ширина автомобиля, м	База автомобиля, м	Расчетный диаметр следа колеса, см
Грузовые автомобили							
УАЗ-451М	1,0	2,70	15,0	0,27	2,04	2,30	27
ГАЗ-53А	4,0	7,40	56,0	0,53	2,38	3,70	26
ЗИЛ-130	5,0	9,50	69,6	0,60	2,50	3,80	27
ЗИЛ-133Г1	8,0	15,18	55,0 × 2	0,35	2,50	3,71	32
Урал-4320	5,0	13,44	45,4 × 2	0,32	2,50	3,53	30
КрАЗ-257Б1	12,0	22,60	90,0 × 2	0,50	2,65	5,05	34
МАЗ-500А	8,0	14,82	100,0	0,65	2,50	3,95	31
МАЗ-516Б	14,5	23,70	90,0 × 2	0,55	2,50	3,85	32
КамАЗ-5320	8,0	15,30	54,6 × 2	0,45	2,50	3,19	28
Магirus-232Д	11,5	19,00	130,0	0,60	2,49	4,60	37
Автомобили-самосвалы							
КрАЗ-256Б1	12,0	23,36	94,0 × 2	0,50	2,64	4,08	40
КамАЗ-5511	10,0	18,92	72,2 × 2	0,45	2,50	2,84	32
Татра-138S1	12,7	22,54	88,2 × 2	0,60	2,45	3,69	31
Татра-148S1	15,0	26,00	100,0 × 2	0,60	2,50	3,69	33
Магirus-290Д-26К	14,5	26,00	100,0 × 2	0,60	2,49	3,85	33
Седелные тягачи							
КамАЗ-5410	8,1	15,12	54,8 × 2	0,45	2,48	2,84	28
Урал-377СН	7,5	14,55	54,6 × 2	0,36	2,50	3,53	31
КрАЗ-258Б1	12,0	21,90	87,4 × 2	0,50	2,63	4,08	33
ЗИЛ-131В	5,0	11,70	40,6 × 2	0,30	2,42	3,35	29
КАЗ-608В	4,5	8,72	59,2	0,60	2,36	2,90	25
Внедорожные автомобили							
БелАЗ-540А	27,0	48,00	324,0	0,50	3,48	3,55	64
БелАЗ-548А	40,0	68,80	456,0	0,56	3,79	4,20	72
БелАЗ-549	80,0	148,30	1006,4	0,56	5,36	5,45	107
МАЗ-7310	20,0	44,00	110,0	0,38	3,05	7,70	33

Использование данного средства и метода измерительного контроля сопряжено с необходимостью выполнения в полевых условиях, при низких температурах воздуха большого количества измерений контролируемой величины и действий по регистрации результатов этих измерений, а также необходимостью выполнения большого количества расчетных действий с обращением к номограмме и другим справочным материалам.



Следствием этого являются *существенные затраты рабочего времени оператора и низкая точность измерений.*

При зимнем содержании грунтовых аэродромов подготавливаемых методом уплотнения выпадающего на покрытия снега, для контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова рекомендуется применять твердомер НИАС [11, 16] (рисунок 1.11), состоящий из вертикальной доски с направляющими скобами и шкалой, по которой определяют глубину погружения конуса.

Внизу доски закреплена площадка для ступни. Конус твердомера высотой 130 мм и основанием 80 мм крепится к площадке для ступни. Вертикальная стойка в ее нижней части соединена с квадратной пластиной, являющейся опорной поверхностью, соприкасающейся со снегом. В таком положении стойка и прямоугольная доска зафиксированы шпилькой.

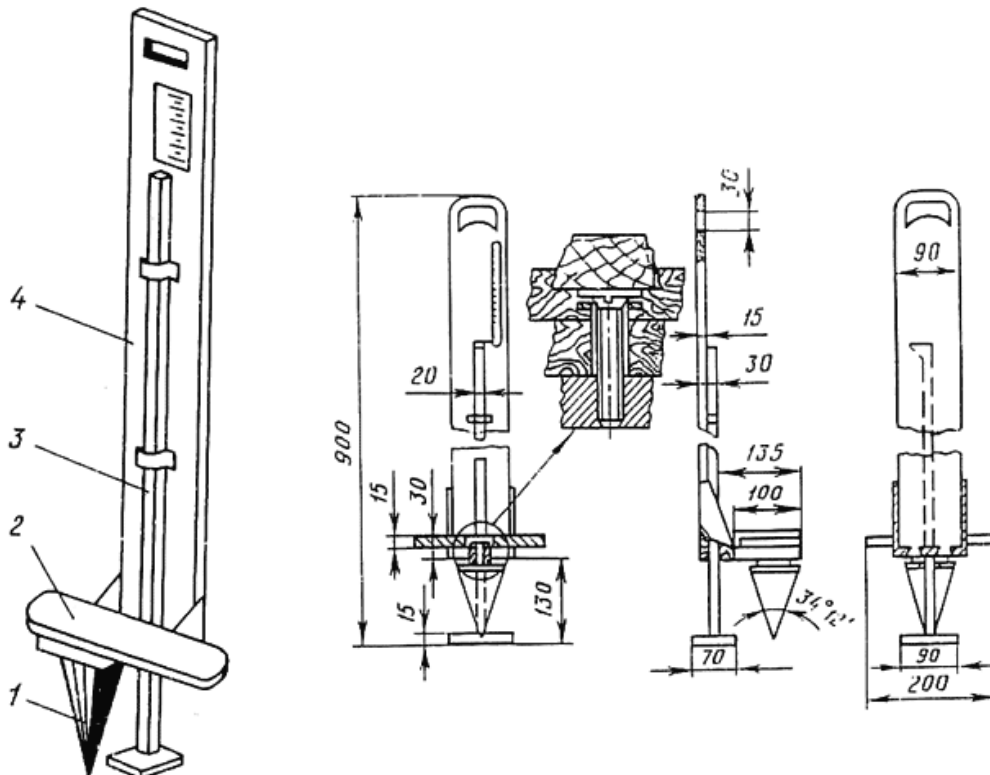


Рисунок 1.11. – Твердомер НИАС: 1 – конус; 2 – площадка для ступни; 3 – вертикальная стойка; 4 – вертикальная доска-упор

Для определения прочности снежного покрова необходимо поставить твердомер на снег, вынуть шпильку, скрепляющую стойку с доской-упором, удерживая рукой доску-упор, затем, став одной ногой на площадку для ступни, перенести тяжесть тела на нее и записать показания глубины погружения конуса на шкале.

Прочность уплотненного снега определяется из выражения

$$b = 3.362P/h^2 \quad (1.7)$$

где  $b$  – прочность снега, кгс/см<sup>2</sup>;

$P$  – нагрузка на конус (вес оператора), кг;

$h$  – глубина погружения конуса, см.

Графики зависимости прочности уплотненного снега от глубины погружения и веса испытателя приведены в работе [11].

Полученные значения прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова сравнивают с нормативными значениями этого параметра для воздушных судов различной взлетной массы в соответствии с установленной классификацией [20]. Например, для самолетов Ан-2, М-15, Л-410М (4 класс):

– для регулярных полетов (эксплуатационная прочность)  $392,4$  кПа (4 кгс/см<sup>2</sup>);

– для разовых полетов (минимальная прочность)  $294,3$  кПа (3 кгс/см<sup>2</sup>).

Для вертолетов всех типов прочность уплотненного снежного покрова должна быть не менее  $294,3$  кПа (3 кгс/см<sup>2</sup>).

На заснеженных летных полях грунтовых аэродромов, в том числе на искусственных взлетно-посадочных полосах (ИВП) под слоем уплотненного снега, прочность и плотность уплотненного снежного покрова следует определять после каждого выполнения работ по уплотнению

снега и повышения температуры воздуха в соответствии с Приложением 13 работы [11].

Твердомер НИАС имеет следующие *недостатки*. Невозможно установить продольную ось прибора строго вертикально и удерживать ее в таком положении при нажатии ногой на площадку для ступни. Контроль и корректировка вертикального положения прибора также невозможна в силу отсутствия встроенного уровнемера. Глубина и скорость погружения конуса зависят от массы испытателя и интенсивности его воздействия на прибор, и меняются в широких пределах, что способствует снижению точности выполняемых измерений.

На основании изложенного выше, сформулирована *первая задача* диссертационной работы: разработать измерительный прибор и метод оперативного полевого контроля с его использованием, прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог с точностью, более высокой, чем у приборов-аналогов.

Этот прибор должен быть прост конструктивно, надежен, прост в эксплуатации и техническом обслуживании, сохранять работоспособность в условиях низких температур.

Конструкция твердомера НИАС (рисунок 1.11) принята автором работы в качестве аналога, при разработке нового прибора – твердомера (см. главу 2).

### **1.5. Основные сведения о технологии зимнего содержания дорожных и аэродромных покрытий, средствах и методах предотвращения и устранения снежно-ледяных отложений**

При зимнем содержании аэродромов, особо трудоемкими являются мероприятия по предотвращению и устранению снежно-ледяных отложений и гололедных образований, которые в настоящее время могут выполняться

механическим, химико-механическим, тепловым и комбинированным методами [11, 63].

Удаление снега с элементов летного поля, относящихся к первой очереди, рекомендуется проводить с начала снегопада, *механическим методом*, организуя патрульную очистку покрытий с использованием плужно-щеточных снегоочистителей (ПМ-130, КО-804, КО-713 и т. п.) и аэродромных уборочных машин (БС-4000 ПБА, ДЭ-235, ДЭ-224А и т. п.), оснащенных скоростными отвалами (плугами) и цилиндрическими ротационными щетками [11]. В случае, когда снегоуборочные работы начинаются по окончании снегопада и при значительном слое снега, целесообразно работу плужно-щеточных снегоочистителей разделить на две группы: первая группа машин сдвигает снег плугом, вторая – подметает щетками.

Качество очистки покрытий от снега обеспечивается в том случае, если отвал, сдвигая основную массу снега, оставляет после себя слой высотой 10 – 15 мм, легко сметающийся щеткой. Поэтому необходимо систематически контролировать состояние резиновых (полиуретановых) ножей отвала. Они должны иметь одинаковую высоту и при опущенном отвале плотно по всей ширине захвата прилегать к поверхности покрытия. Высота ножей должна быть в пределах 25 – 150 мм, с равномерным износом. Плуг должен легко поворачиваться на поворотной раме вправо и влево и надежно фиксироваться. Просадка ворса щетки, прижатой к аэродромному покрытию, должна быть одинаковой по всей ее длине и составлять 15 – 30 мм, длина ворса щетки –  $90 \div 220$  мм. Щетка должна работать при минимальном обжатии ворса, обеспечивая при этом полное отделение снега от поверхности покрытия.

Рабочая скорость машины при снегоочистке зависит от общей нагрузки на снегоочиститель, которая возрастает при увеличении интенсивности снегопада. При патрульной очистке и в случае снегопада интенсивностью

более 3 мм/ч отечественные плужно-щеточные машины работают, как правило, со скоростью 12 – 18 км/ч, а если интенсивность снегопада – менее 3 мм/ч, то рабочая скорость может достигать 30 км/ч и более.

В процессе эксплуатации летного поля может возникнуть необходимость уборки уплотненного снега, снежно-ледяных накатов и образующегося при этом льда, который может иметь толщину более 20 мм. В таких случаях рекомендуется использовать *тепловой метод* с применением тепловых машин (ТМ-59МГ и т. п.), оснащенных авиационными реактивными двигателями.

Разрушение гололедных образований и отрыв их от покрытия происходят под воздействием на ледяной массив мощной струи раскаленных отработавших газов, вырывающихся из сопла реактивного двигателя [64]. Для обеспечения движения тепловой машины без пробуксовки первый ее проход рекомендуется производить при расположении реактивного двигателя с насадкой вдоль оси базового шасси. Проходы последующих машин производятся при установке двигателя под углом от 15 до 45° к оси базового шасси каждой машины.

Наиболее эффективно применение тепловых машин при использовании в технологической схеме одновременно не менее трех единиц данных спецмашин, движущихся уступами с расстоянием между ними 20 – 25 м. Предыдущий проход машины должен перекрываться последующим не менее чем на 15 – 20 см.

Мероприятия по борьбе с СЛЮ на аэродромных покрытиях с применением *химико-механического метода* могут производиться в двух режимах: первый режим – предупреждение (предотвращение) гололедных образований; второй – удаление гололедных образований с аэродромных покрытий. При этом используются как жидкие, так и гранулированные антигололедные реагенты (АГР).

Мероприятия по предотвращению гололедных образований проводятся в периоды их наиболее вероятного возникновения, т. е. при температуре

воздуха от 0 до минус 6 °С, и заключаются в следующем. Заблаговременно, после получения данных прогноза о возможном образовании гололеда, по поверхности покрытий распределяется реагент в растворе или в твердом виде. Образующийся в этих условиях лед имеет рыхлую структуру, слабое сцепление с поверхностью покрытия и легко очищается щетками снегоуборочных машин.

Растворы реагентов разливаются по поверхности покрытия поливомоечными машинами или специальными распределителями реагентов на скорости 10 – 20 км/ч. Ширина обрабатываемой полосы при этом составляет 8 – 18 м. За одну заправку емкости цистерны машина может обрабатывать до 1 га покрытий.

Удаление гололедных отложений на поверхности аэродромных искусственных покрытий производится гранулированными реагентами в твердом виде. Водные растворы реагентов рекомендуется использовать только при толщине гололедной пленки не более 1 мм. Нормы расхода растворов реагентов для удаления гололедных образований рекомендуется применять те же, что и для его предупреждения.

Гранулированные реагенты распределяются по поверхности покрытий специальными распределителями технологических материалов (например, АКМТ-6000) либо комбинированными машинами, оснащенными распределительным оборудованием (например, КрАЗ С20-2RO).

Средние нормы расхода гранулированных реагентов для удаления гололедных образований толщиной 1 мм приведены в таблице 1.10.

Таблица 1.10. – Нормы расхода гранулированных реагентов

Антигололедный химический реагент	Расход реагентов (г/м <sup>2</sup> ) при температуре (°С)					
	0...–2	2...–4	4...–6	6...–8	8...–10	10...–12
АНС	35	55	75	100	125	150
Карбамид	45	45	80	–	–	–

По истечении времени плавления льда производится окончательная очистка поверхности покрытия щетками уборочных машин типа ПМ-130 и ДЭ-224, скопившийся в пониженных местах раствор реагента удаляют ветровыми машинами типа ВМ-66, ВМ-63, ВМ-АИ-25 и т. п. При необходимости покрытие подсушивается.

При зимнем содержании автомобильных дорог дорожными эксплуатационными организациями проводятся работы по обеспечению бесперебойного и безопасного движения в зимнее время, включающие очистку дорог от снега, защиту дорог от снежных заносов и борьбу с зимней скользкостью. Для разрушения снега и льда на дорогах используются *тепловые (термические), фрикционные, химические и механические методы* [13, 41, 50].

К *термическим* методам относят:

- обогрев покрытий, приводящий к стаиванию с них снега;
- использование снеготопильных систем (снеготаялок) – снег загружается в цистерну или контейнер и растапливается.

Системы обогрева покрытий встраиваются в покрытия дорог или сооружения и служат для удаления снега перед входами в здания, с тротуаров, мест стоянок автомашин, пандусов, крыш и въездов на мосты. Эти системы представляют собой вмонтированные в объекты трубы, электрические кабели или надземные установки с лампами инфракрасного излучения. На практике использование систем обогрева покрытий ограничено ввиду их высокой стоимости, обусловленной значительными затратами на капитальные вложения и высокими эксплуатационными расходами. Такие системы рекомендуется использовать лишь в тех местах, где механическая снегоочистка сопряжена с трудностями, использование химикатов может приводить к повреждению конструкций, задержки транспорта недопустимы и большое значение имеет обеспечение безопасности дорожного движения.

Снеготаялки выпускаются двух типов: стационарные установки, к которым снег подвозится, и передвижные установки, которые, двигаясь по улицам, могут собирать и растапливать снег на месте. Снеготаялки имеют различные размеры и конструкции и наиболее эффективны в том случае, если годовая стоимость их использования оказывается равной стоимости борьбы со снегом другими методами (например, транспортировка снега на снежные свалки) или меньше.

При зимнем содержании дорог могут применяться тепловые методы удаления прочных СЛО, аналогичные применяемым на аэродромах. При этом используются такие же тепловые машины (ТМ-59 МГ и т. п.). С помощью этих машин реализуется также тепловой способ предотвращения гололеда путем подогрева поверхности покрытий.

Использование *фрикционного метода* направлено на повышение коэффициента сцепления колеса автомобиля с покрытием, имеющим зимнюю скользкость. По покрытию распределяют песок, высевки каменных материалов или шлак, подогретые фрикционные материалы. Фрикционные методы используют при низких температурах воздуха, когда другие методы борьбы со скользкостью неприменимы (например, на объектах с повышенными экологическими требованиями, в частности на участках дорог, проходящих вдоль водных объектов) или использование химических реагентов экономически нецелесообразно. Отходы промышленности могут использоваться как отдельно, так и в смеси с хлористыми солями при соотношении 4:1. Расход материалов составляет от 0,35 – 0,40 до 0,60 кг/м<sup>2</sup>.

Для повышения эффективности действия фрикционных материалов к ним добавляют химические реагенты – хлориды в твердом виде в количестве до 10 % и более от массы фрикционного материала. Получаемая таким образом смесь кроме повышения коэффициента сцепления дополнительно расплавляет часть снежно-ледяных отложений на покрытии. В основу комбинированного химико-фрикционного метода положено использование



таких смесей. Они не смерзаются и не слеживаются при хранении.

*Химические методы* разрушения снега и льда широко применяются в практике зимнего содержания автомобильных дорог в различных странах [65]. Они предусматривают использование определенных АГР для удаления или предотвращения образования скользкости на дорожном покрытии. Из множества химических веществ для этих целей используются те, которые обладают способностью плавить лед при отрицательной температуре воздуха или образовывать на покрытии растворы с пониженной температурой замерзания. Данный метод, по сути, аналогичен химико-механическому методу, реализуемому при зимнем содержании аэродромов. Рабочие органы машин, распределяющих жидкие или гранулированные АГР по дорожным покрытиям, отличаются меньшей шириной захвата, а сами АГР – химическим составом. Наиболее широкое применение получили хлориды магния, кальция, калия и натрия.

Химический способ борьбы с зимней скользкостью наиболее эффективен, когда температура на поверхности покрытия выше минус 7°C. Если после обработки солью на покрытии образуется талый снег, его необходимо немедленно удалить механическим способом.

*Механический метод* зимнего содержания дорожных покрытий успешно применяется для удаления метелевых отложений, рыхлого свежеснежавшего снега, слабоуплотненного снега или снега с АГР, предотвращающими его уплотнение. При этом используются плужные, плужно-щеточные, шнекороторные, шнекофрезерные снегоочистители, автогрейдеры, оснащаемые основными и дополнительными отвалами, а также и другие машины, аналогичные машинам, используемым при зимнем содержании аэродромов.

### 1.5.1. Недостатки распространенных методов и средств очистки дорожных и аэродромных покрытий от снежно-ледяных отложений

К существенным недостаткам *теплового* метода можно отнести следующее. Прежде всего, это необходимость приобретения, переоборудования и содержания самих тепловых машин. Причем на аэродромах высоких классов необходимо иметь не менее трех единиц такой техники. Отсюда высокие затраты энергии, а также экономические затраты, обусловленные большим расходом авиационного топлива и его стоимостью.

Отработавшие газы реактивного газотурбинного двигателя (ГТД) имеют высокую температуру – до  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  и высокую скорость потока – до  $900\text{ м/с}$ . Следовательно, организация работ с использованием такого оборудования требует соблюдения повышенных мер безопасности.

Кроме того, струи горячих отработавших газов ГТД оказывают негативное влияние на окружающую среду и способствуют разрушению (эрозии) дорожных и аэродромных покрытий, температура которых при обработке тепловой машиной достигает  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Получивший широкое применение *химический* метод, являющийся наиболее высокоэффективным, также имеет ряд существенных недостатков. Это необходимость приобретения и содержания специальных машин для распределения (нанесения) жидких или гранулированных АГР, необходимость строительства и содержания складских помещений для хранения АГР, большой сезонный расход АГР и их высокая стоимость, вредное влияние АГР на окружающую среду, металлические части транспортных средств и элементов дорожного обустройства (металлические опоры дорожных знаков и ограждений), мосты и искусственные покрытия автомобильных дорог и аэродромов. [66 – 68].

Антигололедные реагенты на основе хлоридов (калия, кальция) имеют острый запах, проникают в материал обрабатываемого покрытия на

значительную глубину, что способствует ослаблению структуры материала покрытия и его разрушению. При этом в большей степени страдают бетонные покрытия и элементы дорожного обустройства, и в меньшей степени – асфальтобетонные покрытия [69].

Использование АГР имеет ряд специфических особенностей и ограничений.

Особенности применения АГР следующие: применение АГР для предотвращения гололедных образований целесообразно при температуре воздуха в диапазоне от нуля до минус 6 °С; при удалении гололедных образований жидкие АГР используются только при толщине гололедной пленки не более 1 мм, а эффективность гранулированных АГР проявляется при толщине льда только до 20 мм; нельзя наносить АГР на покрытие во время снегопада, так как при этом происходит усиленное водообразование от растворения реагентом снежно-ледяных образований, ранее находившихся на покрытии, и одновременного таяния падающего снега. Обильный выход воды разжижает АГР, вследствие чего слабеет его концентрация и теряется эффективность. Образовавшееся избыточное количество воды будет впоследствии провоцировать еще более значительное льдообразование.

Ограничения применения АГР следующие: запрещается обработка транспортных магистралей жидкими химическими АГР при движении по ним троллейбусов; не допускается образование свободных растворов расплавленного снега вследствие воздействия на него АГР; запрещается применение технической соли и жидкого хлористого кальция в качестве АГР на тротуарах, посадочных площадках остановок городского пассажирского транспорта, в парках, скверах, дворах и прочих пешеходных и озелененных зонах; запрещается применять хлориды в водоохраных зонах рек и водоемов, а также у источников хозяйственного и питьевого водоснабжения [50].

*Фрикционный* метод является экологически более чистым, чем химико-механический (химический), но также имеет ряд недостатков: невозможность полной ликвидации скользкости – только временное повышение сцепных качеств покрытий, плохое закрепление материалов на поверхности покрытий и быстрое смещение их с проезжей части при движении автомобилей, необходимость использования для распределения фрикционных материалов большого количества единиц техники, необходимость организации дополнительных мероприятий для уборки этих материалов с дорожных покрытий в весенний период эксплуатации.

Фрикционные материалы быстро сдуваются с проезжей части турбулентным потоком воздуха, накапливаются в придорожной полосе, что приводит к загрязнению и запыленности придорожной территории [68].

При зимнем содержании аэродромов фрикционный метод не используется, так как присутствие каких-либо абразивных частиц и прочих посторонних предметов на аэродромных покрытиях не допускается ввиду большой вероятности их попадания с потоками воздуха в сопловые аппараты двигателей воздушных судов, что может привести к повреждению двигателей и выходу их из строя.

Общими существенными недостатками химического, теплового и фрикционного методов являются высокая стоимость их реализации и вредное воздействие на окружающую среду.

Использование менее затратного и экологически более чистого *механического* метода ограничено, так как в случае уплотнения снега или формирования на покрытиях прочных СЛЮ значительной толщины качественная механическая очистка покрытий затрудняется или становится невозможной в силу *конструктивной неприиспособленности* рабочих органов уборочных машин к такому виду работ.

Скоростные отвалы плужно-щеточных снегоочистителей и аэродромных уборочных машин снабжены эластичными ножами из толстой

резины или полиуретана для предотвращения возможных повреждений очищаемых покрытий (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14. – Скоростной углепластиковый отвал аэродромной уборочной машины *Vammas PSB 5500H* с эластичным ножом длиной 5,5 м

Данные машины эффективно используются при патрульной очистке элементов летного поля от свежесвыпавшего рыхлого снега. Однако при взаимодействии с более прочными отложениями такие ножи в силу малой жесткости, без зарезания и заглабления проскальзывают по поверхности среды, подлежащей разрушению, оставляя ее неразрушенной.

Более эффективным рабочим органом при разрушении и уборке прочных снежно-ледяных образований является основной отвал автогрейдера, обеспечивающий механическое разрушение СЛО с последующим сдвигом продуктов разрушения в сторону (рисунок 1.15).

Нож отвала автогрейдера представляет собой сменные стальные пластины, закрепляемые продольно на нижней кромке отвала [70, 71]. Однако основной отвал автогрейдера может срезать только верхний слой уплотненного снега или льда малой прочности.

При взаимодействии с прочными снежно-ледяными отложениями при малой толщине их слоя (до 100 мм) процесс зарезания рабочей кромки ножа в разрушаемый массив с последующим заглаблением крайне осложнен или невозможен вовсе.



Рисунок – 1.15. Отвал автогрейдера ДЗ-98 с ножом из сменных стальных пластин

Роторные снегоочистители с питателями шнекового и фрезерного типов, предназначены для очистки аэродромных и дорожных покрытий от снежных заносов, а также для удаления снежных валов, образованных другими снегоуборочными машинами [64, 72].

Главными параметрами роторных снегоочистителей являются:

- производительность, по которой их разделяют на легкие (до 200 т/ч), средние (до 1000 т/ч) и тяжелые (более 1000 т/ч);
- ширина захвата (от 2 до 3,2 м);
- толщина разрабатываемого снежного покрова (до 2 м);
- рабочая скорость (0,3–5 км/ч);
- дальность отбрасывания снега (для аэродромных снегоочистителей – до 60 м).

Широкое распространение получили роторные снегоочистители с питателями шнекового и фрезерного типа.

Шнекороторные снегоочистители (например, ДЭ-226) имеют рабочий орган, состоящий из одного или двух роторов и шнекового питателя. Такие рабочие органы имеют значительную металлоемкость и невысокую пропускную способность и могут разрабатывать снег плотностью до 500 кг/м<sup>3</sup>.

Фрезерно-роторные снегоочистители (например, ДЭ-250) с рабочим органом представляют собой комбинацию фрезерного питателя и одного или двух роторов-метателей и могут разрабатывать снег плотностью до  $700 \text{ кг/м}^3$ .

Роторные снегоочистители конструктивно не приспособлены для разрушения прочных СЛЮ. Шнековые и фрезерные питатели установлены с определенным зазором относительно поверхности очищаемого покрытия, и после прохода машины, оснащенной такими рабочими органами, часть снега остается неубранной. Кроме того, роторные снегоочистители характеризуются крупными габаритными размерами, значительной металлоемкостью конструкций и высокой энергоемкостью рабочих процессов.

Щеточные рабочие органы нашли широкое применение на подметально-уборочных машинах, плужно-щеточных снегоочистителях и аэродромных уборочных машинах [73, 74]. По конструкции они бывают цилиндрическими, коническими и ленточными. По расположению ворса – сплошные, метельчатые и пучковые. Наиболее широкое применение получили цилиндрические щетки диаметром окружности до 1 м с горизонтальной осью вращения, устанавливаемые на уборочных и подметальных машинах под углом к направлению движения.

Щеточные рабочие органы предназначены для очистки аэродромных и дорожных покрытий от рыхлого снега толщиной 2–3 см, оставшегося после прохода плужного рабочего органа, а также от свежеснежавшего снега толщиной до 15 см. При уборке прочных СЛЮ работа щеточного оборудования становится малоэффективной, так как при встрече с разрушаемой средой ворс щеток прогибается, не обеспечивая необходимой силы резания.

Приведенная в текущем разделе работы информация о технологических возможностях средств механической очистки дорожных и аэродромных покрытий от СЛЮ, полученная автором в результате анализа

авторитетных информационных источников, согласуется и с рекомендациями по выбору типов машин зимнего содержания, приведенными проф. А.П. Куляшовым в работе [42] (таблица 1.11).

Таблица 1.11. – Типы машин, рекомендуемые для поддержания дорожных покрытий в очищенном от снега и льда состоянии

Тип машины	Предельная плотность СЛО, г/см <sup>3</sup>	Предельная толщина слоя разрабатываемой среды, м
Одноотвальные плужно-щеточные автомобильные снегоочистители	0,3	0,7
Двухотвальные плужные автомобильные снегоочистители	0,4	0,8
Двухотвальные тракторные снегоочистители	0,6	1,2
Роторные и фрезерно-роторные снегоочистители	0,7	Не ограничена
Автогрейдеры	0,6	0,6
Бульдозеры	0,7	Не ограничена

Очевидно, что для механического разрушения прочных СЛО, в соответствии с определением этой среды, сформулированном автором в финальной части раздела 1.1 данной работы, могут быть использованы только автогрейдеры и бульдозеры, несущие рабочие органы отвального типа.

Учитывая то, что использование на искусственных дорожных и аэродромных покрытиях машин на гусеничном ходу не допускается во избежание повреждений, в качестве базовой машины, несущей перспективный рабочий орган, конструктивно приспособленный для разрушения прочных СЛО на очищаемых покрытиях, целесообразно использовать *автогрейдер*.

**1.6. Обоснование потребности в методах и средствах измерительного контроля силовых параметров высокоэффективного снегоочистительного рабочего оборудования на стадии его проектирования. Постановка цели и задач исследования.**



Концепция перспективной снегоочистительной машины предполагает использование при зимнем содержании дорожных и аэродромных покрытий, мобильной технической системы, включающей базовую машину на пневмоколесном ходу и устанавливаемого на нее сменного рабочего оборудования для разрушения прочных СЛО.

Конструкция базовой машины должна удовлетворять следующим требованиям. Такая машина должна иметь большой сцепной вес, шасси на пневмоколесном ходу с полным приводом, силовую установку большой мощности, развитую гидравлическую систему.

Использованием пневматических шин исключается возможность механического повреждения обрабатываемых покрытий.

Использованием мощной силовой установки на полноприводной машине, имеющей большой сцепной вес обеспечивается тяговое усилие на колесах, величина которого значительно превосходит силу сопротивления разрабатываемой среды разрушающему воздействию высокопроизводительного рабочего оборудования.

Конструкцией гидравлической системы базовой машины обеспечивается управление рабочим оборудованием: его перевод из транспортного положения в рабочее, и из рабочего положения в транспортное, изменение пространственного положения рабочего оборудования в зависимости от толщины слоя разрушаемой среды, ее физико-механических свойств и т.д.

Всем перечисленным требованиям полностью удовлетворяют автогрейдеры – универсальные мощные самоходные машины на пневмоколесном ходу, предназначенные для устройства и профилирования земляного полотна, возведения насыпей, перемещения грунта и дорожно-строительных материалов и их перемешивания, планировки откосов, выемок и насыпей, устройства корыт и боковых канав, а также строительства, ремонта и содержания аэродромов и автомобильных дорог, их очистки от

снега, обвала и перемешивания снега, разравнивания и планировки его на обочинах, рыхления и срезания уплотненного снега [70, 71, 75 – 77].

Современная классификация автогрейдеров основывается на положениях межгосударственных нормативных документов [78 – 81] и др., регламентирующих общие технические требования к автогрейдерам, термины, определения и технические характеристики этих машин, а также условные обозначения размерных характеристик базовых машин и рабочего оборудования автогрейдеров.

Особенности современной классификации этих машин, номенклатура и условные обозначения основных параметров и размеров автогрейдеров, а также схемы индексации их различных моделей в соответствии с устаревшими и действующими нормативно-техническими документами представлены автором в работе [82].

Конструкцией *проектируемого сменного рабочего оборудования* должна обеспечиваться быстрая его установка на базовую машину, снятие с базовой машины, возможность сопряжения с управляющими элементами ее гидравлической системы, быстрая замена изношенного или неисправного режущего инструмента при малой трудоемкости этого процесса, высокоэффективное разрушение прочных СЛЮ на дорожных и аэродромных покрытиях, без повреждения последних.

Перспективные конструкции высокоэффективного рабочего оборудования для разрушения прочных СЛЮ могут быть получены как путем модернизации уже существующего оборудования, так и путем разработки и создания новых конструкций, адаптированных к соответствующей базовой машине, например, автогрейдеру.

В качестве меры, обеспечивающей возможность высокоэффективного разрушения разрабатываемым оборудованием прочных СЛЮ, предлагается оснащение такого оборудования перспективным режущим инструментом в виде *заостренных дисковых резцов*.

В силу недостаточной изученности процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с прочными СЛЮ при их механическом разрушении, и связанных с этим затруднений в выполнении расчетов при проектировании новых и совершенствовании существующих конструкций снегоочистительного оборудования, имеет место необходимость проведения экспериментальных исследований.

Актуальной задачей этих исследований является установление зависимостей силовых параметров разрабатываемого оборудования от таких факторов как величина угла заострения дискового режущего инструмента, скорость резания, температура окружающей среды, влияющая на прочность разрушаемого материала, радиус закругления рабочей кромки, изменяющиеся параметры среза, пространственное положение инструмента относительно забоя, и др.

Успешная реализация на практике исследований такого рода, а также и регистрация, хранение и обработка результатов этих исследований, возможна только при использовании соответствующих *средств и методов измерительного контроля* исследуемых параметров.

Разработке, созданию и апробированию *комплекса* таких средств и методов измерительного контроля и будет посвящен ряд задач данной диссертационной работы.

Снежно-ледяные отложения, формирующиеся на покрытиях дорог и аэродромов в естественных условиях или формируемые искусственно, например, методом уплотнения снега, непрерывно меняют свои физико-механические свойства в зависимости от температуры и влажности окружающего воздуха, температуры (теплозапаса) дорожной одежды, величины, частоты и скорости прилагаемой уплотняющей нагрузки и других факторов [50]. Это крайне затрудняет проведение экспериментов по разрушению СЛЮ в натуральных условиях. Анализ результатов исследовательских работ по механическому разрушению таких твердых сред

как мерзлые грунты и горные породы различным рабочим инструментом [85–92], позволил сделать вывод о целесообразности проведения экспериментов в лабораторных условиях, на стендовом оборудовании.

Достоверности результатов таких исследований будет способствовать использование при испытаниях *полноразмерного* режущего инструмента, а не его масштабных моделей, а также использование в качестве разрушаемого материала ледяных блоков из *природного пресноводного льда*, содержащего структуру 9 (рисунок 1.3).

Комплекс средств измерительного контроля силовых параметров высокоэффективного снегоочистительного рабочего оборудования дорожных машин, должен включать следующие элементы:

- измерительную установку – лабораторный стенд для испытаний рабочих органов дорожных машин;
- измерительный преобразователь (аналоговый) – тензометрический элемент ИП-1, для контроля силы сопротивления разрушению рабочим инструментом прочных твердых сред, например, прочных СЛО, мерзлых грунтов;
- измерительный преобразователь (аналоговый) – тензометрический элемент ИП-2, для контроля силы сопротивления разрушению рабочим инструментом менее прочных сред, например, уплотненного снега;
- измерительную установку – лабораторный стенд для градуировки тензометрических элементов;
- информационно – измерительный комплекс, для регистрации, хранения и обработки сигналов, получаемых посредством использования измерительных преобразователей, размещаемых на измерительных установках.

Перечисленные выше элементы комплекса средств измерительного контроля должны удовлетворять следующим требованиям.

Конструкция измерительной установки – лабораторного стенда для испытаний рабочих органов дорожных машин, должна обеспечивать жесткое крепление опытного образца разрушаемой среды с возможностью изменения параметров среза: глубины и шага резания; размещение измерительных преобразователей, с закрепленным на них режущим инструментом с возможностью их линейного перемещения из крайнего правого положения, в крайнее левое, при котором осуществлялось бы взаимодействие режущего инструмента с образцом разрушаемой среды. Кроме того, конструкцией лабораторного стенда должна обеспечиваться возможность изменения скорости этого перемещения (скорости резания).

Конструкцией измерительного преобразователя (аналогового) – тензометрического элемента ИП-1 для контроля силы сопротивления разрушению рабочим инструментом прочных твердых сред, должна обеспечиваться возможность быстрого и надежного крепления на нем испытуемого рабочего инструмента (как полноразмерного, так и масштабных его моделей), возможность быстрого и надежного крепления самого преобразователя на соответствующих элементах лабораторного испытательного стенда, измерение с высокой точностью горизонтальной, вертикальной и боковой составляющих силы сопротивления прочной среды, разрушающему воздействию различного рабочего инструмента.

Конструкцией измерительного преобразователя (аналогового) – тензометрического элемента ИП-2, для контроля силы сопротивления разрушению рабочим инструментом менее прочных сред должна обеспечиваться возможность быстрого и надежного крепления на нем испытуемого рабочего инструмента (как полноразмерного, так и масштабных его моделей), возможность быстрого и надежного крепления самого преобразователя на соответствующих элементах лабораторного испытательного стенда, измерение с высокой точностью горизонтальной,

вертикальной и боковой составляющих силы сопротивления менее прочной среды, разрушающему воздействию различного рабочего инструмента.

Конструкцией измерительной установки – лабораторного стенда для градуировки тензометрических элементов, должны обеспечиваться быстрое и надежное крепление на нем измерительных преобразователей – тензометрических элементов в различных пространственных положениях (в зависимости от направления прилагаемой нагрузки), возможность ступенчатого нагружения измерительных преобразователей, с последующей ступенчатой разгрузкой, возможность их градуировки по трем составляющим силы сопротивления испытываемой среды разрушению с использованием одного эталонного вспомогательного средства измерения – динамометра растяжения.

Информационно-измерительный комплекс (ИИК) должен включать блоки тензорезисторов, размещенных на измерительных преобразователях, тензометрический усилитель, аналого-цифровой преобразователь, соответствующее программное обеспечение и персональный компьютер. Элементы ИИК при совместной работе измерительных установок и измерительных преобразователей должны обеспечивать получение стабильного электрического сигнала, его фильтрацию, преобразование в цифровую форму (с минимальными шумами, отсутствием «дрейфа нуля») и высокоинформативную визуализацию диаграмм на мониторе персонального компьютера, регистрацию, хранение и обработку экспериментальных данных.

### **1.7 Выводы по главе**

На основании всего вышеизложенного, автором были сформулированы цель, идея и ряд задач данной диссертационной работы.

Цель исследования – создание новой методологии измерительного контроля силовых показателей тангенциального дискового режущего

инструмента, взаимодействующего с разрушаемой средой, отличающейся возможностью получения наиболее полной измерительной информации, для обоснования на стадии разработки, рациональных с позиции минимизации энергозатрат и повышения производительности конструктивных и эксплуатационных параметров такого инструмента и оснащаемого им оборудования.

Идея работы заключается в комплексном использовании для получения необходимой измерительной информации, результатов последовательной реализации каждого из системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым инструментом с использованием измерительных преобразователей и установок, в основе функционирования которых лежит электротензометрический метод измерения сил.

Для достижения цели работы потребуется решение следующих задач:

1. Разработать метод оперативного полевого контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых аэродромов и автодорог с использованием нового измерительного прибора – твердомера.

2. Разработать методику лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемой средой посредством использования новой измерительной установки – лабораторного стенда.

3. Обосновать конструкцию и основные параметры измерительного преобразователя – тензометрического элемента ИП-1 для работы в составе измерительных установок – стендов.

4. Разработать метод градуировки тензометрических элементов, реализуемый посредством использования новой измерительной установки – градуировочного стенда.

5. Осуществить построение информационно-измерительного комплекса для работы в составе измерительных установок: стендов, измерительных преобразователей.

6. Разработать систему методов измерительного контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию полноразмерным тангенциальным дисковым инструментом, реализуемых посредством использования измерительного преобразователя ИП-1 в составе лабораторного стенда.

7. Исследовать экспериментально, процесс взаимодействия полноразмерного тангенциального дискового режущего инструмента с прочными снежно-ледяными отложениями при различных значениях угла заострения инструмента, скорости резания, температуры окружающей среды, влияющей на прочность разрушаемого материала и радиуса закругления рабочей кромки инструмента.

8. Разработать методику расчета сил, возникающих на дисковом резце при резании прочных снежно-ледяных отложений, при изменяющихся геометрических, технологических параметрах инструмента и параметрах среза.

Результаты реализации метода контроля прочности снежно-ледяных дорожных и аэродромных покрытий, получаемые посредством использования нового пенетрационного прибора – твердомера, при содержании покрытий в накате следует использовать для контроля текущего эксплуатационного состояния этих покрытий, а применительно к очищаемым покрытиям – для выбора рациональных, с позиции минимизации энергозатрат и повышения производительности, технологических параметров снегоочистительного оборудования. Кроме того, эти результаты надлежит использовать и в методике расчета сил сопротивления разрушаемой среды резанию дисковым инструментом для определения значений сцепления материала  $C_0$ , ( $\text{кН/м}^2$ ) и угла  $\varphi_1$ , (град) внутреннего трения материала.



## **ГЛАВА 2. МЕТОД И ПРИБОР КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ (НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ) УПЛОТНЕННОГО СНЕЖНО-ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА**

### **2.1. Методы и средства контроля физико-механических свойств природных твердых сред посредством пенетрации и зондирования**

Такие природные среды, как грунты [22], снег и лед (снежно-ледяные отложения) широко используются человеком в его инженерно-хозяйственной деятельности в качестве основания фундаментов зданий и сооружений, полотен автомобильных, железных дорог и других объектов, а также в качестве строительных материалов, например для возведения насыпей, устройства отдельных слоев конструкций дорожных одежд.

Упомянутые выше, природные среды используются как в состоянии естественного залегания, так и в состоянии техногенно измененном в результате воздействия на них рабочих органов строительных, дорожных, уборочных и др. машин. Характерные виды такого воздействия это разрушение (резанием, копанием, рыхлением, и т.д.), перемещение, перемешивание и уплотнение.

На стадии инженерно-геологических исследований, а также при строительстве и последующем содержании автомобильных дорог различных категорий, в обязательном порядке проводится полевой контроль материала несущих оснований, материала слоев дорожных одежд (при строительстве – для каждого конструктивного слоя), а также и материала дорожных покрытий, с целью определения основных физико-механических свойств (ФМС) этих материалов, таких как:

- прочность (несущая способность);
- деформируемость (жесткость);
- плотность;

- угол внутреннего трения;
- сцепление и др.

Широкое применение на практике получили методы исследования физических и механических свойств различных твердых сред, основанные на пенетрации и зондировании.

Существенный вклад в развитие теории и практики испытания твердых сред пенетрацией и зондированием внесли П.А. Ребиндер [23], Н.А. Цытович [24], В.Г. Березанцев [25], В.Ф. Разоренов [26], Г.Г. Болдырев [27-30], А.Н. Зеленин [31], В.И. Баловнев [31], И.П. Керов [31], В.З. Иофик [32], японский исследователь С. Киношита [33, 211], В.С. Далин [43] и др.

В работе [26] В.Ф. Разоренов дает четкое толкование этих двух понятий. *Пенетрацией* называется погружение наконечников разнообразных форм и размеров на глубину, меньшую высоты наконечника. *Зондированием* называется метод испытания грунтов при погружении наконечника на глубину, превышающую высоту наконечника.

В свою очередь зондирование, документом [34] подразделяется на два вида, определяемые следующим образом:

- статическое зондирование – процесс погружения зонда в грунт под действием статической вдавливающей нагрузки с измерением показателей сопротивления грунта внедрению зонда;
- динамическое зондирование – процесс погружения зонда в грунт под действием ударной нагрузки (ударное зондирование) или ударно-вибрационной нагрузки (ударно-вибрационное зондирование) с измерением показателей сопротивления грунта внедрению зонда.

Данные методы полевых испытаний грунтов широко используются, начиная с 20 – х годов прошлого века [28], а конструкции средств контроля постоянно прогрессируют в своем развитии. Испытания *статическим* зондированием с использованием современного конического зонда с полным набором датчиков (силы, горизонтального давления, порового давления,

наклона, ускорения), например зонда *SCPTU*, позволяют наряду с удельным сопротивлением грунта под наконечником, определять следующие свойства и характеристики грунтов:

- вид грунта;
- мощность слоев грунта;
- недренированная прочность связного грунта  $C_u$ , кПа;
- недренированный угол внутреннего трения  $\varphi$ , град;
- упругий модуль сдвига  $G$ , МПа;
- коэффициент плотности  $I_p$ ;
- коэффициент предварительного уплотнения  $OCR$ ;
- коэффициент бокового давления в состоянии покоя  $K_o$ ;
- коэффициент консолидации в горизонтальном направлении  $C_{hv}$ , см<sup>2</sup>/год;
- коэффициент фильтрации  $k_f$ , см/год;
- параметры для определения несущей способности свай;
- параметры для определения осадки и несущей способности фундамента мелкого заложения.

Существуют механические (метод *SPT*), электрические (метод *CPT*) и пьезоэлектрические (метод *CPTU*) зонды статического нагружения, а также зонды для оценки сейсмических свойств грунтов: пьезосейсмоакустические (метод *SCPTU*), пьезоэлектрические с видеокамерой и т.д. [29].

В Российской Федерации действующим нормативным документом [34] рекомендованы к использованию для полевых испытаний грунтов статическим и динамическим зондированием зонды, схемы конструкций которых представлены на рисунке 2.1. Для статического зондирования предусмотрено использование зондов типа I и типа II.

По данным измерения сопротивления грунта под наконечником и на боковой поверхности зонда определяют удельное сопротивление грунта под наконечником (конусом) зонда, общее сопротивление грунта на боковой

поверхности (для зонда типа I), удельное сопротивление грунта на участке боковой поверхности (муфте трения) зонда типа II.

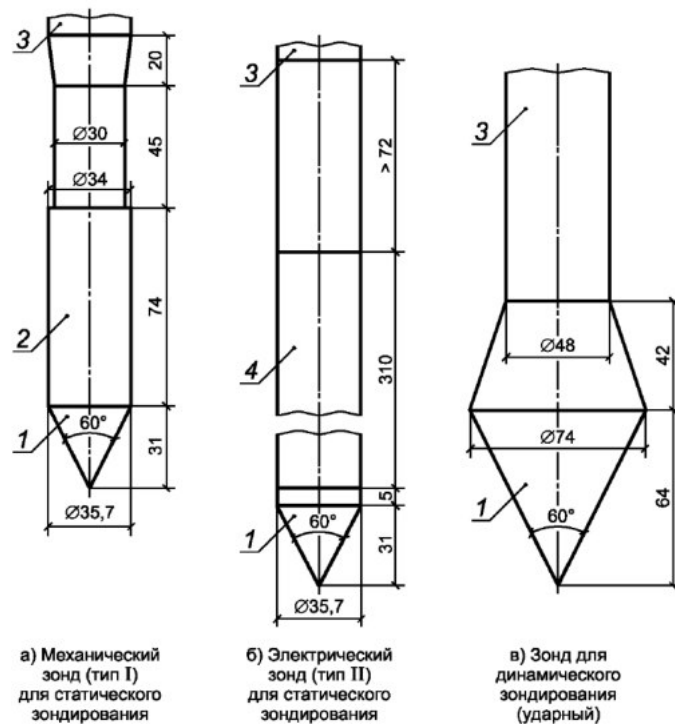


Рисунок 2.1. – Схемы конструкций зондов по ГОСТ 19912-2012 и их основные параметры: 1 – конус, 2 – кожух, 3 – штанга, 4 – муфта трения

Общим недостатком методов статического зондирования является необходимость приложения к зонду значительных усилий вдавливания для погружения его на заданную глубину, а также и для последующего извлечения зонда из тела исследуемого грунтового массива. Для успешной реализации этой группы методов необходимо применение установок большой грузоподъемности.

Методы *динамического* зондирования менее энергоемки и менее трудозатратны, а средства для реализации этой группы методов имеют меньшие массо-габаритные характеристики по сравнению со средствами статического зондирования [30]. Различают зонды с пробоотборником (грунтоносы) для отбора проб грунта в соответствии с ГОСТ 12071-2014 [35]

(рисунок 2.2) и зонды с коническим наконечником (рисунок 2.1в) для определения физико-механических свойств грунтов в полевых условиях, в соответствии с ГОСТ 19912-2012 [34], контроля качества уплотнения слоев насыпей и т.д.

Пробы грунтов, отобранные грунтоносами, используются для определения физических характеристик грунтов в лабораторных условиях в соответствии с ГОСТ 5180-2015 [36]. При использовании зондов с коническим наконечником измеряют глубину погружения зонда  $h$  от определенного числа ударов молота (залога) при ударном зондировании, скорость погружения зонда при ударно-вибрационном зондировании. По данным этих измерений вычисляют условное динамическое сопротивление грунта погружению зонда.

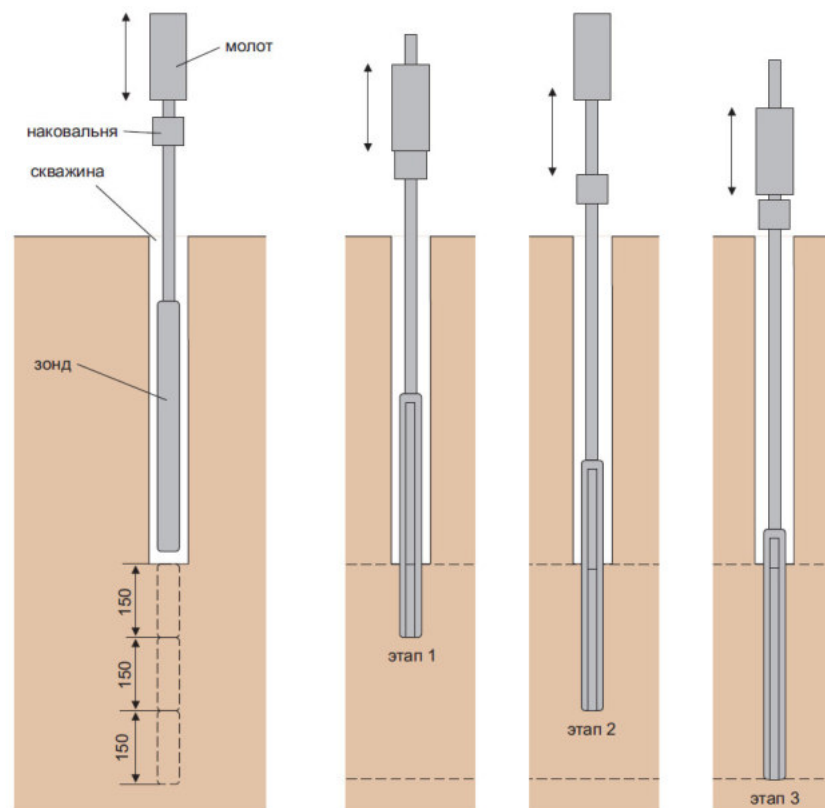


Рисунок 2.2.– Зонд динамического нагружения с пробоотборником (грунтонос)

Динамический ударник (У-1) используется и для контроля прочности грунта на грунтовых аэродромах гражданской авиации в каждом случае изменения физико-механических свойств (ФМС) грунта [11]. Для измерения показателя прочности грунта ударник У-1 (рисунки 2.3-2.4) устанавливается вертикально наконечником на грунт, поднимают гирию по направляющему штоку на высоту 50 см (до упора) и опускают ее. Падая, гирия загоняет стержень наконечника в грунт. Сбрасывание гири повторяется до тех пор, пока наконечник не погрузится в грунт на глубину 10 и 30 см. В процессе работы подсчитывается число ударов гирей при погружении наконечника на 10 см и фиксируется с нарастающим итогом на 30 см.

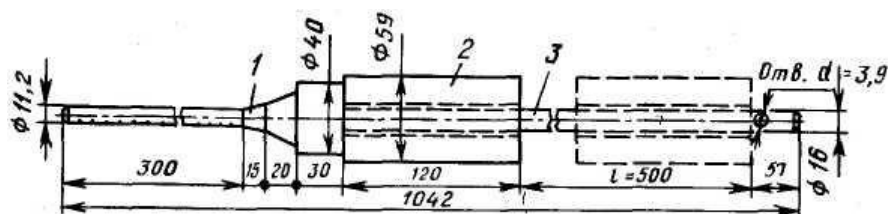


Рисунок 2.3. – Ударник У-1: 1 – наконечник; 2 – гирия (масса 2,5 кг);  
3 – направляющий шток

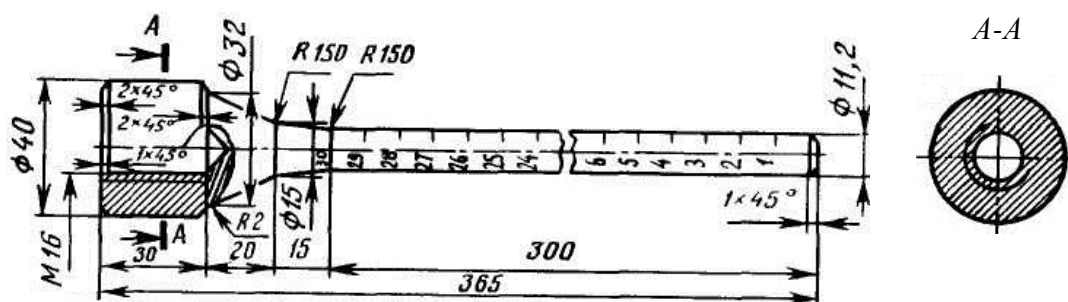


Рисунок 2.4. – Наконечник ударника У1: от обреза наконечника между кольцевыми рисками нанесены сантиметровые деления (оцифровка снизу вверх от 1 до 30 см)

Затем определяются средние арифметические значения из сделанных измерений отдельно для погружения на 10 и 30 см для каждой точки

контроля. По графикам, приведенным в Приложении 12 документа [11] по средним значениям количества ударов определяют прочность грунта на глубине 10 и 30 см. Прочность грунта в месте измерения определяют по формуле

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{10} + \sigma_{30}}{2} \quad (2.1)$$

где  $\sigma_m$  – прочность грунта в месте измерения, кПа (кгс/см<sup>2</sup>);

$\sigma_{10}$  – прочность грунта на глубине 10 см;

$\sigma_{30}$  – прочность грунта на глубине 30 см.

Показатель прочности грунта определяется как среднеарифметическое значение показателей прочности грунта в точках контроля, поделенное на их количество.

В течение многих десятилетий использования методов пенетрации и зондирования для контроля ФМС различных твердых сред, учеными и специалистами разработаны, изготовлены и апробированы десятки конструкций средств измерительного контроля с наконечниками различной геометрической формы. Это ударники, зонды, ударники-зонды, плотномеры, динамические плотномеры, пенетрометры, склероскопы, штампы, твердомеры и т.д.

## **2.2. Обоснование выбора прототипа прибора контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых аэродромов и автодорог**

В рамках данной работы уплотненный снег и прочные снежно-ледяные отложения рассматриваются и как *строительный материал* для дорожных и аэродромных покрытий, содержащихся под слоем уплотненного снежного покрова, так и как *материал, подлежащий разрушению и удалению* с

искусственных дорожных покрытий, содержащихся методом очистки. В обоих случаях необходим контроль прочности этой природной среды. В первом – для эффективной организации мер по поддержанию покрытий в эксплуатационном состоянии, во втором – для получения более полной информации о физико-механических свойствах (ФМС) прочной среды, подлежащей разрушению рабочими органами уборочных машин, что позволит на стадии проектирования, рассчитывать рациональные, с позиции минимизации энергозатрат и повышения производительности, параметры таких рабочих органов.

Поэтому, несмотря на то, что разрабатываемый в рамках решения первой задачи данной работы прибор, предназначен для контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог, следует предусмотреть возможность его использования и применительно к прочным СЛЮ на дорожных покрытиях, в т.ч. и на искусственных. Определение данного вида СЛЮ и их основные ФМС приведены в разд. 1.1 главы 1.

В этой связи, в рамках анализа литературно-патентных источников в данной области, особый интерес представляют приборы *динамического зондирования и пенетрации*, конструктивно приспособленные как к работе с мерзлыми и немерзлыми грунтами, так и к работе со снегом различной плотности и прочными снежно-ледяными отложениями.

С данной точки зрения, наиболее значимыми техническими решениями, наряду с ударником-зондом Союздорнии (рис. 1.9), являются конструкции приборов, предложенные А.Н. Зелениным [31], В.З. Иофиком [32] и С. Киношitou [33].

Известна шкала сопротивляемости грунтов разработке экскавационными машинами различных типов и конструкций (табл. 2.1), оцениваемая по числу ударов (числу  $C$ ) динамического плотномера (ударника ДорНИИ), предложенная А.Н. Зелениным [31]. Данная шкала



используется для нормирования производительности землеройных машин и расценок работ по экскавации грунтов этими машинами [37, 38].

Необходимость в разработке такой шкалы и прибора была обусловлена высокой трудоемкостью и продолжительностью опытов по резанию грунтов в большом диапазоне их ФМС, различными рабочими органами.

Таблица 2.1. – Классификация немерзлых и мерзлых грунтов по числу  $C$

Категория грунтов	Немерзлые грунты				Мерзлые грунты			
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Число ударов $C$	1-4	5-8	9-16	16-34	35-70	70-140	140-280	280-560

Автор определил и обосновал корреляционную связь между сопротивлением грунтов резанию и сопротивлением грунтов вдавливанию металлических штампов, в частности – цилиндрических стержней.

Рекомендуемый А.Н. Зелениным динамический плотномер (рисунок 2.5) прост конструктивно и надежен в эксплуатации. Данный плотномер включает стальной стержень, два наконечника и груз, цилиндрической формы с центральным сквозным отверстием, через которое пропущен стержень. Груз массой 2,5 кг падает с высоты  $H = 0,4$  м на буртик, производя за каждый удар работу, равную 10 Дж.

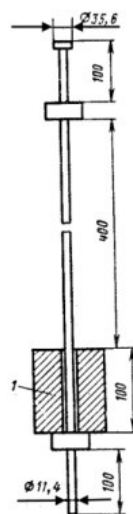


Рисунок 2.5. – Динамический плотномер (ударник ДорНИИ)

*Примечание: число ударов, необходимое для погружения в исследуемый материал плоского цилиндрического наконечника на глубину  $h = 10$  см, называется числом  $C$ .*

Площадь поперечного сечения наконечника плотномера для работы с прочными грунтами  $F = 1$  см<sup>2</sup>. При работе в особо слабых грунтах (рыхлом песке, на пахоте и др.) может быть использован наконечник с площадью поперечного сечения  $F = 10$  см<sup>2</sup>.

Число  $C$ , оперативно и с минимальными трудозатратами определяемое посредством динамического плотномера, комплексно отражает физическое состояние грунта и прямо пропорционально усилиям резания. Оно входит в качестве множителя в формулы А.Н. Зеленина для определения усилий резания при разработке мерзлых и немерзлых грунтов различными рабочими органами землеройных и землеройно-транспортных машин. Использование описанной выше классификации грунтов и динамического плотномера, утверждено рядом действующих нормативных документов РФ, например документами [39, 40] для обязательного применения при производстве земляных работ.

В работе [32] В.З. Иофик подчеркивает, что число ударов  $C$  определяют только в пределах слоя толщиной  $h = 100$  мм, и имеющие место в инженерной практике попытки экстраполировать полученные значения на стружки (слои) меньшей или большей толщины методически ошибочны, поскольку грунты по глубине и по полю массива неоднородны. Кроме того, при моделировании рабочих процессов землеройных машин возникает необходимость измерения параметра  $C$  в модельных слоях  $h < 100$  мм и в натуральных слоистых толщах до 1 – 2 м и более ( $h > 100$  мм). Этим, по мнению автора, обусловлена необходимость разработки увеличенных или уменьшенных (относительно модели А.Н. Зеленина) моделей динамического плотномера.

Приняв в качестве базовой модели конструкцию, геометрические и весовые параметры динамического плотномера по А.Н. Зеленину (модель №1 таблица 2.2), В.З. Иофик расчетным путем обосновал параметры восьми моделей динамических плотномеров, адаптированных к твердым средам с различными физико-механическими свойствами. Предложенные модели конструктивно приспособлены для определения числа  $C$  исследуемых материалов на различной глубине их залегания (модели № 2-9 таблица 2.2, рисунок 2.6).

Таблица 2.2 – Параметры моделей динамического плотномера по данным В.З. Иофика

Номер модели	Геометрические параметры, мм										$m$ , кг	Масштаб числа ударов, $K_n$	$h_c$ , мм
	$l_0$	$l$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$d$	$d_0$	$d_1$	$d_2$	$d_3$			
1	100	100	40	100	400	11,4	–	30	65	11,4	2,5	1	100
2	50	50	20	62	200	5,7	–	15	41	5,7	0,625	1	50
3	37,3	33,3	13,3	48	133,3	3,8	–	10	31	3,8	0,267	1	33,3
4	25	25	10	40	100	2,85	–	7,5	26	3,8	0,156	1	25
5	500	100	50	100	400	17	16	40	92	16,5	5	0,9	100
6	1000	100	50	100	400	16	14	40	92	16,5	5	1	100
7	1500	100	50	100	400	15	14	40	92	16,5	5	1,15	100
8	2000	100	50	100	400	14	12	40	92	16,5	5	1,15	100
9	425	7	25	40	100	25,5	5	15	26	5	0,156	0,0125	25

Модели динамического плотномера в соответствии с данными таблицей 2.2. были изготовлены и испытаны в лабораторных и полевых условиях.

Модели № 2 – 7 испытаны в диапазоне значений  $C = 1 – 200$ , модель №8 – в диапазоне значений  $C = 1 – 50$ . Модель № 9 испытана на снежном покрове, в диапазоне значений  $C = 0,0125 – 5$ .

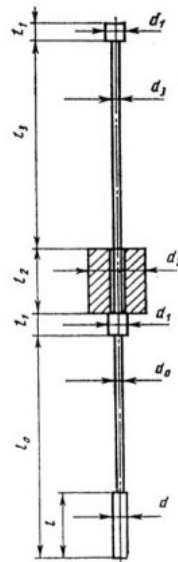


Рисунок 2.6. – Схема динамического плотномера и его размерные параметры по данным В.З Иофика

Данная модель оказалась удобной для определения распределения плотности снежного покрова слоями толщиной  $h = 25$  мм. Модели № 2 – 4 удобны для стендовых лабораторных испытаний, модели № 5 – 8 – для определения распределения трудности разработки грунтового массива на глубину до 2 м.

### 2.2.1. Основные результаты обзора зарубежного опыта в области полевых испытаний природных сред методами пенетрации и зондирования

В работе [33] авторы приводят описание прибора для измерения прочности и плотности снега, предложенного японским исследователем Сэйити Киношитой (рисунок 2.7).

Индентором данного прибора является круглая металлическая пластина  $C$ , которая накладывается на поверхность исследуемого снежного покрова. Стержень  $A$  с цилиндром  $B$  в его нижней части, устанавливается вертикально на поверхность пластины  $C$ .

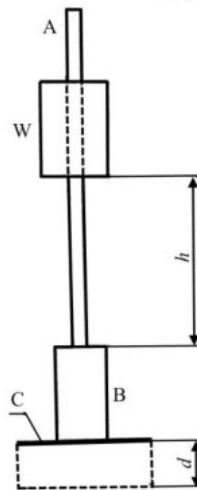


Рис. 2.7. Прибор измерения прочности снега С. Киношита

Затем с высоты  $h$  (см) опускается цилиндрический груз  $W$  ( $m$ , кг), перемещающийся вдоль стержня  $A$  и падающий на цилиндр  $B$ . Таким образом, на снег действует динамическая нагрузка, вызывающая оседание снежной поверхности  $d$  (см).

Среднее сопротивление  $F$ , которое снег оказывает внедрению пластинки  $C$ , определяются по формуле

$$F = m(1 + h/d) + M \quad (2.2)$$

где  $M$  – сумма весов элементов  $A$  и  $B$ .

Прочность снега  $H$  ( $\text{кг/см}^2 \approx 0,1 \text{ МПа}$ ) может определяться по формуле

$$H = F/S \quad (2.3)$$

Или с учетом выражения (2.2)

$$H = 1/S[m(1 + h/d) + M] \quad (2.4)$$

В комплект прибора входят круглые пластины различных диаметров, применяющиеся для измерения прочности снега в широком диапазоне ее значений. Диаметры пластин следующие: 20 см, 14 см, 10 см, 7 см, 5 см, и 3,5 см. Площадь каждого из шести дисков составляет половину площади предыдущего, таким образом, площадь самого большого диска диаметром 20 см соответствует 32 площадям наименьшей пластины диаметром 3,5 см.

Предусмотрено использование двух цилиндрических грузов  $W$  массой  $m = 1$  кг и  $m = 3$  кг.

В работе [211] С. Киношита приводит основные результаты широкомасштабных исследований прочности различных видов снега, проводившихся им в северном районе Мосири, Хоккайдо в зимние периоды 1958, 1959 и 1960 годов.

Размеры пластин, значения  $m$  и  $h$  принимались по данным таблицы 2.3. Указанное в таблице значение «вес грузила равен 0» – для случая, когда диск  $C$  проваливается в снег только при установке на него стержня  $A$  и при отсутствии груза  $W$ . Поскольку  $m = 0$ ,  $H = M/S$ , в независимости от глубины погружения  $d$ . Значение параметра  $M = 520$  г, максимальная площадь диска  $S = 314$  см<sup>2</sup>, поэтому значение  $H = 1,6$  г/см<sup>2</sup>.

Таблица 2.3. – Значения величины диска, веса и высоты грузила

Плотность снега $\rho$ , гр/см <sup>3</sup>	Диаметр диска $D$ , см	Вес грузила $m$ , кг	Высота грузила $h$ , см
~ 0.1	20	0	
0,1 ~ 0.15	14, 10	1	0 ~ 10
0.15 ~ 0.2	10, 7	1	10
0.2 ~ 0.3	7, 5	1	10, 30
0.3 ~ 0.4	5, 3.5	1	30
		3	10
Более 0,4	3.5, 3*	3	30, 40
*цилиндр $B$ без диска			

Контроль прочности снега проводился на разной глубине его залегания. Предварительно поверхность очищалась от верхних слоев и выравнивалась. Основные результаты экспериментальных исследований, в ходе которых была установлена связь между прочностью снега и глубиной, графически отображены на рисунке 2.8.

Твердость  $H$  самого верхнего слоя свежеснегавшего снега на глубине 2 м составляет несколько кг/см<sup>2</sup>. Однако с увеличением глубины твердость  $H$  достигает самых высоких значений в несколько десятков кг/см<sup>2</sup> на высоте 30 см над уровнем земли. Примечательно, что самый нижний слой, представленный жестким снегом, характеризуется неожиданно низкими значениями.

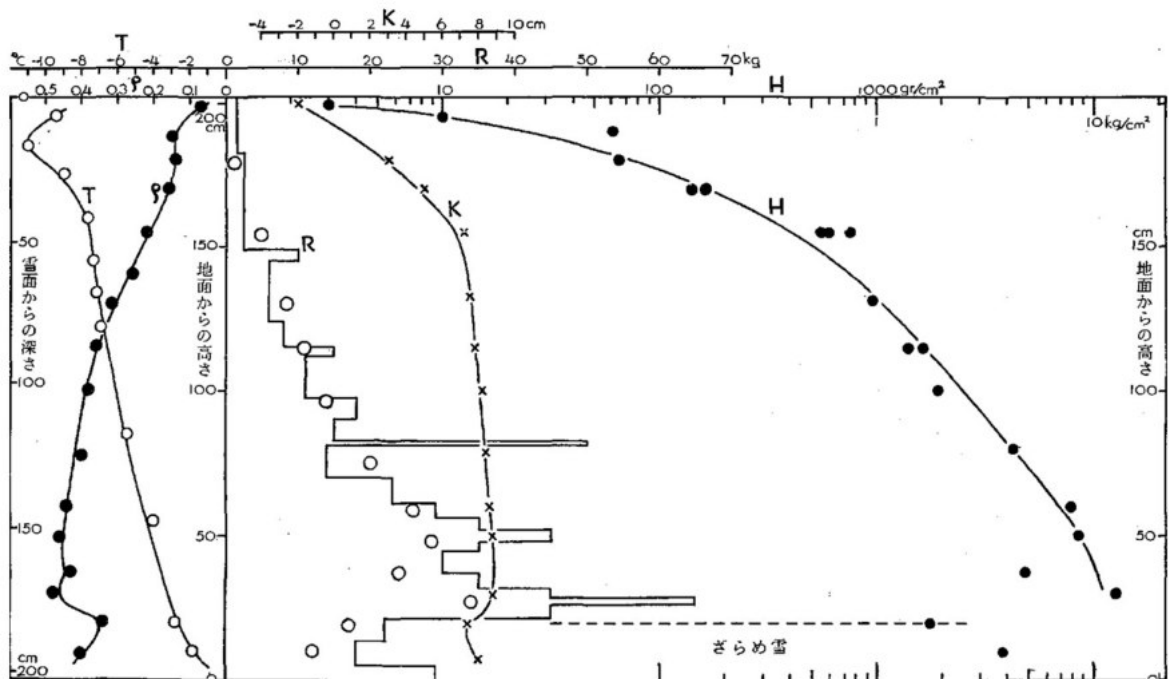


Рисунок 2.8. — Изменение твердости, плотности и температуры снега в зависимости от глубины залегания (22 февраля 1960 г., Мосири, Хоккайдо). Слева направо: глубина от поверхности снега, высота от поверхности земли, высота от поверхности земли.  $H$  — твердость полученная методом Киношиты;  $K$  — твердость по методу Куроды;  $R$  — твердость по конусному твердомеру (ступенчатая линия отражает значения многократных ударов, белые кружки указывают на глубину снега и нанесение одного удара),  $p$  — плотность,  $T$  — температура

Также на рисунке 2.8 кривой линией  $K$  и ступенчатой линией  $R$  обозначены показатели, полученные при одновременном измерении с помощью *тестера Куроды* [212] и *конусного твердомера* соответственно.

Очевидно, что значения твердости по методу Куроды и конусному твердомеру слабо зависят от глубины снега, а твердость, определяемая методом Киношиты, значительно меняется в зависимости от глубины.

*Конусный твердомер* с углом у вершины  $60^\circ$  и высотой конуса 3,8 см при выполнении измерений располагается под цилиндром  $B$  (рисунок 2.7) вершиной вниз.

Оператором обеспечивается многократное падение груза  $W$  вдоль стержня  $A$ , и с каждым последующим ударом вершина конуса уходит глубже в снег. Если измерять глубину  $d$ , возрастающую с каждым ударом, можно воспользоваться формулой (2.2) для определения силы сопротивления  $F$  для каждого отдельного значения глубины снега. Значение  $F$  следует принимать как твердость  $R$  по конусному твердомеру. При большой глубине снега можно увеличить высоту стержня.

Как видно из результатов измерений, отображенных ступенчатой линией на рисунке 2.8, точные измерения твердости мягкого снега в его приповерхностной зоне затруднительны.

*Тестер Куроды* – это конус с углом вершины  $90^\circ$ , высотой 10 см и весом 1 кг. Тестер обращают вершиной вниз, фиксируют над поверхностью снега на высоте 20 см и затем отпускают в свободное падение. Физически параметр  $K$  – это верхняя часть погруженного в снег конуса, остающаяся на дневной поверхности. Высота этой части и принимается как численное значение параметра  $K$ , см.

Как видно из рисунка 2.8., в отличие от конусного твердомера тестер Куроды дает более точные результаты изменения твердости мягкого снега. Однако показатели твердости  $K$  имеют незначительные расхождения в диапазоне от 7,5 до 8,8 при измерении твердого снега плотностью более 0,3



г/см<sup>3</sup> и на глубине более 70 см. Диапазон значений твердости  $H$  по методу Киношиты составляет  $1,3 \div 13$  кг/см<sup>2</sup>.

*При проведении натурных исследований рабочего процесса двухстадийного роторного снегоочистителя, результаты, которых представлены в работе [33], все потребности авторов в измерении прочности (твердости) разрабатываемого снежного массива были удовлетворены использованием в составе прибора Киношиты пластины  $S$  диаметром 5 см.*

Исчерпывающая информация о приборах и методах полевых испытаний грунтов различных категорий методами пенетрации и зондирования, используемых в США, странах Евросоюза, а также и в Российской Федерации изложена профессором Г.Г. Болдыревым в цикле работ, опубликованных журналом «Инженерные изыскания» [27 – 30] и др.

В данных публикациях представлены основные результаты продолжительной тщательной и кропотливой работы автора по изучению и анализу нормативных, технических, конструкторских, эксплуатационных, технологических и прочих документов в исследуемой области в большом объеме. Получили освещение следующие виды полевых испытаний:

- статическое зондирование;
- динамическое зондирование;
- испытания плоским и винтовым штампами;
- испытания плоским гибким и жестким дилатометрами;
- испытания прессиометрами;
- испытания крыльчаткой;
- статические и динамические испытания свай;
- фильтрационные испытания грунтов;
- методы определения длины отдельно стоящих свай и свай в составе существующих свайных фундаментов.

Основные методы полевых испытаний грунтов, их физические параметры, измеряемые при реализации данных методов, определяемые характеристики грунтов, а также ссылки на соответствующие нормативные документы по данным Г.Г. Болдырева, приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. – Основные методы полевых испытаний грунтов по данным Г.Г. Болдырева

Метод испытаний	Условное обозначение	Стандарт	Измеряемые физические величины	Определяемые характеристики грунтов
Динамическая пенетрация	<i>SPT</i> <i>SPTT</i>	<i>ASTM D 1586</i> <i>ISO 22476-2</i> ГОСТ 19912-2001	количество ударов ( $N_{60}$ )	вид грунта мощность слоя $c_u, E_u, G, p_d$
Вращательный срез	<i>VST</i>	<i>ASTM D 2573</i> <i>ISO 22476-9</i> ГОСТ 20276-99	крутящий момент	$c_u$
Поступательный и кольцевой срез		ГОСТ 20276-99 <i>ISO 22476-7</i>	крутящий момент нормальное давление касательное давление деформация сжатия и среза	$c_u, \varphi$
Пенетрация тензозондом	<i>CPT</i>	<i>ASTM D 3441</i> <i>ISO 22476-3</i> ГОСТ 19912-2001	лобовое сопротивление силы трения	вид грунта мощность слоя $c_u, \varphi, E_{oed}$
Пенетрация пьезозондом	<i>CPTU</i>	<i>ISO 22476-1</i> <i>ASTM D 5778</i>	лобовое сопротивление силы трения поровое давление боковое давление	вид грунта мощность слоя $c_u, \varphi, OCR,$ $K_o, E_{oed}, \rho,$ $e_o, D_R, S_t$
Пенетрация сейсмозондом	<i>SCPTU</i>		лобовое сопротивление силы трения поровое давление боковое давление скорость волны сдвига	вид грунта мощность слоя $G, c_u, \varphi,$ $OCR, K_o,$ $E_{oed}, \rho, e_o,$ $D_R, S_t$
Радиальным прессиометром	<i>PMT</i>	<i>ASTM D 4679</i> <i>ISO 22476-4</i> ГОСТ 20276-99	деформация напряжения боковое давление	$p_L, E_{PMT}, K_o,$ $c_u$
Лопастной прессиометр		ГОСТ 20276-99	давление перемещение	$E_{PMT}$
Самозабуривающийся лопастной прессиометр		<i>ASTM D 4679</i> ГОСТ 20276-99 <i>ISO 22476-6</i>	давление перемещение	$E_{PMT}$
Плоский дилатометр	<i>DMT</i>	<i>ASTM D 6635</i> <i>ISO 22476-5</i>	давление	$E_{DMT}, K_o,$
Плоский штамп	<i>PLT</i>	ГОСТ 20276-99	давление осадка	$E_{PLT}, p_L, c_u$

## Окончание таблицы 2.4

Винтовой штамп	<i>SPLT</i>	ГОСТ 20276-99	давление осадка	$E_{SPLT}, p_L, c_u$
Горячий штамп		ГОСТ 20276-99	давление осадка температура	мерзлые грунты $A_{th}, m$
Нейтронно - радиоизотопный		ГОСТ 23061-90	регистрация плотности потока гамма-квантов	$w, \rho$
Срез целиков грунта		ГОСТ 20276-99	касательное напряжение нормальное напряжение вертикальная деформация горизонтальная деформация	$\tau_f, c, \varphi$
<p><math>G</math> – упругий модуль сдвига; <math>E_{PLT}</math> – штамповой модуль деформации; <math>E_{PMT}</math> – прессиометрический модуль деформации; <math>E_{SPLT}</math> – модуль деформации определенный винтовым штампом; <math>E_u</math> – недренированный модуль деформации; <math>E_{oed}</math> – компрессионный модуль деформации; <math>K_o</math> – коэффициент бокового давления в состоянии покоя; <math>c_u</math> – недренированная прочность; <math>p_L</math> – предельное давление; <math>p_d</math> – динамическое сопротивление грунта; <math>w</math> – влажность; <math>\rho</math> – плотность; <math>A_{th}</math> – коэффициент оттаивания; <math>m</math> – коэффициент сжимаемости; <math>\tau_f</math> – предел прочности; <math>c</math> – удельное сцепление; <math>\varphi</math> – угол внутреннего трения; <math>OCR</math> – коэффициент переуплотнения; <math>e_o</math> – коэффициент пористости; <math>D_R</math> – относительная плотность; <math>S_t</math> – чувствительность</p>				

В США практически для всех видов испытаний грунтов используются стандарты *ASTM* (таблица 2.4). В странах Евросоюза требования к полевым испытаниям грунтов регламентированы второй частью документа «Еврокод 7» [209, 210]. В этом документе представлено описание девяти методов полевых испытаний грунтов, в стандартах *ISO 22476* – четырнадцать. Государственными стандартами Российской Федерации предусмотрены двенадцать методов испытаний немерзлых грунтов.

Схемы реализации различных видов испытаний грунтов в полевых условиях проиллюстрированы на рисунке 2.9.

В рамках данной диссертационной работы особый интерес могут представлять технические решения, реализованные в конструкциях средств динамической пенетрации и зондирования, из числа представленных выше, в части способа сообщения энергии индентору посредством использования груза определенной массы, падающего с заданной высоты (рисунок 2.9и), а также форма и геометрические размеры конусного стандартного зонда, (рисунок 2.9к).

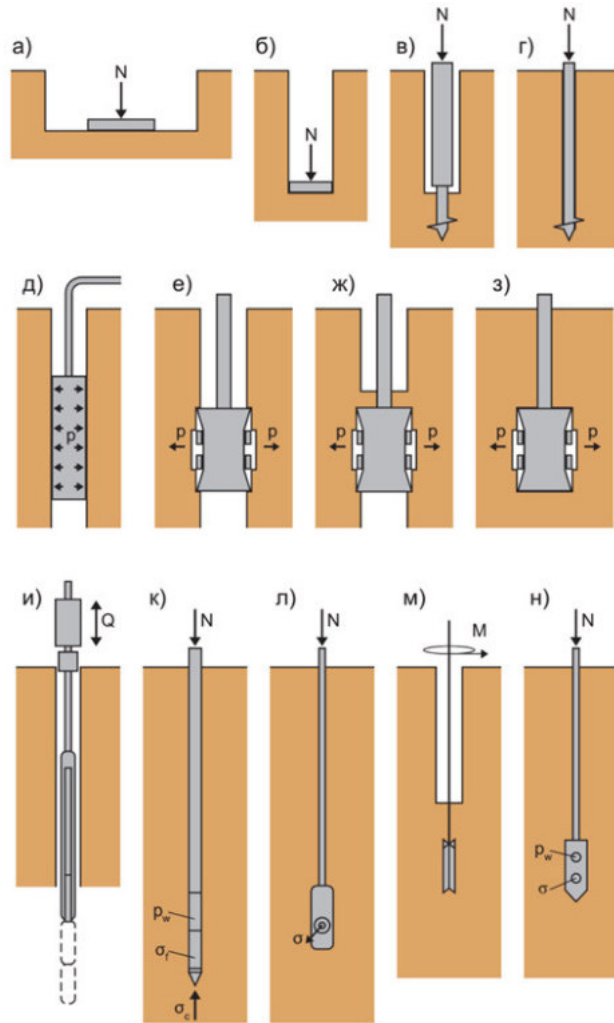


Рисунок 2.9. – Виды испытаний грунтов в полевых условиях: *а* – плоским штампом в шурфах или на дне котлована; *б* – плоским штампом в скважине; *в* – винтовым штампом ниже забоя скважины; *г* – винтовым штампом в массиве; *д* – радиальным прессиометром; *е* – лопастным прессиометром в стенке скважины; *ж* – лопастным прессиометром ниже забоя скважины; *з* – лопастным прессиометром в массиве; *и* – динамическим зондированием; *к* – конусным стандартным или пьезометрическим зондом; *л* – дилатометром; *м* – крыльчаткой в массиве ниже забоя скважины; *н* – плоским статическим зондом.  $N$  – осевая нагрузка;  $M$  – крутящий момент;  $Q$  – масса груза;  $p$  – давление;  $p_w$  – поровое давление;  $\sigma$  – боковое давление;  $\sigma_f$  – касательное напряжение;  $\sigma_c$  – нормальное напряжение

### 2.2.2. Результаты анализа известных средств контроля ФМС различных твердых сред методами динамического зондирования и пенетрации

Результаты анализа известных конструкций средств контроля ФМС различных твердых сред методами динамического зондирования и

пенетрации свидетельствуют о том, что для исследования ФМС уплотненного снега и прочных СЛЮ используются или потенциально могут быть использованы ударник-зонд Союздорнии (рисунок 1.4.), динамический плотномер конструкции А.Н. Зеленина (рисунок 2.5), модель динамического плотномера №9 В.З. Иофика (рисунок 2.6) и прибор С. Киношиты (рисунок 2.7).

Однако, для решения задач данной работы, перечисленные приборы не могут быть использованы по следующим причинам.

Применение ударника-зонда Союздорнии предписано документом [8] применительно к автозимникам – сезонным дорогам, с полотном и дорожной одеждой из снега, льда и мерзлого грунта при толщине снежного (снежно-ледяного полотна) более 100 мм. Методика испытаний твердых сред по числу  $C$  – ударов динамического плотномера, предусматривает (в обязательном порядке) погружение наконечника в испытуемый материал на глубину 100 мм. Соответственно и длина наконечников обоих приборов составляет 100 мм. Но в практике зимнего содержания грунтовых автодорог и аэродромов, а также дорог с искусственным покрытием, в т.ч. и подлежащих очистке, толщина слоя уплотненного снега и прочных снежно-ледяных отложений ограничивается меньшими значениями.

В соответствии с требованиями нормативных документов [5, 7] к уровню зимнего содержания автомобильных дорог, толщина слоя снежного наката (уплотненного снега) на дорожных покрытиях не должна превышать следующих значений:

- для автомобильных дорог с покрытиями из цементобетона асфальтобетона и битумоминеральных смесей, а также автомобильных дорог с покрытиями из обработанных и не обработанных щебеночных и гравийных материалов при интенсивности движения 100-1000 авт./сут – 40 мм;
- для грунтовых автомобильных дорог при интенсивности движения до 100 авт./сут – 60 мм.

В зависимости от наличия или отсутствия на дорогах автобусного движения, по данным работ [41, 42] допустимая толщина снега на покрытиях должна составлять:

- для дорог местного значения с регулярным автобусным движением с интенсивностью до 500 авт./сут – 50 мм;
- для дорог и улиц местного значения непрерывного действия без автобусного движения при интенсивности 200-500 авт./сут – 70 мм, при нерегулярном движении – 100 мм.

Ограничение по толщине слоя уплотненного снега предусмотрено и при зимнем содержании грунтовых взлетно-посадочных полос, подготавливаемых методом очистки. Снег, в соответствии с положениями документа [11], укатывают в начальный период зимы для создания уплотненного слоя толщиной 60-80 мм, который служит для выравнивания микронеровностей поверхности. Дальнейшее содержание производится методом очистки.

Очевидно, что ни ударник-зонд Союздорнии, ни динамический плотномер *конструктивно не приспособлены* для выполнения операций контроля прочности (несущей способности) исследуемой природной среды в рамках решения первой задачи данной диссертационной работы, в силу избыточной длины инденторов, по отношению к толщине слоя покрытий, подлежащих оперативному полевому контролю.

Совершенно невозможно использование данных приборов применительно к прочным снежно-ледяным отложениям.

Вопросы к автору о возможности такого использования этих приборов возникали у коллег как в ходе докладов на НТК различных уровней, так и при защите кандидатской диссертации [134]. С целью получения объективного ответа на эти вопросы, автором данной работы поставлена серия опытов по исследованию процесса взаимодействия динамического плотномера с блоками пресноводного льда. Условия испытаний приведены в

таблице 2.5. В преддверии каждого опыта, ледяной блок и плотномер выдерживались в морозильной камере при соответствующей температуре не менее трех суток.

Таблица 2.5. – Условия проведения опытных наблюдений

№ опыта	Размер ледяного блока (д×ш×в), мм	Температура воздуха в морозильной камере, °С	Плотность материала, г/см <sup>3</sup>	Направление приложения нагрузки	Число ударов плотномера для полного разрушения блока
1	650×330×220	-1	0,8-0,9	вдоль осей кристаллов	7
2	530×250×350	-1	0,8-0,9	перпендикулярно направлению осей кристаллов	11
3	652×310×230	-30	0,8-0,9	вдоль осей кристаллов	22

Результатами выполнения опытов установлено следующее. Погружение наконечника прибора в ледовый массив при каждом ударе гири сопровождается интенсивным растрескиванием материала образца. Образуются множественные трещины круговой формы, располагающиеся концентрично оси приложения нагрузки и одиночные – лучами расходящиеся от этой оси вглубь ледяного блока к его периферии.

Растрескивание материала сопровождается выколом и отделением от массива испытуемого ледяного блока отдельных фрагментов разрушения. Имеет место отсутствие пенетрации – то есть, остановка погружения наконечника, например, при выполнении опыта №2 – при числе ударов 4, 5 и 6. После седьмого удара интенсивность разрушения блока стремительно возрастает и при числе ударов 11 происходит его полное разрушение при неполном погружении наконечника в испытуемый материал.

Анализ результатов проведенных опытов позволяет сделать вывод о том, что *состав и состояние испытуемой среды не позволяют проводить непрерывное последовательное внедрение индентора (наконечника) на заданную глубину*, а именно возможность такого внедрения и является

главным условием реализации методов пенетрации и зондирования для контроля ФМС твердых сред [34].

По этой же причине невозможно применение к прочным снежно-ледяным отложениям и моделей динамического плотномера № 2 – 9 по данным В.З. Иофика (таблица 2.2), а модель № 9 адаптирована только для контроля ФМС уплотненного снега (максимальная плотность  $0,6 \text{ г/см}^3$ ).

Практическое использование прибора С. Киношиты, осложнено отсутствием возможности взаимной жесткой фиксации элементов В и С (рисунок 2.7) концентрично относительно главной оси прибора, а также отсутствием средств контроля вертикального положения этой оси, что способствует снижению точности выполняемых измерений.

Результаты анализа известных устройств динамического зондирования и пенетрации твердых сред свидетельствуют о том, что их эффективное применение возможно только для исследования ФМС мерзлых и немерзлых грунтов и уплотненного снега, но по ряду причин, описанных выше, невозможно, применительно к прочным снежно-ледяным отложениям.

Следует отметить, что все инденторы, этих приборов имеют цилиндрическую форму и плоский торец, за исключением ударника-зонда Союздорнии, наконечник которого имеет коническое заострение. Однако данный прибор является прибором зондирующего действия, а прибор, конструкция которого принята в качестве аналога разрабатываемого прибора – твердомер НИАС (рисунок 1.11), является прибором пенетрационного действия и имеет наконечник конической формы. Поэтому в качестве прототипа следует выбирать прибор с подобными конструктивными признаками. К тому же, разрабатываемый прибор и задумывался как альтернатива твердомеру НИАС.

*Описанные выше конусный твердомер, с углом при вершине  $60^\circ$ , использовавшийся С. Киношитой и тестер Куроды с углом при вершине  $90^\circ$  также имеют инденторы конической формы, но в первом случае высота*



конуса составляет всего лишь 3,8 см. Следовательно, при толщине слоя испытуемого материала превышающей это значение прибор будет работать в режиме зондирующего действия, что не согласуется с концепцией разрабатываемого нового пенетрационного прибора – твердомера.

Кроме того, очевидна существенная разница в значениях угла при вершине конуса этих двух приборов. В открытых источниках информации отсутствуют сведения о научном обосновании этих значений применительно к уплотненному снегу или прочным СЛЮ.

### 2.2.3. Описание конструкции прототипа прибора контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова

Наиболее близким к аналогу техническим решением является конструкция пенетрометра, предложенная В.С. Далиным в работе [43].

Данный пенетрометр (рисунок 2.10) относится к приборам для определения механических свойств грунтов методом пенетрации при производстве изыскательских работ.

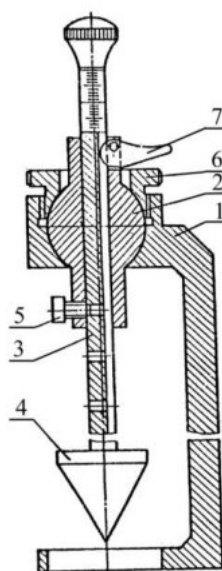


Рисунок 2.10.– Пенетрометр конструкции В.С. Далина

Пенетрометр состоит из корпуса 1, шарового элемента 2, падающего стержня 3 с конусом 4, удерживаемого в заданном положении стопором 5. Гайка 6 служит для фиксации шарового элемента в корпусе. Рычаг 7 для закрепления стержня в нерабочем состоянии и удобства отсчета показаний.

Работают с пенетрометром следующим образом. Устанавливают стержень 3 с конусом 4 в нижнее положение и закрепляют стопором 5. Затем ослабляют гайку 6, отчего стержень 3 с конусом 4 под действием собственного веса устанавливается в вертикальное положение. Затягивают гайку 6, устанавливают стержень 3 на необходимую высоту сбрасывания и закрепляют стопором 5. После освобождения стопора 5, стержень с конусом падают, погружаясь в грунт. По шкале на стержне определяют глубину погружения конуса в грунт, и далее по калибровочной таблице – механические свойства грунта. Упомянутая калибровочная таблица в работе [43] не приводится.

Недостатки изобретения: после установки стержня с конусом в вертикальном положении при фиксации шарового элемента за счет трения шаровой поверхности гайки о поверхность шарового элемента возможен поворот его в плоскости вращения резьбового соединения и тем самым нарушения вертикальности установки падающего стержня с конусом. Часть энергии падающего груза тратится на трение скольжения стержня о направляющие шарового элемента. Это приводит к отклонениям точности определения прочности испытываемой среды.

С учетом результатов анализа средств и методов контроля основных эксплуатационных показателей автомобильных дорог и аэродромов при их зимнем содержании под слоем уплотненного снега, изложенных в Главе 1, а также материалов текущего раздела, в Сибирском федеральном университете при непосредственном участии автора, был разработан изготовлен и испытан в условиях г. Красноярск, аналоговый показывающий измерительный

пенетрационный прибор с динамическим воздействием, прилагаемым к его наконечнику.

Основной целью разработки нового прибора – твердомера, в рамках решения первой задачи данной диссертационной работы является повышение точности измерительного контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог. Конструкцией нового прибора исключены недостатки известных приборов, перечисленные выше.

### **2.3. Измерительный прибор твердомер и метод оперативного полевого контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова на дорожных и аэродромных покрытиях**

В конструкции нового прибора – твердомера сочетаются значимые технические решения, реализованные в приборе – аналоге (рисунок 1.11) и приборе – прототипе (рисунок 2.10), а также в приборах по рис. 2.5 – 2.6 и др.

Твердомер (рисунок 2.11) состоит из корпуса 1, соединенного с основанием 2 посредством опор 3.

Корпус содержит шаровой подшипник 4 (с разрезной наружной обоймой), в сферической головке которого выполнено сквозное отверстие, в котором закреплена направляющая труба 5 с установленным в ней стержнем 6 с коническим наконечником 7, сменным грузом 8, гайкой 20 и мерной линейкой 9, закрепленной на наружной поверхности трубы 5.

В верхней и нижней частях направляющей трубы 5 (в два ряда) выполнены по три сквозных прямоугольных отверстия 10, равномерно расположенных по диаметру. В каждом из этих отверстий расположена вилка 11 с возможностью продольного перемещения.

На концах вилок 11, обращенных внутрь направляющей трубы 5 установлены подшипники качения 12, наружные обоймы которых

соприкасаются с поверхностью стержня 6 и являются направляющими, обеспечивающими его продольное перемещение.

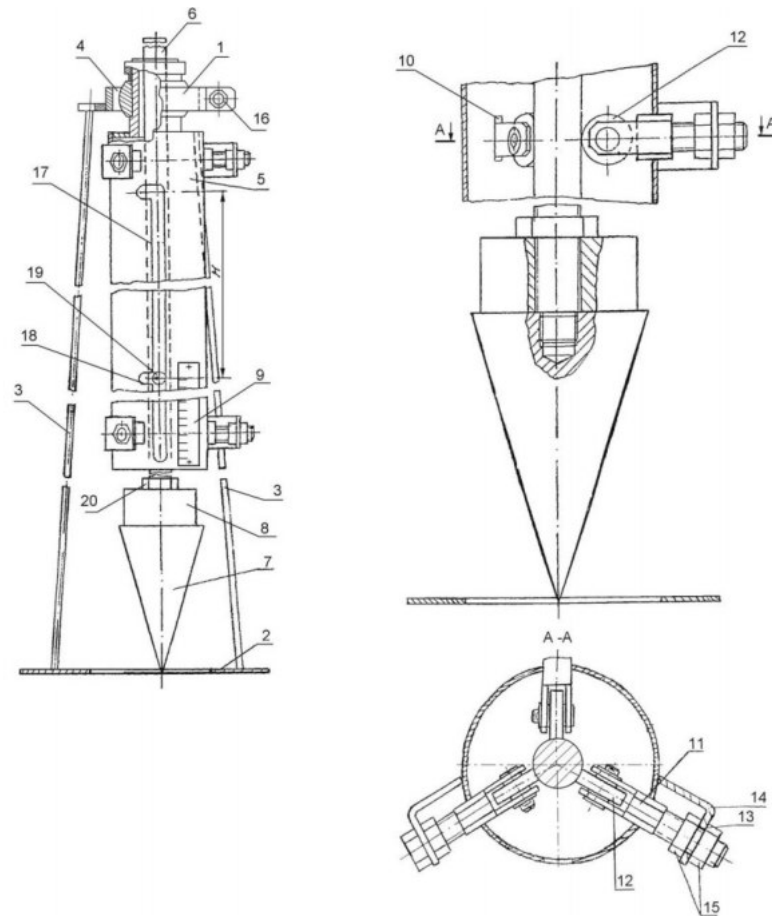


Рисунок 2.11. – Твердомер предлагаемой конструкции:

1 – корпус; 2 – основание; 3 – опоры; 4 – шаровый подшипник; 5 – направляющая труба; 6 – стержень; 7 – конический наконечник; 8 – сменный груз; 9 – мерная линейка; 10 – прямоугольное отверстие; 11 – вилка; 12 – подшипник качения; 13 – цилиндрическое отверстие; 14 – скоба; 15 – гайки регулировочные; 16 – гайка стопора; 17 – продольный паз; 18 – поперечный уступ; 19 – указатель со стрелкой, 20 – гайка

Внешние резьбовые концы вилок 11 установлены в цилиндрических отверстиях 13 скоб 14, жестко закрепленных на направляющей трубе 5. На резьбовом конце каждой вилки 11 установлены гайки 15 для регулировки зазора между наружной обоймой подшипника качения 12 и поверхностью стержня 6. На стержне 6 установлен указатель 19 со стрелкой, который

входит в паз 17, выполненный вдоль продольной оси направляющей трубы 5 и имеющий поперечный уступ 18.

Внешний вид нового твердомера, воплощенного в металле, представлен на рисунке 2.12. Основные параметры твердомера предложенной конструкции представлены в таблице 2.6.



Рис. 2.12. Внешний вид нового твердомера

Таблица 2.6. – Основные параметры нового твердомера

Параметр	Значение
Высота прибора по верхнему торцу стержня, находящегося в нижнем положении, как на рис. 2.9 – 2.10, мм	1300
Наружный диаметр основания, мм	308
Внутренний диаметр основания, мм	140
Длина направляющей трубы, мм	700
Длина продольного паза направляющей трубы, мм	660
Расстояние между поперечными уступами продольного паза, мм	400
Длина стержня без конического наконечника, мм	1200
Диаметр стержня, мм	16
Диаметр основания конического наконечника, мм	80
Высота конического наконечника, мм	128
Угол при вершине конуса наконечника, град.:	
– прибора – аналога:	34°12′
– разработанного прибора:	35°

Масса падающих элементов твердомера, кг по результатам взвешивания на весах ПВм – 3/32 [46]:	
– конического наконечника:	0,503
– стержня с указателем и гайкой:	1,749
– общая масса элементов:	2,252
Общая масса прибора, кг	11,8
Мерная линейка – линейка измерительная металлическая по ГОСТ 427-75 [45]. Предел измерения / цена деления, мм	300/1
Предел измерения твердомера, кПа (кгс/см <sup>2</sup> ):	
– минимальный	294,3 (3,0) ÷ 97,9 (9,99 ≈ 10,0)
– максимальный	170 (1,73) ÷ 3155 (32,17)
Относительная погрешность измерений, определенная по результатам испытаний твердомера на уплотненном снегу и блоках пресноводного льда, %	7,0

В основе метода контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова, реализуемого посредством использования данного прибора, лежит сопротивление испытываемой среды погружению в нее конуса под воздействием прилагаемой к нему внешней нагрузки. Величина этого сопротивления, определяется значением среднего нормального напряжения  $\sigma_l$  (рисунок 2.13), возникающего на боковой поверхности заглубленной части конуса при его взаимодействии с материалом испытываемого покрытия.

Значение  $\sigma_l$  зависит от величины нагрузки, глубины погружения конуса в исследуемый материал, а также и от изменения площади проекции отпечатка конуса, линейно возрастающей при увеличении нагрузки.

Механизм процесса взаимодействия конуса с испытываемой средой проиллюстрирован на расчетных схемах сил и напряжений, возникающих при этом (рис. 2.13) [115].

Здесь  $\sigma_l$  – эпюра нормальных напряжений, равномерно распределенных по поверхности заглубленной части конуса. Условно показаны половина равнодействующей нормальной силы  $0,5N$  на поверхности конуса, и соответствующая часть силы трения  $0,5F$  стали о грунт.

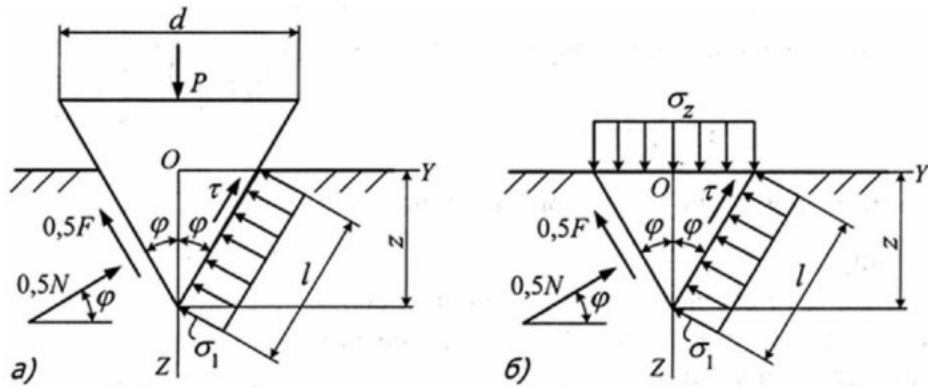


Рисунок 2.13. – Расчетные схемы сил и напряжений, возникающих на заглубленной части конуса при его взаимодействии с испытуемой средой: *а* – общая схема сил; *б* – силы и напряжения, действующие на заглубленную часть конуса

Равнодействующая нормальных сил определяется из выражения

$$N = \sigma_1 A_K = \sigma_1 \pi R l, \quad (2.5)$$

где  $A_K$  – площадь боковой поверхности заглубленной части конуса;

$l$  – длина образующей боковой поверхности заглубленной части конуса:

$$l = \frac{z}{\cos \varphi}, \quad (2.6)$$

где  $z$  – глубина погружения конуса, м

Радиус основания заглубленной части конуса определяется из выражения

$$R = z \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.7)$$

где  $\varphi$  – угол между образующей конуса и его главной осью.

*Примечание:* очевидно, что угол при вершине конуса (угол заострения конического наконечника) будет равен  $2\varphi$ .

Выражение 2.5 можно записать следующим образом

$$N = \sigma_1 \pi r^2 \frac{\sin \varphi}{\cos^2 \varphi}, \quad (2.8)$$

Сила трения на боковой поверхности заглубленной части конуса определится из выражения

$$F = fN, \quad (2.9)$$

где  $f$  – коэффициент трения стали по грунту (табл. 2.7).

Уравнение равновесия сил, действующих на конус, будет иметь следующий вид

$$\sum Z_i = P - N \sin \varphi - F \cos \varphi = 0, \quad (2.10)$$

где  $P$  – внешняя сила, приложенная к основанию конуса.

Подставляя в уравнение 2.10 выражения действующих сил, после преобразований получаем

$$\sigma_1 = \frac{P}{\pi r^2 (tg^2 \varphi + f tg \varphi)}, \quad (2.11)$$

Далее, выражение 2.11 необходимо адаптировать применительно к твердомеру предлагаемой конструкции. Для этого следует выразить силу  $P$  (нагрузку), прилагаемую к коническому наконечнику следующим образом

$$P = mgH, \quad (2.12)$$



где  $m$  – масса падающих элементов твердомера: стержня с указателем, гайкой и коническим наконечником, кг (таблица 2.6);

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$H$  – фиксированная высота падения падающих элементов твердомера, м (таблица 2.4).

Пренебрегая силой трения стали о снег в силу ее малости (табл. 2.8), с учетом выражения 2.12 получаем

$$\sigma_1 = \frac{mgH}{\pi z^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}, \text{кПа} \quad (2.13)$$

где  $\sigma_1$  – показатель прочности снега, кПа;

$m$  – суммарная масса падающих элементов твердомера, кг;

$H$  – высота падения штанги с коническим наконечником, м;

$z$  – глубина погружения конуса, м;

$\varphi$  – 1/2 угла в вершине конуса:  $35^\circ/2 = 17^\circ 30'$ ;

$g$  – ускорение свободного падения:  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

Именно это выражение предложено автором для определения численного значения прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог, в соответствии с методом контроля этого параметра, описанным ниже, в разделе 2.3.

Связь напряжений  $\sigma_1$  на боковой поверхности заглубленной части конуса с вертикальными напряжениями  $\sigma_z$ , действующими на горизонтальную площадку – основание заглубленной части конуса (рис. 2.13), может быть установлена следующим образом. Сила  $P$ , создаваемая напряжениями  $\sigma_z$ , эквивалентна силе, создаваемой напряжениями  $\sigma_1$ , из условия равновесия сил.

Выражая силу  $P$  через напряжения  $\sigma_z$  получаем

$$P = \sigma_z \pi R^2 = \sigma_z \pi r^2 \operatorname{tg}^2 \varphi, \quad (2.14)$$

Из уравнения (2.10) находим

$$\sigma_z = 2\sigma_1 \quad (2.15)$$

Очевидно, что нормальные напряжения  $\sigma_z$  на горизонтальной площадке равны удвоенным напряжениям  $\sigma_1$  на боковой поверхности заглубленной части конуса.

### **2.3.1. Обоснование выбора величины угла при вершине конического индентора и его высоты**

Описание прибора – аналога, изложенное в нормативном документе [11] не содержит никакой информации, поясняющей обоснованность выбора величины угла при вершине конуса наконечника –  $34^\circ 12'$ . В описании прибора – прототипа и вовсе отсутствует информация о численном значении этого параметра. Между тем, выбор величины угла при вершине конуса наконечника твердомера не может быть случайным.

Результаты проведенного автором анализа нормативной, научно-технической литературы в области испытаний различных материалов пенетрацией и зондированием позволили сделать ряд важных выводов и заключений по данному вопросу.

Например, инденторы конической формы, приборов статического и динамического зондирования грунтов, как отечественные [34], так и зарубежные [29], имеют угол при вершине конуса величиной  $60^\circ$ .

Обоснование этой величины, может быть следующим. Основным значимым фрикционным показателем грунтов, различных категорий, препятствующим проникновению в них иного, более твердого и не

получающего остаточных деформаций, тела (в соответствии с определением твердости или прочности материала) принимается угол его внешнего трения, т.е. трения грунта о металл (металла о грунт). Для того чтобы результаты испытаний грунтов пенетрацией и зондированием были достоверными, необходимо чтобы значение величины угла  $\varphi$  между образующей конуса наконечника и его главной осью (рисунок 2.13) было максимально близко значению угла внешнего трения исследуемого грунта.

В таблице 2.7, приведены значения коэффициента трения скольжения стали о грунт (по данным А.Н. Зеленина) для наиболее распространенных видов грунтов, подлежащих разработке различными рабочими органами строительных дорожных машин [31]. Среднее значение указанного коэффициента для всех видов грунтов составит 0,56.

Таблица 2.7. – Коэффициент трения скольжения стали о грунт

Разновидность грунтов	Численные значения коэффициента $f$
Песок, супесь	0,45 – 0,5
Суглинок	0,5-0,6
Глина (включая сухую)	0,6-0,7

Известно, что коэффициент трения скольжения стали о грунт определяется следующим выражением

$$f = tg \varphi \quad (2.16)$$

Приняв угол  $\varphi$ , между образующей конуса и его главной осью (рисунок 2.13), равным углу трения стали о грунт, из выражения (2.16) находим:

$$\varphi = \arctg 0.56 = 29,24$$

Умножая полученный результат на 2, получаем 58,48. Округлив полученный результат, получаем *искомые*  $60^\circ$ .

Иного подхода требует обоснование выбора величины угла при вершине конуса индентора прибора для контроля прочности (несущей) способности уплотненного снежного покрова и прочных СЛЮ. В отличие от грунтов (таблица 2.7), значения коэффициента внешнего трения снега по стали очень малы (таблица 2.8). Для пресноводного льда значение этого коэффициента составляет 0,065 [56]. Это свидетельствует о незначительном трении, не оказывающем существенного противодействия индентору, погружаемому в массив исследуемого материала.

Таблица 2.8. – Коэффициент внешнего трения снега по стали в зависимости от плотности и температуры (по данным Д.А. Шалмана)

Плотность снега, г/см <sup>3</sup>	Температура снега, °С		
	от 0 до - 1	- 4	от - 16 до - 30
0,08-0,12	0,18	0,10	0,14
0,15-0,20	0,11	0,08	0,10
0,25-0,30	0,09	0,07	0,08
0,35-0,40	0,075	0,05	0,06
0,45	0,055	0,04	0,05
0,48	0,05	0,03	0,04
0,52	0,04	0,02	0,03
0,55	0,03	0,015	0,02

В этом случае, основным значимым фрикционным показателем уплотненного снега и прочных СЛЮ, противодействующим проникновению в них конического индентора, следует принимать коэффициент внутреннего трения снега. Значения этого коэффициента по данным Д.А. Шалмана [52] приведены в таблице 2.9.

Среднее значение коэффициента внутреннего трения наиболее плотных видов снега составляет 0,48. Из выражения (2.16) находим:

$$\varphi = \arctg 0.48 = 25,64$$

Следовательно, величина угла при вершине конуса наконечника составит  $2\varphi=50,8^\circ$ .

Таблица 2.9. – Коэффициент внутреннего трения снега в зависимости от его вида, плотности и температуры

Вид снега	Плотность снега, г/см <sup>3</sup>	Температура снега, °С		
		от -1 до -3	от -4 до -22	ниже -22
Свежевыпавший	0,12-0,18	0,30-0,32	0,37-0,42	0,40-0,45
Слабоуплотненный	0,20-0,28	0,35-0,38	0,37-0,40	0,40-0,48
Плотный из мелкозернистого фирна	0,29-0,36	0,37-0,40	0,45-0,50	0,48-0,52
	0,37-0,44	0,40-0,45	0,42-0,48	0,46-0,50
Плотный из крупнозернистого фирна	0,29-0,35	0,42-0,45	0,50-0,57	0,55-0,65
	0,38-0,48	0,40-0,43	0,45-0,53	0,52-0,60
Плотный, слежавшийся под давлением верхних слоев или искусственно уплотненный из мелкозернистого фирна	0,42-0,52	0,48-0,52	0,48-0,53	0,52-0,53
	0,55-0,65	0,45-0,50	0,46-0,50	0,50-0,55

Данное значение практически совпадает с величиной угла при вершине конического наконечника ударника-зонда Союздорнии –  $53^\circ$  (рисунок 1.9), который по ряду причин, приведенных выше, не может быть использован для решения задач данной работы.

Не дает четкого обоснования выбора величины угла при вершине конуса наконечника и И.В. Крагельский – разработчик и создатель самой первой версии твердомера НИАС. В предложенных им конструкциях приборов, описанных в работе [16], использовались конические наконечники с углом и в  $30^\circ$  и в  $45^\circ$ . Судя по всему, эти значения выбирались эмпирически, при большом количестве опытных наблюдений. В современной версии твердомера НИАС (рисунок 1.11), являющегося прибором-аналогом нового твердомера, величина этого параметра составляет  $34^\circ 12'$ . Именно на это значение ориентировался автор данной диссертации при разработке

твердомера предлагаемой конструкции (рисунки 2.11 – 2.12). Каким же образом можно обосновать выбор этого значения?

Целесообразно для такого обоснования определять угол внутреннего трения исследуемой среды, исходя из ее прочностных характеристик: предела прочности на растяжение и предела прочности на одноосное сжатие. Имея численные значения этих параметров можно получить величину угла  $\varphi$ , а также и величину сцепления материала  $C_0$ , как расчетным путем, так и графоаналитическим, в соответствии с теорией напряжений Мора [116].

Ориентируясь на предполагаемое использование разрабатываемого прибора применительно к сильно уплотненному снегу и прочными СЛО, задаемся пределами прочности пресноводного льда на сжатие  $\sigma_{сж}$  и растяжение  $\sigma_p$ . Предел прочности на растяжение  $\sigma_p$ , согласно табл. 1.6, при температуре воздуха от 0 до минус 10 °С составляет 1,2 МПа. Предел прочности льда при сжатии, в направлении, перпендикулярном к осям кристаллов, при температуре от 0 до минус 2 °С составляет  $\sigma_{сж} = 2,3$  МПа (таблица П.А.3.).

На рисунке 2.14 показаны круги напряжений (круги Мора), диаметры которых соответствуют численным значениям  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$ .

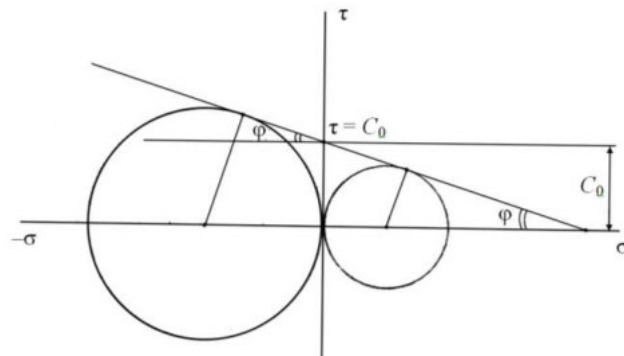


Рисунок 2.14. – Круги Мора для напряженного состояния льда при растяжении и сжатии:

$\tau$  – касательные напряжения;  $\sigma_p = 1,2$  МПа;  $\sigma_{сж} = 2,3$  МПа

Угол, составленный огибающей с осью  $\sigma$ , физически означает угол внутреннего трения  $\varphi$  разрушаемого материала, а точка пересечения

огибающей с осью напряжений – величину напряжения сдвига (разрушающего напряжения), численно равную величине сцепления материала. Используя транспортир и линейку, на оригинале рисунка 2.14 можно определить численные значения искомых параметров.

Также, численное значение сцепления льда  $C_0$  можно определить из выражения

$$C_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \quad (2.17)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – главные нормальные напряжения, равные в данном случае соответственно  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$ .

Величина сцепления льда, определяемая по выражению (2.17), составляет  $C_0 = 1,75 \text{ кН/м}^2$ .

Численное значение угла  $\varphi$  можно получить из следующего выражения:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \geq \sin \varphi, \quad (2.18)$$

Подставляя в выражение (2.18) численные значения напряжений, получаем

$$\sin \varphi \geq 0,314 \Rightarrow \varphi = 18,3^\circ$$

Следовательно, величина угла при вершине конуса наконечника  $2\varphi = 36,6^\circ = 36^\circ 36'$  – значение, очень близкое, значению, заявленному в характеристиках прибора – аналога (твердомера НИАС)  $34^\circ 12'$ .

Фактическая величина угла при вершине конуса наконечника твердомера предлагаемой конструкции (рисунок 2.12) составляет  $35^\circ$ .

Учитывая результаты аналитической работы автора, изложенные в данном разделе, можно предположить, что использованием в твердомере

предлагаемой конструкции, конического наконечника с указанным значением угла при его вершине, будут обеспечиваться достоверные значения показателей прочности (несущей способности) как покрытий из уплотненного снега, так и покрытий из прочных СЛЮ, в частности, содержащих структуру №9 (рисунок 1.3).

*Так как значения параметров прочности льда, приводимые в различных литературных источниках, имеют большой разброс, определять их следует экспериментально, в конкретных местных условиях. Задачи изучения существующих и разработки новых средств и методов оперативного контроля таких параметров требуют выполнения большого объема исследовательских работ и потому в рамках данной диссертации не рассматривались. Автор руководствовался справочными данными.*

Высота конического наконечника 128 – 130 мм, назначается из условия допустимой, в соответствии с требованиями нормативных документов [5, 7] и рекомендациями работ [41, 42], толщиной слоя снежного наката (уплотненного снега) на дорожных и аэродромных покрытиях. Максимальное значение этого параметра – 100 мм, для дорог и улиц местного значения непрерывного действия при интенсивности движения 200 – 500 авт./сут. при нерегулярном автобусном движении. При этом высота конического наконечника должна в обязательном порядке обеспечивать работу прибора в минимальном пределе измерений: 294,3 кПа ( $3,0 \text{ кгс/см}^2$ ) ÷ 97,9 кПа ( $10,0 \text{ кгс/см}^2$ ) (таблица 2.6), крайним значениям которого соответствует глубина погружения наконечника на 100 мм и 50 мм соответственно.

Материал для изготовления конического наконечника – прокат круглый горячекатаный, сталь У8А [119].

В конструкции твердомера использованы открытые шариковые радиальные подшипники качения (подшипник 18 по ГОСТ 8338-75 [117]) поз. 12 (рисунок 2.11). В качестве смазочного материала для этих



подшипников использована смазка «Литол – 24» по ГОСТ 21150-87 [118], предназначенная для узлов трения различного по назначению оборудования, работающего при температурах от минус 40 до 120 °С.

Сборка опытного образца твердомера была завершена в теплое время года. Поэтому, во избежание непроизводительных потерь времени зимой на настройку прибора, его определительные испытания, разработку и отработку основных приемов применения этого средства измерения по назначению, эти мероприятия были выполнены летом на так называемой, парафиновой пробе, т.е. с использованием в качестве испытываемой среды – технического парафина марки Т-2 [47]. Основные физико-химические показатели парафина Т-2 представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Основные физико-химические показатели парафина Т-2

Наименование показателей	Значения в соответствии с требованиями ГОСТ 23686-89 [47]	Фактические значения для продукта производства ЗАО «Химреактивснаб», г. Уфа, использовавшегося в данной работе
Температура плавления, °С	52,0-56,0	54,0
Массовая доля масла, %, не более	2,3	0,98
Плотность при 15 °С, г/см <sup>3</sup>	0,88 – 0,915	0,88 – 0,915
Размеры плиты в состоянии поставки (в×ш×д), мм	-----	40×230×1000
Содержание механических примесей	отсутствие	отсутствие
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	отсутствие	отсутствие

Следует отметить, что парафин ни в коем случае не рассматривался автором как искусственная среда, качественно эквивалентная уплотненному снегу или прочным снежно-ледяным отложениям, в силу существенного различия физико-механических свойств этих сред, их структурных особенностей, различия во внешних условиях, при которых осуществляется взаимодействие индентора прибора с исследуемыми средами и т.д. [49].

Однако ФМС парафина (плотность, прочность, пластичность, отсутствие абразивных включений) позволили многократно погружать в эту среду конический наконечник твердомера без повреждения его материала и без искажения его правильной геометрической формы.

В результате каждого такого погружения, на парафиновом образце образовывались четкие глубокие отпечатки, высокое качество которых обеспечивало возможность их визуального и измерительного контроля (рисунки 2.15, 2.16).

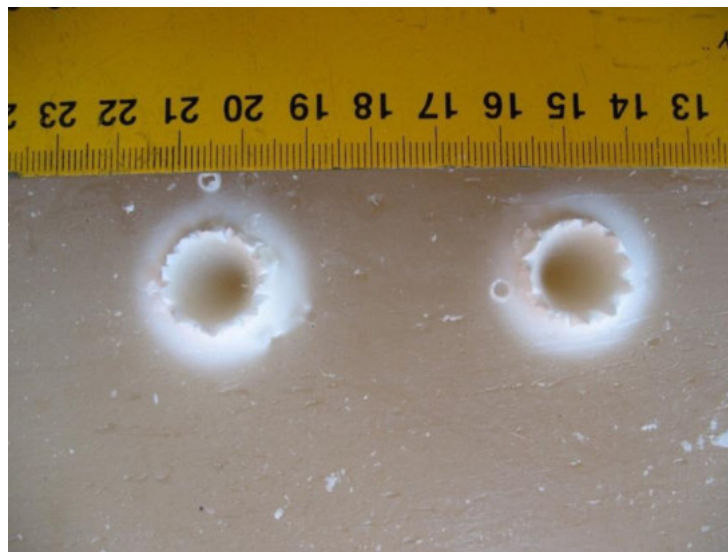


Рисунок 2.15. – Отпечатки, оставленные коническим наконечником твердомера на парафиновом образце – вид сверху

Равномерное (по диаметру отпечатка) уплотнение материала, является результатом его реакции на внедрение в него конического наконечника и воздействия нормальных напряжений  $\sigma_l$ , равномерно распределенных по поверхности заглубленной части конуса.

Так как величина этих напряжений в два раза превышает значения напряжений  $\sigma_z$ , создаваемых силой  $P$ , приложенной к основанию конуса (см. формулу 2.15), часть испытуемого материала, преодолевая сопротивление силы трения стали о парафин и силы внутреннего трения материала,

продвигаясь по поверхности заглубленной части конуса вверх вытесняется из забоя на дневную поверхность.



Рисунок 2.16. – Отпечатки, оставленные коническим наконечником твердомера на парафиновом образце – вид под углом

При этом образуется группа призм, примерно равного размера и с примерно равным шагом, распределенных по периферии отпечатка и возвышающихся над верхней плоскостью парафиновой плиты (рисунок 2.16).

Материал, утративший изначальную целостность в результате воздействия механических напряжений, отреагировал на внешнее воздействие и изменением цвета: от темно-бежевого, до белого, обозначив тем самым размеры его уплотненной зоны (зоны действия напряжений  $\sigma_1$ ).

Использование технического парафина в качестве испытываемой среды позволило в летний период года провести определительные и доводочные испытания нового прибора – твердомера [48], разработать метод контроля с его использованием, прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог, полностью подготовить твердомер к его натурным испытаниям зимой.

#### **2.4. Метод контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых аэродромов и автодорог, реализуемый посредством использования твердомера, предложенной конструкции**

Перед непосредственным использованием твердомера по назначению необходимо произвести его предварительную настройку (настройку на ноль). В качестве вспомогательного средства может быть использована плита поверочная по ГОСТ 10805-86 [120], размеры которой не должны быть меньше наружного диаметра основания 2 прибора, составляющего 308 мм (рисунок 2.11). Например, *Плита 1-0-400×400 ГОСТ 10905-86*. Это плита поверочная чугунная исполнения 1, класса точности 0, размерами 400×400 мм. Исполнение 1 – предполагает ручную шабровку рабочих поверхностей. Допуск плоскостности для класса точности 0 плит указанного размера составляет 6 мкм. Плиту следует установить на поверхности любой ровной площадки с твердым чистым покрытием, а на рабочую поверхность плиты установить твердомер основанием 2. Поверхности поверочной плиты и основания 2 прибора не должны содержать загрязнений. Недопустимо наличие между ними абразивных частиц и мусора.

Перед установкой твердомера на поверочную плиту необходимо при ослабленной гайке 20, вращением по резьбе нижнего конца стержня 6 переместить конический наконечник 7 до упора вверх. Удерживая ручную указатель 19 вместе со стержнем 6, коническим наконечником 7, сменным грузом 8 и гайкой 20, завести его в поперечный уступ 18 продольного паза 17 направляющей трубы 5. При этом стрелка указателя 19 установится на одной горизонтальной линии с нулевым делением шкалы мерной линейки 9. После установки твердомера на поверочную плиту и корректировки вертикального положения направляющей трубы, вращением по резьбе нижнего конца стержня 6, конический наконечник 7 перемещается вдоль его оси вниз, до

упора вершиной в поверхность поверочной плиты, чем обеспечивается расположение точки касания вершины конического наконечника 7 с поверочной плитой в одной плоскости с нижней поверхностью основания 2. Это положение фиксируется затяжкой гайки 20 с последующим пломбированием резьбового соединения краской.

Для определения прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова прибор основанием 2 устанавливается на предварительно выровненный участок исследуемого покрытия и указатель 19 со стрелкой заводится в нижний поперечный уступ 18 паза 17 направляющей трубы 5. При этом вершина конического наконечника 7 находится в плоскости основания 2, соприкасающегося со снежным покровом, а направляющая труба 5 с размещенными на ней и внутри нее элементами прибора устанавливается оператором в корпусе 1 вертикально. Такое положение направляющей трубы 5 и корпуса 1 фиксируется путем затяжки гайки 16 стопора. При этом стягивается разрезная обойма шарового подшипника 4, охватывающая его сферическую головку, несущую направляющую трубу 5. Затем падающие элементы прибора: стержень 6, конический наконечник 7, сменный груз 8, гайка 20 вручную, захватом за указатель 19 со стрелкой перемещаются по продольному пазу 17 вверх на 0,4 м (в крайнее верхнее положение). Из этого положения стержень отпускается. При этом падающие элементы твердомера под действием собственной тяжести движутся вниз, обеспечивая внедрение наконечника 7 конической поверхностью в исследуемое покрытие. Величина глубины внедрения конического наконечника 7 считывается со шкалы мерной линейки 9 по делениям напротив стрелки указателя 19 (рисунки 2.11, 2.17).

Прочность уплотненного снежного покрова (прочных СЛО) в зависимости от прилагаемой нагрузки и глубины погружения конуса определяется по формуле (2.13.). Например, при  $m = 2252$  кг,  $H = 0,4$  м,  $z =$

0,04 м,  $2\varphi = 35^\circ$ ,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  значение прочности СЛО составит  $\sigma_l = 1776 \text{ кПа} = 1,8 \text{ МПа}$  (таблица 2.12).

Полученные значения прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова сравнивают с нормативными значениями этого параметра для воздушных судов (ВС) различной взлетной массы в соответствии с установленной их классификацией [20]. Для каждого класса ВС устанавливается эксплуатационная и минимально допустимая прочность уплотненного снега (таблица 2.11), которая должна обеспечиваться аэродромными службами в процессе эксплуатации аэродрома.



Рисунок 2.17. – Определение глубины погружения конического наконечника в исследуемое покрытие по шкале мерной линейки твердомера: *а* – на парафиновой пробе; *б* – на уплотненном снегу

Например, для ВС Ан-2, М-15, Л-410М (4 класс):

– для регулярных полетов (эксплуатационная прочность):  $392,4 \text{ кПа}$  ( $4 \text{ кгс/см}^2$ );

– для разовых полетов (минимально допустимая прочность):  $294,3 \text{ кПа}$  ( $3 \text{ кгс/см}^2$ ).

Прочность (несущую способность) уплотненного снежного покрова на грунтовых (ГВП) и искусственных взлетно-посадочных полосах (ИВП) аэродромов, его плотность и толщину, определяют перед началом эксплуатации аэродрома по оси и продольным краям ВПП через каждые 200 м, а также на участках наибольшей глубины колеи от уплотняющих средств.

Таблица 2.11 – Прочность уплотненного снежного покрова для воздушных судов различных классов

Класс воздушного судна	Максимальная взлетная масса, т		Тип воздушного судна	Прочность уплотненного снега, кПа (кгс/см <sup>2</sup> )	
	самолета	вертолета		Для регулярных полетов (эксплуатационная прочность)	Для разовых полетов (минимально допустимая прочность)
1	75 и более	10 и более	Ил-96, Ил-86, Ил-76, Ил-62, Ту-204, Ту-154, Ми-26, Ми-10, Ми-6, Ми-8, Ка-32	779,6 – 979,7 (7,95 - 9,99)	590,4 - 779,6 (6,02 – 7,95)
2	от 30 до 75	от 5 до 10	Ан-12, Ил-18, Ту-134, Як-42, В-3	879,7 (8,97)	679,6 (6,93)
3	от 10 до 30	от 2 до 5	Ан-74, Ан-24, Ан-26, Ан-30, Ил-114, Ил-14Як-40, Ка-26, Ка-126, Ми-2	579,6 – 779,6 (5,91 – 7,95)	390,3– 489,4 (3,98 - 4,99)
4	до 10	до 2	Ан-2, Л-410М	392,4 (4,0)	294,3 (3,0)
Примечание: для вертолетов всех типов прочность уплотненного снежного покрова должна быть не менее 294,3 кПа (3 кгс/см <sup>2</sup> ).					

В процессе дальнейшей эксплуатации аэродрома значения этих параметров следует определять после каждого выполнения работ по уплотнению снега и повышения температуры воздуха. Измерения необходимо производить на концевых участках по оси ГВП через 50 м, а на средних участках через 200 м [11]. Для аэродромов класса «Е», с минимальной длиной взлетно-посадочной полосы 500 м [12], замеры прочности снежного покрытия следует производить по оси ВПП через 25 м на стартовых участках и через 100 м на среднем участке. Количество наблюдений для каждой контрольной точки документом [11] не регламентируется.

#### **2.4.1. Натурные испытания нового твердомера. Обработка и анализ результатов испытаний прибора**

Первые натурные испытания нового твердомера были проведены в феврале 2010 года на уплотненном снегу проезжей части автомобильной

дороги с основным покрытием из асфальтобетона. Измерения производились по оси каждой колеи с шагом 5 м. Температура воздуха составляла  $-9^{\circ}\text{C}$ , температура уплотненного снега в шпуре  $-15^{\circ}\text{C}$ , средняя толщина слоя наката 120 мм, плотность снега около  $0,5 \text{ г/см}^3$ . Результаты измерений представлены в таблице 2.12.

Зимой 2015 года с целью изучения возможности использования применительно к прочным СЛЮ, твердомер был испытан на ледяных блоках из пресноводного льда, содержащих в поверхностной зоне структуру №9.

Таблица 2.12. – Результаты натуральных испытаний твердомера на уплотненном снегу

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глубина погружения конического наконечника твердомера, мм	41	40	42	47	43	39	32	41	43	38
Показатель прочности снега в соотв. с форм. (2.13) $\sigma_I$ , кПа	1688	1776	1611	1285	1780	1867	2776	1688	1780	1966
Показатель прочности снега $\sigma_I$ , кгс/см <sup>2</sup>	17,21	18,11	16,43	13,10	18,15	19,04	28,31	17,21	18,15	20,05

Испытания проводились в различных температурных условиях, обеспечиваемых морозильной камерой. Диапазон температур составлял –от минус 1 до минус  $30^{\circ}\text{C}$  с шагом в  $5^{\circ}\text{C}$ . В преддверии каждой серии опытов, в каждой температурной точке, ледяные блоки и твердомер выдерживались в морозильной камере не менее трех суток. Средний размер ледяных блоков (д×ш×в):  $650 \times 330 \times 250$  мм. Направление приложения нагрузки – вдоль осей кристаллов среднего слоя основного массива льда. Приповерхностные структуры льда: № 7 – 9 (рисунок 1.3, таблица П.А.1.) преимущественно имеют хаотичное расположение кристаллов. Плотность материала  $0,7 - 0,8 \text{ г/см}^3$ . Результаты испытаний представлены в табл. П. Б.1. – П. Б.7.

В общей сложности проведено восемь серий опытов: одна серия на уплотненном снегу, и семь серий на льду в каждой из семи температурных



точек. Достоверность результатов измерений для каждой серии опытов оценивалась по сопоставимости результатов десятикратного испытания прибора.

При обработке результатов испытаний с использованием табличного процессора «Microsoft Excel» определены следующие показатели:

- среднее значение величины  $z$  – глубины погружения наконечника;
- сумма квадратов отклонений измеряемой величины от ее среднего значения;
- средняя квадратичная ошибка (стандарт измерений);
- абсолютная погрешность каждого измерения серии и средняя абсолютная погрешность всей совокупности наблюдений для каждой серии опытов;
- средняя относительная погрешность измерений;
- доверительный интервал.

Среднее значение параметра  $z$  – глубины погружения конического наконечника в испытываемую среду определяется как среднее арифметическое результатов, полученных для каждой серии опытов по формуле [121, 122]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.19)$$

Точность результатов каждого измерения при десяти наблюдениях характеризуется средней квадратической ошибкой (стандартом измерений), которая определяется по формуле [122]

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (2.20)$$

где:  $n$  – число наблюдений;

$\bar{x}$  – среднее арифметическое значение показателя;

$x_i$  – численное значение отдельных измерений.

Абсолютная погрешность измерений определяется как разность между средним арифметическим значением каждого из показателей и значением, полученным при отдельном наблюдении из выражения [121]

$$\Delta x_i = |\bar{x} - x_i|, \quad (2.21)$$

Средняя абсолютная погрешность измерений всей совокупности наблюдений для каждой серии опытов определяется из выражения

$$\varepsilon_a = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n}, \quad (2.22)$$

Относительная погрешность измерений определяется из следующего выражения [121]

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (2.23)$$

Для характеристики величины случайной ошибки измерений необходимо знать доверительный интервал и величину доверительной вероятности, которая позволяет оценить степень надежности полученного результата. При измерениях можно ограничиться доверительной вероятностью  $\alpha = 0,95$  [121], которой соответствует доверительный интервал, выраженный в долях стандарта  $\omega = 2,0$ . Так, для измерений показателей каждого наблюдения доверительный интервал  $\Delta \tau_x^-$  определится по формуле

$$\Delta \tau_x^- = S_n \cdot \omega, \quad (2.24)$$

Результаты вычислений сведены в таблицу 2.13. Очевидно, что прослеживается тенденция возрастания прочности СЛО с понижением температуры, о чем свидетельствует постепенное уменьшение величины  $z$  (см. гр. 2 таблицы 2.13), что справедливо, так как величина прочности тем больше, чем больше плотность и ниже температура этой среды.

При этом на прочность исследуемых СЛО в большей степени влияет температура окружающего воздуха, определяющая степень упрочнения межкристаллических связей СЛО, а не температура материала в блоках, значения которой нестабильны [табл. П. Б.1. – П. Б.7.].

Таблица 2.13 – Данные статистической обработки результатов испытаний твердомера на уплотненном снегу и блоках пресноводного льда

Испытуемая среда (отсылка к исходным данным)	Показатели					
	Среднее значение величины $z$ - глубины погружения наконечника $\bar{z}$ (мм)	Сумма квадратов отклонений измеряемой величины от среднего значения $\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)$	Средняя квадратичная ошибка (стандарт измерений), $S_n$ , мм	Средняя абсолютная погрешность $\epsilon_a$ , мм	Средняя относительная погрешность, $\epsilon$ (%)	Доверительный интервал $\Delta \tau_x$ , мм
1	2	3	4	5	6	7
Уплотненный снег (табл. 2.9)	40,6	138,4	3,92	2,68	6,51	$\pm 7,8$
Лед (табл. П. 5.1.)	19,7	40,1	0,211	1,76	8,94	$\pm 4,2$
Лед (табл. П. 5.2.)	19,0	22	1,56	1,2	6,33	$\pm 3,13$
Лед (табл. П. 5.3.)	19,2	51,6	2,39	2,04	10,65	$\pm 4,78$
Лед (табл. П. 5.4.)	15,5	10,5	1,1	0,9	5,8	$\pm 2,16$
Лед (табл. П. 5.5.)	14,6	12,4	1,17	1,0	6,77	$\pm 2,35$
Лед (табл. П. 5.6.)	15,1	6,9	0,88	0,72	4,8	$\pm 1,8$
Лед (табл. П. 5.7.)	14,7	14,1	1,25	0,96	6,4	$\pm 2,5$

Закономерность взаимного влияния этих двух параметров установить практически невозможно в силу изменчивости теплофизических свойств льда

(теплопроводности, температуропроводности) как во времени, так и по сечению снежно-ледяного (ледового) покрова [56].

Средняя относительная погрешность (СОП) измерений для всей совокупности результатов восьми опытов, при описанных выше условиях их проведения, составляет 7%, что допустимо. Однако величина данного параметра для некоторых пенетрационных приборов, например, динамического плотномера конструкции МГП «Кондор» (рисунок 2.18), заявленная производителем, составляет  $1,0 \div 1,5\%$  (таблица 2.14).

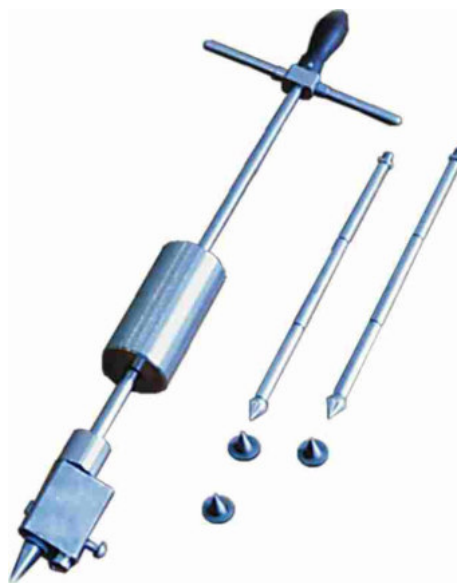


Рисунок 2.18. — Динамический плотномер конструкции МГП «Кондор»

Данный плотномер предназначен для контроля качества асфальтобетона, а существенная разница значений СОП двух приборов объясняется, прежде всего, существенной разницей физико-механических свойств асфальтобетона и СЛЮ.

Асфальтобетон, преимущественно анизотропная среда, контроль механических свойств которой осуществляется при положительных температурах воздуха. Изменение ФМС этой среды под воздействием внешних факторов не столь динамично как у СЛЮ.

Таблица 2.14. – Основные технические характеристики динамического плотномера конструкции МГП «Кондор»

Общая масса прибора, кг	4
Параметры инденторов: $d$ - диаметр основания; $H$ - высота конуса, мм. Малый конус Большой конус	$d = 12; H = 18$ $d = 17; H = 30$
Масса падающего груза, кг	$2,5 \pm 1$
Высота падения груза, мм	$300 \pm 1$
Относительная погрешность измерения, %	1,0-1,5
Предел измерений, $K_{упл}$	0,9-1,0

Уплотненный снег и прочные СЛЮ в зависимости от условий формирования, степени воздействия на них уплотняющей нагрузки и других факторов могут обладать как свойствами анизотропной, так и свойствами изотропной среды. Главной особенностью ФМС снега и льда является их крайняя нестабильность, как по площади покрова, так и во времени (см. Главу 1). Этой особенностью также обусловлены величина и неравномерность изменения доверительного интервала измерений твердомера применительно к прочным СЛЮ, а для уплотненного снега доверительный интервал имеет максимальное значение из числа всех данных, представленных в гр. 7 таблицы 2.13.

О существенном варьировании прочности уплотненного снежного покрова на различных участках летного поля грунтовых аэродромов говорит и И.В. Крагельский – разработчик первой версии твердомера НИАС, в работе [16]. Этим обуславливалась необходимость для получения среднего значения прочности, выполнения большого количества испытаний. Коэффициент вариации для прочности составлял примерно 30-35%. При заданной точности в 5% необходимое число наблюдений составляло 30 – 40.

Анализируя вышесказанное можно предположить, что при определении средней относительной погрешности измерений прибора и доверительного интервала измерений посредством испытания прибора на эталонной изотропной среде, обладающей постоянством ФМС по площади,

объему и во времени, значения этих параметров будут значительно ниже, а характер их изменения в различных условиях выполнения измерений более равномерным.

Однако в рамках данной работы для решения ее задач, было целесообразным проведение испытаний нового прибора именно в условиях его использования по прямому назначению, то есть применительно к уплотненному снегу и прочным СЛЮ.

Результаты расчета значений  $\sigma_l$  прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова при изменяющейся глубине  $z$  погружения конического наконечника нового твердомера в соответствии с формулой 2.13 представлены в таблице 2.15.

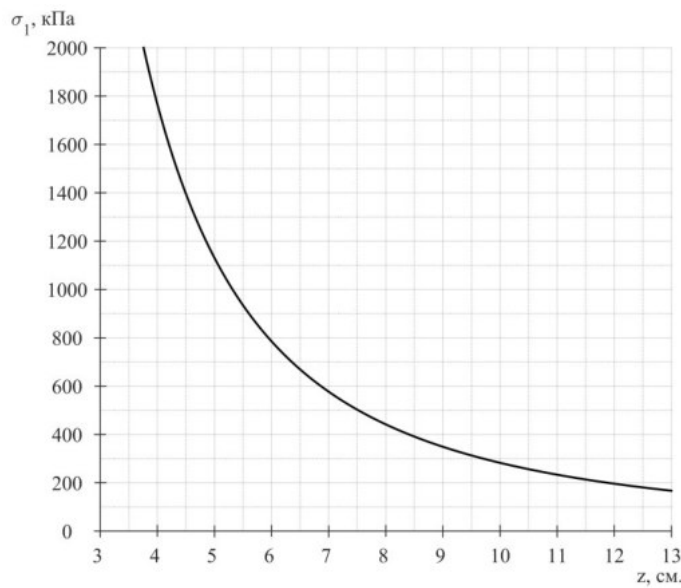
По данным таблицы 2.15, средствами табличного процессора «Microsoft Excel» построен график зависимости прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова от глубины погружения конического наконечника (рисунок 2.19а).

Таблица 2.15. – Результаты расчета значений прочности уплотненного снега

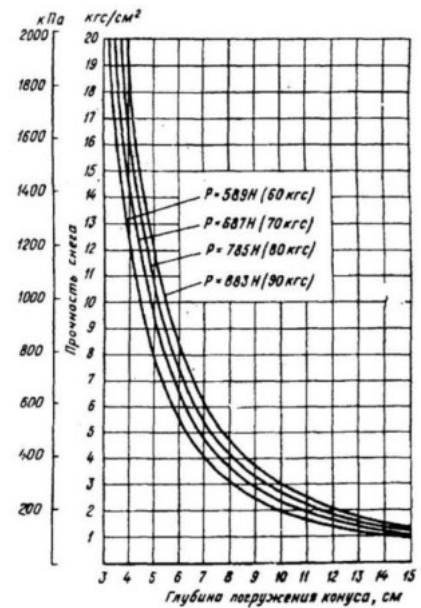
$z$ , см	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\sigma_l$ , кПа	7102	3155	1775	1136	789	580	444	351	284	235	197	168
$\sigma_l$ , кгс/см <sup>2</sup>	72,42	32,17	18,10	11,58	8,05	5,91	4,53	3,58	2,9	2,4	2,01	1,71

Достоверность аппроксимации данной кривой  $R^2 = 0,98$ , что свидетельствует о непосредственной близости ее линии тренда к фактическим данным. Для сравнения, на рисунке 2.19б представлен график зависимости тех же параметров, утвержденный к использованию нормативным документом [11].

Очевидно, что значения контролируемого параметра  $\sigma_l$  на обоих графиках для нагрузки  $P = 883$  Н (что соответствует нагрузке, создаваемой падающими элементами нового твердомера) практически совпадают.



а



б

Рисунок 2.19. – Зависимость прочности уплотненного снежного покрова от глубины погружения конического наконечника: а – по результатам расчета в соответствии с формулой (2.13); б – по данным документа [11]

Этим подтверждается правильность математического описания процесса взаимодействия конуса с испытуемой средой (формулы 2.5 – 2.11) в соответствии с расчетными схемами сил и напряжений (рисунок 2.13), корректность допущений, принятых при адаптации выражения (2.11) применительно к твердомеру предлагаемой конструкции и получении конечного выражения (2.13) для расчета показателя прочности уплотненного снега. Подтверждается также правильность выбора величины угла при вершине конуса наконечника прибора и суммарной массы его падающих элементов.

Результатами статистической обработки опытных данных подтверждается достоверность значений прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова и прочных СЛЮ, получаемых при реализации разработанного автором метода контроля этого параметра посредством использования твердомера, предложенной конструкции.

Нормативные значения контролируемого параметра лежат в диапазоне

от 294,3 кПа (3,0 кгс/см<sup>2</sup>) до 979,7 кПа (9,99 ≈ 10,0 кгс/см<sup>2</sup>) (таблица 2.11). Следовательно, и минимально необходимый предел измерения прибора соответствует указанному диапазону значений. Максимальный предел измерений составляет 170 кПа (1,73 кгс/см<sup>2</sup>) ÷ 3155 кПа (32,17 кгс/см<sup>2</sup>). Глубина погружения конического наконечника твердомера для значений минимального предела измерений составляет 100 мм и 50 мм соответственно, для значений максимального предела измерений: 130 мм и 30 мм соответственно. Значения показателя прочности  $\sigma_I$ , соответствующие глубине погружения наконечника менее 30 мм нормативным документом [11] не учитываются (рисунок 2.19 б). На графике  $\sigma_I = f(z)$  для нового твердомера (рисунок 2.19 а) эти значения также не учтены, так как находятся далеко за верхней границей нормативного (для уплотненного снега) диапазона значений показателя прочности. Применительно к прочным СЛО, значения показателя прочности  $\sigma_I$  следует определять только расчетным путем в соответствии с формулой (2.13).

Схема применения метода контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог представлена на рисунке 6.1.

Основные результаты работ, относящихся к созданию нового твердомера, изложены автором в публикациях [123, 124].

Конструкция данного аналогового показывающего измерительного прибора – твердомера защищена патентом Российской Федерации на изобретение № 2350923 [44].

**2.5. Модернизированный твердомер для оперативного полевого контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова на дорожных и аэродромных покрытиях**



Не смотря на общие положительные результаты испытаний нового твердомера, эти испытания позволили выявить и ряд недостатков его конструкции:

– невозможность обеспечения устойчивого вертикального положения продольной оси прибора даже при незначительных неровностях исследуемого покрытия в силу малой площади опорной поверхности плоского основания твердомера, при значительной высоте прибора. При выполнении одним оператором каждого измерения необходимо привлечение второго оператора для удержания направляющей трубы твердомера в вертикальном положении;

– перемещение падающих элементов прибора в крайнее верхнее положение вручную, перед началом каждого измерения после предварительной настройки твердомера, а также, обеспечение последующего их падения, сопровождается приложением боковых нагрузок к элементам прибора, что приводит к дополнительному нарушению стабилизации продольной оси твердомера в вертикальном положении;

– конструкцией прибора не предусмотрена возможность фиксации падающих элементов при транспортировании твердомера, что может привести к их самопроизвольному выпадению из направляющей трубы при транспортировке прибора и удару конического наконечника вершиной о твердые покрытия и предметы, следствием чего может явиться деформация металла острия и утрата коническим наконечником правильной геометрической формы;

– невозможно осуществлять качественный контроль и корректировку установки продольной оси прибора в вертикальном положении в силу отсутствия уровнемера.

Перечисленные недостатки способствуют снижению точности выполняемых измерений, повышению трудоемкости работ по их

выполнению и создают серьезные неудобства в работе оператора, выполняющего эти измерения.

С целью повышения точности определения прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова и прочных СЛЮ, снижения трудоемкости работ по измерению данного параметра и обеспечения удобства эксплуатации прибора, в Сибирском федеральном университете разработана конструкция модернизированного твердомера (рисунок 2.20), исключающая недостатки, перечисленные выше [125].

Модернизированный твердомер состоит из корпуса 1, опирающегося на исследуемое покрытие тремя телескопическими стойками 2, шарнирно соединенными с корпусом 1 посредством трех проушин 3, расположенных на его внешней боковой поверхности равномерно через  $120^\circ$  и болтов, пропущенных через отверстия в проушинах 3 и шипах наконечников 4 каждой из стоек 2.

Внутри корпуса 1 заключена разрезная обойма 5, охватывающая сферическую часть шарового элемента 6, имеющего также верхнюю удлиненную часть цилиндрической формы, с выполненными в ней двумя продольными сквозными криволинейными пазами 7, расположенными диаметрально противоположно (рисунок 2.21), и нижнюю укороченную цилиндрическую часть, имеющую резьбовое отверстие для установки стопорного винта 8.

На внутренней цилиндрической поверхности шарового элемента 6, образуемой сквозным продольным отверстием выполнены два продольных паза 9, расположенные соосно со сквозными криволинейными пазами 7 и равные им по ширине. На верхней удлиненной части шарового элемента 6 снаружи на противоположных краях каждого из криволинейных пазов 7 попарно закреплены четыре кронштейна 10, в отверстиях которых с возможностью осевого вращения установлены валы 11 (рисунок 2.22).

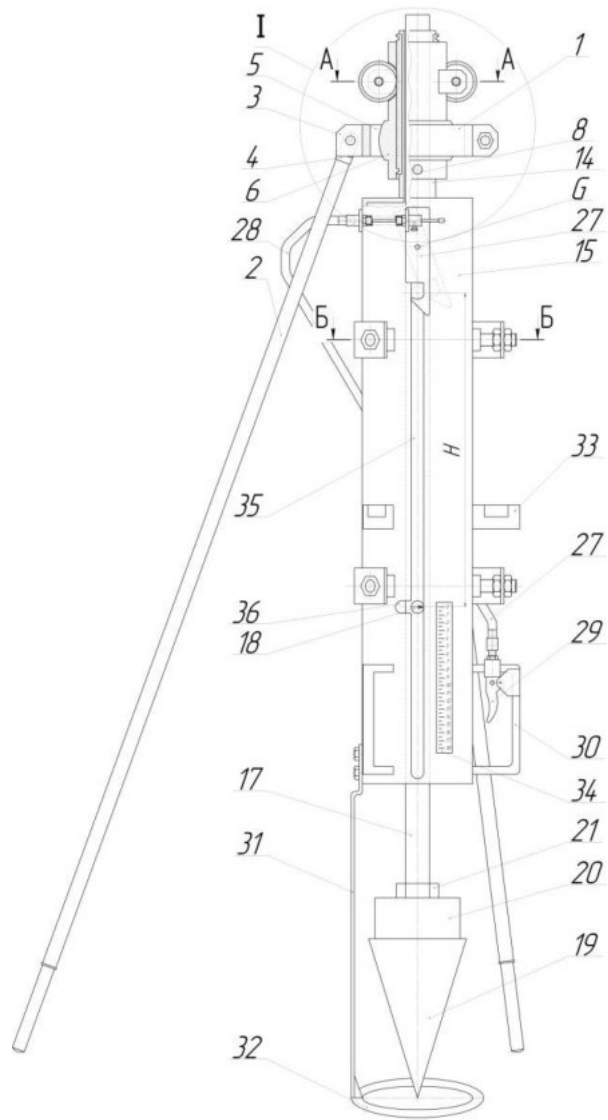


Рисунок 2.20. – Модернизированный твердомер

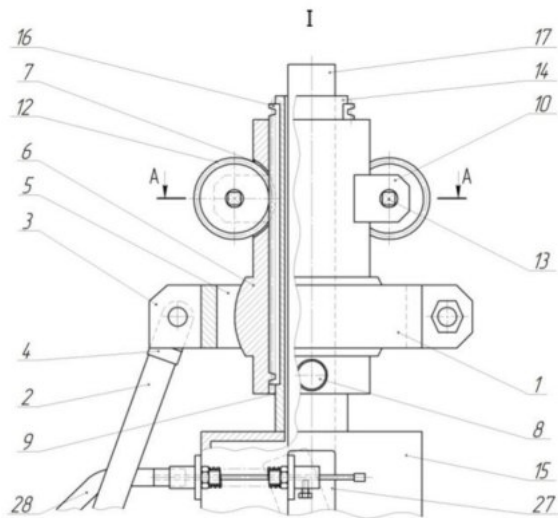


Рисунок 2.21. – Выносной элемент I на рисунке 2.20

На валах 11 закреплены зубчатые колеса 12, частично входящие в сквозные криволинейные пазы 7. Валы 11 оканчиваются квадратами 13, на каждый из которых может быть установлена кривошипная рукоятка. Во внутреннем сквозном продольном отверстии шарового элемента 6 (рисунки 2.21, 2.22) установлен стакан 14 направляющей трубы 15, на поверхности которого в двух диаметрально противоположных продольных пазах установлены зубчатые рейки 16, частично входящие в продольные пазы 9 шарового элемента 6 и находящиеся в зацеплении с зубчатыми колесами 12.

Внутри направляющей трубы 15 (рисунок 2.20) с возможностью продольного перемещения установлен стержень 17 с указателем 18 со стрелкой, коническим наконечником 19 и сменным грузом 20, зафиксированным гайкой 21. Подшипниковые узлы, обеспечивающие продольное перемещение стержня 17 и установленных на нем элементов устроены также как и в приборе-прототипе (рисунок 2.11).

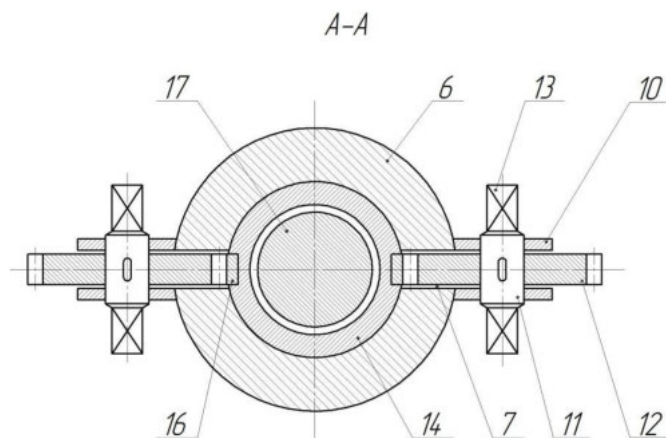


Рисунок 2.22. – Разрез А-А на рисунке 2.21

Снаружи направляющей трубы 15 установлены затвор 27 (рисунок 2.20), связанный приводным тросом 28 со спусковым крючком 29 расположенным на рукояти 30, стойка 31 несущая упорное кольцо 32, уровнемеры 33 и мерная линейка 34. Вдоль основной оси направляющей трубы 15 выполнен продольный паз 35 с поперечным уступом 36. В паз 35

входит указатель 18 со стрелкой, который по рискам делений мерной линейки 34 указывает величину глубины погружения конического наконечника в снежный покров. Указатель 18 со стрелкой, жестко соединенный со стержнем 17, представляет собой палец, на торцевой поверхности которого выгравирована стрелка, продольная ось которой устанавливается при закреплении указателя на стержне 17 строго перпендикулярно его продольной оси. Стержень 17 имеет резьбовое соединение с коническим наконечником 19, а сменный груз 20 плотно поджат к коническому наконечнику с помощью гайки 21.

Твердомер работает следующим образом. Для предварительной настройки прибор тремя телескопическими стойками 2 устанавливается на ровной площадке с твердым покрытием (возможно в помещении). Постоянная величина угла разведения стоек обеспечивается формой наконечников 4 и проушин 3. При этом направляющая труба 15 посредством реечной передачи, приводимой вручную кривошипной рукояткой, установленной на любом из квадратов 13, должна быть поднята в крайнее верхнее положение до упора ее верхнего торца в нижний торец шарового элемента 6 и зафиксирована стопорным болтом 8. Стержень 17 с коническим наконечником 19, сменным грузом 20 и гайкой 21 также должен быть зафиксирован в крайнем верхнем положении посредством указателя 18 и затвора 27. Телескопические стойки 2 выдвигаются в длину на равное расстояние, достаточное для того, чтобы при установке прибора на опорную поверхность был обеспечен зазор между этой поверхностью и нижней поверхностью упорного кольца 32. Минимальная величина этого зазора может составлять 30-50 мм, а максимальная - не должна превышать хода реечной передачи. Посредством болта и гайки, стягивающих концы хомута (корпуса 1), в соединении шаровой элемент 6 – разрезная обойма 5 задается натяг, величина которого должна обеспечивать поворот сферической части шарового элемента 6 в разрезной обойме 5 с некоторым усилием. Ручным

захватом за одну или обе рукояти 30 направляющая труба 15 приводится в вертикальное положение, контроль которого осуществляется при помощи уровнемеров 33.

Затем производится установка прибора на ноль. Для этого направляющая труба 15 при ослабленном стопорном болте 8 посредством реечной передачи, приводимой вручную кривошипной рукояткой, установленной на любом из квадратов 13, переводится вниз, до упора упорным кольцом 32 в поверхность поверочной плиты, установленной на ровной горизонтальной площадке. Размеры поверочной плиты должны быть не менее внешнего диаметра опорного кольца 32. Указатель 18, удерживаемый пальцами одной руки высвобождается из затвора 27 нажатием на спусковой крючок 29, и вместе со стержнем 17, коническим наконечником 19, сменным грузом 20 и гайкой 21 плавно переводится в нижнее положение и заводится в поперечный уступ 36. При этом стрелка указателя 18 установится на одной горизонтальной линии с нулевым делением шкалы мерной линейки 34. При ослабленной гайке 21 вращением по резьбе нижнего конца стержня 17 конический наконечник 19 перемещается вдоль его оси вниз, до упора вершиной в поверхность поверочной плиты, чем обеспечивается расположение точки касания вершины конического наконечника 19 с поверочной пластиной в одной плоскости с нижней поверхностью опорного кольца 32. Это положение фиксируется затяжкой гайки 21 с последующим пломбированием резьбового соединения краской.

По окончании предварительной настройки и установки прибора на ноль, захватом за указатель 18 стержень 17 с коническим наконечником 19, сменным грузом 20 и гайкой 21 переводится в крайнее верхнее положение и фиксируется затвором 27. Направляющая труба 15 посредством реечной передачи также переводится в крайнее верхнее положение и фиксируется стопорным болтом 8.

Для выполнения измерений прибор устанавливается на исследуемое покрытие тремя телескопическими стойками 2 с максимальным углом их разведения. При этом необходимо обеспечить просадку нижних наконечников телескопических стоек 2 в точках опоры под весом прибора при малой прочности исследуемого покрытия до достижения твердомером стабильного устойчивого положения. Величина просадки не должна превышать величины зазора между опорной поверхностью и нижней поверхностью упорного кольца 32, установленного при предварительной настройке. Ручным захватом за одну или обе рукояти 30 направляющая труба 15 приводится в вертикальное положение, контроль которого осуществляется при помощи уровнемеров 33. При ослабленном стопорном болте 8 направляющая труба 15 посредством реечной передачи, приводимой вручную кривошипной рукояткой, установленной на любом из квадратов 13 (под руку, удобную оператору), переводится вниз, до соприкосновения нижней поверхности упорного кольца 32 с исследуемым покрытием. Удерживая направляющую трубу 15 за одну или обе рукояти 30, оператор при помощи уровнемеров 33 корректирует ее вертикальное положение и производит нажатие пальцем на спусковой крючок 29. Под воздействием усилия, передаваемого приводным тросом 28 от спускового крючка 29, затвор 27 поворачивается относительно оси вращения  $G$  в направлении против часовой стрелки и выходит из зацепления с указателем 18. При этом падающие массы твердомера: стержень 17, указатель 18, конический наконечник 19, сменный груз 20 и гайка 21 под действием собственной тяжести движутся вниз, обеспечивая внедрение наконечника 19 конической поверхностью в исследуемое покрытие. Величина глубины внедрения конического наконечника 19 считывается со шкалы мерной линейки 34 по делениям напротив стрелки указателя 18.

Перед транспортировкой прибора направляющая труба 15 посредством реечной передачи переводится в крайнее верхнее положение и фиксируется

стопорным болтом 8. Стержень 17 и связанные с ним падающие массы прибора также приводятся в крайнее верхнее положение, и фиксируется посредством указателя 18 и затвора 27, чем исключается возможность самопроизвольного выпадения падающих масс твердомера из направляющей трубы 15 и повреждение конического наконечника 19 в результате удара вершиной о твердые покрытия и предметы.

Данным конструктивным решением исключаются:

- приложение боковых нагрузок к элементам прибора при выполнении измерений;
- влияние этих нагрузок на стабилизацию продольной оси твердомера в вертикальном положении;
- возможность самопроизвольного выпадения падающих элементов из направляющей трубы 15 при транспортировке прибора и повреждение конического наконечника.

Качественный контроль и корректировка установки продольной оси прибора в вертикальном положении обеспечивается посредством уровнемеров 33.

Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет повысить точность определения прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова, снизить трудоемкость работ по измерению данного параметра и обеспечить удобство эксплуатации прибора оператором.

Конструкция данного аналогового показывающего измерительного прибора – модернизированного твердомера защищена патентом Российской Федерации на изобретение № 2550375 [126].

В настоящее время ведется подготовка рабочей и конструкторской документации по модернизированному твердомеру для передачи ее в подрядную организацию с целью изготовления опытного образца прибора. Планируется проведение определительных и доводочных испытаний нового прибора, утверждение типа средства измерения в соответствии с



положениями документа ПР 50.2.009-94 [127], аттестация прибора в соответствии с положениями ГОСТ Р 8.568-97 [128], а также корректировка описанного в разделе 2.3, метода контроля с использованием модернизированного твердомера, прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых аэродромов и автодорог.

## **2.6. Выводы по главе**

1. Практическая реализация метода измерительного контроля, посредством использования твердомеров предложенных конструкций, позволит специалистам, обеспечивающим зимнее содержание дорожных и аэродромных покрытий под слоем уплотненного снежно-ледяного покрова, быстро и с высокой точностью определять его прочность (несущую способность). Это будет способствовать рациональному планированию мероприятий по поддержанию покрытий в пригодном для *безопасной эксплуатации* состоянии и *продлению сроков* сезонной эксплуатации данных техногенных объектов.

2. При организации зимнего содержания искусственных дорожных покрытий методом очистки от снежно-ледяных отложений, результатами оперативного контроля их прочности будет обеспечиваться получение более полной информации о физико-механических свойствах среды, подлежащей разрушению снегоочистительным оборудованием, что позволит на стадии проектирования рассчитывать, а при эксплуатации назначать рациональные, с позиции минимизации энергозатрат и повышения производительности, конструктивные и технологические параметры такого оборудования, использованием которого будут обеспечиваться нормативные значения основных показателей эксплуатационного состояния покрытий: чистоты, ровности, коэффициента сцепления. Это в свою очередь будет способствовать *повышению уровня безопасности* данных техногенных объектов при их *эксплуатации*.

### ГЛАВА 3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

#### 3.1. Обоснование выбора режущего инструмента для разрушения прочных снежно-ледяных отложений

Адаптация существующих и разрабатываемых рабочих органов дорожных машин к различным условиям эксплуатации может быть осуществлена путем их оснащения одиночным режущим инструментом, при его групповом размещении по схемам, обеспечивающим механическое разрушение разрабатываемых сред с малой энергоемкостью процесса и высокой производительностью оборудования [83].

Номенклатура одиночного режущего инструмента, которым преимущественно оснащаются рабочие органы машин, взаимодействующих с различными средами при их механическом разрушении, представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1. – Одиночный режущий инструмент и область его применения

Режущий инструмент	Область применения
Зубья	Землеройные машины (ковшовые и роторные экскаваторы), бульдозерные рыхлители, грейдерные кирковщики, баровые и дискофрезерные машины [101, 104]
Резцы	Бурильные и землеройные машины, бесковшовые траншейные экскаваторы [88]
Дисковый режущий инструмент (дисковые ножи, дисковые резцы, дисковые шарошки)	Сельскохозяйственные орудия: луцильники, бороны, плуги, культиваторы, рыхлители [103]; Рабочие органы горных машин, например, проходческих комбайнов [102]; Бурильные и землеройные машины для разработки мерзлых грунтов [88]

Основными критериями выбора режущего инструмента, предназначенного для разработки твердых сред, являются минимальная энергоемкость процесса, максимальная производительность рабочего

оборудования, оснащаемого таким инструментом и достаточная его долговечность.

Зубья и резцы рабочих органов работают в условиях трения скольжения. Каждая точка режущей кромки такого инструмента контактирует с разрушаемой средой на протяжении всего периода их взаимодействия – от момента заглубления инструмента в разрушаемый массив, до момента его выглубления из него при завершении производственной операции. Следовательно, и величина пути трения каждой из этих точек, будет равна пути, пройденному режущей кромкой инструмента за указанный период времени.

Такой режим работы сопровождается повышенными динамическими нагрузками на режущий инструмент и рабочий орган в целом, способствует быстрому изнашиванию и поломкам инструмента.

Кроме того, существенным недостатком зубьев и резцов является малая ширина режущей кромки, что влечет за собой необходимость значительного уменьшения шага расстановки и увеличение количества единиц инструмента на рабочих органах. Снижению эффективности таких рабочих органов также способствует их низкая способность к выносу продуктов разрушения из забоя.

Дисковый режущий инструмент работает в условиях трения качения. Каждая точка его режущей кромки при перекатывании диска по забою погружается в массив разрушаемого материала по циклоиде только на величину глубины резания [88]. При этом путь трения каждой из этих точек снижается в десятки раз по сравнению, например с путем трения точек, составляющих режущую кромку зуба. Точки тела диска, расположенные ближе к оси его вращения, погружаются в разрушаемый массив по укороченным циклоидам, и их путь трения также уменьшается. В результате этого уменьшаются динамические нагрузки на навесное оборудование и на всю базовую машину в целом, снижается энергоемкость процесса,

повышается долговечность инструмента, создается возможность увеличения скорости резания и значительного повышения производительности рабочего оборудования, оснащаемого дисковым режущим инструментом.

Очевидными преимуществами дискового режущего инструмента по сравнению с зубьями и резцами и обусловлен его выбор для использования в данной диссертационной работе, что отражено в ее основной идее, цели и задачах, сформулированных в Главе 1.

Известно о широком применении такого инструмента в конструкциях сельскохозяйственных орудий: луцильниках, боронах, плугах, культиваторах, рыхлителях [103, 105, 106], в проходческих комбайнах при разработке горных пород [89–92, 107], а также в рабочих органах буровых [108], землеройных машин [109, 110] и на бульдозерных рыхлителях [111–114] при разработке мерзлых грунтов.

Наибольшим многообразием геометрических параметров отличаются дисковые инструменты сельхозорудий. Это диски с гладким лезвием (плоские и сферические), сферические диски с  $V$  – образными вырезами, диски с пятью выпуклыми лопастями (в форме цветка), сферические вырезные диски с зубьями, режущие кромки которых выполнены по логарифмической спирали, заданной определенной формулой, сферические вырезные диски с шестью вырезами (в форме звезды с шестью вершинами), плоские шестиугольные диски с прямыми режущими кромками, прорезные диски луцильников и т.д. [103].

Однако основной целью использования сельхозорудий, оснащаемых различным дисковым инструментом, является не разрушение разрабатываемой среды как таковое, а обеспечение агротехнических требований к обрабатываемой поверхности поля: соблюдению заданной глубины обработки, максимальному очищению полей от сорняков, созданию мелкокомковатой, хорошо выровненной поверхности и т.д.

Научное обоснование геометрических параметров инструмента дается учеными и специалистами отрасли при изучении процессов взаимодействия такого инструмента с почвой и растительными остатками. Выбор формы инструмента, его угла атаки, глубины обработки и скоростных режимов сельхозорудий зависит от принятых в соответствии с конкретными почвенно-климатическими условиями местности, способов основной обработки почв.

Высокоэффективным является оснащаемое дисковым инструментом рабочее оборудование машин, предназначенных для механического разрушения горных пород и мерзлых грунтов. Здесь наиболее широкое применение получили дисковые инструменты (резцы, шарошки), форма которых изображена на рисунке 3.1.

*Конструкции зубчатых и штыревых шарошек в рамках данной работы не рассматриваются, поскольку они предназначены для разрушения прочных горных пород и сложны в изготовлении.*

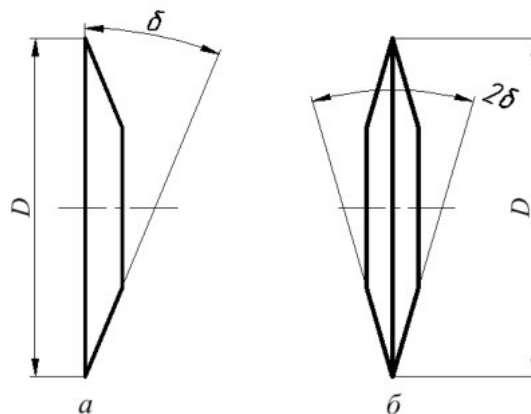


Рисунок 3.1. – Типы дискового инструмента: а – тип А; б – тип Б

Дисковый резец типа А представляет собой вращающийся на оси диск с непрерывным односторонним клиновым ободом, перекатывающийся при работе по поверхности забоя и внедряющийся в нее под воздействием усилия подачи.

Дисковый резец типа *Б* имеет симметричный непрерывный двухсторонний клиновой обод и разрушает массив забоя, будучи ориентированным под прямым углом к его поверхности.

Широкомасштабные исследования процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с горными породами при их разработке проходческими комбайнами проводились в Институте горного дела им. А. А. Скочинского (ИГД) Л. И. Бароном, Л. Б. Глатманом, С. Л. Загорским и др. [89–92].

В работах лаборатории разрушения горных пород ИГД им. А. А. Скочинского применительно к дисковым резцам использовался термин «дисковая шарошка». Типы дисковых резцов *А* и *Б*, изображенные на рисунке 3.1, именовались соответственно тангенциальной и лобовой дисковыми шарошками. Особенность лобовой дисковой шарошки состоит в том, что она может быть размещена только под прямым углом к поверхности разрабатываемого забоя и перемещается вдоль и вглубь него с образованием в последнем борозды.

В отличие от лобовой, дисковая тангенциальная шарошка располагается под острым углом к поверхности забоя, работает в уступе и производит скол породы крупными фракциями в сторону обнаженных поверхностей (рисунок 3.2).

Диск шарошки выполнен в виде одностороннего усеченного конуса и углом заострения  $\delta$ . Для уменьшения площади трения большего основания конуса об массив диск наклонен к уступу под углом  $\gamma$ , который называют «задним углом» или «углом атаки».

Перечисленными особенностями дисковой тангенциальной шарошки, возможностью размещения такого инструмента в различных пространственных положениях, относительно поверхностей разрушаемого массива могут быть обеспечены рациональные углы резания и достаточное многообразие схем размещения этого инструмента на разрабатываемых рабочих органах.

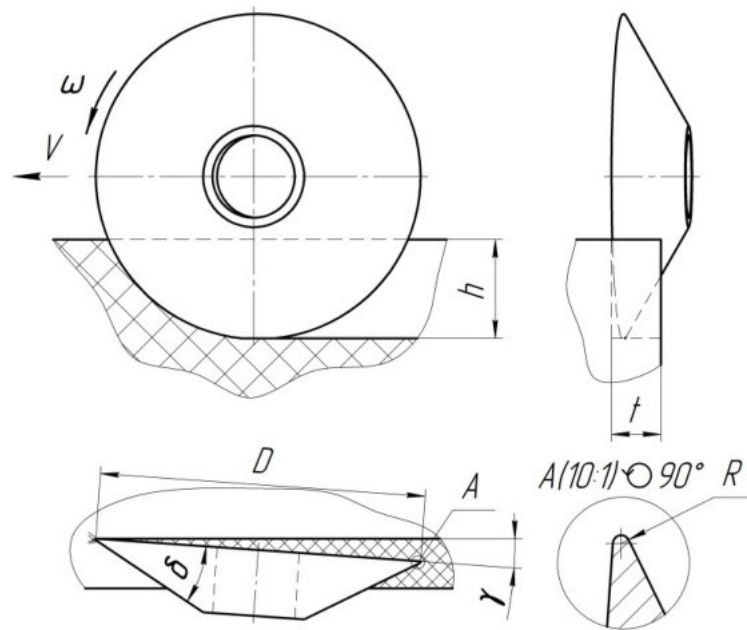


Рисунок 3.2. – Схема работы дисковой тангенциальной шарошки:  $h$  – глубина резания;  $t$  – шаг резания;  $\gamma$  – задний угол;  $\delta$  – угол заострения;  $D$  – диаметр шарошки;  $R$  – радиус закругления рабочей (режущей) кромки

Кроме того, известно, что энергоемкость процесса разрушения твердых сред дисковыми тангенциальными шарошками, на 20 – 30 % ниже, чем лобовыми [91].

По указанным причинам, именно дисковая тангенциальная шарошка, характеризующаяся термином «Дисковый режущий инструмент» принята к использованию в данной диссертационной работе в качестве инструмента, предназначенного для оснащения им высокоэффективного снегоочистительного оборудования.

Для контроля силовых параметров этого инструмента, а также оснащаемого им оборудования и предназначены средства и методы, разрабатываемые в рамках данной работы в соответствии с ее целью и рядом задач, сформулированных в Главе 1.

### **3.2. Конструкция измерительной установки – лабораторного стенда для испытания рабочих органов дорожных машин**

Исследование процессов взаимодействия различного режущего инструмента с разрушаемой средой путем проведения натурных испытаний полноразмерных рабочих органов дорожных машин представляет комплекс дорогостоящих, энергоемких и трудоемких мероприятий. Поэтому исследователи широко используют методы физического моделирования таких процессов на стендовом оборудовании в лабораторных условиях [31, 86, 87, 88, 103, 116, 129, 130, 131, 132 и др.].

Прототипом разрабатываемого в рамках решения второй задачи данной работы лабораторного стенда, послужил стенд для испытания рабочих органов землеройных машин конструкции Л.К. Соколова, сконструированный им в рамках выполнения работы [86] и изготовленный Красноярским филиалом ВНИИстройдормаша [133]. По завершении цикла лабораторных экспериментальных исследований, предусмотренных программой работы [86], данный стенд в качестве благотворительной акции был передан Л.К. Соколовым автотранспортному факультету Красноярского политехнического института (позже КГТУ, СФУ) где и хранился под грудой старой мебели в сыром цокольном помещении одного из учебных корпусов в течение нескольких десятилетий. Только волей случая, при поддержке проф. Р.Б. Желукевича и Ю.Н. Безбородова, автору данной диссертации при подготовке лабораторной базы для выполнения работы [134] удалось обнаружить этот стенд и договориться с руководством факультета о передаче его Институту нефти и газа.

Время и влага нанесли стенду существенный урон. Часть элементов конструкции была утрачена, уцелевшие детали кинематической схемы прочно заблокированы ржавчиной, нарушена герметичность уплотнений, электрооборудование полностью отсутствовало (рисунок 3.3).



Стенд был подвергнут ремонтно-восстановительным работам и глубокой модернизации. Работы выполнялись силами небольшого творческого коллектива студентов под руководством и при личном участии автора с привлечением специалистов сторонних организаций. Львиная доля ремонтно-восстановительных работ выполнена студентами Г.А. Салеевым и Д.А. Шупрановым (ныне к.т.н., доцент) во время летней практики 2007 года. В рекордно короткие сроки (около двух недель) этими студентами стенд был полностью разобран, все детали очищены от ржавчины, избытков краски, остатков старых прокладок и тщательно вымыты.



Рисунок 3.3. – Общий вид лабораторного стенда в исходном состоянии

Из листового паронита вручную были изготовлены новые уплотнительные прокладки для крышек подшипниковых узлов и редуктора. Во всех узлах трения произведена полная замена всех смазочных материалов, выполнен ремонт поврежденных резьбовых соединений, всем звеньям заржавевших приводных роликовых цепей возвращена подвижность. Все

сборочные единицы и отдельные детали стенда были законсервированы и тщательно упакованы для временного хранения и последующей транспортировки к новому месту размещения стенда. Этим местом стал металлический автомобильный гараж, установленный нами во дворе одного из учебных корпусов на заранее подготовленной забетонированной площадке. Силами целой группы студентов рама стенда и все его комплектующие были перемещены в этот гараж, где была произведена его частичная сборка и затем последовательно осуществлялись мероприятия глубокой модернизации и дооснащения стенда вплоть до ввода обновленного оборудования в эксплуатацию. Основные этапы модернизации лабораторного стенда описаны в работе [199].

Целью проведения цикла лабораторных экспериментальных исследований в рамках работы Л.К. Соколова [86] было изучение влияния скорости резания и деформирования на величину силы сопротивления мерзлого грунта разрушению зубьями землеройных машин, изучение влияния шага, глубины резания и геометрических параметров зубьев на величину указанной силы и энергоемкость разрушения мерзлого грунта при ступенчато-шахматной схеме расстановки инструмента.

Исследования производились на стенде – прототипе [133], конструкцией которого обеспечивалось испытание только масштабных моделей зубьев при их взаимодействии с искусственно приготовленными образцами мерзлого грунта. Изготовление таких образцов, качественно эквивалентных натурному мерзлому грунту является многоэтапной, трудоемкой и продолжительной по времени процедурой. Однако полезный объем каждого приготовленного образца грунта удавалось использовать для проведения ограниченного числа опытов, зачастую – только одного. В конструкциях стенда – прототипа и стенда – аналога [135], образец грунта устанавливался на нижних балках опорной рамы стенда и жестко фиксировался упорами только в одном положении, при котором

обеспечивалось только однократное разрушение массива образца в его центральной части.

Основной целью реализации комплекса мероприятий по модернизации лабораторного стенда являлось исключение недостатков конструкций стенда-аналога [135] и стенда-прототипа [133], а также адаптация конструкции модернизированного стенда к испытаниям полноразмерного режущего инструмента, взаимодействующего как с искусственно приготовленными образцами разрушаемой среды, так и с природными образцами, при наиболее полном последовательном разрушении их полезного объема.

Модернизированный лабораторный стенд (рисунок 3.4) содержит опорную раму 1 сварной конструкции, на которой смонтированы две цилиндрические направляющие 16, по которым перемещается тензометрический элемент 2 с закрепленным на нем режущим инструментом 3.

На нижних балках 18 опорной рамы 1 стенда смонтирован механизм поперечной подачи образца 4 разрушаемого материала, включающий несущую плиту 19, к нижней поверхности которой основанием вверх прикреплены четыре подшипника скольжения 20, попарно сопряженные с двумя параллельными цилиндрическими направляющими 21, с возможностью продольного перемещения по ним.

Концы направляющих 21 жестко закреплены в опорах 22, смонтированных на нижней балке 18 опорной рамы 1 стенда. В средней части несущей плиты 19, на ее нижней поверхности, установлен ходовой механизм 23, изготовленный в виде втулки, на внутренней поверхности которой выполнена ходовая резьба.

С резьбой ходового механизма взаимодействует резьбовая часть поворотной рукоятки 24, цилиндрическая часть которой установлена в опоре 25 с возможностью вращения в ней и без передвижения в осевом

направлении. Образец разрушаемого материала 4 устанавливается на верхней поверхности несущей плиты 19 и жестко фиксируется упорами 5.

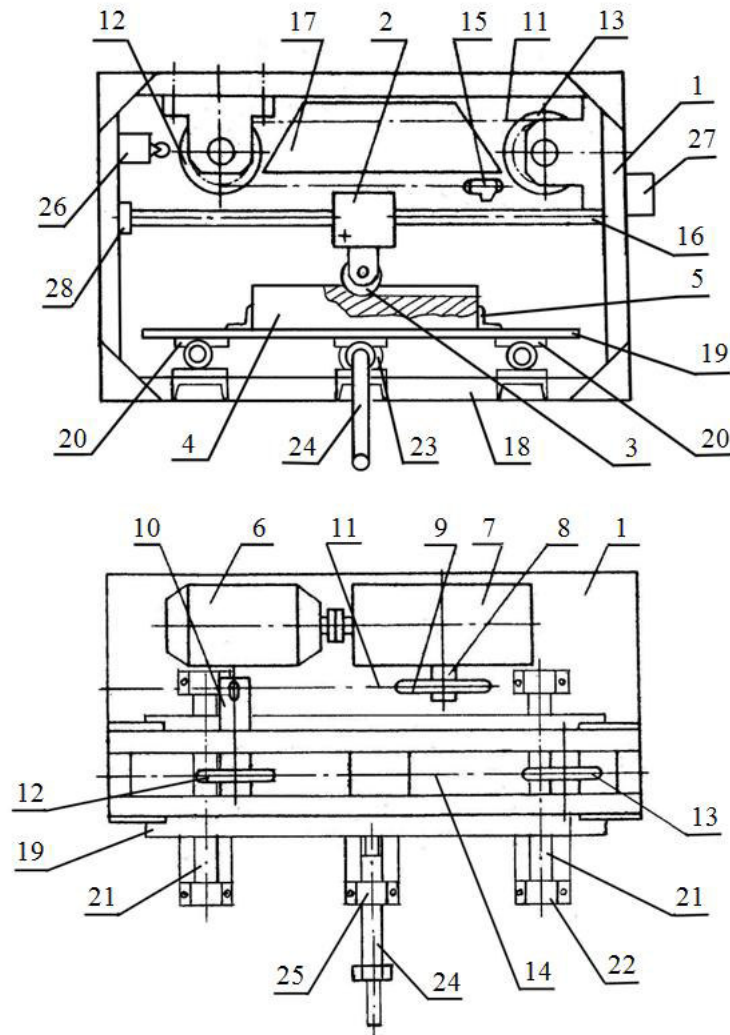


Рисунок 3.4. – Схема модернизированного лабораторного стенда: 1 – опорная рама; 2 – тензометрический элемент; 3 – режущий инструмент; 4 – образец разрушаемого материала; 5 – упоры; 6 – электрический двигатель; 7 – редуктор; 8 – выходной вал редуктора; 9 – приводная звездочка; 10 – ведущий вал цепной передачи; 11 – цепь; 12, 13 – звездочки тяговой цепи; 14 – тяговая цепь привода; 15 – захват; 16 – направляющие тензометрической головки; 17 – шина; 18 – нижние балки рамы; 19 – несущая плита; 20 – подшипники скольжения; 21 – направляющие механизма поперечной подачи образца; 22 – опоры; 23 – ходовой механизм; 24 – поворотная рукоятка; 25 – опора поворотной рукоятки; 26 – конечный выключатель; 27 – кнопочная станция; 28 – демпферы

Привод тензометрического элемента 2 включает электрический двигатель 6, червячный редуктор 7 с выходным валом 8, на котором закреплена звездочка 9, связанная со звездочкой ведущего вала 10 цепью 11, а также ведущую и ведомую звездочки 12, 13 тяговой цепи 14 привода.

На одном из звеньев цепи 14 закреплен захват 15, при помощи которого осуществляется перемещение тензометрического элемента 2 по направляющим 16. Для предотвращения прогиба тяговой цепи 14 на опорной раме 1 установлена шина 17.

Управление электродвигателем 6 привода тензометрического элемента 2 станда осуществляется кнопочной станцией 27.

Для автоматического отключения двигателя от электрической сети после выполнения реза, на левой передней вертикальной опоре станда установлен конечный выключатель 26.

Окончательная остановка тензометрического элемента в крайнем левом положении производится эластичными демпферами 28. Регулировка глубины резания осуществляется с помощью одиночных или собранных в два пакета калиброванных стальных пластин (рисунок 3.7).

Наибольшую трудоемкость при модернизации станда представляла задача разработки, изготовления и монтажа механизма поперечной подачи образца разрушаемого материала (МППО).

Основная функция этого механизма – жесткое крепление на несущей плите образца разрушаемого материала с возможностью последовательного, перед каждым последующим опытом, изменения шага резания, а также и глубины резания, чем обеспечивалось бы рациональное использование всего полезного объема материала образца.

Первым конструкторским документом на пути создания этого механизма стал его масштабный эскиз, выполненный автором с учетом реальных размеров конструктивных элементов опорной рамы станда (рисунок 3.5).

Затем были выполнены рабочие чертежи всех деталей механизма и переданы в подрядную организацию для изготовления в металле. Интеграция разработанного механизма в конструкцию стенда потребовала установки трех дополнительных консолей в плоскости нижних балок опорной рамы стенда и увеличения высоты четырех его вертикальных опор.

Консоли и доборные элементы вертикальных опор изготовлены из швеллера 10П ГОСТ8240-72. Минимально необходимая расчетная длина этих деталей составила 200 мм и 378 мм соответственно. Увеличение высоты вертикальных опор стенда обусловило необходимость увеличения и длины приводной роликовой цепи 11 (рисунок 3.4). Конструкцией разработанного МППО предусмотрена возможность крепления на его несущей плите как искусственно приготовленных лабораторных образцов разрушаемого материала, так и образцов природного происхождения, например, ледяных блоков, вырезанных из ледового покрова пресноводного водоема.

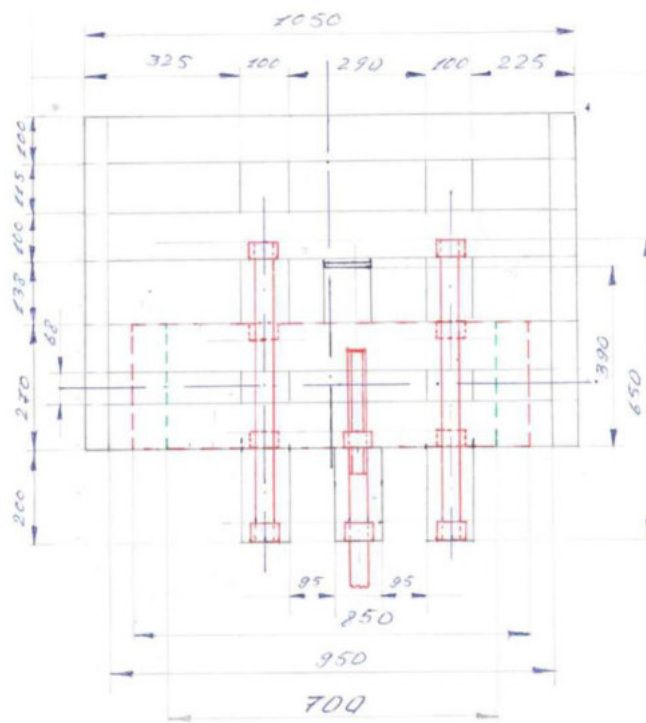


Рисунок 3.5. – Эскиз механизма поперечной подачи образца разрушаемого материала

Для приготовления искусственных лабораторных образцов, качественно эквивалентных натурным материалам, автором разработана и изготовлена металлическая форма со съемными стенками (рисунок 3.6, 3.7). Габаритные размеры формы (Ш×Д×В): 296×490×216 мм.



Рисунок 3.6. – Металлическая разборная форма для приготовления лабораторного образца разрушаемой среды

Размеры искусственно приготовленных с помощью разборной формы образцов разрушаемой среды (Ш×Д×В): 264×459 ×200 мм. Данная форма, как в сборе, так и со снятыми стенками может устанавливаться днищем как непосредственно на поверхность несущей плиты МППО стенда, так и на калиброванные стальные пластины (высота каждой пластины 10 мм), в случае необходимости регулировки при испытаниях глубины резания (рисунок 3.7). В обоих случаях форма на несущей плите МППО фиксируется металлическими угловыми упорами с гладкими стенками в соответствии с рисунком 3.4.

В случае установки на несущую плиту образцов, изготовленных из природного материала, для более надежного их удержания предусмотрено использование угловых упоров с ошпированными вертикальными стенками.





Рисунок 3.7. – Металлическая разборная форма, установленная на несущей плите МППО лабораторного стенда на калиброванных пластинах для регулировки глубины резания

Надежное подвижное крепление на стенде измерительных преобразователей (тензометрических элементов) осуществляется посредством двух стальных щек, установленных на двух параллельных цилиндрических стальных направляющих, концы которых жестко закреплены на четырех вертикальных опорах стенда. Каждая стальная щека имеет продольное сквозное отверстие с запрессованной в него бронзовой втулкой, внутренняя цилиндрическая поверхность которой сопрягается с наружной цилиндрической поверхностью каждой из направляющих.

Тензометрический элемент при установке на стенд помещается между двумя стальными щеками, которые соединяются между собой четырьмя шпильками, пропущенными через соответствующие отверстия в карнизах щек и платформе тензометрического элемента (рисунок 3.8).





Рисунок 3.8. – Тензометрический элемент в сборе с кронштейном и режущим инструментом, установленный на лабораторном стенде

Все соединения фиксируются гайками. Для смазывания сопрягающихся цилиндрических поверхностей трения используется смазка «Литол – 24» по ГОСТ 21150-87 [118].

Таким образом, при включении привода обеспечивается свободное перемещение устанавливаемых на лабораторном стенде измерительных преобразователей с закрепленным на них режущим инструментом по цилиндрическим направляющим по всей их длине из крайнего правого положения, в крайнее левое. При этом осуществляется взаимодействие режущего инструмента с образцом разрушаемой среды, закрепленном на несущей плите МППО с заданным шагом и глубиной резания и производится разрушение части этого образца. В исходное положение измерительный преобразователь перемещается оператором вручную.

Изменение значений скорости перемещения измерительных преобразователей с закрепленным на них режущим инструментом (скорости резания) осуществляется установкой на лабораторный стенд в качестве приводной звездочки 9 выходного вала 8 редуктора (рисунок 3.4) и звездочки

ведущего вала 10 цепной передачи, звездочек с различным числом зубьев (рисунок 3.9) в различных комбинациях.



Рисунок 3.9. – Звездочки к приводным роликвым цепям, использующиеся в конструкции модернизированного стенда

В конструкции стенда использованы однорядные звездочки приводной роликвой цепи ПР – 19,05 – 3180 по ГОСТ 13568-97 [136] с числом зубьев  $z = 21, 25, 44$  и  $66$ . Две из них, с числом зубьев  $z = 21$  и  $z = 44$  унаследованы от стенда – прототипа, а две другие, с числом зубьев  $z = 25$  и  $z = 66$  изготовлены дополнительно в рамках мероприятий по модернизации описываемого лабораторного стенда.

Значения скорости перемещения измерительных преобразователей, обеспечиваемые стендом при установке звездочек цепной передачи привода тензометрического элемента в двенадцати возможных комбинациях, определяются расчетным путем с учетом материалов работы [137] в следующем порядке.

Исходные данные:

– частота вращения вала электрического двигателя 6 (рисунок 3.4):  $n_d = 1450$  об/мин;

- передаточное число червячного редуктора 7:  $u_p = 13$ ;
- число зубьев звездочки 9 выходного вала редуктора 7:  $z_1 = 21$ ;
- число зубьев звездочки ведущего вала 10:  $z_2 = 44$ .
- шаг тяговой цепи 14 привода: 38,1 мм.

Частота вращения звездочки 9:

$$n_1 = n_0 / u_p = 1450 / 13 = 111,538 \text{ об/мин}$$

Передаточное отношение ведущей и ведомой звездочек цепи 11:

$$u_{1-2} = z_2 / z_1 = 44 / 21 = 2,1$$

Частота вращения звездочки вала 10 и звездочки 12:

$$n_2 = n_1 / u_{1-2} = 111,538 / 2,1 = 53,113 \text{ об/мин}$$

Средняя скорость тяговой цепи 14 привода (м/с) а, следовательно, и скорость перемещения измерительных преобразователей, определится из выражения [137, стр. 196]

$$V = \frac{z_T \cdot n_2 \cdot t}{60000}, \quad (3.1)$$

где:  $n_2$  – частота вращения ведущей звездочки 12 (об/мин);

$z_T$  – число зубьев ведущей звездочки 12;  $t$  – шаг цепи (мм).

Подставляя в выражение (3.1) численные значения параметров получаем:  $V = 15 \times 53,113 \times 38,1 / 60000 = 0,51 \text{ м/с}$ .

Аналогично рассчитаны значения скорости перемещения измерительных преобразователей для оставшихся одиннадцати комбинаций пар звездочек цепной передачи привода тензометрического элемента (таблица 3.2).

Таблица 3.2. – Результаты расчета значений скорости перемещения измерительных преобразователей, обеспечиваемых цепной передачей лабораторного стенда

Число $z_1$ зубьев приводной звездочки вала редуктора стенда	Число $z_2$ зубьев ведущего вала цепной передачи стенда	Передаточное отношение ведущей и ведомой звездочек приводной цепи $u_{1-2}$	Скорость перемещения измерительных преобразователей, м/с (км/ч)
21	25	1,2	0,89 (3,20)
21	44	2,1	0,51 (1,84)
21	66	3,14	0,34 (1,22)
25	21	0,84	1,26 (4,54)
25	44	1,76	0,6 (2,16)
25	66	2,64	0,4 (1,44)
44	21	0,48	2,21 (7,96)
44	25	0,57	1,86 (6,7)
44	66	1,5	0,71 (2,56)
66	21	0,32	3,32 (11,9)
66	25	0,38	2,8 (10,1)
66	44	0,67	1,59 (5,72)

Техническая характеристика модернизированного лабораторного стенда представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3. – Техническая характеристика модернизированного лабораторного стенда

Показатель	Значение показателя
Электродвигатель: тип марка мощность, кВт частота вращения вала, об/мин	Асинхронный трехфазный 4A132S4У3 7,5 1 450
Габаритные размеры, мм: длина ширина высота	1 050 790 1580
Масса, кг	510

## Окончание таблицы 3.3.

Скорость перемещения измерительных преобразователей (скорость резания), м/с	min:0,34 max: 3,32 промежуточные значения в соотв. с таблицей 3.2
Наибольшая глубина резания дисковым инструментом, закрепленном на П - образном кронштейне, мм	60
Передаточное число $u_p$ червячного редуктора	13
Цепь приводная	ПП – 19,05 – 3180 по ГОСТ 13568-97
Цепь тяговая, несущая захват	ПП – 38,1 – 12700 по ГОСТ 13568-97
Число $z$ зубьев каждой из четырех сменных однорядных звездочек приводной цепи	21, 25, 44, 66
Число $z_T$ зубьев каждой из двух однорядных звездочек тяговой цепи	15
Рекомендуемые размеры лабораторных образцов разрушаемой среды природного происхождения (Ш×Д×В), мм	300×510×260
Размеры образцов разрушаемой среды искусственно приготовленных с помощью разборной формы (Ш×Д×В), мм	264×459 ×200
Размеры калиброванных стальных пластин для регулировки глубины резания (Ш×Д×В), мм	40×350×10

Детали и узлы, совершающие во время работы стенда вращательное или прямолинейное поступательное движение, окрашены в красный цвет.

*Все детали механизма поперечной подачи образца разрушаемого материала, консоли и доборные элементы вертикальных опор рамы модернизированного стенда, пальцы и полумуфта его приводной группы, детали разборной формы для приготовления лабораторных образцов разрушаемой среды, калиброванные пластины для регулировки глубины резания, кронштейны для крепления режущего инструмента, металлические детали измерительных преобразователей, рама, тяги и кронштейны стенда для градуировки тензоэлементов (см. раздел 3.4), опытные образцы дискового режущего инструмента, дополнительные звездочки приводных*

*роликовых цепей изготовлены по чертежам, выполненным автором, специалистами и рабочими Производственно-экспериментального центра ОАО «Красноярский ПромстройНИИпроект» под руководством И.И. Франка.*

*Электрическая схема стенда разработана инженером А.Н. Хитровым. Им же произведены подключение к электрической сети и пробный запуск силовой установки модернизированного стенда.*

Конструкция представленной в данной работе измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда для испытания рабочих органов дорожных машин защищена патентом Российской Федерации на изобретение № 2429459[138].

### **3.2.1. Методика лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой с использованием стенда предлагаемой конструкции**

Каждой серии экспериментальных исследований должны предшествовать подготовительные мероприятия, включающие постановку цели и задач исследований, разработку программы эксперимента, на основании которой с учетом расчетного необходимого числа опытных наблюдений следует определить и необходимое количество опытных образцов разрушаемой среды, произвести их заготовку (с некоторым запасом) и обеспечить временное хранение. Необходимо также проверить текущее техническое состояние стенда. Поверхности цилиндрических направляющих, несущих измерительный преобразователь и направляющих МППО не должны иметь повреждений и загрязнений, смазочный материал поверхностей трения должен быть свежим и в достаточном количестве, оси каждой пары направляющих должны быть строго параллельны. Перемещение по направляющим измерительных преобразователей и

несущей плиты МППО в обоих направлениях должно быть свободным, без рывков и заеданий.

Необходимо проверить состояние приводной и тяговой цепей станда. Все звенья цепей должны свободно двигаться, быть смазанными, натяг цепей при необходимости отрегулировать. Перед началом каждого опыта захват тяговой цепи должен располагаться посередине ее верхней ветви. Контролю подлежит состояние пальцевой муфты, соединяющей электрический двигатель и редуктор станда. Эластичные гильзы каждого пальца муфты не должны иметь существенного износа, а резьбовые соединения пальцев, электрического двигателя и редуктора надежно затянуты, обе полумуфты тщательно отцентрованы. Необходимо проверить уровень масла в редукторе и при необходимости долить.

Все электрические контакты оборудования станда не должны иметь повреждений и загрязнений, ослабленных резьбовых соединений. Рама станда и электрический двигатель должны иметь надежное заземление, на рабочем месте оператора в непосредственной близости от кнопочной станции на полу должен быть уложен резиновый диэлектрический ковер по ГОСТ 4997-75 [139].

В случае, когда программой эксперимента предусмотрено проведение испытаний при различных значениях скорости перемещения измерительных преобразователей (скорости резания) необходимо на основании данных таблицы 3.2 произвести выбор комбинации пар зубчатых колес, установкой которых на станд будет обеспечиваться соответствующий скоростной режим резания.

В случае, когда программой эксперимента предусмотрено проведение испытаний в определенном диапазоне низких температур с использованием морозильной камеры, необходимо перед началом серии опытов в каждой температурной точке выдерживать все элементы системы «лабораторный

стенд – образцы разрушаемой среды – средства контроля ФМС разрушаемой среды» при заданной температуре не менее трех суток.

Порядок выполнения работ на стенде следующий. Лабораторный образец разрушаемой среды подвергается испытаниям на прочность помощи соответствующих пенетрационных или зондирующих приборов (гл. 1 – 2).

Производится измерение температуры материала внутри образца и температуры окружающего воздуха ртутными термометрами или цифровым мультиметром с термопарой. Полученные результаты заносятся в протокол испытаний.

Заблаговременно (не менее чем за 30 минут до начала испытаний) следует включить питание тензометрического усилителя УТ1-10 для вывода его элементов на рабочий режим. Непосредственно перед началом испытаний произвести включение компьютера и запуск программы *Power Graph* (см. раздел 3.5).

Перед началом эксперимента тензометрический элемент с закрепленным на нем испытуемым режущим инструментом устанавливается в крайнее правое положение для обеспечения его правильного зацепления захватом тяговой цепи при включении привода.

Для обеспечения достаточного разгона электродвигателя без нагрузки, захват должен находиться на верхней ветви цепи 11, посередине между звездочками 12 и 13 (рисунок 3.4). Затем на верхнюю поверхность несущей плиты 19 устанавливается лабораторный образец разрушаемого материала 4 и жестко фиксируется упорами 5. Вращением поворотной рукоятки 24 вправо несущая плита 19 с закрепленным на ней лабораторным образцом 4 устанавливается в крайнее ближнее к рукоятке 24 положение. При этом продольная кромка лабораторного образца, с его тыльной стороны, устанавливается на траектории движения режущего инструмента 3. При включении кнопочной станции 27 электродвигатель 6 и все элементы привода разгоняются без нагрузки. Крутящий момент от двигателя 6



передается через редуктор 7, выходной вал 8 редуктора, звездочку 9, цепь 11, ведущий вал 10, звездочки 12 и 13 и далее через тяговую цепь 14 на захват 15. Взаимодействуя с тензометрическим элементом 2, захват 15 перемещает его по направляющим 16 влево и осуществляет тем самым резание части массива лабораторного образца разрушаемой среды.

Одновременно информационно-измерительный комплекс обеспечивает первичное преобразование сигналов блоков тензодатчиков, его усиление, а также последующую запись на диаграммах и регистрацию всех измеряемых величин.

После выхода из зацепления с тензометрическим элементом 2 захват 15 взаимодействует с рычагом конечного выключателя 26, и электродвигатель привода стенда отключается от электрической сети. Демпферы 28 смягчают удар тензометрического элемента о раму. Далее вручную тензометрический элемент 2 перемещается в исходное (крайнее правое положение). Затем вращением рукоятки 24 влево несущая плита 19 с закрепленным на ней лабораторным образцом 4 перемещается на заданное расстояние в сторону, противоположную рукоятке 24. При этом неразрушенная в предыдущем опыте часть массива разрушаемого материала с заданной шириной (шагом) резания  $t$  устанавливается на траекторию движения режущего инструмента 3, и производится следующий опыт.

При последовательном пошаговом перемещении несущей плиты 19 до упора, в крайнем дальнем от рукоятки 24 положении, весь полезный объем массива лабораторного образца оказывается разрушенным. Затем производится замена разрушенного образца на целый. Работы продолжаются в описанной выше последовательности до полного выполнения программы эксперимента.

Использованием измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда для испытания рабочих органов дорожных машин предлагаемой конструкции обеспечивается возможность проведения

экспериментальных исследований процессов взаимодействия различного рабочего инструмента с разрушаемыми прочными средами в больших объемах при рациональном использовании всего полезного массива лабораторных образцов разрушаемого материала, меньшей трудоемкости работ связанных с установкой и перемещением образца на стенде при задании различных параметров среза, сокращении затрат подготовительного времени в промежутках между каждым последующим опытом при проведении испытаний, возможности быстрого изменения скорости перемещения тензометрических элементов (скорости резания) в большом диапазоне значений. Кроме того, сокращаются объемы работ по изготовлению лабораторных образцов разрушаемой среды, требующих от исследователя больших затрат времени и тяжелого физического труда.

Общий вид модернизированного лабораторного стенда для испытания рабочих органов дорожных машин предлагаемой конструкции представлен на рисунке 3.45. Конструкция данной измерительной установки полностью соответствует техническим и эксплуатационным требованиям, сформулированным автором в главе 1 данной работы. Схема применения описанной выше Методики лабораторных экспериментальных исследований приведена в Главе 6 настоящей работы.

Основные результаты работ автора, связанных с ремонтом, восстановлением, модернизацией лабораторного стенда, разработкой методики экспериментальных исследований с его использованием процессов взаимодействия различного рабочего инструмента с разрушаемыми прочными средами изложены в трудах [134, 140, 141].

### **3.3. Конструкции измерительных преобразователей – тензометрических элементов ИП-1 и ИП-2**

В практике исследований процессов взаимодействия рабочих органов машин различного назначения с разрушаемой (разрабатываемой) средой

возникает необходимость измерительного контроля таких параметров как вес, давление, силы сопротивления передвижению, силы сопротивления резанию, копанию, рыхлению и т.п. При разработке средств измерительного контроля указанных величин исследователями широко используется электротензометрический метод измерений, реализуемый посредством металлических тензометров сопротивления (тензорезисторов) [31, 84, 85, 86, 87, 116, 142-151] и др. Популярность этого метода обусловлена конструктивной простотой резистивных преобразователей, их малой массой и относительно небольшими размерами, возможностью обеспечения измерений статически и динамически изменяющихся величин с высокой точностью, простотой способов оценки измеряемых величин. Многообразие способов использования резистивных преобразователей делает данный метод измерений универсальным.

Работа тензорезисторов основана на эффекте изменения сопротивления проводников и полупроводников при их механической деформации (тензоэффект). Конструктивно тензорезисторы делятся на проволочные, фольговые и полупроводниковые.

В рамках решения третьей и четвертой задач данной работы в соответствии с ее основной идеей, разработаны, изготовлены и апробированы две конструкции измерительных преобразователей – тензометрических элементов ИП-1 и ИП-2 с использованием металлических фольговых тензорезисторов (тензометров сопротивления) по ГОСТ 21616-91[152], выпускаемых ООО УК «Сибтензоприбор» г. Кемерово [153].

Основные технические и метрологические характеристики фольговых константановых одиночных тензорезисторов, выпускаемых данным предприятием, структура и расшифровка условного обозначения этих изделий, а также документ об утверждении типа средств измерений представлены в Приложении В.

Значения коэффициента тензочувствительности приборов этой группы определяется свойствами материала чувствительной решетки. Химический состав сплава константан включает 45% *Ni* и 55 % *Cu*. Коэффициент тензочувствительности константана 2,1 [154].

Выбор для использования в работе фольговых тензорезисторов обусловлен рядом их преимуществ по сравнению с проволочными [116, 154].

Нити чувствительной решетки 1 (рисунок 3.10) имеют прямоугольную форму поперечного сечения, чем обеспечивается меньшая, чем у проволочных тензорезисторов габаритная высота изделия, и увеличивается площадь контакта решетки с поверхностью исследуемой детали 2.

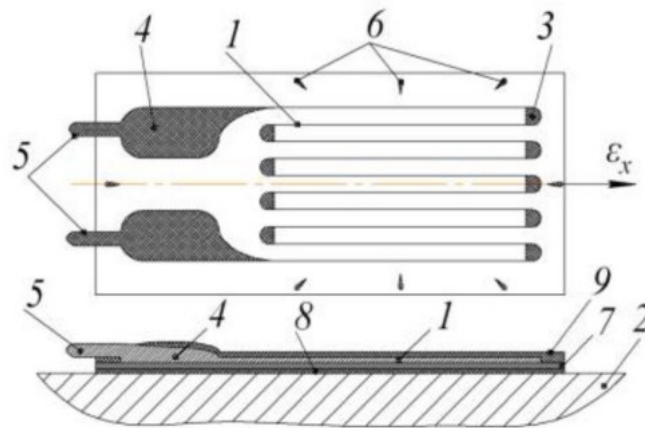


Рисунок 3.10. – Фольговый тензорезистор: 1 – чувствительная решетка; 2 – исследуемая деталь; 3 – поперечные перемычки; 4 – контактные площадки; 5 – выводные проводники; 6 – установочные метки; 7 – подложка; 8 – клеевой слой; 9 – защитное покрытие

Это делает соединение тензорезистора с телом детали более прочным, улучшает качество передачи деформации к чувствительной решетке, повышает стабильность и надежность производимых измерений. Этому также способствует более интенсивная передача тепла от разогревающейся в результате воздействия тока высокой плотности, чувствительной решетки к материалу детали (плотность тока  $\geq 45$  А/мм<sup>2</sup>).

Метод фотолитографии используемый при производстве фольговых тензорезисторов позволяет получать изделия различных конфигураций с

широкими поперечными перемычками 3, что делает такие тензорезисторы практически нечувствительными к поперечным деформациям деталей. Наличием широких контактных площадок 4 обеспечивается надежное крепление выводных проводников 5.

### **3.3.1. Измерительный преобразователь – тензометрический элемент ИП-1 для контроля силы сопротивления разрушению прочных твердых сред полноразмерным рабочим инструментом**

Основной целью разработки и создания данного измерительного преобразователя ИП-1 являлась адаптация модернизированного лабораторного стенда, описанного в разделе 3.2 к проведению операций измерительного контроля силовых параметров полноразмерного дискового режущего инструмента при его взаимодействии с разрушаемой прочной средой.

Тензометрический элемент (рисунок 3.11) включает стальную прямоугольную несущую плиту 1, на нижней стороне которой жестко закреплена тензометрическая балка 2 цилиндрической формы, выполненная в виде стакана с утолщенным дном 3. Геометрические оси несущей плиты 1 и тензометрической балки 2 взаимно перпендикулярны.

В теле несущей плиты 1 выполнены два горизонтальных сквозных отверстия диаметром 12 мм для крепления тензометрического элемента на лабораторном стенде, а в теле утолщенного дна тензобалки – четыре резьбовых отверстия с резьбой М12 для установки кронштейнов, несущих полноразмерный испытуемый режущий инструмент или для непосредственного крепления к тензобалке масштабных моделей зубьев землеройных машин. На нижней стороне несущей плиты 1 у основания цилиндрической тензобалки 2 закреплена электрическая клеммная колодка 4 для крепления выводных проводников блоков тензорезисторов и проводного

соединения тензометрического элемента с информационно-измерительным комплексом (см. раздел 3.5).

Буквенные обозначения тензорезисторов и терморезисторов на рисунке 3.11. ( $R_1, R_2, R_5 - R_{10}$ ) соответствуют обозначениям этих же элементов на принципиальной электрической схеме тензометрического усилителя УТ1-10 (рисунок 3.34).

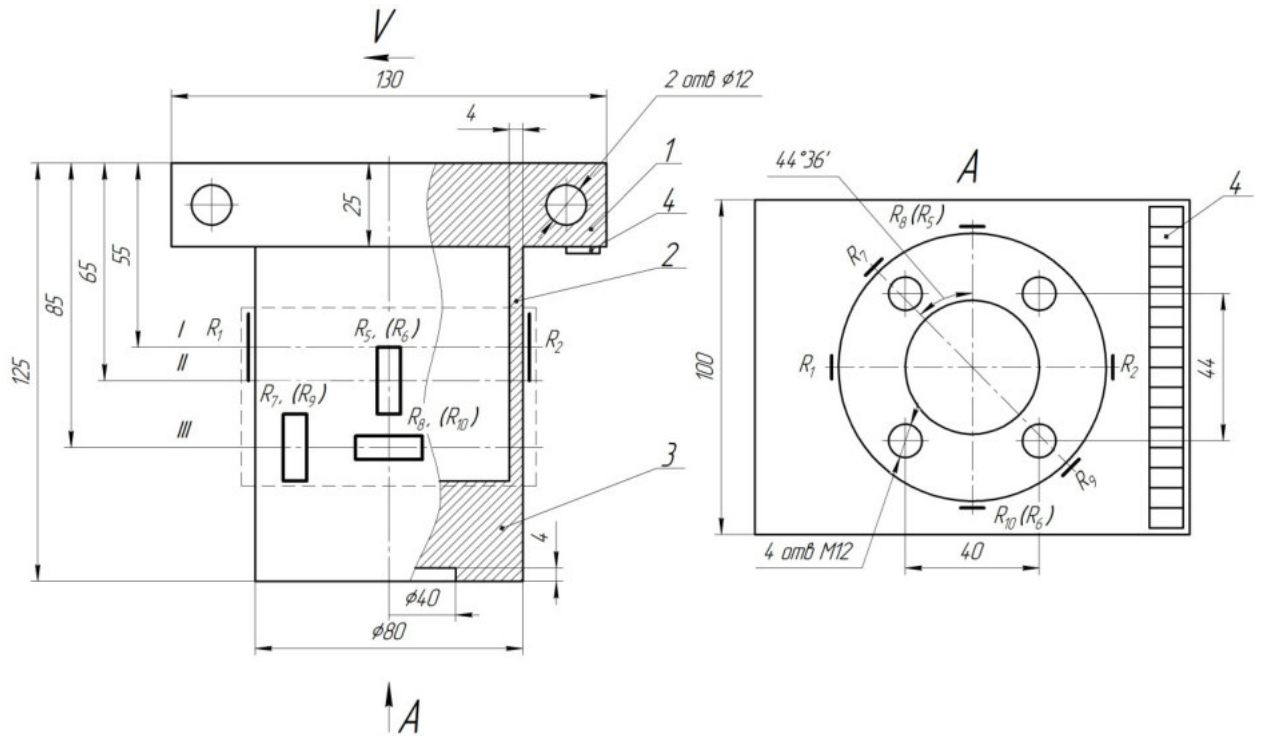


Рисунок 3.11. – Габаритный чертеж тензометрического элемента с установленными тензорезисторами: 1 – несущая плита; 2 – тензометрическая балка; 3 – утолщенное дно тензометрической балки; 4 – клеммная колодка;  $R_1, R_2, R_5 - R_7, R_9$  – тензорезисторы;  $R_8, R_{10}$  – терморезисторы (позисторы)

В скобках указаны обозначения тензорезисторов на невидимой стороне тензоэлемента а также и непоказанных на виде А. Пунктиром условно показан защитный кожух.

В качестве материала для изготовления тензометрического элемента в соответствии с рекомендациями работы [116] выбран прокат стали 50ХФА по ГОСТ 14959-79 [157]. Основные физико-механические свойства стали 50ХФА представлены в таблице 3.4.

Данный материал обладает соответствующими для подобного рода устройств упругими и прочностными свойствами, минимальным гистерезисом и постоянством модуля упругости, чем обеспечивается линейность и стабильность характеристик преобразований, т.е. однозначность и повторяемость деформаций [181].

Таблица 3.4. – Основные физико-механические свойства проката стали 50ХФА по ГОСТ 14959-79

Режим термообработки: температура закалки $t_3$ , температура отпуска $t_o$ , °С	Твердость НВ	Предел кратковременной прочности, $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Предел усталости $\sigma$ , МПа	Относительное удлинение при разрыве $\delta_5$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Модуль упругости $E^{***}$ , $10^{-5}$ МПа
$t_3 = 850$ $t_o = 470$	269* ÷ 302**	1270	1080	501	8	35	2,18
* твердость термообработанного проката ** твердость проката без термообработки *** $E = 21200 \text{ кг/мм}^2 = 2120000 \text{ кг/см}^2 = 207901 \text{ МПа} = 2,18 \times 10^{-5} \text{ МПа}$							

Однако при практическом использовании и таких материалов не соблюдается строго закон Гука даже при напряжениях, меньших их предела упругости. Кривые нагружения и разгрузки тензометрического элемента не совпадают, образуя «петлю гистерезиса». Поэтому во избежание пластических деформаций в материале тензометрического элемента, уменьшения влияния гистерезиса на точность измерений, максимальную величину нормальных напряжений, возникающих в тензометрическом элементе при его работе, следует ограничивать значениями, составляющими 30 ÷ 60 % предела текучести материала [181] или меньшими или равными 30% его предела упругости [116].

Основные размеры тензобалки 2: диаметр – 80 мм, высота – 100 мм, толщина стенки – 4 мм назначены с учетом опыта практической реализации электротензометрического метода измерения силы сопротивления мерзлых

грунтов разрушению зубьями землеройных машин, освещенного в работе [86].

Форма упругого элемента (тензобалки) также как и его размеры оказывает влияние на чувствительность тензоэлемента и равномерность распределения напряжения по сечению.

Под чувствительностью тензоэлемента понимают величину тока или напряжения на выходе мостовой (полумостовой) схемы, приходящегося на единицу измеряемой величины. Геометрическая форма упругого элемента должна быть такой, чтобы на нем имелись поверхности, деформируемые с разными знаками, а размеры сечения позволяли вызывать значительные деформации для получения достаточно мощных сигналов на выходе мостовых схем при допустимом гистерезисе.

Этим требованиям в полной мере соответствуют стержневые упругие элементы цилиндрической формы. Установлено что при действии сосредоточенной нагрузки по оси стержня равномерное распределение напряжений обеспечивается только для сечений, достаточно удаленных от концевых плоскостей. Следовательно, располагать тензорезисторы следует ближе к середине упругого элемента, а для наилучшей компенсации влияния изгибных деформаций, и полной компенсации температурных погрешностей посредством, например, схемной термокомпенсации их следует располагать строго симметрично на противоположных сторонах что, и реализовано в тензометрическом элементе предлагаемой конструкции (рисунок 3.11).

Применением в качестве упругого элемента пустотелого стержня (полого цилиндра) обеспечивается повышение относительной чувствительности тензометрического элемента и существенное уменьшение погрешности, вызываемой влиянием изгибающего момента.

Это объясняется тем, что момент сопротивления полого сечения в несколько раз больше чем у сплошного сечения, а толщина стенок полого



цилиндра всегда меньше диаметра, и поэтому напряжение даже вблизи концевых плоскостей распределяется равномерно по сечению.

Для предварительной проверки соответствия тензометрического элемента предлагаемой конструкции приведенным выше требованиям, предъявляемым к таким устройствам, оценки потенциальной работоспособности при выполнении измерительных операций в рамках решения большинства задач данной работы, произведен анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) тензометрического элемента в сборе с П – образным кронштейном, посредством исследования 3D модели данного узла средствами САПР *Solid Works Simulation* по методу конечных элементов. При построении сетки использованы конечные элементы в форме параболических тетраэдров [107, 185].

При этом были приняты следующие условия и допущения:

- 3D – модель исследуемого узла – твердотельная сборка деталей: несущей плиты тензометрического элемента, тензометрической балки, П – образного кронштейна и вала, в реальных условиях несущего дисковый резец;
- все детали сборки жестко закреплены между собой, а их взаимодействие описывается контактным условием «Нет интерференции»;
- для закрепления узла в модельном пространстве используется граничное условие «Зафиксировано», приложенное к верхней плоскости несущей плиты тензометрического элемента;
- геометрические размеры тензометрического элемента приняты в соответствии с рисунком 3.11;
- геометрические размеры П – образного кронштейна приняты в соответствии с рабочим чертежом детали;
- материал тензометрического элемента – Сталь 50ХФА ГОСТ 14959-79;
- материал П – образного кронштейна – Сталь 45 ГОСТ 1050 – 88;

– прилагаемая нагрузка (сила) приведена к оси вращения дискового режущего инструмента, при испытаниях размещаемого на валу в отверстиях П – образного кронштейна;

– материал вала – Сталь 45 ГОСТ 1050 – 88;

– линии действия каждой из составляющих прилагаемой силы параллельны соответствующим осям трехмерной системы координат (для вертикальной составляющей – оси «Y», для горизонтальной составляющей – оси «X», для боковой составляющей – оси «Z»);

– максимальная величина нагрузки, прилагаемой к тензометрическому элементу, несколько превышает верхний предел предполагаемого диапазона измерений, реализуемых посредством использования этого устройства – 2500 Н, и составляет 3000 Н.

На рисунке 3.12 показан процесс нагружения  $3D$  – модели исследуемого узла, в направлении действия *горизонтальной* составляющей измеряемой силы в режиме «Эквивалентная деформация». Очевидно, что в результате такого воздействия, на противоположных (передней и задней) сторонах тензобалки образуются зоны наибольших деформаций. Размеры этих зон имеют четкое графическое и цветовое выделение. Деформации каждой из сторон равны по величине, но противоположны по знаку, так как передняя сторона тензобалки подвержена деформации растяжения, а противоположная задняя – деформации сжатия.

Анализ распределения деформаций по поверхности упругого элемента позволяет уточнить место расположения на теле тензобалки сечения I (рисунок 3.11), на уровне которого будут располагаться зоны поверхности тензобалки 2 для размещения тензорезисторов блока контроля горизонтальной составляющей  $P_r$  измеряемой силы.

Исключая пояс максимальных деформаций №1 и пояса минимальных деформаций №6 и №7 (рисунок 3.12), получаем участок деформируемой

зоны, по площади которого деформации распределены равномерно, а их значения стабильны.

Размещением тензорезисторов на таких участках обеспечивается возможность получения стабильных и мощных электрических сигналов на выходе мостовых (полумостовых) схем соответствующих измерительных блоков. В центре этого участка, образуемого поясами №№ 2 – 5 и следует поместить сечение I, в данном случае на высоте  $h = 55$  мм от верхней грани несущей плиты тензометрического элемента (рисунки 3.11, 3.12).

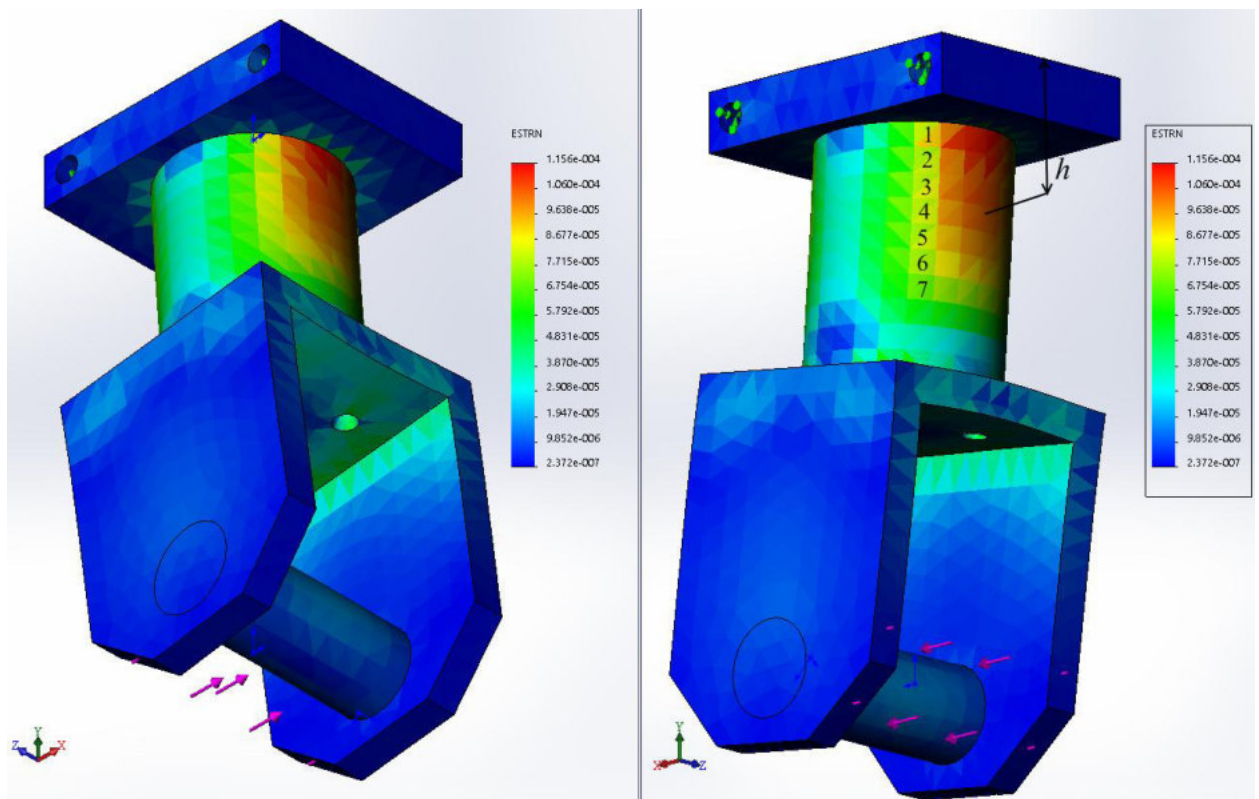


Рисунок 3.12. – Распределение эквивалентных деформаций по телу упругого элемента под воздействием горизонтальной составляющей измеряемой силы

Следующим этапом исследования  $3D$  – модели исследуемого узла было ее нагружение в направлении действия *горизонтальной* составляющей измеряемой силы в режиме «Эквивалентные напряжения». Величина максимальных эквивалентных напряжений материала упругого элемента –

стали 50ХФА составила 46,832 МПа. При этом тридцатипроцентное ограничение по пределу текучести, предписанное для материалов тензометрических элементов [181], для стали 50ХФА (таблица 3.4) составляет 324 МПа. Следовательно, возникновение пластических деформаций в материале тензометрического элемента при его работе будет исключено, а влияние гистерезиса на точность измерений сведено к минимуму.

На рисунке 3.13 показан процесс нагружения исследуемого узла в направлении действия *боковой* составляющей измеряемой силы в режиме «Эквивалентная деформация».

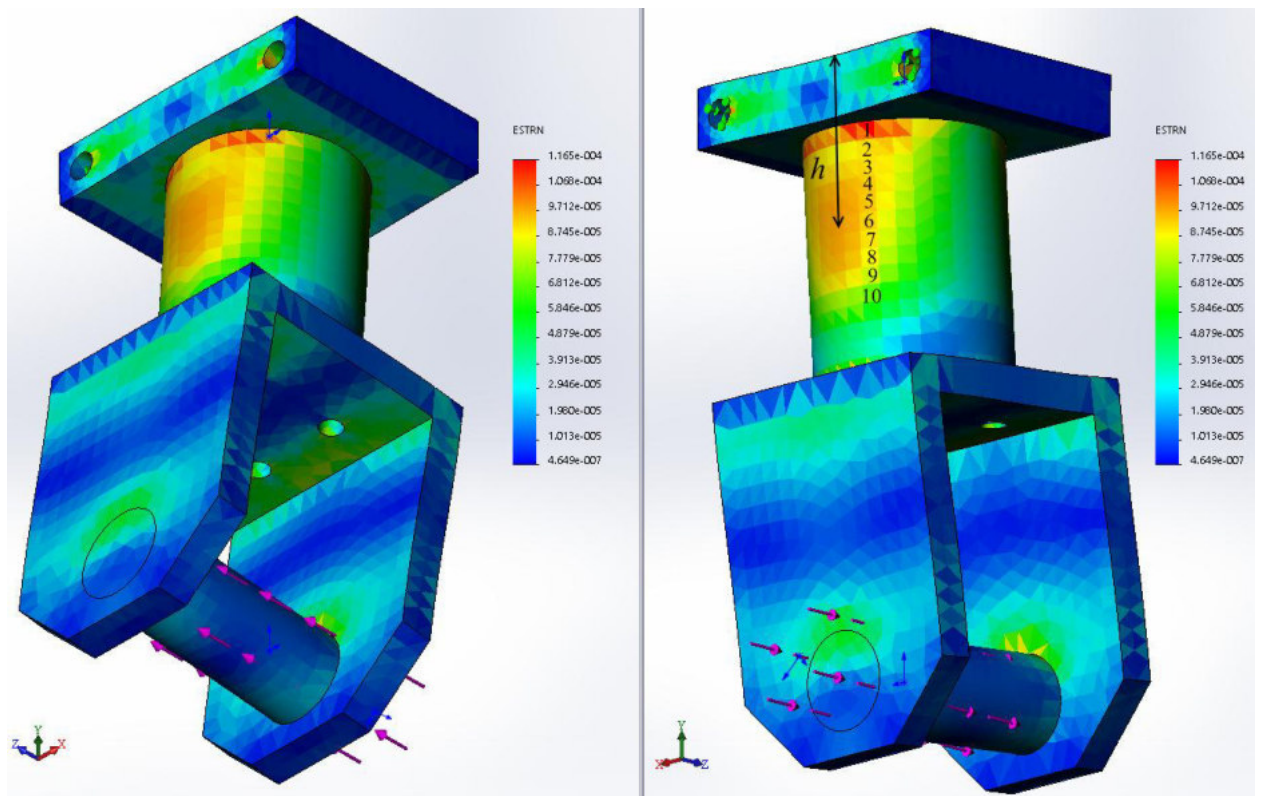


Рисунок 3.13. – Распределение эквивалентных деформаций по телу упругого элемента под воздействием боковой составляющей измеряемой силы

В результате такого воздействия, на противоположных сторонах тензобалки образуются зоны наибольших деформаций. Как и в предыдущем случае, эти зоны выделены цветом – от желтого, до насыщенного оранжевого

и красного. Деформации каждой из сторон равны по величине, но противоположны по знаку, так как одна сторона тензобалки подвержена деформации растяжения, а противоположная – деформации сжатия.

Анализ распределения деформаций по поверхности упругого элемента позволяет уточнить место расположения на теле тензобалки сечения II (рисунок 3.11), на уровне которого будут располагаться зоны поверхности тензобалки 2 для размещения тензорезисторов блока контроля *боковой* составляющей  $P_6$  измеряемой силы.

Исключая пояс максимальных деформаций №1 и пояса малых деформаций №№ 2, 3, 9, 10 (рисунок 3.13), получаем участок деформируемой зоны, образованный поясами №№ 4 – 8, по площади которого деформации распределены равномерно, а их значения стабильны.

Сечение II следует поместить в центре этого участка, в данном случае на высоте  $h = 65$  мм от верхней грани несущей плиты тензометрического элемента (рисунки 3.11, 3.13).

Следующим этапом исследования  $3D$  – модели исследуемого узла было ее нагружение в направлении действия *боковой* составляющей измеряемой силы в режиме «Эквивалентные напряжения». Величина максимальных эквивалентных напряжений материала упругого элемента – стали 50ХФА составила 34,023 МПа. Это значение, как и в предыдущем случае, существенно ниже тридцатипроцентного ограничения по пределу текучести, предписанного для материалов тензометрических элементов, которое для стали 50ХФА (таблица 3.4) составляет 324 МПа. Следовательно, возникновение пластических деформаций в материале тензометрического элемента при его работе будет исключено, а влияние гистерезиса на точность измерений сведено к минимуму.

На рисунке 3.14 показан процесс нагружения исследуемого узла в направлении действия *вертикальной* составляющей измеряемой силы в режиме «Эквивалентная деформация».



В данном случае линия действия вертикальной составляющей  $P_v$  измеряемой силы совпадает с главной осью тензометрического элемента, а направление ее действия – снизу вверх.

При этом реализуется сжимающее воздействие на материал тензобалки, а возникающие при этом деформации одного знака распределяются по всей поверхности материала упругого элемента.

Очевидно, что преобладают деформации, величина которых лежит в диапазоне значений  $ESTRN$  от  $9,141 \cdot 10^{-06}$  до  $1,825 \cdot 10^{-05}$  (выделено зеленым цветом).

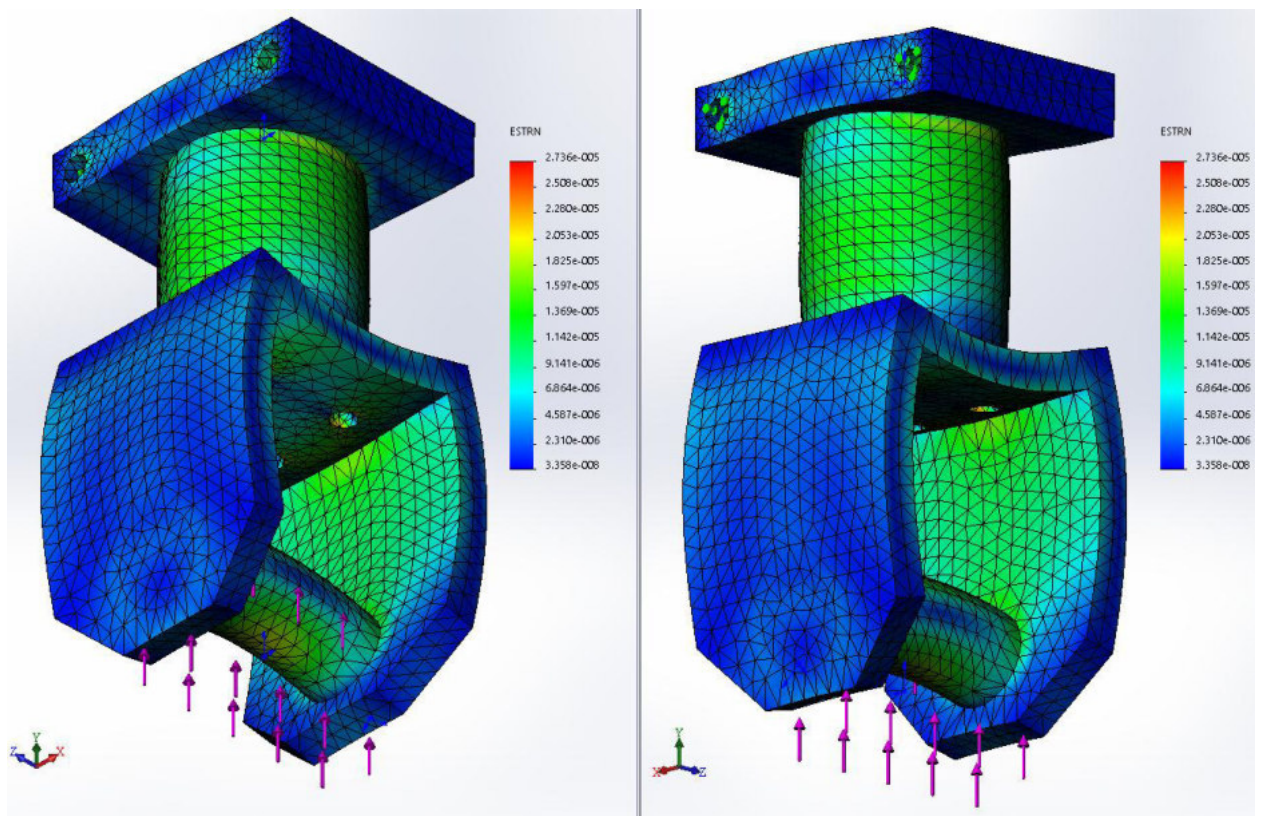


Рисунок 3.14. – Распределение эквивалентных деформаций по телу упругого элемента под воздействием вертикальной составляющей измеряемой силы

Для минимизации взаимного влияния трех составляющих измеряемой силы друг на друга при работе тензометрического элемента, для размещения рабочих тензорезисторов блока измерения  $P_v$ , необходимо выбрать зоны

поверхности тензобалки, величина деформаций которых под воздействием горизонтальной и боковой составляющих не превышает величины деформаций, возникающих под воздействием вертикальной составляющей измеряемой силы. Такие зоны определены в результате комплексного анализа распределения эквивалентных деформаций по телу упругого элемента под одновременным воздействием всех трех составляющей измеряемой силы (рисунок 3.15). Центр одной из зон, соответствующих указанному выше условию, может быть расположен в точке, соответствующей расположению в модельном пространстве одной из вершин элемента № 9067.

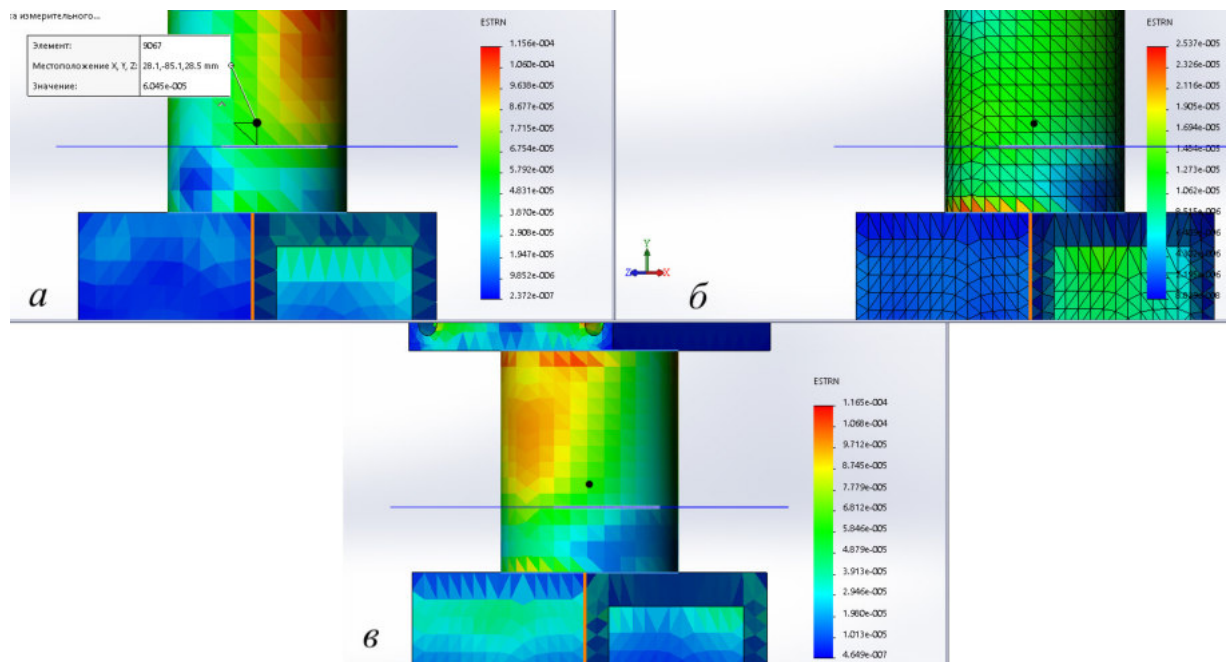


Рисунок 3.15. – Распределение эквивалентных деформаций по телу упругого элемента при одновременном воздействии трех составляющей измеряемой силы: *a* – горизонтальной; *б* – боковой; *в* – вертикальной

Расстоянием  $h = 85$  мм от верхней грани несущей плиты тензометрического элемента до этой точки и определится место расположения на теле тензобалки 2, сечения III, на уровне которого будут

размещены рабочие тензорезисторы блока контроля вертикальной составляющей  $P_v$  измеряемой силы (рисунок 3.11).

В указанной зоне следует разместить один из рабочих тензорезисторов, например  $R_7$  (рисунок 3.11). Зона для размещения второго рабочего тензорезистора  $R_9$  будет также расположена на уровне сечения III, но диаметрально противоположно по отношению к зоне размещения первого рабочего тензорезистора  $R_7$ . Вертикальная плоскость, проходящая через центры указанных зон поверхности тензобалки, смещена относительно вертикальной плоскости, перпендикулярной направлению  $V$  перемещения тензометрического элемента на угол  $44^\circ 36'$ .

Дополняющие полную мостовую схему измерительного блока вертикальной составляющей, терморезисторы должны располагаться на теле упругого элемента в равных температурных условиях с рабочими тензорезисторами. В данном случае, компенсирующие терморезисторы  $R_8$  и  $R_{10}$  расположены на уровне сечения III в непосредственной близости от рабочих тензорезисторов  $R_7$ ,  $R_9$  (рисунок 3.11).

Следующим этапом исследования 3D – модели исследуемого узла было ее нагружение в направлении действия *вертикальной* составляющей измеряемой силы в режиме «Эквивалентные напряжения». Величина максимальных эквивалентных напряжений материала упругого элемента – стали 50ХФА составила 6,683 МПа. Это значение существенно ниже тридцатипроцентного ограничения по пределу текучести, предписанного для материалов тензометрических элементов, которое для стали 50ХФА (таблица 3.4) составляет 324 МПа. Следовательно, возникновение пластических деформаций в материале тензометрического элемента при его работе будет исключено, а влияние гистерезиса на точность измерений сведено к минимуму.

Результаты анализа НДС тензометрического элемента, описанные выше, позволяют сделать предположение о том, что выбор формы



тензометрического элемента, материала для его изготовления, назначение основных геометрических размеров произведены верно, а при размещении рабочих тензорезисторов на выбранных зонах поверхности упругого элемента со строгим соблюдением правил их наклейки, измерения контролируемой величины посредством использования данного тензометрического элемента, будут осуществляться с высокой точностью при допустимом гистерезисе.

При выборе зон поверхности тензобалки 2 (рисунок 3.11) для размещения блоков тензорезисторов автор руководствовался как результатами анализа НДС тензометрического элемента, представленными выше, так и рекомендациями известных работ [86, 116, 144, 145, 154, 181].

Тензорезисторы, наклеенные на поверхности указанной тензобалки составляют три измерительных блока, два из которых собраны по полумостовой а третий – по полномостовой схемам. Каждый из этих блоков предназначен для контроля соответственно горизонтальной  $P_r$ , боковой  $P_b$  и вертикальной  $P_v$  составляющих силы сопротивления твердой среды разрушению испытываемым инструментом.

Тензорезисторы для каждого блока выбирались из одной партии по величине их сопротивления, которая не должна отличаться более чем на 0,05 % [181].

Блок контроля *горизонтальной* составляющей  $P_r$  (полумост) включает тензорезисторы  $R_1$  и  $R_2$  расположенные в сечении I симметрично относительно вертикальной оси тензометрического элемента, на противоположных (передней и задней) сторонах тензобалки 2 в вертикальной плоскости, параллельной направлению  $V$  перемещения тензометрического элемента. Материал упругого элемента в зоне сечения I при воздействии прилагаемой изгибающей нагрузки (от составляющей  $P_r$ ) испытывает значительные деформации, причем разные по знаку: передняя его сторона

подвержена деформации растяжения, а противоположная задняя – деформации сжатия.

Блок контроля *боковой* составляющей  $P_6$  (полумост) включает тензорезисторы  $R_5$  и  $R_6$  расположенные в сечении II симметрично относительно вертикальной оси тензометрического элемента, но в плоскости расположенной перпендикулярно относительно той, в которой находятся тензорезисторы  $R_1$  и  $R_2$ . В этом случае при воздействии прилагаемой изгибающей нагрузки (от составляющей  $P_6$ ), деформации растяжения подвержена сторона тензобалки, содержащая тензорезистор  $R_6$ , а деформации сжатия – сторона, содержащая тензорезистор  $R_5$ .

Тензорезисторы ( $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{15}$ ,  $R_{16}$ ) обоих измерительных блоков, дополняющие мосты вынесены за пределы тензометрического элемента и размещены в корпусе тензометрического усилителя УТ1 – 10 (рисунок 3.35).

Размещением тензорезисторов в зонах значительных стабильных, равномерно распределенных по материалу упругого элемента деформаций при совпадении осей базы каждого из тензорезисторов с осью главных деформаций, обеспечивается интенсивное растяжение и сжатие нитей чувствительных решеток, достаточное для получения стабильных и мощных сигналов на выходе полумостовых (мостовых) схем. Такое размещение тензорезисторов способствует и повышению общей чувствительности тензометрического элемента.

Этому также способствует и попарное симметричное размещение тензорезисторов на противоположных сторонах тензобалки при котором каждый из пары тензорезисторов испытывает деформации равные по величине, но разные по знаку. Этим наряду с полной температурной компенсацией исключается влияние на результаты измерений деформации растяжения – сжатия, при условии включения каждого тензорезистора из пары в *смежные* плечи соответствующего полумоста.

Суть метода схемной компенсации температурного приращения сопротивлений тензорезисторов, реализованного в тензометрическом элементе предлагаемой конструкции заключается в том, что два тензорезистора с одинаковыми характеристиками, наклеенные на один и тот же материал одним и тем же клеем с соблюдением одинаковой технологии наклейки, находящиеся в одинаковых температурных условиях, и ориентированные на тензометрическом элементе таким образом, что измеряемая деформация вызывает у них *противоположные* по знаку приращения сопротивлений, включаются в смежные плечи симметричной мостовой (полумостовой) схемы.

В этом случае оба тензорезистора являются одновременно и рабочими и компенсационными (один относительно другого), а измеряемая ими деформация определится выражением

$$\varepsilon_{изм} = \frac{1}{S} \left[ \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{1} - \left( -\frac{\Delta R}{R} \right)_{2} \right] + \frac{1}{S} \left[ \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{t1} - \left( -\frac{\Delta R}{R} \right)_{t2} \right], \quad (3.2)$$

где  $\left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{1}$  и  $\left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{2}$  – относительные приращения сопротивлений смежных плеч, вызванные измеряемой деформацией;

$\left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{t1}$  и  $\left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{t2}$  – температурные приращения сопротивлений смежных плеч.

Если оба активных тензорезистора находятся в одинаковых температурных условиях, то при идентичности их рабочих характеристик

$\left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{t1} - \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{t2} = 0$ , т.е. достигается полная компенсация температурных погрешностей. Кроме того, как упоминалось выше, увеличивается (практически удваивается) чувствительность схемы, так как оба тензорезистора участвуют в измерении деформации.

Взаимное влияние друг на друга горизонтальной  $P_r$  и боковой  $P_b$  составляющих практически исключено в силу конструктивных особенностей фольговых тензорезисторов, делающих их практически нечувствительными к поперечным деформациям деталей.

В рассматриваемом случае (рисунок 3.11) деформации упругого элемента, возникающие при воздействии на него горизонтальной составляющей  $P_r$ , являются поперечными по отношению к чувствительным решеткам тензорезисторов  $R_5$  и  $R_6$  блока контроля боковой составляющей  $P_b$  контролируемой силы. И наоборот: деформации упругого элемента, возникающие при воздействии на него боковой составляющей  $P_b$  являются поперечными по отношению к чувствительным решеткам тензорезисторов  $R_1$  и  $R_2$  блока контроля горизонтальной составляющей  $P_r$  контролируемой силы.

Блок контроля *вертикальной* составляющей  $P_v$  (полный мост – мост Уитстоуна) включает рабочие тензорезисторы  $R_7$  и  $R_9$  и компенсирующие терморезисторы (позисторы)  $R_8$  и  $R_{10}$ .

Направление действия вертикальной составляющей  $P_v$  – снизу вверх вдоль главной оси тензометрического элемента. Параллельно этой оси ориентированы и главные оси чувствительных решеток каждого из двух рабочих тензорезисторов.

Преобладающим видом деформации, которую испытывает материал упругого элемента при воздействии прилагаемой нагрузки (от составляющей  $P_v$ ) является деформация сжатия, вызывающая у тензорезисторов  $R_7$  и  $R_9$  *одинаковые* как по величине, так и по знаку приращения сопротивлений. Это делает невозможным использование в данном случае метода схемной компенсации температурного приращения сопротивлений тензорезисторов, аналогично тому, как это было реализовано применительно к блокам контроля горизонтальной и боковой составляющих. Поэтому описываемый блок контроля вертикальной составляющей силы сопротивления резанию

собран в виде полной мостовой схемы, в которой рабочие тензорезисторы  $R_7$  и  $R_9$  включены в *противоположные* плечи полного моста (рисунок 3.35).


Наличие двух активных тензорезисторов позволяет удвоить чувствительность моста, но при этом его чувствительность к температурным изменениям сопротивлений тензорезисторов также удваивается. Поэтому для компенсации температурных погрешностей использованы два компенсационных терморезистора (позистора)  $R_8$  и  $R_{10}$ , размещенные непосредственно на теле тензобалки и включенные в *противоположные* плечи полного моста, *смежные* по отношению к рабочим плечам  $R_7$  и  $R_9$ .

В случае изгиба тензобалки, вызванного отклонением прилагаемой нагрузки от вертикали, оба активных тензорезистора получают одинаковые по величине, но противоположные по знаку приращения сопротивлений, поэтому влияние изгибной деформации исключается.

В состав измерительных блоков входят следующие тензорезисторы:

- для контроля горизонтальной составляющей – ФКП-20-400-А-12-С;
- для контроля боковой составляющей – ФКП-20-200-А-12-С;
- для контроля вертикальной составляющей – ФКП-20-200-А-12-С и терморезисторы (позисторы) СТ11 – 1Г (таблица 3.5) [182 – 184].

Таблица 3.5. – Основные технические характеристики терморезисторов СТ11 – 1Г

Показатель	Диапазон номинальных сопротивлений при 20 °С, Ом	Максимальная мощность, Вт	Диапазон рабочих температур, °С	Диапазон температур положительного ТКС, °С	Максимальный ТКС при 20 °С, %/°С	Кратность измерения сопротивлений в области положительного ТКС	Постоянная времени, с	Внешний вид
Значения показателей	100 ÷ 300	0,8	- 60 ÷ 125	- 20 ÷ 125	6 ÷ 9	20 ÷ 80	40	

Термический коэффициент сопротивления (ТКС) определяет степень изменения сопротивления участка цепи при изменении температуры на 1°С. Если ТКС положительный, то терморезисторы называют позисторами (РТС- термисторами), если ТКС отрицательный, то термисторами (НТС-

термисторами). У позисторов с повышением температуры повышается и сопротивление. Литеры «СТ» в условном обозначении свидетельствуют о том, что это именно терморезисторы. Цифра «11» означает материал изделия: система (Ba, Sr) (Ti, Sn) O<sub>3</sub>, легированная церием.

Наклейка тензорезисторов на поверхность тензобалки 2 произведена клеем БФ – 2 по ГОСТ 12172 – 74 [155] со строгим соблюдением рекомендаций технологии наклейки, предписанных производителем тензорезисторов [156] и с учетом рекомендаций работы [116].

Способ крепления тензометрического элемента на лабораторном стенде проиллюстрирован на рисунке 3.16. Тензометрический элемент помещается между двумя стальными щечками, каждая из которых сопрягается с одной из двух параллельных цилиндрических направляющих. Крепление осуществляется четырьмя шпильками, две из которых (верхние) пропущены через отверстия верхних карнизов стальных щек и сквозные отверстия несущей плиты тензометрического элемента.



Рисунок 3.16. – Крепление тензометрического элемента ИП-1 в сборе с кронштейном и режущим инструментом на лабораторном стенде

Это соединение фиксируется четырьмя наружными гайками. Две нижние шпильки пропущены через соответствующие отверстия нижних карнизов обеих стальных щек. Каждая из этих шпилек имеет две пары гаек:

одна пара внутренних и одна пара наружных. Каждая из внутренних гаек одним из торцов упирается во внутреннюю стенку соответствующей щеки.

Расстояние между этими торцами  $a$ , следовательно, и между стенками щек в их нижней части, должно быть равным поперечному размеру несущей плиты тензоэлемента, которым задается расстояние между стенками щек в их верхней части. Окончательно это соединение также фиксируется четырьмя наружными гайками.

Таким способом крепления обеспечивается параллельность внутренних стенок стальных щек, совмещение осей каждой из цилиндрических направляющих с осями сопрягающихся с ними соответствующих бронзовых втулок, установленных в стальных щеках, что способствует свободному перемещению тензоэлемента по направляющим по всей их длине без перекосов, заеданий и подтормаживания.

Для установки на тензометрический элемент полноразмерного режущего инструмента изготовлены стальные кронштейны двух видов: П – образный и Г – образный. На вертикальных параллельных стойках П – образного кронштейна (рисунок 3.17) выполнены отверстия для установки оси, несущей режущий инструмент.



Рисунок 3.17. –Внешний вид П – образного кронштейна, несущего полноразмерный режущий инструмент

Ось в этом случае двухопорная. Г – образный кронштейн (рисунок 3.16) имеет одну вертикальную стойку и ось, несущая режущий инструмент крепится в отверстии этой стойки консольно. Кронштейны изготовлены в соответствии с рабочими чертежами деталей, выполненными автором.

Крепление каждого из кронштейнов к тензометрическому элементу осуществляется болтами с резьбой М12 пропущенными через четыре дугообразных паза, выполненные в горизонтальной полке кронштейна (рисунок 3.18) и ввернутыми в соответствующие резьбовые отверстия (рисунок 3.11) на утолщенном дне 3 тензобалки 2.

Для установки на П – образный кронштейн полноразмерного дискового режущего инструмента необходимо использовать бронзовую втулку (подшипник скольжения), стальную втулку, массивный палец и гайку с резьбой М 39×1,5 (рисунок 3.19).

Стальная втулка и дисковый резец с предварительно установленной в его центральной отверстии бронзовой втулкой, помещаются в пространство между вертикальными стойками кронштейна.



Рисунок 3.18. – Горизонтальная полка кронштейна: вид сверху



Палец пропускается через отверстия в стойках кронштейна и внутренние отверстия обоих втулок. Сборка узла завершается установкой гайки на резьбовом конце пальца, и ее затяжкой (рисунок 3.19). Установленный таким образом дисковый резец имеет возможность свободного вращения вокруг своей оси.

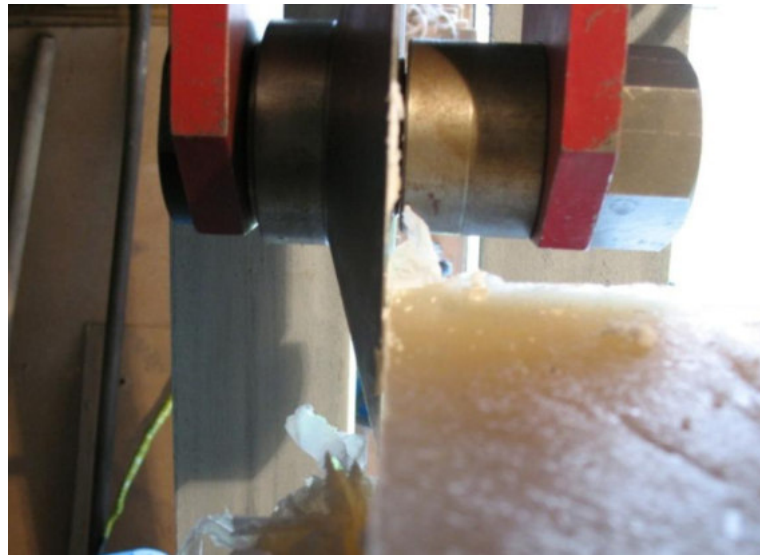


Рисунок 3.19. – П – образный кронштейн в сборе с полноразмерным дисковым режущим инструментом

Установка и корректировка величины заднего угла (угла атаки) дискового режущего инструмента осуществляется при ослабленных четырех болтах крепления кронштейна к тензобалке, поворотом кронштейна в сборе с резцом в горизонтальной плоскости на необходимое количество градусов в соответствующую сторону, после чего болты затягиваются. При этом размерами дугообразных пазов, выполненных на горизонтальной полке кронштейна (рисунок 3.18) обеспечивается величина его хода, соответствующая значениям угла атаки инструмента в диапазоне  $\gamma = 0 \div 30^\circ$ .

Автором также предусмотрена возможность установки на П – образный кронштейн экспериментального образца зуба землеройной машины с рациональными параметрами (ширина режущей кромки  $b = 30$  мм, угол заострения  $\delta = 45^\circ$ , задний угол  $\gamma = 10^\circ$ ). В этом случае фиксированное

положение зуба в центре между стойками кронштейна обеспечивается установкой по обе стороны зуба двух одинаковых стальных втулок соответствующего размера (рисунок 3.20).



Рисунок 3.20. – П – образный кронштейн в сборе с экспериментальным образцом зуба землеройной машины

Крепление масштабных моделей зубьев землеройных машин к тензометрическому элементу осуществляется болтами с резьбой М12 пропущенными через четыре отверстия прямоугольной пластины державки зуба (рисунок 3.21).



Рисунок 3.21. – Масштабная модель зуба землеройной машины, установленная на тензометрическом элементе

Конструкцией измерительного преобразователя – тензометрического элемента ИП-1, описанного в текущем разделе работы, обеспечивается возможность его быстрой установки на двух параллельных горизонтальных направляющих лабораторного испытательного стенда с возможностью свободного перемещения по всей их длине. Также обеспечивается возможность быстрого и надежного крепления на преобразователе полноразмерного рабочего инструмента, различных перспективных экспериментальных его образцов и масштабных моделей с последующей быстрой их заменой.

Это способствует расширению области применения измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда (рисунок 3.4) при изучении процессов взаимодействия различного рабочего инструмента с прочными твердыми средами при их механическом разрушении, с целью поиска рациональных с точки зрения снижения энергоемкости и повышения производительности процесса, геометрических и технологических параметров такого инструмента и оснащаемого им рабочего оборудования.

Использование в практике таких лабораторных испытаний полноразмерного рабочего инструмента и природных лабораторных образцов разрушаемой среды способствует большей достоверности получаемых результатов.

### **3.3.2. Система методов измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП-1**

Первым действием, предшествующим проведению серии измерительных операций является заблаговременное (не менее чем за 30 минут до начала испытаний) включение питания тензометрического

усилителя УТ1-10 (рисунок 3.35) для вывода его элементов на рабочий режим.

Затем оператор информационно – измерительного комплекса (см. раздел 3.5) осуществляет балансировку измерительных каналов при помощи подстроечных резисторов, расположенных на приборной панели тензометрического усилителя (рисунок 3.32), где также расположены стрелочные индикаторы электрических сигналов каждого измерительного канала. О полной готовности усилителя к работе свидетельствуют стабильные нулевые показания всех трех стрелочных индикаторов.

Непосредственно перед началом измерения силы сопротивления разрушаемой среды резанию, предварительно тарированный в соответствии с п. 3.4.1. тензометрический элемент ИП-1 в сборе с кронштейном и полноразмерным режущим инструментом, например дисковым резцом (рисунок 3.8, 3.15, 3.18), установленный на стальных цилиндрических направляющих лабораторного стенда (рисунок 3.4), переводится оператором стенда вручную в крайнее правое положение.

На несущей плите лабораторного стенда размещается и жестко фиксируется образец разрушаемой среды, например ледяной блок. При этом оператором стенда задаются параметры среза (глубина и шаг резания), значения которых предписаны программой эксперимента для каждого опытного наблюдения.

В преддверии первого опыта каждой серии измерений следует выполнить 3 – 4 «тренировочных» реза, для сведения к минимуму влияния на точность измерений, гистерезиса материала упругого элемента измерительного преобразователя (см. подраздел 3.4.1).

По согласованию с оператором стенда оператор ИИК с некоторым опережением до включения привода тензометрического элемента активирует координатное поле в интерфейсе программного продукта *Power Graph*, о чем уведомляет оператора стенда.

Оператор стенда нажатием кнопки «Пуск» кнопочной станции стенда осуществляет включение привода тензометрического элемента, в результате чего последний, захватом 15 тяговой цепи 14, перемещается по направляющим 16 из крайнего правого положения в крайнее левое. При этом дисковый резец взаимодействует с расположенной на траектории его движения частью массива образца разрушаемой среды, что сопровождается возникновением в месте контакта режущей кромки с этой средой, напряжений. При достижении напряжениями предельных значений происходит растрескивание материала, скол и отделение от массива фрагментов разрушения различной величины, которые под воздействием боковой конусной поверхности режущего диска вытесняются из забоя.

Напряжения, возникающие на режущем инструменте в результате воздействия на него силы сопротивления разрушаемого массива резанию, передаются через кронштейн, на котором закреплен инструмент, упругому элементу измерительного преобразователя, в результате чего этот элемент деформируется, а наклеенные на его поверхности рабочие тензорезисторы реагируют на деформацию изменением размеров нитей чувствительных решеток и соответствующим изменением их удельного сопротивления.

В результате этого происходит разбалансировка полумостовых (мостовых) схем каждого из трех измерительных блоков тензорезисторов, получающих питание от тензометрического усилителя УТ1-10, что сопровождается возникновением электрического сигнала в измерительных диагоналях мостов каждого блока. Изменение величины этого сигнала пропорционально изменению величин соответствующих составляющих измеряемой силы. Такие электрические сигналы, генерируемые одновременно каждым из трех измерительных блоков обрабатываются информационно-измерительным комплексом (см. раздел 3.5) с визуализацией диаграмм в интерфейсе программного продукта *Power Graph* на мониторе

персонального компьютера (рисунок 3.22), расположенного на рабочем месте оператора ИИК.

Оператор ИИК во время проведения опыта контролирует процесс записи измеряемых величин, а по его завершении сохраняет файл с полученными результатами в памяти персонального компьютера с присвоением этому файлу соответствующего имени, которое должно содержать сведения, обеспечивающие в дальнейшем быструю идентификацию этого файла. К таким сведениям можно отнести, например, номер опыта, значения глубины и шага резания, скорости резания и т.п.

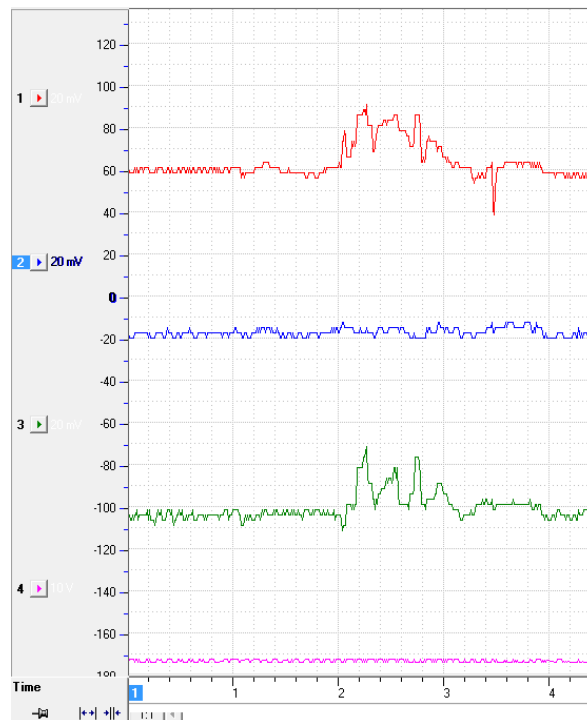


Рисунок 3.22. – Фрагмент записи диаграмм в интерфейсе программного продукта *Power Graph* на мониторе персонального компьютера: 1 – диаграмма горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию; 2 – диаграмма боковой составляющей силы сопротивления резанию; 3 – диаграмма вертикальной составляющей силы сопротивления резанию; 4 – диаграмма запасного измерительного канала

Координация действий оператора станда и оператора ИИК по возможности осуществляется жестами рук при визуальном контакте, в отсутствие такой возможности – голосом по радиосвязи.

Выполнение следующего опыта (измерения) производится в описанной выше последовательности.

Таким образом, использованием измерительного преобразователя ИП-1 в составе измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда (рисунок 3.4) может осуществляться измерение горизонтальной, вертикальной и боковой составляющих силы сопротивления прочной среды, разрушающему воздействию различного рабочего инструмента с высокой точностью. Диапазон измерений составляет  $0 \div 2500$  Н.

При решении ряда задач данной диссертационной работы описанный выше подход, позволил выстроить систему методов измерительного контроля силы сопротивления разрушаемой среды резанию полноразмерным инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП-1 (рисунок 3.23).

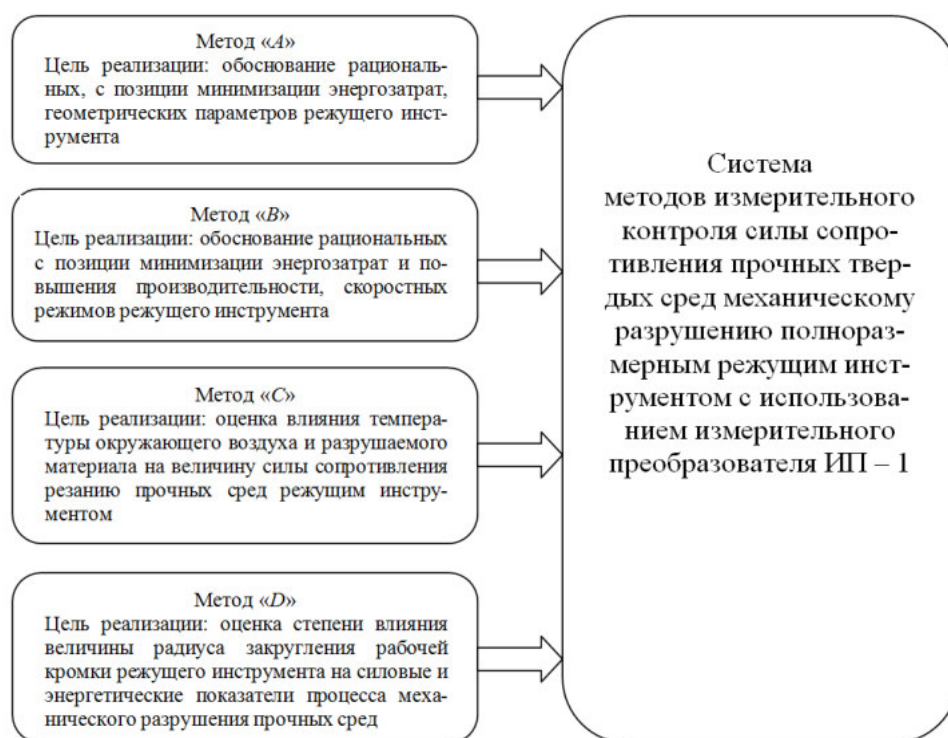


Рисунок 3.23. – Система методов измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП-1

Каждый из методов представленной системы («А», «В», «С», «D») отличается конечная цель его реализации, и как следствие – различия в условиях проведения экспериментальных исследований, в т.ч. геометрические и технологические параметры режущего инструмента.

Данные методы апробированы при проведении ряда серий экспериментальных лабораторных исследований процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с прочными СЛЮ при их механическом разрушении. Основные результаты этих исследований, а также и схемы применения каждого из методов системы представлены соответственно в главах 4 и 6 настоящей диссертационной работы.

### **3.3.3. Измерительный преобразователь – тензометрический элемент ИП-2 для контроля силы сопротивления разрушению твердых менее прочных сред масштабными моделями отвальных рабочих органов**

С целью более глубокого изучения процессов взаимодействия снегоочистительного оборудования отвального типа с твердыми средами (уплотненным снегом, немерзлыми грунтами, почвами, сыпучими материалами и т.п.) при их механическом разрушении и (или) перемещении, обеспечения более высокой точности результатов измерительного контроля силы сопротивления этих сред резанию (перемещению) такими рабочими органами, в Сибирском федеральном университете творческим коллективом с участием автора данной диссертации, разработан, изготовлен и испытан измерительный преобразователь – тензометрический элемент ИП-2 (рисунок 3.24), адаптированный для работы в составе измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда (рисунок 3.4).

Конструкцией данного измерительного преобразователя обеспечивается возможность индивидуального измерения величины каждой – горизонтальной, вертикальной и боковой составляющих силы сопротивления разрушаемой среды резанию масштабной моделью отвала.



При этом взаимное влияние этих составляющих друг на друга исключается конструктивно.

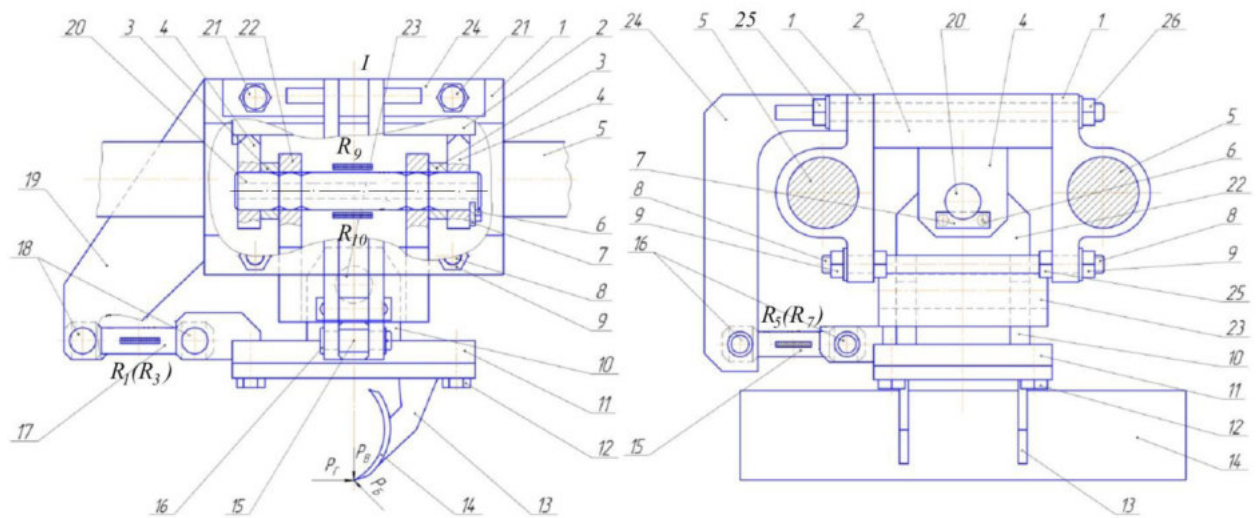


Рисунок 3.24. – Тензометрический элемент ИП-2 для контроля силы сопротивления разрушению твердых сред масштабными моделями отвальных рабочих органов: 1 – стальные щеки лабораторного стенда; 2 – рама; 3 – втулка; 4, 10 – проушины; 5 – направляющие лабораторного стенда; 6 – винты; 9, 25, 26 – гайки; 7 – пластина; 8 – шпилька; 11 – основание; 12 – болты; 13 – держатель; 14 – масштабная модель рабочего органа отвального типа; 15 – тяга воспринимающая воздействие от боковой составляющей силы сопротивления резанию; 16, 18, 23 – пальцы; 17 – тяга воспринимающая воздействие от горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию; 19, 24 – кронштейны; 20 – тяга воспринимающая воздействие от вертикальной составляющей силы сопротивления резанию; 21 – шпильки; 22 – элемент II – образный консольный. В скобках указаны обозначения тензорезисторов на невидимой стороне тензометрических тяг.

Тензометрический элемент содержит раму 2 с приваренным к ней наклонным кронштейном 19. Кронштейн 24 крепится к несущей плите рамы только при установке на стенд (рисунок 3.4) поверх верхнего карниза стальной щеки 1, расположенной со стороны оператора, шпильками 21 и гайками 25 и 26.

С рамой 2 шарнирно, посредством тяги 20, соединен II – образный упругий консольный элемент 22 с которым в свою очередь шарнирно,

посредством пальца 23 связано основание 11, к нижней поверхности которого крепится держатель 13, несущий масштабную модель 14 рабочего органа отвального типа.

Тяга 17 воспринимающая воздействие от горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию закреплена шарнирно: одним концом в проушинах вилки кронштейна 19 в его нижней части, другим – в проушинах вилки основания 11 посредством пальцев 18. Ось тяги 17 ориентирована параллельно продольной оси лабораторного стенда.

Тяга 15 воспринимающая воздействие от боковой составляющей силы сопротивления резанию закреплена шарнирно: одним концом в проушинах вилки кронштейна 24 в его нижней части, другим – в проушинах соответствующей вилки основания 11 посредством пальцев 16. Ось тяги 15 ориентирована в направлении перпендикулярном продольной оси лабораторного стенда.

Тяга 20 воспринимающая воздействие от вертикальной составляющей силы сопротивления резанию устанавливается в кронштейнах 4 рамы 2 будучи пропущенной через внутренние отверстия этих кронштейнов, отверстия в проушинах консольного П – образного элемента и отверстия втулок 3. Ось тяги 20 ориентирована параллельно продольной оси лабораторного стенда. От осевого перемещения тяга 20 удерживается пластиной 7 вставленной в проточку на заднем конце тела этой тяги и закрепленной на соответствующем кронштейне 4 винтами 6.

На поверхности кронштейна 19, обращенной к оператору закреплена электрическая клеммная колодка (на рисунке 3.24 не показана) для крепления выводных проводников блоков тензорезисторов, закрепленных на каждой из тяг 15, 17, 20, и проводного соединения тензометрического элемента с информационно-измерительным комплексом (см. раздел 3.5).

Каждая из тяг 15 и 17 изготовлена в виде стержня гантелевидной формы, на обоих уширенных концах которого выполнены отверстия

(рисунок 3.25). Тяга 20 воспринимающая воздействие от вертикальной составляющей силы сопротивления резанию выполнена в виде пустотелой трубки.

На каждой из трех тензометрических тяг соответствующим образом наклеены тензорезисторы  $R_n$  (рисунок 3.24) составляющие три измерительных блока, собранные по мостовой и полумостовой схемам. В состав каждого из блоков входят тензорезисторы ФКП-20-200-А-12-С (таблица П.В.1).



Рисунок 3.25. – Тяга тензометрического элемента, воспринимающая воздействие от боковой составляющей силы сопротивления резанию

Блок контроля горизонтальной составляющей  $P_r$  (мост разнесенный) включает рабочие тензорезисторы  $R_1$  и  $R_3$  и компенсационные выносные тензорезисторы  $R_2$  и  $R_4$ , размещенные в тензоусилителе.

Рабочие тензорезисторы  $R_1$  и  $R_3$  расположены на противоположных сторонах тяги 17, друг напротив друга. При этом главные оси чувствительных решеток каждого из двух рабочих тензорезисторов ориентированы вдоль главной оси этой тяги. В этом случае оба тензорезистора испытывают одинаковую деформацию, как по величине, так и по знаку. Поэтому данные тензорезисторы включены в *противоположные*

плечи измерительного моста, а служащие для компенсации температурных погрешностей выносные тензорезисторы  $R_2$  и  $R_4$  – в противоположные плечи полного моста, смежные по отношению к рабочим плечам  $R_1$  и  $R_3$  (рисунок 3.26).

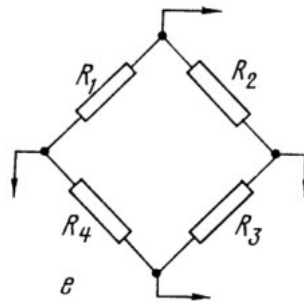


Рисунок 3.26. – Схема включения тензорезисторов в плечи моста при измерении деформаций растяжения – сжатия

В случае изгиба тяги 17, вызванного отклонением прилагаемой нагрузки от ее оси, оба активных тензорезистора получают одинаковые по величине, но противоположные по знаку приращения сопротивлений, поэтому влияние изгибной деформации исключается.

Блок контроля боковой составляющей  $P_6$  (мост разнесенный) включает рабочие тензорезисторы  $R_5$  и  $R_7$  и компенсационные тензорезисторы  $R_6$  и  $R_8$ , вынесенные в тензоусилитель. Размещение рабочих тензорезисторов на тяге 15 (рисунок 3.24) и схема включения всех тензорезисторов блока в плечи моста выполнены аналогично блоку контроля горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию.

Блок контроля вертикальной составляющей  $P_v$  (полумост) включает тензорезисторы  $R_9$  и  $R_{10}$ , расположенные симметрично относительно главной оси тензометрической тяги 20 на противоположных (верхней и нижней) ее сторонах. Тяга 20 является по сути двухопорной балкой, подверженной при воздействии прилагаемой нагрузки (от составляющей  $P_v$ ) деформации изгиба.

При этом материал (тяги) балки в зоне сечения  $I$  испытывает наиболее значительные деформации, причем разные по знаку: верхняя его сторона подвержена деформации растяжения, а противоположная нижняя – деформации сжатия. Следовательно, и каждый из пары рабочих тензорезисторов испытывает деформации равные по величине, но разные по знаку. Этим наряду с полной температурной компенсацией исключается влияние на результаты измерений деформации растяжения – сжатия, при условии включения каждого тензорезистора из пары в смежные плечи соответствующего полумоста.

Тензорезисторы  $R_{11}$  и  $R_{12}$  измерительного блока, дополняющие мост размещены в корпусе тензометрического усилителя.

При выборе схем размещения тензорезисторов на поверхности тяг учитывался вид деформации, которому подвергается тяга при выполнении измерений и опыт разработки и использования известных конструкций тензометрических элементов по материалам работ [86, 116, 144, 145, 154] и др.

Наклейка тензорезисторов на поверхность тензометрических тяг произведена клеем БФ – 2 по ГОСТ 12172 – 74 [155] со строгим соблюдением рекомендаций технологии наклейки, предписанных производителем тензорезисторов [156] и с учетом рекомендаций работы [116]. В качестве материала для изготовления тензометрического элемента в соответствии с рекомендациями работы [116] выбран прокат стали 50ХФА по ГОСТ 14959-79 [157]. Основные физико-механические свойства стали 50ХФА представлены выше в таблице 3.4.

В качестве испытываемого рабочего органа, устанавливаемого на тензометрический элемент, используется масштабная модель основного поворотного отвала автогрейдера ГС 10.06 [70, 82], изготовленная в масштабе 1: 10 с длиной режущей кромки  $L = 250$  мм из стали Ст3 ГОСТ 14637-89.

При изготовлении тензометрического элемента (рисунок 3.24) в его конструкцию был введен дополнительный элемент – П-образный кронштейн, несущий масштабную модель отвала и обеспечивающий при установке на нижнюю поверхность основания 11, изменение величины угла установки отвала в плане и угла резания. Механизм изменения указанных параметров понятен из рисунка 3.27, иллюстрирующего внешний вид дополнительного П-образного кронштейна и тыльной части масштабной модели отвала. На рисунке 3.28. показан внешний вид установленного на лабораторном испытательном стенде тензометрического элемента в сборе с П-образным кронштейном и масштабной моделью отвала.



Рисунок 3.27. – Дополнительный П-образный кронштейн тензометрического элемента



Рисунок 3.28. – Тензометрический элемент ИП-2 для контроля силы сопротивления разрушению твердых сред масштабными моделями отвальных рабочих органов в сборе

Конструкцией измерительного преобразователя – тензометрического элемента ИП-2, описанного в текущем разделе работы, обеспечивается возможность его быстрой установки на двух параллельных горизонтальных направляющих лабораторного испытательного стенда с возможностью свободного перемещения по всей их длине.

Также обеспечивается возможность быстрого и надежного крепления на преобразователе масштабных моделей рабочих органов, в частности отвального типа, возможность быстрого изменения значений угла установки рабочего органа в плане (угла захвата), относительно продольной оси стенда и угла резания, в достаточном для выполнения различных программ исследований диапазоне их значений. Значения угла установки отвала в плане (угла захвата)  $\alpha$  (град.), выбираются из ряда: 90, 65, 45, 30, угла резания  $\beta$  (град.) из ряда: 15, 30, 45, 60, 75, 90.

Это способствует дополнительному расширению области применения измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда (рисунок 3.4) при изучении процессов взаимодействия различных рабочих органов, в частности отвального типа, с твердыми средами (уплотненным снегом, немерзлыми грунтами, почвами, сыпучими материалами) при их механическом разрушении и (или) перемещении, с целью поиска рациональных с точки зрения снижения энергоемкости и повышения производительности процессов, технологических параметров такого оборудования.

Более высокая точность измерений контролируемой величины по сравнению с известными измерительными преобразователями, в частности прибором – аналогом [158] и прибором – прототипом [159] обеспечивается установкой блоков тензорезисторов на три разные тяги, каждая из которых воспринимает воздействие только одной из трех составляющих измеряемой силы, чем исключается взаимное влияние этих составляющих друг на друга.

Конструкция представленного в текущем разделе данной работы измерительного преобразователя – тензометрического элемента для контроля силы сопротивления разрушению твердых сред масштабными моделями отвальных рабочих органов защищена патентом Российской Федерации на изобретение № 2461809 [160].

Основные результаты работ автора, связанных с разработкой, созданием и испытаниями измерительных преобразователей – тензометрических элементов, описанных в подразделах 3.3.1. и 3.3.3. изложены в трудах [134, 161, 162].

### **3.3.4. Метод измерительного контроля силы сопротивления твердых менее прочных сред механическому разрушению масштабными моделями отвальных рабочих органов с использованием измерительного преобразователя ИП-2**

Первым действием, предшествующим проведению серии измерительных операций является заблаговременное (не менее чем за 30 минут до начала испытаний) включение питания тензометрического усилителя УТ1-10 для вывода его элементов на рабочий режим.

Затем оператор информационно – измерительного комплекса (см. раздел 3.5) осуществляет балансировку измерительных каналов при помощи подстроечных резисторов, расположенных на приборной панели тензометрического усилителя (рисунок 3.32), где также расположены стрелочные индикаторы электрических сигналов каждого измерительного канала. О полной готовности усилителя к работе свидетельствуют стабильные нулевые показания всех трех стрелочных индикаторов.

Непосредственно перед началом измерения силы сопротивления разрушаемой среды резанию, предварительно тарированный в соответствии с п. 3.4.1. тензометрический элемент ИП-2 (рисунок 3.24) в сборе с П –



образным кронштейном и масштабной моделью отвального рабочего органа (рисунок 3.28), установленный на стальных цилиндрических направляющих лабораторного стенда (рисунок 3.4), переводится оператором стенда вручную в крайнее правое положение.

На несущей плите лабораторного стенда размещается и жестко фиксируется образец разрушаемой среды, например блок из уплотненного снега. За тем оператором стенда задаются угол установки отвала в плане (угол захвата)  $\alpha$  (град.), угол резания  $\beta$  (град.) и глубина резания  $h$  (мм), значения которых предписаны программой эксперимента для каждого опытного наблюдения.

В преддверии первого опыта каждой серии измерений следует выполнить 3 – 4 «тренировочных» реза, для сведения к минимуму влияния на точность измерений, гистерезиса материала упругих элементов измерительного преобразователя.

По согласованию с оператором стенда оператор ИИК с некоторым опережением до включения привода тензометрического элемента активирует координатное поле в интерфейсе программного продукта *Power Graph*, о чем уведомляет оператора стенда.

Оператор стенда нажатием кнопки «Пуск» кнопочной станции стенда осуществляет включение привода тензометрического элемента, в результате чего последний, захватом 15 тяговой цепи 14, перемещается по направляющим 16 из крайнего правого положения в крайнее левое. При этом масштабная модель отвала внедряется в расположенный на траектории ее движения массив снежного блока, что сопровождается возникновением в месте контакта режущей кромки с этой средой, напряжений. При достижении напряжениями предельных значений происходит сдвиг слоя разрушаемого материала, отделение его от массива и перемещение продуктов разрушения либо перед отвалом с образованием призмы волочения, либо вдоль рабочей поверхности отвала с вытеснением этих продуктов из забоя в сторону.

Напряжения, возникающие на режущей кромке ножа отвала в результате воздействия на него силы сопротивления разрушаемого массива резанию, передаются через кронштейн, на котором закреплена масштабная модель отвала, основанию 11 (рисунок 3.24) а от него непосредственно тягам 15 и 17, и через основание 11 и П – образный консольный элемент 22 – тяге 20 измерительного преобразователя, в результате чего тяги испытывают упругую деформацию, а наклеенные на них рабочие тензорезисторы реагируют на деформацию изменением размеров нитей чувствительных решеток и соответствующим изменением их удельного сопротивления.

В результате этого происходит разбалансировка полумостовых (мостовых) схем каждого из трех измерительных блоков тензорезисторов, получающих питание от тензометрического усилителя УТ1-10, что сопровождается возникновением электрического сигнала в измерительных диагоналях мостов каждого блока. Изменение величины этого сигнала пропорционально изменению величин соответствующих составляющих измеряемой силы. Такие электрические сигналы, генерируемые одновременно каждым из трех измерительных блоков обрабатываются информационно-измерительным комплексом (см. раздел 3.5) с визуализацией диаграмм в интерфейсе программного продукта *Power Graph* на мониторе персонального компьютера, расположенного на рабочем месте оператора ИИК.

Оператор ИИК во время проведения опыта контролирует процесс записи измеряемых величин, а по его завершении сохраняет файл с полученными результатами в памяти персонального компьютера с присвоением этому файлу соответствующего имени, которое должно содержать сведения, обеспечивающие в дальнейшем быструю идентификацию этого файла. К таким сведениям можно отнести, например, номер опыта, значения глубины и угла резания, угла установки отвала в плане и т.п.

Координация действий оператора станда и оператора ИИК по возможности осуществляется жестами рук при визуальном контакте, в отсутствие такой возможности – голосом по радиосвязи.

Выполнение следующего опыта (измерения) производится в описанной выше последовательности.

Таким образом, с использованием измерительного преобразователя ИП-2 в составе измерительной установки – модернизированного лабораторного станда (рисунок 3.4) может осуществляться измерение горизонтальной, вертикальной и боковой составляющих силы сопротивления твердой среды (уплотненного снега, немерзлых грунтов, почв и т.п.), разрушающему воздействию рабочего оборудования отвального типа (перемещению таким оборудованием) с высокой точностью. Диапазон измерений составляет  $0 \div 1000\text{Н}$ .

Данный метод апробирован при проведении нескольких серий экспериментальных лабораторных исследований процесса взаимодействия снегоочистительного оборудования отвального типа с уплотненным снегом, при его механическом разрушении и (или) перемещении.

Основные результаты этих исследований, а также и схема применения метода представлены соответственно в главах 4 и 6 настоящей диссертационной работы.

### **3.4. Измерительная установка – стенд для градуировки тензометрических элементов**

Перед проведением экспериментальных исследований процессов взаимодействия различного рабочего (например, режущего) инструмента с разрушаемой средой с использованием лабораторного станда (рисунок 3.4) и тензометрических элементов ИП-1 и ИП-2 (рисунки 3.11, 3.24) следует произвести поверку или тарировку этих тензометрических элементов.

Тарировка тензоэлементов необходима для лабораторной обработки диаграмм усилий и определения действительного значения величин, записанных на регистрирующем устройстве, т.е. для определения масштаба записанной величины на диаграмме.

Запись, хранение и обработка значений измеряемой силы может осуществляться информационно-измерительным комплексом (ИИК), описанным в разделе 3.5.

Результаты произведенного автором анализа литературно-патентных источников в данной области свидетельствуют о том, что для реализации наиболее простого и точного метода поверки, называемого эталонным, исследователи используют эталонные грузы, динамометры растяжения, динамометры сжатия, прессы, имеющие силоизмерительную шкалу и т.п.

Тарировка осуществляется при помощи нагружающего устройства, обеспечивающего последовательное ступенчатое нагружение тензометрического элемента в статическом режиме до определенной величины и последующую ступенчатую его разгрузку. Заданная в системных единицах силы величина шага нагружения и разгрузки контролируется при помощи эталонного прибора. Тензометрический элемент, эталонный прибор и нагружающее устройство должны быть собраны в единую кинематическую цепь (КЦ).

Определенную сложность для исследователей представляет создание специальных устройств для размещения этой кинематической цепи. Данная задача дополнительно осложняется тем, что программой исследований зачастую предполагается одновременное измерение нескольких составляющих контролируемой силы, например, горизонтальной, боковой и вертикальной [134]. В этом случае, тензометрический элемент, оснащенный тремя блоками тензорезисторов необходимо протарировать по каждой из трех составляющих.

Для тарировки одного и того же тензометрического элемента по разным составляющим исследователи вынуждены разрабатывать специальные тарировочные устройства или приспособлять для этих целей известное в технике оборудование, например, прессы, динамометрические ключи и т.п. [85, 86, 87, 142, 134]. При этом в зависимости от направления приложения нагрузки к тензометрическому элементу необходимо использовать и различные эталонные приборы, например, для тарировки вертикальной составляющей – динамометр сжатия, для тарировки горизонтальной составляющей – динамометр растяжения [85]. Сказанное свидетельствует о том, что тарировка тензометрического элемента, являющаяся одним из важнейших подготовительных этапов экспериментальных исследований, зачастую требует значительных затрат труда и времени.

В рамках решения пятой задачи данной работы, для тарировки тензометрического элемента по каждой из составляющих силы сопротивления резанию автором разработана и изготовлена измерительная установка – стенд, для градуировки тензометрических элементов конструкция которого, обеспечивает размещение и фиксацию элементов КЦ (рисунок 3.29).

При этом тензометрический элемент может быть закреплен на раме стенда в трех пространственных положениях, в каждом из которых, нагружающим устройством обеспечивается нагружение тензоэлемента в направлении действия одной из трех соответствующих составляющих измеряемой силы, например силы сопротивления резанию, а также последующая разгрузка. В качестве эталонного прибора может быть использован динамометр растяжения, например ДПУ-5-2 по ГОСТ 13837-79 [163]. В качестве нагружающего устройства – талреп 0,8 ГУ – ОШ по ГОСТ 9690 – 71 [164]. Для крепления элементов КЦ на раме стенда предусмотрен комплект крепежных деталей и соединительных элементов (рисунок 3.30).

Стенд (рисунок 3.29) включает раму, состоящую из опоры 1, стойки 2, балки 3, выполненных из швеллера № 10, а также укосин 4.

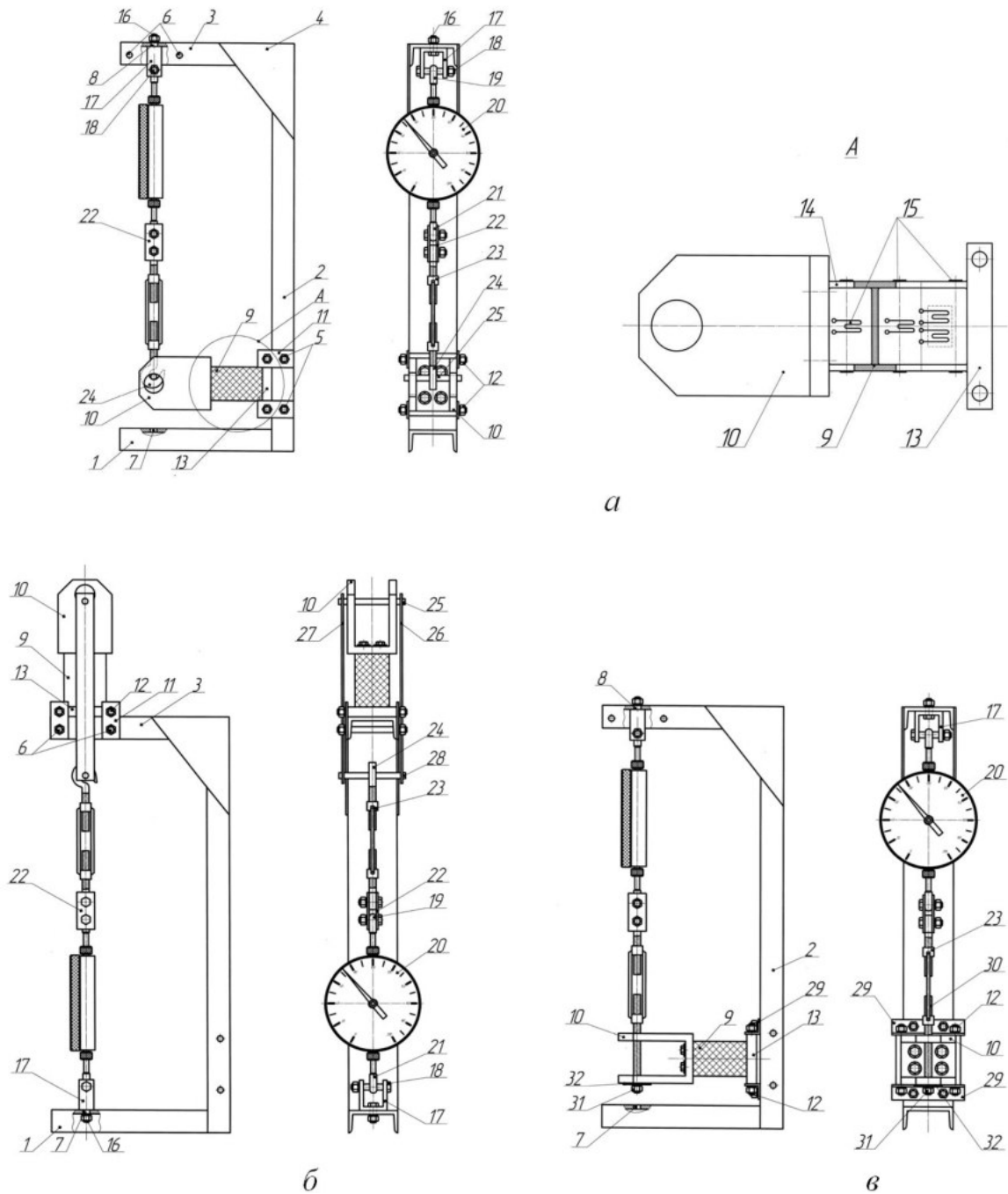


Рисунок 3.29. – Размещение элементов КЦ на раме стенда: а – при тарировке горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию; б – при тарировке вертикальной составляющей силы сопротивления резанию; в – при тарировке боковой составляющей силы сопротивления резанию

На боковых полках швеллера в нижней части стойки 2 и передней части балки 3 выполнены отверстия 5 и 6. На горизонтальных поверхностях опоры 1 и балки 3 выполнены отверстия 7 и 8, расположенные на одной оси.

Тензометрический элемент 9 (рисунок 3.29а) с закрепленным на нем кронштейном 10 посредством пластин 11 и шпилек 12, установленных в отверстиях 5 и отверстиях несущей плиты 13 тензометрического элемента жестко крепится на стойке 2.

На свободном конце балки 3 снизу посредством болта 16 вставленного в отверстие 8 и зафиксированного гайкой, закреплена вилка 17, в отверстиях которой установлен болт 18, продетый через верхнюю серьгу 19, несущую динамометр 20.

Нижняя серьга 21 динамометра 20 посредством шарнирного переходника 22 и двух болтов с гайками, соединяет динамометр 20 с ушком талрепа 23, гак 24 которого находится в зацеплении со стержнем 25, вставленным в отверстия кронштейна 10.

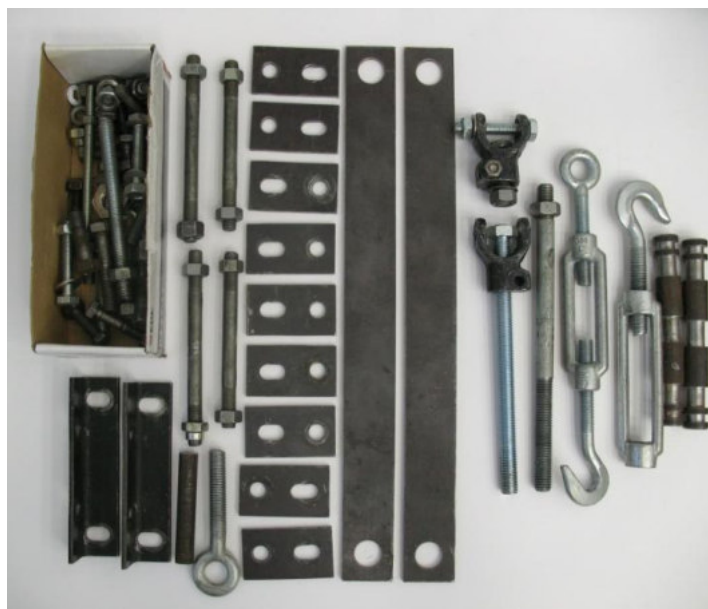


Рисунок 3.30. – Крепежные детали и соединительные элементы стенда

### **3.4.1. Метод градуировки тензометрических элементов с использованием измерительной установки – стенда предлагаемой конструкции**

При соблюдении технологии наклейки тензорезисторов на поверхность упругого элемента, между относительным приращением сопротивления и измеряемой деформацией (в пределах упругости материала) должна существовать строго линейная зависимость как при нагружении, так и при разгрузке. Однако если проводить тарировку тензометрического элемента, ранее не подвергавшегося деформации, то характеристики, снятые при его нагружении и разгрузке не дадут точного совпадения и образуется петля гистерезиса. Под термином «Механический гистерезис» понимают несовпадение тарировочных кривых тензометрического элемента, снятых при его нагружении и последующей разгрузке.

Поэтому каждому этапу тарировки должна предшествовать так называемая «тренировка» тензометрического элемента с наклеенными на него тензорезисторами, заключающаяся в реализации трех-, четырехкратного циклического его нагружения до максимально допустимой нагрузки с последующей разгрузкой до значений, близких нулю. Опытным путем установлено, что при этом гистерезис практически исчезает и линейность характеристики тензометрического элемента практически полностью восстанавливается (рисунок 3.31).

Это способствует повышению точности измерений, реализуемых посредством использования различных тензометрических элементов.

Для тарировки горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию все компоненты стенда размещаются на раме стенда в порядке, описанном выше (рисунок 3.29а).

При этом все элементы КЦ располагаются вдоль линии действия горизонтальной составляющей силы сопротивления разрушаемой среды



резанию, приведенной к оси вращения режущего инструмента, при испытаниях размещаемого на валу в отверстиях кронштейна 10.

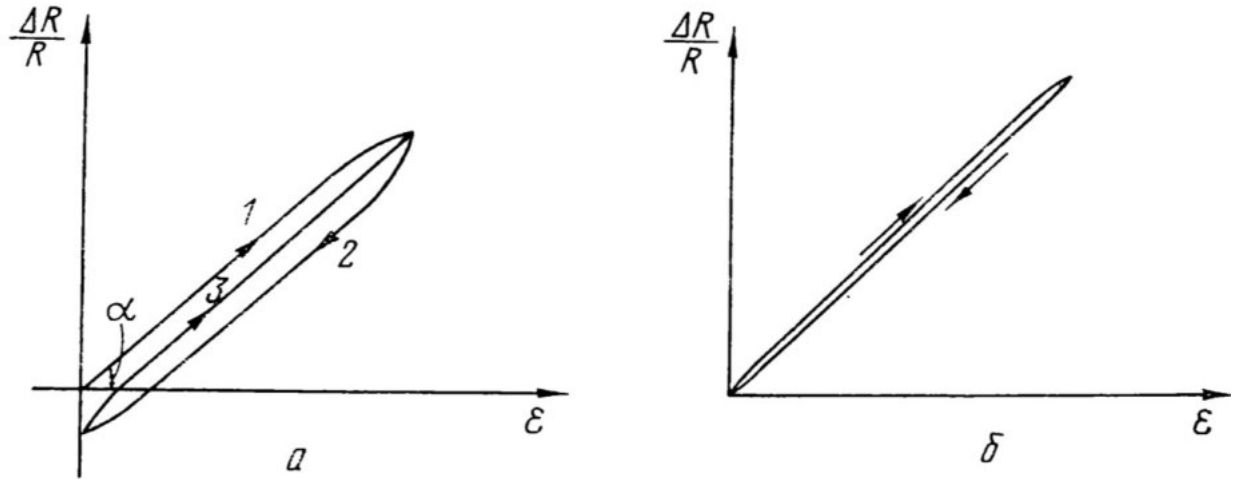


Рисунок 3.31. – Тарировочная характеристика тензометрического элемента: *a* – при первых нагружениях; *б* – после многократных нагружений («тренировки»)

Для тарировки вертикальной составляющей силы сопротивления резанию (рисунок 3.29б), вилка 17 устанавливается на опоре 1 и крепится посредством болта 16, вставленного в отверстие 7 и зафиксированного гайкой. Тензометрический элемент 9 с закрепленным на нем кронштейном 10 устанавливается несущей плитой 13 на горизонтальной поверхности балки 3 и жестко крепится на ней посредством пластин 11 и шпилек 12, установленных в отверстиях 6 и отверстиях несущей плиты 13. На свободных концах стержня 25 вставленного в отверстия кронштейна 10 навешаны тяги 26 и 27 имеющие на нижних концах отверстия, в которые вставлен стержень 28 находящийся в зацеплении с гаком 24 талрепа 23. На поверхности стержней 25 и 28 для предотвращения их осевого смещения, соскальзывания тяг 26 и 27 и смещения гака 24 талрепа 23 выполнены кольцевые проточки соответствующей ширины (на чертеже не показаны). Ушко талрепа 23 посредством шарнирного переходника 22 и двух болтов с гайками соединено с верхней серьгой 19, несущей динамометр 20. Нижняя серьга 21

посредством продетого через нее болта 18 соединена с вилкой 17. Таким образом, все элементы КЦ располагаются вдоль линии действия вертикальной составляющей нагружающего усилия, приведенной к оси вращения режущего инструмента.

Для тарировки боковой составляющей силы сопротивления резанию (рисунок 3.29в) тензометрический элемент 9 с закрепленным на нем кронштейном 10 посредством двух шпилек 12, установленных в отверстиях несущей плиты 13 и отверстиях дополнительных кронштейнов 29 жестко крепится в нижней части стойки 2 рамы стенда, при этом ось отверстий в кронштейне 10 совпадает с осью отверстий 7 и 8. Вилка 17, динамометр 20 и талреп 23 размещены на раме в порядке аналогичном порядку, описанному для тарировки горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию. В нижнем резьбовом отверстии муфты талрепа 23 вместо гака 24 установлена шпилька 30 пропущенная через отверстия кронштейна 10 и зафиксированная снизу гайкой 31 упирающейся в шайбу 32. Таким образом, все элементы КЦ располагаются вдоль линии действия боковой составляющей усилия резания, приведенной к оси вращения режущего инструмента.

Во всех трех случаях, пошаговое ступенчатое нагружение тензоэлемента до заданной величины и последующая его ступенчатая разгрузка с тем же шагом осуществляются вращением муфты талрепа 23 в соответствующем направлении. Величина шага нагружения и разгрузки контролируется по показаниям динамометра 20. Запись, регистрация и хранение получаемой измерительной информации осуществляется ИИК (см. раздел 3.5).

Схема применения метода градуировки тензометрических элементов приведена в Главе 6 настоящей диссертационной работы.

Измерительная установка – стенд для градуировки тензоэлементов предлагаемой конструкции позволяет произвести тарировку

тензометрического элемента по трем составляющим силы сопротивления резанию с минимальными затратами труда и времени, используя только один эталонный прибор.

Кроме того, массово-габаритные параметры стенда позволяют размещать его в любом удобном месте учебного лабораторного или аудиторного помещения и использовать для демонстрации студентам основных принципов электротензометрического метода измерения деформаций и усилий в элементах различных технических систем.

Данный стенд успешно использован автором и коллегами при проведении целого ряда серий лабораторных экспериментальных исследований процессов взаимодействия различного рабочего инструмента с разрушаемыми прочными и твердыми средами в рамках работ [88, 134, 165, 166, 167] и др. с применением обоих тензометрических элементов, описанных в данной главе (рисунки 3.32, 3.33).



Рисунок 3.32. – Градуировка тензометрического элемента ИП-1 по горизонтальной составляющей измеряемой силы

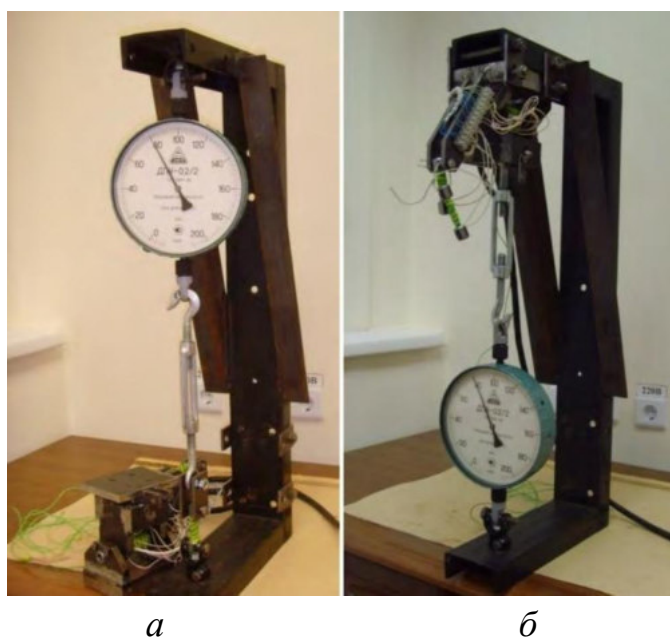


Рисунок 3.33. – Градуировка тензометрического элемента ИП-2: *а* – по горизонтальной составляющей измеряемой силы; *б* – по вертикальной составляющей измеряемой силы

Конструкция представленной в текущем разделе данной работы измерительной установки – стенда для градуировки тензоэлементов защищена патентом Российской Федерации на изобретение № 2500983 [168].

Основные результаты работ автора, связанных с разработкой, созданием и испытаниями данной измерительной установки изложены в трудах [169, 170].

### 3.5. Информационно-измерительный комплекс

Для обеспечения блоков тензорезисторов электрическим питанием при измерении сил посредством использования описанных выше тензометрических элементов, получения от этих измерительных преобразователей электрического сигнала, его первичной обработки, усиления, преобразования в цифровую форму, записи измеряемых величин на диаграммах, регистрации, хранения полученных результатов с возможностью их дальнейшей обработки построен информационно-измерительный комплекс (ИИК) (рисунок 3.34).

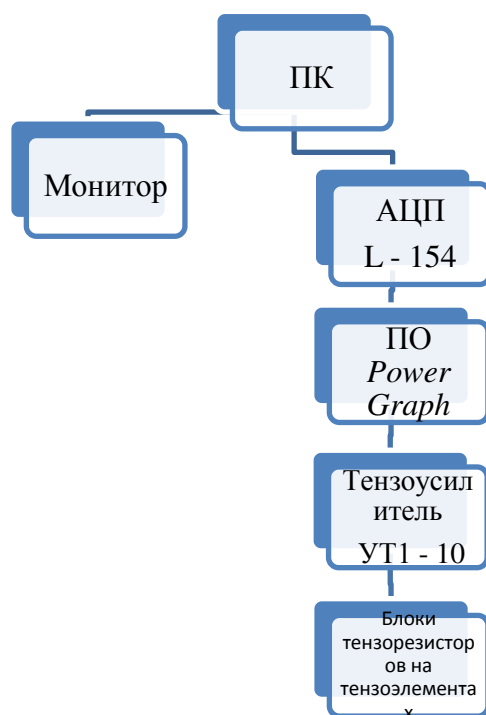


Рисунок 3.34. – Структурная схема информационно-измерительного комплекса

Компонентами ИИК являются: блоки тензорезисторов, размещенные на тензометрических элементах, тензометрический усилитель УТ1-10, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) L-154 [171], программное обеспечение *Power Graph*, персональный компьютер и монитор, необходимый для визуализации сигналов, получаемых от измерительных преобразователей, выполнения операций регистрации, обработки и хранения экспериментальных данных.

Конструкции тензометрических элементов, обоснование выбора тензорезисторов и позисторов, входящих в состав трех измерительных блоков, обоснование выбора зон поверхности упругих элементов для размещения указанных электронных компонентов изложены выше в подразделах 3.3.1 – 3.3.4.

Следующим важнейшим элементом ИИК является тензометрический усилитель УТ1-10, разработанный сотрудниками лаборатории КИП и А Центра энергетических технологий ОАО «Красноярский

ПромстройНИИпроект» под руководством В.И. Тихонова. Электрическая схема тензоусилителя представлена на рисунке 3.35.

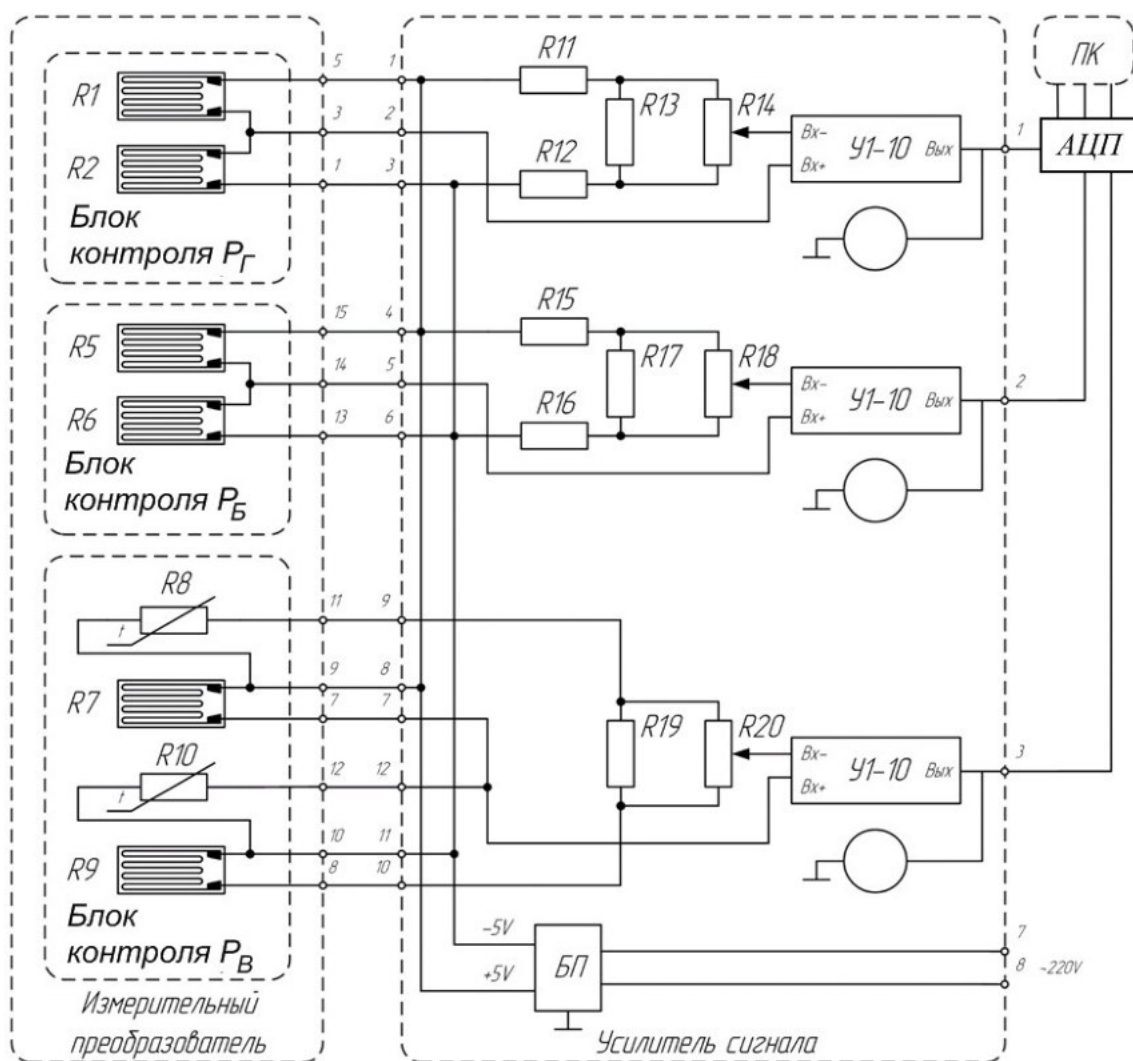


Рисунок 3.35. – Электрическая схема тензометрического усилителя УТ1-10

Электрическое питание тензометрических мостов напряжением 5 вольт осуществляется блоком питания БП. Положительный потенциал передается на тензометрические мосты через провода, подключенные на разъемы 1, 4, 8 модуля усилителя сигнала и соответствующие разъемы 5, 15 и 9 блоков контроля составляющих силы сопротивления резанью, размещенных на измерительном преобразователе. Отрицательный потенциал передается на тензометрические мосты через провода, подключенные на разъемы 3, 6, 11

модуля усилителя сигнала и соответствующие разъемы 3, 13, 10 блоков контроля составляющих силы сопротивления резанию измерительного преобразователя.

Для пояснения порядка работы отдельного измерительного канала в качестве примера на рисунке 3.36 приведена схема тензометрического моста для измерения горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию.

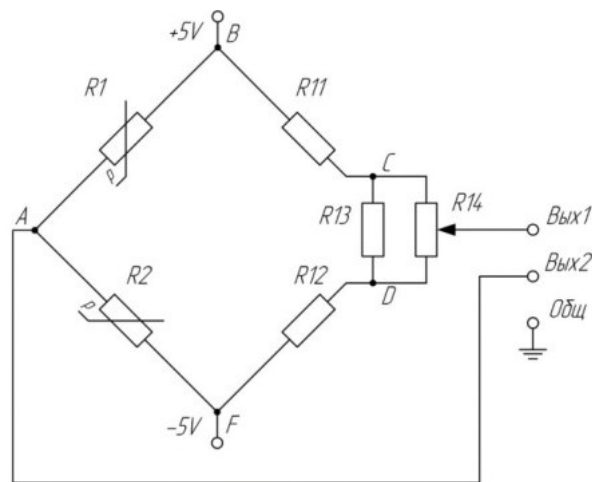


Рисунок 3.36. – Тензометрический мост для измерения горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию

В рамках общей электрической схемы тензоусилителя (рисунок 3.35) данный мост упрощенно можно рассматривать как два простых резистивных делителя. Это обусловлено тем, что сопротивление усилительного блока У1-10, электрически связанного с мостом, имеет значительную величину. Следовательно, точки «Вых1» и «Вых2» (рисунок 3.36) условно друг с другом не связаны.

Измерительный мост является сбалансированным при соблюдении следующего условия:  $R11 \times R2 = R1 \times R12$ .

Питающее напряжение подведено к точкам  $B$  и  $F$  и соответствует выводам измерительного преобразователя 5 и 1 (рисунок 3.35). Переменный резистор  $R14$  предназначен для точной подстройки моста, в условиях

незначительных различий в номиналах сопротивления  $R_{11}$  и  $R_{12}$ . Резистор  $R_{13}$  подбирается таким образом, чтобы вклады в каждое из плеч  $R_{11}$  и  $R_{12}$  моста не превышали сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  тензометрических резисторов.

При взаимодействии закрепленного на тензометрическом преобразователе режущего инструмента с разрушаемой средой возникает деформации упругого элемента, что сопровождается увеличением значений сопротивления  $R_1$  рабочего тензорезистора, расположенного на стороне тензобалки, подверженной деформации растяжения, и уменьшением значений сопротивления  $R_2$  рабочего тензорезистора, расположенного на стороне тензобалки, подверженной деформации сжатия. Вследствие этого напряжение в точке «Вых2» уменьшается. Напряжение в точке «Вых1» всегда остаётся неизменным. В результате между точками «Вых1» и «Вых2» возникает разность потенциалов. Сформированный таким образом электрический сигнал с измерительной диагонали тензометрического моста направляется в блок усилителя У1-10 (рисунок 3.35).

Основой усилительного блока У1-10 является прецизионный усилитель отечественного производства 140УД17Б, обозначенный на рисунке 3.37 как «DA1» [205].

Данный усилитель обладает малым напряжением смещения нуля и высоким коэффициентом усиления напряжения, имеет внутреннюю частотную коррекцию. Обладает также оптимальным сочетанием параметров входных напряжений и тока шума. Электрические параметры микросхем 140УД17Б представлены в Приложении Г.

Микросхема DA1 включена по классической схеме дифференциального операционного усилителя (ОУ) коэффициент усиления синфазного сигнала которого определяется из выражения

$$k = \frac{R_{oc}}{R_1} = \frac{3,6 MOm}{3 KOm} = \frac{R_3}{R_2} = \frac{3,6 MOm}{3 KOm} = 1200 \quad (3.3)$$



Для устранения дрейфа нуля используется балансирующий резистор  $R_6$ . Наиболее вероятной причиной такого дрейфа может служить влияние на измерительную систему температуры окружающей среды.

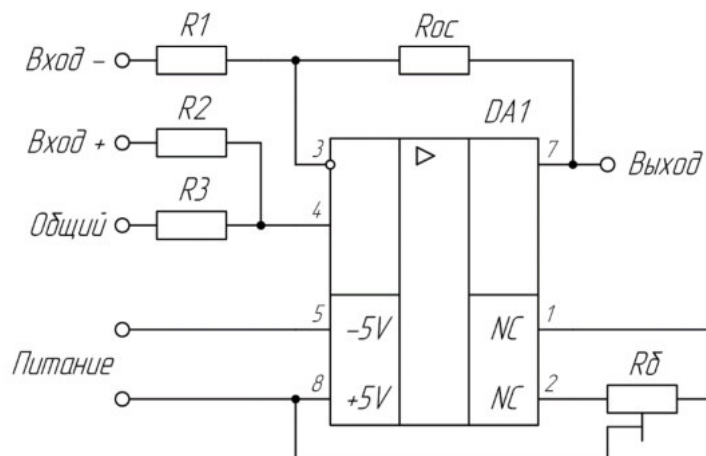


Рисунок 3.37. – Принципиальная схема дифференциального усилителя 140УД17Б:  $R_1$  – 3 КОм;  $R_{0c}$  – сопротивление обратной связи (3,6 МОм);  $R_2$  – 3 КОм;  $R_3$  – 3,6 МОм;  $R_6$  – балансирующий резистор (47 КОм)

Усиленный аналоговый электрический сигнал от каждого из усилителей У1-10 проводной связью передается на плату многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) L-154, установленную в системном блоке персонального компьютера. Данный АЦП при поддержке программного продукта *Power Graph* осуществляет преобразование аналогового электрического сигнала в цифровую форму, запись измеряемых величин на диаграммах, регистрацию, хранение полученных результатов с возможностью их дальнейшей обработки. Указанные АЦП выпускаются серийно ЗАО «Л-КАРД» г. Москва [206]. Техническая характеристика АЦП L-154 приведена в таблице 3.6.

Описываемый тензометрический усилитель УТ1-10 собран в корпусе от персонального компьютера (рисунок 3.32). На передней панели корпуса смонтированы стрелочные нуль – индикаторы и подстроечные резисторы. Посредством использования этих приборов осуществляется корректировка

баланса каждого из трех измерительных мостов перед проведением очередного опыта.

Таблица 3.6. – Техническая характеристика платы L-154

Количество каналов	– дифференциальных 16 – с общей землей 32
Разрядность	12 бит
Время преобразования	1.7 мкс
Входное сопротивление	2 МОм
Диапазон входного сигнала	$\pm 5.12\text{В}$ , $\pm 2.56\text{В}$ , $\pm 1.024\text{В}$
Максимальная частота преобразования	70 кГц
Интегральная нелинейность преобразования	$\pm 0.8$ МЗР, макс. $\pm 1.2$ МЗР
Дифференциальная нелинейность преобразования	$\pm 0.5$ МЗР, макс. $\pm 0.75$
Отсутствие пропуска кодов	гарантировано 12 бит
Межканальное прохождение	На полосе 10 кГц меньше 0.5 МЗР На полосе 50 кГц 1 МЗР
Смещение нуля	$\pm 0.5$ МЗР, макс. 1 МЗР
Полоса пропускания сигнала	не более 250 кГц

При выполнении опыта отклонение стрелки от нулевого значения вправо или влево свидетельствует о разбалансировке моста и возникновении в его измерительной диагонали напряжения, величина которого пропорциональна величине соответствующей составляющей силы сопротивления резанию. Также на передней панели корпуса тензоусилителя размещен световой индикатор внешнего сетевого питания. На тыльной стороне корпуса размещены разъем для кабельного подключения усилителя к персональному компьютеру, тумблер включения (выключения) внешнего сетевого питания, а также клеммная колодка для подключения к тензоусилителю жгута проводов, обеспечивающих его электрическую связь с измерительными блоками тензометрического элемента.

Посредством использования данного информационно-измерительного комплекса в составе средств измерительного контроля, представленных в

данной работе, осуществляется реализация электротензометрического метода измерения сил, возникающих на различном режущем инструменте при его взаимодействии с разрушаемой средой.

Работоспособность ИИК, его надежность, стабильность получаемых данных будут подтверждены результатами целого ряда серий экспериментальных лабораторных исследований процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с прочными СЛО, а также масштабных моделей отвальных рабочих органов с уплотненным снегом при механическом разрушении этих сред.

Основные результаты работ автора, связанных с разработкой, созданием и испытаниями данного информационно-измерительного комплекса изложены в трудах [134, 161] и др.

### **3.5.1. Анализ точности измерений**

Эффективность оценки качества эксперимента находится в прямой зависимости от точности результатов испытаний. При измерении исследуемых величин соответствующими измерительными приборами в процессе эксперимента возникают определенные погрешности измерений.

Расчет погрешностей измерений при проведении эксперимента произведен в соответствии с методиками, основанными на теории ошибок [87, 142, 143]. Согласно данным методикам предельная относительная погрешность измерения какого-либо параметра есть сумма предельных относительных погрешностей источников ошибок. В рассматриваемом случае источниками ошибок являются элементы информационно-измерительного комплекса (ИИК), составляющие тензометрическую схему. При анализе точности измерений всю тензометрическую схему следует разбить на несколько зон, каждая из которых выполняет определенную роль в ИИК.

В первую зону входит тензометрический элемент. Причиной погрешностей, вносимых данной зоной, могут являться:

- несовершенство загрузки тензобалки;
- несовершенство температурной компенсации;
- проведение тарировки в статическом режиме при неподвижном тензоэлементе.

Во вторую зону входит электрический кабель, соединяющий тензометрический элемент с остальными компонентами ИИК. Погрешности в этой зоне могут быть обусловлены фазовой разбалансировкой измерительных мостов за счет распределенной емкости кабеля.

В третью зону входит тензометрический усилитель. Причины погрешностей, вносимых данной зоной, могут быть следующими:

- емкостная разбалансировка моста;
- непостоянство напряжения, питающего измерительный мост;
- взаимное влияние каналов;
- амплитудные искажения фазочувствительного канала.

В четвертую зону входит плата аналого-цифрового преобразователя L-154 (таблица 3.6), относительная ошибка измерений которой может служить причиной погрешности, вносимой данной зоной.

Значения силы сопротивления прочной среды, например льда, резанию рабочим инструментом, например дисковым резцом, периодически меняются. Поэтому тензометрический элемент, несущий режущий инструмент будет испытывать вынужденные колебания. При определенных условиях свободные колебания тензобалки могут существенно исказить результаты измерений, что не позволит оценить реальную величину измеряемой силы.

Согласно рекомендациям работы [86] частота  $W_0$  собственных колебаний упругого тензоэлемента должна удовлетворять условию

$$\frac{W_0}{W} \geq 10, \quad (3.4)$$

где  $W$  – частота регистрируемого процесса.

В данной работе используется тензометрический элемент с консольно закрепленной пустотелой балкой цилиндрической формы с сосредоточенной массой на конце (резцом). Частота собственных колебаний такой балки определяется по формуле [86]

$$W_0 = \frac{a}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (3.5)$$

где  $a$  – расчетный коэффициент;

$$a = \sqrt{\frac{3}{\frac{M}{ml} + \frac{1}{3}}} \text{ при } a < 1, \quad (3.6)$$

где  $M$  – сосредоточенная масса (масса резца);

$m$  – масса единицы длины балки;

$l$  – длина балки;

$E$  – модуль упругости;

$J$  – момент инерции.

При условии изготовления тензобалки из стали 50ХФА, частота  $W_0 = 21222,3 \text{ с}^{-1}$ .

Предельная частота регистрируемого процесса

$$W = 0,1 W_0 = 2122,23 \text{ с}^{-1}$$

Проверочные эксперименты по резанию массива льда дисковыми резцами в различных скоростных режимах показали, что частота процесса значительно ниже предельно допустимой частоты. Следовательно, свободные колебания тензобалки (тензоэлемента) не внесут существенных

искажений при регистрации силы сопротивления льда резанию таким инструментом.

Относительная ошибка измерений прецизионного операционного усилителя постоянного тока на основе интегральной схемы К140УД17Б при коэффициенте усиления, равном 215, имеет относительную погрешность не более  $\delta_4 = 0,2 \%$  [205].

Относительная ошибка измерений платы аналого-цифрового преобразователя L-154 производилась следующим образом.

Для работы в составе ИИК плата L-154 была переключена в 16-канальный дифференциальный режим. При этом частоту дискретизации одного канала определяли по формуле

$$f_k = \frac{f_h}{n}, \quad (3.7)$$

где  $f_k$  – частота дискретизации одного канала платы;

$f_h$  – частота дискретизации платы;

$n$  – число каналов платы;

$$f_k = \frac{70}{16} = 4,37 \text{ кГц.}$$

Максимальную частоту регистрируемых процессов находили по формуле

$$f_{\max} = \frac{f_k}{2}, \quad (3.8)$$

$$f_{\max} = \frac{4,37}{2} = 2,18 \text{ кГц.}$$

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что максимальная частота регистрируемых процессов на одном канале платы составит 2,88 кГц, что является достаточным условием при измерении механических величин.

Для регистрации сигналов плата была настроена в режиме записи напряжения в диапазоне  $\pm 5$  В. Абсолютная погрешность измерения напряжения платой

$$\Delta_1 = \frac{U}{2^m}, \quad (3.9)$$

где  $U$  – размах амплитуды измерений;

$m$  – разрядность платы;

В результате расчета получаем

$$\Delta_1 = \frac{\pm 5}{2^{12}} = \pm 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Относительная ошибка измерения напряжения платой определялась из выражения

$$\delta_1 = \frac{1}{2^m}, \quad (3.10)$$

В результате расчета получаем

$$\delta_1 = \frac{1}{2^{12}} = \pm 2,44 \cdot 10^{-4} \text{ \%}.$$

Относительная погрешность измерений тензорезисторов сведена к минимуму за счет использования метода схемной термокомпенсации применительно к блокам контроля горизонтальной и боковой составляющих

силы сопротивления резанию, и использованием терморезисторов (позисторов) в составе блока контроля вертикальной составляющей измеряемой силы (рисунок 3.34).

Допускаемый разброс сопротивлений, зависящий от качества наклейки тензорезисторов на металл тензоэлемента, составляет не более 5 % [142].

При реализации электротензометрического метода измерения механических величин погрешность измерений складывается из систематической погрешности (погрешности АЦП, тензоэлемента и т. д.) и погрешности тарировки (случайной погрешности). Процесс тарировки осуществлялся посредством многократного ступенчатого нагружения и последующей ступенчатой разгрузки тензометрического моста (см. раздел 3.4). Погрешность определялась по методике, приведенной в работе [143].

Относительная погрешность измерений при тарировке рассчитывалась по формуле

$$\delta_2 = \pm \frac{\Delta_2}{U_{\text{cp}} M_{\text{T}}} \cdot 100 \%, \quad (3.11)$$

где  $\Delta_2$  – абсолютная погрешность при тарировке, кН;

$$\Delta_2 = \pm 0,5 (U_{\text{н}i} - U_{\text{р}i}) M_{\text{T}}, \quad (3.12)$$

где  $U_{\text{н}i}$ ,  $U_{\text{р}i}$  – среднее напряжение при нагрузке и разгрузке на  $i$ -й ступени, В;

$M_{\text{T}}$  – масштаб ступени тарировки, кН/В;

$$M_{\text{T}} = \frac{P}{U_{\text{cp}}}, \quad (3.13)$$

где  $P$  – истинная нагрузка данной ступени, кН;

$U_{\text{cp}}$  – среднее напряжение при нагрузке и разгрузке, В;

$$U_{\text{cp}} = 0,5 (U_{\text{н}i} + U_{\text{р}i}), \quad (3.14)$$



На рисунке 3.38 представлен фрагмент обработки тарировочной диаграммы горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию в интерфейсе табличного процессора *Microsoft Excel*.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
2	kG	Пер. в kN 0,0098	V, точки	Block 15	Selection		Block 16	Selection		Block 17	Selection
3	0	0	0	Started:	19.01.2010 17:08		Started:	19.01.2010 17:16		Started:	19.01.2010 17:09
4	50	0,49	0,0274	Interval:	50 ms		Interval:	50 ms		Interval:	50 ms
5	100	0,98	0,0361	Samples:	71		Samples:	61		Samples:	58
6	150	1,47	0,0618	Time, s	Ch1, V 50kG N		Time, s	Ch1, V 50kG R		Time, s	Ch1, V 100kG N
7	200	1,96	0,0795	0	0,025		0	0,025		0	0,0475
8	250	2,45	0,099	0,05	0,03		0,05	0,025		0,05	0,0475
9	300	2,94	0,1168	0,1	0,0275		0,1	0,025		0,1	0,0475
10				0,15	0,03		0,15	0,025		0,15	0,0475
11				0,2	0,025		0,2	0,025		0,2	0,0475
12	Тар. коэф.	25,17123288	kN/V	0,25	0,03		0,25	0,025		0,25	0,0475
13				0,3	0,0275		0,3	0,0275		0,3	0,045
14				0,35	0,0325		0,35	0,025		0,35	0,0475
15				0,4	0,0325		0,4	0,025		0,4	0,0475
16				0,45	0,0275		0,45	0,025		0,45	0,0475
17				0,5	0,03		0,5	0,025		0,5	0,045
18				0,55	0,03		0,55	0,025		0,55	0,0475
19				0,6	0,0325		0,6	0,025		0,6	0,0475
20				0,65	0,0275		0,65	0,025		0,65	0,0475
21				0,7	0,03		0,7	0,025		0,7	0,0475
22				0,75	0,03		0,75	0,0275		0,75	0,0475
23				0,8	0,03		0,8	0,025		0,8	0,05
24				0,85	0,0325		0,85	0,0275		0,85	0,0475
25				0,9	0,03		0,9	0,0225		0,9	0,0475
26				0,95	0,03		0,95	0,025		0,95	0,05
27				1	0,03		1	0,025		1	0,0475
28				1,05	0,0325		1,05	0,0225		1,05	0,0475
29				1,1	0,0325		1,1	0,0225		1,1	0,0475
30				1,15	0,03		1,15	0,025		1,15	0,0475
31				1,2	0,03		1,2	0,0275		1,2	0,0475
32				1,25	0,0325		1,25	0,025		1,25	0,05

Рисунок 3.38. – Фрагмент обработки тарировочной диаграммы горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию

Результаты обработки тарировочной диаграммы горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7. – Результаты обработки тарировочной диаграммы горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию

Нагрузка $P$ , кН	Напряжение на измерительной диагонали тензометрического моста $U$ , В		Среднее напряжение $U_{cp}$ , В	Масштаб ступени тарировки $M_T$ , кН/В
	при нагрузке $U_{ni}$	при разгрузке $U_{pi}$		
0,49	$U_{n1} = 0,031$	$U_{p1} = 0,024$	0,0274	17,883
0,98	$U_{n2} = 0,048$	$U_{p2} = 0,041$	0,0445	22,022
1,47	$U_{n3} = 0,066$	$U_{p3} = 0,058$	0,0618	23,786
1,96	$U_{n4} = 0,083$	$U_{p4} = 0,076$	0,0795	24,654
2,45	$U_{n5} = 0,100$	$U_{p5} = 0,098$	0,0990	24,747
2,94	$U_{n6} = 0,117$	$U_{p6} = 0,117$	0,1168	25,171

Тарировочный график горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию, построенный на основании обработанных результатов тарировки представлен на рисунке 3.39.

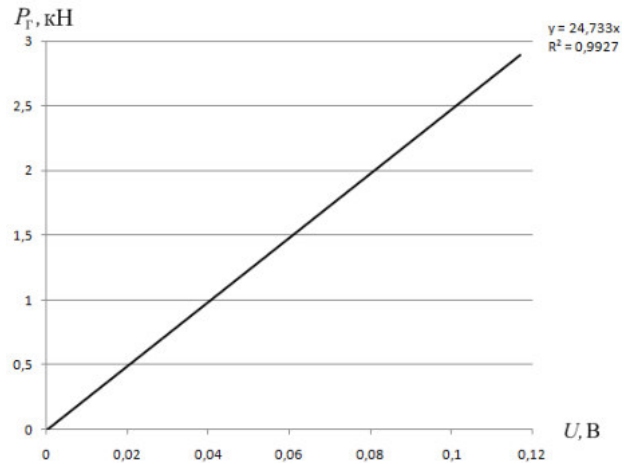


Рисунок 3.39. – Тарировочный график горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию

В результате расчетов по ступеням тарировочных диаграмм максимальная относительная погрешность составила  $\delta_2 = \pm 2 \%$ .

Из приведенных расчетов следует, что погрешности измерений не могут внести существенных искажений в результаты измерений величин контролируемых параметров.

### **3.6. Учебно-научная лаборатория «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур»**

Средства измерительного контроля природной среды и изделий, разработанные, изготовленные и успешно испытанные в рамках данной работы (рисунок 3.40), стали основой материально-технической базы учебно-научной лаборатории «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур» (далее – лаборатория).

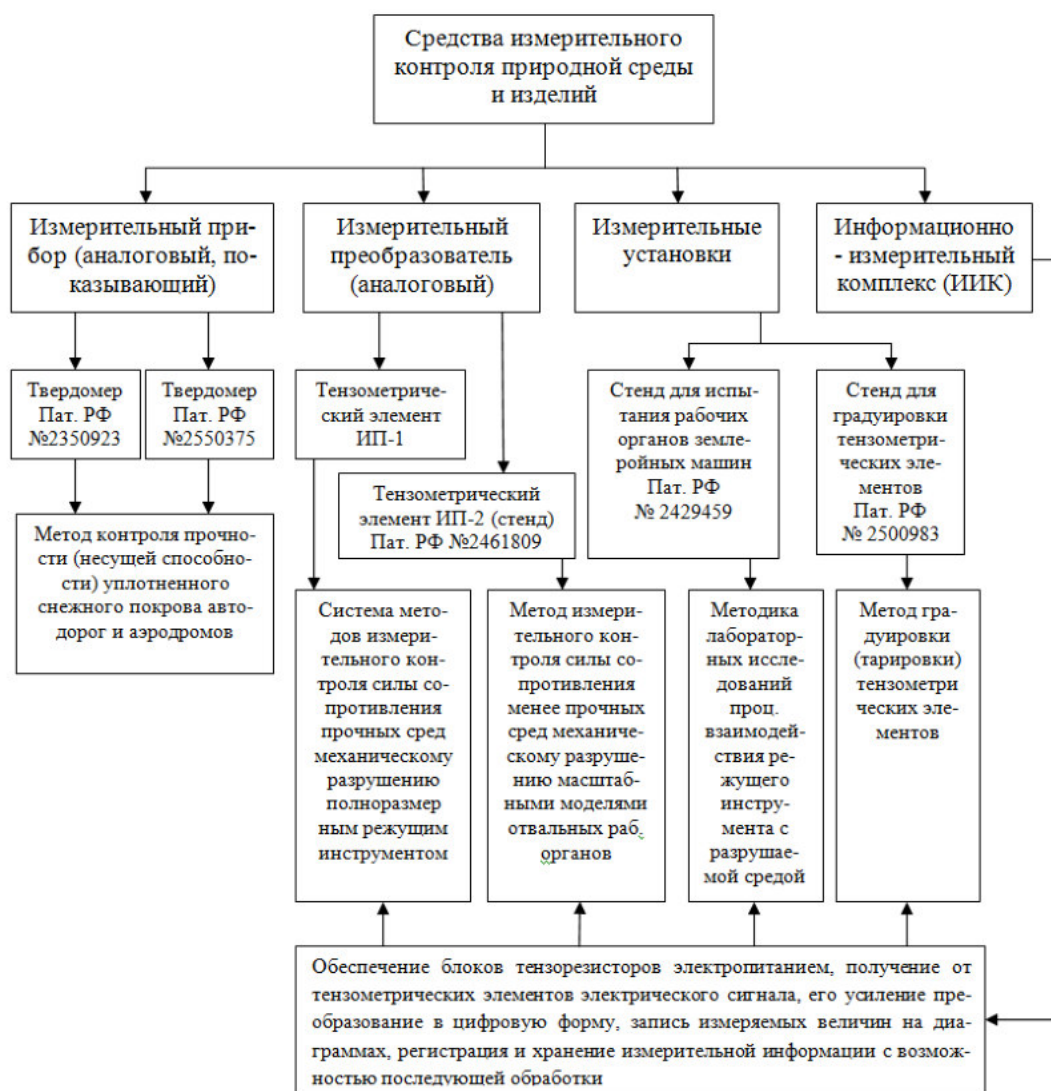


Рисунок 3.40. – Средства измерительного контроля, разработанные в рамках данной диссертации и методы контроля и методики, реализуемые с их использованием

Лаборатория создана по инициативе автора данной работы как новое структурное подразделение Института нефти и газа (ИНиГ) Сибирского федерального университета в составе кафедры Топливообеспечение и горючесмазочные материалы (ТОГСМ). Становление и развитие лаборатории осуществлялось при активной поддержке заведующего каф. ТОГСМ, д.т.н., профессора Ю.Н. Безбородова и директора ИНиГ д.т.н., профессора Н.Н. Довженко.

Состав оборудования лаборатории включает также вспомогательные средства измерения в соответствии с перечнем, приведенным в таблице 3.8.

Лаборатория в ее первой версии размещалась в неотапливаемом металлическом автомобильном гараже, установленном во дворе одного из учебных корпусов на заранее подготовленной забетонированной площадке.

Таблица 3.8. – Перечень вспомогательных средств измерения в составе оборудования лаборатории

№	Наименование вспомогательных средств измерения	Ссылочные документы
1	Линейки измерительные металлические	ГОСТ 427-75 [45]
2	Весы электронные ПВм – 3/32	Руководство по эксплуатации [46]
3	Термометр метеорологический стеклянный	ГОСТ 112-78 [14]
4	Плита поверочная	ГОСТ 10905-86 [120]
5	Рулетка измерительная металлическая	ГОСТ 7502-80 [173]
6	Динамометр пружинный указывающий ДПУ – 500	Инструкция по эксплуатации [163]
7	Измеритель твердости ультразвуковой УЗИТ – 3	Инструкция по эксплуатации [172]
8	Плотномер динамический (ударник ДорНИИ)	ГОСТ 23987-80 [39], ГОСТ 30067-93 [40]
9	Ударник – зонд СоюзДорНИИ	ВСН 137–89[8]
10	Мультиметр цифровой УТ – 33В/С/D с термопарой	Руководство по эксплуатации [174]

Подвод к лабораторному помещению силового электрического кабеля от щитовой, расположенной в учебном корпусе и подключение электрооборудования лаборатории к сети переменного тока напряжением 380 вольт были произведены в соответствии с эскизом, выполненным автором (рисунок 3.41).

*Электромонтажные работы выполнены сотрудниками Отдела главного энергетика ПИ СФУ под руководством В.Г. Лаука.*

*Работы зимнего содержания территории прилегающей к лабораторному помещению и транспортное обеспечение исследовательских работ в течение нескольких сезонов организовывал сотрудник Управления эксплуатационно-хозяйственного обеспечения СФУ А.Л. Богатырев.*

Экспериментальные лабораторные исследования процессов взаимодействия различного рабочего инструмента и масштабных моделей рабочих органов снегоочистительных машин с прочными СЛЮ и уплотненным снегом, в рамках нескольких диссертационных работ производились в данном лабораторном помещении только в зимний период.

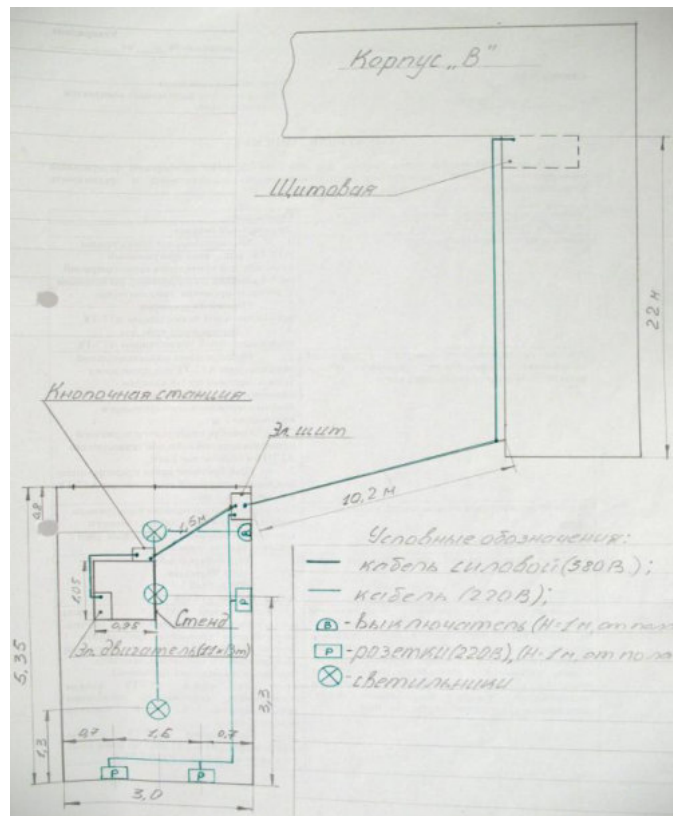


Рисунок 3.41. – Эскиз размещения потребителей электроэнергии в лабораторном помещении

Этим обеспечивались условия проведения экспериментов, максимально приближенные к реальным условиям эксплуатации снегоочистительного оборудования. Для поддержания чистоты каждой серии экспериментов, участниками творческих коллективов под руководством автора, на основании прогнозов погоды, публикуемых в официальных источниках, для производства исследовательских работ выбирались временные периоды (5-7 дней подряд) со стабильными значениями температуры и влажности воздуха.

При выполнении первой серии экспериментальных исследований в данном лабораторном помещении, в рамках работы [134] все компоненты ИИК, кроме тензометрического элемента, размещались в ближайшем к лаборатории помещении учебного корпуса в его цокольном этаже. Основное неудобство такого вынужденного решения заключалось в необходимости в начале каждого исследовательского рабочего дня прокладывать кабель, связывающий тензометрический элемент, установленный на лабораторном стенде с ИИК, от лабораторного помещения к соответствующему окну учебного корпуса. Приходилось каждый раз пропускать соединительный кабель через форточку этого окна и подключать его к клеммной колодке тензоусилителя. В конце каждого дня исследований производилось отключение кабеля от ИИК с последующим его перемещением в лабораторное помещение. Связь и координация действий оператора стенда и оператора ИИК осуществлялась посредством использования мобильной любительской радиостанции.

Позже, автором и аспирантом П.В. Ковалевичем, внутри лабораторного помещения была выстроена утепленная отапливаемая кабина, в которой размещался ИИК и рабочее место его оператора, чем были исключены описанные выше неудобства.

Знаковым событием в развитии лаборатории стало инициированное автором приобретение в 2015 году Институтом нефти и газа СФУ контейнера – рефрижератора *CARRIER* (40 футов) с целью использования его в качестве нового лабораторного помещения (рисунок 3.42).

Указанный контейнер – рефрижератор (КР) был установлен на территории гаража площадки №4 СФУ в непосредственной близости от электрической подстанции. Применительно к данному объекту, так же как и в случае с металлическим гаражом в ранней версии лаборатории, автором было разработано новое объемно-планировочное решение (ОПР)



лабораторного помещения и схема расположения в нем потребителей электрической энергии (рисунок 3.43).



Рисунок 3.42. – Новое лабораторное помещение – контейнер – рефрижератор *CARRIER*

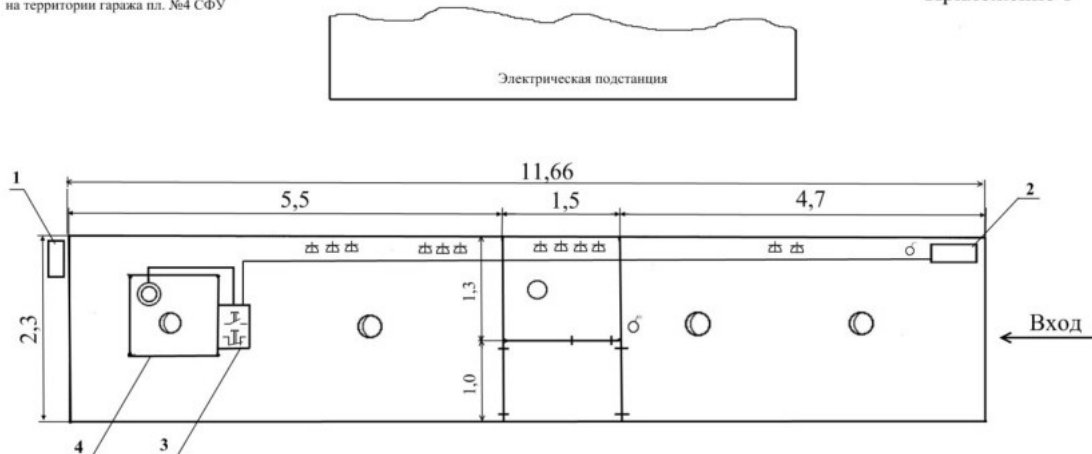
В соответствии с новым ОПР, все внутренне пространство КР разделено на три части. В центре КР (рисунок 3.43) размещается малое помещение длиной 1,5 м, ширина которого равна ширине КР. Данное помещение образовано двумя параллельными металлопластиковыми перегородками, расположенными перпендикулярно продольной оси КР.

Третья перегородка, соединяющая две первые и расположенная перпендикулярно им и параллельно продольной оси КР, делит это малое помещение на кабину оператора ИИК, размером 1,3×1,5 м, и проходной тамбур размером 1,0 × 1,5 м с двумя дверными проемами, закрываемыми глухими металлопластиковыми дверями. Кабина оператора также имеет

вход, закрываемый глухой дверью меньшего размера, чем двери проходного тамбура.

Контейнер - рефрижератор CARRIER  
на территории гаража пл. №4 СФУ

Приложение 1



1. Щит питания электрооборудования рефрижераторной установки (потребляемая мощность 8,5 кВт)
2. Щит питания лабораторного оборудования и внутреннего освещения (потребляемая мощность 12 кВт)
3. Кнопочная станция
4. Лабораторный стенд

Условные обозначения

- |                           |                               |
|---------------------------|-------------------------------|
| ⊙ - двигатель асинхронный | ⊖ - выключатель одноклавишный |
| ○ - светильник с ДРЛ      | ⊖ - выключатель двухклавишный |
| ○ - светильник потолочный |                               |
| ⌘ - розетка штепсельная   |                               |

Рисунок 3.43. – Объемно-планировочное решение нового лабораторного помещения и схема расположения в нем электрооборудования (копия Приложения к служебной записке о подключении к электрическим сетям)

Слева от данного малого помещения располагается морозильная камера, размерами  $2,3 \times 5,5$  м, справа, со стороны входа – помещение общего назначения, размерами  $2,3 \times 4,7$  м. В перегородке, отделяющей кабину оператора от морозильной камеры, выполнен витраж из толстого витринного стекла (рисунок 3.44). Вид лабораторного помещения со стороны входа представлен на (рисунок 3.45).

В морозильной камере КР установлен и жестко закреплен на полу модернизированный лабораторный стенд (рисунок 3.46), а в отапливаемой кабине оператора, на его рабочем месте, размещены основные элементы ИИК.



С вводом в эксплуатацию лаборатории в новом помещении, появилась возможность проведения экспериментальных исследований в различных температурных режимах, независимо от условий окружающей среды и даже времени года.



Рисунок 3.44. – Вид нового лабораторного помещения со стороны морозильной камеры



Рисунок 3.45. – Вид нового лабораторного помещения со стороны входа

Продолжительность работ с использованием лабораторных образцов разрушаемого материала природного происхождения, например ледяных блоков или блоков уплотненного снега, ограничивается только их

количеством, заготавливаемым зимой и помещаемым на хранение в работающую морозильную камеру лаборатории.

Приготовление искусственных лабораторных образцов разрушаемого материала, качественно эквивалентных природным средам, а также и проведение исследований с их использованием стало возможным круглогодично.



Рисунок 3.46. – Модернизированный лабораторный стенд, установленный в морозильной камере нового лабораторного помещения

Это позволяет реализовывать на базе лаборатории большие программы исследований различной тематики в широком диапазоне температур, в рамках диссертационных и выпускных квалификационных работ

обучающихся, разрабатывать новые лабораторные работы и практикумы для использования в учебном процессе СФУ.

Ввод в эксплуатацию учебно-научной лаборатории «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур» в ее современной версии, оснащение лаборатории средствами измерительного контроля и вспомогательными средствами измерений, разработка и апробация методов измерений и методик экспериментальных исследований в различных тематических направлениях, являются результатом более чем десятилетней работы автора с привлечением студентов, аспирантов, магистрантов СФУ, сотрудников хозяйственных и технических служб университета, а также и специалистов сторонних организаций.

В настоящее время автором разработано, оформлено, заверено соответствующим образом Положение об учебно-научной лаборатории «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур», утвержденное Ученым советом Сибирского федерального университета. Разработан и направлен руководству СФУ для согласования и утверждения проект Приказа о создании нового структурного подразделения Института нефти и газа (ИНиГ) Сибирского федерального университета в составе кафедры ТОГСМ. Акт внедрения лаборатории в учебный процесс представлен в Приложении Е.

### **3.7. Выводы по главе**

1. Для обоснования работоспособности и высокой эффективности снегоочистительного оборудования, оснащаемого дисковым режущим инструментом, необходимо установить и проанализировать зависимости силы сопротивления прочной твердой среды (например, прочных СЛЮ) резанию таким инструментом от ряда факторов:

- геометрических параметров режущего инструмента;
- углов установки режущего инструмента;
- скорости перемещения оси, несущей дисковый резец (скорости резания);
- физико-механических свойств разрушаемого материала, изменяющихся в основном с изменением температуры окружающей среды;
- радиуса закругления рабочей кромки дисковых резцов, изменяющегося по мере износа такого инструмента;
- скорости подачи рабочего органа на забой;
- параметров среза: шага и глубины резания и т.д.

2. Проведение теоретических и экспериментальных исследований, посвященных изучению влияния большинства из перечисленных факторов на силовые и энергетические показатели процесса механического разрушения прочных снежно-ледяных отложений дисковым режущим инструментом, стало возможным при использовании средств и методов измерительного контроля силы сопротивления прочных сред резанию различным рабочим инструментом, разработанных в рамках решения ряда задач данной работы.

3. Работоспособность этих средств и методов, удобство их использования и достаточно высокая точность измерений контролируемых параметров будут многократно подтверждены результатами нескольких серий экспериментальных лабораторных исследований процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с прочными снежно-ледяными отложениями, а также масштабных моделей отвальных рабочих органов с уплотненным снегом при механическом разрушении этих сред.

Данные экспериментальные лабораторные исследования производились творческими коллективами молодых ученых под руководством автора на базе учебно-научной лаборатории «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в

условиях низких температур» (см. раздел 3.6.) в рамках последовательного ряда исследовательских работ со следующими рабочими названиями тем:

- обоснование конструкции и основных параметров дискового режущего инструмента для разрушения снежно-ледяных образований [134];
- обоснование рациональных скоростных режимов работы дискового режущего инструмента при механическом разрушении прочных снежно-ледяных образований [166];
- оценка влияния температуры окружающей среды и разрушаемого материала на величину силы сопротивления резанию прочных СЛЮ дисковым инструментом;
- оценка степени влияния радиуса закругления рабочей (режущей) кромки дискового инструмента на силовые и энергетические показатели процесса разрушения льда таким инструментом;
- экспериментальные лабораторные исследования процессов взаимодействия снегоочистительного оборудования отвального типа с уплотненным снегом.

4. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований в указанных тематических направлениях представлены в Главе 4 данной диссертационной работы.

#### **ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С РАЗРУШАЕМОЙ СРЕДОЙ ПОСРЕДСТВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕДЛАГАЕМЫХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ**

Основные результаты анализа литературно-патентных источников, выполнявшегося автором с целью оценки современного уровня конструкций рабочих органов дорожных машин, анализа исследований по разрушению различных материалов дисковым режущим инструментом [134], свидетельствуют о высокой эффективности использования такого инструмента в проходческих комбайнах при разработке горных пород [89 – 92], в рабочих органах буровых, землеройных машин и на бульдозерных рыхлительных агрегатах при разработке мерзлых и немерзлых прочных грунтов [85 – 88], а также в качестве рабочего инструмента сельхозорудий [103, 105, 106].

Однако, рекомендации по применению такого инструмента, предложенные в изученных работах, не могут быть использованы в устройствах для разработки прочных СЛО без проведения дополнительных исследований, так как физико-механические свойства горных пород, мерзлых грунтов и почв существенно отличаются от физико-механических свойств снежно-ледяных отложений на дорожных и аэродромных покрытиях.

В известных конструкциях устройств, предназначенных для разрушения прочных СЛО с использованием дисковых резцов различной геометрической формы и различными схемами их размещения на рабочих органах, геометрические и технологические параметры инструмента выбирались эмпирически [175 – 180]. Обоснованных теоретических и экспериментальных данных по выбору этих параметров применительно к прочным СЛО нет, что свидетельствует о недостаточной изученности данного вопроса, как в теоретическом, так и в экспериментальном плане.

Следовательно, проведение экспериментальных лабораторных исследований процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемой средой посредством использования предлагаемых в данной работе средств и методов измерительного контроля, с последующей обработкой и анализом результатов, является актуальной задачей на пути к достижению цели данной диссертационной работы.

#### 4.1. Определение необходимого числа опытов

Для определения необходимого числа повторных опытов (опытов – близнецов), выполняемых в неизменных условиях, при реализации которого функциональные зависимости выявлялись бы наиболее полно с учетом случайных ошибок опытов, автором использована Методика определения необходимого числа опытов, предложенная А.Н. Зелениным [31, 116].

Данная Методика апробирована А.Н. Зелениным в ходе выполнения огромного объема экспериментальных исследований процессов взаимодействия различного рабочего оборудования землеройных машин с немерзлыми и мерзлыми грунтами, как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Основные положения данной методики следующие.

Рассеяние результатов измерений указывает на бó льшую или меньшую их изменчивость и обычно оценивается средним квадратическим отклонением наблюдаемых значений  $x_i$  от их средних арифметических  $\bar{x}$  или квадратным корнем из него. Первая из этих величин называется дисперсией и определяется из выражения

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}, \quad (4.1)$$

где  $n$  – число измерений в группе однотипных опытов.

Величина  $\sigma$  – называется стандартом измерений (средней квадратической ошибкой) и определяется формулой

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \sigma_i^2}{N - n}}, \quad (4.2)$$

где  $\sigma_i^2$  – дисперсия отдельных групп опытов;

$N$  – общее число опытов;

$n$  – число групп опытов.

Стандарт имеет размерность величины, для которой он вычислен. Абсолютное его значение зависит и от совершенства измерительных приборов. Кроме стандарта, количество опытов зависит от заданной надежности результата  $H$ , т.е. от вероятности получения тех же результатов при новых измерениях в аналогичных условиях. В условиях исследования рабочего оборудования строительных и дорожных машин величину надежности следует выбирать в пределах  $H = 0,8 \div 0,95$ .

Для того чтобы найти необходимое число опытов, исходя из распределения Стьюдента (Госсета), нужно задаться и надежностью  $H$ , и ошибкой  $\Delta$ , взятой в долях стандарта. Для вычисления  $\Delta$  следует задаться средней арифметической ошибкой (требуемой степенью точности результата  $v_{\text{доп}}$ , %) и произвести вычисление по формуле

$$\Delta = \frac{\bar{X}}{\sigma} v_{\text{доп}} = \frac{v_{\text{доп}}}{v_{\text{вар}}}, \quad (4.3)$$

где коэффициент вариации

$$v_{\text{вар}} = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\%, \quad (4.4)$$



Затем, исходя из данных таблицы 4.1, назначить число опытов, необходимое для соблюдения заданной надежности  $H$ .

Таблица 4.1. – Данные для определения необходимого числа опытов

Расчетное значение $\Delta = v_{\text{доп}}/v_{\text{вар}}$	Необходимое число опытов
2,000	1
1,386	2
1,132	3
0,980	4
0,876	5
0,800	6
0,741	7
0,693	8
0,653	9
0,620	10

Для установления необходимого числа опытов в преддверии экспериментальных лабораторных исследований в рамках данной диссертационной работы были проведены предварительно 20 опытов при неизменных параметрах режима резания. Полученные значения горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию  $P_r$  при разрушении массива льда дисковым резцом с углом заострения  $30^\circ$ , с глубиной резания 60 мм и шириной резания 40 мм сведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. – Результаты предварительных опытов

Номер опыта	$P_r$ , кН	Номер опыта	$P_r$ , кН
1	0,54	11	0,66
2	0,57	12	0,64
3	0,63	13	0,59
4	0,67	14	0,57
5	0,66	15	0,54
6	0,47	16	0,51
7	0,55	17	0,62
8	0,72	18	0,55
9	0,74	19	0,71
10	0,68	20	0,64

На основании данных табл. 4.2, в табличном процессоре *Microsoft Excel* были вычислены следующие величины:

- среднее арифметическое ряда измерений  $\bar{x} = 0,613$ ;
- среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 0,0723$ ;
- коэффициент вариации  $v_{\text{вар}} = 17,096$ .

При заданной надежности экспериментальных результатов, равной  $H = 0,95$  в соответствии с рекомендациями А.Н. Зеленина и значением средней арифметической ошибки  $v_{\text{доп}} = 15 \%$ , подставляя значения  $v_{\text{вар}}$  и  $v_{\text{доп}}$  в выражение (4.3), получаем  $\Delta = 0,877$ . По табл. 4.1 находим ближайшее к расчетному, значение  $\Delta = 0,876$ . Этому значению соответствует количество опытов – пять.

#### **4.2. Обоснование конструкции и основных геометрических параметров дискового режущего инструмента для разрушения прочных снежно-ледяных отложений**

Целью экспериментальных лабораторных исследований, выполненных автором в рамках темы текущего раздела являлось определение рациональных геометрических параметров дискового режущего инструмента и оценка влияния этих параметров, а также физико-механических свойств разрабатываемой среды и параметров среза на силовые показатели процесса механического разрушения прочных СЛЮ дисковым режущим инструментом.

При этом результатами таких исследований должна быть обоснована работоспособность средств измерительного контроля, предложенных в данной работе, апробированы методы и методики их практического использования.

#### **4.2.1. Испытания модернизированного лабораторного стенда и измерительного преобразователя ИП-1 на парафиновой пробе**

Как и в случае с новым измерительным прибором – твердомером (рисунки 2.9, 2.10) сборка модернизированного лабораторного стенда (рисунки 3.4, 3.46) была завершена в теплое время года. Данный стенд, как упоминалось в разделе 3.6, стал основой материально – технической базы учебно-научной лаборатории «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур» еще в ее первой версии, т.е. был размещен в неотапливаемом металлическом автомобильном гараже. Проведение серии лабораторных экспериментальных исследований в соответствии с указанной тематикой было возможно только в зимний период в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации снегоочистительного оборудования.

Поэтому, во избежание непроизводительных потерь времени зимой на определительные и доводочные испытания лабораторного стенда, отработку методики лабораторных экспериментальных исследований с его использованием в соответствии с подразделом 3.2.1, эти мероприятия были выполнены летом на так называемой, парафиновой пробе, т.е. с использованием в качестве испытуемой среды – технического парафина марки Т-2 [47]. Основные физико-химические показатели парафина Т-2 представлены в таблице 2.8.

Изготовление опытного образца разрушаемого материала производилось в специально предназначенной для этого металлической разборной форме (рисунки 3.6, 3.7), в которую предварительно укладывался полиэтиленовый пакет, препятствовавший вытеканию жидкого парафина через зазоры в стыках стенок и днища формы. Плиты парафина в состоянии поставки (таблица 2.8) разламывались на фрагменты меньшей величины,

которые помещались в металлический сосуд, установленный на включенной электрической плите. Полностью расплавленный парафин в жидком виде заливался в форму, после чего незамедлительно приготавливалась следующая порция парафина, заливавшаяся в форму с еще не застывшей предыдущей порцией (порциями). Операции повторялись до окончательного заполнения жидким парафином всего внутреннего объема формы. После выдержки в течение нескольких суток, до полного застывания парафина, съемные стенки разборной формы были демонтированы, а готовый опытный образец разрушаемой среды был установлен на несущей плите МППО лабораторного стенда (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1. – Лабораторный образец разрушаемой среды, изготовленный из парафина Т - 2

На двух параллельных цилиндрических направляющих лабораторного стенда был закреплен измерительный преобразователь ИП-1 (см. раздел 3.3.1). Для установки на этот тензометрический элемент полноразмерного

дискового режущего инструмента использовались стальные кронштейны двух видов: Г – образный (рис. 3.16) и П – образный (рисунок 3.17).

Выбор режущего инструмента обоснован в разделе 3.1. Это заостренный дисковый резец типа А в форме усеченного конуса (рисунки 3.1а, 3.2). Такая форма инструмента допускает расположение его в пространстве под различными углами по отношению к поверхности разрабатываемого массива, что исключает возможность трения большего основания конуса об массив, позволяет установить рациональный угол резания и обеспечить многообразие схем размещения дисковых резцов на разрабатываемых рабочих органах дорожных машин.

Первая партия опытных образцов полноразмерного дискового режущего инструмента, была изготовлена в Производственно-экспериментальном центре ОАО «Красноярский ПромстройНИИпроект» по чертежам, выполненным автором (рисунок 4.2).

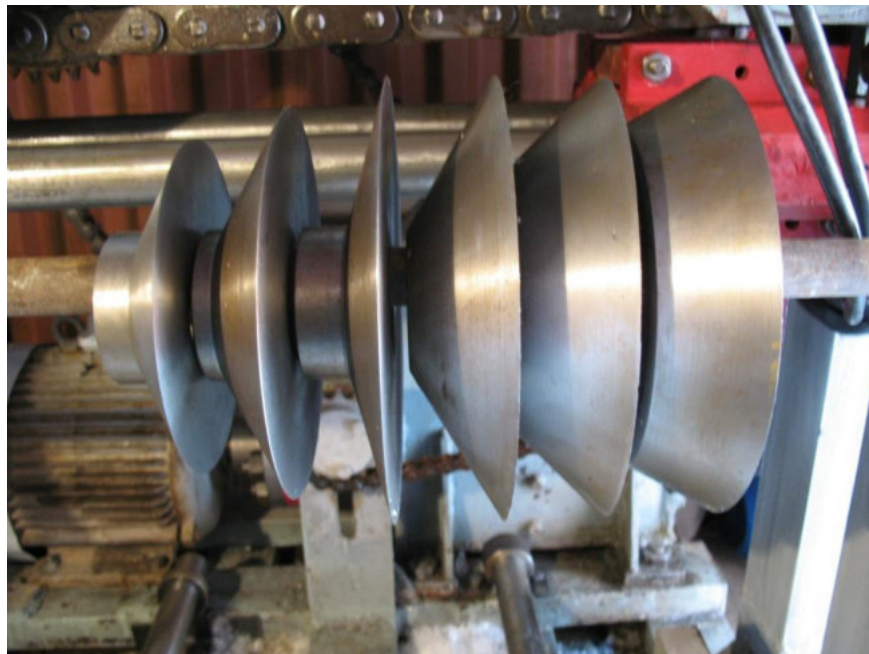


Рисунок 4.2. – Дисковые резцы различных диаметров и с различными углами заострения, использовавшиеся при проведении экспериментов

Материал инструмента – сталь 40ХН ГОСТ 4543-71 [187]. Твердость материала, измеренная твердомером УЗИТ – 3 [172] (рисунок 4.3) составила в среднем *HRC* 53.



Рисунок 4.3. – Измерение твердости материала дисковых резцов твердомером УЗИТ - 3

В преддверии лабораторных испытаний на парафиновой пробе, было осуществлено подключение тензометрического элемента к информационно-измерительному комплексу (см. раздел 3.5). Температура материала опытного образца разрушаемой среды, измеренная мультиметром с термопарой, погруженной в шпур, непосредственно перед началом испытаний составила 15 °С.

Дальнейшие действия коллектива испытателей были организованы в соответствии с Методикой лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой, описанной в подразделе 3.2.1 и Методом «А» системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП – 1, (см. подраздел 3.3.2, рисунок 3.23).

Первые пробные опыты по резанию парафинового блока проводились с использованием Г – образного кронштейна и консольно закрепленного на нем дискового резца диаметром  $D = 150$  мм и углом заострения  $\delta = 30^\circ$  (рисунок 4.4). Значение заднего угла  $\gamma \approx 5^\circ$ .



Рисунок 4.4. – Тензометрический элемент ИП – 1 в сборе с Г – образным кронштейном и дисковым резцом, установленный на лабораторном стенде накануне первого пробного опыта

Предполагалось, что такая компоновка режущего узла будет обеспечивать разрушение вертикальной стенки парафинового блока по всей ширине рабочей зоны дискового резца. Результаты разрушения части опытного образца при описанных выше условиях представлены на (рисунке 4.5).

Процесс взаимодействия дискового резца с разрушаемой средой сопровождается возникновением в месте контакта режущей кромки с этой средой, напряжений. По мере нарастания напряжений, в материале формируются зоны уплотнения серповидной формы (поз. 1 – 5 рисунок 4.5). При достижении напряжениями предельных значений происходит растрескивание материала, скол и отделение от массива фрагментов разрушения различной величины, что сопровождается спадом напряжений.





Рисунок 4.5. – Результаты разрушения вертикальной стенки парафинового блока дисковым резцом, установленном на Г – образном кронштейне: 1 – 5 – зоны уплотнения разрушаемого материала

Количество зон уплотнения материала соответствует количеству циклов нарастания напряжений до значений, превышающих предел его прочности и последующих спадов этих напряжений.

В рассматриваемом случае (рисунок 4.5) спад напряжений после пятого цикла их нарастания был обусловлен сколом и отделением от массива образца крупного углового фрагмента материала (рисунок 4.6). Причины такого характера разрушения следующие.



Рисунок 4.6. – Часть фрагмента разрушения лабораторного образца со следами воздействия режущего инструмента и сопрягаемых с ним элементов



При анализе фрагментов разрушения, в том числе и показанного на рисунке 4.6 выяснилось, что в процессе разрушения парафинового блока участвует не только режущая кромка дискового резца, но и его боковая конусная поверхность, и цилиндрическая шейка у малого основания конуса, и опора, несущая дисковый инструмент на Г – образном кронштейне. То есть реализуется не процесс резания, как таковой, а по сути, процесс ударного разрушения разрабатываемого материала инструментом сложной геометрической формы, что никоим образом не согласуется ни с основной идеей данной диссертационной работы, ни с ее целью, ни с ее задачами.

Кроме того, такой характер взаимодействия режущего узла и разрушаемой среды делает невозможным измерение составляющих силы сопротивления этой среды резанию дисковым инструментом в силу неустранимого влияния на величину деформации упругого элемента преобразователя ИП – 1 а, следовательно, и на результаты измерений, перечисленных выше конструктивных элементов режущего узла за исключением режущей кромки инструмента. Степень такого влияния тем больше, чем больше задаваемая оператором станда толщина срезаемой стружки.

В силу указанных причин идея использования в работе такой компоновки режущего узла и организации процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемой средой (рисунок 4.4) была признана несостоятельной.

*Все дальнейшие лабораторные экспериментальные исследования процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемыми твердыми прочными средами производились с использованием режущего узла в составе измерительного преобразователя ИП – 1 в сборе с П – образным кронштейном и дисковым режущим инструментом в соответствии с (рисунки 3.8, 3.19), а процесс взаимодействия такого инструмента с разрушаемой средой реализовывался*

в соответствии со схемой работы дисковой тангенциальной шарошки (рисунок 3.2).

Пробные опыты на парафиновой пробе, выполненные при соблюдении данных условий дали положительные результаты. Резание парафинового блока осуществлялось дисковыми резцами диаметром  $D = 200$  мм с различными углами заострения  $\delta$  (15, 30, 45 и 60°) и различным шагом резания  $t$  (10, 20, 30 и 40 мм). Скорость резания составляла 0,51 м/с (1,84 км/ч), глубина резания  $h = 60$  мм.

Каждое опытное наблюдение (рез) сопровождалось растрескиванием материала, сколом и отделением от массива фрагментов разрушения различной величины, которые под воздействием боковой конусной поверхности режущего диска вытеснялись из забоя (рисунок 4.7).

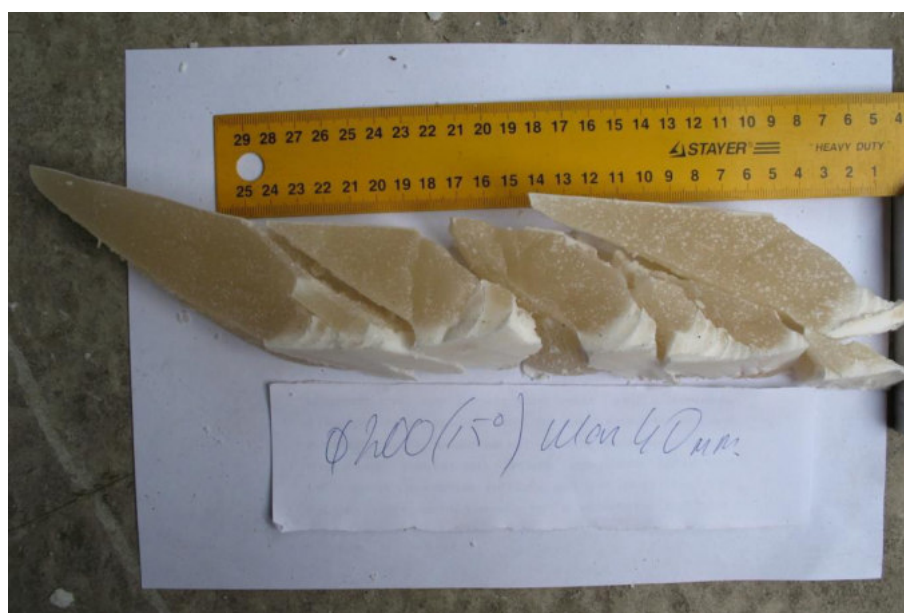


Рисунок 4.7. – Фрагменты разрушения парафинового блока при резании дисковым резцом диаметром 200 мм, углом заострения 15° с шагом резания 40 мм

При этом информационно – измерительным комплексом (см. раздел 3.5) обеспечивалась подача электрического питания к блокам тензорезисторов, размещенным на измерительном преобразователе ИП – 1,

получение от этого преобразователя устойчивых стабильных, достаточно мощных электрических сигналов, их первичная обработка, усиление, преобразование в цифровую форму, запись измеряемых величин на диаграммах, регистрация, хранение полученных результатов с возможностью их дальнейшей обработки.

Пример записи диаграмм составляющих силы сопротивления резанию в интерфейсе программного продукта *Power Graph* при резании лабораторного парафинового образца дисковым резцом диаметром  $D = 200$  мм, углом заострения  $\delta = 60^\circ$  с шагом резания  $t = 40$  мм представлен на рисунке 4.8.

Практически полностью разрушенный в результате многократного последовательного резания дисковым резцом с разным шагом резания лабораторный парафиновый образец показан на рисунке 4.9.

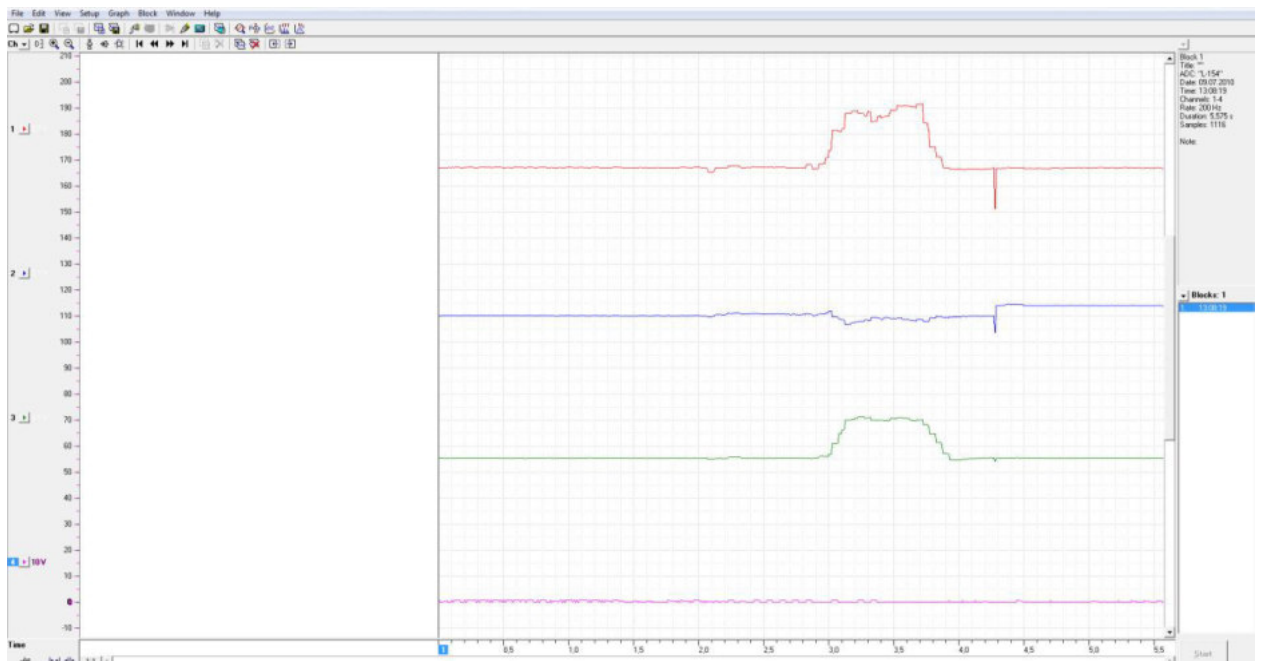


Рисунок 4.8. – Фрагмент записи диаграмм в интерфейсе программного продукта *Power Graph* на мониторе персонального компьютера: 1 – диаграмма горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию; 2 – диаграмма боковой составляющей силы сопротивления резанию; 3 – диаграмма вертикальной составляющей силы сопротивления резанию; 4 – диаграмма запасного измерительного канала

Здесь отчетливо просматриваются горизонтальная поверхность разрушения, имеющая сложный рельеф и борозды, оставленные рабочей кромкой инструмента, а также ровная вертикальная плоскость резания (стенка уступа) неразрушенной части лабораторного образца.



Рисунок 4.9. – Лабораторный парафиновый образец по окончании серии определительных испытаний модернизированного лабораторного стенда

Таким образом, использование технического парафина в качестве аналога (заменителя) разрушаемой среды позволило в летний период года провести определительные и доводочные испытания измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда (рисунок 3.4) и измерительного преобразователя ИП – 1 (рисунок 3.11). С учетом результатов этих испытаний были внесены коррективы в Методику лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой (см. подраздел 3.2.1) и в каждый из системы методов («А», «В», «С» и «D») измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом (см. подраздел 3.3.2). Также была

подтверждена работоспособность информационно – измерительного комплекса, произведена полная подготовка оборудования к зимнему этапу экспериментальных лабораторных исследований процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемой средой.

#### **4.2.2. Экспериментальные лабораторные исследования процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с прочными снежно-ледяными отложениями при поиске рациональных геометрических параметров инструмента**

Работы первого зимнего этапа экспериментальных лабораторных исследований в соответствии с темой раздела 4.2, также как и испытания средств измерительного контроля на парафиновой пробе проводились на базе учебно-научной лаборатории «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур» размещавшейся в неотапливаемом металлическом автомобильном гараже при следующих условиях.

Разрушаемый материал – блоки, изготовленные из природного пресноводного льда (рисунок 4.10), содержащие в поверхностных слоях структуру № 9 (рисунок 1.3). Размеры ледяных блоков, подготовленных к установке на МППО лабораторного стенда, приведены в таблице 3.3.

Режущий инструмент – заостренный дисковый резец типа А в форме усеченного конуса (рисунки 3.1а, 3.2, 4.2). Диаметр дискового резца  $D = 200$  мм. Это меньшее из диапазона рекомендуемых в работах [91, 92] рациональных значений диаметров резцов (200 – 260 мм). При таком диаметре исключается громоздкость конструкции и необходимость установки массивных опор, несущих дисковые резцы на исполнительном органе, и обеспечивается необходимая глубина резания. Кроме того, в работах [89, 91] отмечается, что диаметр дискового резца существенного влияния на величину силы сопротивления резанию не оказывает.





Рисунок 4.10. – Блоки пресноводного льда на этапе их заготовки на берегу водоема

Величина угла заострения дисковых резцов  $\delta$  выбиралась с учетом рекомендованного в работах [91, 92, 85] диапазона рациональных значений:  $45 - 60^\circ$ . Используются дисковые резцы с углами заострения  $15, 30, 45$  и  $60^\circ$ , из числа представленных на рисунке 4.2. Материал инструмента, как упоминалось выше, сталь 40ХН ГОСТ 4543-71 без термообработки, с твердостью по шкале Роквелла *HRC* 53.

Резание осуществлялось на глубину  $h = 60$  мм. При выборе данного значения учитывались следующие обстоятельства. В качестве одной из базовых машин, несущей рабочие органы (в том числе и отвальные), оснащенные дисковыми резцами, предполагается использовать автогрейдеры различных типов.

Современные автогрейдеры оборудуются автоматическими системами управления основным отвалом, предназначенными для автоматического обеспечения заданного углового положения отвала автогрейдера в поперечной плоскости независимо от поперечного профиля полотна. Нормативными и производственными документами, регламентирующими правила эксплуатации и порядок работы автогрейдеров, оснащенных системами автоматизации, установлено ограничение максимальной толщины снимаемой стружки, которое составляет 70 мм [75]. Кроме того, при

стендовых испытаниях, с погружением дискового резца диаметром  $D = 200$  мм на глубину более 60 мм, в разрушаемый массив врезаются торцы стоек П – образного кронштейна, несущего дисковый резец на валу, что приводит к увеличению значений составляющих силы сопротивления резанию и создает погрешности измерений значений этих составляющих.

Шаг резания  $t$  (толщина срезаемой стружки) составил 10, 20, 30 и 40 мм. При этом соблюдалось условие  $t \leq h$ , так как предполагается, что резцами, размещаемыми на рабочих органах, будет обеспечиваться разрушение льда по полублокированной схеме, требующей меньших затрат энергии. В случае же когда шаг резания превышает его глубину, имеет место более энергоемкая блокированная схема резания.

Величина заднего угла  $\gamma$  (угла атаки), образуемого большей торцевой поверхностью дискового резца с плоскостью резания, принималась в диапазоне значений  $3 \div 5^\circ$ . В этом случае обеспечивается достаточно широкая рабочая зона резца и уменьшается площадь трения нижней торцевой поверхности резца о забой.

Испытания проводились при температуре окружающего воздуха от минус 2 до минус 6 °С, при которой наиболее вероятно льдообразование на дорожных и аэродромных покрытиях. Для производства исследовательских работ временные периоды (5 – 7 дней подряд) со стабильными значениями температуры и влажности воздуха выбирались на основании прогнозов погоды, публикуемых в официальных информационных источниках.

Измерение температуры воздуха производилось ртутным термометром ТЛ – 4 №1 (ГОСТ 27544 – 87) [188] с ценой деления 0,1 °С и пределом измерения от минус 30 °С до 20 °С.

Скорость резания (скорость перемещения тензометрического элемента, несущего резец на оси П – образного кронштейна) при испытаниях составила 0,51 м/с (1,84 км/ч). В рамках данного этапа работы это условие можно считать достаточным по следующим причинам. По данным работы [92], при

разрушении горных пород с коэффициентом крепости  $f = 6,1$  дисковой тангенциальной шарошкой изменение скорости резания от 0,05 до 1,00 м/с практически не влияет на значения составляющих силы сопротивления резанию. Следует отметить, что указанному значению коэффициента крепости соответствует значение предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж} = 610 \text{ кг/см}^2 = 59,8 \text{ МПа}$ , в то время как у льда максимальные значения  $\sigma_{сж} = 3,4 - 3,6 \text{ МПа}$  ( $f \approx 0,4$ ). Также, по данным работы [86], при исследовании влияния скорости на усилия резания мерзлых грунтов зубьями землеройных машин установлено, что изменение скорости резания от 0,5 до 1,5 м/с (1,8 – 5,4 км/ч) не влечет существенного увеличения значений составляющих силы сопротивления резанию. В реальных условиях такие скорости резания могут быть обеспечены автогрейдерами при движении на 1-й и 2-й передачах.

Температура внутри массива каждого ледового образца измерялась при помощи термопары, вмороженной в шпур. Термопара подключалась к цифровому мультиметру *UT – 33B/C/D* [174], с монитора, которого и считывались значения температуры (рисунок 4.11).

Один ледяной блок из серии блоков, подготовленных к экспериментам подвергался испытаниям на прочность при помощи твердомера (рисунок 2.10) в соответствии с методом контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог (см. Раздел 2.3).



Рисунок 4.11. –Измерение температуры внутри массива ледяного блока цифровым мультиметром с термопарой



Значения прочности льда, получаемые при помощи твердомера, будут использованы при расчете значений составляющих силы сопротивления льда резанию дисковым инструментом в соответствии с Методикой расчета усилий резания льда дисковым режущим инструментом (см. Главу 5, Приложение Д).

Значения температуры воздуха, температуры внутри массива ледового образца и значения глубины погружения конического наконечника твердомера в тело ледяного блока заносились в протокол испытаний.

Все действия коллектива испытателей были организованы в соответствии с Методикой лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой (см. подраздел 3.2.1) в рамках реализации Метода «А» системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП – 1, (см. Подраздел 3.3.2, рисунок 3.23) при предварительной тарировке тензометрического элемента ИП-1 в соответствии с Методом градуировки тензометрических элементов (см. подраздел 3.4.1).

#### **4.2.3. Обработка и анализ результатов первого этапа экспериментальных исследований**

Обработка сигналов, генерируемых блоками тензорезисторов измерительного преобразователя ИП – 1, осуществлялась с применением программного обеспечения *Power Graph*, предназначенного для записи, регистрации, визуализации, обработки и хранения аналоговых сигналов, записываемых с помощью аналого-цифровых преобразователей.

Ординаты записи, соответствующие величинам составляющих силы сопротивления резанию, при помощи инструментов программы *Power Graph* копировались в табличный процессор *Microsoft Excel*.

Полученные числовые массивы данных умножались на соответствующие тарировочные коэффициенты, в результате чего вычислены числовые значения величин составляющих силы сопротивления резанию (кН). Также определены средние значения каждой составляющей для каждого из произведенных наблюдений.

Достоверность результатов измерений составляющих силы сопротивления резанию оценивалась по сопоставимости результатов пятикратного испытания каждого из четырех дисковых резцов с различными углами заострения режущей кромки и различным шагом резания. Определены средние значения каждой составляющей силы сопротивления резанию, средняя квадратическая ошибка (стандарт измерений) результатов каждого измерения, абсолютная и относительная погрешности, доверительный интервал, коэффициент корреляции [121, 189–191].

Среднее значение  $\bar{x}$  каждой составляющей силы сопротивления резанию определяется как среднее арифметическое полученных результатов каждого из произведенных наблюдений по формуле (2.19).

Точность результатов каждого измерения при пяти наблюдениях характеризуется средней квадратической ошибкой  $S_n$  (стандартом измерений), которая определяется по формуле (2.20).

Абсолютная погрешность измерений  $\Delta x_i$  определяется как разность между средним арифметическим значением каждого из показателей и значением, полученным при отдельном наблюдении по формуле (2.21) [189].

Относительная погрешность измерений  $\varepsilon$  определяется по формуле 2.23.

Для характеристики величины случайной ошибки измерений необходимо знать доверительный интервал и величину доверительной вероятности, которая позволяет оценить степень надежности полученного

результата. При измерениях можно ограничиться доверительной вероятностью  $\alpha = 0,95$ , которой соответствует доверительный интервал, выраженный в долях стандарта  $\omega = 2,0$  [121]. Так, для измерений показателей каждого наблюдения при соответствующем шаге резания, доверительный интервал  $\Delta\tau_x$  определится по формуле (2.24).

Результаты вычислений для горизонтальной  $P_r$  составляющей силы сопротивления резанию при испытании дискового резца с углом заострения  $15^\circ$  сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3. – Данные статистической обработки и регрессионного анализа результатов испытаний по резанию льда дисковым резцом с углом заострения  $15^\circ$

Показатель	Значения горизонтальной составляющей $P_r$ силы сопротивления резанию, кН			
	10	20	30	40
Шаг резания, мм	10	20	30	40
Опыт 1	0,224	0,40	0,589	0,535
Опыт 2	0,19	0,39	0,56	0,48
Опыт 3	0,182	0,379	0,57	0,494
Опыт 4	0,233	0,452	0,603	0,57
Опыт 5	0,243	0,464	0,613	0,577
Среднее значение $P_r, \bar{x}$	0,2144	0,4178	0,587	0,5312
Средняя квадратическая погрешность $S_n$	0,048	0,039	0,022	0,045
Средняя относительная погрешность $\varepsilon, \%$	9,8	7,9	3	6,7
Доверительный интервал $\Delta\tau_x$	$\pm 0,01$	$\pm 0,08$	$\pm 0,04$	$\pm 0,09$
Уравнение регрессии	$P_r = -(3,18 \cdot 10^{-5})t^3 + 0,001737t^2 - 0,00951t + 0,1676$			
Коэффициент корреляции	1,0			

Аналогично обработаны полученные экспериментально значения  $P_r$  при испытании дисковых резцов с углами заострения  $30, 45$  и  $60^\circ$ , а также значения боковой  $P_b$  и вертикальной  $P_v$  составляющих силы сопротивления резанию для дисковых резцов во всём рассматриваемом диапазоне углов заострения  $\delta$  их режущих кромок.

Результаты вычислений свидетельствуют о том, что в доверительные интервалы укладываются 95 % результатов всех измерений. Значения средней относительной погрешности каждого измерения не превышают 15 %.

На основании статистически обработанных результатов всех испытаний, предусмотренных программой эксперимента, построены графики зависимости горизонтальной  $P_g$ , боковой  $P_b$  и вертикальной  $P_v$  составляющих силы сопротивления резанию от угла заострения дискового резца во всем рассматриваемом диапазоне шага резания: 10, 20, 30 и 40 мм (рисунки 4.17 – 4.19), графики зависимости каждой из составляющих силы сопротивления резанию от шага резания при разрушении льда дисковыми резцами с углами заострения 15, 30, 45 и 60° (рисунки 4.20 – 4.22), произведен расчет удельной энергоемкости процесса резания ледяного массива дисковыми резцами с углами заострения 15, 30, 45 и 60° при шаге резания 10, 20, 30 и 40 мм и построены графики зависимости энергоемкости процесса резания от угла заострения дискового резца (рисунок 4.23).

Характер разрушения льда при резании дисковым резцом определяется не только изменением геометрических параметров резца и параметров среза, но и совокупностью ряда прочих факторов: это особенности физико-механических свойств льда (их многообразие и нестабильность во времени и по объему массива), его кристаллографическая форма, ориентация направления прилагаемой разрушающей нагрузки относительно преобладающего направления осей кристаллов, составляющих разрушаемый ледяной массив.

Дисковый резец, перекатываясь вдоль образца льда, в месте контакта с ним создает напряжения. Когда эти напряжения превышают предельно допустимую величину, происходит разрушение. Периодичность сколов обуславливается периодичностью действия сил сопротивления льда резанию, т. е. периодичностью образования ядер уплотнения разрушаемого материала на линии его контакта с режущей кромкой резца. Ядра уплотнения являются

концентраторами напряжений, силовые линии которых направлены от центра ядра к его периферии и распределяются по обе стороны от плоскости разрушения. При этом часть силовых линий, воздействующая на массив срезаемого уступа, при достижении напряжениями предельных значений вызывает растрескивание материала образца и его скол. После очередного скола происходит отделение ряда элементов различной величины, которые под воздействием боковой конусной поверхности дискового резца вытесняются из забоя.

Одновременно другая часть силовых линий, распределенная в материале неразрушенной части массива, вызывает растрескивание материала, сопровождающееся образованием множественных трещин сложной формы и сложным характером их распределения по объему материала образца. Распространение трещин в вертикальном направлении хорошо просматривается на плоскости разрушения (рисунок 4.12).

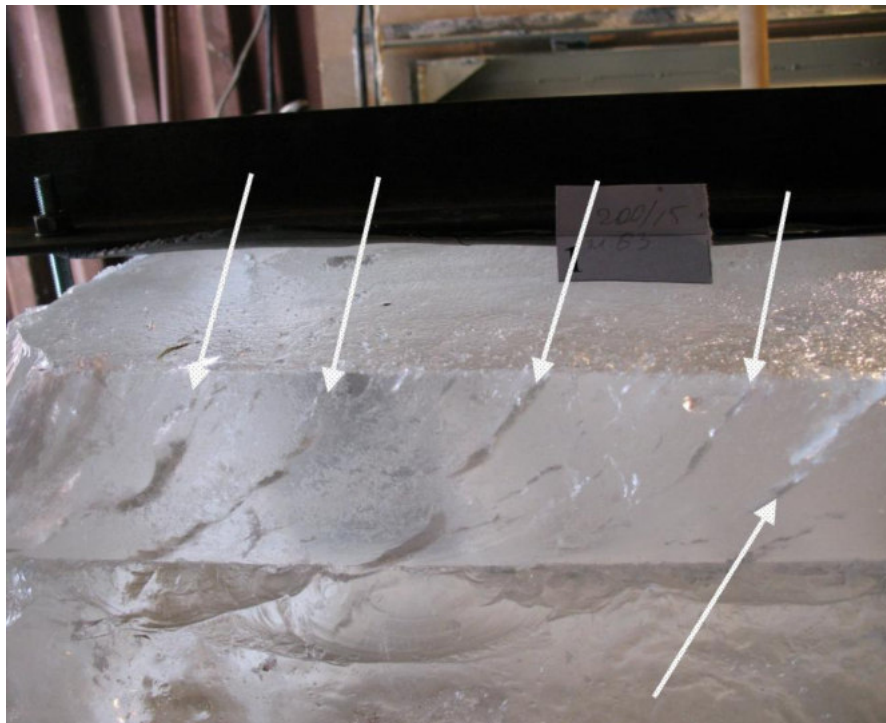


Рисунок 4.12. – Распространение вертикальных трещин в плоскости разрушения образца льда при резании резцом с углом  $\delta = 15^\circ$  и шагом  $t = 10$  мм

Трещины имеют серповидную форму, что объясняется характером траектории движения каждой точки режущей кромки дискового резца (циклоида), перекатывающегося вдоль массива образца льда при его разрушении. Количество трещин с увеличением шага резания существенно возрастает (рисунок 4.13).

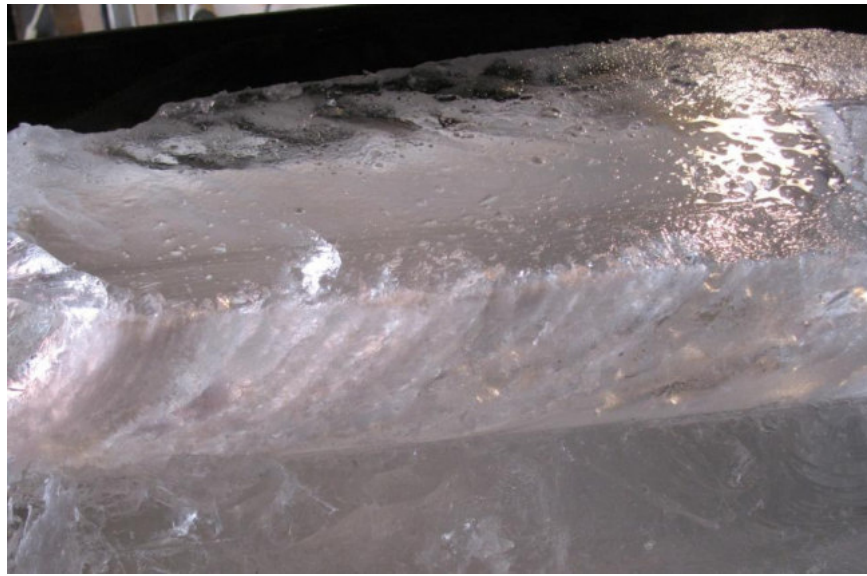


Рисунок 4.13. – Распространение вертикальных трещин в плоскости разрушения образца льда при резании резцом с углом  $\delta = 15^\circ$  и шагом  $t = 30$  мм

Кроме того, растрескивание происходит и вглубь неразрушенной части массива образца. При этом наблюдается образование трещин круговой формы с центрами в ядрах уплотнения разрушаемого материала (рисунок 4.14), что при последующем резании обеспечивает отделение от массива крупных однообразных фрагментов материала (рисунок 4.15).

Описываемый характер распределения трещин объясняется особенностями кристаллографической схемы льда и направлением приложения разрушающей нагрузки относительно преобладающего направления осей кристаллов, составляющих разрушаемый ледяной массив.

При проведении данных экспериментов использовались блоки, приготовленные из льда покрова пресного водоема.



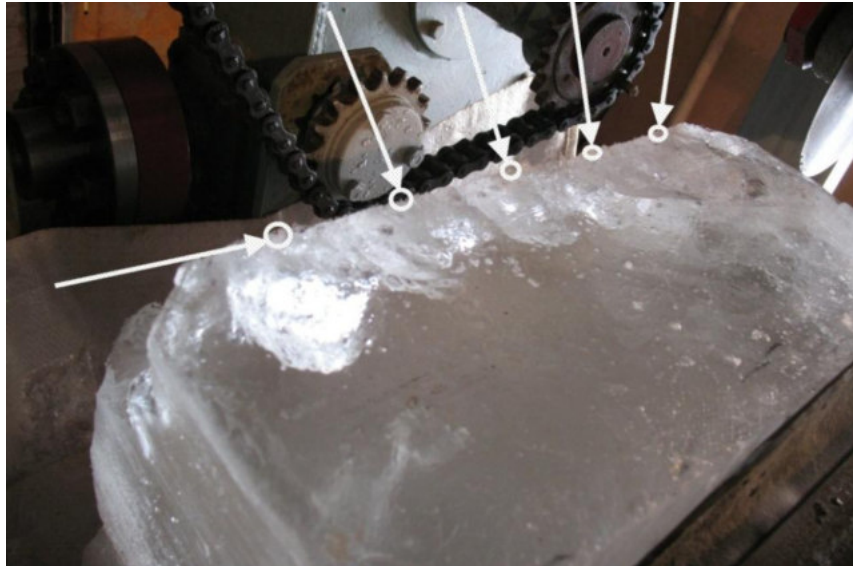


Рисунок 4.14. –Образование трещин круговой формы с центрами в ядрах уплотнения. Стрелками и кольцами показаны места расположения ядер уплотнения

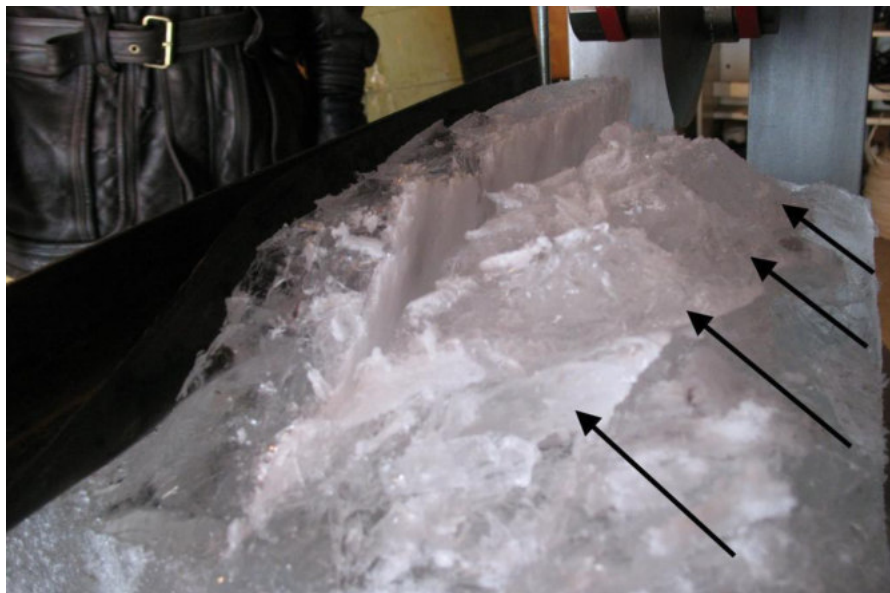


Рисунок 4.15. – Отделение от массива крупных однообразных фрагментов материала

Такой лед имеет поликристаллическую структуру с преобладающим вертикальным (перпендикулярно поверхности водоема) направлением осей большинства кристаллов.

Следовательно, разрушающая нагрузка прилагалась в направлении, перпендикулярном направлению осей кристаллов, т. е. плоскость сдвига совпадала с базисной плоскостью (см. рисунок 1.5a). При этом происходит

только сдвиг элементарных пластинок и деформация носит преобладающий пластический характер.

Результатами экспериментальных исследований установлено, что интенсивное растрескивание массива льда под плоскостью разрушения преобладает при резании образца дисковыми резцами с углом  $\delta = 15^\circ$  и  $\delta = 60^\circ$ .

Это позволяет сделать предположение о том, что при высокой адгезии льда к очищаемым твердым дорожным покрытиям, разрушение таких СЛЮ дисковыми резцами с указанными параметрами будет сопровождаться интенсивным когезионным разрывом разрушаемого материала под плоскостью разрушения с последующим отделением фрагментов разрушения различной величины от массива и вытеснением их из забоя.

Поверхность разрушения материала, остающегося на очищаемом покрытии после прохода рабочего органа, будет иметь сложный шероховатый рельеф, чем обеспечится лучшее сцепление автомобильных шин с поверхностью очищенного покрытия, а в случае последующего использования химического, фрикционного или комбинированного способов зимнего содержания – лучшее удержание на поверхности дорожного полотна абразивных и (или) химически активных противогололедных материалов (ПГМ).

При резании льда дисковыми резцами с углом  $\delta = 30^\circ$  и  $\delta = 45^\circ$  интенсивного растрескивания массива льда под плоскостью разрушения не наблюдается. Вертикальная стенка уступа остается ровной и неразрушенной (рисунок 4.16), что позволяет рекомендовать дисковые резцы с данными параметрами (при вертикальном расположении оси вращения) к применению в рабочих органах дорожных машин, предназначенных для проведения планировочных работ при строительстве и содержании ледовых аэродромов, вертолетных площадок и зимников.

С увеличением шага резания и угла заострения резцов периодичность сколов уменьшается. При этом размеры отделяемых фрагментов,



составляющих бóльшую часть объема каждого среза, увеличиваются, а их общее количество уменьшается. Процесс сопровождается одновременным выходом небольшого количества мелких продуктов разрушения.

Резание при малых шагах сопровождается выходом множественной мелкой стружки серповидной формы.



Рисунок 4.16. – Вертикальная стенка уступа (плоскость разрушения) при резании льда дисковым резцом с углом  $\delta = 30^\circ$

Периодичность сколов при этом достаточно высока, и скалывание происходит при малых разрушающих напряжениях без резких всплесков и спадов усилий, что характерно для пластического разрушения.

При увеличении шага резания выкалывание укрупняющихся фрагментов льда сопровождается резким высвобождением энергии сцепления частиц льда и выбросом фрагментов разрушения из зоны резания. Это свидетельствует о том, что, наряду с формированием уплотненного ядра, перед режущей кромкой происходит образование опережающих трещин, что характерно для упругого и неустойчивого хрупкого разрушения материалов.

Анализ характера изменения величины горизонтальной  $P_r$  составляющей силы сопротивления резанию, в зависимости от угла заострения дискового резца и параметров среза, при выполнении данного этапа работы представлял особый интерес, так как именно значения горизонтальной составляющей определяют и величину удельной энергоёмкости процесса резания льда дисковым режущим инструментом. Параметром, влияющим на изменение площади  $S$  среза, в данном случае является только шаг  $t$  резания, так как глубина резания при испытаниях принята постоянной.

Графики зависимости горизонтальной составляющей  $P_r$  силы сопротивления резанию от угла  $\delta$  заострения дискового резца при полублокированном резании с шагом 10, 20, 30 и 40 мм представлены на рис. 4.17.

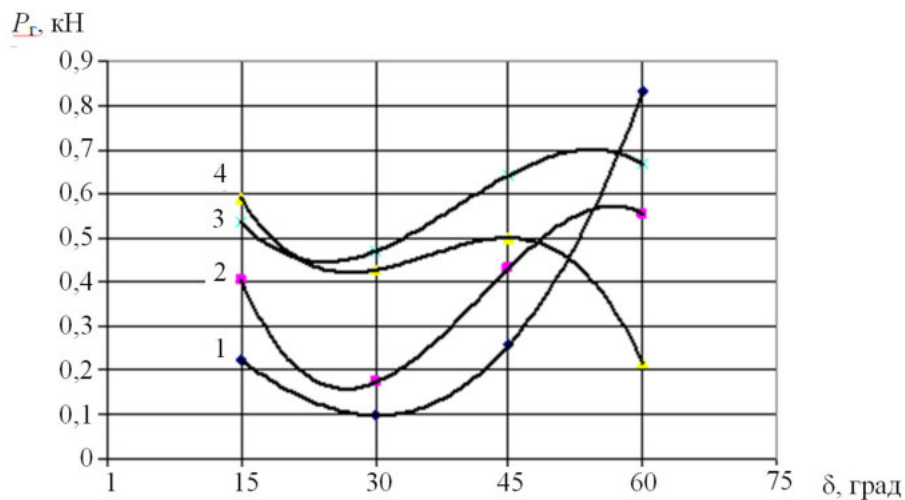


Рисунок 4.17. – Графики зависимость горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию от угла заострения инструмента при шаге резания: 1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 40 мм; 4 – 30 мм

Анализ графиков показал, что наименьшие значения  $P_r$  обеспечиваются при использовании дисковых резцов с углом  $\delta = 30^\circ$  при всех рассматриваемых значениях шага резания, а также при резании диском с углом заострения  $\delta = 60^\circ$  и шагом резания  $t = 30$  мм.

Превышение значений  $P_r$ , полученных при резании резцом с углом  $\delta = 15^\circ$ , над значениями  $P_r$ , полученными при использовании резца с углом  $\delta = 30^\circ$ , объясняется тем, что при более остром угле заострения площадь контакта разрушаемого материала с боковой поверхностью резца очень мала, в результате чего возрастает удельная нагрузка на единицу площади боковой поверхности инструмента, взаимодействующей со льдом. Следовательно, для обеспечения сдвига элементарных базисных пластин ледяных кристаллов, приводящего к растрескиванию и разрушению ледового массива, требуется приложение больших разрушающих усилий. С увеличением шага резания до значения  $t = 30$  мм (рисунок 4.20) значения  $P_r$  нарастают. При шаге  $t = 40$  мм значение  $P_r$  снижается, что объясняется спадом разрушающих усилий при сколе более крупных фрагментов разрушения.

Снижение значений  $P_r$  при увеличении угла заострения инструмента до  $\delta = 30^\circ$  обусловлено изменением положения боковой поверхности резца относительно забоя, что способствовало увеличению площади контакта этой поверхности с массивом разрушаемого материала. В результате этого произошло снижение удельной нагрузки на единицу площади боковой поверхности диска, соприкасающейся со льдом при его разрушении, обеспечен более интенсивный сдвиг базисных пластин кристаллов льда и наиболее интенсивное вытеснение фрагментов разрушения за пределы забоя с минимальными затратами на трение льда о сталь боковой поверхности диска. С увеличением шага резания до значения  $t = 30$  мм (рисунок 4.20) значения  $P_r$  нарастают. При шаге  $t = 40$  мм значение  $P_r$  снижается, что объясняется спадом разрушающих усилий при сколе крупных элементов разрушения.

При увеличении угла заострения диска до  $\delta = 45^\circ$  вновь наблюдается увеличение значений  $P_r$ . Это объясняется увеличением площади контакта боковой поверхности диска с разрушаемым материалом и необходимостью преодоления ставшего более значительным воздействия сил трения льда о сталь боковой поверхности диска во время приложения

разрушающей нагрузки и при вытеснении отколовшихся фрагментов из забоя. Увеличение значений  $P_r$  наблюдается при увеличении шага резания во всём диапазоне его значений (рисунок 4.20).

При резании инструментом с углом заострения  $\delta = 60^\circ$  с шагом резания  $t = 10$  мм значение  $P_r$  достигает самой большой величины – 0,831 кН. В этом случае имеет место максимальный разворот боковой поверхности диска относительно забоя, в результате чего воздействие сил трения стали о лед при приложении разрушающей нагрузки становится особенно значительным. При этом площадь контакта разрушаемого материала с боковой поверхностью диска мала из-за малой толщины срезаемого слоя, что способствует увеличению удельной нагрузки, приходящейся на единицу площади этой поверхности. При таком резании наблюдается интенсивное растрескивание неразрушенной части массива образца (под плоскостью разрушения). Это сопровождается образованием множественных глубоких трещин как в вертикальном направлении, так и в горизонтальном и обеспечивается приложением значительного усилия.

При резании инструментом с углом заострения  $\delta = 60^\circ$  и шагом резания  $t = 30$  мм наблюдается существенное снижение значения  $P_r$ . Можно предположить, что это обусловлено интенсивным образованием опережающих трещин, интенсивным глубоким и разнонаправленным растрескиванием неразрушенной части массива льда (под плоскостью разрушения). При таком резании наблюдается неравномерность размеров отделяемых фрагментов разрушения, имеет место выход мелкой стружки в значительных количествах, который может чередоваться и с отделением крупных элементов.

Графики зависимости боковой составляющей  $P_b$  силы сопротивления резанию от угла  $\delta$  заострения режущей кромки дискового резца при изменяющемся шаге резания 10, 20, 30 и 40 мм представлены на рис. 4.18. Очевидно, что в данном случае, наименьшие значения этой составляющей

имеют место при резании ледяного массива инструментом с углом заострения  $\delta = 30^\circ$  и  $\delta = 60^\circ$  во всем диапазоне значений шага резания.

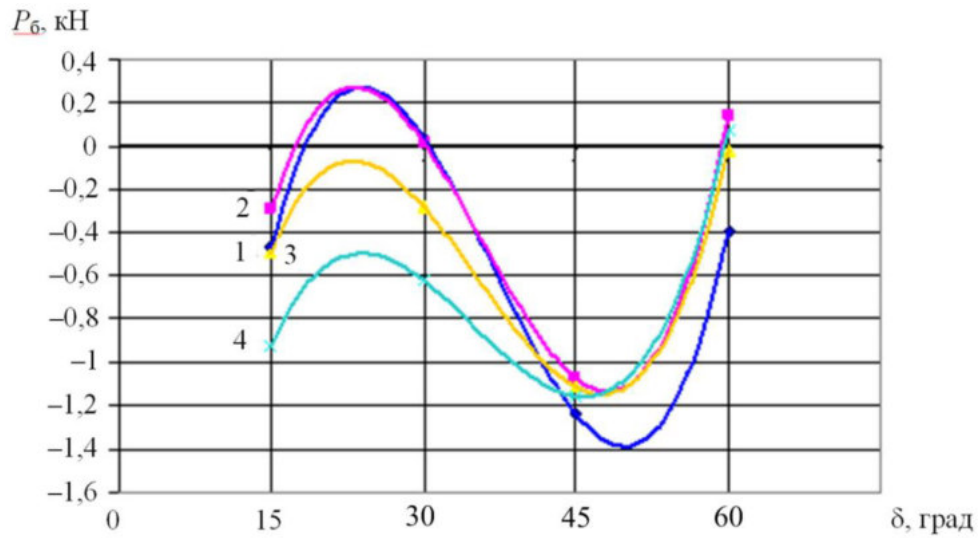


Рисунок 4.18. – Графики зависимости боковой составляющей силы сопротивления резанию от угла заострения инструмента при шаге резания: 1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 30 мм; 4 – 40 мм

Графики зависимости вертикальной составляющей  $P_v$  силы сопротивления резанию от угла  $\delta$  заострения режущей кромки дискового резца при шаге резания 10, 20, 30 и 40 мм представлены на рис. 4.19.

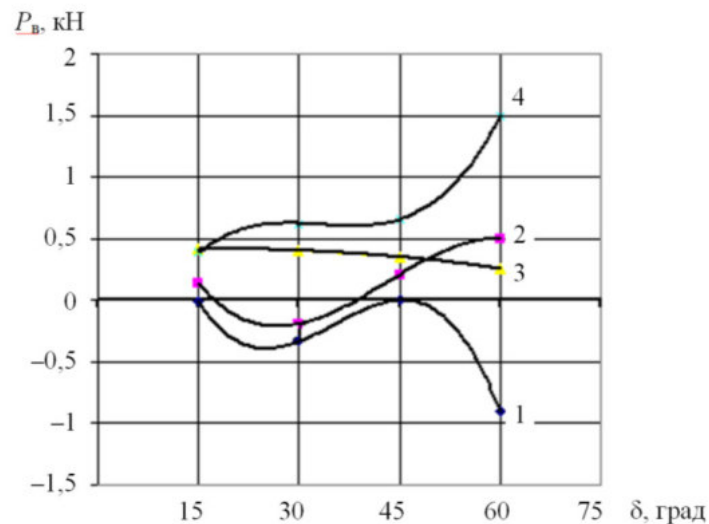


Рисунок 4.19. – Графики зависимости вертикальной составляющей силы сопротивления резанию от угла заострения инструмента при шаге резания: 1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 30 мм; 4 – 40 мм

Из графиков следует, что при увеличении угла заострения  $\delta$  ближайšie к нулю значения  $P_v$  обеспечиваются при резании резцом с углом  $\delta = 15^\circ$  (шаг  $t = 10$  мм и  $t = 20$  мм) и резцом с углом  $\delta = 45^\circ$  (шаг  $t = 10$  мм и  $t = 20$  мм).

Постепенное равномерное уменьшение значений  $P_v$  с увеличением угла  $\delta$  наблюдается при резании с шагом  $t = 30$  мм.

Графики зависимости горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию от шага резания при изменяющихся значениях угла  $\delta$  представлены на рисунке 4.20.

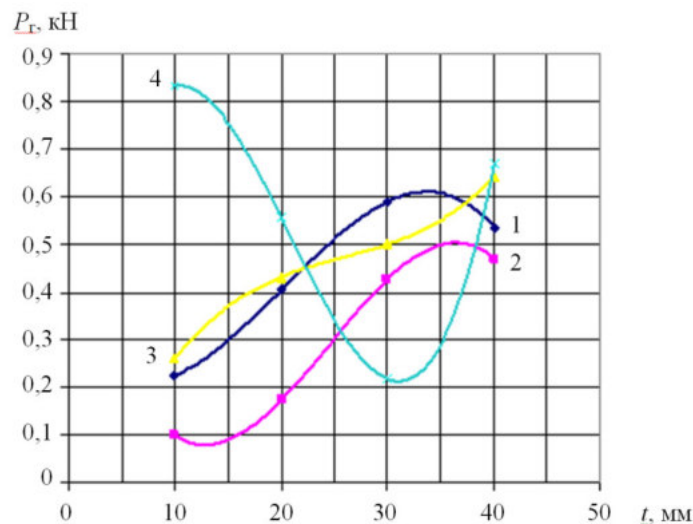


Рисунок 4.20. – Графики зависимости горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию от шага резания резцом с углом заострения: 1 –  $15^\circ$ ; 2 –  $30^\circ$ ; 3 –  $45^\circ$ ; 4 –  $60^\circ$

Механизм разрушения ледяного массива, оказывающий влияние на изменение значений  $P_g$ , описан выше. Очевидно, что минимальные значения  $P_g$  обеспечиваются при резании дисковым резцом с углом  $\delta = 30^\circ$  во всем диапазоне изменяющихся значений шага  $t$ . Также малое значение  $P_g$  наблюдается при резании льда дисковым резцом с углом  $\delta = 60^\circ$  при  $t = 30$  мм.

Графики зависимости боковой составляющей силы сопротивления резанию от шага резания при изменяющихся значениях угла  $\delta$  представлены на рисунке 4.21.

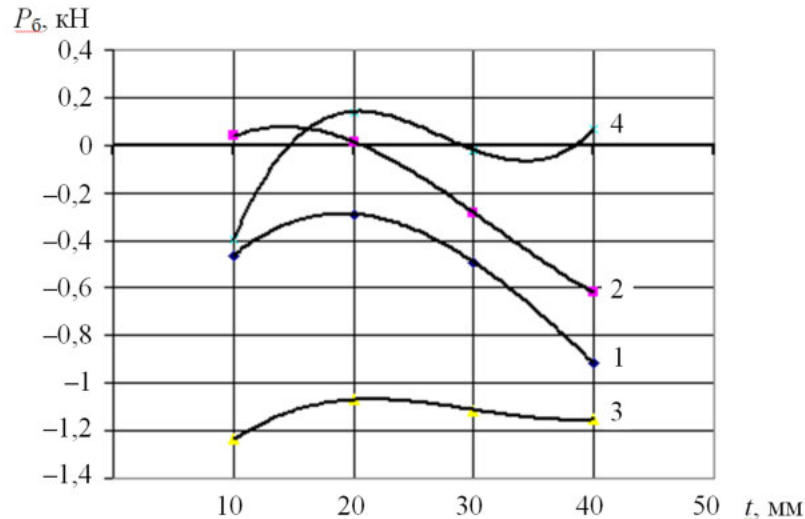


Рисунок 4.21. – Графики зависимости боковой составляющей силы сопротивления резанию от шага резания резцом с углом заострения: 1 – 15°; 2 – 30°; 3 – 45°; 4 – 60°

Наиболее близкими к нулю являются значения  $P_b$ , полученные при резании резцом с углом  $\delta = 30^\circ$  и шагом  $t = 10$  мм и  $t = 20$  мм, а также при резании резцом с углом  $\delta = 60^\circ$  при шаге  $t = 30$  мм, что подтверждает правильность ранее выдвинутых предположений.

Графики зависимости вертикальной составляющей силы сопротивления резанию от шага резания при изменяющихся значениях угла  $\delta$  представлены на рисунке 4.22.

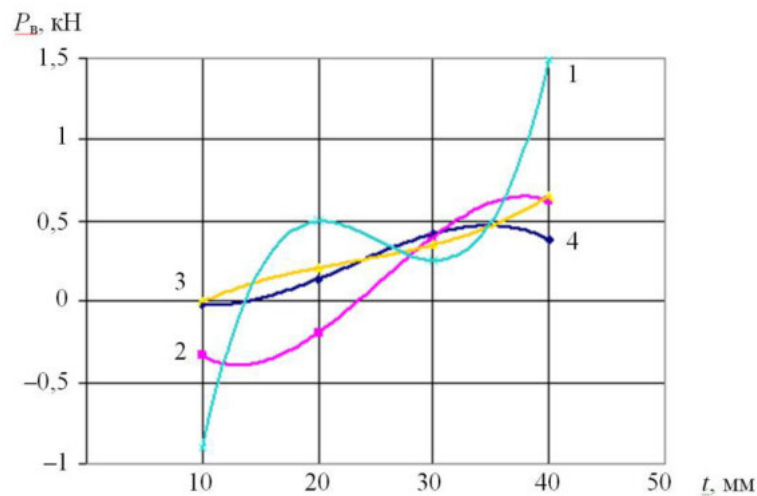


Рисунок 4.22. – Графики зависимости вертикальной составляющей силы сопротивления резанию от шага резания резцом с углом заострения: 1 – 15°; 2 – 30°; 3 – 45°; 4 – 60°

Здесь схожий характер нарастания и спада напряжений с увеличением шага резания наблюдается при использовании резцов с углами заострения 45, 30 и 60°.

При этом примерно равные значения данной составляющей ( $P_v \approx 0,4$  кН) имеют место при резании с шагом  $t = 30$  мм, а также при резании резцом с углом  $\delta = 60^\circ$  с шагом  $t = 40$  мм.

Из сказанного выше можно сделать вывод о том, что при различных условиях испытаний: разрушении льда дисковыми резцами с углами заострения 15, 30, 45 и 60° при изменяющемся шаге резания (10, 20, 30 и 40 мм), низкие значения силы сопротивления льда резанию обеспечиваются при использовании дискового резца с углом заострения  $\delta = 30^\circ$ .

Расчет удельной энергоёмкости процесса резания ледяного массива дисковым резцом (кВт ч/м<sup>3</sup>) произведен по формуле [92]

$$E = 0,000272 \frac{P_r}{S}, \quad (4.5)$$

где  $P_r$  – значение горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию, кН;

$S$  – площадь среза

$$S = ht, \quad (4.6)$$

где  $h$  – глубина резания, м;

$t$  – шаг резания, м.

Результаты расчетов удельных затрат энергии на резание льда дисковым резцом диаметром  $D = 200$  мм при различных углах заострения  $\delta$  режущей кромки и различном шаге резания  $t$  сведены в таблицу 4.4.



Таблица 4.4. – Результаты расчетов удельной энергоёмкости процесса резания ( $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ )

Шаг $t$ резания, м	Угол $\delta$ заострения режущей кромки резца, град			
	15	30	45	60
0,01	0,102	0,045	0,117	0,377
0,02	0,092	0,039	0,098	0,126
0,03	0,089	0,065	0,076	0,033
0,04	0,061	0,053	0,073	0,076

На основании данных таблицы 4.4. построены графические зависимости энергоёмкости процесса резания от угла  $\delta$  заострения инструмента (рисунок 4.23).

Анализ графиков зависимости удельной энергоёмкости процесса резания льда дисковыми резцами от угла заострения диска позволяет сделать следующие выводы.

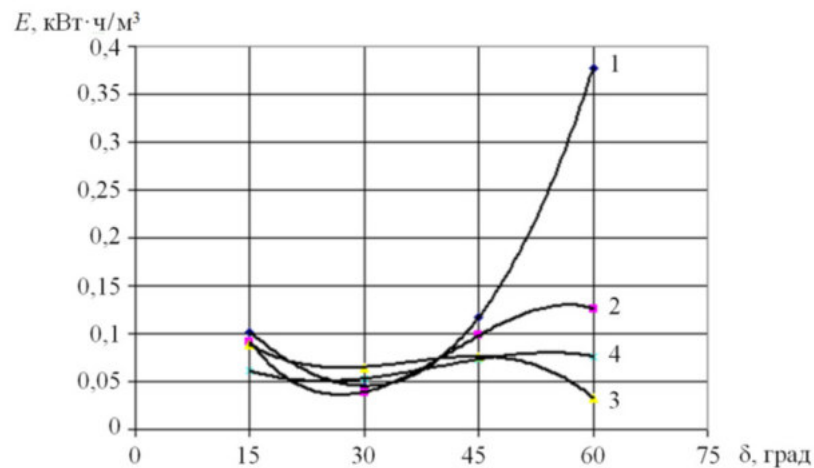


Рисунок 4.23. – Графики зависимости энергоёмкости процесса резания от угла заострения инструмента при шаге резания: 1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 30 мм; 4 – 40 мм

Наименьшая удельная энергоёмкость процесса будет обеспечена при резании льда дисковым резцом с углами заострения  $\delta = 30^\circ$  во всём диапазоне изменяющихся значений шага резания  $t$  (10, 20, 30 и 40 мм), а

также при резании дисковым резцом с углом заострения режущей кромки  $\delta = 60^\circ$  с шагом  $t = 30$  мм.

Общие результаты данного этапа экспериментальных лабораторных исследований, изложенные в текущем подразделе диссертационной работы, позволяют рекомендовать к использованию в конструкциях высокоэффективного снегоочистительного оборудования, дискового режущего инструмента диаметром  $D = 200$  мм и углом заострения режущей кромки  $\delta = 30^\circ$ .

Очевидно, что процесс взаимодействия инструмента, имеющего указанные параметры, с прочными СЛЮ при их механическом разрушении, протекает при малых значениях каждой из трех составляющих силы сопротивления резанию и при малой энергоемкости процесса.

Следовательно, данные параметры дискового режущего инструмента при его работе в условиях описанных выше, следует считать рациональными [134, 199, 200].

#### **4.3 Обоснование рациональных скоростных режимов работы дискового режущего инструмента при механическом разрушении прочных снежно-ледяных отложений**

Основной целью серии экспериментальных лабораторных исследований данного (второго) этапа работ являлось установление закономерностей влияния скорости резания на величину силы сопротивления резанию, величину удельной энергоемкости процесса механического разрушения прочных СЛЮ дисковым режущим инструментом и на производительность рабочего оборудования, оснащаемого таким инструментом. Это необходимо для обоснования рациональных с позиции минимизации энергетических затрат и повышения производительности, скоростных режимов разрабатываемого высокоэффективного снегоочистительного оборудования.

Работы данного этапа экспериментальных лабораторных исследований в соответствии с темой раздела 4.3 проводились на базе учебно-научной лаборатории «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур» (см. раздел 3.6) размещавшейся в неотапливаемом металлическом автомобильном гараже при следующих условиях.

Разрушаемый материал – блоки, изготовленные из природного пресноводного льда (рисунок 4.10), содержащие в поверхностных слоях структуру №9 (рисунок 1.3). Размеры ледяных блоков, подготовленных к установке на МППО лабораторного стенда, приведены в таблице 3.3.

Режущий инструмент – заостренный дисковый резец типа А в форме усеченного конуса (рисунки 3.1а, 3.2, 4.2). Диаметр дискового резца  $D = 200$  мм. Угол заострения режущей кромки инструмента  $\delta = 30^\circ$  (см. раздел 4.2).

Материал инструмента – сталь 40ХН ГОСТ 4543-71 без термообработки, с твердостью по шкале Роквелла  $HRC 53$ .

Скорость резания определяется скоростью перемещения тензометрического элемента ИП – 1, несущего резец на оси П – образного кронштейна, по двум параллельным цилиндрическим направляющим лабораторного стенда (рисунок 3.4). Изменение значений скорости перемещения измерительного преобразователя с закрепленным на нем режущим инструментом осуществлялось установкой на лабораторный стенд в качестве приводной звездочки 9 выходного вала 8 редуктора и звездочки ведущего вала 10 цепной передачи, звездочек с различным числом зубьев (рис. 3.9) в различных комбинациях в соответствии с данными таблицы 3.2.

Экспериментальные лабораторные исследования проводились в пяти скоростных режимах:  $V = 0,5; 0,9; 1,3; 1,9; 2,2$  м/с. Комбинации пар звездочек цепной передачи лабораторного стенда и обеспечиваемые их установкой соответствующие значения скорости перемещения измерительного

преобразователя представлены в таблице 4.5. Выбор указанного диапазона значений скорости резания был обусловлен следующими соображениями.

Таблица 4.5. – Значения скорости перемещения измерительного преобразователя

Число $z_1$ зубьев приводной звездочки вала редуктора станда	Число $z_2$ зубьев ведущего вала цепной передачи станда	Передаточное отношение ведущей и ведомой звездочек приводной цепи $i_{1-2}$	Скорость перемещения измерительного преобразователя $V$ , м/с (км/ч)
21	44	2,1	0,51 (1,84)
21	25	1,2	0,89 (3,20)
25	21	0,84	1,26 (4,54)
44	25	0,57	1,86 (6,7)
44	21	0,48	2,21 (7,96)

Результаты исследований влияния скорости на усилия резания мерзлых и немерзлых грунтов зубьями землеройных машин [86, 196, 197], свидетельствуют о незначительном влиянии скорости резания на силовые показатели процесса при изменении ее значений от 0,5 до 1,5 м/с (1,8 – 5,4 км/ч).

Анализ опыта использования дискового режущего инструмента в рабочих органах проходческих комбайнов при разрушении горных пород [89 – 92], также свидетельствует о том, что изменение скорости резания в диапазоне значений 0,05 – 1,0 м/с (0,18 – 3,6 км/ч), существенного влияния на силу сопротивления резанию не оказывает.

Однако в рамках данного этапа исследований, с учетом существенного различия ФМС горных пород, грунтов и прочных СЛО, значение нижнего предела скорости резания принято равным  $0,5 \approx 0,51$  м/с (1,84 км/ч).

Высокие рабочие скорости машин, несущих плужное (отвальное) снегоочистительное оборудование имеют место при патрульной очистке дорожных и аэродромных покрытий от свежесвыпавшего и слабоуплотненного снега. Так, при удалении снега плотностью 0,20 – 0,25 г/см<sup>3</sup> при глубине снежного покрова до 0,4 м, работы по снегоочистке могут

выполняться автогрейдером со скоростью 15 – 20 км/ч (4,17 – 5,56 м/с) [42, 70, 194], машинами на шасси грузовых автомобилей – со скоростью 20 – 25 км/ч (5,56 – 6,94 м/с) [192 – 195].

В случае использования тракторных плужных снегоочистителей для расчистки дорог от больших заносов снега плотностью  $0,5 \text{ г/см}^3$  и более при толщине слоя 1,0 – 1,2 м рабочая скорость снегоочистителя составляет 3,0 – 3,5 км/ч (0,83 – 0,97 м/с) [193].

В соответствии с рекомендациями работы [192] скорость уборки снега высокой плотности должна составлять 3,5 – 7,0 км/ч (1,0 – 2,0 м/с), а льда – 0,72 – 1,8 км/ч (0,2 – 0,5 м/с).

При разрушении на дорожных покрытиях прочных СЛЮ посредством использования скальвателей – рыхлителей, рабочая скорость базовой машины должна составлять 4 – 7 км/ч [194].

При очистке покрытий от сильно уплотненного снега и прочных СЛЮ *наилучшее качество работ* достигается при работе снегоочистительного оборудования со скоростью 6 – 10 км/ч (1,67 – 2,78 м/с) [70]. При такой скорости базовая машина, например автогрейдер, может работать без значительной пробуксовки ведущих колес и с неизменным углом захвата и глубиной резания отвала.

С учетом сказанного выше, в рамках данного этапа исследований значение верхнего предела скорости резания принято равным  $2,21 \approx 2,2 \text{ м/с}$  ( $7,96 \approx 8,00 \text{ км/ч}$ ).

Глубина резания  $h = 60 \text{ мм}$ . Шаг резания  $t$  (толщина срезаемой стружки) составил 10, 20, 30, 40, 50 и 60 мм. При этом соблюдалось условие  $t \leq h$ , так как предполагается что резцами, размещаемыми на рабочих органах, будет обеспечиваться разрушение льда по полублокированной схеме, требующей меньших затрат энергии (по сравнению с блокированной схемой). В случае, когда ширина резания превышает его глубину, имеет место более энергоемкая блокированная схема резания.

Величина заднего угла  $\gamma$  (угла атаки), образуемого бóльшей торцовой поверхностью дискового резца с плоскостью резания, принималась в диапазоне значений  $3 - 5^\circ$ .

Резание ледяных блоков осуществлялось на различных скоростных режимах, в указанном выше диапазоне значений скорости резания. При этом на каждом из этих режимов производилось последовательное изменение шага резания во всем исследуемом диапазоне его значений.

Температурные условия проведения эксперимента выбирались максимально приближенными к условиям первого этапа исследований. Так температура окружающего воздуха при испытаниях находилась в диапазоне от минус 2 до минус 6  $^\circ\text{C}$ , что соответствует условиям наиболее вероятного льдообразования на дорожных и аэродромных покрытиях.

Для производства исследовательских работ временные периоды (5 – 7 дней подряд) со стабильными значениями температуры и влажности воздуха выбирались на основании прогнозов погоды, публикуемых в официальных информационных источниках.

Измерение температуры воздуха производилось ртутным термометром ТЛ – 4 №1 (ГОСТ 27544 – 87) [188] с ценой деления 0,1  $^\circ\text{C}$  и пределом измерения от минус 30  $^\circ\text{C}$  до 20  $^\circ\text{C}$ .

Температура внутри массива каждого ледового образца измерялась при помощи термопары, замороженной в шпур. Термопара подключалась к цифровому мультиметру *UT – 33C* [174], с монитора, которого и считывались значения температуры (рис. 4.11).

Один ледяной блок из серии блоков, подготовленных к экспериментам подвергался испытаниям на прочность при помощи твердомера (рисунок 2.10) в соответствии с методом контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог (см. раздел 2.3).

Значения температуры воздуха, температуры внутри массива ледового образца и значения глубины погружения конического наконечника твердомера в тело ледяного блока заносились в протокол испытаний.

Все действия коллектива испытателей были организованы в соответствии с Методикой лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой (см. подраздел 3.2.1) в рамках реализации Метода «В» системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП – 1, (см. Подраздел 3.3.2, рисунок 3.23) при предварительной тарировке тензометрического элемента ИП-1 в соответствии с Методом градуировки тензометрических элементов (см. Подраздел 3.4.1).

#### **4.3.1. Обработка и анализ результатов второго этапа экспериментальных исследований**

Полученные экспериментально значения горизонтальной  $P_{г}$ , боковой  $P_{б}$  и вертикальной  $P_{в}$  составляющих силы сопротивления ледового блока резанию дисковым резцом во всём рассматриваемом диапазоне скорости резания  $V$  и диапазоне шага резания  $t$  были обработаны аналогично тому, как обрабатывались результаты первого этапа экспериментальных исследований (см. подраздел 4.2.3).

На основании статистически обработанных результатов всех испытаний, предусмотренных программой эксперимента, построены графики зависимости горизонтальной  $P_{г}$ , боковой  $P_{б}$  и вертикальной  $P_{в}$  составляющих силы сопротивления льда резанию от скорости  $V$  резания с изменяющимся шагом  $t$  резания, выполнен расчет удельной энергоемкости  $E$  процесса резания снежно-ледяного массива дисковым резцом для различных значений

скорости резания и шага резания в соответствии с выражением (4.5), построены графики зависимости удельной энергоёмкости исследуемого процесса от скорости резания.

Важным этапом экспериментальных исследований являлся анализ характера изменения величины горизонтальной  $P_r$  составляющей силы сопротивления резанию в зависимости от скорости резания льда дисковым резцом и параметров среза, так как значения  $P_r$  определяют величину удельной энергоёмкости процесса резания льда дисковым режущим инструментом.

Графики зависимости горизонтальной  $P_r$  составляющей силы сопротивления резанию от скорости  $V$  резания льда дисковым резцом при полублокированном резании в исследуемом диапазоне шага  $t$  резания представлены на рисунке 4.24.

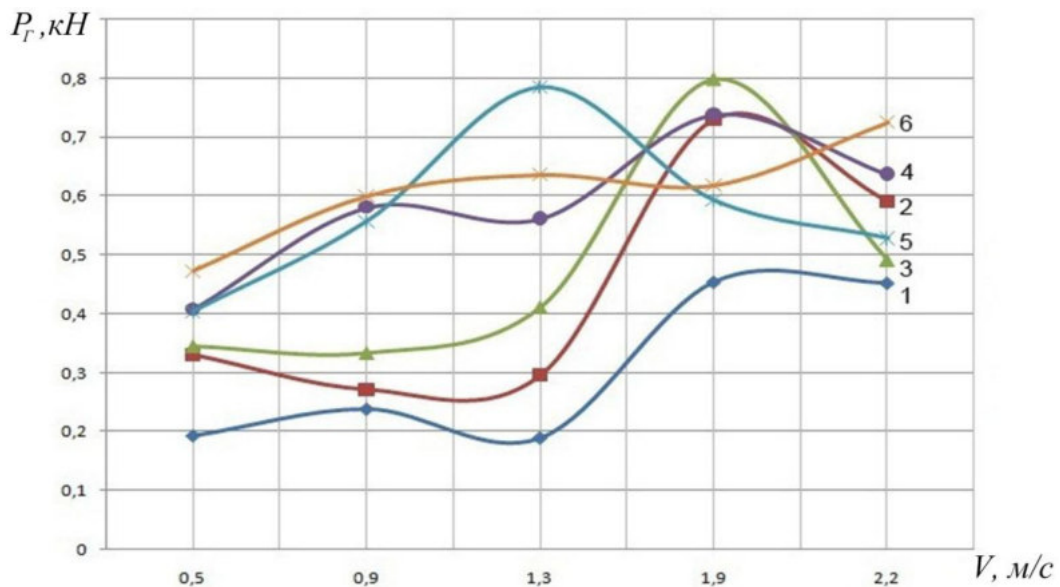


Рисунок 4.24. – Зависимость горизонтальной составляющей  $P_r$  силы сопротивления резанию от скорости  $V$  резания: 1 – шаг резания  $t = 10$  мм; 2 – шаг резания  $t = 20$  мм; 3 – шаг резания  $t = 30$  мм; 4 – шаг резания  $t = 40$  мм; 5 – шаг резания  $t = 50$  мм; 6 – шаг резания  $t = 60$  мм



При анализе данных графиков необходимо учитывать такой параметр как производительность, значения которого изменяются пропорционально изменению скорости резания, что следует из выражения

$$P_p = 3600 F_p V_p, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (4.6)$$

где  $P_p$  – теоретическая (расчетная) производительность машины непрерывного действия,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$F_p$  – расчетное поперечное сечение срезаемой стружки,  $\text{м}^2$ ;

$V_p$  – расчетная скорость резания,  $\text{м}/\text{сек}$

Результаты расчета производительности режущего инструмента в соответствии с выражением (4.6) представлены в таблице 4.6. На основании этих результатов построены графики зависимости расчетной производительности инструмента от скорости резания во всем исследуемом диапазоне шага резания (рисунок 4.25).

Таблица 4.6. Результаты расчета производительности дискового режущего инструмента

Скорость резания $V$ , м/с	Шаг резания $t$ , мм					
	10	20	30	40	50	60
0,5	1,08	2,16	3,24	4,32	5,4	6,48
0,9	1,944	3,888	5,832	7,776	9,72	11,664
1,3	<b>2,808</b>	<b>5,616</b>	<b>8,424</b>	<b>11,232</b>	14,04	16,848
1,9	4,104	8,208	12,312	16,416	20,52	<b>24,624</b>
2,2	4,752	9,504	14,256	19,008	<b>23,76</b>	28,512

Результаты анализа графиков (рисунки 4.24, 4.25) свидетельствуют о том, что наиболее благоприятные (по сочетанию параметров сила – производительность) условия разрушения прочных СЛЮ дисковым инструментом обеспечиваются при резании со скоростью  $V = 1,3$  м/с с шагом  $t = 10, 20, 30$  и  $40$  мм, при резании со скоростью  $V = 2,2$  м/с с шагом  $t = 50$  мм, а также, при скорости резания  $V = 1,9$  м/с с шагом  $t = 60$  мм.

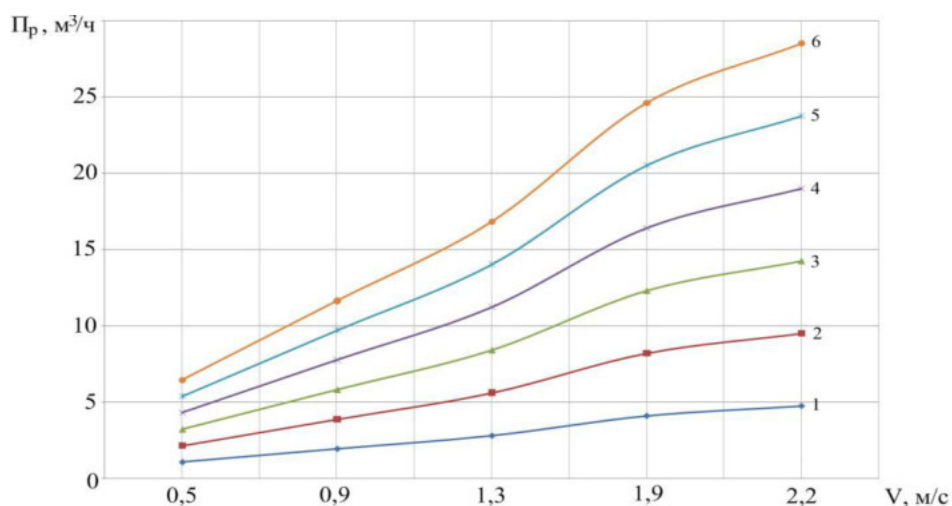


Рисунок 4.25. – Зависимость расчетной производительности  $P_p$  режущего инструмента от скорости  $V$  резания: 1 – шаг резания  $t = 10$  мм; 2 – шаг резания  $t = 20$  мм; 3 – шаг резания  $t = 30$  мм; 4 – шаг резания  $t = 40$  мм; 5 – шаг резания  $t = 50$  мм; 6 – шаг резания  $t = 60$  мм

На основании результатов расчета по формуле (4.5) удельных затрат энергии на резание прочных СЛО дисковым резцом диаметром  $D = 200$  мм при различных значениях скорости  $V$  резания во всем рассматриваемом диапазоне шага  $t$  резания построены графические зависимости энергоемкости исследуемого процесса от скорости резания (рисунок 4.26).

Анализ полученных графиков свидетельствует о том, что разрушение льда дисковым инструментом при малых затратах энергии и с высокой производительностью обеспечивается при резании со скоростью  $V = 1,3$  м/с и шагом  $t = 10, 20, 30$  и  $40$  мм, при резании со скоростью  $V = 2,2$  м/с с шагом  $t = 50$  мм, а также, при скорости резания  $V = 1,9$  м/с с шагом  $t = 60$  мм, т. е. на тех же скоростных режимах, при которых обеспечиваются благоприятные по сочетанию параметров сила – производительность условия разрушения льда дисковым инструментом (рисунок 4.24).

Повышение значений удельной энергоемкости процесса резания с малыми шагами объясняется следующими причинами.

Результатами эксперимента установлено, что периодичность сколов при резании льда дисковым инструментом на различных скоростных

режимах непостоянна и в частности, при значениях шага 10 и 20 мм достигает максимума на скорости 1,9 м/с.

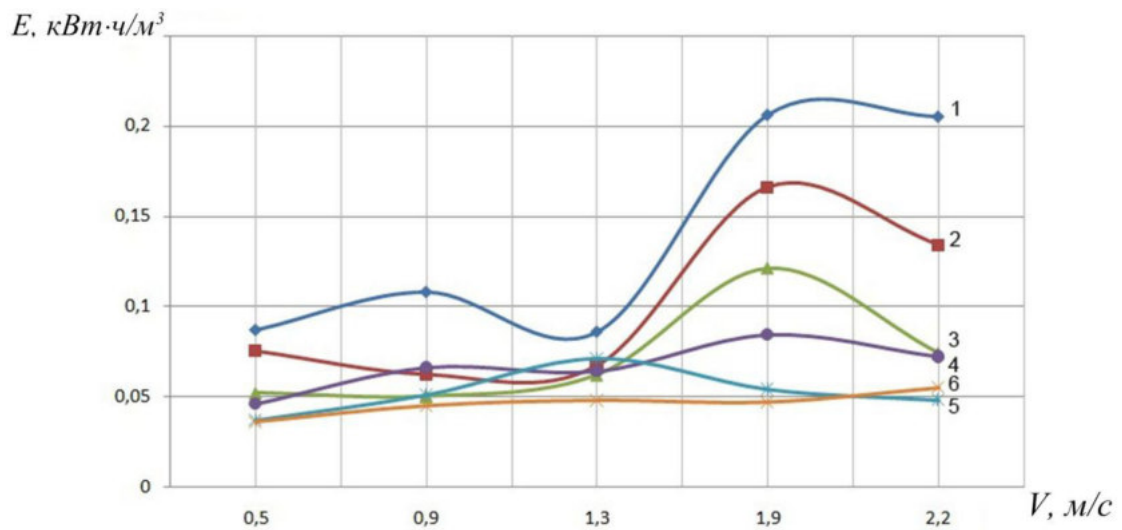


Рисунок 4.26. – Зависимость удельной энергоёмкости процесса резания от скорости резания: 1 – шаг резания  $t = 10$  мм; 2 – шаг резания  $t = 20$  мм; 3 – шаг резания  $t = 30$  мм; 4 – шаг резания  $t = 40$  мм; 5 – шаг резания  $t = 50$  мм; 6 – шаг резания  $t = 60$  мм

Каждый скол реализуется при малых разрушающих напряжениях, но суммарное разрушающее усилие за опыт и, следовательно, среднее значение каждого ряда наблюдений оказываются достаточно высокими (рисунок 4.24). Резание ледового массива с малым шагом осуществляется при малой площади контакта разрушаемого материала с боковой поверхностью резца, что способствует увеличению удельной нагрузки, приходящейся на единицу площади боковой поверхности инструмента взаимодействующей со льдом. Следовательно, для обеспечения сдвига элементарных базисных пластин кристаллов льда, приводящего к растрескиванию и разрушению ледового массива, требуются большие затраты энергии (рисунок 4.26).

Таким образом, результатами теоретических и экспериментальных исследований определены рациональные с точки зрения минимизации энергозатрат и повышения производительности, значения скорости резания прочных СЛО дисковым инструментом при различных параметрах среза.

Полученные данные позволяют устанавливать шаг дискового режущего инструмента при разработке схем его размещения на рабочих органах снегоочистительных машин, а также назначать их рабочую скорость, при которой будет обеспечиваться наиболее эффективное разрушение прочных СЛО на очищаемых дорожных покрытиях [166, 167, 198].

#### **4.4. Оценка влияния температуры окружающей среды и разрушаемого материала на величину силы сопротивления прочных СЛО резанию дисковым инструментом**

Основные физико-механические свойства различных видов снега и прочных СЛО, классификация прочных СЛО как материала подлежащего механическому разрушению рабочими органами дорожных машин, а также основные закономерности деформирования и разрушения пресноводного льда изложены автором в главе 1 данной диссертационной работы (см. Разделы 1.1 – 1.3).

Из материалов указанных разделов следует вывод о существенном влиянии на характер процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с прочными СЛО, а, также и на величину силы сопротивления разрушаемой среды резанию этим инструментом таких ее ФМС как удельный вес (плотность) и пористость, вязкость, коэффициент внешнего трения, а также и прочностные свойства. Последние характеризуются пределами прочности разрушаемой среды при сжатии, растяжении, изгибе и срезе и, применительно к уплотненному снегу, находятся в тесной зависимости от плотности материала и его температуры: *величина прочности тем больше, чем больше плотность и ниже температура уплотненного снега.*

На величину прочности СЛО в большей степени влияет температура окружающего воздуха, определяющая степень упрочнения

межкристаллических связей СЛО, а не температура в массиве этого материала, значения которой нестабильны (см. табл. II. 5.1 – II. 5.7). Закономерность взаимного влияния этих двух параметров установить практически невозможно в силу изменчивости теплофизических свойств льда (теплопроводности, температуропроводности) как во времени, так и по сечению снежно-ледяного (ледового) покрова [56].

Однако известно, что *наиболее резкое увеличение прочности* льда происходит при изменении его температуры от 0 до  $-5$  °С. Это свидетельствует о продолжающемся процессе формирования кристаллической решётки, при котором оставшийся в порах водный раствор переходит в твердое состояние [50].

Температура природного льда близка к точке его плавления и с понижением температуры перегруппировка атомов в его пространственной решетке все более затруднена. При этом кристаллическая решетка становится прочнее, а упругие и хрупкие свойства льда проявляются сильнее. Наоборот, при повышении температуры сцепление молекул льда в кристаллической решетке ослабевает и появляется возможность перегруппировки атомов – лед становится все более пластичным. Следовательно, *механическая прочность льда зависит от его температуры и должна возрастать с её понижением* [201]. Данный вывод подтверждается результатами испытаний нового твердомера (рисунок 2.10) на блоках пресноводного льда в морозильной камере (см. таблицу 2.13).

Основной целью серии экспериментальных лабораторных исследований данного (третьего) этапа исследовательских работ являлось установление степени влияния температуры окружающей среды на величину силы сопротивления резанию, величину удельной энергоемкости процесса механического разрушения льда дисковым режущим инструментом.

Работы данного этапа экспериментальных лабораторных исследований в соответствии с темой раздела 4.4 проводились на базе учебно-научной

лаборатории «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур» (см. раздел 3.6) в ее обновленной версии – на базе контейнера – рефрижератора *CARRIER* (рисунки 3.42 – 3.46).

Разрушаемый материал – блоки, изготовленные из природного пресноводного льда (рисунок 4.10), содержащие в поверхностных слоях структуру №9 (рисунок 1.3). Размеры ледяных блоков, подготовленных к установке на МППО лабораторного стенда, приведены в табл. 3.3.

Режущий инструмент – заостренный дисковый резец типа А в форме усеченного конуса (рисунки 3.1а, 3.2, 4.2). Диаметр дискового резца  $D = 200$  мм. Угол заострения режущей кромки инструмента  $\delta = 30^\circ$  (см. раздел 4.2).

Материал инструмента – сталь 40ХН ГОСТ 4543-71 без термообработки, с твердостью по шкале Роквелла *HRC 53*.

Скорость резания (скорость перемещения тензометрического элемента, несущего резец на оси П – образного кронштейна) при испытаниях составила  $V = 0,51$  м/с (1,84 км/ч). В рамках данного этапа работы это условие можно считать достаточным в силу того, что такая скорость резания практически не влияет на величину значений составляющих силы сопротивления резанию (см. Подраздел 4.2.2).

Глубина резания  $h = 60$  мм. Шаг резания  $t$  (толщина срезаемой стружки) составил 10, 20, 30, 40, 50 и 60 мм. При этом соблюдалось условие  $t \leq h$ , так как предполагается что резцами, размещаемыми на рабочих органах, будет обеспечиваться разрушение льда по полублокированной схеме, требующей меньших затрат энергии (по сравнению с блокированной схемой). В случае, когда ширина резания превышает его глубину, имеет место более энергоемкая блокированная схема резания.

Величина заднего угла  $\gamma$  (угла атаки), образуемого большей торцовой поверхностью дискового резца с плоскостью резания, принималась в диапазоне значений  $3^\circ \div 5^\circ$ .

Испытания проводились при различных значениях температуры окружающей среды, обеспечиваемых морозильной камерой нового лабораторного помещения в диапазоне от значений  $t_{oc} \approx 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ , до  $t_{oc} = -30 \text{ } ^\circ\text{C}$  с шагом  $5 \text{ } ^\circ\text{C}$  в прямом и обратном порядке, т.е. в тринадцати температурных точках.

В преддверии очередной серии опытов в каждой температурной точке, предварительно заготовленные ледяные блоки в необходимом количестве помещались в морозильную камеру с установленным в ней лабораторным стендом (рисунок 3.46) куда также помещался и твердомер (рисунок 2.10). Перед началом серии опытов в каждой температурной точке все элементы системы «лабораторный стенд – образцы разрушаемой среды – средства контроля ФМС разрушаемой среды» выдерживались при заданной температуре не менее трех суток.

Температура воздуха внутри морозильной камеры предварительно задавалась с пульта управления контейнера – рефрижератора, расположенного на его задней тыльной стороне, с ориентировкой на показания встроенного дисплея. Корректировка значений температуры осуществлялась с учетом показаний ртутного термометра ТЛ – 4 №1 (ГОСТ 27544 – 87) [188], размещенного непосредственно в морозильной камере. Цена деления шкалы данного термометра  $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ , предел измерения от минус  $30 \text{ } ^\circ\text{C}$  до  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Температура внутри массива каждого ледового образца измерялась при помощи термопары, вмороженной в шпур. Термопара подключалась к цифровому мультиметру *UT – 33B/C/D* [174], с монитора, которого и считывались значения температуры (рисунок 4.11).

Один ледяной блок из серии блоков, подготовленных к экспериментам подвергался испытаниям на прочность при помощи твердомера (рисунок 2.10) в соответствии с методом контроля прочности (несущей способности)

уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог (см. Раздел 2.3).

Значения температуры воздуха внутри морозильной камеры, температуры внутри массива ледового образца и значения глубины погружения конического наконечника твердомера в тело ледяного блока заносились в протокол испытаний.

Резание ледяных блоков в каждой температурной точке осуществлялось при последовательном изменении шага  $t$  резания во всем исследуемом диапазоне его значений.

Все действия коллектива испытателей были организованы в соответствии с Методикой лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой (см. Подраздел 3.2.1) в рамках реализации Метода «С» системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП – 1, (см. Подраздел 3.3.2, рисунок 3.23) при предварительной тарировке тензометрического элемента ИП-1 в соответствии с Методом градуировки тензометрических элементов (см. Подраздел 3.4.1).

#### **4.4.1. Обработка и анализ результатов третьего этапа экспериментальных исследований**

Полученные экспериментально значения горизонтальной  $P_g$ , боковой  $P_b$  и вертикальной  $P_v$  составляющих силы сопротивления ледового блока резанию дисковым резцом для каждой температурной точки, во всём рассматриваемом шага  $t$  резания были обработаны аналогично тому, как обрабатывались результаты первого этапа экспериментальных исследований (см. Подраздел 4.2.3).



На основании статистически обработанных результатов всех испытаний, предусмотренных программой эксперимента, построены графики зависимости горизонтальной  $P_{\Gamma}$ , боковой  $P_{\text{б}}$  и вертикальной  $P_{\text{в}}$  составляющих силы сопротивления льда резанию от температуры  $t_{oc}$  окружающей среды при изменяющихся значениях шага  $t$  резания, выполнен расчет энергоемкости  $E$  процесса резания снежно-ледяного массива дисковым резцом для различных значений  $t_{oc}$  и  $t$  в соответствии с выражением (4.5), построены графики зависимости удельной энергоемкости  $E$  исследуемого процесса от температуры  $t_{oc}$  окружающей среды.

Важным этапом экспериментальных исследований являлся анализ характера изменения величины горизонтальной  $P_{\Gamma}$  составляющей силы сопротивления резанию в зависимости от температуры  $t_{oc}$  окружающей среды и параметров среза, так как значения  $P_{\Gamma}$  определяют величину  $E$ .

Графики зависимости горизонтальной  $P_{\Gamma}$  составляющей силы сопротивления резанию льда дисковым резцом от температуры  $t_{oc}$  окружающей среды при полублокированном резании в исследуемом диапазоне значений шага  $t$  резания представлены на рис. 4.27, 4.28.

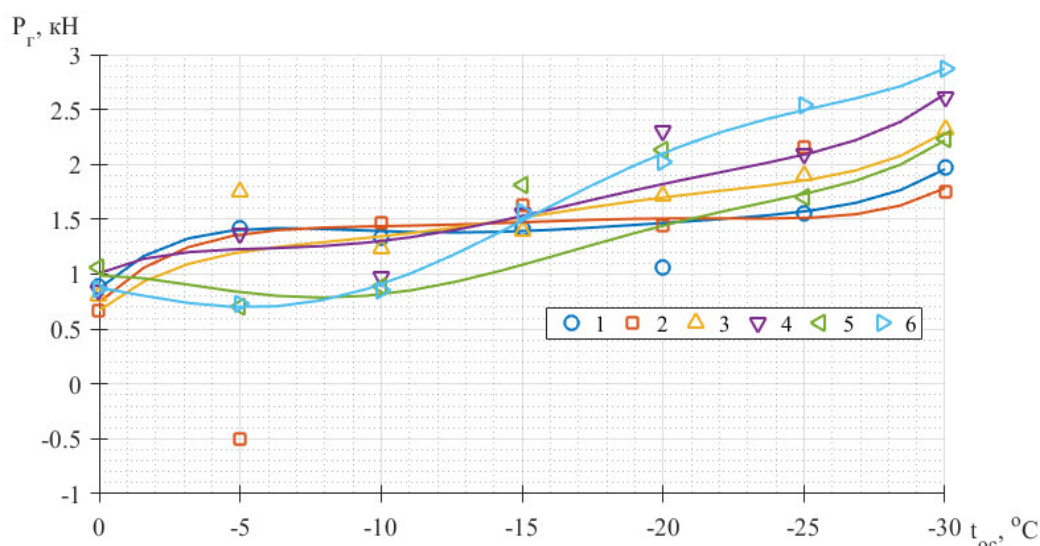


Рисунок 4.27. – Зависимость горизонтальной составляющей  $P_{\Gamma}$  силы сопротивления резанию от температуры  $t_{oc}$  окружающей среды: 1 – шаг резания  $t = 10$  мм; 2 – шаг резания  $t = 20$  мм; 3 – шаг резания  $t = 30$  мм; 4 – шаг резания  $t = 40$  мм; 5 – шаг резания  $t = 50$  мм; 6 – шаг резания  $t = 60$  мм

$$R^2 = 0.984$$

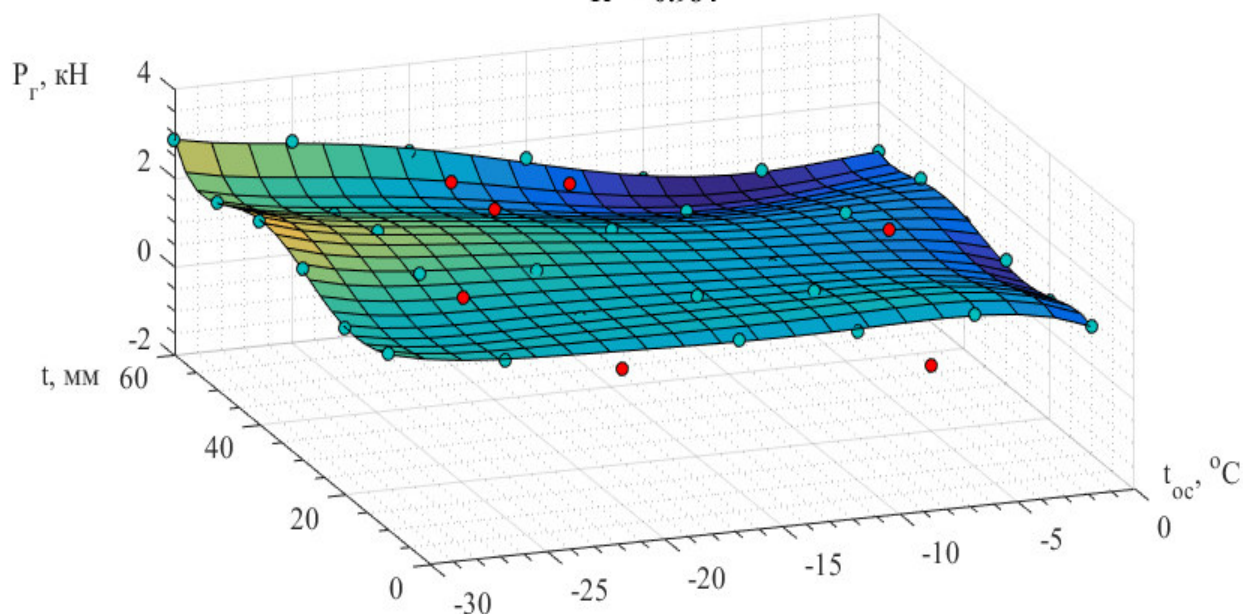


Рисунок 4.28. – Зависимость горизонтальной составляющей  $P_G$  силы сопротивления резанию от температуры  $t_{oc}$  окружающей среды и шага  $t$  резания

Результаты анализа представленных графиков свидетельствуют о существенном повышении значений горизонтальной составляющей  $P_G$  силы сопротивления резанию с понижением температуры  $t_{oc}$  окружающей среды: от значений в диапазоне  $P_G = 0,664 \div 1,067$  кН (ср. знач. 0,860 кН) при  $t_{oc} \approx 0$  °С, до значений  $P_G = 1,753 \div 2,865$  кН (ср. знач. 2,290 кН) при  $t_{oc} = -30$  °С, т.е. в 2,7 раза.

При этом наиболее резкий рост значений  $P_G$  имеет место при резании с шагом резания  $t = 10, 20, 30$  и  $40$  мм в диапазоне  $t_{oc} = 0 \div -5$  °С, и во всем исследуемом диапазоне шага резания от значения  $t_{oc} = -15$  °С и ниже. Температурной точке  $t_{oc} = -5$  °С соответствуют значения  $P_G = 0,702 \div 1,753$  кН (ср. знач. 0,911 кН), а  $t_{oc} = -15$  °С соответствуют значения  $P_G = 1,391 \div 1,814$  кН (ср. знач. 1,562 кН).

Примечательно то, что наименьшие значения  $P_G$  в диапазоне  $t_{oc} = 0 \div -15$  °С имеют место при резании с шагом  $t = 50$  мм, а с шагом  $t = 60$  мм – в диапазоне  $t_{oc} = 0 \div -20$  °С.

Очевидно, что *наиболее эффективное разрушение* прочных СЛО на очищаемых дорожных покрытиях при малых значениях силы  $P_{\Gamma}$  сопротивления резанию рабочими органами, оснащаемыми дисковым режущим инструментом, может осуществляться при организации уборочных работ *в диапазоне значений*  $t_{oc} = 0 \div -15^{\circ}\text{C}$ . Средние (для всего диапазона шага  $t$  резания) значения контролируемого параметра в указанном температурном диапазоне составляют  $P_{\Gamma} = 0,860 \div 1,562$  кН, а максимальные значения  $P_{\Gamma} = 1,067 \div 1,814$  кН.

Выполнение работ данного вида при более низких температурах в диапазоне  $t_{oc} = -15 \div -30^{\circ}\text{C}$  будет сопровождаться значительным повышением значений  $P_{\Gamma}$ , и как следствие, ростом динамических нагрузок на режущий инструмент и рабочий орган в целом, что наряду с ростом энергоемкости процесса может привести к быстрому изнашиванию, поломкам инструмента и несущих его опор.

Средние (для всего диапазона шага  $t$  резания) значения контролируемого параметра в указанном температурном диапазоне составляют  $P_{\Gamma} = 1,562 \div 2,292$  кН, а максимальные значения  $P_{\Gamma} = 1,814 \div 2,865$  кН.

Дополнительному росту значений  $P_{\Gamma}$  будет способствовать и повышение скорости резания от значения  $V = 0,5$  м/с и выше (см. Подраздел 4.3.1).

С учетом вышесказанного, при выборе базовой машины, несущей снегоочистительное рабочее оборудование, оснащаемое дисковым режущим инструментом следует оценить ее тяговые возможности и предусмотреть некоторый *запас силы тяги* ( $T$ , кН), достаточный для эффективного выполнения работ по очистке покрытий от прочных СЛО в случае вынужденного их проведения в условиях низких температур в диапазоне  $t_{oc} = -15 \div -30^{\circ}\text{C}$ .

На основании результатов расчета по формуле (4.5) удельных затрат энергии на резание прочных СЛЮ дисковым резцом диаметром  $D = 200$  мм при различных значениях  $P_T$  в соответствующих температурных точках в диапазоне  $t_{oc} = 0 \div -30$  °C во всем рассматриваемом диапазоне шага  $t$  резания построены графические зависимости удельной энергоемкости  $E$  (кВт·ч/м<sup>3</sup>) исследуемого процесса от температуры  $t_{oc}$  окружающей среды (рисунок 4.29).

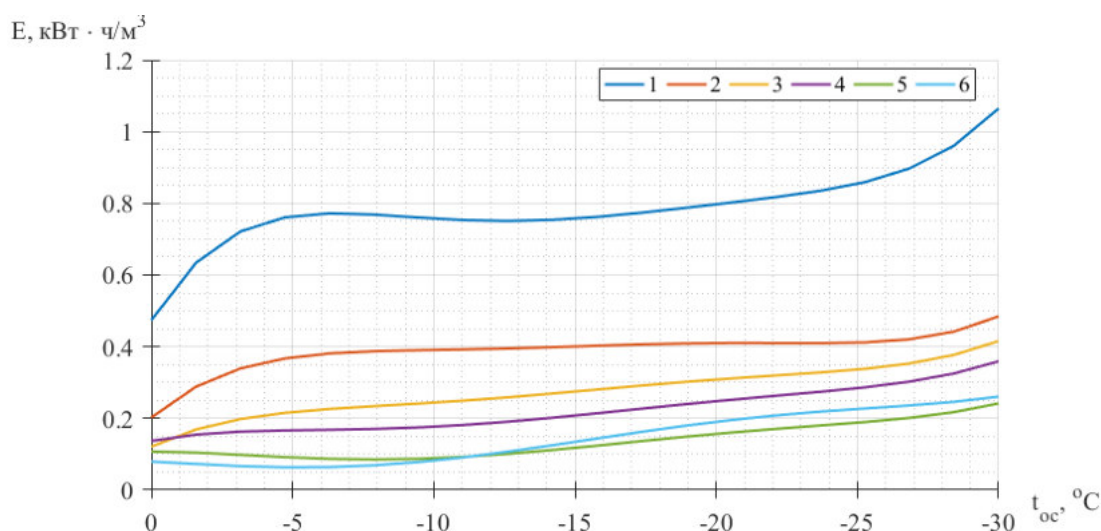


Рисунок 4.29. – Зависимость удельной энергоемкости процесса резания от температуры  $t_{oc}$  окружающей среды: 1 – шаг резания  $t = 10$  мм; 2 – шаг резания  $t = 20$  мм; 3 – шаг резания  $t = 30$  мм; 4 – шаг резания  $t = 40$  мм; 5 – шаг резания  $t = 50$  мм; 6 – шаг резания  $t = 60$  мм

Результаты анализа полученных графиков свидетельствует о существенном увеличении значений  $E$  при резании с шагом  $t = 30, 40, 50$  и  $60$  мм при температуре  $t_{oc} = -15$  °C и ниже. При резании с шагом  $t = 20$  мм значения  $E$  остаются стабильными в диапазоне значений  $t_{oc} = -10 \div -25$  °C.

Высокие значения  $E$  при резании с шагом  $t = 10$  мм во всем исследуемом диапазоне низких температур  $t_{oc}$  объясняется тем, что такое резание ледового массива осуществляется при малой площади контакта разрушаемого материала с боковой поверхностью резца, что способствует увеличению удельной нагрузки, приходящейся на единицу площади боковой

поверхности инструмента взаимодействующей со льдом. Следовательно, для обеспечения сдвига элементарных базисных пластин кристаллов льда, приводящего к растрескиванию и разрушению ледового массива, требуются большие затраты энергии.

Однако при разработке схем размещения дискового инструмента на рабочих органах следует предпочесть большие значения шага резания  $t = 30, 40, 50$  и  $60$  мм, как обеспечивающие большую толщину срезаемой стружки разрушаемого материала, а следовательно и более высокую производительность разрабатываемого оборудования. При этом также уменьшится необходимое для размещения на рабочем органе количество единиц режущего инструмента при заданной ширине захвата и общая металлоемкость оборудования.

Основным итогом сказанного выше является подтверждение *целесообразности организации работ* по очистке дорожных покрытий от прочных СЛЮ с использованием высокоэффективного снегоочистительного оборудования, оснащаемого дисковым инструментом при температуре окружающей среды (воздуха) в *диапазоне значений*  $t_{oc} = 0 \div -15$  °С, т. е. в тех же температурных условиях, при которых обеспечивается разрушение прочных СЛЮ с малыми значениями  $P_{\Gamma}$  силы сопротивления данной среды резанию дисковым инструментом (рисунки 4.27, 4.28). Средние (для всего диапазона шага  $t$  резания, не включая  $t = 10$  мм) значения удельной энергоемкости процесса в указанном температурном диапазоне составят соответственно  $E = 0,108 \div 0,208$  кВт ч/м<sup>3</sup>.

При  $t_{oc} = -30$  °С значение данного параметра (для всего диапазона шага  $t$  резания, не включая  $t = 10$  мм) достигает  $E = 0,294$  кВт ч/м<sup>3</sup>, т.е. в 2,7 раза выше по сравнению со значением данного параметра при  $t_{oc} = 0$  °С.

#### **4.5 Оценка степени влияния радиуса закругления рабочей (режущей) кромки дискового инструмента на силовые и энергетические показатели процесса разрушения льда таким инструментом**

Необходимость группового использования в конструкциях рабочих органов землеройно-транспортных, дорожных, сельскохозяйственных и других машин, одиночного режущего инструмента (таблица 3.1.) обусловлена значительной прочностью сред, подлежащих разработке этим оборудованием: мерзлых и немерзлых грунтов, почв, горных пород, прочных СЛО и др., а также их высокой абразивностью.

Взаимодействие режущего инструмента с такими средами сопровождается его изнашиванием, зачастую весьма интенсивным. Следствием изнашивания является изменение формы и размеров, веса инструмента, затупление режущих кромок.

Такого рода изменения режущего инструмента оказывают существенное влияние на характер процесса его взаимодействия с разрушаемой средой – наблюдается значительное увеличение силы сопротивления разрабатываемой среды резанию, повышение энергоемкости процесса и снижение производительности рабочего оборудования, в том числе и за счет уменьшения размеров стружки материала, отделяемой от массива. При этом имеют место повышенные нагрузки конструктивных элементов базовых машин, несущих указанное рабочее оборудование [202, 203, 204].

Поэтому меры по своевременной замене, восстановительному ремонту, ограничению износа и затупления режущего инструмента позволят улучшить условия работы исполнительных органов, повысить эффективность работы такого оборудования.

В рамках серии исследовательских работ, направленных на разработку высокоэффективного снегоочистительного оборудования оснащаемого

дисковым режущим инструментом необходимо на стадии проектирования иметь информацию о влиянии на силовые параметры такого оборудования и его производительность основных, изменяющихся при изнашивании инструмента его геометрических параметров – радиуса закругления рабочей кромки (рисунок 3.2) и диаметра резца.

*Оценка степени влияния диаметра инструмента, уменьшающегося по мере его износа, на силовые параметры и производительность разрабатываемого оборудования в рамках данного этапа исследований не производилась, так как решение данной задачи требует выполнения больших объемов исследовательских работ по дополнительной программе.*

Основной целью серии экспериментальных лабораторных исследований данного (четвертого) этапа исследовательских работ являлось установление закономерностей влияния радиуса закругления рабочей (режущей) кромки дискового инструмента на величину силы сопротивления резанию и величину удельной энергоемкости процесса механического разрушения льда дисковым режущим инструментом.

Это необходимо для обоснования на стадии проектирования приемлемых для практического использования по условию минимизации энергетических затрат значений радиуса  $R$  закругления рабочей кромки инструмента и технологических параметров оснащаемого им перспективного высокоэффективного снегоочистительного оборудования.

Работы данного этапа экспериментальных лабораторных исследований в соответствии с темой раздела 4.5 проводились на базе учебно-научной лаборатории «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур» (см. Раздел 3.6) в ее обновленной версии – на базе контейнера – рефрижератора *CARRIER* (рис. 3.42 – 3.46).

Разрушаемый материал – блоки, изготовленные из природного пресноводного льда (рисунок 4.10), содержащие в поверхностных слоях

структуру № 9 (рисунок 1.3). Размеры ледяных блоков, подготовленных к установке на МППО лабораторного стенда, приведены в таблице 3.3.

В качестве режущего инструмента с *номинальными* размерами принят заостренный дисковый резец типа А в форме усеченного конуса (рисунки 3.1а, 3.2, 4.2), диаметром  $D = 225$  мм, углом заострения  $\delta = 30^\circ$ , величиной радиуса закругления рабочей кромки  $R \approx 0,00$  мм.

Различные стадии износа инструмента имитированы дисковыми резцами, изготовленными с радиусом закругления рабочей кромки разной величины. Комплект такого инструмента (рисунок 4.30), включающий шесть единиц, также как и первый комплект (рисунок 4.2), был изготовлен в Производственно-экспериментальном центре ОАО «Красноярский ПромстройНИИпроект» по чертежам, выполненным автором.

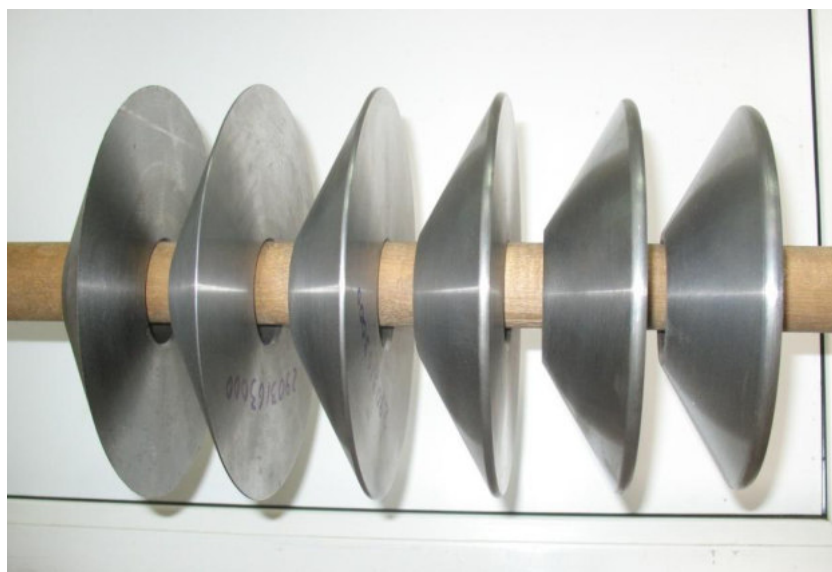


Рисунок 4. 30. — Дисковые резцы с различной величиной радиуса закругления рабочей кромки – слева направо:  $R_{кр} = 0,0; 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5$  мм

Величина радиуса закругления рабочей кромки инструмента из этого комплекта, в направлении слева направо составляет соответственно  $R_{кр} = 0,0; 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5$  мм. Первым слева изображен дисковый резец с номинальными размерами.



Материал инструмента – сталь 40ХН ГОСТ 4543-71 без термообработки, с твердостью по шкале Роквелла *HRC* 53.

Результаты взвешивания резцов данного комплекта на весах ПВм – 3/32 [46], диаметры резцов и данные о потере веса инструментом по мере его износа представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7. – Основные параметры дисковых резцов использовавшихся в работе

Резец (рис. 4. 30)	1	2	3	4	5	6
Радиус закругления рабочей кромки $R_{кр}$ , мм	≈ 0,0	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
Масса, кг	5,731	5,728	5,702	5,651	5,577	5,481
Диаметр резца, мм	225,00	222,30	216,80	211,30	205,90	200,40
Потеря веса инструментом по мере износа, кг	0,000	0,003	0,029	0,080	0,154	0,250

Глубина резания  $h = 60$  мм. Это значение выдерживалось постоянным не зависимо от уменьшения диаметра инструмента по мере его износа, которое компенсировалось изменением положения ледяного блока по высоте при его установке на МППО лабораторного стенда. Для этого использовались калиброванные стальные пластины (рисунок 3.7) и прокладки различной толщины из других подручных материалов, устанавливаемые под нижнюю грань ледяного блока, размещенного на несущей плите МППО.

Некоторым увеличением диаметра неизношенного резца (с номинальными параметрами) по сравнению с диаметром резцов первого комплекта (рисунок 4.2), составляющего 200 мм, обеспечивается расстояние от нижнего торца П – образного кронштейна до крайней нижней точки резца (рисунок 3.19), имеющего максимальный износ, достаточное для того, чтобы при погружении такого инструмента на глубину 60 мм исключалось взаимодействие нижнего торца стойки П – образного кронштейна с поверхностью разрушаемого ледяного блока. Так при использовании

наиболее изношенного дискового резца ( $R_{кр} = 4,5$  мм), с остаточным диаметром 200,41 мм (таблица 4.7), погруженного на глубину 60 мм, величина зазора между нижним торцом стойки П – образного кронштейна и поверхностью ледяного блока составит примерно 10,2 мм. Этим исключается всяческое взаимодействие элементов кронштейна и разрушаемого материала, обеспечивается достаточно высокая точность измерений и чистота эксперимента.

Шаг резания  $t$  (толщина срезаемой стружки) составил 10, 20, 30, 40 и 50 мм. При этом соблюдалось условие  $t \leq h$ , так как предполагается, что резцами, размещаемыми на рабочих органах, будет обеспечиваться разрушение льда по полублокированной схеме, требующей меньших затрат энергии. В случае же когда шаг резания превышает его глубину, имеет место более энергоемкая блокированная схема резания.

Величина заднего угла (ушла атаки)  $\gamma$ , образуемого большей торцовой поверхностью дискового резца с плоскостью резания, принималась в диапазоне значений  $3 - 5^\circ$ . В этом случае обеспечивается достаточно широкая рабочая зона резца и уменьшается площадь трения нижней торцовой поверхности резца о забой.

Скорость резания (скорость перемещения тензометрического элемента, несущего резец на оси П – образного кронштейна) при испытаниях составила 0,51 м/с (1,84 км/ч). В рамках данного этапа работы это условие можно считать достаточным в силу того, что такая скорость резания практически не влияет на величину значений составляющих силы сопротивления резанию (см. подраздел 4.2.2).

Испытания проводились при температуре окружающего воздуха от минус 2 до минус 6 °С, что обеспечивалось морозильной камерой нового лабораторного помещения.

В преддверии каждого исследовательского дня предварительно заготовленные ледяные блоки в необходимом количестве помещались в

морозильную камеру с установленным в ней лабораторным стендом (рисунок 3.46) куда также помещался и твердомер (рисунок 2.10). Перед началом каждой серии опытов заблаговременно до назначенного дня проведения испытаний все элементы системы «лабораторный стенд – образцы разрушаемой среды – средства контроля ФМС разрушаемой среды» выдерживались при заданной температуре не менее трех суток.

Температура воздуха внутри морозильной камеры предварительно задавалась с пульта управления контейнера – рефрижератора, расположенного на его задней тыльной стороне, с ориентировкой на показания встроенного дисплея. Корректировка значений температуры осуществлялась с учетом показаний ртутного термометра ТЛ – 4 №1 (ГОСТ 27544 – 87) [188], размещенного непосредственно в морозильной камере. Цена деления шкалы данного термометра  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , предел измерения от минус  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Температура внутри массива каждого ледового образца измерялась при помощи термопары, вмороженной в шпур. Термопара подключалась к цифровому мультиметру *UT – 33B/C/D* [174], с монитора, которого и считывались значения температуры (рис. 4.11).

Один ледяной блок из серии блоков, подготовленных к экспериментам подвергался испытаниям на прочность при помощи твердомера (рисунок 2.10) в соответствии с методом контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог (см. Раздел 2.3).

Значения температуры воздуха, температуры внутри массива ледового образца и значения глубины погружения конического наконечника твердомера в тело ледяного блока заносились в протокол испытаний.

Резание ледяных блоков осуществлялось каждым из резцов с соответствующим радиусом закругления рабочей кромки (рисунок 4.30) во всем исследуемом диапазоне шага резания.

Все действия коллектива испытателей были организованы в соответствии с Методикой лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой (см. Подраздел 3.2.1) в рамках реализации Метода «D» системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП-1, (см. Подраздел 3.3.2, рисунок 3.23) при предварительной тарировке тензометрического элемента ИП-1 в соответствии с Методом градуировки тензометрических элементов (см. Подраздел 3.4.1).

#### **4.5.1. Обработка и анализ результатов четвертого этапа экспериментальных исследований**

Полученные экспериментально значения горизонтальной  $P_g$ , боковой  $P_b$  и вертикальной  $P_v$  составляющих силы сопротивления ледового блока резанию дисковым резцом во всём рассматриваемом диапазоне значений радиуса  $R_{кр}$  закругления режущей кромки дискового резца и диапазоне шага резания  $t$  были обработаны аналогично тому, как обрабатывались результаты первого этапа экспериментальных исследований (см. подраздел 4.2.3).

На основании статистически обработанных результатов всех испытаний, предусмотренных программой эксперимента, построены графики зависимости горизонтальной  $P_g$ , боковой  $P_b$  и вертикальной  $P_v$  составляющих силы сопротивления льда резанию от радиуса  $R_{кр}$  закругления режущей кромки дискового инструмента при изменяющихся значениях шага  $t$  резания, выполнен расчет удельной энергоёмкости  $E$  процесса резания ледяного массива дисковым резцом для различных значений  $R_{кр}$  и  $t$  в соответствии с выражением (4.5), построены графики зависимости удельной энергоёмкости  $E$  исследуемого процесса от значений  $R_{кр}$ .

Важным этапом экспериментальных исследований являлся анализ характера изменения величины горизонтальной  $P_r$  составляющей силы сопротивления резанию в зависимости от значений радиуса  $R_{кр}$  закругления рабочей кромки дискового инструмента и параметров среза, так как значения  $P_r$  определяют величину  $E$ .

Графики зависимости горизонтальной  $P_r$  составляющей силы сопротивления резанию льда дисковым резцом от значений радиуса  $R_{кр}$  закругления режущей кромки дискового инструмента при полублокированном резании в исследуемом диапазоне значений шага  $t$  резания представлены на рисунках 4.31, 4.32.

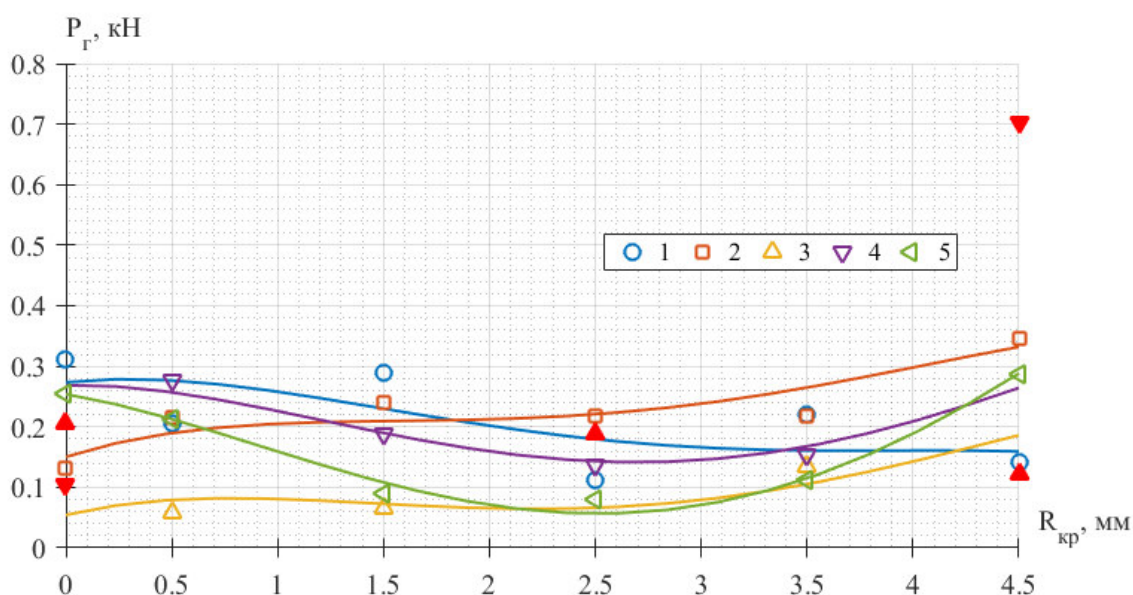


Рисунок 4.31. – Зависимость горизонтальной составляющей  $P_r$  силы сопротивления резанию от значений радиуса  $R_{кр}$  закругления рабочей кромки: 1 – шаг резания  $t = 10$  мм; 2 – шаг резания  $t = 20$  мм; 3 – шаг резания  $t = 30$  мм; 4 – шаг резания  $t = 40$  мм; 5 – шаг резания  $t = 50$  мм

Из графиков видно, что зависимости исследуемых величин не являются линейными. Изменение  $R_{кр}$  от значений близких нулю до 0,5 мм сопровождается некоторым снижением значений  $P_r$  при резании с шагом  $t = 10$ , 40 и 50 мм, и увеличением значений  $P_r$  при резании с шагом  $t = 20$  и 30 мм.

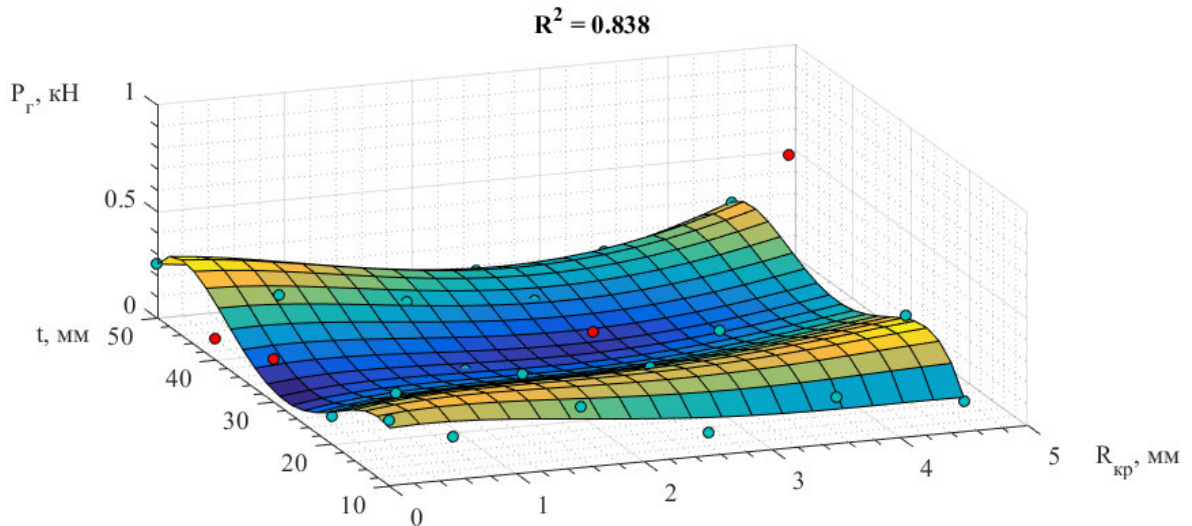


Рисунок 4.32. –Зависимость горизонтальной составляющей  $P_T$  силы сопротивления резанию от значений радиуса  $R_{кр}$  закругления рабочей кромки и шага  $t$  резания

Средние для всего диапазона шага резания значения  $P_T$  уменьшаются незначительно: от  $P_T = 0,210$  кН при  $R_{кр} = 0$  мм, до  $P_T = 0,194$  кН при  $P_T = 0,5$  мм.

Здесь следует отметить, что испытание дискового резца с  $R_{кр} = 0$  мм наряду с резцами, имеющими иные значения данного параметра, предусматривалось программой экспериментальных исследований данного этапа с целью получения в лабораторных условиях более полной информации о степени влияния  $R_{кр}$  на значения составляющих силы  $P$  сопротивления резанию прочных СЛЮ испытываемым инструментом.

В реальных условиях эксплуатации велика вероятность быстрого притупления рабочей кромки такого инструмента уже в начальный период работы, что будет сопровождаться и увеличением значений  $R_{кр}$ .

По этой причине, авторы работы [92], исследовавшие влияние радиуса закругления рабочей кромки дисковых шарошек на силу сопротивления горных пород резанию этим инструментом, в преддверии выполнения серии опытов с регистрацией получаемых результатов, предварительно «обкатывали» новый острый инструмент до достижения значений  $R_{кр} = 1,0$

мм, а в некоторых случаях до  $R_{кр} = 1,5$  мм. Данные значения принимались как минимально приемлемые для практического использования.

В рассматриваемом случае применительно к прочным СЛЮ, в силу существенно меньшей их прочности по сравнению с горными породами, целесообразно принять в качестве *минимально приемлемого* для практического использования, значение  $R_{кр} = 0,5$  мм.

При увеличении значений радиуса закругления режущей кромки от  $R_{кр} = 0,5$  мм до  $R_{кр} = 1,5$  мм и  $R_{кр} = 2,5$  мм (рисунок 4.31) наблюдается снижение средних для всего диапазона шага резания значений горизонтальной составляющей контролируемой силы соответственно до  $P_r = 0,174$  кН и  $P_r = 0,147$  кН.

Дальнейшее увеличение радиуса закругления режущей кромки инструмента до значений  $R_{кр} = 3,5$  мм и  $R_{кр} = 4,5$  мм сопровождается ростом  $P_r$  до значений  $P_r = 0,168$  кН и  $P_r = 0,320$  кН соответственно.

Очевидно, что *минимальные* для всего исследуемого диапазона  $R_{кр}$  значения  $P_r$  имеют место при  $R_{кр} = 2,5$  мм –  $P_r = 0,147$  кН. Это в 1,4 раза ниже значений  $P_r$ , получаемых при использовании дискового инструмента с  $R_{кр} = 0,0$  мм, и в 2,2 раза ниже по сравнению со значениями  $P_r$ , получаемыми при использовании дискового инструмента с  $R_{кр} = 4,5$  мм.

Соизмеримыми являются значения  $P_r$ , получаемые при использовании дискового инструмента с  $R_{кр} = 1,5$  мм и  $R_{кр} = 3,5$  мм, соответственно  $P_r = 0,174$  кН и  $P_r = 0,168$  кН.

При выборе приемлемых для практического использования значений  $R_{кр}$  из условия наименьших значений  $P_r$  следует учитывать и пространственное положение инструмента, размещаемого на рабочем органе, относительно забоя.

Так при полублокированном резании инструментом с горизонтальной осью вращения, что соответствует условиям проведения эксперимента, приемлемые для практического использования значения исследуемого

параметра могут находиться в диапазоне  $R_{кр} = 0,5 \div 3,5$  мм, умеренно малые значения  $P_r$  будут иметь место в диапазоне  $R_{кр} = 1,5 \div 3,5$  мм, а наименьшие значения  $P_r$  – в диапазоне  $R_{кр} = 2,0 \div 3,0$  мм.

Однако по мере увеличения радиуса закругления рабочей кромки режущего инструмента существенно затрудняется или вовсе исключается возможность зарезания и заглабления последнего в разрабатываемый массив с последующим его разрушением, возрастает вероятность существенного увеличения вертикальной  $P_v$  и (или) боковой  $P_b$  составляющих силы сопротивления резанию.

В случае размещения инструмента на горизонтальной оси вращения погружение даже затупленного резца в разрабатываемый массив будет осуществляться за счет веса базовой машины, компенсирующего воздействие, например, вертикальной составляющей  $P_v$  измеряемой силы. Однако при этом возрастут и динамические нагрузки на инструмент, несущие его опоры и рабочий орган в целом. Дополнительному росту значений силы  $P$  сопротивления резанию будет способствовать и повышение скорости резания от значения  $V = 0,5$  м/с и выше (см. Подраздел 4.3.1).

Поэтому в данном случае *приемлемые для практического применения значения  $R_{кр}$*  следует ограничить диапазоном  $R_{кр} = 0,5 \div 2,5$  мм.

В случае же размещения на оси, имеющей положение близкое к вертикальному (с отклонением от вертикали на угол  $\gamma$ ) дисковый инструмент с большими значениями  $R_{кр}$  будет проскальзывать по поверхности массива, подлежащего разрушению без зарезания и заглабления в него.

Это делает несостоятельной идею интенсификации существующего снегоочистительного оборудования, например, отвального типа, за счет группового использования дискового режущего инструмента и будет способствовать снижению эффективности использования новых рабочих органов, оснащаемых таким инструментом.



Поэтому в данном случае *приемлемые для практического применения значения*  $R_{кр}$  следует ограничить диапазоном  $R_{кр} = 0,5 \div 1,5$  мм.

Следует отметить, что при использовании дисковых резцов с большими значениями  $R_{кр}$  изменится и характер взаимодействия такого инструмента с разрушаемой средой – будет иметь место ударное разрушение материала инструментом округлой формы или разрушение раздавливанием, а не разрушение резанием инструментом клиновидной формы.

На основании результатов расчета по формуле (4.5) удельных затрат энергии на резание прочных СЛЮ дисковым режущим инструментом различного диаметра  $D$  и различными значениями радиуса  $R_{кр}$  закругления рабочей кромки (см. таблицу 4.7) при постоянной глубине  $h$  резания во всем рассматриваемом диапазоне шага  $t$  резания построены графические зависимости удельной энергоемкости  $E$  (кВт·ч/м<sup>3</sup>) исследуемого процесса от значений  $R_{кр}$  (рисунок 4.33).

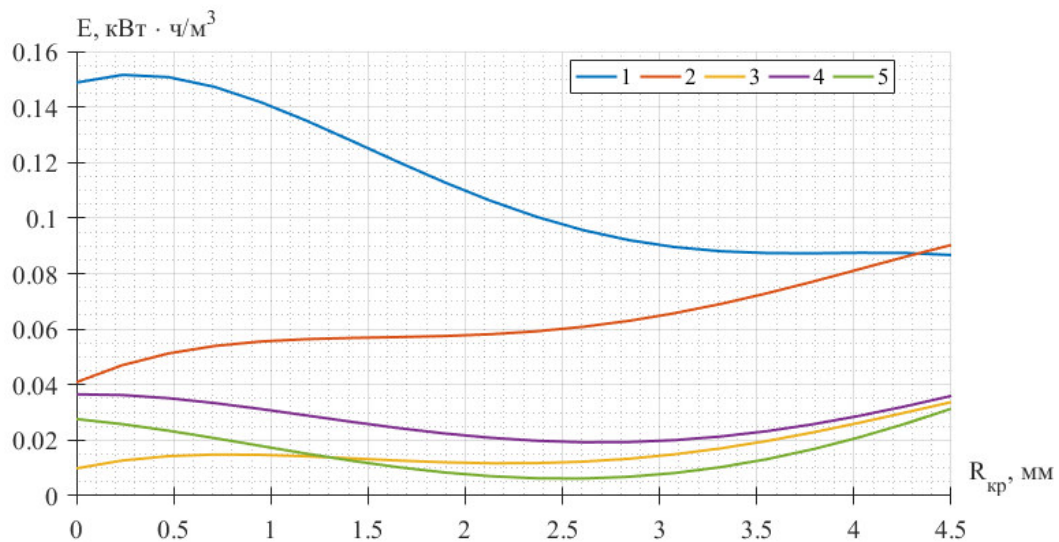


Рисунок 4.33. – Зависимость удельной энергоемкости процесса резания от значений радиуса  $R_{кр}$  закругления рабочей кромки: 1 – шаг резания  $t = 10$  мм; 2 – шаг резания  $t = 20$  мм; 3 – шаг резания  $t = 30$  мм; 4 – шаг резания  $t = 40$  мм; 5 – шаг резания  $t = 50$  мм

Результаты анализа полученных графиков свидетельствуют о высоких значениях  $E$  при резании с шагом  $t = 10$  и  $t = 20$  мм. Это объясняется тем, что такое резание ледового массива осуществляется при малой площади контакта разрушаемого материала с боковой поверхностью резца и поверхностью его рабочей кромки, что способствует увеличению удельной нагрузки, приходящейся на единицу площади поверхностей инструмента взаимодействующих со льдом. Следовательно, для обеспечения сдвига элементарных базисных пластин кристаллов льда, приводящего к растрескиванию и разрушению ледового массива, требуются большие затраты энергии.

Однако при разработке схем размещения дискового инструмента на рабочих органах следует предпочесть большие значения шага резания  $t = 30$ , 40 и 50 мм, как обеспечивающие большую толщину срезаемой стружки разрушаемого материала, а следовательно и более высокую производительность разрабатываемого оборудования. При этом также уменьшится необходимое для размещения на рабочем органе количество единиц режущего инструмента при заданной ширине захвата и общая металлоемкость оборудования.

Все вышесказанное свидетельствует о том, что при резании снежно – ледяного массива с шагом  $t = 30$ , 40 и 50 мм дисковым инструментом с горизонтальной осью вращения и имеющим радиус закругления рабочей кромки в диапазоне приемлемых для практического применения значения  $R_{кр} = 0,5 \div 2,5$  мм, наименьшие значения удельной энергоёмкости процесса  $E = 0,025 \div 0,027$  кВт ч/м<sup>3</sup> следует ожидать при  $R_{кр} = 2,0 - 2,5$  мм.

При резании снежно – ледяного массива с шагом  $t = 30$ , 40 и 50 мм дисковым инструментом размещенным на оси имеющей положение близкое к вертикальному (с отклонением от вертикали на угол  $\gamma$ ) и радиусом закругления рабочей кромки в диапазоне приемлемых в этом случае для практического применения значения  $R_{кр} = 0,5 \div 1,5$  мм, наименьшие значения

удельной энергоемкости процесса  $E \approx 0,040$  кВт ч/м<sup>3</sup> следует ожидать при  $R_{кр} = 1,5$  мм.

#### **4.6 Экспериментальные лабораторные исследования процессов взаимодействия снегоочистительного оборудования отвального типа с уплотненным снегом**

Средствами реализации механического способа зимнего содержания дорожных и аэродромных покрытий, получившими наиболее широкое применение на практике являются рабочие органы отвального типа (плуги, отвалы) которыми оснащаются плужно-щеточные снегоочистители и аэродромные уборочные машины, автогрейдеры различных типов.

Широкое применение таких рабочих органов обусловлено простотой их конструкции, высокой производительностью машин, оснащаемых такими рабочими органами, простотой технического обслуживания, монтажа и демонтажа, низкой себестоимостью выполнения работ и возможностью использования для разработки материалов с различными физико-механическими свойствами [83].

Наиболее эффективным рабочим органом, обеспечивающим механическое разрушение плотного и сильно уплотненного снежного покрова с последующим сдвигом продуктов разрушения в сторону, является основной отвал автогрейдера.

Результаты анализа литературно-патентных источников свидетельствуют о недостаточной изученности процессов взаимодействия рабочих органов отвального типа с уплотненными снежными отложениями.

Задачи более глубокого изучения этих процессов, оценки степени влияния технологических параметров рабочего оборудования: угла резания и угла установки отвала в плане, а также и параметров среза: глубины резания и ширины захвата отвала на величины составляющих силы сопротивления

уплотненного снега резанию отвалом, являются актуальными. Актуальность этих задач обусловлена постоянным ростом объемов работ зимнего содержания дорожных и аэродромных покрытий в связи с ежегодно увеличивающейся протяженностью сети автомобильных дорог, ростом интенсивности дорожного движения, увеличением числа аэродромов региональной авиации.

Основной целью серии экспериментальных лабораторных исследований данного (пятого) этапа работ являлось установление закономерностей изменения значений силы  $P$  сопротивления уплотненного снега (плотностью  $\rho = 0,40 \div 0,50 \text{ г/см}^3$ ) резанию отвальным рабочим органом, а также и удельной энергоемкости  $E$  процесса в зависимости от величины угла резания  $\beta$  и угла  $\alpha$  установки отвала в плане при изменяющихся параметрах среза: глубине  $h$  резания и ширине  $B$  захвата отвала.

Это необходимо для обоснования рациональных с позиции минимизации энергетических затрат и ожидаемого повышения производительности, технологических параметров снегоочистительного оборудования отвального типа. Предполагается, что при установке таких параметров механическое разрушение уплотненного снега отвалом будет производиться при малой энергоемкости процесса с одновременным повышением производительности базовой машины, несущей такое оборудование.

Выбор автогрейдера в качестве базовой машины, несущей отвальный рабочий орган обусловлен универсальностью конструкции этой машины, обеспечивающей установку основного полноповоротного отвала в различных пространственных положениях в большом диапазоне значений угла резания и угла установки отвала в плане. Кроме того, такие машины имеют достаточно высокую мощность силовых установок, большой сцепной вес и шасси на пневмоколесном ходу. В частности, автогрейдер ГС 10.06 широко

используется дорожно-эксплуатационными организациями для очистки дорожных покрытий от уплотненного снега (плотностью до  $0,6 \text{ г/см}^3$ ) в районах РФ с суровыми климатическими условиями.

Работы данного этапа экспериментальных лабораторных исследований в соответствии с темой раздела 4.6 проводились на базе учебно-научной лаборатории «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур» (см. раздел 3.6) размещавшейся в неотапливаемом металлическом автомобильном гараже, при следующих условиях.

Используемое основное лабораторное оборудование: измерительный преобразователь – тензометрический элемент ИП – 2 (рисунок 3.24, подраздел 3.3.3) в составе измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда (рисунок 3.4).

Испытуемый рабочий орган – масштабная модель основного полноповоротного отвала автогрейдера ГС 10.06 [70, 82], изготовленная в масштабе  $1 : 10$  с длиной режущей кромки  $L = 250 \text{ мм}$ , установленная на тензометрическом элементе ИП – 2 (рисунок 3.27).

Разрушаемый материал – блоки уплотненного снега, вырезанные из снежного наката действующей автомобильной дороги. Размеры блоков, подготовленных к установке на МППО лабораторного стенда, приведены в таблицу 3.3. Плотность снега в блоках, измеренная весовым методом в соответствии с подразделом 1.4.1. составляла  $\rho = 0,40 \div 0,45$  и  $\rho = 0,45 \div 0,50 \text{ г/см}^3$  ( $400 \div 450$  и  $450 \div 500 \text{ кг/м}^3$ ).

Один снежный блок из серии блоков, подготовленных к экспериментам подвергался испытаниям на прочность при помощи твердомера (рисунок 2.10) в соответствии с методом контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог (см. раздел 2.3).

Испытания проводились при температуре окружающего воздуха от минус 5 до минус 10 °С. При данных значениях температуры наиболее вероятно образование снежного наката на дорожных покрытиях.

Для производства исследовательских работ временные периоды (5 – 7 дней подряд) со стабильными значениями температуры и влажности воздуха выбирались на основании прогнозов погоды, публикуемых в официальных информационных источниках.

Измерение температуры воздуха производилось ртутным термометром ТЛ – 4 №1 (ГОСТ 27544 – 87) [188] с ценой деления 0,1 °С и пределом измерения от минус 30 до 20 °С.

Температура внутри массива каждого лабораторного образца измерялась при помощи термопары, погруженной в материал блока. Термопара подключалась к цифровому мультиметру *UT – 33B/C/D* [174], с монитора, которого и считывались значения температуры.

Значения температуры воздуха, температуры внутри массива лабораторного снежного образца и значения глубины погружения конического наконечника твердомера в тело блока заносились в протокол испытаний.

Скорость резания (скорость перемещения тензометрического элемента, несущего масштабную модель отвального рабочего органа) при испытаниях составила 0,51 м/с (1,84 км/ч). В рамках данного этапа работы это условие можно считать достаточным в силу того, что такая скорость резания практически не влияет на величину значений составляющих силы сопротивления резанию (см. подраздел 4.2.2). В реальных условиях эксплуатации такие скорости резания могут быть обеспечены автогрейдерами при движении на 1 – ой и 2 – ой передачах.

Глубина резания составляла  $h = 10, 20, 30$  и  $40$  мм.

Значения угла резания составляли:  $\beta = 15, 30, 45, 60, 75$  и  $90^\circ$ .

Значения угла установки отвала в плане (угла захвата) составляли:  $\alpha = 90, 60, 45$  и  $30^\circ$ .

Программа эксперимента включала четыре серии опытов, каждая из которых производилась при соответствующем, из четырех указанных выше, значении угла захвата  $\alpha$ . При каждом значении  $\alpha$  резание снежного блока масштабной моделью отвала осуществлялось во всем исследуемом диапазоне значений угла резания  $\beta$  при изменяющейся глубине резания  $h$ , ряд значений которой также указан выше.

Необходимое число опытов – близнецов, рассчитанное в соответствии с положениями раздела 4.1 составило четыре опыта.

Все действия коллектива испытателей были организованы в соответствии с Методикой лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой (см. подраздел 3.2.1), в рамках реализации Метода измерительного контроля силы сопротивления твердых менее прочных сред механическому разрушению масштабными моделями отвальных рабочих органов, с использованием измерительного преобразователя ИП-2 (см. подраздел 3.3.4), при предварительной тарировке тензометрического элемента ИП-2 в соответствии с адаптированным для этого устройства Методом градуировки тензометрических элементов (см. Подраздел 3.4.1, рисунки 3.29, 3.33).

#### **4.6.1. Обработка и анализ результатов пятого этапа экспериментальных исследований**

Полученные экспериментально значения горизонтальной  $P_g$ , боковой  $P_b$  и вертикальной  $P_v$  составляющих силы сопротивления уплотненного снега резанию масштабной моделью грейдерного отвала при изменяющихся значениях угла захвата  $\alpha$ , угла резания  $\beta$  и глубины резания  $h$  были

статистически обработаны аналогично тому, как обрабатывались результаты первого этапа экспериментальных исследований (см. подраздел 4.2.3).

На основе статистически обработанных результатов экспериментальных исследований, предусмотренных программой испытаний, построены графические зависимости горизонтальной  $P_g$ , боковой  $P_b$  и вертикальной  $P_v$  составляющих силы сопротивления уплотненного снега резанию отвалом при различных значениях угла захвата  $\alpha$ , от угла резания  $\beta$  и глубины резания  $h$ .

Данные графические зависимости для горизонтальной  $P_g$  составляющей силы сопротивления уплотненного снега (плотностью  $0,45 - 0,50 \text{ г/см}^3$ ) резанию приведены на рисунках 4.34 – 4.37.

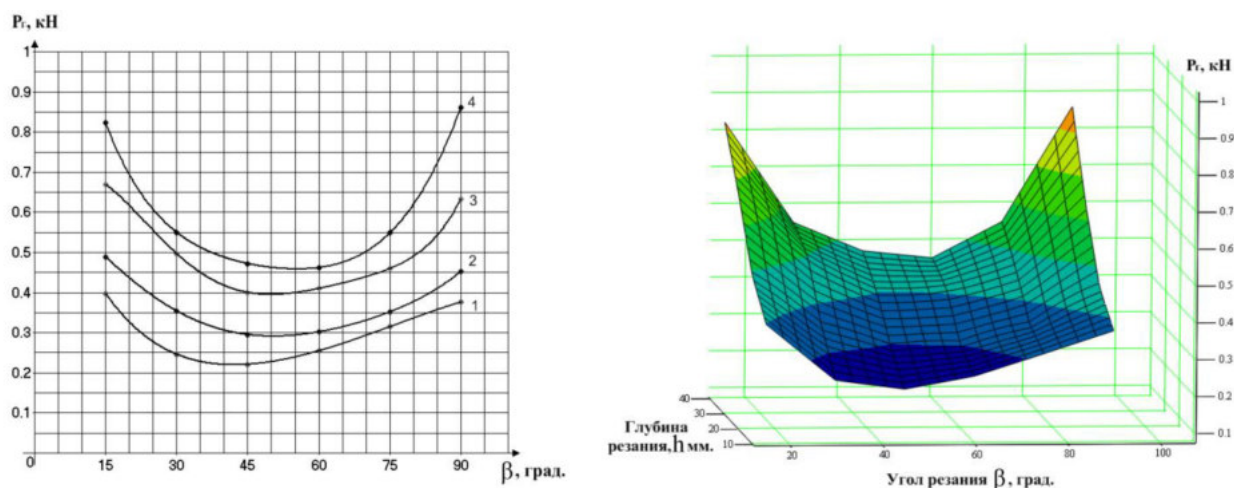


Рисунок 4.34. – Зависимость горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию уплотненного снега масштабной моделью отвала, установленной с углом захвата  $\alpha = 90^\circ$  от величины угла резания  $\beta$  и глубины резания  $h$ : 1, 2, 3, 4 – глубина резания соответственно  $h = 10, 20, 30, 40 \text{ мм}$

Графические зависимости указанных параметров для боковой  $P_b$  и вертикальной  $P_v$  составляющих, представлены и проанализированы в работе [165].

Анализ характера изменения величины горизонтальной  $P_g$  составляющей силы сопротивления резанию при изменяющихся значениях



угла захвата  $\alpha$ , от величины угла резания  $\beta$  и глубины резания  $h$  при выполнении данного этапа работы представляет особый интерес, так как именно значения горизонтальной составляющей в значительной мере определяют и величину удельной энергоемкости процесса резания уплотненного снега отвальным рабочим органом, рассчитываемую в соответствии с выражением (4.5).

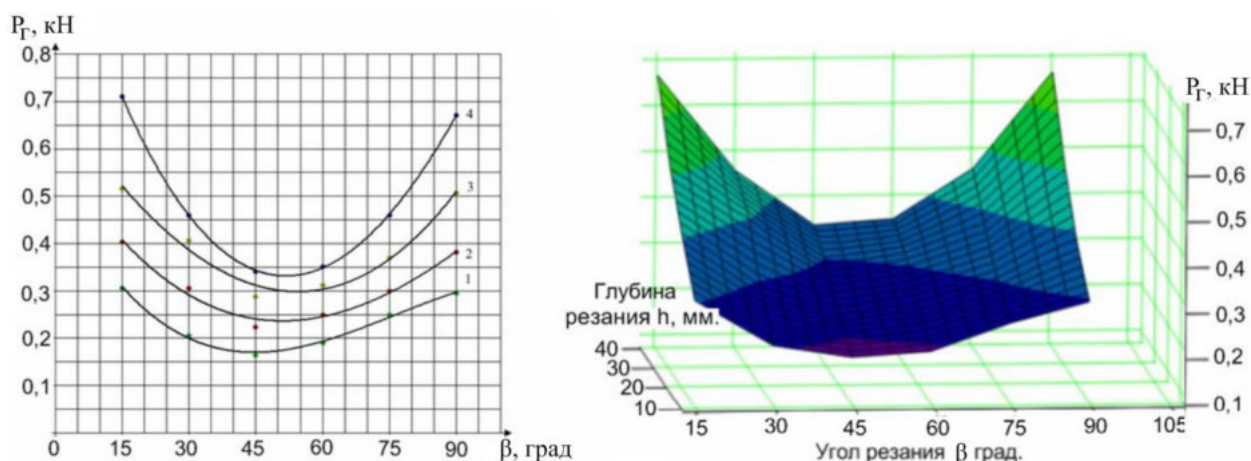


Рисунок 4.35. – Зависимость горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию уплотненного снега масштабной моделью отвала, установленной с углом захвата  $\alpha = 60^\circ$  от величины угла резания  $\beta$  и глубины резания  $h$ : 1, 2, 3, 4 – глубина резания соответственно  $h = 10, 20, 30, 40$  мм

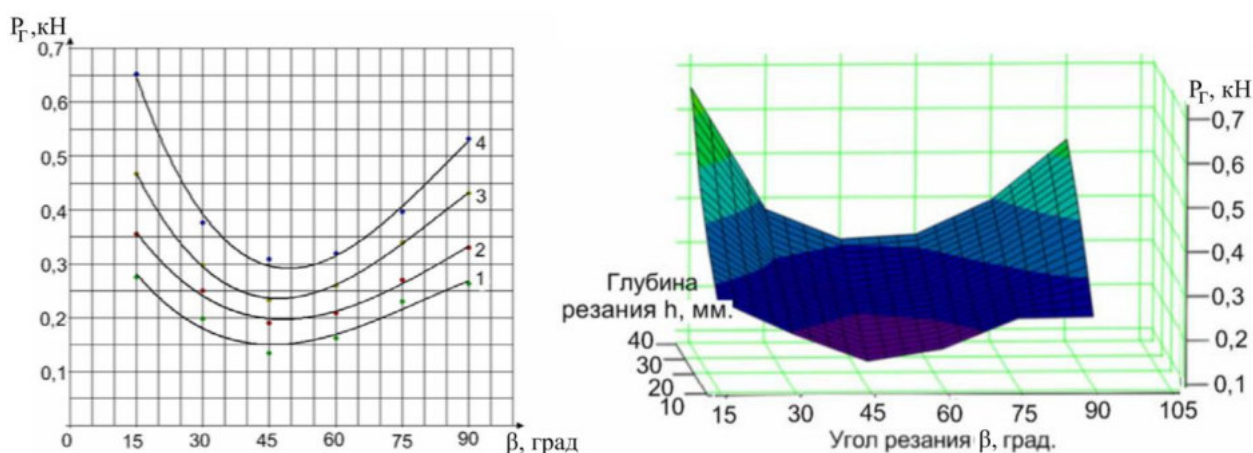


Рисунок 4.36. – Зависимость горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию уплотненного снега масштабной моделью отвала, установленной с углом захвата  $\alpha = 45^\circ$  от величины угла резания  $\beta$  и глубины резания  $h$ : 1, 2, 3, 4 – глубина резания соответственно  $h = 10, 20, 30, 40$  мм

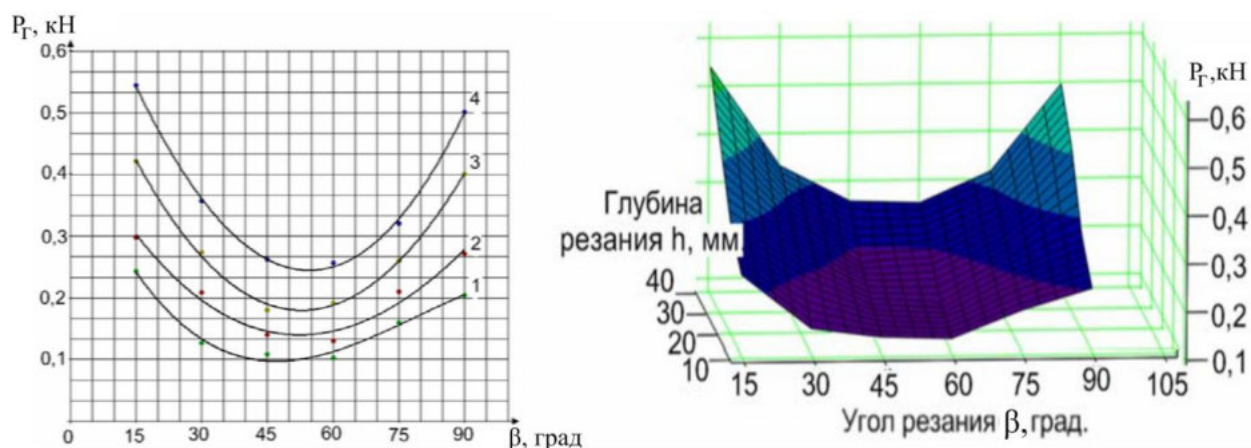


Рисунок 4.37. – Зависимость горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию уплотненного снега масштабной моделью отвала, установленной с углом захвата  $\alpha = 30^\circ$  от величины угла резания  $\beta$  и глубины резания  $h$ : 1, 2, 3, 4 – глубина резания соответственно  $h = 10, 20, 30, 40$  мм

Параметрами, влияющими на изменение площади  $S$  среза, в данном случае является ширина захвата  $B$  (м) и глубина резания  $h$  (м). Следовательно, выражение (4.6) примет следующий вид

$$S = hB \quad (4.7)$$

где  $h$  – глубина резания, м;

$B$  – ширина захвата отвала, м.

Результаты анализа полученных графических зависимостей свидетельствуют о том, что наименьшие значения горизонтальной составляющей  $P_r$  обеспечиваются при угле захвата рабочего органа отвального типа  $\alpha = 30 - 45^\circ$  и угле резания  $\beta = 45 - 55^\circ$ . Для практического применения целесообразно выбирать значения угла захвата, близкие к  $\alpha = 45^\circ$ .

При таком значении этого параметра обеспечивается высокая эффективность сдвигания отвалом продуктов разрушения, оцениваемая коэффициентом эффективности  $\eta_0$ , определяемым из выражения [97]

$$\eta_0 = \cos(\alpha + \delta), \quad (4.8)$$

где  $\alpha$  – угол захвата отвала, град;

$\delta$  – угол отклонения частиц продуктов разрушения от перпендикуляра к поверхности отвала в сторону сдвига, град.

В этом случае  $tg\delta = f_l$ , где  $f_l$  – коэффициент трения снега о поверхность отвала (о сталь). Следовательно,  $\delta = arctg f_l$ . Для примера в таблице 4.8 приведены результаты расчета значений коэффициента эффективности  $\eta_0$  при разработке снега плотностью  $\rho = 0,520 \text{ г/см}^3$  отвалом, устанавливаемым с углом резания в диапазоне значений  $\alpha = 0 \div 90$ , с шагом  $15^\circ$ . Среднее значение коэффициента внешнего трения снега принято по данным Д.А. Шалмана:  $f_l = 0,03$  [52]. Значение угла  $\delta$  при указанном значении  $f_l$  составляет  $1,72^\circ$ .

Очевидно, что при  $\alpha < 45^\circ$  значения  $\eta_0$  увеличиваются, но при этом существенно уменьшается ширина захвата отвала, что способствует снижению производительности снегоуборочного оборудования, возрастает вероятность бокового заноса и увода снегоуборочной машины в сторону под воздействием боковой составляющей силы сопротивления снега удалению отвалом [195].

Таблица 4.8. – Значения коэффициента эффективности сдвига отвалом продуктов разрушения

Угол захвата $\alpha$ , град	Значения коэффициента эффективности $\eta_0$
0	0,999
15	0,957
30	0,850
45	0,686
60	0,474
75	0,231
90	0,029

На основании расчетов, произведенных в соответствии с выражениями (4.5, 4.7) построены графические зависимости удельной энергоемкости процесса резания уплотненного снега масштабной моделью отвала, установленной с углом захвата  $\alpha = 45^\circ$  от величины угла резания  $\beta$  и глубины резания  $h$  (рисунок 4.38).

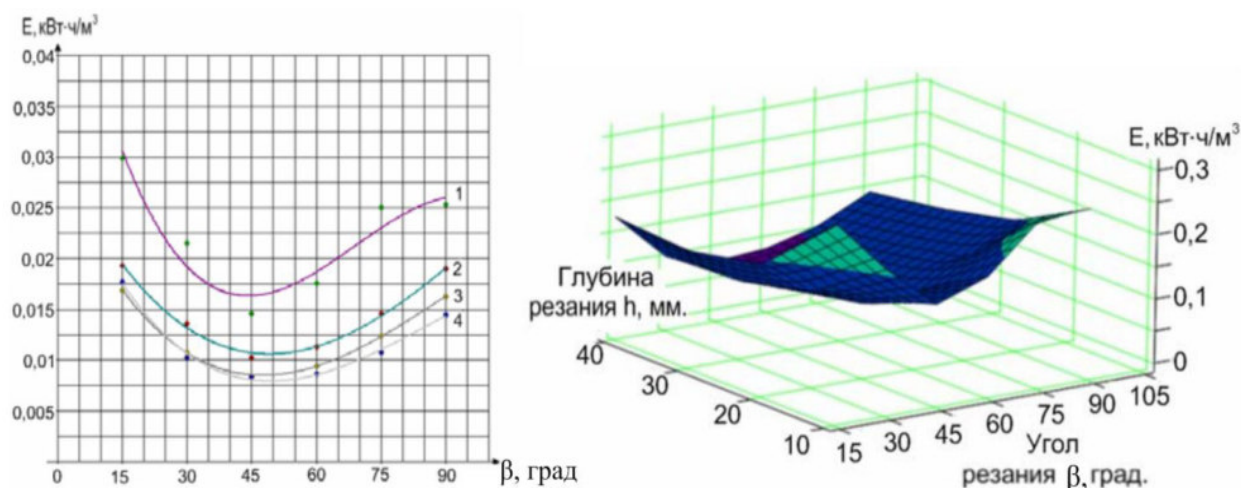


Рисунок 4.38. – Зависимость удельной энергоемкости процесса резания уплотненного снега масштабной моделью отвала, установленной с углом захвата  $\alpha = 45^\circ$  от величины угла резания  $\beta$  и глубины резания  $h$ : 1, 2, 3, 4 – глубина резания соответственно  $h = 10, 20, 30, 40$  мм

Результаты анализа данных зависимостей свидетельствуют о том, что наименьшая удельная энергоемкость процесса резания уплотненного снега рабочим органом отвального типа обеспечивается при значениях угла резания  $\beta = 45 - 55^\circ$  во всем исследуемом диапазоне значений глубины резания  $h$ , т. е. при условиях, соответствующих тем, при которых были получены минимальные значения горизонтальной составляющей  $P_T$  силы сопротивления резанию.

В работе [165] А.В. Лысянниковым предложена Методика расчета усилий резания уплотненных снежных образований рабочим органом отвального типа, основанная на использовании изложенной в этой же работе математической модели процесса взаимодействия рабочего органа

отвального типа с уплотненным снегом, позволяющей рассчитывать значения составляющих силы сопротивления резанию с учетом угла захвата  $\alpha$  (ширины захвата  $B$ ), глубины резания  $h$ , угла резания  $\beta$ , а также физико-механических свойств разрабатываемого массива.

В качестве примера, в соответствии с данной методикой произведен расчет значений горизонтальной, боковой и вертикальной составляющих силы сопротивления резанию уплотненного снега плотностью  $0,45 - 0,50$  г/см<sup>3</sup> масштабной моделью грейдерного отвала, установленного с углом захвата  $\alpha = 45^\circ$ , при значениях угла резания в диапазоне  $\beta = 15 - 90^\circ$  с шагом  $15^\circ$ , при глубине резания  $h = 30$  и  $h = 40$  мм.

На основании результатов данного расчета построены графические зависимости расчетных и экспериментальных значений горизонтальной, боковой и вертикальной составляющих силы сопротивления резанию от величины угла резания  $\beta$  при указанных значениях глубины резания  $h$  (рисунок 4.39).

Как следует из приведенных зависимостей, расчетные и экспериментальные значения горизонтальной, боковой и вертикальной составляющих силы сопротивления резанию имеют удовлетворительную сходимость. Погрешность не превышает 12%.

Таким образом, опираясь на результаты реализации Метода измерительного контроля силы сопротивления твердых менее прочных сред механическому разрушению масштабными моделями отвальных рабочих органов, с использованием измерительного преобразователя ИП – 2 можно рекомендовать к практическому применению на снегоуборочных машинах, оснащенных отвальными рабочими органами, предназначенными для разрушения уплотненного снега (плотностью  $\rho = 0,40 \div 0,50$  г/см<sup>3</sup>), угол резания величиной  $\beta = 45 - 55^\circ$  при величине угла захвата отвала  $\alpha = 45^\circ$ .

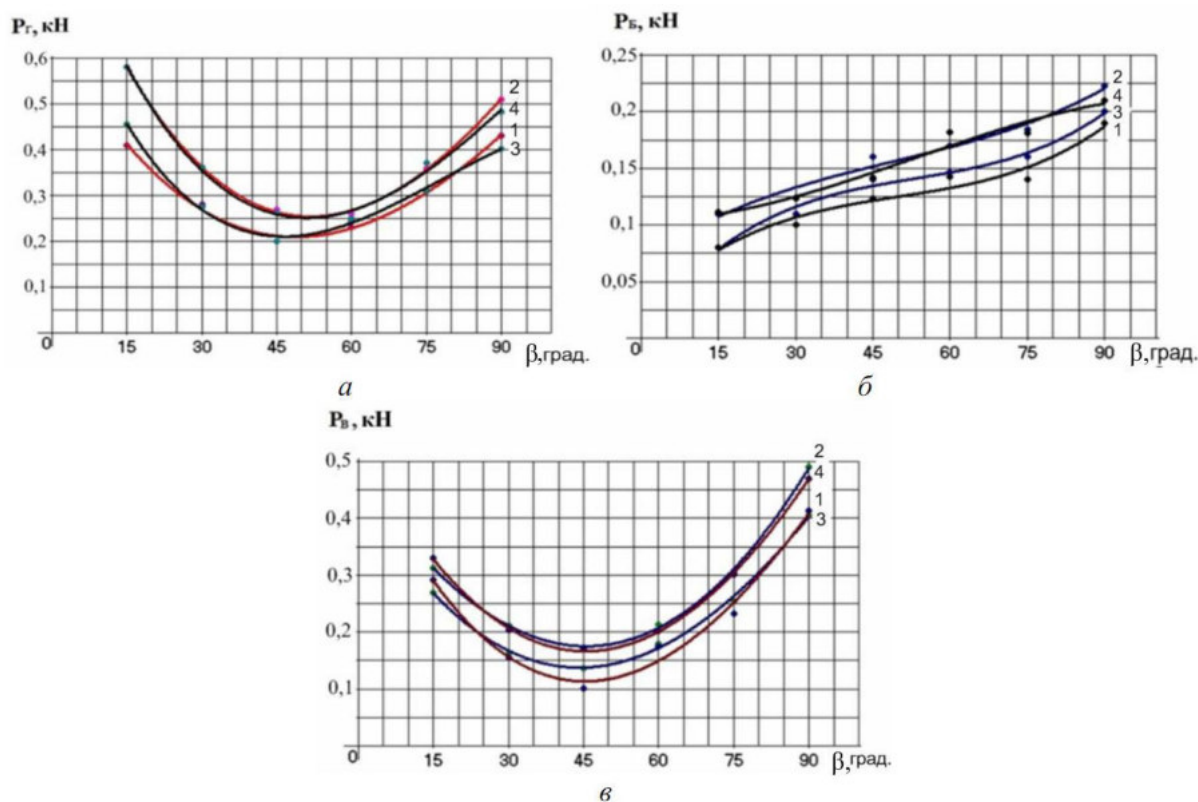


Рисунок 4.39. – Графические зависимости составляющих силы сопротивления уплотненного снега резанию масштабной моделью грейдерного отвала от величины угла резания  $\beta$ , глубины резания  $h$  при величине угла захвата  $\alpha = 45^\circ$ : а – для горизонтальной составляющей  $P_r$ ; б – для боковой составляющей  $P_б$ ; в – для вертикальной составляющей  $P_в$ ; 1, 2 – кривые значений составляющих, полученных экспериментально для глубины резания  $h = 30$  и  $40$  мм; 3, 4 – кривые расчетных значений составляющих, для глубины резания  $h = 30$  и  $40$  мм.

Данные технологические параметры при условиях, описанных выше, следует считать рациональными, так как при их использовании, резание уплотненного снега отвальным рабочим органом осуществляется с наименьшими значениями горизонтальной составляющей  $P_r$  силы сопротивления резанию и минимальной энергоемкостью  $E$  процесса при достаточно высоком значении коэффициента  $\eta_0$  эффективности сдвигания отвалом продуктов разрушения.

Кроме того, указанные значения угла захвата  $\alpha$  хорошо согласуются со значениями, рекомендованными в ранее опубликованной работе [97] применительно к плужным рабочим органам, предназначенным для патрульной очистки дорожных покрытий от свежесвыпавшего или

слабоуплотненного снега. Здесь рациональные значения угла захвата  $\alpha = 38 - 43^\circ$ , угла резания  $\beta = 75 - 80^\circ$ . В данном случае, более высокие по сравнению с обоснованными выше, рациональные значения угла резания, обусловлены особенностями условий работы такого отвала. Основная его функция – сгребание снега малой плотности и отбрасывание его в сторону на значительное расстояние за счет сложной геометрической формы отвальной поверхности при высокой рабочей скорости базовой машины.

#### 4.7. Выводы по главе

1. Результаты последовательной реализации на практике каждого из методов («А», «В», «С», «D») «Системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя – тензометрического элемента ИП-1» позволили сформулировать следующие выводы и рекомендации.

1.1 *Результатами реализации метода «А»* обоснованы рациональные геометрические параметры дискового режущего инструмента: диаметр  $D = 200$  мм и угол заострения рабочей кромки  $\delta = 30^\circ$ .

Процесс взаимодействия инструмента, имеющего указанные параметры, с прочными снежно-ледяными отложениями при их механическом разрушении, протекает при малых значениях силы сопротивления резанию и при малой энергоемкости процесса.

1.2. *Результатами реализации метода «В»* установлены наиболее благоприятные из условия «малая энергоемкость – высокая производительность» скоростные режимы работы дискового режущего инструмента: скорость резания  $V = 1,3$  м/с с шагом резания  $t = 10, 20, 30$  и  $40$  мм, скорость резания  $V = 2,2$  м/с с шагом резания  $t = 50$  мм, скорость резания  $V = 1,9$  м/с с шагом резания  $t = 60$  мм.



1.3. *Результатами реализации метода «С»* установлен диапазон значений температуры окружающей среды:  $t_{oc} = 0 \div -15^{\circ}\text{C}$  в рамках которого механическое разрушение прочных снежно-ледяных отложений на очищаемых дорожных покрытиях будет производиться наиболее эффективно – при малых значениях силы  $P$  сопротивления данной среды резанию дисковым инструментом и при малой энергоемкости  $E$  процесса.

В диапазоне значений  $t_{oc} = -15 \div -30^{\circ}\text{C}$  значения параметров  $P$  и  $E$  существенно возрастают.

1.4. *Результатами реализации метода «D»* установлены приемлемые (для практического применения по условию «малая энергоемкость – способность к зарезанию в разрушаемый массив») значения радиуса  $R_{кр}$  закругления рабочей кромки дискового режущего инструмента, увеличивающиеся по мере его износа. Для инструмента с горизонтальной осью вращения  $R_{кр} = 0,5 \div 2,5\text{мм}$ . Для инструмента с осью вращения имеющей положение близкое к вертикальному (с отклонением от вертикали на угол  $\gamma$ )  $R_{кр} = 0,5 \div 1,5\text{мм}$ .

2. *Результатами реализации на практике «Метода измерительного контроля силы сопротивления твердых менее прочных сред механическому разрушению масштабными моделями отвальных рабочих органов с использованием измерительного преобразователя ИП-2»* обоснованы рациональные технологические параметры отвальных рабочих органов, используемых для разрушения уплотненного снега ( $\rho = 0,40 \div 0,50 \text{ г/см}^3$  при  $t_{oc} = -5 \div -10^{\circ}\text{C}$ ), на дорожных покрытиях: угол резания  $\beta = 45 - 55^{\circ}$  при величине угла захвата отвала  $\alpha = 45^{\circ}$ .

Установкой данных параметров обеспечивается резание уплотненного снега отвальным рабочим органом с наименьшими значениями горизонтальной составляющей  $P_r$  силы сопротивления резанию и минимальной энергоемкостью  $E$  процесса при достаточно высоком значении коэффициента  $\eta_0$  эффективности сдвигания отвалом продуктов разрушения.



3. Анализ результатов комплекса экспериментальных и теоретических исследований, изложенных в данной главе настоящей диссертационной работы, свидетельствует о том, что использованием измерительных преобразователей – тензометрических элементов ИП-1 и ИП-2, в составе измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда (рис. 3.4) обеспечивается измерение горизонтальной  $P_{г}$ , вертикальной  $P_{в}$  и боковой  $P_{б}$  составляющих силы сопротивления твердой среды резанию дисковым инструментом и масштабной моделью отвала с достаточно высокой точностью. При этом взаимное влияние этих составляющих друг на друга сведено к минимуму путем реализации соответствующих конструктивных и схемных решений.

4. Достоверность получаемых результатов обеспечивается достаточным объемом проведенных исследований и подтверждается удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментальных данных, а также использованием полноразмерного режущего инструмента (дисковых резцов), а в качестве разрушаемого материала натуральных образцов природной среды, что делает условия проведения лабораторных экспериментальных исследований максимально приближенными к реальным условиям эксплуатации снегоочистительного оборудования.

5. Использование в работе измерительного преобразователя – тензометрического элемента ИП-2 способствует расширению области применения модернизированного лабораторного стенда и учебно-научной лаборатории (см. Раздел 3.6) в целях изучения процессов взаимодействия различных рабочих органов не только с уплотненным снегом, но и с другими средами: грунтами, почвами, сыпучими материалами и т.п., при их механическом разрушении и (или) перемещении, в различных температурных условиях, при поиске рациональных с точки зрения снижения энергоемкости и повышения производительности процессов, геометрических и технологических параметров такого оборудования.

## **ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОЧНЫХ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕЗАНИЮ ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

Методика расчета значений силы сопротивления прочных СЛО резанию дисковым режущим инструментом основана на результатах математического моделирования процесса взаимодействия дискового резца со льдом, производившегося автором в рамках работ первого этапа теоретических и экспериментальных лабораторных исследований указанного процесса с целью определения рациональных, с позиции минимизации энергозатрат, геометрических параметров дискового режущего инструмента.

Программа лабораторных экспериментальных исследований реализовывалась посредством использования средств измерительного контроля, предложенных в данной работе, а результатами этих исследований обоснована работоспособность упомянутого оборудования, апробированы методы и методики его практического использования.

Основные результаты работ данного этапа исследований изложены в Разделе 4.2 настоящей диссертации. Подробное описание математической модели процесса взаимодействия дискового резца со льдом представлено в работах [134, 199].

При разработке данной математической модели автором был изучен и учтен опыт математического моделирования процессов разрушения прочных немерзлых и мерзлых грунтов на основе теории предельного состояния, выполнявшегося К. А. Артемьевым, А.Н. Зелениным, В. И. Баловневым, Ю. А. Ветровым [31, 130, 202] и другими исследователями.

При решении задач предельного состояния рассматривается стадия напряженного состояния, при котором даже малое изменение объемных или поверхностных сил приводит к потере устойчивости части разрушаемого ледового массива.

### 5.1. Краткое описание математической модели процесса взаимодействия дискового резца с разрушаемой средой

При разработке математической модели были приняты следующие условия и допущения:

- дисковый резец – твердое тело, не получающее при взаимодействии с разрушаемой средой остаточных деформаций;
- дисковый резец установлен на несущей его оси с возможностью свободного вращения вокруг нее;
- ось, несущая дисковый резец перемещается в пространстве по прямолинейной траектории с постоянной скоростью, при этом дисковый резец перекачивается по ровной поверхности без скольжения;
- в каждый элементарный момент времени погружение дискового резца в разрушаемый массив можно рассматривать как внедрение в его тело множества, собранных в пакет плоских клиньев, а в плоскости, проходящей через каждую точку погруженного в материал сегмента дуги режущей кромки и ось вращения, – как одиночный плоский клин.

*Последнее допущение основано на результатах кинематических исследований движения точек, составляющих режущую кромку дискового резца при его взаимодействии с разрушаемой средой, изложенных Р. Б. Желудкевичем в работе [207].*

В условиях плоской деформации при вдавливании клина в полубесконечный массив величину давления  $P$  на грани клина можно получить на основе решения задачи, предложенной Р. Т. Шилдом [208]:

$$P = C_0 \operatorname{ctg} \varphi_2 \left[ e^{2\theta \operatorname{tg} \varphi_2} \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_2}{2} \right) - 1 \right], \quad (5.1)$$

где  $C_0$  – сцепление льда,  $\text{кН/м}^2$ ;

$\varphi_2$  – угол внутреннего трения, град;

$\theta$  – угол зоны радиального сдвига, рад.

В зависимости от схем размещения на рабочих органах, дисковые резцы могут работать как в заблокированном, так и в полублокированном режимах резания. Поэтому было необходимо предусмотреть возможность расчета составляющих силы сопротивления резанию для обоих режимов.

Расчетная схема сил, действующих на дисковый резец типа *A* (рис. 3.1) в процессе заблокированного резания, показана на рисунке 5.1.

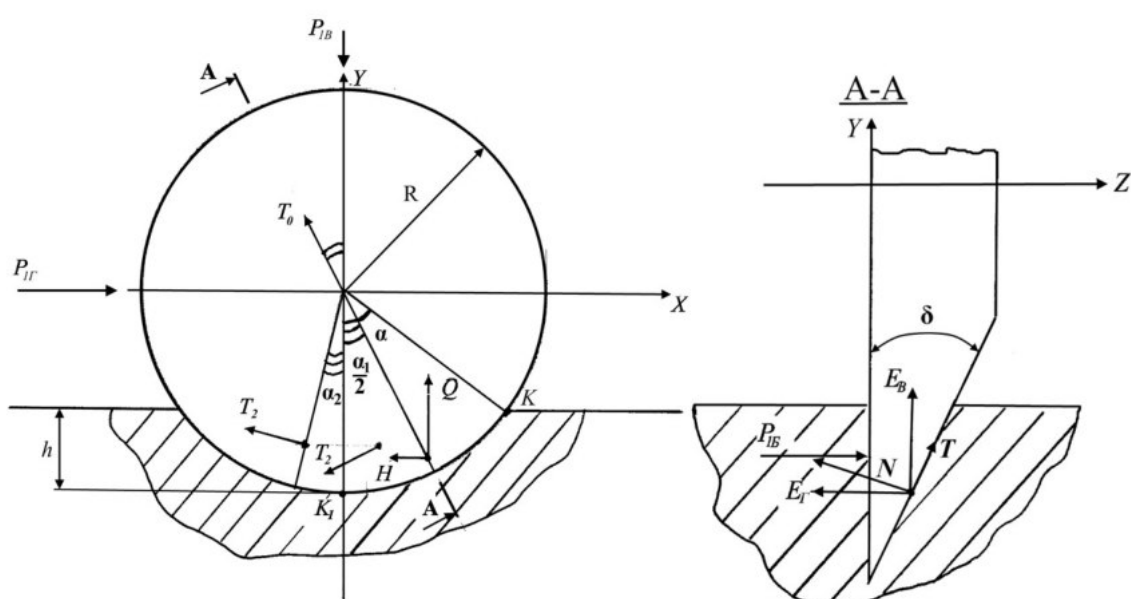


Рисунок 5.1. – Расчетная схема сил, действующих на дисковый резец типа *A* при заблокированном резании:  $R$  – радиус дискового резца;  $H$  и  $Q$  – соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие реакции ледового массива в плоскости вращения резца проходящей через центр тяжести боковой поверхности усеченного конуса, кН;  $\alpha$  – угол поворота точки контакта  $K$  режущей кромки резца с массивом льда до точки  $K_1$  на глубине резания  $h$ ;  $\alpha_2$  – угол между вертикалью и радиусом, пересекающим центр тяжести половины сегментной поверхности резца;  $T_2$  – сила трения, действующая со стороны сегментной поверхности

При перекачивании дискового резца типа *A* в процессе заблокированного резания с постоянной глубиной резания  $h$  без скольжения на боковую конусную поверхность действуют силы:  $N$  – нормальная сила, равная произведению части площади боковой конусной поверхности,

соприкасающейся со льдом, на величину давления  $P$ , и касательная сила  $T$  равная

$$T = N\mu_1, \quad (5.2)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент внешнего трения.

Реакция массива льда на воздействие этих сил на часть конусной поверхности дискового резца описывается следующими выражениями:

$$E_b = T \cos \delta + N \sin \delta, \quad (5.3)$$

$$E_r = -T \sin \delta + N \cos \delta, \quad (5.4)$$

где  $E_b$  и  $E_r$  – соответственно вертикальная и горизонтальная составляющие реакции массива льда, кН;

Кроме того, в опоре подшипника возникает сила трения

$$T_0 = E_b f_1, \quad (5.5)$$

где  $f_1$  – коэффициент трения в подшипнике.

Проецируя на оси  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  все силы реакции ледяного массива, действующие на острый дисковый резец, получаем

$$P_r = 2PS(\mu_1 \cos \delta + \sin \delta)(1 + f_1) \sin \frac{\alpha_1}{2}, \quad (5.6)$$

$$P_b = 2PS(\mu_1 \cos \delta + \sin \delta)(1 + f_1) \cos \frac{\alpha_1}{2}, \quad (5.7)$$

$$P_z = 0, \quad (5.8)$$

где  $P_{\Gamma}$ ,  $P_{\text{в}}$ ,  $P_{\text{б}}$  – соответственно горизонтальная, вертикальная и боковая составляющие усилия резания, кН;

$S$  – площадь боковой конусной поверхности дискового резца, соприкасающейся со льдом в процессе резания, м<sup>2</sup>;  $\alpha_1$  – угол отклонения точки приложения равнодействующей реакции ледяного массива от вертикальной оси в сторону поступательного движения диска.

$$\alpha_1 = \arccos \frac{R_1 - (h - \frac{z_c}{\text{tg } \delta})}{R_1}, \quad (5.9)$$

где  $R_1$  – радиус окружности, образованной в результате пересечения конусной поверхности плоскостью, проходящей параллельно основанию конуса через центр тяжести боковой поверхности, м;

$z_c$  – центр тяжести боковой поверхности усеченного конуса, м.

При блокированном резании резцом типа  $A$  в разрушении ледяного массива участвует часть боковой конусной поверхности, а трение о лед осуществляется ею и вертикальной сегментной поверхностью. В этом случае составляющие силы сопротивления резанию определяются из следующих выражений

$$P_{1\Gamma} = PSk_{\text{III}} (\mu_1 \cos \delta + \sin \delta)(1 + f_1) \sin \frac{\alpha_1}{2} + P_{1\text{в}} \mu_1; \quad (5.10)$$

$$P_{1\text{в}} = PSk_{\text{III}} (\mu_1 \cos \delta + \sin \delta)(1 + f_1) \cos \frac{\alpha_1}{2}; \quad (5.11)$$

$$P_{1\text{б}} = PSk_{\text{III}} (\cos \delta - \mu_1 \sin \delta), \quad (5.12)$$

где  $k_{\text{III}}$  – коэффициент параметров разрушения при блокированном резании

$$k_{\Pi 1} = \frac{2Lhk}{S}, \quad (5.13)$$

где  $L$  – длина дуги контакта режущей кромки дискового резца со льдом, м;

$h$  – глубина резания, м;

$k$  – коэффициент неравномерности разрушения.

При определении составляющих силы сопротивления резанию дисковым резцом типа  $A$  по полублокированной схеме резания расчеты велись по формулам (5.14 – 5.16) без учета влияния массы срезаемого льда ввиду ее малости.

В этом случае составляющие силы сопротивления резанию определяются из следующих выражений

$$P_{2Г} = Pk_{\Pi 2}(\mu_1 \cos \delta + \sin \delta)(\sin \frac{\alpha_1}{2} + f_1 \cos \frac{\alpha_1}{2}) + P_{1Б}\mu_1 \quad (5.14)$$

$$P_{2Б} = Pk_{\Pi 2}(\mu_1 \cos \delta + \sin \delta)(1 + f_1) \cos \frac{\alpha_1}{2} \quad (5.15)$$

$$P_{2Б} = Pk_{\Pi 2}(\cos \delta - \mu_1 \sin \delta), \quad (5.16)$$

где коэффициент параметров разрушения при полублокированном резании

$$k_{\Pi 2} = \frac{2Lht}{S}, \quad (5.17)$$

где  $t$  – шаг резания, м;

Коэффициенты параметров разрушения  $k_{\Pi 1}$  и  $k_{\Pi 2}$  введены в выражения (5.10 – 5.12 и 5.14 – 5.16) ввиду того, что глубина погружения в массив каждой точки дуги контакта режущей кромки дискового резца со льдом не

постоянна и изменяется от положения  $K$  (на границе массива с дневной поверхностью) до положения  $K_1$  на глубине резания  $h$  (рис. 5.1).

Полученные в результате разработки математической модели уравнения позволяют на стадии проектирования высокоэффективного снегоочистительного оборудования аналитически определить значения составляющих силы  $P$  сопротивления льда (прочных СЛО) резанию дисковыми резцами типа  $A$  в заблокированном и полублокированном режимах с учетом величины угла  $\delta$  заострения этого инструмента, глубины  $h$  и шага  $t$  резания, а также физико-механических свойств разрушаемой среды.

## **5.2 Методика расчета значений силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым инструментом**

Предлагаемой Методикой предусмотрена возможность расчета значений силы сопротивления льда резанию дисковым резцом типа  $A$  в заблокированном и полублокированном режимах, так как работа резцов размещаемых на рабочих органах спецмашин в зависимости от схемы размещения может осуществляться как в первом, так и во втором из указанных режимов.

### **5.2.1. Основные рекомендации к расчету значений составляющих силы сопротивления прочных СЛО резанию дисковым резцом типа $A$ в заблокированном режиме**

Расчет следует начинать с определения значений горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию из выражения (5.10) приняв к расчету значения коэффициента внешнего трения стали о лед  $\mu_1 = 0,065$  и коэффициента трения стали о бронзу  $f_1 = 0,016$ .



Значения вертикальной составляющей силы сопротивления резанию следует определять из выражения (5.11), а боковой составляющей – из выражения (5.12).

Эмпирический коэффициент параметров разрушения  $k_{пл}$  к формулам (5.10 – 5.12) может быть представлен в иной, более корректной форме, нежели предложенный в математической модели (см. формулу 5.13).

В данном случае

$$k_{пл} = \frac{2L_c h}{S}, \quad (5.18)$$

где  $L_c$  – длина части образующей конуса, соприкасающаяся с разрушаемым материалом при заглублении инструмента на глубину  $h$ , м;

$$L_c = \pi k, \quad (5.19)$$

где  $k$  – коэффициент скола;

$$k = R + h_{ср} \operatorname{ctg} \beta, \quad (5.20)$$

где  $R$  – радиус бóльшего основания резца, м;

$h_{ср}$  – толщина слоя срезаемого материала, м;

$\beta$  – угол скола разрушаемого материала, град

$$\beta = 90 - \frac{\alpha_p + \varphi_1 + \varphi_2}{2}, \quad (5.21)$$

где  $\alpha_p$  – угол резания, град;

$\varphi_1$  – угол внешнего трения материала, град;

$\varphi_2$  – угол внутреннего трения материала, град;

$h$  – глубина резания, м;

$S$  – площадь половины сегментной поверхности, погруженной в разрушаемый массив.

Длину  $L$  дуги контакта режущей кромки дискового резца со льдом следует определять по формуле

$$L = \frac{\pi R}{180} \arccos \frac{R-h}{R}, \quad (5.22)$$

где  $R$  – радиус резца, м;

$h$  – глубина резания, м.

Угол  $\alpha_1$  (рис. 5.1) определяется по формуле

$$\alpha_1 = \arccos \frac{R_1 - \left( h - \frac{z_C}{\operatorname{tg} \delta} \right)}{R_1}, \quad (5.23)$$

где  $R_1$  – радиус окружности, образованной в результате пересечения конусной поверхности плоскостью, проходящей параллельно основанию конуса через центр тяжести боковой поверхности усеченного конуса, м

$$R_1 = R - \frac{z_C}{\operatorname{tg} \delta}, \quad (5.24)$$

где  $z_C$  – центр тяжести боковой поверхности усеченного конуса, м

$$z_c = \frac{h \operatorname{tg} \delta (3R - 2h)}{3(2R - h)}, \quad (5.25)$$

где  $h$  – глубина резания, м;

$\delta$  – угол заострения режущей кромки резца, град;

$R$  – радиус резца, м.

По формуле (5.25) параметр  $z_c$  рассчитывается при блокированном резании и при резании по полублокированной схеме при условии, что  $h \operatorname{tg} \delta \leq t$  (где  $t$  – шаг резания). При  $h \operatorname{tg} \delta > t$  вместо  $h$  следует подставлять значение  $t/\operatorname{tg} \delta$ .

После получения значения угла  $\alpha_1$  следует определить величину давления  $P$  на грани клина по формуле (5.1) где  $C_0$  – сцепление льда (удельное усилие, необходимое для разъединения частиц при сдвиге), кН/м<sup>2</sup>;  $\varphi_2$  – угол внутреннего трения;  $\theta$  – угол зоны радиального сдвига, рад, определяется в соответствии с величиной угла  $\varphi_2$  по номограмме на рисунке 5.2.

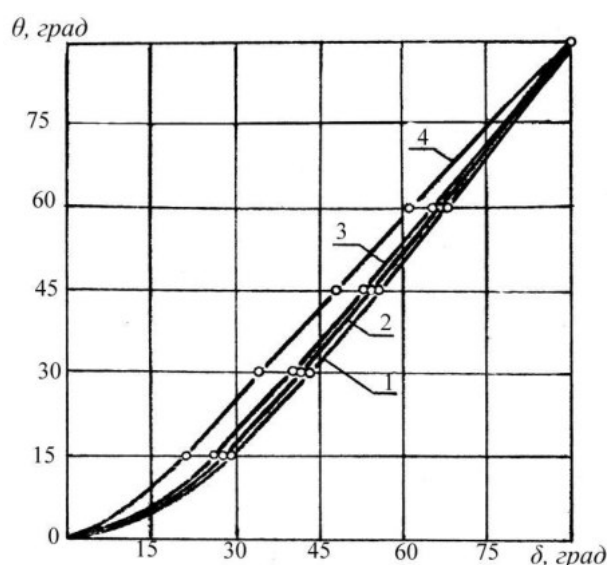


Рисунок 5.2. – Зависимость угла зоны радиального сдвига от угла заострения клина при заданном угле внутреннего трения: 1 –  $15^\circ$ ; 2 –  $30^\circ$ ; 3 –  $45^\circ$ ; 4 –  $60^\circ$

Величины  $C_0$  и  $\varphi_2$  определяются графическим методом в соответствии с теорией напряжений Мора. Угол, составленный огибающей с осью  $\sigma$  (рисунок 5.3), физически означает угол внутреннего трения  $\varphi$  разрушаемого материала.

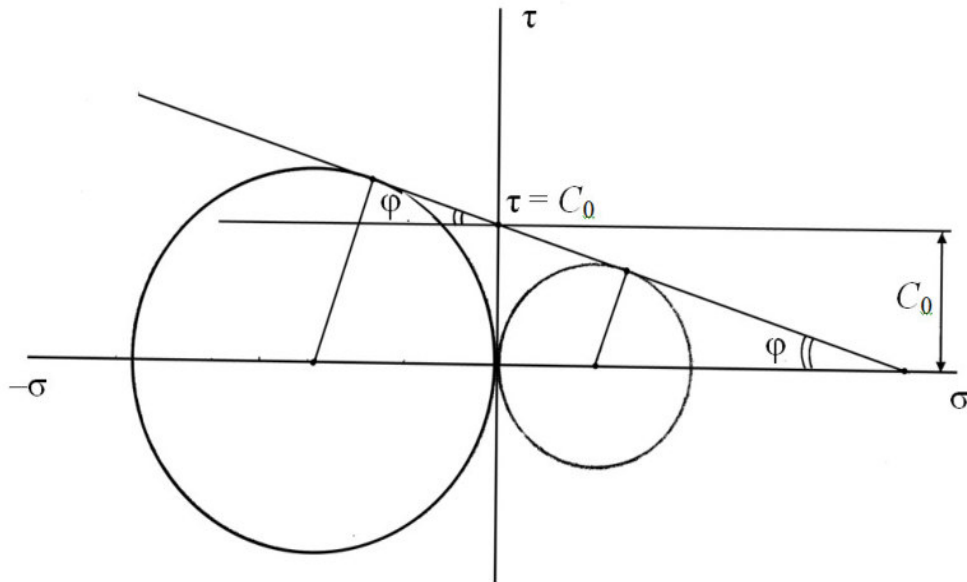


Рисунок 5.3. – Круги Мора для напряженного состояния льда при растяжении и сжатии:  $\tau$  – касательные напряжения;  $\sigma_p = 1,2$  МПа;  $\sigma_{сж} = 2,3$  МПа

Численное значение угла  $\varphi$  можно получить из следующего выражения

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \geq \sin \varphi, \quad (5.26)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – главные нормальные напряжения, равные в данном случае соответственно  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$ .

Сцепление льда  $C_0$  определим как

$$C_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \quad (5.27)$$

Площадь  $S$  части боковой конусной поверхности дискового резца, соприкасающейся со льдом во время резания, определяется по формуле

$$S = \frac{S_{\sigma}}{2}, \quad (5.28)$$

где  $S_{\sigma}$  – площадь поверхности конуса, соприкасающейся со льдом во время резания

$$S_{\sigma} = \frac{\sqrt{a^2 + c^2}}{a} (R^2 \arccos \frac{x_1}{R} - x_1 \sqrt{R^2 - x_1^2}), \quad (5.29)$$

где  $a$  – параметр конуса

$$a = R = 0,1 \text{ м},$$

где  $R$  – радиус дискового резца, м;

$c$  – высота конуса

Этот параметр определяется из выражения

$$c = R \operatorname{tg} \delta \quad (5.30)$$

Для дискового резца радиусом  $R = 0,1$  м и углом заострения  $\delta = 30^\circ$  высота конуса  $c = 0,06$  м.

Параметр  $x_1$  [134] определится из выражения

$$x_1 = R - h, \quad (5.31)$$

где  $h$  – глубина резания, м.

Величина боковой составляющей усилия резания  $P_{16}$  определяется по формуле (5.11).

Завершать расчет составляющих усилия резания дисковым резцом типа А по блокированной схеме следует определением значения вертикальной составляющей по формуле (5.12).

### 5.2.2. Пример расчета значений составляющих силы сопротивления прочных СЛЮ резанию дисковым резцом типа А в блокированном режиме

Расчет значений составляющих усилия резания льда дисковым резцом типа А радиусом  $R = 0,1$  м, углом заострения  $\delta = 30^\circ$  на глубину  $h = 0,06$  м по блокированной схеме производится в порядке, описанном в подразделе 5.2.1.

Значение  $z_C$  определяется в соответствии с выражением (5.25):

$$z_C = \frac{0,06 \cdot 0,58(0,3 - 2 \cdot 0,06)}{3(0,2 - 0,06)} = 0,015 \text{ м}$$

Значение радиуса  $R_1$  определяется по формуле (5.24):

$$R_1 = 0,1 - \frac{0,015}{0,58} = 0,074 \text{ м.}$$

Значение угла  $\alpha_1$  определяется по формуле (5.23):

$$\alpha_1 = \arccos \frac{0,074 - \left(0,06 - \frac{0,015}{0,58}\right)}{0,074} = 57,32 \text{ град.}$$

Величину давления  $P$  на грани клина находим из выражения (5.1). Задаемся пределами прочности льда на сжатие  $\sigma_{сж}$  и растяжение  $\sigma_p$ . Предел прочности на растяжение  $\sigma_p$ , при температуре воздуха от 0 до минус 10 °С

составляет 1,2 МПа. При температуре от 0 до минус 2 °С, предел прочности льда при сжатии в направлении, перпендикулярном к осям кристаллов,  $\sigma_{\perp} = 2,3$  МПа [56]. На рис. 5.3 показаны круги напряжений (круги Мора), диаметры которых соответствуют численным значениям  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$ .

Подставляя в выражение (5.26) численные значения напряжений, получаем

$$\sin \varphi \geq 0,314 \Rightarrow \varphi = 18,3^{\circ}.$$

Величина сцепления льда, определяемая по выражению (5.27), составила  $C_0 = 1,75$  кН/м<sup>2</sup>.

Угол зоны радиального сдвига для угла внутреннего  $\varphi_2 = 18,3^{\circ}$  составляет  $\theta = 0,3$  рад.

Подставляя полученные значения в выражение (5.1), получаем

$$P = 1,75 \cdot 3,06 \left[ \exp(2 \cdot 0,3 \cdot 0,32) \operatorname{tg}^2 \left( \frac{180}{4} + \frac{18,3}{2} \right) - 1 \right] = 6,85 \text{ кН/м}^2.$$

Значение площади  $S_{\sigma}$  части поверхности конуса, соприкасающейся со льдом во время резания, определяется в соответствии с выражением (5.29):

$$S_{\sigma} = \frac{\sqrt{0,01 + 0,0036}}{0,1} \left( 0,1^2 \arccos \frac{0,04}{0,1} - 0,04 \sqrt{0,01 - 0,0016} \right) = 0,0092 \text{ м}^2.$$

Площадь  $S$  в соответствии с выражением (5.28)

$$S = \frac{0,0092}{2} = 0,0046 \text{ м}^2$$

Длина  $L$  дуги контакта со льдом режущей кромки дискового резца, согласно выражению (5.22), составляет

$$L = \frac{3,14 \cdot 0,1}{180} \arccos \frac{0,1 - 0,06}{0,1} = 0,113 \text{ м.}$$

Экспериментальное значение коэффициента скола  $k$  для рассматриваемых условий в соответствии с выражением (5.20) составляет  $k = 0,135$ .

Тогда длина образующей области разрушения материала

$$L_c = 3,14 \cdot 0,135 = 0,42$$

Величина коэффициента параметров разрушения  $k_{п1}$  в соответствии с выражением (5.18) составит

$$k_{п1} = \frac{2 \cdot 0,42 \cdot 0,06}{0,0046} = 10,9$$

Итак, значения составляющих силы сопротивления резанию льда дисковым резцом типа  $A$  по блокированной схеме определяются в соответствии с выражениями (5.10) – (5.12):

– горизонтальная составляющая

$$P_{г1} = 6,85 \cdot 0,0046 \cdot 10,9(0,065 \cdot 0,87 + 0,5)(1 + 0,016) \sin \frac{57,32}{2} +$$

$$+ 0,26 \cdot 0,065 = 0,25 \text{ кН};$$



– вертикальная составляющая

$$P_{1в} = 6,85 \cdot 0,0046 \cdot 10,9(0,065 \cdot 0,87 + 0,5)(1,016) \cdot 0,88 = 0,16 \text{ кН};$$

– боковая составляющая

$$P_{16} = 6,85 \cdot 0,0046 \cdot 10,9(0,87 - 0,065 \cdot 0,5) = 0,26 \text{ кН}.$$

### 5.2.3. Пример расчета составляющих силы сопротивления прочных СЛО резанию дисковым резцом типа *A* в полублокированном режиме

Для определения значений составляющих силы сопротивления льда резанию дисковым резцом типа *A* в полублокированном режиме следует воспользоваться рекомендациями и результатами расчетов усилий резания дисковым резцом типа *A* по блокированной схеме согласно материалам подразделов 5.2.1. и 5.2.2.

Значения горизонтальной составляющей в данном случае определяется по формуле (5.14). Завершающим этапом расчета является вычисление значений вертикальной и боковой составляющих усилия резания дискового резца типа *A* по полублокированной схеме по формулам (5.15) и (5.16).

Выполним расчет значений составляющих силы сопротивления льда резанию дисковым резцом типа *A* радиусом  $R = 0,1$  м, углом заострения  $\delta = 30^\circ$  на глубину  $h = 0,06$  м с шагом резания  $t = 0,01$  м по полублокированной схеме в описанном выше порядке.

Величина коэффициента параметров разрушения  $k_{п2}$  в соответствии с выражением (5.17) составит

$$k_{п2} = \frac{2 \cdot 0,113 \cdot 0,06 \cdot 0,01}{0,0046} = 0,03$$

Значения составляющих силы сопротивления льда резанию дисковым резцом типа *A* в полублокированном режиме, определенные в соответствии с выражениями (5.14, 5.15, 5.16), составят:

для горизонтальной составляющей

$$P_{2г} = 6,85 \cdot 0,03(0,065 \cdot 0,87 + 0,5)(28,7 + 0,016 \cdot 0,88) + \\ + 0,26 \cdot 0,065 = 0,08 \text{ кН};$$

для вертикальной составляющей

$$P_{2в} = 6,85 \cdot 0,03(0,065 \cdot 0,87 + 0,5) \cdot 1,016 \cdot 0,88 = 0,114 \text{ кН};$$

для боковой составляющей

$$P_{2б} = 6,85 \cdot 0,03(0,87 - 0,065 \cdot 0,5) = 0,191 \text{ кН}.$$

В рамках работ первого этапа теоретических и экспериментальных лабораторных исследований процесса взаимодействия дискового резца со льдом, производившегося автором с целью определения рациональных, с позиции минимизации энергозатрат, геометрических параметров дискового режущего инструмента (метод «А», см. Раздел 4.2), согласно предлагаемой Методике были рассчитаны значения составляющих силы сопротивления льда резанию дисковым резцом радиусом  $R = 0,1$  м и углом заострения  $\delta = 30^\circ$  на глубину  $h = 0,06$  м в диапазоне шага резания  $t = 10\text{--}40$  мм с интервалом 10 мм.

Результаты расчетов, а также значения соответствующих составляющих силы сопротивления резанию, полученные экспериментально при тех же условиях, сведены в табл. 5.1. Произведен расчет отклонений  $\Delta P$  (%) расчетных значений составляющих контролируемой силы от экспериментальных по формуле

$$\Delta P = \frac{(a - b) \cdot 100}{a}, \quad (5.32)$$

где  $a$  и  $b$  – сравниваемые значения ( $a > b$ ).

Графические зависимости расчетных и полученных экспериментально значений горизонтальной и вертикальной составляющих силы сопротивления резанию от шага резания  $t$ , построенные на основании данных табл. 5.1, представлены на рисунках 5.4, 5.5.

Таблица 5.1. – Расчетные и экспериментальные значения составляющих силы сопротивления резанию

Шаг $t$ , м	Показатели								
	$P_{2г}$ , кН		$\Delta P_{2г}$ , %	$P_{2в}$ , кН		$\Delta P_{2в}$ , %	$P_{26}$ , кН		$\Delta P_{26}$ , %
	расчетное	экспериментальное		расчетное	экспериментальное		расчетное	экспериментальное	
0,01	0,080	0,100	20,0	0,114	0,142	19,7	0,191	0,037	80,0
0,02	0,143	0,173	17,3	0,227	0,193	15,0	0,380	0,014	96,0
0,03	0,350	0,427	18,0	0,340	0,402	15,4	0,570	0,283	50,4
0,04	0,380	0,470	19,2	0,490	0,612	19,9	0,760	0,621	18,4

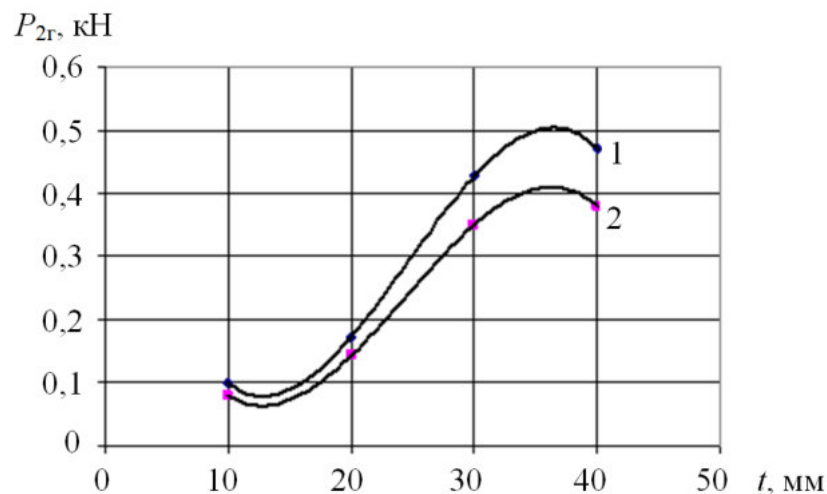


Рисунок 5.4. – Зависимость горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию от шага при резании льда резцом с углом заострения  $30^\circ$ : 1 – кривая значений, полученных экспериментально; 2 – кривая расчетных значений

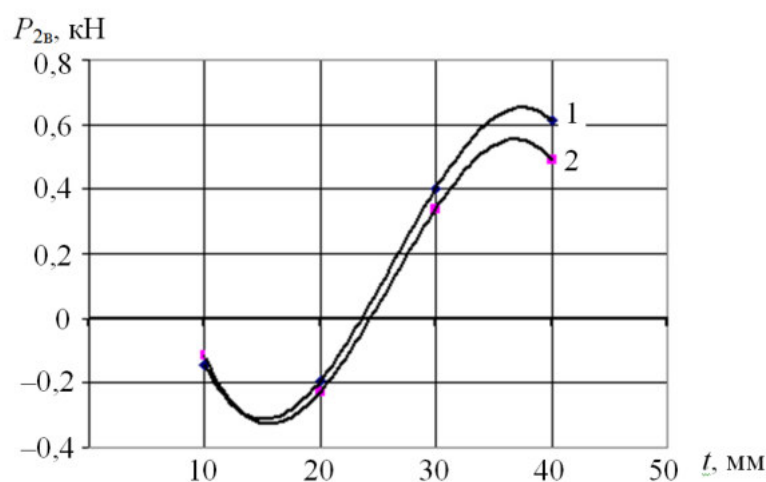


Рисунок 5.5. – Зависимость вертикальной составляющей силы сопротивления резанию от шага при резании льда резцом с углом заострения  $30^\circ$ : 1 – кривая значений, полученных экспериментально; 2 – кривая расчетных значений

Как следует из графиков, представленных на рисунках 5.4, 5.5, сходимость расчетных и экспериментальных значений горизонтальной  $P_{2г}$  и вертикальной  $P_{2в}$  составляющих силы сопротивления резанию достаточно высока. Погрешность не превышает 20 %.

Значения составляющих силы сопротивления резанию, рассчитанные в соответствии с предложенной методикой, дают удовлетворительную сходимость со значениями, полученными экспериментально, что свидетельствует о работоспособности предложенной методики расчета, а также о достоверности значений контролируемой величины, получаемых при использовании средств измерительного контроля, предложенных в данной работе.

### 5.3. Выводы по главе

1. Описанная выше методика расчета значений силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым режущим инструментом позволяет с учетом физико-механических свойств разрушаемой среды, изменяющихся глубине и шаге резания вычислять на

стадии проектирования, значения контролируемой силы и определять рациональные геометрические параметры дискового инструмента, обеспечивающие протекание данного процесса с минимальной энергоемкостью.

Данная методика, в виде, адаптированном к условиям конкретного предприятия под названием «Методика расчета усилий резания льда дисковым режущим инструментом» внедрена на Красноярском филиале государственного предприятия «Краевая дорожно-эксплуатационная организация» (см. Приложение Д). Акты внедрения в производство основных результатов данной диссертационной работы представлены в Приложении Е.

2. В настоящее время творческим коллективом под руководством автора данной диссертации ведутся работы по модернизации описанной выше методики с целью обеспечения возможности автоматизированного вычисления горизонтальной  $P_G$ , вертикальной  $P_B$  и боковой  $P_B$  составляющих силы сопротивления прочной среды резанию дисковым режущим инструментом с использованием матричной математической системы *MATLAB*. Подразумевается, что при этом, вычисления значений контролируемых параметров будут производиться с учетом влияния на их величину (наряду с углом заострения инструмента, изменяющихся параметров среза и физико-механических свойств разрушаемой среды) таких факторов как скорость  $V$  резания и радиус  $R_{кр}$  закругления рабочей (режущей) кромки дискового инструмента.

Установление степени влияния указанных факторов в модернизированной методике основывается на результатах экспериментальных лабораторных исследований процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с прочными снежно-ледяными отложениями, представленными в Разделах 4.3 и 4.5 настоящей работы.

## ГЛАВА 6. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СНЕГООЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ОСНАЩАЕМОГО ДИСКОВЫМ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ

### 6.1. Применение метода измерительного контроля прочности (несущей способности) снежно-ледяных покрытий автодорог и аэродромов

Реализация метода контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог подразумевает последовательность и взаимосвязь действий, представленных на рисунке 6.1.

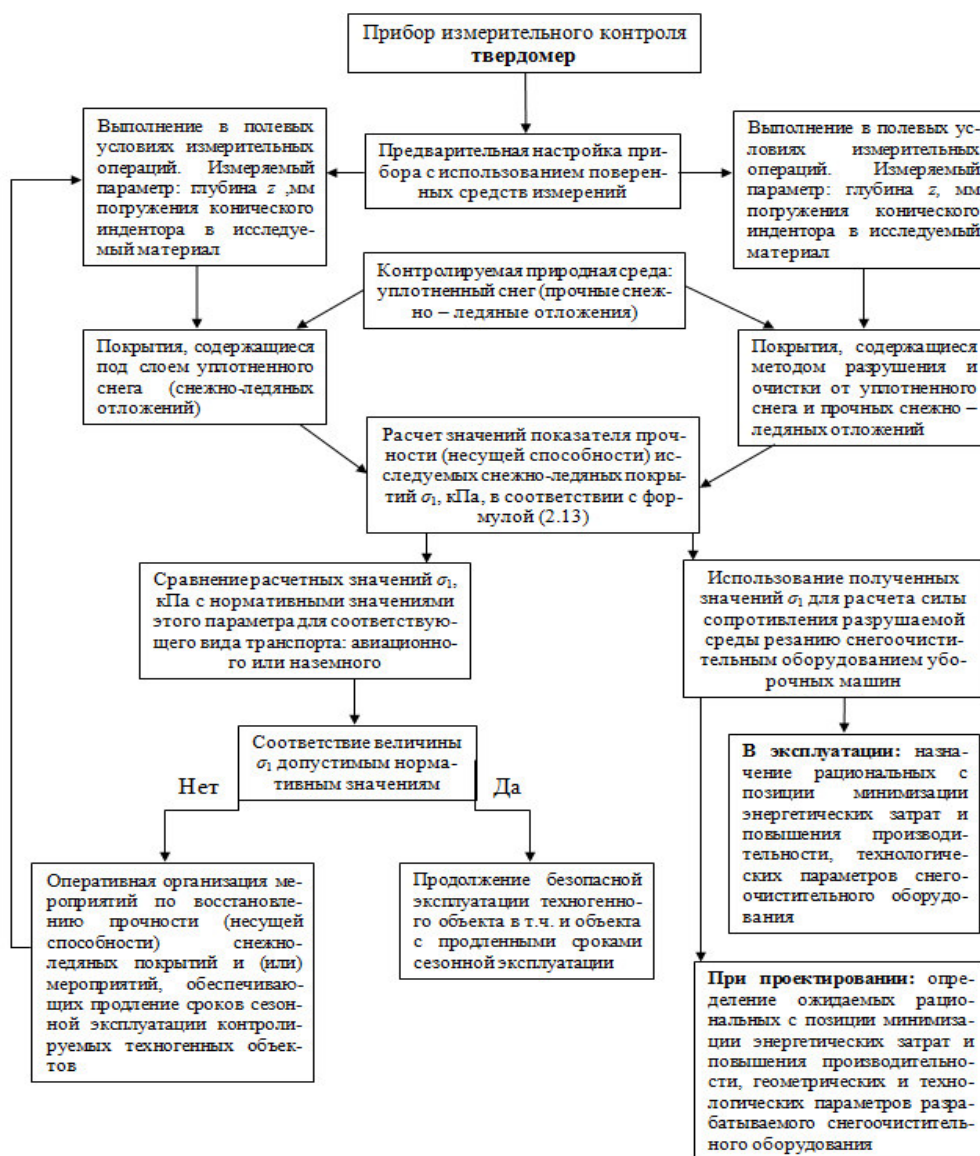


Рисунок 6.1. – Схема применения метода контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежного покрова грунтовых аэродромов и автодорог

## 6.2. Применение методики лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой с использованием измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда

Реализация методики лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой подразумевает последовательность и взаимосвязь действий, представленных на рисунке 6.2.

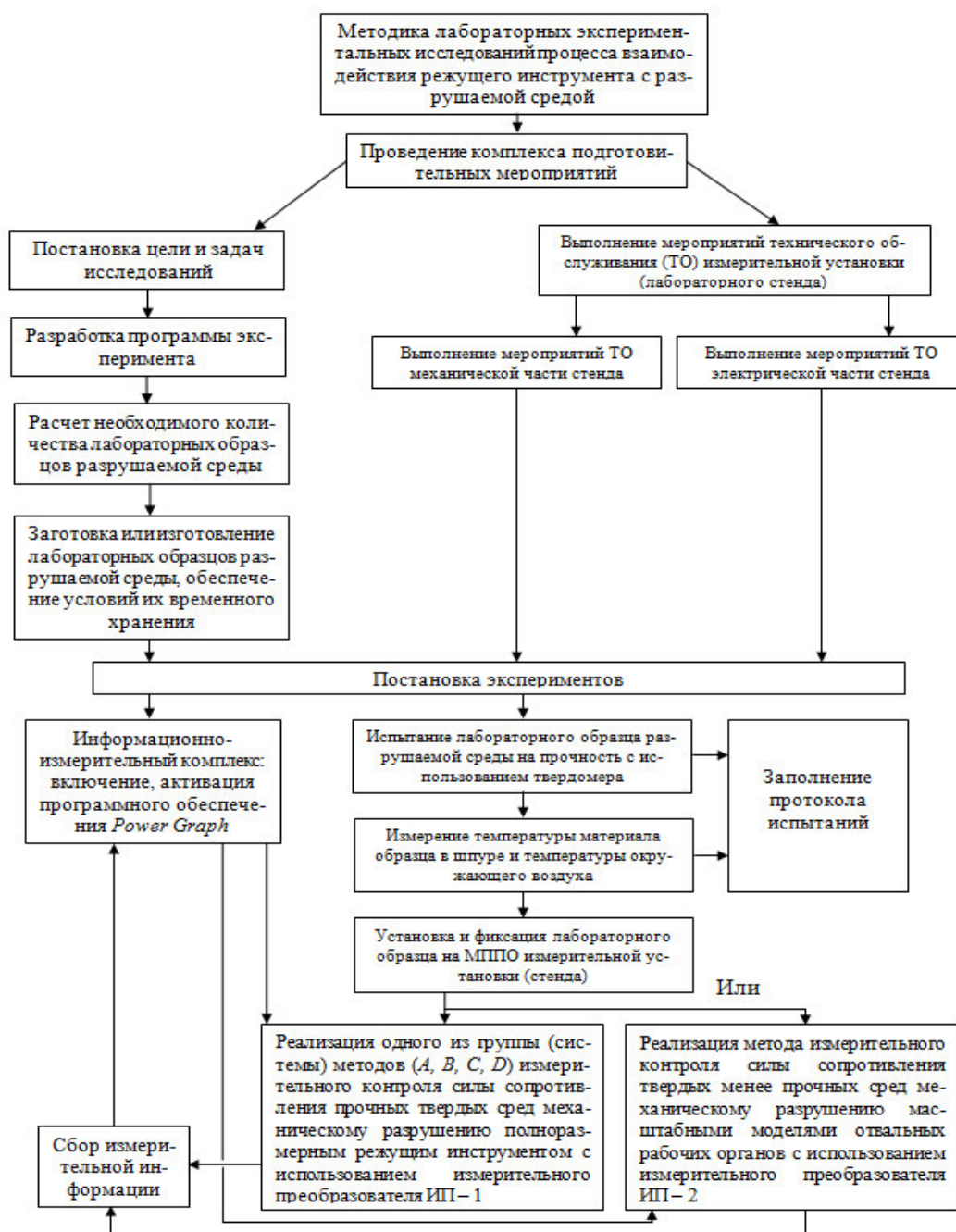


Рисунок 6.2. – Схема применения методики лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой



### 6.3. Применение системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП-1

#### 6.3.1. Применение метода «А»

Реализация метода «А» измерительного контроля силы сопротивления прочных сред механическому разрушению режущим инструментом подразумевает последовательность и взаимосвязь действий, представленных на рисунке 6.3.

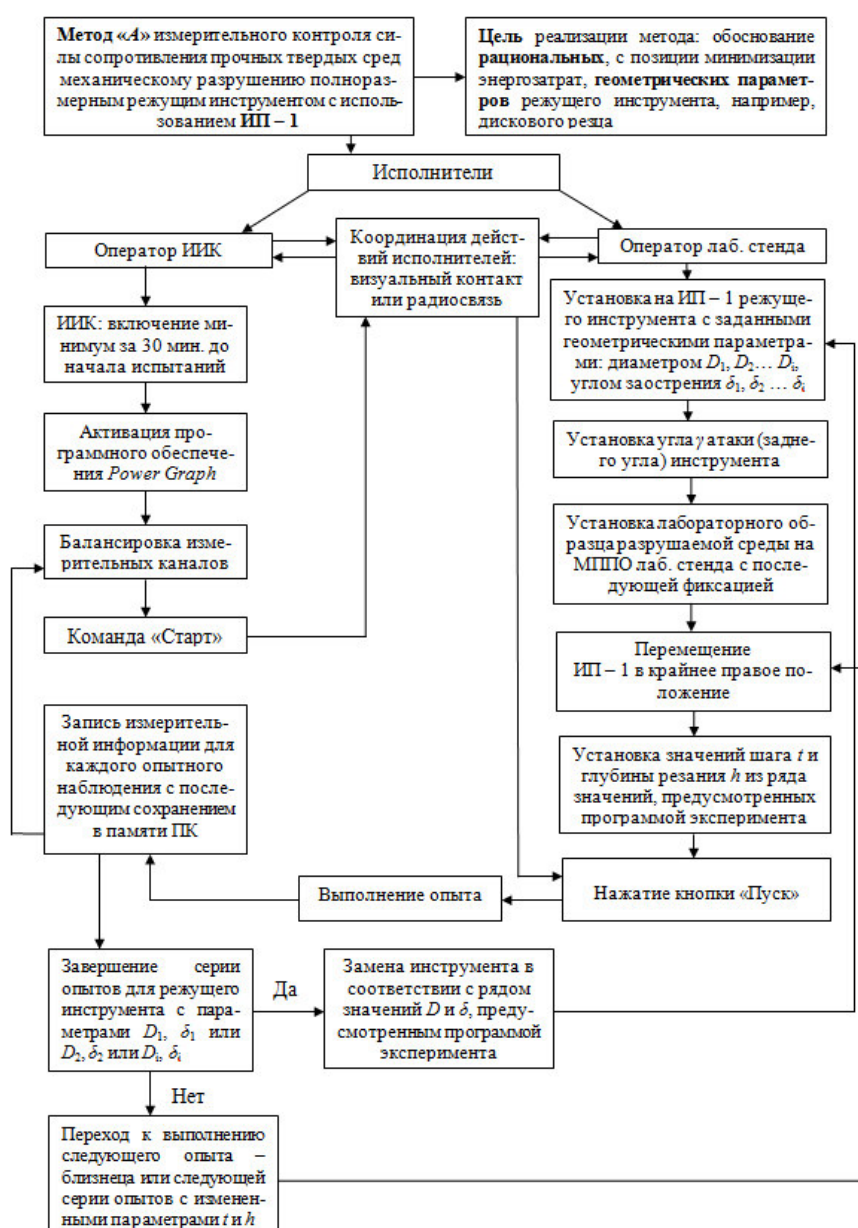


Рисунок 6.3. – Схема применения метода «А» измерительного контроля силы сопротивления прочных сред механическому разрушению режущим инструментом



### 6.3.2. Применение метода «В»

Реализация метода «В» измерительного контроля силы сопротивления прочных сред механическому разрушению режущим инструментом подразумевает последовательность и взаимосвязь действий, представленных на рисунке 6.4.

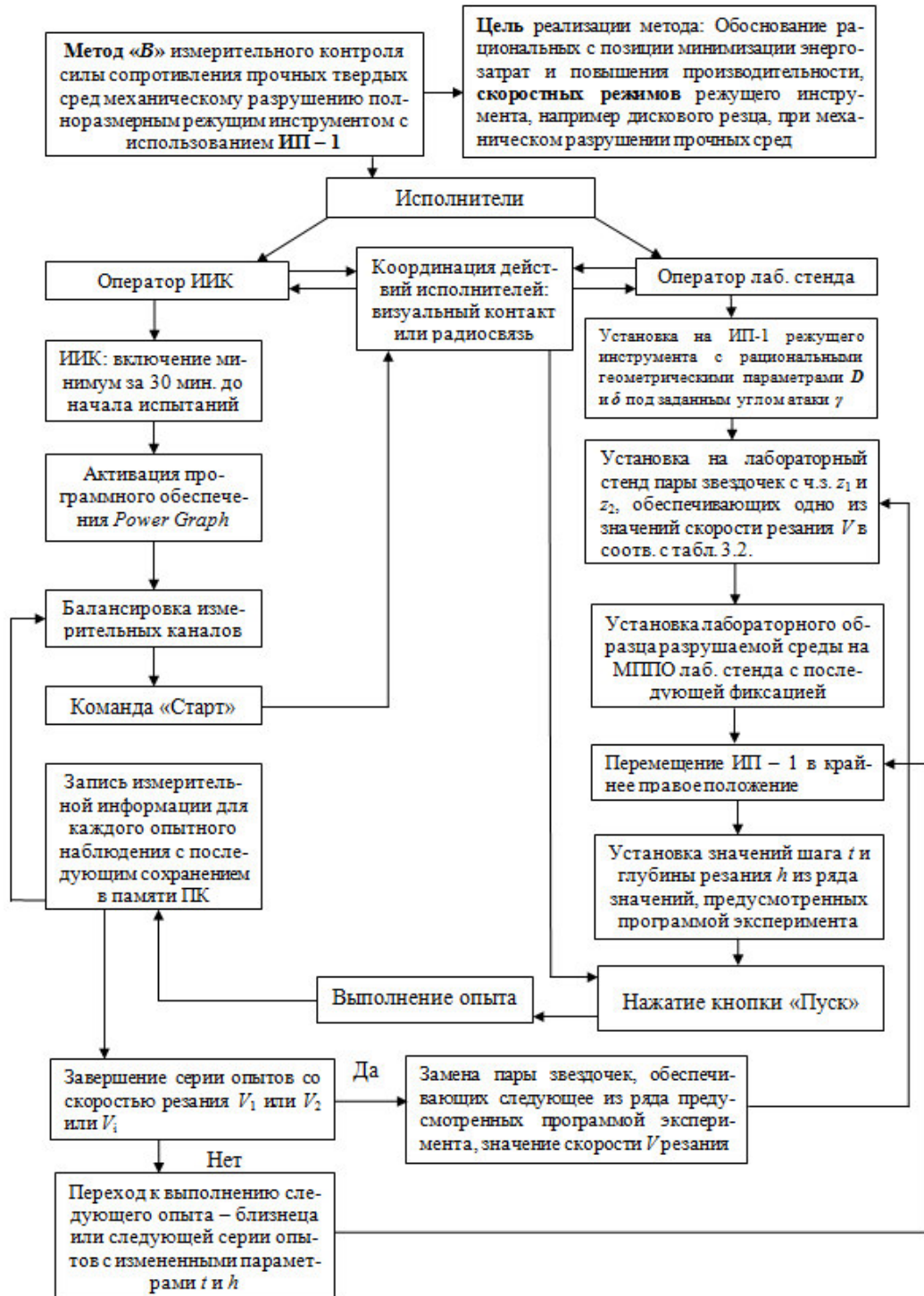


Рисунок 6.4. –Схема применения метода «В» измерительного контроля силы сопротивления прочных сред механическому разрушению режущим инструментом

### 6.3.3. Применение метода «С»

Реализация метода «С» измерительного контроля силы сопротивления прочных сред механическому разрушению режущим инструментом подразумевает последовательность и взаимосвязь действий, представленных на рисунке 6.5.

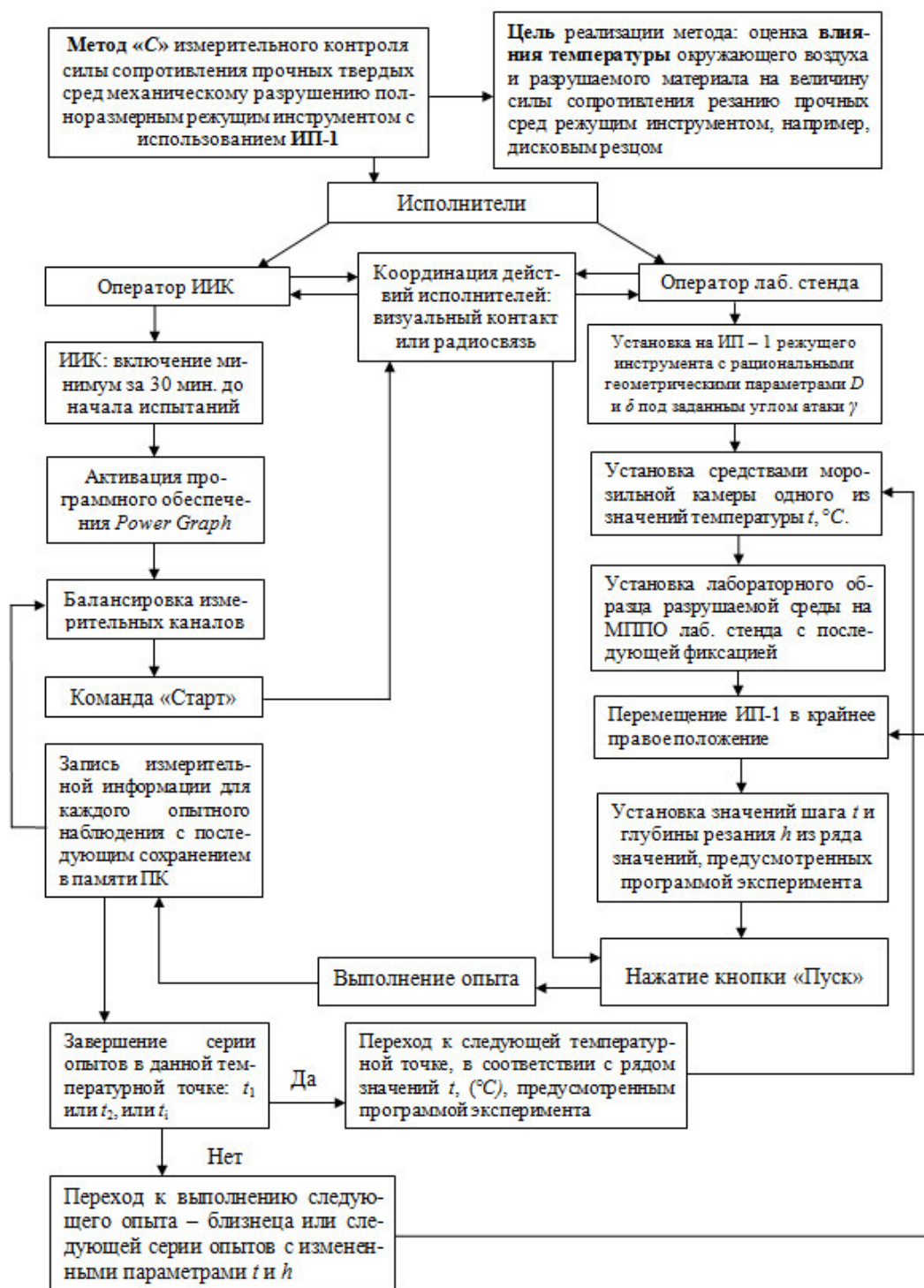


Рисунок 6.5. – Схема применения метода «С» измерительного контроля силы сопротивления прочных сред механическому разрушению режущим инструментом

### 6.3.4. Применение метода «D»

Реализация метода «D» измерительного контроля силы сопротивления прочных сред механическому разрушению режущим инструментом подразумевает последовательность и взаимосвязь действий, представленных на рисунке 6.6.

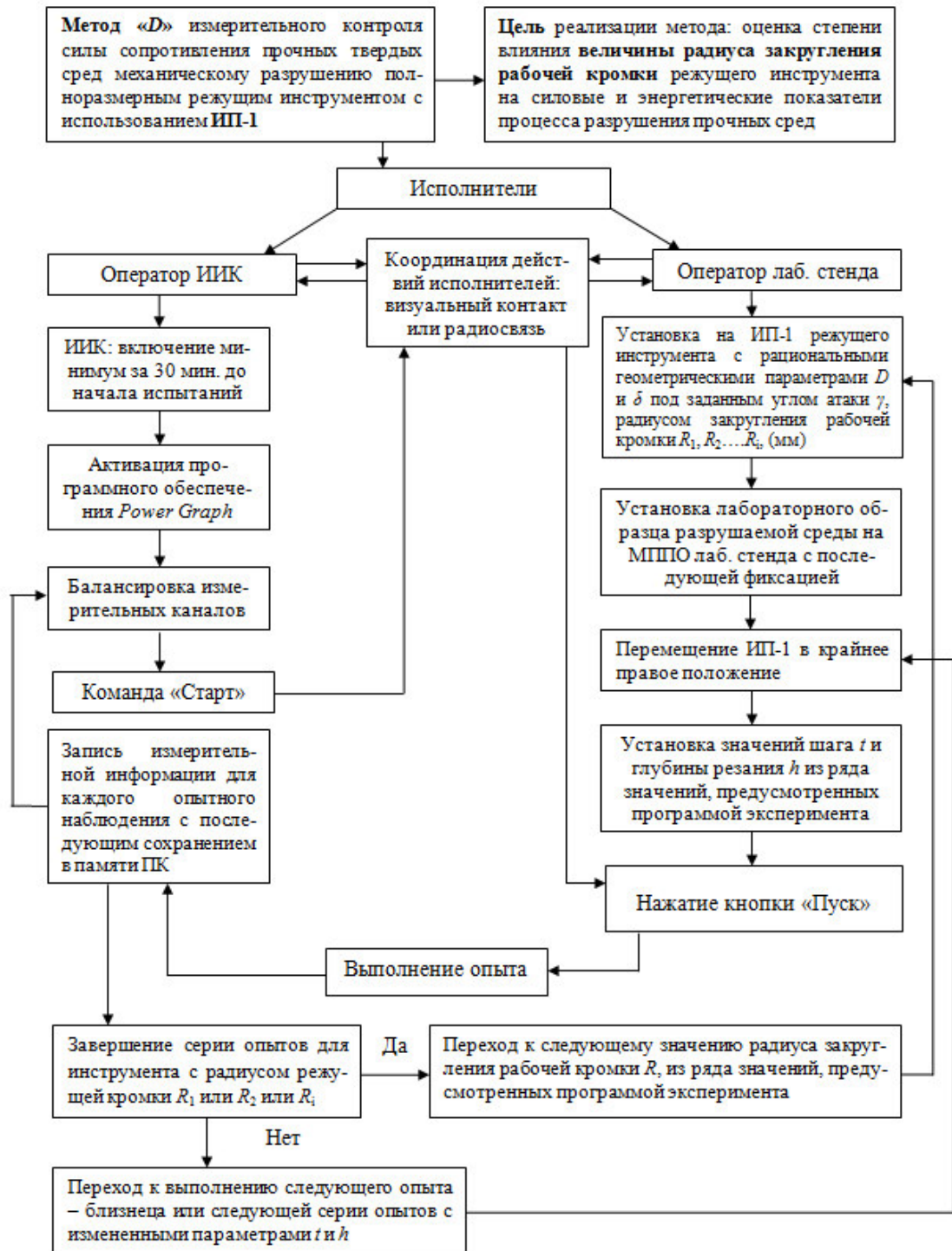


Рисунок 6.6. – Схема применения метода «D» измерительного контроля силы сопротивления прочных сред механическому разрушению режущим инструментом



#### 6.4. Применение метода измерительного контроля силы сопротивления твердых менее прочных сред механическому разрушению масштабными моделями отвальных рабочих органов с использованием измерительного преобразователя ИП-2

Реализация метода измерительного контроля силы сопротивления твердых менее прочных сред механическому разрушению масштабными моделями отвальных рабочих органов подразумевает последовательность и взаимосвязь действий, представленных на рисунке 6.7.

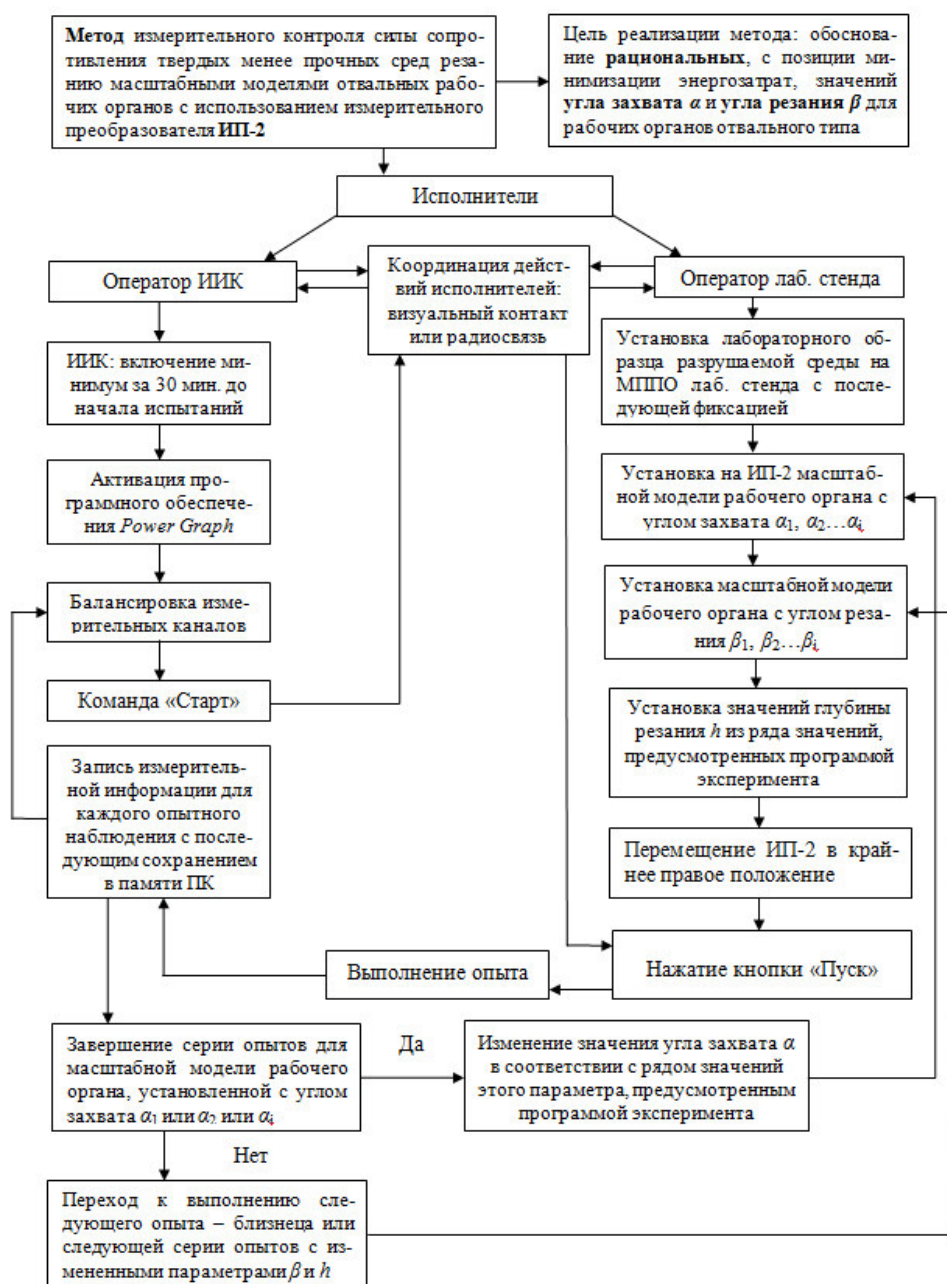


Рисунок 6.7. – Схема применения метода измерительного контроля силы сопротивления твердых менее прочных сред резанию масштабными моделями отвальных рабочих органов с использованием измерительного преобразователя ИП-2

### 6.5. Применение метода градуировки тензометрических элементов

Реализация метода градуировки тензометрических элементов подразумевает последовательность и взаимосвязь действий, представленных на рисунке 6.8.

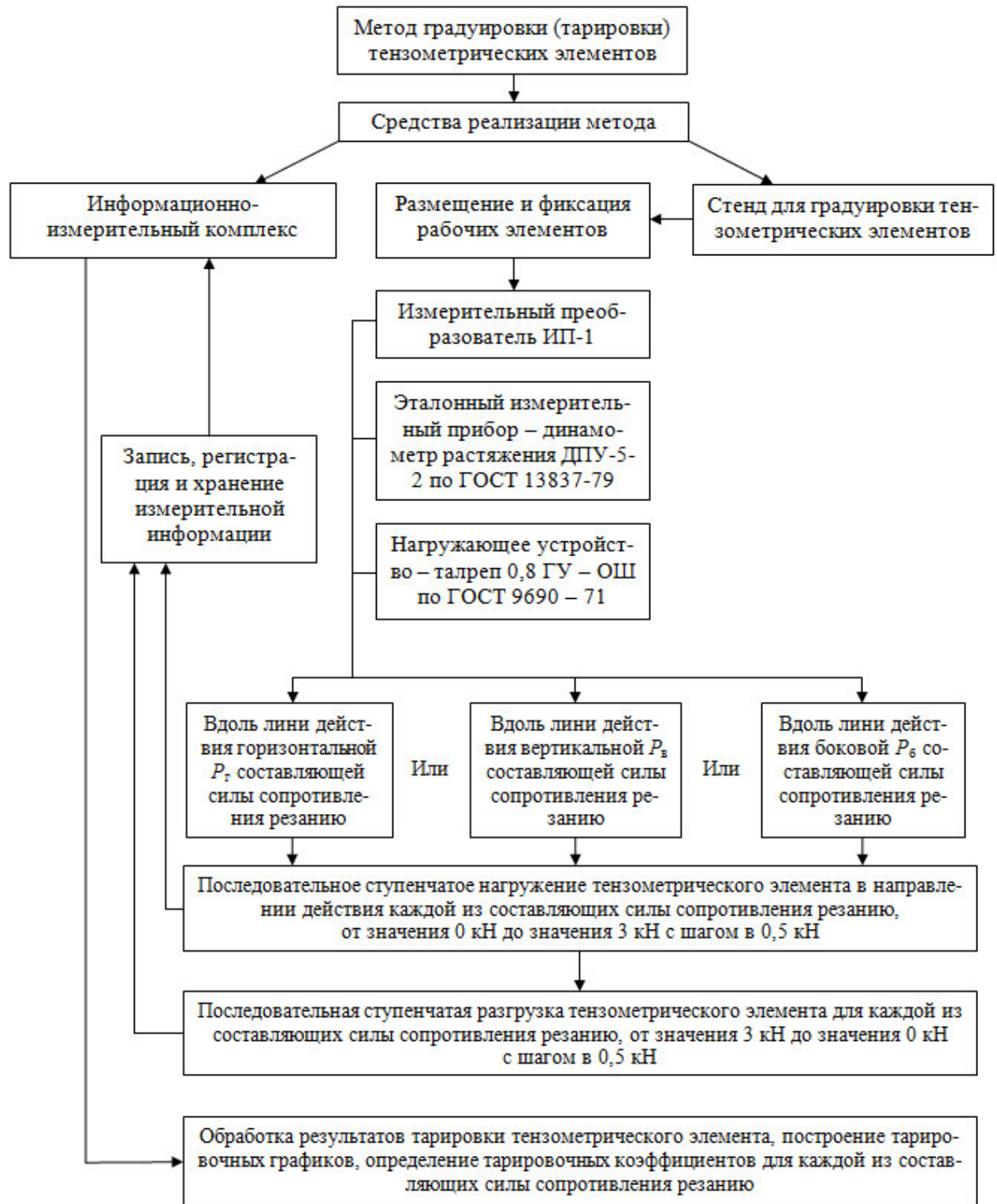


Рисунок 6.8. – Схема применения метода градуировки тензометрических элементов

## **6.6. Использование результатов реализации методов измерительного контроля силовых параметров режущего инструмента применительно к конструкциям высокоэффективного снегоочистительного оборудования**

### **6.6.1. Конструкция сменного рабочего органа отвального типа оснащенного дисковым режущим инструментом**

На рисунке 6.9 представлена конструкция сменного отвального рабочего органа для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов, оснащенного дисковыми резцами, размещенными на рабочем органе по схеме, обеспечивающей взаимное перекрытие рабочих зон смежных резцов.

В основе данного рабочего органа рама, выполненная в виде отвала 1, снабженного двумя вертикальными передними кронштейнами 2, с закрепленной на них пластиной 3. Жесткость крепления вертикальных передних кронштейнов 2 к отвалу 1 обеспечивается дополнительной установкой двух укосин 4. Два вертикальных задних кронштейна 5 отвала 1 жестко закреплен к опорной плите 6, служащей для присоединения рабочего органа к базовой машине (автогрейдеру). В нижней части пластины 3 размещены не менее шести режущих дисков 7. Количество дисковых резцов на рабочем органе определяется длиной отвала и шириной его захвата, и может отличаться в зависимости от эксплуатационной мощности силовой установки базовой машины, несущей рабочий орган, выполненный по предлагаемой схеме, а также и ее эксплуатационной массы.

Каждый из режущих дисков 7, установлен на оси 8, с возможностью свободного вращения вокруг нее, с задним углом (углом атаки)  $\gamma$  не более  $10^\circ$ . Изменение угла  $\gamma$  режущего диска 7 на величину большую  $10^\circ$  повлечет

за собой увеличение угла резания, определяемого суммой значений угла  $\gamma$  и угла  $\delta$  заострения его рабочей кромки (рис. 3.1, 3.2).

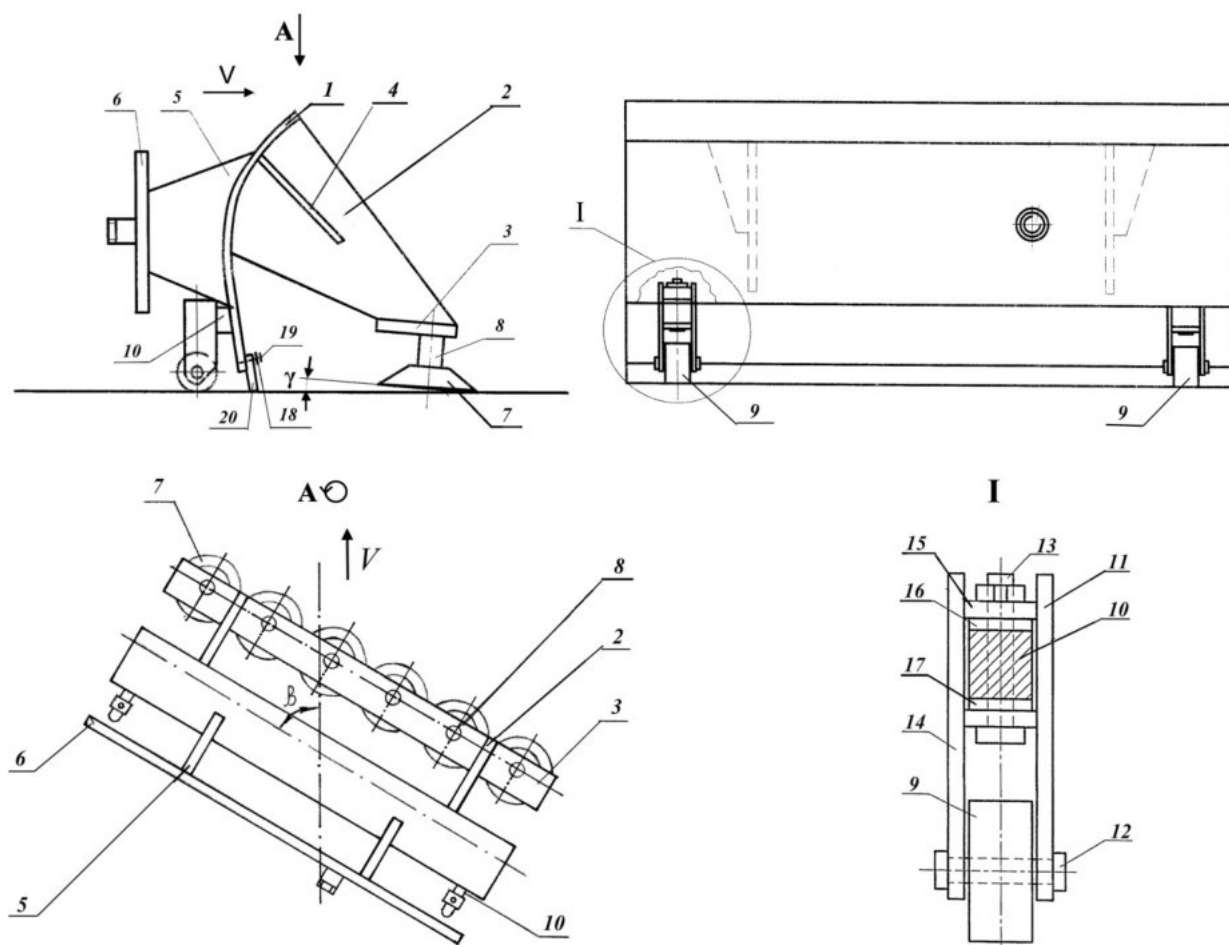


Рисунок 6.9. – Схема рабочего органа отвального типа оснащенного дисковыми резцами: 1 – рама; 2 – передние кронштейны; 3 – пластина; 4 – укосины; 5 – задние кронштейны; 6 – опорная плита; 7 – режущие диски; 8 – ось резца; 9 – опорные колеса; 10 – горизонтальный кронштейн; 11 – вилка; 12-13 – оси; 14 – вертикальные пластины; 15 – горизонтальные пластины; 16 - 17 – пакеты регулировочных прокладок; 18 – листовая пластина; 19 – болты; 20 – эластичный нож.

Это приведет к значительному возрастанию силы сопротивления разрушаемой среды резанию и энергоемкости процесса в целом, которые будут увеличиваться по мере заглубления диска в разрабатываемый массив, так как при этом боковые поверхности диска начнут взаимодействовать с разрушаемой средой на большей площади, обеспечивая вытеснение продуктов разрушения из забоя.

Кроме того, уменьшится рабочая зона диска, и соседние режущие диски будут работать без взаимного перекрытия рабочих зон, оставляя участки не разрушенного массива в промежутках между дисками.

Продольная ось рабочего органа расположена с возможностью поворота в горизонтальной плоскости на угол  $\beta = 38^\circ \div 43^\circ$  к направлению его движения  $V$  (рисунок 6.9). Такое расположение рабочего органа обеспечивает достаточное перекрытие рабочих зон соседних дисков при ширине захвата, обеспечивающей высокую производительность и высокую эффективность сдвигания отвалом продуктов разрушения (см. подраздел 4.6.1) [97].

Изменение значений угла  $\beta$  на величину большую  $43^\circ$  повлечет за собой увеличение ширины захвата рабочего органа, но при этом не будет обеспечено взаимное перекрытие рабочих зон режущих дисков, и в промежутках между дисками будут оставаться участки не разрушенного массива.

Кроме того, каждый режущий диск будет взаимодействовать с цельным, закрытым со всех сторон массивом (блокированная схема резания), что будет способствовать значительному увеличению значений силы сопротивления резанию и энергоемкости процесса по сравнению с резанием при перекрытии рабочих зон, когда каждый режущий диск (кроме крайнего переднего) взаимодействует с массивом, частично разрушенным соседним предыдущим диском (полублокированная схема резания).

По краям отвала 1, с его тыльной стороны установлены два опорных колеса 9, каждое из которых, прикреплено к отвалу 1 посредством горизонтального кронштейна 10 и вилки 11 с осями 12 и 13. Вилка 11 состоит из двух параллельных установленных вертикально пластин 14 с отверстиями для установки оси 12, и двух параллельных установленных горизонтально пластин 15 с отверстиями для установки оси 13, жестко прикрепленных к пластинам 14.



Для регулировки глубины погружения рабочей кромки режущего диска 7 в разрабатываемый массив, между верхним и нижним торцами горизонтального кронштейна 10 и смежными с ними гранями горизонтальных пластин 15 установлены, соответственно верхний 16 и нижний 17 пакеты регулировочных прокладок. Вдоль нижней кромки отвала 1 при помощи листовой пластины 18 и болтов 19 закреплен эластичный нож 20.

Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов работает следующим образом.

Рабочий орган устанавливается на очищаемое покрытие с углом захвата  $\beta$  между продольной осью рабочего органа и предполагаемым направлением его движения. При этом заостренные режущие кромки дисков 7 должны находиться в одной плоскости с опорной поверхностью опорных колес 9, что обеспечивается изменением числа прокладок в пакетах 16 и 17. Рабочий орган перемещается базовой машиной в направлении  $V$ , и режущие диски 7 врезаются под острым углом резания в снежно-ледяной накат, разрушают его. Продукты разрушения перемещаются к эластичному ножу 20 и с его помощью сдвигаются в сторону. Рабочие зоны режущих дисков взаимно перекрываются, что способствует улучшению качества очистки обрабатываемых поверхностей.

Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет интенсифицировать отвальный рабочий орган и адаптировать его к разрушению прочных снежно-ледяных отложений на дорожных и аэродромных покрытиях с малой энергоемкостью процесса, что способствует повышению эффективности использования такого оборудования.

Конструкция данного рабочего органа для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов, защищена патентом на изобретение № 2396389 [213].

В работе [134] автором приводится сравнительный расчет силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию основным стандартным отвалом автогрейдера ДЗ-98 (ГС-25) и силы сопротивления этой же среды резанию отвальным рабочим органом, оснащенным дисковыми резцами (рисунок 6.9) при равной ширине захвата  $B$ , м.

Исходные данные для расчета: длина стандартного отвала  $L=3,7$  м, угол установки отвала в плане  $\beta = 40$  град, средняя высота удаляемого слоя снежно-ледяного наката  $h_{cp} = 0,06$  м, коэффициент сопротивления льда резанию  $k_{cp} = 0,15$  МПа =  $1,5 \cdot 10^5$  Па. Значение данного коэффициента принято для снежно-ледового наката плотностью  $\rho_c = 0,75$  г/см<sup>3</sup> при температуре от минус 1 до минус 3 °С [74], предел прочности разрушаемой среды на сжатие  $\sigma_{сж} = 1,8 \div 2,3$  МПа [56].

При данных условиях расчетная ширина захвата отвала составила  $B = 2,378$  м, расчетное значение силы сопротивления разрушаемой среды резанию стандартным отвалом автогрейдера составило  $W_I = 21,4$  кН.

Суммарное сопротивление резанию снежно-ледяных отложений отвальным рабочим органом, оснащенным дисковыми резцами составило

$$W_1^1 = P_{1B} + P_{2Г} \times n = 2,353 + 0,43 \times 17 = 9,66 \text{ кН} \quad (6.1)$$

где  $P_{1B}$  – значение вертикальной составляющей силы сопротивления СЛЮ резанию дисковым резцом типа  $A$  по блокированной схеме резания, кН;

$P_{2Г}$  – значение горизонтальной составляющей силы сопротивления СЛЮ резанию дисковым резцом типа  $A$  по полублокированной схеме, кН;

$n$  – необходимое количество дисковых резцов размещаемых на рабочем органе, шт.

Значение  $P_{1B}$  рассчитывается применительно к крайнему переднему резцу (рисунок 6.9), первым врезающемуся в полностью закрытый массив и работающему в режиме блокированного резания, а значения  $P_{2Г}$  –

применительно к каждому последующему резцу, взаимодействующему с массивом, частично разрушенным предыдущим резцом, т. е. работающим в режиме полублокированного резания. Оба указанных значения составляющих силы сопротивления резанию рассчитываются в соответствии с «Методикой расчета усилий резания льда дисковым режущим инструментом», представленной в Приложении Д.

Необходимое количество дисковых резцов размещаемых на рабочем органе  $n$ , шт. рассчитывалось для рабочего органа с длиной отвала и шириной захвата, численно равным значениям этих параметров, принятых ранее для стандартного овала автогрейдера, соответственно  $L = 3,7$  м,  $B = 2,378$  м.

Расчет производился для дисковых резцов с рациональными геометрическими параметрами: диаметр  $D = 200$  мм, угол заострения режущей кромки  $\delta = 30^\circ$ . Принятое к расчету значение заднего угла (угла атаки) составило  $\gamma = 5^\circ$ .

Необходимое количество дисковых резцов составило  $n = 18$  шт. При этом величина взаимного перекрытия рабочих зон смежных дисков составила  $\Delta l = 36$  мм, а расстояние между осями соседних дисков  $l_1 = 205,9$  мм (рисунок 6.10).

Выражение для расчета энергоемкости процесса в данном случае примет следующий вид:

$$E = 0.000272 \frac{W}{S}; \text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3 \quad (6.2)$$

где  $W$  – значение сопротивления резанию снежно-ледяных образований (кН);

$S$  – площадь среза, определяемая следующим выражением

$$S = h \cdot B \quad (6.3)$$

где:  $h$  – глубина резания, м;

$B$  – ширина захвата отвала, м

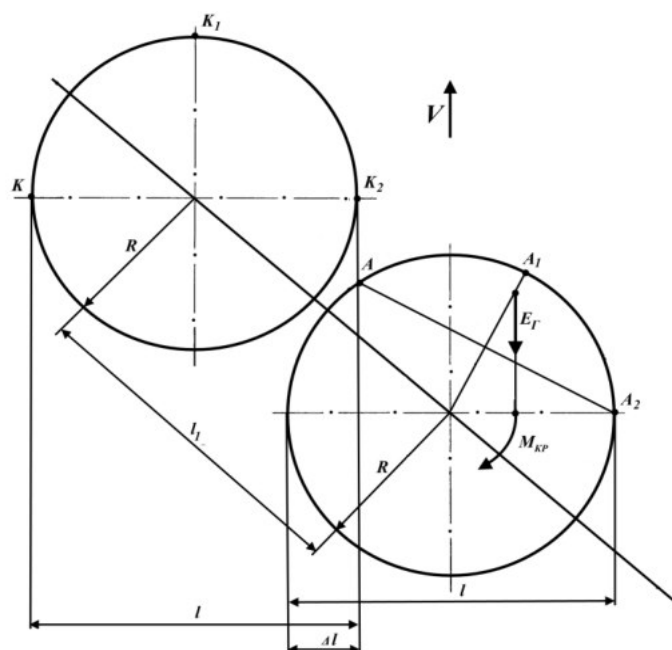


Рисунок 6.10. – Схема для определения величины перекрытия  $\Delta l$  рабочих зон смежных дисков:  $K - K_1 - K_2$  – дуга контакта с разрушаемой средой режущей кромки резца работающего в заблокированном режиме;  $A - A_1 - A_2$  – дуга контакта с разрушаемой средой режущей кромки резца работающего в полублокированном режиме;  $E_\Gamma$  – горизонтальная составляющая реакции льда на воздействие дискового резца;  $M_{кр}$  – крутящий момент силы  $E_\Gamma$  относительно оси вращения резца;  $V$  – направление подачи рабочего органа на забой.

В данном случае ширина захвата обоих рабочих органов равная и составляет  $B = 2,378$  м. Следовательно

$$S = 0,06 \times 2,378 = 0,143 \text{ м}^2$$

Тогда энергоёмкость процесса резания СЛЮ стандартным отвалом автогрейдера составит

$$E_1 = 0,000272 \frac{21,4}{0,143} = 0,041 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$$

Энергоёмкость при работе отвального рабочего органа оснащенного дисковыми резцами

$$E_1^1 = 0.000272 \frac{9.66}{0.143} = 0,018 \text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$$

Очевидно, что расчетное значение энергоемкости процесса резания прочных СЛО отвальным рабочим органом, оснащенным дисковыми резцами в 2,3 раза ниже расчетного значения энергоемкости при работе стандартным отвалом автогрейдера.

Зная значения сопротивления снежно-ледяных образований резанию  $W_l = 21,4$  кН и  $W_l^l = 9,66$  кН производим расчет тягового усилия базовой машины несущей рабочий орган по сцеплению колес с опорным покрытием. Сопротивление резанию  $W$ , возникающее при работе машины не должно превышать тягового усилия  $T$  по ее сцепному весу, определяемого по формуле

$$T = G_{сц} \times g \times \varphi_{св} \quad (6.4)$$

где  $G_{сц}$  – сцепной вес базовой машины, кг;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\varphi_{сц}$  – коэффициент сцепления шин с покрытием

Для автогрейдера ГС-25 (ДЗ-98), являющегося полноприводной машиной, сцепной вес равен его эксплуатационной массе (включая массу бульдозерного отвала и заднего рыхлителя):  $G_{сц} = G = 19500$  кг. Коэффициент сцепления шин с укатанным снежно-ледяным покрытием составляет  $\varphi_{сц} = 0,1$  [52]. Тогда сила тяги автогрейдера составит

$$T = 19500 \times 9.81 \times 0.1 = 19.13 \text{кН}$$

Из результатов расчетов видно, что значение силы сопротивления снежно-ледяных отложений резанию стандартным отвалом автогрейдера  $W_I = 21,4$  кН превышает расчетное значение силы тяги указанного автогрейдера, что свидетельствует о невозможности использования этой машины со стандартным рабочим органом для разрушения прочных снежно-ледяных отложений.

При этом значения сопротивления разрушаемой среды резанию отвальным рабочим органом, оснащенный дисковыми резцами  $W_I' = 9,66$  кН в 2 раза ниже расчетного значения силы тяги автогрейдера ГС-25. Следовательно, можно рассмотреть возможность использования подобного рабочего органа на менее мощной машине, например автогрейдере среднего типа ГС-18.05. Данная машина имеет колесную схему 1 х 2 х 3 и к расчету тягового усилия следует принимать сцепной вес автогрейдера, приходящийся на ведущие колеса, определяемый из выражения

$$G_{сц} = \mu \times G \quad (6.5)$$

где  $\mu$  – коэффициент нагрузки ведущих колес

Для машин с колесной схемой 1 х 2 х 3 значения коэффициента нагрузки ведущих колес  $\mu = 0,7 \div 0,75$ .

Тогда сцепной вес автогрейдера ГС-18.05, приходящийся на ведущие колеса, составит

$$G_{сц} = 0,75 \times 16280 = 12210 \text{ кг}$$

Сила тяги автогрейдера ГС-18.05 составит

$$T = 12210 \times 9,81 \times 0,1 = 11,98 \text{ кН}$$

Полученное значение  $T = 11,98$  кН на 2,66 кН превышает значение сопротивления снежно-ледяных образований резанию отвальным рабочим органом, оснащенный дисковыми резцами  $W_I^I = 9,32$  кН. Следовательно, можно предположить, что в качестве базовой машины, несущей рабочий орган отвального типа, оснащенный дисковыми резцами и обеспечивающей эффективное разрушение снежно-ледяных отложений при условиях описанных выше, может быть использован менее мощный автогрейдер.

### **6.6.2. Конструкция рабочего органа с дисковым инструментом для разрушения снежно-ледяного наката на дорожных покрытиях**

Перспективные конструкции высокоэффективного снегоочистительного оборудования для разрушения прочных СЛО могут быть получены как путем модернизации уже существующего оборудования (рисунок 6.9), так и путем разработки и создания новых конструкций, адаптированных к соответствующей базовой машине, например, автогрейдеру.

Конструкция оснащаемого дисковым режущим инструментом рабочего органа для удаления снежно-ледяного наката с дорожных покрытий представлена на рисунке 6.11.

В основе рабочего органа предлагаемой конструкции – рама 1, связанная посредством двух пар гидроцилиндров 2 и 3, вилки 4, кронштейна 5 и пальца 6 с тяговой рамой базовой машины (автогрейдера) с возможностью поворота в вертикальной плоскости относительно оси пальца 6. К раме 1 шарнирно прикреплены с возможностью поворота в вертикальной плоскости рычаги 7, соединенные с гидроцилиндрами 8 одностороннего действия, имеющими штоки 9. На свободных концах рычагов 7 размещены режущие диски 10 с непрерывным односторонним клиновым ободом, каждый из которых установлен на оси, с возможностью свободного

вращения вокруг нее в вертикальной плоскости, большим основанием наружу и углом  $\gamma$  (углом атаки) между плоскостью большего основания и продольной осью рабочего органа.

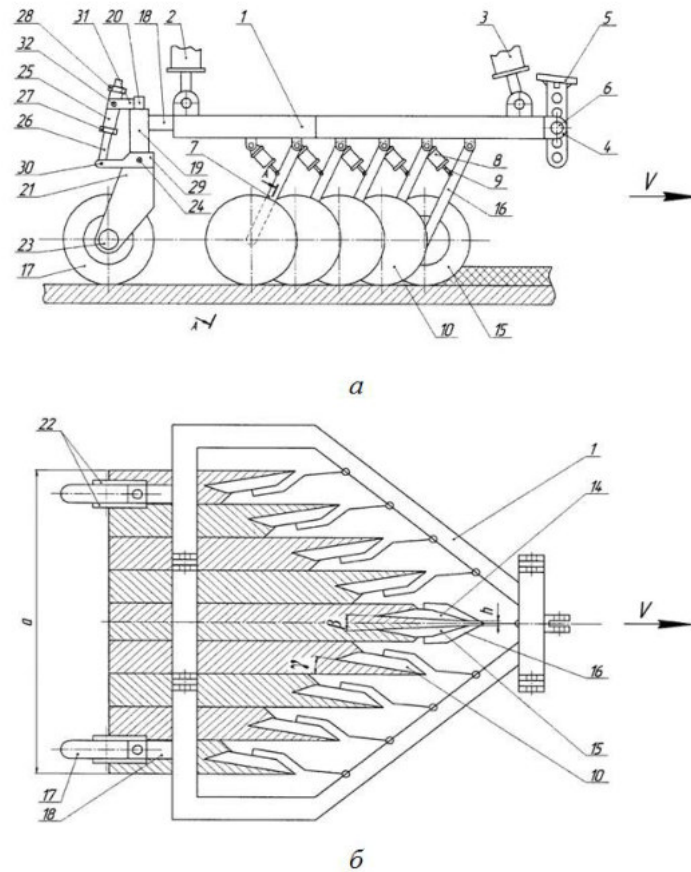


Рисунок 6.11. – Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов: а – вид сбоку; б – вид сверху, с изображением границ поля разрушенного снежно-ледяного массива

Два передних режущих диска 14 и 15, имеющих меньший угол заострения, размещены на общем рычаге 16 и обращены друг к другу большими своими основаниями с углом  $\beta$  между ними и расстоянием  $h$  между режущими кромками в месте их схождения. Режущие диски 10, 14 и 15 установлены на раме 1 в плане клином, симметрично относительно продольной оси рабочего органа. В задней части рамы с ее тыльной стороны установлены два опорных колеса 17.



Гидравлический насос 33 (рисунок 6.12) посредством напорной линии 34 подключен к трехпозиционному четырехлинейному гидрораспределителю 35, обеспечивающему его сообщение в одной из позиций с регулятором давления 36, а в другой – с манометром 37, гидроаккумулятором 38 и бесштоковыми полостями гидроцилиндров 39 одностороннего действия, каждый из которых связан одним концом с рамой 1 (рисунок 6.11), а другим – с кронштейном соответствующего рычага 7 и общего рычага 16. Сливная линия 40 (рисунок 6.12) соединяет гидрораспределитель 35 с гидробаком 41.

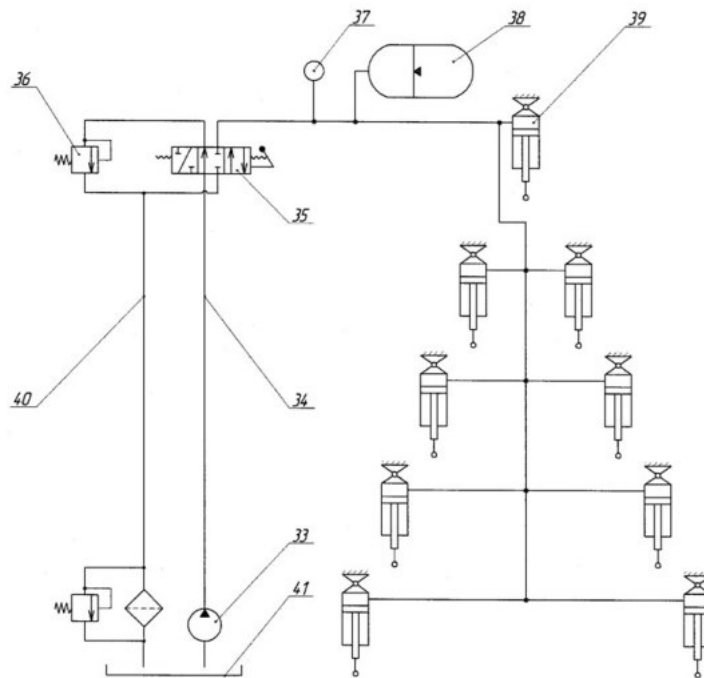


Рисунок 6.12. – Схема гидравлическая принципиальная рабочего органа предлагаемой конструкции

Для использования по назначению, рабочий орган устанавливается на очищаемое покрытие из транспортного положения в рабочее при помощи гидроцилиндров 2 и 3 базовой машины. Регулировка глубины погружения режущих дисков в разрабатываемый массив осуществляется изменением положения рамы 1 относительно тяговой рамы базовой машины. Передняя

часть рамы 1 при извлеченном пальце 6 перемещается гидроцилиндрами 3 вверх или вниз до положения, при котором обеспечивается зазор между режущими кромками дисков 14 и 15 и очищаемым покрытием. При этом отверстия в вилке 4 совмещаются с одним из ближайших отверстий в кронштейне 5, и соединение фиксируется пальцем 6. Положение задней части рамы 1, исключающее контакт режущих кромок дисков 10 с очищаемым покрытием, устанавливается посредством регулировки опорных колес 17.

Затем от насоса 33 гидрораспределителем 35 производится подпитка гидроаккумулятора 38 до необходимого по прочности удаляемого снежно-ледяного наката давления, величина которого контролируется по манометру 37.

Рабочий орган перемещается базовой машиной в направлении  $V$  и режущие диски 10, 14, 15, врезаясь в снежно-ледяной накат, разрушают его. При этом установленные на общем рычаге 16 режущие диски 14 и 15 взаимодействуют с цельным закрытым со всех сторон массивом, осуществляя блокированную схему резания.

Расстояние  $h$  между режущими кромками дисков 14 и 15 не должно быть малым. Его величину следует подбирать экспериментально, из условия наибольшей эффективности разрушения уступа забоя, остающегося в промежутке между дисками 14 и 15. Этим обеспечивается блокированное резание разрушаемого массива двумя отдельными дисками с односторонним непрерывным клиновым ободом, значительно менее энергоемкое, чем резание при минимальных значениях  $h$ , когда сближенные диски 14 и 15 фактически представляют собой один целый режущий диск с двухсторонним клиновым ободом.

Каждый из режущих дисков 14 и 15, перекатываясь по забюю и взаимодействуя с разрушаемой средой в месте контакта режущей кромки с ней, создает напряжения. При достижении напряжениями предельных

значений происходит растрескивание материала, скол и отделение фрагментов разрушения различной величины, которые под воздействием боковой конусной поверхности режущего диска вытесняются из забоя. Уступ забоя в промежутке между дисками 14 и 15 растрескивается и разрушается в результате воздействия силовых линий горизонтальной, вертикальной и боковой составляющих силы сопротивления резанию, возникающей в месте контакта режущих кромок дисков с разрушаемой средой. Установка режущих дисков 14 и 15 с углом  $\beta$  между большими их основаниями обеспечивает уменьшение трения поверхности этих оснований о материал разрушаемого массива. В результате одновременного воздействия режущих дисков 14 и 15 на разрушаемый цельный массив образуется борозда, содержащая фрагменты разрушенного материала различной величины. Глубина борозды определяется заданной глубиной резания, а ширина - рабочей зоной пары режущих дисков 14 и 15, а также углами продольного и поперечного сколов разрушаемого материала.

Механизм взаимодействия с разрушаемой средой режущих дисков 10, 14 и 15 аналогичен. Однако первой, следующей за дисками 14 и 15 парой дисков 10, расположенных симметрично относительно главной оси рабочего органа, совершается резание уже частично разрушенного массива. Скол и отделение фрагментов разрушения происходит при меньших затратах энергии и сопровождается их сдвигом в сторону полученной ранее борозды. Таким образом, имеет место полублокированная схема резания, значительно менее энергоемкая, чем блокированная. Эта схема реализуется и каждой последующей парой режущих дисков 10, расположенных симметрично относительно главной оси рабочего органа, осуществляющей резание массива частично разрушенного предыдущей парой. Установка каждого из режущих дисков 10 под углом  $\gamma$  к продольной оси рабочего органа обеспечивает уменьшение трения поверхности большего основания диска о материал разрушаемого массива. Рабочие зоны режущих дисков взаимно

перекрываются, чем обеспечивается разрушение снежно-ледяного наката по всей ширине захвата рабочего органа, которая определяется расстоянием  $a$  между наиболее удаленными от оси рабочего органа точками режущих кромок задней симметричной пары режущих дисков 10. Количество симметричных пар режущих дисков 10 может меняться в зависимости от конструкции и мощности базовой машины, несущей рабочий орган.

При встрече любого из режущих дисков 10 или пары дисков 14 – 15 с препятствием, прочность которого выше предела прочности разрушаемого наката, диски поднимаются, преодолевая давление, создаваемое гидроаккумулятором 38, и перекатившись по поверхности препятствия, возвращаются в исходное положение. Этим предотвращается поломка режущих дисков.

Разрушение прочного снежно-ледяного наката осуществляется в тангенциальном режиме режущими дисками с непрерывным односторонним клиновым ободом, свободно вращающимися на соответствующих осях, чем обеспечивается разрушение с меньшими затратами энергии при равномерном износе режущих кромок инструмента. Регулировкой глубины погружения режущих дисков в разрабатываемый массив исключается контакт режущей кромки диска с очищаемым покрытием.

Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет повысить эффективность процесса механического разрушения прочного снежно-ледяного наката на поверхности дорог и аэродромов за счет снижения его энергоемкости при ожидаемой высокой производительности разрабатываемого снегоочистительного оборудования.

Конструкция данного рабочего органа для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов, защищена патентом на изобретение № 2487970 [214].

Сравнительный расчет силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию основным стандартным отвалом автогрейдера ДЗ-98

(ГС-25) и силы сопротивления этой же среды резанию рабочим органом, оснащенным дисковыми резцами (рисунок 6.11) производился при тех же условиях, что и для отвального рабочего органа (рисунок 6.9).

При данных условиях расчетная ширина захвата отвала составила  $B = 2,378$  м, расчетное значение силы сопротивления разрушаемой среды резанию стандартным отвалом автогрейдера составило  $W_I = 21,4$  кН.

При ширине рабочей зоны нового оборудования (рисунок 6.11), равной указанному значению ширины захвата, необходимое количество дисковых резцов размещаемых на рабочем органе составило  $n = 24$  шт. (12 пар).

В этом случае суммарное сопротивление резанию снежно-ледяных отложений рабочим органом, оснащенным дисковыми резцами составит

$$W_1^I = 2P_{1Г} + P_{2Г} \times n = 2 \times 0,25 + 0,395 \times 22 = 9,19 \text{ кН} \quad (6.6)$$

где  $P_{1Г}$  – значение горизонтальной составляющей силы сопротивления СЛО резанию дисковым резцом типа  $A$  по блокированной схеме резания, кН;

$P_{2Г}$  – значение горизонтальной составляющей силы сопротивления СЛО резанию дисковым резцом типа  $A$  по полублокированной схеме, кН;

$n$  – необходимое количество дисковых резцов (за исключением резцов первой пары) размещаемых на рабочем органе, шт.

Значение  $P_{1Г}$  рассчитывается применительно к каждому из резцов первой пары (рисунок 6.11), врезающихся в полностью закрытый массив и работающих в режиме блокированного резания, а значения  $P_{2Г}$  – применительно к каждому последующему резцу, взаимодействующему с массивом, частично разрушенным предыдущим резцом, т. е. работающим в режиме полублокированного резания. Оба указанных значения составляющих силы сопротивления резанию рассчитываются в соответствии с «Методикой расчета усилий резания льда дисковым режущим инструментом», представленной в Приложении Д.

Рассчитанное выше значение силы тяги базовой машины – автогрейдера ГС-25 составило  $T = 19,13$  кН. Также был сделан вывод о невозможности использования этой машины со стандартным отвалом для разрушения прочных снежно-ледяных отложений в силу превышения значения  $W_I = 21,4$  кН над расчетным значением  $T$ .

В рассматриваемом случае значение сопротивления разрушаемой среды резанию рабочим органом, оснащенный дисковыми резцами  $W_I^1 = 9,19$  кН, в 2,1 раза ниже расчетного значения силы тяги автогрейдера ГС-25 и в 1,3 раза ниже расчетного значения силы тяги автогрейдера ГС-18.05, составившей  $T = 11,98$  кН.

Следовательно, можно предположить, что в качестве базовой машины, несущей рабочий орган, оснащенный дисковыми резцами и обеспечивающей эффективное разрушение снежно-ледяных отложений при условиях описанных выше, может быть использован автогрейдер ГС-18.05.

При площади среза разрушаемого материала  $S = 0,143$  м<sup>2</sup> энергоемкость процесса резания прочных СЛО рабочим органом, оснащенный дисковыми резцами, в соответствии с выражением (6.2) составит

$$E_1^1 = 0,000272 \frac{9,19}{0,143} = 0,017 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$$

Данное значение также как и в случае с отвальным рабочим органом (рисунок 6.9) существенно (в 2,4 раза) ниже расчетного значения энергоемкости процесса резания СЛО стандартным отвалом автогрейдера, составившим  $E_1 = 0,041$  кВт ч/м<sup>3</sup>.

Результаты приведенных выше расчетов свидетельствуют о возможности эффективного разрушения прочных снежно-ледяных отложений рабочими органами, оснащенными дисковым режущим инструментом с минимальной энергоемкостью процесса, при ожидаемой высокой производительности такого снегоочистительного оборудования.

Достоверность получаемых расчетных значений силы сопротивления разрушаемой среды резанию дисковым инструментом подтверждается их удовлетворительной сходимостью (см. Главу 5) с результатами лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемой средой (см. Главу 4), проведенных в достаточном объеме при последовательной реализации каждого из методов («А», «В», «С» и «D») «Системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных твердых сред механическому разрушению полноразмерным режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП-1» (см. раздел 6.3).

Кроме того, высокой достоверности результатов исследований способствуют использование в работе полноразмерного режущего инструмента, а не его масштабных моделей, а также лабораторных образцов разрушаемой среды природного происхождения, а не приготовленных искусственно.

Реализация данных методов производилась в соответствии с Методикой лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой с использованием измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда (см. Раздел 6.2.) при предварительной тарировке тензометрического элемента ИП-1 в соответствии с Методом градуировки тензометрических элементов (см. Раздел 6.5). Диапазон измерения контролируемой величины, обеспечиваемый тензометрическим элементом ИП-1, составляет  $0 \div 2500$  Н.

На основании результатов реализации методов измерительного контроля силовых параметров высокоэффективного снегоочистительного оборудования, с использованием соответствующих средств контроля, представленных в данной работе, *сформулирован ряд выводов и рекомендаций по использованию такого оборудования на практике.*

Высокоэффективное механическое разрушение на дорожных и аэродромных покрытиях прочных снежно-ледяных отложений плотностью  $\rho_C = 0,75 \text{ г/см}^3$ , пределом прочности на сжатие  $\sigma_{сж} = 1,8 \div 2,3 \text{ МПа}$  при температуре от минус 1 до минус 3 °С, средней высоте удаляемого слоя  $h_{cp} = 0,06 \text{ м}$  возможно посредством использования рабочих органов, оснащаемых дисковым режущим инструментом при установке следующих геометрических и технологических параметров такого инструмента и оснащаемого им оборудования.

Результатами реализации Метода «А» (см. Раздел 4.2, Подраздел 6.3.1) обоснованы рациональные с позиции минимизации энергозатрат, значения диаметра дискового резца  $D = 200 \text{ мм}$ , угла заострения режущей кромки резца  $\delta = 30^\circ$ , угла атаки  $\gamma = 3 \div 5^\circ$ .

Результатами реализации Метода «В» (см. Раздел 4.3., Подраздел 6.3.2) обоснованы рациональные с позиции минимизации энергозатрат, при высокой производительности процесса, значения скорости резания прочных снежно-ледяных отложений дисковым инструментом при различных параметрах среза. Рекомендуемые значения скорости резания составляют: для шага резания  $t = 10, 20, 30$  и  $40 \text{ мм}$  –  $V = 1,3 \text{ м/с}$  ( $4,68 \text{ км/ч}$ ), для шага резания  $t = 50 \text{ мм}$  –  $V = 2,2 \text{ м/с}$  ( $7,92 \text{ км/ч}$ ), для шага резания  $t = 60 \text{ мм}$  –  $V = 1,9 \text{ м/с}$  ( $6,84 \text{ км/ч}$ ).

Результатами реализации Метода «С» (см. Раздел 4.4, Подраздел 6.3.3) установлен диапазон значений температуры окружающей среды (воздуха)  $t_{oc} = 0 \div -15 \text{ }^\circ\text{C}$ , предпочтительный для организации работ по очистке дорожных покрытий от прочных снежно-ледяных отложений. Механическое разрушение данной среды в указанных температурных условиях рабочими органами, оснащаемыми дисковым режущим инструментом будет осуществляться при малых значениях силы  $P_{\Gamma}$  сопротивления резанию и малой удельной энергоемкости  $E$  исследуемого процесса.



Результатами реализации Метода «D» (см. Раздел 4.5., Подраздел 6.3.4) установлены приемлемые (для практического применения по условию «малая энергоемкость – способность к зарезанию в разрушаемый массив») значения радиуса  $R_{кр}$  закругления рабочей кромки дискового режущего инструмента, увеличивающиеся по мере его износа. Для инструмента с горизонтальной осью вращения  $R_{кр} = 0,5 \div 2,5$  мм. Для инструмента с осью вращения имеющей положение близкое к вертикальному (с отклонением от вертикали на угол  $\gamma$ )  $R_{кр} = 0,5 \div 1,5$  мм.

Метод измерительного контроля силы сопротивления твердых *менее прочных* сред механическому разрушению масштабными моделями отвальных рабочих органов с использованием измерительного преобразователя ИП-2 (см. Разделы 4.6., 6.4) реализовывался в соответствии с Методикой лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия режущего инструмента с разрушаемой средой с использованием измерительной установки – модернизированного лабораторного стенда (см. Раздел 6.2.) при предварительной тарировке тензометрического элемента ИП-2 в соответствии с Методом градуировки тензометрических элементов (см. Раздел 6.5). Диапазон измерения контролируемой величины, обеспечиваемый тензометрическим элементом ИП-2, составляет  $0 \div 1000$  Н.

Результатом реализации данного метода является обоснование рациональных с позиции минимизации энергозатрат технологических параметров снегоуборочных машин, оснащенных отвальными рабочими органами, предназначенными для разрушения уплотненного снега. Плотность разрушаемой среды  $\rho = 0,40 \div 0,50$  г/см<sup>3</sup> при температуре окружающего воздуха от минус 5 до минус 10 °С. Скорость резания 0,51 м/с (1,84 км/ч). Рекомендуемые значения угла резания  $\beta = 45^\circ - 55^\circ$  при величине угла захвата отвала  $\alpha = 45^\circ$ .

Данные результаты могут быть использованы и применительно к отвальному рабочему органу, оснащённому дисковым режущим инструментом (рисунок 6.9).

Реализацией метода измерительного контроля прочности (несущей способности) снежно-ледяных покрытий автодорог и аэродромов с использованием твердомеров предложенных конструкций (рисунки 2.11, 2.20) обеспечивается оперативное, с малой трудоёмкостью процесса и с высокой точностью, определение значений контролируемого параметра как в нормативном диапазоне от 294,3 кПа (3,0 кгс/см<sup>2</sup>) до 979,7 кПа (9,99 ≈ 10,0 кгс/см<sup>2</sup>), так и в расширенном 170 кПа (1,73 кгс/см<sup>2</sup>) ÷ 3155 кПа (32,17 кгс/см<sup>2</sup>) при средней относительной погрешности измерений 7%.

### **6.7. Выводы по главе**

1. Практическое использование представленных в данной диссертационной работе средств и системы методов измерительного контроля силы сопротивления резанию прочных снежно-ледяных отложений дисковым режущим инструментом (на ряду с методикой расчета силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым режущим инструментом) позволяет на стадии проектирования определять рациональные геометрические и технологические параметры режущего инструмента и оснащаемого им снегоочистительного оборудования, обеспечивающих механическое разрушение данной среды с малой энергоёмкостью процесса при высокой производительности таких рабочих органов.

2. Предполагается, что применением рабочих органов, оснащаемых дисковым режущим инструментом, в практике зимнего содержания дорог и аэродромов будет обеспечиваться ответственный промежуточный этап подготовки очищаемых покрытий, заключающийся в разрушении трудноудаляемых прочных снежно-ледяных отложений толщиной слоя  $h \leq$

100 мм и сдвиг продуктов разрушения в сторону основным отвалом базовой машины, оснащенным эластичным ножом. При этом окончательная очистка покрытий может производиться химико-механическим способом, но при существенно более низком расходе химически активных противогололедных материалов (ПГМ), так как известно, что расход последних, нормируется в зависимости от толщины очищаемого слоя и температуры окружающего воздуха. Также известно, что применение ПГМ эффективно только при толщине слоя прочных снежно-ледяных образований до 20 мм. Со снижением расхода ПГМ снизится и потребность в специальной технике для их распределения, что также будет способствовать экономии затрат энергии и сокращению времени вредного воздействия работающих машин на окружающую среду.

Такое использование высокоэффективного снегоочистительного оборудования позволит эксплуатационным организациям выполнять работы зимнего содержания дорог и аэродромов в установленные сроки и в полном объеме с обеспечением при этом нормативных значений основных показателей эксплуатационного состояния покрытий: чистоты, ровности, коэффициента сцепления. Это в свою очередь будет способствовать *повышению уровня безопасности данных техногенных объектов при их эксплуатации.*

3. Практическое использование представленных в данной диссертационной работе средств и метода измерительного контроля силы сопротивления уплотненного снега резанию масштабной моделью отвала позволяет в лабораторных условиях определять (уточнять) его рациональные технологические параметры (величину угла резания  $\beta$ , величину угла захвата отвала  $\alpha$ ), при установке которых в реальных условиях эксплуатации, механическое разрушение данной среды будет осуществляться с малой энергоемкостью процесса при ожидаемой высокой производительности такого снегоочистительного оборудования.

Обеспечение при этом нормативных значений основных показателей эксплуатационного состояния дорожных и аэродромных покрытий: чистоты, ровности, коэффициента сцепления, будет *способствовать повышению уровня безопасности данных техногенных объектов при их эксплуатации.*

4. Практическое использование средств и метода измерительного контроля прочности (несущей способности) снежно-ледяных покрытий автодорог и аэродромов, представленных в данной диссертационной работе, позволит специалистам, обеспечивающим их зимнее содержание быстро и с высокой точностью определять значения контролируемого параметра. Наличие такой информации способствует рациональному планированию мероприятий по *поддержанию покрытий в пригодном для безопасной эксплуатации состоянии и продлению сроков сезонной эксплуатации данных техногенных объектов.*

5. В случае организации зимнего содержания покрытий методом очистки от снежно – ледяных отложений, результатами оперативного контроля их прочности будет обеспечиваться получение более полной информации о физико-механических свойствах прочной среды, подлежащей разрушению рабочими органами снегоуборочных машин, что позволит на стадии проектирования, рассчитывать, а при эксплуатации назначать рациональные, с позиции минимизации энергозатрат и повышения производительности, конструктивные и технологические параметры такого оборудования.

Кроме того, результаты оперативного контроля прочности снежно – ледяных отложений при их удовлетворительной сходимости со значениями предела прочности разрушаемой среды на сжатие ( $\sigma_{сж}$ , МПа) могут быть использованы в методике расчета усилий резания льда дисковым режущим инструментом (Приложение 11) для определения значений сцепления материала  $C_0$ , (кН/м<sup>2</sup>) и угла  $\varphi_1$ , (град) внутреннего трения материала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, на основании выполненных автором исследований, решена научная проблема разработки и создания методологии измерительного контроля силовых параметров дискового режущего инструмента и оснащаемого им высокоэффективного снегоочистительного оборудования, имеющая, на современном этапе освоения северных и арктических территорий, важное хозяйственное значение для предприятий, обеспечивающих зимнее содержание дорожных и аэродромных покрытий.

**Основные выводы, научные и практические результаты,** полученные автором, и представленные в диссертации заключаются в следующем:

1. Разработан метод оперативного полевого контроля прочности (несущей способности) уплотненного снежно-ледяного покрова грунтовых аэродромов и автодорог, реализуемый посредством использования нового измерительного прибора – твердомера, обеспечивающий получение достоверных значений контролируемой величины в диапазоне нормативных для такого вида покрытий значений:  $294,3 \div 979,7$  кПа ( $3,0 \div 10,0$  кгс/см<sup>2</sup>) при средней относительной погрешности измерений 7%.

2. Разработана методика лабораторных экспериментальных исследований процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемой средой с использованием новой измерительной установки – лабораторного стенда, обеспечивающая стабильное получение измерительной информации, характеризующей силовые параметры дискового реза, диаметром  $D = 0,2$  м в диапазонах значений: шага резания  $t = 0,00 \div 0,06$  м, глубины резания  $h = 0,00 \div 0,06$  м, скорости резания  $V = 0,34 \div 3,32$  м/с.

3. Обоснована конструкция измерительного преобразователя ИП-1, обеспечивающая, при работе в составе измерительных установок, получение достоверных значений силы сопротивления разрушаемой прочной среды резанию дисковым инструментом одновременно по горизонтальной, вертикальной и боковой составляющим в диапазоне значений  $P = 0 \div 2500$  Н.

4. Разработан метод градуировки тензометрических элементов, реализуемый посредством использования предлагаемой в работе новой измерительной установки – градуировочного стенда, чем обеспечивается тарировка измерительного преобразователя ИП-1 в диапазоне значений  $P = 0 \div 2500$  Н последовательно, по трем составляющим силы сопротивления резанию, с минимальными затратами труда и времени при использовании только одного эталонного прибора – динамометра растяжения.

5. Проведены экспериментальные лабораторные исследования процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с прочными снежно-ледяными отложениями, результатами которых, при последовательной реализации каждого из методов «А», «В», «С», «D» Системы методов измерительного контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым режущим инструментом с использованием измерительного преобразователя ИП-1, установлены закономерности изменения значений контролируемой силы в зависимости от величины угла заострения инструмента, скорости резания, температуры окружающей среды, влияющей на прочность разрушаемого материала, и радиуса закругления рабочей кромки инструмента, при изменяющихся параметрах среза.

На основании полученных результатов сформулированы практические рекомендации по выбору рациональных конструктивных и эксплуатационных параметров дискового режущего инструмента и оснащаемого им высокоэффективного снегоочистительного оборудования:

а) в качестве одиночного режущего инструмента, для группового применения в конструкциях разрабатываемого снегоочистительного оборудования следует использовать тангенциальный дисковый резец диаметром  $D = 0,2$  м и углом заострения рабочей кромки  $\delta = 30^\circ$ .

Процесс взаимодействия дискового инструмента, имеющего указанные параметры, с прочными снежно-ледяными отложениями при их механиче-

ском разрушении, протекает при малых значениях силы сопротивления резанию и при малой энергоёмкости процесса.

б) выбор наиболее благоприятных из условия «малая энергоёмкость – высокая производительность» скоростных режимов разрабатываемого оборудования следует производить с учетом величины шага  $t$  резания: скорость резания  $V = 1,3$  м/с при резании с шагом  $t = 10, 20, 30$  и  $40$  мм, скорость резания  $V = 2,2$  м/с при резании с шагом  $t = 50$  мм, скорость резания  $V = 1,9$  м/с при резании с шагом  $t = 60$  мм. Величина шага  $t$  резания определяется принятой для каждой конкретной конструкции рабочего оборудования, схемы группового размещения на нем дискового инструмента.

в) высокоэффективное механическое разрушение прочных снежно-ледяных отложений на очищаемых дорожных покрытиях снегоочистительным оборудованием с дисковым инструментом, будет иметь место при температуре окружающей среды в диапазоне значений  $t_{oc} = 0 \div -15^\circ\text{C}$ .

Процесс взаимодействия дискового инструмента с разрабатываемой средой в указанных температурных условиях протекает при малых значениях силы сопротивления данной среды резанию таким инструментом и стабильных значениях удельной энергоёмкости процесса. В температурном диапазоне  $t_{oc} = -15 \div -30^\circ\text{C}$  значения указанных параметров существенно возрастают.

г) приемлемыми для практического применения по условию «малая энергоёмкость – способность к зарезанию в разрушаемый массив» значениями радиуса  $R_{кр}$  закругления рабочей кромки дискового инструмента являются следующие: для инструмента с горизонтальной осью вращения  $R_{кр} = 0,5 \div 2,5$  мм; для инструмента с осью вращения имеющей положение близкое к вертикальному (с отклонением от вертикали на величину угла атаки  $\gamma$ )  $R_{кр} = 0,5 \div 1,5$  мм.

6. Разработана методика расчета значений силы сопротивления прочных снежно-ледяных отложений резанию дисковым режущим инструментом, позволяющая с учетом физико-механических свойств разрушаемой среды,

изменяющихся глубине и шаге резания вычислять на стадии проектирования, значения контролируемой силы и определять рациональные конструктивные параметры дискового инструмента, обеспечивающие протекание данного процесса с минимальной энергоемкостью.

7. Создано новое структурное подразделение Сибирского федерального университета – учебно-научная лаборатория «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур», основой материально-технической базы которой стали средства измерительного контроля природной среды и изделий, представленные в данной работе. Состав оборудования лаборатории позволяет реализовывать на ее базе большие программы исследований различной тематики в широком диапазоне температур, в рамках диссертационных и выпускных квалификационных работ обучающихся, разрабатывать новые лабораторные работы и практикумы для использования в учебном процессе.

На основе разработанных методов и методик сформирована новая методология измерительного контроля силовых показателей тангенциального дискового режущего инструмента, взаимодействующего с разрушаемой средой. Реализованный подход, основанный на комплексном использовании системы основных и ряда вспомогательных методов измерительного контроля, методики экспериментальных исследований и методики расчета, обеспечивает 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.

#### Направления дальнейших исследований

1. Исследование силовых и энергетических параметров дискового режущего инструмента при его взаимодействии с прочными снежно-ледяными отложениями, содержащими абразивные включения.



2. Разработка устройств, обеспечивающих при работе в составе лабораторного стенда, возможность испытания образцов разрушаемой среды на одноосное сжатие и растяжение (разрыв).

3. Модернизация методики расчета силы сопротивления разрушаемой среды резанию дисковым инструментом с целью обеспечения возможности автоматизированного вычисления значений составляющих указанной силы с учетом влияния на их величину (наряду с углом заострения и диаметром инструмента, изменяющихся параметров среза и физико-механических свойств разрушаемой среды) таких факторов как скорость резания и радиус закругления рабочей кромки дискового инструмента.

4. Разработка и создание опытных образцов высокоэффективного снегоочистительного оборудования, оснащаемого дисковым режущим инструментом для работы в составе с малогабаритными базовыми машинами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734 – р ( в редакции Правительства Российской Федерации от 11 июня 2014 г. № 1032 – р).

2. The World Factbook. Country comparison: roadways. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2085rank.html>. – Загл. с экрана.

3. Федеральная целевая программа Развитие транспортной системы России (2010 – 2020 годы) (в редакции Постановления Правительства РФ от 05 мая 2014 года № 401). [Электронный ресурс]. – URL: <http://fcp.economy.gov.ru/cgi-bin/cis/fcp.cgi/Fcp/ViewFcp/View/2012/264/>. – Загл. с экрана.

4. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. Утверждена Президентом Российской Федерации 20 февраля 2013 года. [Электронный ресурс]. – URL: <http://government.ru/news/432/>. – Загл. с экрана.

5. ГОСТ Р 50597. Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля. – Введ. 26.09.2017. – М. : Стандартинформ, 2017. – 31 с.

6. Руководство по борьбе с зимней скользкостью на автомобильных дорогах. Методика Министерства транспорта РФ. – Введ. 16.06.2003. – М., 2003. – (Отрасл. дор. метод. док.).

7. Методические рекомендации по ремонту и содержанию автомобильных дорог общего пользования. – Взамен ВСН 24–88. – Введ. 17.03.2004. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 103 с. – (Отрасл. дор. метод. док.).

8. ВСН 137–89. Проектирование, строительство и содержание зимних автомобильных дорог в условиях Сибири и Северо-Востока СССР. – Взамен ВСН 137–77. – Введ. 20.02.89. – М. : Минтрансстрой СССР, 1991. – 96 с.

9. СНиП 3.06.03–85. Автомобильные дороги. – Введ. 01.01.86. – М. : Госстрой СССР, 1989. – 164 с.

10. Правила дорожного движения Российской Федерации с комментариями и иллюстрациями (в редакции Постановления Правительства РФ 12 июля 2017 г. № 832). – М.: ООО «Атберг 98», 2017. – 66 с.

11 Руководство по эксплуатации гражданских аэродромов Российской Федерации (РЭГА РФ-94). – М. : Воздушный транспорт, 1995. – 232 с.

12. Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов: федеральные авиационные правила: утв. Приказом Минтранса Рос. Федерации № 262 от 25.08.2015: введ. в действие с 09.10.15. – М. : ЭНАС, 2001. – 175 с.

13. Зимнее содержание территориальных автомобильных дорог Пермского края / И. А. Афанасьев [и др.]. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006.

14. ГОСТ 112-78. Термометры метеорологические стеклянные. Технические условия. – Введ. 01.01.1981. – М. Изд-во стандартов, 1978. – 22 с.

15. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч 1. Метеорологические наблюдения на станциях / под ред. Г. И. Слабковича. – Л., Гидрометеиздат, 1985. – 300 с.

16. Крагельский, И.В. О методике определения твердости и плотности снеговых покрытий / Физико-механические свойств снега и их использование в аэродромном и дорожном строительстве: сб. работ аэродромно-дорожной комиссии СОПС по ред. Д.Г. Виленского. – М., Л. : Изд – во АН СССР, 1945. – С. 61-66.

17. Ронгонен В.Э. Снегоуплотняющие машины для строительства зимних дорог и аэродромов / В.Э. Ронгонен // Строительные и дорожные машины. – 1990. – №8. – С. 22-23.

18. Ронгонен В.Э., Шаталов Н.В. Машина для строительства снеголедяных дорожных и аэродромных покрытий // Строительные и дорожные машины, 1985. № 10. с. 3 – 4.

19. Мерданов Ш. М. Механизированные комплексы для строительства временных зимних дорог : научное издание / Ш. М. Мерданов. – Тюмень : изд-во ТюмГНГУ. – 2013. – 195 с.

20. НТЭРАТ ГА-93. Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России. – Введ. 01.01.95. – М. : Минтранс РФ, 1995. – 315 с.

21. Гурьянова Е.М. Конструкция и эксплуатация воздушных судов для менеджеров : конспект лекций / Е.М. Гурьянова. – Ульяновск: изд-во УВАУ ГА. – 2007. – 96 с.

22. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – Введ. 01.01.2013. – М. : Изд-во стандартов, 2012. – 60 с.

23. Ребиндер П.А. О методе погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластично-вязких тел / П.А. Ребиндер, Н.А. Семенов. – Докл. АН СССР. – М.; 1949, – т. 14, № 6. – С.20-25.

24. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов : учеб. пособие / Н. А. Цытович. – М. : Высш. шк., 1973. – 448 с.

25. Березанцев В.Г. Расчет оснований сооружений / В.Г. Березанцев. – Л. : Изд – во литературы по строительству. – 1970. – 210 с.

26. Разоренов В.Ф. Пенетрационные испытания грунтов: теория и практика применения / В.Ф. Разоренов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат. – 1980. – 248 с.

27. Болдырев Г.Г. Полевые методы исследований / Г.Г. Болдырев // Инженерные изыскания. – 2010. – № 9. – С. 58-61.

28. Болдырев Г.Г. Испытания грунтов методом пенетрации. Часть 1 / Г.Г. Болдырев // Инженерные изыскания. – 2010. – № 11. – С. 26-24.

29. Болдырев Г.Г. Испытания грунтов методом пенетрации. Часть 2 / Г.Г. Болдырев // Инженерные изыскания. – 2010. – № 12. – С. 30-42.

30. Болдырев Г.Г. Испытания грунтов методом динамического зондирования. Часть 3 / Г.Г. Болдырев // Инженерные изыскания. – 2011. – № 1. – С. 22 – 30.

31. Зеленин, А. Н. Машины для земляных работ / А. Н. Зеленин, В. И. Баловнев, И. П. Керов. – М. : Машиностроение, 1975. – 424 с.

32. Иофик В. З. выбор моделей динамического плотномера для определения трудности разработки грунтов / В.З. Иофик // Строительные и дор. машины. – 1990. – № 5. – С. 23–24.

33. Шибуа М. Работа двухстадийного роторного снегоочистителя / М. Шибуа, Х. Кируяма. – Борьба со снегом и гололедом на транспорте: Материалы 2-го Международного симпозиума, состоявшегося 15-19 мая 1978 г., Ганновер, штат Нью-Гэмпшир, США / Пер, с англ. Л.Я. Менис, М.Н. Шипковой; Под ред. А.П. Васильева. – М.: Транспорт, 1986. – 216 с. (стр. 129 – 137).

34. ГОСТ 19912-2012. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. – Введ. 11.01.2013. – М. : Изд-во стандартов, 2012. – 23 с.

35. ГОСТ 12071-2014. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. – Введ. 07.01.2015. – М. : Изд-во стандартов, 2014. – 10 с.

36. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введ. 04.01.2016. – М. : Изд-во стандартов, 2015. – 19 с.

37. Белов, П.А. О физическом смысле числа  $C$  ударника ДорНИИ / П.А. Белов // Строительные и дор. машины. – 2012. – № 10. – С. 45 – 47.

38. Тарасов В.Н. Расчет параметров прочности грунта / В.Н. Тарасов, С.М. Кузнецов // Строительные и дор. машины. – 2001. – № 12. – С. 34 – 36.

39. ГОСТ 23987-80. Экскаваторы-каналокопатели. Методы испытаний. – Введ. 01.01.81. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 20 с.

40. ГОСТ 30067-93. Экскаваторы одноковшовые универсальные полноповоротные. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1996. – М. : Изд-во стандартов, 1995. – 17 с.

41. Афанасьев, И. А. Зимнее содержание улиц и дорог населенных мест Западного Урала / И. А. Афанасьев, А. В. Эдельман,

Л. И. Афанасьева. – 2-е изд., доп. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006.

42. Куляшов А.П. Информатизация процесса разработки и выбора техники для содержания автомобильных дорог / А.П. Куляшов, И.Г. Куклина // Строительные и дор. машины. – 2011. – № 1. – С. 32 – 36.

43. Пат. 520535 СССР, МПК G01N3/42, G01L1/04. Пенетрометр / Далин В.С.; Заявл. 10.11.74; № 2074710/15; опубл. 05.07.76, бюл. № 25. – 2с.

44. Пат. 2350923 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/42. Твердомер / Р. Б. Желукевич, В. Н. Подвезенный, В. А. Ганжа ; заявитель и патентообладатель Сиб. федер. ун-т. – № 2007117229/28 ; заявл. 08.05.2007 ; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9.

45. ГОСТ 427-75. Линейки измерительные металлические. Технические условия. – Введ. 01.01.1977. – М. : ФГУП «Стандартинформ», 1976. – 6 с.

46. Весы электронные ПВм с программируемыми пределами взвешивания и дискретностью отсчета (ПВм – 3/6, ПВм – 3/15, ПВм – 3/32). Руководство по эксплуатации ЭК 1121.00.00.000 РЭ. – М: ООО «Мера ТСП», 2012. – 28 с.

47. ГОСТ 23683-89 Парафины нефтяные твердые. Технические условия (с Изменением N 1). – Введ. 25.12.1989. – Изм. №1 введ. 25.04.1997. – М. : ФГУП «Стандартинформ», 1988. – 14 с.

48. ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – Введ. 01.01.1982. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 48 с.

49. Вильдерман В.Н. Выбор эквивалентных материалов на моделях разрушения мерзлых грунтов / В.Н. Вильдерман, О.К. Преображенский, Э.А. Кравцов // Строительные и дор. машины. – 1974. – № 9. – С. 28 – 29.

50. Куляшов, А. П. Зимнее содержание дорог / А. П. Куляшов, Ю. И. Молев, В. А. Шапкин ; Нижегор. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2008. – 353 с.

51. Воскресенский, Г. Г. Исследования процесса резания уплотненного

снега на автодорогах / Г. Г. Воскресенский // Строительные и дор. машины. – 2009. – № 12. – С. 45 – 48.

52. Шалман, Д. А. Снегоочистители / Д. А. Шалман. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1967. – 216 с.

53. Вейнберг, Б. П. Снег, иней, град, лед и ледники / Б. П. Вейнберг. – Одесса : Blancoизд-во М. Шпенцера, 1909. – 127 с.

54. Вейнберг, Б. П. Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда / Б. П. Вейнберг. – М. ; Л. : Гостехтеоретиздат, 1940. – 524 с.

55. Современные методы разрушения льда / А. П. Куляшов [и др.]. – М. : Спутник +, 2005. – 135 с.

56. Богородский, В. В. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии / В. В. Богородский, В. П. Гаврило. – Л. : Гидрометеиздат, 1980. – 384 с.

57. Заморский, А. Д. Атмосферный лед / А. Д. Заморский. – Л. : Изд-во АН СССР, 1955. – 370 с.

58. Песчанский, И. С. Льдоведение и льдотехника / И. С. Песчанский. – Л. : Морской транспорт. – 1963. – 343 с.

59. Турбина, Е. А. Лед как материал при исследовании процессов бурения / Е. А. Турбина // Тр. Горьк. политехн. ин-та им. А. А. Жданова. Механический фак. – Горький, 1967. – Вып. 8. – С. 13 – 16.

60. Кузьмин, П. П. Физические свойства снежного покрова / П. П. Кузьмин. – Л. : Гидрометеорол. изд-во, 1957. – 180 с.

61. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов : Общая и прикладная : учеб. пособие. Изд. 2-е / Н. А. Цытович. – М. : Книжный дом «Либроком», 2010. – 448 с.

62. Инженерная гляциология / под ред. Г. К. Тушинского. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1971. – 208 с.

63. Гражданские аэродромы / под ред. В. Н. Иванова. – М. : Воздушный транспорт, 2005. – 278 с.

64. Желукевич Р. Б. Машины и агрегаты для содержания аэродромов : учеб. пособие / Р. Б. Желукевич, [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 316 с.

65. Васильев, А. П. Анализ современного зарубежного опыта зимнего содержания дорог и разработка предложений его использования в условиях России / А. П. Васильев, В. В. Ушаков. – М. : Минтранс России, 2003. – 60 с.

66. Воскресенский, Г. Г. Основы механики разрушения уплотненного снега на автомобильных дорогах / Г. Г. Воскресенский. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2008. – 250 с.

67. Ганжа В. А., Ковалева М. А. Химические противогололедные материалы для зимнего содержания автомобильных дорог и меры снижения их негативного влияния на экосистему // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2016. – Т. 15. – С. 1681–1685. – URL: <http://e-koncept.ru/2016/96255.htm>.

68. Ганжа, В.А. об основных источниках загрязнений придорожной полосы автомобильных дорог и мерах снижения их негативного влияния на экосистему / В.А. Ганжа, [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2016. – №4. – Стр. 28 – 30.

69. Бялобжеский, Г.В. Борьба с зимней скользкостью на автомобильных дорогах / Г.В. Бялобжеский [и др.]. – М.:Транспорт, 1976. – 112 с.

70. Ронинсон, Э. Г. Автогрейдеры / Э. Г. Ронинсон. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1982. – 192 с.

71. Дорожные машины : отрасл. кат. – М. : ЦНИИТЭстроймаш, 1987. – 507 с.

72. Канарчук, В.Е. Авиационная наземная техника: справочник / В.Е. Канарчук [и др.]. – М. : Транспорт, 1989. – 278 с.

73. Пуртов, А. Р. Выбор конструктивных параметров рабочего органа для удаления снежных накатов и льда с бетонных покрытий : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.05.04 / А. Р. Пуртов ; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2002. – 24 с.



74. Молев, Ю. И. Обеспечение дорожной безопасности автомобильного транспорта в зимний период : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.22.10 / Ю. И. Молев ; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2007. – 30 с.

75. Шестопапов, К. К. Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование : учеб. пособие / К. К. Шестопапов. – 2-е изд., испр. – М. : Академия, 2005. – 320 с.

76. Полосин, М. Д. Техническое обслуживание и ремонт дорожно-строительных машин : учеб. пособие / М. Д. Полосин, Э. Г. Ронинсон. – М. : Академия, 2005. – 352 с.

77. Забегалов, Г. В. Бульдозеры, скреперы, грейдеры / Г. В. Забегалов, Э. Г. Ронинсон. – 2-е изд., перераб. – М. : Высш. шк., 1991. – 334 с.

78. ГОСТ 11030–93. Автогрейдеры. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 28590–90, ГОСТ 11030-88. – Введ. 01.01.95. – М. : Изд-во стандартов, 1994. – 13 с.

79. ГОСТ 27535–87 (ИСО 7134–85) Машины землеройные. Автогрейдеры. Термины, определения и техническая характеристика для коммерческой документации. – Введ. 01.01.89. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 14 с.

80. ГОСТ 28633–90 (ИСО 6746/1–87) Машины землеройные Определения и условные обозначения размерных характеристик. Часть 1. Базовая машина. – Введ. 01.01.92. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 8 с.

81. ГОСТ 28632-90 (ИСО 6746/2–87) Машины землеройные Определения и условные обозначения размерных характеристик. Часть 2. Рабочее оборудование. – Введ. 01.01.92. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 9 с.

82. Ганжа В.А. О классификации автогрейдеров / В. А. Ганжа, Е.Г. Зеленкова. // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 2. – С. 2-6 .

83. Баловнев, В.И. Дорожно-строительные машины с рабочими органами интенсифицирующего действия / В.И. Баловнев. – М.: Машиностроение, 1981. – 223 с.

84. Зеленин, А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А. Н. Зеленин. – М. : Машиностроение, 1968. – 376 с.

85. Желукевич, Р. Б. Разрушение мерзлого грунта дисковыми резцами : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.05.04 / Р. Б. Желукевич ; СибАДИ. – Омск, 1983. – 22 с.

86. Соколов, Л. К. Исследование процесса резания мерзлого грунта с целью обоснования и выбора рациональных параметров рабочих органов траншейных экскаваторов : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.05.04 / Л. К. Соколов ; ВНИИстройдормаш. – М., 1976. – 22 с.

87. Школьный, А. Н. Обоснование выбора конструктивных и технологических параметров исполнительного органа бесковшовых цепных траншеекопателей : автореф. дис. канд. техн. наук / А. Н. Школьный ; Том. гос. архит.- строит. ун-т. – Томск, 2006. – 22 с.

88. Желукевич, Р. Б. Теория и практика создания рабочих органов строительных и дорожных машин с дисковыми резцами: автореф. дис. доктора техн. наук : 05.05.04 / Р. Б. Желукевич ; СибАДИ. – Омск, 2013. – 34 с.

89. Разрушение горных пород механическими способами / под ред. Л. И. Барона. – М. : Наука, 1966. – 278 с.

90. Барон, Л. И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами / Л. И. Барон, Л. Б. Глатман, Е. К. Губенков. – М. : Наука, 1968. – 216 с.

91. Барон, Л. И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Разрушение шарошками / Л. И. Барон, Л. Б. Глатман, С. Л. Загорский. – М. : Наука, 1969. – 151 с.

92. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Разрушение тангенциальным инструментом / под ред. Л. И. Барона. – М. : Наука, 1973. – 172 с.

93. Евстратов, В.А. Исследования физической модели ковша экскаватора с роликовым днищем / В.А. Евстратов, А.Ю. Ляшенко // Строительные и дорожные машины. – 2013. – N 1. – С. 2 – 7.

94. Крившин, А.П. Повышение эффективности использования дорожных машин / А.П. Крившин [и др.]. – М.: Транспорт, 1980. – 263 с.

95. Хмара, Л. А. Отвал бульдозера с винтошнековым интенсификатором / Л. А. Хмара, Р. Н. Кроль // Строительные и дорожные машины. – 2009. – N 9. – С. 30 – 33

96. Курилов, Е.В. Полусферический отвал бульдозера с дисковыми секциями / Е. В. Курилов, А. С. Щербаков // Строительные и дорожные машины. – 2010. – N 12. – С. 46 – 50.

97. Машины для городского хозяйства / Г. Л. Карабан [и др.]. – М. : Машиностроение, 1988. – 272 с.

98. Заднепровский, Р. П. Оценка возможности снижения энергоемкости и повышения КПД при копании грунтов / Р. П. Заднепровский // Строительные и дор. машины. – 2006. – № 12. – С. 34 – 38.

99. Заднепровский, Р. П. Оценка максимального усилия и коэффициент полезного действия отвальных поверхностей / Р. П. Заднепровский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. – № 6. – С. 33 – 34.

100. Пат. 2396389 Российская Федерация, МПК Е 01 Н 5/12. Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов / Р. Б. Желукевич, В. А. Ганжа, Ю. Н. Безбородов ; заявитель и патенто-обладатель Сиб. федер. ун-т. – № 2009121899/11 ; заявл. 08.06.2009 ; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22.

101. Алексеева, Т.В. Дорожные машины. Ч.1. Машины для земляных работ / Т.В. Алексеева, К.А. Артемьев, А.А. Бромберг [и др.]. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1972. – 504 с.

102. Крапивин, М.Г. Горные инструменты / М.Г. Крапивин, И.Я раков, Н.И. Сысоев. – 3-е изд., перераб. и доп.– М. : Недра, 1990. – 256 с.

103. Союнов, А.С. Обоснование параметров дисковых рабочих органов почвообрабатывающих орудий : автореф. дис. канд. техн. наук / А.С. Союнов; Омский гос. аграрный ун-т. им. П.А. Столыпина. – Омск, 2011. – 19 с.

104. Радько, Ю. М. Конструкции и рабочие процессы землеройно-транспортных машин / Ю. М. Радько. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2004. – 55 с.

105. Дроздов, С.Н. Обоснование конструктивно-режимных параметров вибровозбудителя комбинированного почвообрабатывающего орудия: автореф. дис. канд. техн. наук / С.Н. Дроздов ; Оренбург. гос. аграрный ун-т. – Оренбург, 2013. – 24 с.

106. Несмиян, А.Ю. Сравнительные характеристики орудий для поверхностной обработки почвы / А.Ю. Несмиян [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 3. – С. 23 – 25.

107. Борисов, А.Ю. Разработка двухкорончатых стреловидных исполнительных органов проходческих комбайнов с дисковым инструментом : автореф. дис. канд. техн. наук / А.Ю. Борисов ; КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2016. – 22 с.

108. Желукевич, Р. Б. Буровая головка с дисковым инструментом / Р. Б. Желукевич, Ю. Ф. Кайзер // Политранспортные системы : материалы V Всеросс. НТК, Красноярск, 21–23 нояб. 2007 г. : в 2 ч. Ч. 2. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т; Политехн. ин-т, 2007. – С. 224 – 228.

109. Желукевич, Р. Б. Модернизация рабочих органов землеройно-фрезерных машин / Р. Б. Желукевич, В. А. Ганжа // Проблемы эксплуатации и обслуживания транспортно-технологических машин : материалы междунар. НТК, Тюмень, 11–12 апр. 2007 г. : в 2 ч. Ч. 1. – Тюмень : ТНГУ, 2007. – С. 325 – 327.

110. Желукевич, Р. Б. Экспериментальные исследования резания мерзлых грунтов дисковым инструментом / Р. Б. Желукевич, Ю. Н. Безбородов, В. А. Ганжа // Механики – XXI веку : сб. докл. VIII Всеросс. НТК с междунар. участием. – Братск : БрГУ, 2009. – С. 44 – 46.

111. Желукевич, Р. Б. Совершенствование конструкции рабочих органов рыхлителей мерзлого грунта / Р. Б. Желукевич, В. И. Емелин // Строительные и доп. машины. – 2008. – № 12. – С. 43–46.

112. Желукевич, Р. Б. Тягово-сцепные показатели разрушения мерзлых грунтов бульдозерно-рыхлительными агрегатами / Р. Б. Желукевич, В. И. Емелин // Строительные и дор. машины. – 2010. – № 7. – С. 51 – 54.

113. Кузнецова, В. Н. Создание эффективных рабочих органов землеройных машин для разработки мерзлых и прочных грунтов / В. Н. Кузнецова, Р. А. Мартюков // Строительные и дор. машины. – 2005. – № 4. – С. 34.

114. Кузнецова, В. Н. Разработка мерзлых грунтов землеройными машинами / В. Н. Кузнецова, А. М. Завьялов. – Омск : Изд-во «Апельсин», 2011. – 224 с.

115. Гриценко, В.А. Оперативный контроль плотности и прочности грунтов земляных сооружений зондированием: лабораторный практикум / В.А. Гриценко, В.Н. Шестаков. – Омск: изд-во СибАДИ, 2008. – 48 с.

116. Зеленин, А. Н. Лабораторный практикум по резанию грунтов : учеб. пособие для студентов инж.-строит. и автомоб.-дор. вузов / А. Н. Зеленин, Г. Н. Карасёв, Л. В. Красильников. – М. : Высш. шк., 1969. – 310 с.

117. ГОСТ 8338-75 Подшипники шариковые радиальные однорядные. Основные размеры. – Введ. 28.03.1975.– М. : Изд-во стандартов, 2003. – 12 с.

118. ГОСТ 21150-87 Смазка Литол – 24. Технические условия. – Введ. 01.01.1989.– М. : ФГУП «Стандартинформ», 1988. – 5 с.

119. ГОСТ 2590-88 Прокат стальной горячекатаный круглый. Сортамент. – Введ. 01.01.1990.– М. : Изд-во стандартов, 1989. – 8 с.

120. ГОСТ 10905-86 Плиты поверочные и разметочные. Технические условия. – Введ. 01.01.1987.– М. : Изд-во стандартов, 1986. – 8 с.

121. Зайдель, А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А. Н. Зайдель. – Л. : Наука, 1968. – 97 с.

122. Венецкий, И. Г. Основные математико-статистические формулы и понятия в экономическом анализе / И. Г. Венецкий, В. И. Венецкая. – М. : Статистика, 1974. – 280 с.

123. Желукевич, Р. Б. Устройство для определения показателей прочности уплотненного снежного покрова / Р. Б. Желукевич,

Ю. Н. Безбородов, В. А. Ганжа // Строительные и дор. машины. – 2010. – № 1. – С. 26 – 27.

124. Ганжа В.А. Полевой контроль качества аэродромных покрытий при их зимнем содержании под слоем уплотненного снега / В.А. Ганжа, П.В. Ковалевич, И.В. Каптюк // Измерение, контроль, информатизация: материалы XVI международной научно-технической конференции. Том 1, г. Барнаул, 12 мая 2015 г. – Барнаул: АлтГТУ, 2015. С. 115 – 119.

125. Ганжа В.А. Модернизированный твердомер для контроля прочности аэродромных покрытий содержащихся под слоем уплотненного снега / В.А. Ганжа, П.В. Ковалевич, И.В. Каптюк, А.С. Сатышев // Измерение, контроль, информатизация: материалы XVII международной научно-технической конференции. / под ред. Л.И. Сучковой. – г. Барнаул, 19 мая 2016 г. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. С. 47 – 50.

126. Пат. 2550375 Российская Федерация, МПК G01N3/42. Твердомер / В.А. Ганжа, П.В. Ковалевич; заявители и патентообладатели В.А. Ганжа, П.В. Ковалевич – № 2014 105 740/28; заявл. 17.02.2014; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13.

127. Правила по метрологии. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений: ПР 50.2.009-94: приняты постановлением Госстандарта РФ от 08.02.1994 № 8: введ. в действие с 01.03.1994. : дата актуализации: 05.05.2017.

128. ГОСТ Р 8.568-97 Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. – Введ. 01.07.1998.– М. : ФГУП «Стандартинформ», 1997.11 с.

129. Захаров, В. А. Исследование сопротивляемости мерзлых грунтов разрушению резанием : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / В. А. Захаров ; Тул. политехн. ин-т. – Тула, 1973. – 25 с.

130. Баловнев, В. И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. – М. : Машиностроение, 1994. – 432 с.

131. Тарасов, В.Н. Физическое моделирование процесса внедрения ковша в рабочую среду и методика оценки тягово-эксплуатационных показателей фронтальных погрузчиков / В.Н. Тарасов, И.В. Бояркина, С.В. Озеров // Строительные и дор. машины. – 2014. – № 10. – С. 39 – 44.

132. Мыльников, Н.Ф. Стенд физического моделирования процессов разрушения грунта / Н.Ф. Мыльников // Вестник донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2012. №6. – С. 135 – 138.

133. Пат. 757899 СССР, МПК G01M 13/00. Стенд для испытания рабочих органов землеройных машин / Соколов Л.К. ; заявитель и патентообладатель Красноярский филиал ВНИИстройдормаша, заявл. 30.05.78; опубл. 23.08.80, Бюл. № 31.

134. Ганжа, В.А. Обоснование конструкции и основных параметров дискового режущего инструмента для разрушения снежно-ледяных образований: автореф. дис. канд. техн. наук / В.А. Ганжа; СФУ. – Красноярск, 2011. – 24 с.

135. А.С. СССР № 321709, МПК G 01 M 13/00. Стенд для испытания рабочих органов землеройных машин / А.В. Карнаухов [и др.] ; заявитель и патентообладатель Красноярский филиал ВНИИстройдормаша, заявл. 02.12.1969 ; опубл. 19.11.1971 , Бюл. № 35.

136. ГОСТ 13568-97 Цепи приводные роликовые и втулочные. Общие технические условия. – Введ. 01.07.2000.– М. : Изд-во стандартов, 2000. – 27 с.

137. Эрдеди, А.А. Техническая механика. Детали машин: Учеб. для машиностр. спец. техникумов / А.А Эрдеди, Н.А. Эрдеди. – М.: Высшая школа, 1992. – 272 с.

138. Пат. 2429459 Российская Федерация, МПК G01M 13/00. Стенд для испытания рабочих органов землеройных машин / В. А. Ганжа, Р. Б. Желукевич, Ю. Н. Безбородов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – №2010116560/28; заявл. 26.04.2010; опубл. 20.09.2011, Бюл. № 26.

139. ГОСТ 4997-75. Ковры диэлектрические резиновые. Технические условия. – Введ. 01.01.1977.– М. : Изд-во стандартов, 1992. – 15 с.

140. Ганжа, В.А. Лабораторный стенд для испытания рабочих органов землеройных машин / В.А. Ганжа, П.В. Ковалевич, В.Г. Шрам, О.Н. Петров // Вестник Казанского Технологического университета. – 2013. – №1. – С. 229 – 231.

141. Шрам, В.Г. Модернизация стенда для испытания режущего инструмента рабочих органов строительных и дорожных машин / В.Г. Шрам, В.А. Ганжа, П.В. Ковалевич, И.С. Карпов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – №3. – С. 78 – 80.

142. Карнаухов, А. И. Обоснование энергосберегающих параметров торцовых фрез и режимов резания лесных почв для выполнения работ в лесном хозяйстве : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.01 / А. И. Карнаухов ; Сиб. гос. технол. ун-т. – Красноярск, 2009. – 24 с.

143. Черник, Д. В. Совершенствование технологического оборудования гусеничных лесопогрузчиков перекидного типа на базе лесопромышленных тракторов на основе анализа динамики боковых нагрузок : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Черник ; Сиб. гос. технол. ун-т. – Красноярск, 2010. – 25 с.

144. Трехкомпонентный динамометр / А. Н. Берон [и др.] // Измерительная техника. – 1960. – № 10. – С. 33 – 35.

145. Применение полупроводниковых тензорезисторов для исследования строительных и дорожных машин / Г. А. Аржаев [и др.] // Строительные и дор. машины. – 1974. – № 8. – С. 17 – 19.

146. Мещеряков, В.А. Методика обработки результатов экспериментальных исследований тягового режима автогрейдера / В.А. Мещеряков, В.В. Вебер // Вестник СибАДИ. – 2012. – №4. – С. 14 – 19.

147. Руденко, Н.Е. Тензометрическое приспособление для динамометрирования навесных сельхозмашин / Н.Е. Руденко [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – №1. – С. 23 – 24.



148. Шабанов, М.Л. Изучение силовых параметров рабочих органов почвообрабатывающих орудий с использованием тензометрических установок / М.Л. Шабанов, М.Н. Лысич, А.А. Шкильный // Молодой ученый. – 2014. – №6. – С. 271 – 274.
149. Степанов, А.В. Расчет балочного упругого элемента датчика силы / А.В. Степанов, Г.В. Леонов // Ползуновский вестник. – 2007. – №3. – С. 140 – 143.
150. Донцов, И.Е. Установка для объемного динамометрирования почвообрабатывающих рабочих органов и результаты ее использования / И.Е. Донцов, М.Н. Лысич // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – №2. – С. 9 – 14.
151. Дайчик, М.Л. Методы и средства натурной тензометрии : справочник / М.Л. Дайчик, Н.И. Пироговский, Г.Х. Хуршудов. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
152. ГОСТ 21616-91. Тензорезисторы. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1992. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 49 с.
153. Тензорезисторы типа ФКП (одиночные). Руководство по эксплуатации. – Кемерово: ООО УК «СИБТЕНЗОПРИБОР», 2016. – 7 с.
154. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А. Мехеда. – Самара: Изд-в Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
155. ГОСТ 12172 – 74 Клеи фенолополивинилацетатные. Технические условия. Введ. 01.01.1976. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 12 с.
156. Инструкция по наклейке тензорезисторов клеем БФ - 2. – Кемерово: ООО УК «СИБТЕНЗОПРИБОР», 2016. – 4 с.
157. ГОСТ 14959-79 Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия. – Введ. 01.01.1981. – М. : Стандартиформ, 2006. – 21 с.
158. Пат. 1564506 СССР , МПК G01M13/00. Устройство для замеров усилий сопротивления резанию грунтов / Г.К. Галицкий, Л.К. Соколов; заяви-

тель и патентообладатель Красноярский филиал ВНИИстройдормаша, заявл. 08.01.1988 ; опубл. 15.05.1990 , Бюл. № 18.

159. Пат. 734514 СССР , МПК G01N3/58. Стенд для измерения сопротивления грунтов резанию / Ю.П. Пристайло, В.Н. Смирнов; заявитель и патентообладатель Киевский инженерно-строительный институт. – № 2548561/29 - 33; заявл. 09.11.1977; опубл. 15.05.1980, Бюл. № 18.

160. Пат. 2461809 Российская Федерация, МПК G01N3/58. Стенд для измерения сопротивления грунтов и снежно-ледяных образований резанию / Р. Б. Желукевич, В.А. Ганжа, А.В. Лысянников, Ю.Ф. Кайзер; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2011119793/28; заявл. 17.05.2011; опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26.

161. Сатышев А.С. Измерительный комплекс для контроля силы сопротивления снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом / А.С. Сатышев, В.А. Ганжа, П.В. Ковалевич // Измерение, контроль, информатизация: материалы XVII международной научно-технической конференции. / под ред. Л.И. Сучковой. – г. Барнаул, 19 мая 2016 г. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. С. 155 – 158.

162. Лысянников, А.В. Устройство для исследования сопротивлений резания снежно-ледяных образований рабочими органами отвального типа / А.В. Лысянников, Р.Б. Желукевич, В.А. Ганжа // Молодежь и наука: материалы VI Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых [Электронный ресурс] /отв. ред. О.А. Краев - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011.

163. Динамометр общего назначения ДПУ-5-2. Паспорт Гб 2.782.070 ПС. – Иваново : ОАО «Точприбор», 2013. – 8 с.

164. ГОСТ 9690 – 71 Талрепы. – Введ. 01.07.1972. – М. : Издательство стандартов, 1977. – 14 с.

165. Лысянников, А. В. Методика и средства контроля нагрузочных параметров рабочих органов отвального типа снегоуборочных машин : автореф.

дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / А. В. Лысянников; Нац. иссл. Томский политехн. ун-т. – Томск, 2013. – 24 с.

166. Ганжа В.А. Влияние скорости резания на силовые и энергетические показатели процесса разрушения льда дисковым режущим инструментом / В.А. Ганжа, Ю.Н. Безбородов, П.В. Ковалевич, А.А. Рябинин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – №6. – С. 105 – 110.

167. Ковалевич П.В. Влияние скорости резания дискового режущего инструмента на силу и энергоёмкость при механическом разрушении льда / П.В. Ковалевич, В.А. Ганжа, И.В. Каптюк // Современные концепции научных исследований: сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции, г. Москва, 30-31 октября 2014 г. – С. 73 – 77.

168. Пат. 2500983 Российская Федерация, МПК G01B7/16. Стенд для градуировки тензоэлементов / В.А. Ганжа, П.В. Ковалевич; Н.Н. Малышева, И.В. Каптюк; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2012 121 697/28; заявл. 25.05.2012; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34.

169. Ганжа, В.А. Стенд для поверки тензометрических элементов / В.А. Ганжа, Н.Н. Малышева, П.В. Ковалевич, О.Н. Петров // Вестник Казанского Технологического университета. – 2013. – №1. – С. 232 – 234.

170. Ковалевич, П.В. Устройство для тарировки тензоэлементов / П.В. Ковалевич, В.А. Ганжа, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – №6. – С. 105 – 108.

171. Плата L-154. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М. : ЗАО «Л-КАРД», 2001. – 40 с.

172. Измеритель твердости ультразвуковой УЗИТ – 3. Инструкция по эксплуатации. – Екатеринбург : ЗАО НПО «Интротест» , 2011. – 14 с.

173. ГОСТ 7502 – 80 Рулетки измерительные металлические. Технические условия. – Введ. 01.07.2000. – М. : ФГУП «Стандартинформ», 2006. – 10 с.

174. Мультиметры цифровые *UT – 33B/C/D*. Руководство по эксплуатации. – Алматы : ТОО «Test Instruments», 2015. – 2 с.

175. Пат. 126511 СССР, МПК Е 01 Н 5/12. Навесное оборудование для очистки дорожных покрытий ото льда и уплотненного снега / В. М. Упинэ. – № 626079/29 ; заявл. 23.04.1959 ; опубл. 1960, Бюл. № 5.

176. Пат. 1219707 СССР, МПК Е 01 Н 5/12. Рабочий орган снегоуборочной машины / В. П. Шабанов, Л. В. Конюхов, Н. В. Очагов ; заявитель и патентообладатель Урал. НИИ Академии коммунального хоз-ва им. К. Д. Памфилова. – № 3834683/29-11 ; заявл. 02.01.1985 ; опубл. 23.03.1986, Бюл. № 11.

177. Пат. 771242 СССР, МПК Е 01 Н 5/07. Машина для удаления снега и льда с дорожного покрытия / Ж. Н. Сердюков. – № 2431985/29-11 ; заявл. 22.12.1976 ; опубл. 15.10.1980, Бюл. № 38.

178. Пат. 2361036 Российская Федерация, МПК Е 01 Н 5/12. Устройство для удаления с поверхности аэродромных и твердых дорожных покрытий ледяного и снежного накатов / В. М. Козин [и др.] ; заявители и патентообладатели Козин Виктор Михайлович, Козин Михаил Викторович. – № 2007108459/11 ; заявл. 06.03.2007 ; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 19.

179. Пат. 2390602 Российская Федерация, МПК Е 01 Н 5/10. Способ удаления с поверхности аэродромных и твердых дорожных покрытий ледяного и снежного накатов / В. М. Козин [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «АмГПГУ». – № 2007113547/11 ; заявл. 11.04.2007 ; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15.

180. Козин, В. М. Совершенствование технологии удаления ледяного и снежного наката с поверхности дорожного покрытия / В. М. Козин, В. С. Макеева // Строительные и дор. машины. – 2011. – № 1. – С. 25 – 31.

181. Шушкевич, В.А. Основы электротензометрии / В.А. Шушкевич. – Минск: Высшая школа, 1975. – 352 с.

182. Бондаренко, И.Б. Электрорадиоэлементы. Ч1. Резисторы / И.Б. Бондаренко. – СПб: Изд – во НИУ ИТМО, 2012. – 109 с.
183. ГОСТ 2.728-74 Резисторы, конденсаторы. Обозначения условные графические в схемах. – Введ. 01.07.1975. М. : ФГУП «Стандартинформ», 2010. – 46 стр.
184. ГОСТ 28883-90 Коды для маркировки резисторов и конденсаторов. – Введ. 01.01.1992. – М. : Изд – во стандартов, 2005. – 16 с.
185. Кульга, К.С. Применение CAD/CAE – систем для статического исследования компоновок мехатронного станочного оборудования / К.С. Кульга // CAD/CAM/ CAE Observer. – 2014. – №2 (86). – С. 61 – 67.
186. Дубин, Д.А. Специализированная измерительная система для экспериментального исследования нагруженности систем подрессоривания быстроходных гусеничных машин / Д.А. Дубин [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – №4. – С. 16 – 24.
187. ГОСТ 4543 – 71 Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. – Введ. 01.01.1973. М. : ФГУП «Стандартинформ», 2008. – 40 с.
188. ГОСТ 27544 – 87 Термометры жидкостные стеклянные. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1989. М. : Изд – во стандартов, 1988. – 22 с.
189. Клейнен, Дж. Статистические методы в имитационном моделировании / Дж. Клейнен. – Вып. 1. – М. : Статистика, 1978. – 221 с.
190. Митропольский, А. К. Техника статистических вычислений / А.К. Митропольский. – М. : Физматгиз, 1961. – 479 с.
191. Дружинин, Н. К. Выборочное наблюдение и эксперимент / Н. К. Дружинин. – М. : Статистика, 1977. – 176 с.
192. Соколов, А. М. Повышение эффективности эксплуатации снегоуборочной техники с учетом слоистости снежного покрова : автореф. дис. канд.

техн. наук : 05.05.04 / А. М. Соколов ; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2007. – 24 с.

193. Хархута, Н.Я. Дорожные машины / Н.Я. Хархута [и др.]. – М. : Машиностроение, 1968. – 416 с.

194. Баловнев, В.И., Эксплуатация специальных автомобилей для содержания и ремонта городских дорог: практическое пособие / В.И. Бловнев [и др.]. – М. : Транспорт, 1992. – 263 с.

195. Молев, Ю.И. Обеспечение безопасности движения снегоуборочной машины на дорогах общего пользования / Ю.И. Молев, Ю.В. Кошелев, Д.А. Соколов // Строительные и дор. машины. – 2013. – № 12. – С. 30 – 31.

196. Фомичев, В.П. Влияние скорости резания грунта на усилия резания / В.П. Фомичев [и др.] // Строительные и дор. машины. – 1968. – № 12. – С. 13 – 15.

197. Семкин, Д.С. О влиянии скорости рабочих органов землеройных машин на силу сопротивления грунта резанию / Д.С. Семкин // Вестник СибаДИ. – 2017. – №1 (53). – С. 37 – 43.

198. Ганжа, В.А. Разрушение прочных снежно-ледяных образований / В.А. Ганжа [и др.] // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2015. – №3. – Стр. 21 – 23.

199. Ганжа, В.А. Разрушение снежно-ледяных образований механическим способом : монография / В. А. Ганжа. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. – 192 с.

200. Ганжа В. А., Безбородов Ю. Н., Ковалевич П. В. Технические средства разрушения снежно-ледяных образований. Пути расширения области применения механического способа зимнего содержания аэродромов и автомобильных дорог : монография. – Саарбрюккен : *LAP LAMBERT Academic Publishing* , 2012. – 192 с.

201. Войтковский, К.Ф. Механические свойства снега / К.Ф. Войтковский. – М. : Наука, 1977. – 126 с.

202. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров. – М. : Машиностроение, 1971. – 357 с.

203. Елтышев, В.А. Влияние интенсивности изнашивания режущей кромки резца на производительность рыхления смерзшихся навалочных грузов / В.А. Елтышев, В.Ф. Миллер, Ю.А. Барыкин // Строительные и дор. машины. – 2011. – № 7. – С. 1 – 2.

204. Курилов, Е.В. Влияние износа режущей кромки дискового ножа на энергоемкость косо́го резания грунта / Е.В. Курилов // Механизация строительства. – 2013. – № 10. – С. 28 – 31.

205. Гальперин, М. В. Усилители постоянного тока / М. В. Гальперин, Ю. П. Злобин, В. А. Павленко. – М. : Энергия, 1978. – 248 с.

206. Плата L-154. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М. : ЗАО «Л-КАРД», 2003. – 39 с.

207. Желуквич Р.Б. Разработка мерзлых грунтов землеройными машинами с дисковым инструментом: монография / Р.Б. Желукевич. – Красноярск : Сиб. Федер. ун-т, 2012. – 196 с.

208. Шилд, Р.Т. Смешанные граничные задачи механики грунтов / Р.Т. Шилд // Механика. Определяющие законы механики грунтов. – М.: Мир, 1975. – Вып. 2. – С. 178 – 194.

209. EN 1997-2. Eurocode 7. Geotechnical design. Part 2. Ground investigation and testing: European committee for standardization, 2007 г.

210. Франк, Р. Еврокод 7 – Европейские нормы геотехнического проектирования / Р. Франк // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2005. – №9. – С. 47 – 55.

211. Киношита, Сэйити. Твердость снежного покрова / С Киношита // Ученые записки. Университет Хоккайдо, серия А: Науки о низких температурах. Естественные науки. – 1960. – № 19. – С. 119 – 134.

212. Курода, М. Механические характеристики снежного покрова. Научная работа физико-химических исследований / М. Курода // Токио. 12, 69. 1929.

213. Пат. 2396389 Российская Федерация, МПК Е 01Н 5/12. Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов / Р. Б. Желукевич, В. А. Ганжа, Ю. Н. Безбородов; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2009121899/11; заявл. 08.06.2009; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22.

214. Пат. 2487970 Российская Федерация, МПК Е 01Н 5/12. Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов / В.А. Ганжа, Ю.Н. Безбородов; Н.Н. Малышева, П.В. Ковалевич; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2012 109 412/13; заявл. 12.03.2012; опубл. 20.07.2013.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Классификация и основные физико-механические свойства снежно-ледяных отложений

Таблица П.А.1

## Краткие характеристики структур льда

Номер и название структуры	Схемы (а – горизонтальный срез; б – вертикальный срез)	Краткое описание
<b>Структура 1</b> <u>Аллотриоморфнозернистая</u>		Кристаллы изометрические, неправильной формы, с отсутствием граней, развиты равномерно по всем направлениям. Размеры, см: мелкозернистые – 0,1–0,5; среднезернистые – 0,5–1,0; крупнозернистые – 1,0 и более
<b>Структура 2</b> <u>Гипидноморфнозернистая</u>		Кристаллы изометрические. Размеры, см: мелкозернистые – 0,1–0,5; среднезернистые – 0,5–1,0; крупнозернистые – 1,0 и более
<b>Структура 3</b> <u>Столбчатая гипидноморфнозернистая</u>		Кристаллы (призмы, столбики, пирамидки) имеют вертикальное развитие и, как правило, утолщаются к низу. Размеры, см: в горизонтальном сечении: мелкозернистые – 0,1–0,5; среднезернистые – 0,5–1,0; крупнозернистые – 1,0 и более; в вертикальном сечении: мелкозернистые – 0,5–2,0; среднезернистые – 2,0–10,0; крупнозернистые – 10,0 и более
<b>Структура 4</b> <u>Столбчато-зернистая</u>		Кристаллы (призмы, столбики, пирамидки неправильной формы) имеют вертикальное развитие. От структуры 3 отличаются неправильной формой граней. Размеры, см: в горизонтальном сечении: мелкозернистые – 0,2–0,5; среднезернистые – 0,5–2,0; крупнозернистые – 2,0 и более;
		в вертикальном сечении: мелкозернистые – 0,5–2,0; среднезернистые – 2,0–10,0; крупнозернистые – 10,0 и более
<b>Структура 5</b> <u>Шестовато-волокнистая</u> (агрегатная)		Кристаллы сходны со структурой 4, грани еще более изрезанные и извилистые. Каждый кристалл состоит из серии небольших вертикальных брусочков. Размеры агрегатов: в горизонтальном сечении: мелкозернистые – 0,5–8,0 мм; крупнозернистые – 3,0 см; в вертикальном сечении: мелкозернистые – до 10,0 мм; крупнозернистые – 10,0 мм и более
<b>Структура 6</b> <u>Параллельно-волокнистая</u> (агрегатная)		Кристаллы развиты вертикально. Базисные пластинки в виде сильно вытянутых вертикальных брусков-волокон длиной до нескольких метров
<b>Структура 7</b> <u>Агломератная</u>		Образуется в результате механического накопления и частичной цементации мелких ледяных зерен или обломков. Такой лед имеет пористую структуру. Размеры кристаллов – 0,1–0,5 см, реже – до 1,0 см
<b>Структура 8</b> <u>Радиально-лучистая</u>		Размеры кристаллов, см: в горизонтальном сечении: мелкозернистые – 0,1–0,5; среднезернистые – 0,5–2,0; крупнозернистые – 2,0 и более;

		в вертикальном сечении: мелкозернистые – до 0,1; среднезернистые – 0,5–2,0; крупнозернистые – 2,0 и более
Структура 9 Вторичная термометрическая (диатектическая)		Образуется в процессе метаморфизма ледяного покрова. Имеет сложную ветвистую форму кристаллов, вращение одних кристаллов в другие. Структура льда неравномерно-зернистая. Размеры, см: мелкозернистые – 0,1–0,5; крупнозернистые – 2,0–5,0
Структура 10 Вторичная динамометаморфическая		Образуется в результате динамометаморфизма ледяного покрова, связанного с частичным или полным дроблением льда и последующей его цементацией. Структура неравномерно-зернистая. Кристаллы изометрические, неправильной формы. Размеры, см: мелкозернистые – 0,1–2,0; крупнозернистые – 2,0–5,0
Структура 11 Пластинчатая	–	Кристаллы имеют вид различных по своей форме пластинок, сплюснутых по направлению главной оси. Толщина пластинок – не более 0,3–0,4 мм, ширина – до нескольких сантиметров

Таблица П.А.2.

## Прочность пресноводного льда на изгиб

Характеристика льда	Условия эксперимента	Температура льда, °С	Предел прочности, МПа		
			максимальной	средней	минимальной
Речной	$V_d = 2$ см/мин	0...–6	–	1,30–0,83	–
	$V_d = 20$ см/мин	0	–	0,92	–
	Излом в воде перпендикулярно <u>С-оси</u>	0	–	0,36	–
		0	–	2,50	–
	То же, параллельно <u>С-оси</u>	0	–	1,40	–
		0	–	0,71	–
Изгиб клавишей в воде	–2...–20	–	1,90–1,90	–	
	–3...–21	–	2,40–0,80	–	
Консольные балки на всю толщину (40–60 см) ледяного покрова	0	–	0,42	–	
	–10	–	0,47	–	
Речной (р. Нева)	Малые образцы из льда типа А8	$\approx 0$	1,51	1,15	0,7,10
	То же, типа А3	$\approx 0$	1,67	1,08	0,6,10
	Двухопорные балки на всю толщину ледяного слоя	$\approx 0$	–	0,60–0,70	–
Озерный	Консоли, нагрузка вниз	$\approx 0$	–	0,42	–
	Балочки размером 8×8×50 см	0...–2	–	1,79	–
	Образцы размером 4×4×36 см	–0,5	–	0,72	–
	Консоли сечением 40×40 см	–7	–	0,59	–
	Консоли сечением до 65×65 см	0	–	0,59	–
	Консольные балки на всю толщину (40–60 см) ледяного покрова	2	–	0,37	–

Примечание: обозначения типов льда (А8 и А3) приняты по классификации Н. В. Черепанова [56]. Обозначение «С-ось» – главная ось симметрии кристалла льда.

## Прочность пресноводного льда на сжатие

Характеристика льда	Температура льда, °С	Предел прочности, МПа		Примечания
		$\sigma_{\perp}$	$\sigma_{\parallel}$	
Речной, верхний слой ледяного покрова	0...-2	1,8	2,1	Продолжительность одного испытания – несколько секунд
	-12...-15	2,5	2,9	
	-31...-15	2,8	3,8	
Речной средний слой	0...-2	2,3	3,6	
	-12...-15	3,3	3,3	
	-31...-15	6,9	7,6	
Речной нижний слой	0...-2	1,2	1,8	
	-12...-15	1,8	2,0	
	-31...-15	3,2	3,8	
Речной	0...-6	1,0–1,5	3,7	
Речной (р. Нева)				
Размеры образцов, см:				
50×50×50	2...-1	1,6	1,8	
5×5×5	2...-1	–	4,3	
25×25×25	-1...-5	3,2	2,4	
5×5×5	-1...-5	–	4,8	
50×50×50	-6...-11	2,6	2,5	
5×5×5	-6...-11	4,4	6,2	
Речной	-3	2,9	3,3	Средние значения для малых образцов
Речной	0	0,5–1,9	–	Скорость деформирования при использовании 30-тонного пресса составляла 70–100 мм/мин, что позволило разрушать образец за несколько секунд
Речной, водно-снеговой куб, площадь грани – 70 см <sup>2</sup>	-3,1	0,4	–	
То же, площадь грани – 70 см <sup>2</sup>	1,1...-1,6	1,2	–	
Из водохранилища, площадь граней – 60–770 см <sup>2</sup>	0	3,9	–	
То же, площадь грани – 770 см <sup>2</sup>	11 -23 -36	3,2 5,4 3,9	– – –	
Сводные данные для образцов сечением граней от 6×6 до 28×28 см	–	0,2 1,6 9,1	– – –	Минимальный Средний Максимальный
Озерный столбчато-гранулированный лед, образцы размером 46×46×50 см, $V_d = 0,5$ МПа/с	-5...-40	2,2–2,5	4,5–7,0	–
Обобщенные данные из различных источников, представленные в виде наиболее вероятных значений	0...-5	1,6–3,0		–
	-5...-10	3,0–3,6		
	-10...-15	3,6–3,9		
	-15...-25	3,9–4,0		

Условные обозначения:  $\sigma_{\perp}$  – предел прочности льда при сжатии в направлении перпендикулярном к осям кристаллов;  $\sigma_{\parallel}$  – то же, при сжатии в направлении осей кристаллов.



## Прочность пресноводного льда на срез

Характеристика льда	Температура льда, °С	Предел прочности, МПа
Речной, средний слой ледяного покрова	0...–2	0,6
	–12...–15	0,90–1,00
Речной, нижний слой ледяного покрова	–31...–35	1,20–1,30
Речной, малые образцы	–1...–24	0,50–3,5
Пресноводный, среднее значение по результатам трех испытаний	–	0,58
Речной, срез перемычек в покрове сечением около 20×20 см, нагрузка параллельно оптической оси	–0,5...–9,8	0,25–0,59
Лед из водохранилища, образцы сечением 9×9 см	0	1,17
	–11	1,26
	–23	1,08
	–36	0,89
Пресноводный, среднее значение	–	0,70
Пресноводный мелкозернистый, призматические образцы	0...–33	0,34–0,8
Речной (р. Нева), тип А8	0	0,47–0,8
То же, тип А3	0	0,50–0,9

Примечание: обозначения типов льда (А8 и А3) приняты по классификации Н. В. Черепанова [56].

## Коэффициенты вязкости льда, определенные статическими методами

Характеристика льда	Метод измерения	Температура льда (°С)	Напряжение, развиваемое нагрузкой (МПа)	Коэффициент вязкости
Пресноводный поликристаллический	Прогиб балки длиной 20 см	0	–	$10^{10} - 2 \cdot 10^{10}$
	Кручение образцов длиной 10–30 см, сечением 3–4 см	0	–	$10^{12}$
Озерный поликристаллический	Прогиб ледяного покрова толщиной до 40 см	0	0,02	$10^{12}$
	Изгиб клавиш в ледяном покрове	0	–	$6 \cdot 10^{12}$
Мелкозернистый поликристаллический, средний размер кристалла – 4–5 мм	Изгиб стержней длиной 30 мм	–3	1,00–1,20	$1,36 \cdot 10^{12}$
Пресноводный крупноблочный, размер блоков – 3–4 см	Изгиб стержней длиной 30 мм	–3	1,00–1,20	$1,15 \cdot 10^{13}$
Речной поликристаллический, размер кристалла – 3–5 мм	Изгибные колебания стержней длиной до 35 см на частотах 5–400 Гц	–5	–	Динамический коэффициент вязкости $10^4 - 10^6$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица П.Б.1. – Результаты испытаний твердомера на ледяных блоках. Температура воздуха в морозильной камере - 1 °С, температура льда в блоке -1 °С

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глубина погружения конуса, мм	21	16	20	22	21	21	18	22	17	19

Таблица П.Б.2. – Результаты испытаний твердомера на ледяных блоках. Температура воздуха в морозильной камере - 6 °С, температура льда в блоке -3 °С

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глубина погружения конуса, мм	20	16	20	19	21	19	18	20	20	17

Таблица П.Б.3. – Результаты испытаний твердомера на ледяных блоках. Температура воздуха в морозильной камере - 10 °С, температура льда в блоке -1 °С

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глубина погружения конуса, мм	21	18	16	21	17	23	18	22	19	17

Таблица П.Б.4. – Результаты испытаний твердомера на ледяных блоках. Температура воздуха в морозильной камере - 15 °С, температура льда в блоке -7 °С

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глубина погружения конуса, мм	14	15	16	17	15	16	15	14	17	16

Таблица П.Б.5. – Результаты испытаний твердомера на ледяных блоках. Температура воздуха в морозильной камере - 20 °С, температура льда в блоке -1 °С

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глубина погружения конуса, мм	16	13	16	15	14	14	15	14	16	13

Таблица П.Б.6. – Результаты испытаний твердомера на ледяных блоках. Температура воздуха в морозильной камере - 25 °С, температура льда в блоке -1 °С

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глубина погружения конуса, мм	15	16	16	15	16	14	14	14	16	15

Таблица П.Б.7. – Результаты испытаний твердомера на ледяных блоках. Температура воздуха в морозильной камере - 31 °С, температура льда в блоке (н/д)

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глубина погружения конуса, мм	12	15	16	16	14	14	14	15	16	15

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Основные технические и метрологические характеристики фольговых константановых одиночных тензорезисторов производства ООО УК «Сибтензоприбор» г. Кемерово

Условное обозначение тензорезисторов

**[I] ФК [II]-[III]-[IV]-[V]-[VI]-[VII]**

Группа знаков [I] – тип подложки:

- 1 – клеевая основа;
- 2 – бумага;

Знак «ФК» – обозначение типа чувствительного элемента (фольга константановая).

Группа знаков [II] – конфигурация чувствительного элемента:

- П – одиночные;
- P1...P10 – розетки;
- M1...M2 – мембраны.

Группа знаков [III] – длина чувствительного элемента (номинальная база), мм.

Группа знаков [IV] – номинальное электрическое сопротивление, Ом.

Группа знаков [V] – группа показателей точности.

Группа знаков [VI] – температурный коэффициент линейного расширения материала без множителя  $10^{-6}$ , при установке на который тензорезистор является термокомпенсированным, °C-1.

Группа знаков [VII] – исполнение:

- С – стандартные выводы;
- С1 – без выводов;
- С2 – нестандартные выводы;
- С3 – без защитного покрытия;
- С4 – без выводов и защитного покрытия;
- С5 – без выводов с облуженными точками.

Примеры записи условного обозначения:

– тензорезисторы ФК на бумажной подложке, одиночные одноосевые прямоугольные, с базой 1мм, сопротивлением 50 Ом, высокостабильные, с коэффициентом теплового расширения материала 12, без выводов:

2ФКП-1-50-А-12-С1

– тензорезисторы ФК на клеевой пленке, розетки, с базой 3мм, сопротивлением 400 Ом, для проведения различных испытаний, с коэффициентом теплового расширения материала 16, со стандартными выводами:

1ФКР-3-400-Б-16-С.

Таблица П.В.1. – Основные технические характеристики фольговых тензорезисторов производства ООО УК «Сибтензоприбор» (для части ассортимента)

Обозначение (группа знаков ФК [II]- [III]- [IV])	Номинальное сопротивление, Ом	Номинальная база (длина тензорешетки), мм	Длина подложки, мм	Ширина подложки, мм
ФКП-10-100	100	10	15,0	3,7
ФКП-10-120	120	10	15,0	4,0
ФКП-10-200	200	10	22,0	7,7
ФКП-10-350	350	10	13,8	6,6
ФКП-10-400	400	10	15,0	5,4
ФКП-10-700	700	10	15,0	6,6
ФКП-10-1000	1000	10	18,0	8,0
ФКП-15-100	100	15	24	4,7
ФКП-15-120	120	15	24	4,7
ФКП-15-200	200	15	20,0	4,4
ФКП-15-350	350	15	20,0	5,8
ФКП-15-400	400	15	20,0	5,8
ФКП-15-700	700	15	20,0	6,6
ФКП-15-1000	1000	15	20,0	6,8
ФКП-20-100	100	20	29,5	4,7
ФКП-20-120	120	20	28,9	7,2
ФКП-20-200	200	20	25,0	4,7
ФКП-20-350	350	20	25,0	4,7
ФКП-20-400	400	20	25,0	4,7
ФКП-20-700	700	20	25,0	7,0
ФКП-20-1000	1000	20	25,0	7,2
ФКП-30-120	120	30	37,0	5,2
ФКП-30-350	350	30	37,0	5,2
ФКП-30-700	700	30	37,0	6,0
ФКП-30-1000	1000	30	37,0	6,2

Таблица П.В.2. – Общие технические характеристики фольговых тензорезисторов производства ООО УК «Сибтензоприбор»

Показатели	Значения
Максимальный рабочий ток питания, мА	25
Масса не более, г	0,5
Рабочая область значений температуры, °С	от минус 50 до плюс 70
Материал решетки	константан
Материал выводных проводников	медь
Тип подложки	клеевая основа
	бумага
Температурный коэффициент линейного расширения материала без множителя $10^{-6}$ , при установке на который тензорезистор является термокомпенсированным, °С-1:	
– титан	8
– сталь	12
– медь	16
– алюминиевый сплав	23

Таблица П.В.3. – Основные метрологические характеристики фольговых тензорезисторов производства ООО УК «Сибтензорприбор» (для части ассортимента)

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерения деформации, мЛн <sup>-1</sup>	±3000
Номинальная база, мм	0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 15,0; 20,0; 30,0; 40,0; 50,0; 60,0
Допустимое отклонение от номинальной базы, %	±25
Номинальное сопротивление, Ом	50; 100; 120; 200; 350; 400; 700; 1000
Предельное относительное отклонение сопротивления в партии от номинального для групп качества А, Б, В соответственно, %, не более	±0,35; ±0,8; ±1,0
Среднее значение чувствительности при нормальных условиях ( <i>коэффициент тензочувствительности</i> )	от 1,90 до 2,30
Среднее квадратическое отклонение (СКО) чувствительности при нормальных условиях для групп качества А, Б, В, соответственно, не более	0,02; 0,03; 0,05
Нелинейность функции преобразования при нормальных условиях для групп качества А, Б, В соответственно, %, не более	1; 2; 3
Среднее значение часовой ползучести при нормальных условиях для групп качества А, Б, В соответственно, %, не более	±0,5; ±1,0; ±1,5
СКО часовой ползучести при нормальных условиях для групп качества А, Б, В соответственно, %, не более	0,5; 1,0; 1,5
СКО погрешности аппроксимации функции влияния температуры на чувствительность для групп качества А, Б, В, соответственно, не более	0,02; 0,04; 0,07
Температурная характеристика сопротивления (ТХС), где t – температура в °С, C <sub>0</sub> , C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> и C <sub>3</sub> – коэффициенты.	$\xi(t) = C_0 + C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t^3$
СКО погрешности аппроксимации, мкОм/Ом, не более	10; 40; 100
Максимальное значение ТХС в рабочей области значений температуры, для групп качества А, Б, В, соответственно, мкОм/Ом, не более	800; 1300; 1800
СКО максимального значения ТХС в рабочей области значений температуры для групп качества А, Б и В соответственно, мкОм/Ом, не более	20; 50 и 100
Среднее значение воспроизводимости начального сопротивления для групп качества А, Б, В соответственно, мкОм/Ом, не более	20; 40; 80
СКО воспроизводимости начального сопротивления для групп качества А, Б, В соответственно, мкОм/Ом, не более	30; 50; 75
Среднее значение часового дрейфа при максимальной температуре для групп качества А, Б, В соответственно, мкОм/Ом, не более	±20; ±100; ±500
СКО часового дрейфа при максимальной температуре для групп качества А, Б, В соответственно, мкОм/Ом, не более	5; 20; 60
Минимальное значение сопротивления изоляции в рабочей области значений температуры для групп качества А, Б, В соответственно, МОм	200; 50; 10

Нормальные условия эксплуатации: температура воздуха от 18 до 25 °С, относительная влажность от 30 до 60%.





Рисунок П.В.1. – Копия свидетельства об утверждении типа средств измерений



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Электрические параметры микросхем 140УД17 при  $U_n = \pm 15$  В,  $T = 25^\circ$  С

1	Напряжение питания	$\pm 15$ В $\pm 10\%$
2	Максимальное выходное напряжение К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б	не менее $\pm 12$ В не менее $\pm 11,5$ В
3	Напряжение смещения нуля при $U_n = \pm 15$ В К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б при $U_n = \pm 16,5$ В К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б	не более 75 мкВ не более 150 мкВ не более 135 мкВ не более 250 мкВ
4	Входной ток при $U_n = \pm 15$ В К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б при $U_n = \pm 16,5$ В К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б	не более $\pm 4$ нА не более $\pm 12$ нА не более $\pm 5$ нА не более $\pm 14$ нА
5	Ток потребления при $U_n = \pm 15$ В К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б при $U_n = \pm 16,5$ В К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б	не более 4 мА не более 5 мА не более 4,5 мА не более 5,5 мА
6	Разность входных токов при $U_n = \pm 15$ В К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б при $U_n = \pm 16,5$ В К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б	не менее 3,8 нА не менее 6 нА не менее 4,5 нА не менее 7 нА
7	Коэффициент усиления напряжения при $U_n = \pm 15$ В К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б при $U_n = \pm 13,5$ В К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б	не менее 200000 не менее 120000 не менее 200000 не менее 120000
8	Коэффициент ослабления синфазных входных напряжений К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б	не менее 106 дБ не менее 96 дБ
7	Коэффициент усиления напряжения при $U_n = \pm 15$ В К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б при $U_n = \pm 13,5$ В К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б	не менее 200000 не менее 120000 не менее 200000 не менее 120000
8	Коэффициент ослабления синфазных входных напряжений К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б	не менее 106 дБ не менее 96 дБ
9	Синфазное входное напряжение не менее типовое	$\pm 13$ В $\pm 15$ В
10	Коэффициент влияния неустойчивости источников питания на напряжение смещения К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б	не менее 94 дБ не менее 90 дБ
11	Частота единичного усиления	не менее 0,4 МГц
12	Скорость нарастания выходного напряжения	не менее 0,1 В/мкс
13	Средний температурный дрейф напряжения смещения К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б	не более 3 мкВ/°С не более 6 мкВ/°С
14	Средний температурный дрейф разности входных токов К140УД17А, КР140УД17А, К140УД1701А К140УД17Б, КР140УД17Б, К140УД1701Б	не более 120 нА/°С не более 200 нА/°С

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

## Методика расчета усилий резания льда дисковым режущим инструментом

«УТВЕРЖДАЮ»  
Первый проректор  
по науке и международному  
сотрудничеству

  
Верховский С. В.  
«20» Января 2011 г.



«УТВЕРЖДАЮ»  
Директор Красноярского филиала  
государственного предприятия  
«Краевая дорожно-эксплуатационная  
организация»

  
Эпов В. П.  
2011 г.



**МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ ЛЬДА ДИСКОВЫМ  
РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ**

(2011)


Методику разработал:

Ганжа В.А. (ФГАОУ ВПО Сибирский федеральный университет)


СОГЛАСОВАНО:  
рассмотрено и  
рекомендовано к внедрению

Протокол заседания ИТС ИНГ  
№ \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2011 г.

Профессор-директор ИН и Г  
Довженко Н. Н.



СОГЛАСОВАНО:  
рассмотрено и  
принято к реализации в КрайДЭО

  
Заместитель директора  
Стрелков М.Н.

## Содержание

1. Общие положения.....	3
2. Термины и определения.....	4
3. Расчет усилий резания льда дисковым резцом типа А по блокированной схеме резания.....	4
4. Расчет усилий резания льда дисковым резцом типа А по полублокированной схеме резания.....	9
5. Использованная литература.....	11
Приложение 1. Пример расчета усилий резания льда дисковым резцом типа А по блокированной схеме резания.....	12
Приложение 2. Пример расчета усилий резания льда дисковым резцом типа А по полублокированной схеме резания.....	15



## 1. Общие положения

1.1. Настоящая Методика позволяет на стадии проектирования, с учетом физико-механических свойств льда и параметров среза, определять рациональные геометрические параметры режущего инструмента, обеспечивающие минимальную энергоемкость процесса разрушения снежно-ледяных и гололедных образований на покрытиях дорог и аэродромов рабочими органами спецмашин.

1.2. Методика предназначена для использования на эксплуатационных предприятиях, выполняющих работы по зимнему содержанию дорог и аэродромов при совершенствовании существующих и разработке новых, оснащаемых дисковыми резцами, рабочих органов спецмашин.

1.3. В Методике приведены способы расчета усилий резания льда дисковым резцом типа А по блокированной и полублокированной схемам резания, так как работа резцов размещаемых на рабочих органах спецмашин в зависимости от схемы размещения может осуществляться как в блокированном так и в полублокированном режимах.

1.4. Предлагаемая ниже методика составлена, исходя из условия, что заданы следующие параметры:

1. Характеристики дискового режущего инструмента – радиус резца  $R$ , угол заострения  $\delta$ , задний угол  $\gamma$ ;

2. Прочность льда на сжатие  $\sigma_{сж}$  и прочность льда на разрыв  $\sigma_p$  для региона, в котором предполагается проведение работ разрабатываемым рабочим органом;

3. Основные параметры режима разрушения - глубина резания  $h$  и шаг резания  $t$ ;

4. Коэффициент трения стали о бронзу  $f_i$ ;

5. Коэффициент  $\mu_l$  трения стали о лед (коэффициент внешнего трения)

## 2. Термины и определения

2.1. Заостренный дисковый резец типа А - вращающийся на оси диск с непрерывным односторонним клиновым ободом, перекатывающийся при работе по поверхности забоя и внедряющийся в нее под воздействием усилия подачи.

2.2. Полублокированная схема резания – разрушение резанием массива две поверхности, которого открыты и в сторону одной из них в процессе резания происходит скол отделяемых элементов материала. При этом ширина резания должна быть меньше или равна глубине резания.

2.3. Блокированная схема резания – разрушение резанием полностью закрытого массива. При этом ширина резания превышает глубину резания.

2.4. Шаг резания  $t$  (ширина резания) – расстояние между соседними линиями перекатывания дискового резца (толщина срезаемой стружки).

2.5. Глубина резания  $h$  – толщина слоя разрушаемого материала.

## 3. Расчет усилий резания льда дисковым резцом типа А по блокированной схеме резания

Для определения составляющих усилия резания дисковым резцом типа А по *блокированной* схеме предложены следующие уравнения:

1. Значение горизонтальной составляющей определится из выражения

$$P_{1r} = PSk_{r1}(\mu_1 \cos \delta + \sin \delta)(1 + f_1) \sin \frac{\alpha_1}{2} + P_{1g}\mu_1 \quad (1)$$

2. значение вертикальной составляющей

$$P_{1g} = PSk_{r1}(\mu_1 \cos \delta + \sin \delta)(1 + f_1) \cos \frac{\alpha_1}{2} \quad (2)$$

3. значение боковой составляющей

$$P_{1g} = PSk_{III}(\cos \delta - \mu_1 \sin \delta) \quad (3)$$

где  $k_{III}$  - коэффициент параметров разрушения

$$k_{III} = \frac{2Lhk}{S} \quad (4)$$

где  $L$  - длина дуги контакта режущей кромки дискового резца со льдом, м;

$h$  - глубина резания, м;

$k$  - коэффициент неравномерности разрушения.

Расчет следует начинать с определения горизонтальной составляющей усилия резания в соответствии с формулой (1). Для этого необходимо определить следующие показатели.

Длина  $L$  дуги контакта режущей кромки дискового резца со льдом определится из выражения

$$L = \frac{\pi R}{180^\circ} \arccos \frac{R-h}{R} \quad (5)$$

где  $h$  - глубина резания (м);

$R$  - радиус резца (м).

Принимая к расчету экспериментальное значение коэффициента неравномерности разрушения  $k = 3,4$ , производим вычисление значения коэффициента параметров разрушения  $k_{III}$  в соответствии с выражением (4).

Угол  $\alpha_1$  определяется из выражения

$$\alpha_1 = \arccos \frac{R_1 - (h - \frac{z_\epsilon}{\operatorname{tg} \delta})}{R_1} \quad (6)$$



где радиус  $R_1$  окружности (м), образованной в результате пересечения конусной поверхности плоскостью, проходящей параллельно основанию конуса через центр тяжести боковой поверхности усеченного конуса, равен

$$R_1 = R - \frac{z_c}{\operatorname{tg} \delta} \quad (7)$$

где центр тяжести боковой поверхности усеченного конуса  $z_c$  (м):

$$z_c = \frac{h \operatorname{tg} \delta (3R - 2h)}{3(2R - h)} \quad (8)$$

где  $h$  - глубина резания (м);

$\delta$  - угол заострения режущей кромки резца (град.);

$R$  - радиус резца (м).

По этой формуле  $z_c$  рассчитывается при заблокированном резании и при резании по полублокированной схеме, при условии, что  $h \operatorname{tg} \delta \leq t$  (где  $t$  - ширина резания). При  $h \operatorname{tg} \delta > t$  вместо  $h$  подставляется значение  $\frac{t}{\operatorname{tg} \delta}$ .

После получения значения угла  $\alpha_1$ , следует определить величину  $P$  давления на грани клина из выражения

$$P = C_0 \operatorname{ctg} \varphi_2 \left[ e^{2\theta \operatorname{tg} \varphi_2} \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_2}{2} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

где  $C_0$  - сцепление льда (удельное усилие, необходимое для разъединения частиц при сдвиге), (кН/м<sup>2</sup>);

$\varphi_2$  - угол внутреннего трения;

$\theta$  - угол зоны радиального сдвига (рад) определяется в соответствии с величиной угла  $\varphi_2$  внутреннего трения по номограмме (рис. 1).



Для определения величин  $C_0$  и  $\varphi_2$  следует воспользоваться графическим методом определения напряжений в соответствии с теорией Мора [1].

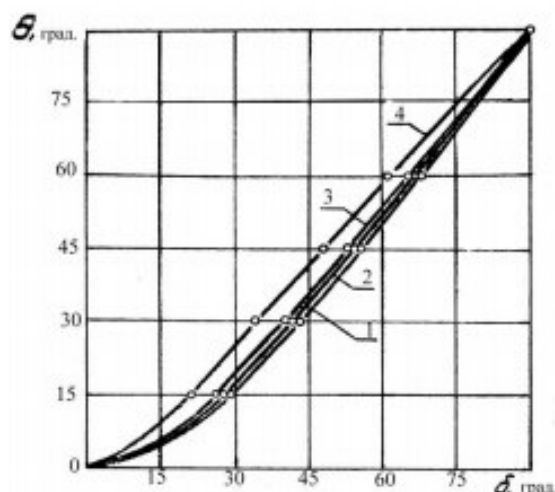


Рис. 1. Зависимость угла зоны радиального сдвига от угла заострения клина при заданном угле внутреннего трения: 1, 2, 3, 4 – угол внутреннего трения соответственно  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ .

При этом необходимо задаться пределами прочности льда на сжатие  $\sigma_{сж}$  и растяжение  $\sigma_p$ . В прямоугольной системе координат  $\sigma$  и  $\tau$  (касательное напряжение) (рис. 2) на оси  $\sigma$  производится построение кругов напряжений (Мора), диаметры которых соответствуют численным значениям  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$ . Растягивающие напряжения, откладываются вправо от начала координат. Напряжения сжатия – влево. Далее производится построение касательной к этим кругам, заменяющей соответствующую часть огибающей напряженных состояний, расположенных между точками касания. Угол, составленный огибающей с осью  $\sigma$ , физически означает угол внутреннего трения  $\varphi$  разрушаемого материала. Численное значение угла  $\varphi$  можно получить из следующего выражения [1]

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \geq \sin \varphi \quad (10)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – величины главных нормальных напряжений, равные, в данном случае соответственно  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$ .

Сцепление льда  $C_0$  определим из выражения

$$C_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (11)$$

Затем определяется площадь  $S$  боковой конусной поверхности дискового резца, заглубляющаяся в ледовый массив во время резания из выражения

$$S = \frac{S_\sigma}{2} \quad (12)$$

где  $S_\sigma$  - площадь части поверхности конуса соприкасающейся со льдом во время резания, равная

$$S_\sigma = \frac{\sqrt{a^2 + c^2}}{a} (R^2 \arccos \frac{x_1}{R} - x_1 \sqrt{R^2 - x_1^2}) \quad (13)$$

где  $X_1 = R - h$  (м); параметры конуса:  $a = R = 0,1$  м; высота конуса  $c = R \times \operatorname{tg} \delta$  (для дискового резца радиусом  $R = 0,1$  м и углом заострения  $\delta = 30^\circ$  высота конуса  $c = 0,06$  м).

Следующей составляющей формулы (1) является коэффициент  $\mu_1$  трения стали о лед (коэффициент внешнего трения). При расчетах следует принимать следующее значение коэффициента динамического трения стали по льду: 0,065 [3].

Также следует задаться коэффициентом трения стали о бронзу, величина которого составляет  $f_1 = 0,016$ .

Последней составляющей формулы (1) которую следует определить, является величина боковой составляющей усилия резания  $P_{1B}$ , определяемая из выражения (3).

Завершать расчет составляющих усилия резания дисковым резцом типа А по блокированной схеме, следует определением значения вертикальной составляющей по формуле (2). Пример расчета составляющих усилия резания льда дисковым резцом типа А по блокированной схеме резания приведен в Приложении 1.

#### 4. Расчет усилий резания льда дисковым резцом типа А по полублокированной схеме резания

Для определения составляющих усилия резания дисковым резцом типа А по *полублокированной* схеме резания, следует воспользоваться результатами расчетов усилий резания дисковым резцом типа А по блокированной схеме согласно п. 3. При этом влиянием массы срезаемого льда можно пренебречь ввиду ее малости. Площадь среза следует определять как произведение длины дуги контакта  $L$  режущей кромки дискового резца со льдом и ширины среза  $t$ .

Горизонтальная составляющая усилия резания по этой схеме определяется по формуле

$$P_{2r} = Pk_{m2}(\mu_1 \cos \delta + \sin \delta)(\sin \frac{\alpha_1}{2} + f_1 \cos \frac{\alpha_1}{2}) + P_{1B}\mu_1 \quad (14)$$

где  $k_{m2}$  - коэффициент параметров разрушения

$$k_{m2} = \frac{2Lht}{S} \quad (15)$$

где  $t$  – шаг резания, м;



Коэффициент параметров разрушения  $k_{П2}$  введен в выражение (14; 16; 17) ввиду непостоянной величины заглубления в лед каждой точки режущей кромки дискового резца.

Завершающим этапом расчета является вычисление значений вертикальной и боковой составляющих усилия резания дискового резца типа А по полублокированной схеме по формулам

$$P_{2в} = Pk_{П2}(\mu_1 \cos \delta + \sin \delta)(1 + f_1) \cos \frac{\alpha_1}{2} \quad (16)$$

$$P_{2б} = Pk_{П2}(\cos \delta - \mu_1 \sin \delta) \quad (17)$$

Пример расчета составляющих усилия резания льда дисковым резцом типа А по полублокированной схеме резания приведен в Приложении 2.

В соответствии с п. 3-4 настоящей методики, следует производить расчет составляющих усилия резания льда дисковым резцом заданного радиуса (например,  $R = 0,1$  м) и различными углами заострения (например,  $\delta = 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ$  и  $60^\circ$ ) на заданную глубину резания  $h$  с различным шагом резания (например,  $t = 10; 20; 30$  и  $40$  мм). Параметры дискового резца, обеспечивающие минимальные расчетные усилия следует считать рациональными.

При расчете удельной энергоёмкости процесса  $E$  в соответствии с выражением (18), следует использовать значения горизонтальной составляющей  $P_{Г}$  усилия резания рассчитанной для дискового резца с рациональными параметрами:

$$E = 0.000272 \frac{P_{Г}}{S}; \text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3 \quad (18)$$

где  $P_{Г}$  – значение горизонтальной составляющей усилия резания (кН);

$S$  – площадь среза, определяемая следующим выражением:

$$S = h \cdot t; \text{м}^2 \quad (19)$$

где:  $h$  – глубина резания (м);  $t$  – шаг резания (м).

### 5. Использованная литература

1. Зеленин, А.Н. Лабораторный практикум по резанию грунтов: учебное пособие для студ. инж.- стр. и автомобильно - дорожн. ВУЗов/ А.Н. Зеленин, Г.Н. Карасев, Л.В. Красильников. – М.: Высшая школа, 1969.- 310 с.
2. Богородский, В.В. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии / В.В Богородский, В.П. Гаврило. – Л.: Гидрометеониздат, 1980. – 384с.
3. Современные методы разрушения льда / А.П. Куляшов [и др.]. – М.: Компания Спутник+, 2005. – 135с.

**Пример расчета составляющих усилия резания льда дисковым резцом типа А по блокированной схеме резания**

Рассчитываем значения составляющих усилия резания льда дисковым резцом типа А радиусом  $R = 0.1$  м., углом заострения  $\delta = 30^\circ$  на глубину  $h = 0,06$  м. в соответствии с п.3.

Значение  $z_c$  определяется в соответствии с выражением (8)

$$z_c = \frac{0.06 \times 0.58(0.3 - 2 \times 0.06)}{3(0.2 - 0.06)} = 0.015 \text{ м} \quad (20)$$

Значение радиуса  $R_1$  определяется в соответствии с выражением (7)

$$R_1 = 0.1 - \frac{0.015}{0.58} = 0.074 \text{ м} \quad (21)$$

Значение угол  $\alpha_1$  определяется из выражения (6)

$$\alpha_1 = \arccos \frac{0.074 - (0.06 - \frac{0.015}{0.58})}{0.074} = 57.32 \text{ град} \quad (22)$$

Для определения величины  $P$  давления на грани клина из выражения (9) необходимо определить значения величин  $C_0$  и  $\varphi_2$  для чего следует воспользоваться графическим методом определения напряжений в соответствии с теорией Мора. Задаемся пределами прочности льда на сжатие  $\sigma_{сж}$  и растяжение  $\sigma_p$ . К расчету примем следующие значения для пресноводного льда. Предел прочности на растяжение при температуре воздуха от  $0^\circ\text{C}$  до  $-10^\circ\text{C}$  составляет  $\sigma_p = 1,2$  МПа. При температуре от  $0^\circ\text{C}$  до  $-2^\circ\text{C}$ , по данным работы [2], предел прочности льда при сжатии в направлении перпендикулярном к осям кристаллов  $\sigma_{\perp} = 2,3$  МПа. В прямоугольной системой координат  $\sigma$  и  $\tau$  (касательное напряжение) (рис. 2) на оси  $\sigma$  строим круги напряжений (Мора), диаметры которых соответствуют численным



значениям  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$ . Растягивающие напряжения, откладываются вправо от начала координат. Напряжения сжатия – влево.

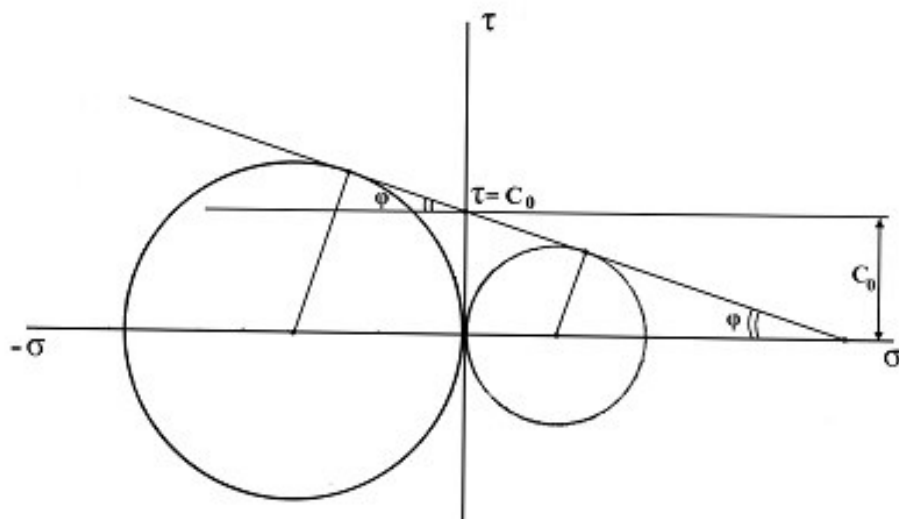


Рис. 2. Круги Мора для напряженного состояния льда при растяжении и сжатии ( $\sigma_p=1,2$  МПа;  $\sigma_{сж}=2,3$  МПа)

Далее производим построение касательной к этим кругам, заменяющей соответствующую часть огибающей напряженных состояний, расположенных между точками касания. Угол, составленный огибающей с осью  $\sigma$ , физически означает угол внутреннего трения  $\varphi$  разрушаемого материала. Численное значение угла  $\varphi$  можно получить из выражения (8).

Подставляя в выражение (10) численные значения напряжений, получаем

$$\sin \varphi \geq 0.314 \quad (23)$$

Следовательно, в данном случае  $\varphi = 18,3^\circ$

Величина сцепления льда  $C_0$  определяемая из выражения (11) составит  $C_0 = 1,75 \text{ кН/м}^2$ .

Угол зоны радиального сдвига для угла внутреннего трения  $\varphi_2 = 18,3^\circ$  составляет:  $\theta = 0,3$  рад.

Подставляя полученные значения в выражение (9) получаем

$$P = 1.75 \times 3.06 \left[ e^{2 \times 0.3 \times 0.32} \operatorname{tg}^2 \left( \frac{180}{4} + \frac{18.3}{2} \right) - 1 \right] = 6.85 \text{ кН / м}^2 \quad (24)$$

Значение площади  $S_\sigma$  части поверхности конуса соприкасающейся со льдом во время резания определяется в соответствии с выражением (13)

$$S_\sigma = \frac{\sqrt{0.01 + 0.0036}}{0.1} (0.1^2 \arccos \frac{0.04}{0.1} - 0.04 \sqrt{0.01 - 0.0016}) = 0.0092 \text{ м}^2 \quad (25)$$

Площадь  $S$  в соответствии с выражением (12) равна

$$S = \frac{0.0092}{2} = 0.0046 \text{ м}^2 \quad (26)$$

Длина  $L$  дуги контакта со льдом режущей кромки дискового резца согласно выражению (5) составляет

$$L = \frac{3.14 \times 0.1}{180^\circ} \arccos \frac{0.1 - 0.06}{0.1} = 0.113 \text{ м} \quad (27)$$

Экспериментальное значение коэффициента неравномерности разрушения  $k$  для рассматриваемых условий составляет 3,4. Тогда, величина коэффициента параметров разрушения  $k_{\text{пл}}$  в соответствии с выражением (4) составит

$$k_{\text{пл}} = \frac{2 \times 0.113 \times 0.06 \times 3.4}{0.0046} = 10.023 \quad (28)$$

Значения составляющих усилия резания дисковым резцом типа А по блокированной схеме определяются в соответствии с выражениями (1 – 3):

1. значение горизонтальной составляющей

$$P_{1r} = 6.85 \times 0.0046 \times 10(0.065 \times 0.87 + 0.5)(1 + 0.016) \sin \frac{57.32}{2} + 0.26 \times 0.065 = 0.25 \text{ кН} \quad (29)$$

2. значение вертикальной составляющей

$$P_{1g} = 6.85 \times 0.0046 \times 10(0.065 \times 0.87 + 0.5)(1.016) \times 0.88 = 0.16 \text{ кН} \quad (30)$$

3. значение боковой составляющей

$$P_{1b} = 6.85 \times 0.0046 \times 10(0.87 - 0.065 \times 0.5) = 0.26 \text{ кН} \quad (31)$$



**Пример расчета составляющих усилия резания льда дисковым резцом типа А по полублокированной схеме резания**

Рассчитываем значения составляющих усилия резания льда дисковым резцом типа А радиусом  $R = 0.1$  м., углом заострения  $\delta = 30^\circ$  на глубину  $h = 0,06$  м. с шагом резания  $t = 0,01$  м по полублокированной схеме в порядке описанном в п. 4.

Величина коэффициента параметров разрушения  $k_{п2}$  в соответствии с выражением (15) составит

$$k_{п2} = \frac{2 \times 0.113 \times 0.06 \times 0.01}{0.0046} = 0,03 \quad (32)$$

Значения составляющих усилия резания дисковым резцом типа А по полублокированной схеме определяются в соответствии с выражениями (14, 16, 17):

1. значение горизонтальной составляющей

$$P_{2Г} = 6.85 \times 0.03(0.065 \times 0.87 + 0.5)(28.7 + 0.016 \times 0.88) + 0.26 \times 0.065 = 0.08 \text{ кН} \quad (33)$$

2. значение вертикальной составляющей

$$P_{2В} = 6.85 \times 0.03(0.065 \times 0.87 + 0.5) \times 1.016 \times 0.88 = 0.114 \text{ кН} \quad (34)$$

3. значение боковой составляющей

$$P_{2Б} = 6.85 \times 0.03(0.87 - 0.065 \times 0.5) = 0.191 \text{ кН} \quad (35)$$

Результаты расчетов составляющих усилия резания льда дисковым резцом радиусом  $R = 100$  мм и углом заострения  $\delta = 30^\circ$  на глубину  $h = 0.06$  м с шагом резания  $t = 10; 20; 30$  и  $40$  мм. представлены в табл. 1.

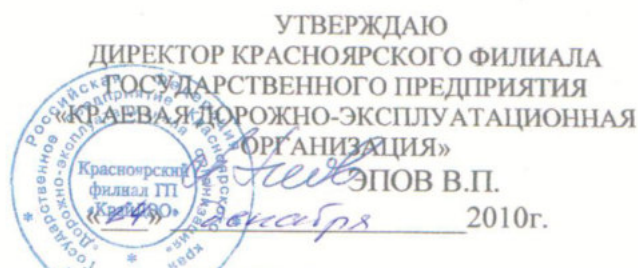
Таблица 1.

## Результаты расчета составляющих усилия резания

Шаг $t$ , м	Показатели		
	$P_{2Г}$ , кН	$P_{2В}$ , кН	$P_{2Б}$ , кН
0,01	0,08	0,114	0,191
0,02	0,143	0,227	0,38
0,03	0,35	0,34	0,57
0,04	0,38	0,49	0,76

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акты внедрения основных результатов диссертационной работы в производство

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

**результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы  
ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИСКОВОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

выполненной ГАНЖОЙ ВЛАДИМИРОМ АЛЕКСАНДРОВИЧЕМ  
Кафедра ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЕ И ГОРЮЧЕСМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
ИНСТИТУТА НЕФТИ И ГАЗА СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
внедрены в КРАСНОЯРСКОМ ФИЛИАЛЕ ГП «КрайДЭО»

Вид внедренных результатов ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ И ГОЛОЛЕДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ  
эксплуатация (изделия, работы, технологии), производство (изделия, работы, технологии) и др.

1. Характеристика масштаба внедрения СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СУЩЕСТВУЮЩИХ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ УБОРОЧНЫХ МАШИН

2. Форма внедрения МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ ЛЬДА ДИСКОВЫМ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ

3. Новизна результатов научно-исследовательских работ КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ, МОДИФИКАЦИЯ

4. Опытно-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ РАЗРАБОТАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНЕДРЯЕМОЙ МЕТОДИКИ

5. Внедрены: в промышленное производство ПАРК СПЕЦМАШИН

6. Годовой экономический эффект

Ожидаемый

Фактический

7. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов \_\_\_\_\_

8. Объем внедрения \_\_\_\_\_

что составляет \_\_\_\_\_ от объема внедрения, положенного в основу расчета гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР

9. Социальный и научно - технический эффект УСОВЕРШЕНСТВОВАНА ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ОЧИСТКИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ И ГОЛОЛЕДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ БОЛЕЕ ВЫСОКОЕ КАЧЕСТВО РАБОТ

(охрана окружающей среды, недр; улучшение и оздоровление условий труда; специального назначения и т.п.)

**От исполнителя**

Автор разработанной методики

Ганжа В.А.

Проректор-директор Института нефти и газа СФУ  
Довженко Н.Н.



УТВЕРЖДАЮ  
 ДИРЕКТОР ПО ПРОИЗВОДСТВУ  
 ООО «АЭРОПОРТ ЕМЕЛЬЯНОВО»  
 ШЕЙКО В.В.  
 «6» октября 2010г.

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и  
 технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы  
ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИСКОВОГО  
 РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ  
 ОБРАЗОВАНИЙ

выполненной ГАНЖОЙ ВЛАДИМИРОМ АЛЕКСАНДРОВИЧЕМ  
 Кафедра ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЕ И ГОРЮЧЕСМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИНСТИТУТА  
 НЕФТИ И ГАЗА СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
 внедрены в ООО «АЭРОПОРТ ЕМЕЛЬЯНОВО»

Вид внедренных результатов ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ АЭРОДРОМНЫХ И  
 ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ И ГОЛОЛЕДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

1. Характеристика масштаба внедрения СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ  
 СУЩЕСТВУЮЩИХ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ УБОРОЧНЫХ  
 МАШИН
2. Форма внедрения МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ ЛЬДА ДИСКОВЫМ  
 РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ
3. Новизна результатов научно-исследовательских работ КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ,  
 МОДИФИКАЦИЯ
4. Опытно-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ  
 РАБОЧИХ ОРГАНОВ РАЗРАБОТАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНЕДРЯЕМОЙ  
 МЕТОДИКИ
5. Внедрены: в промышленное производство СЛУЖБА СПЕЦТРАНСПОРТА
6. Годовой экономический эффект  
 Ожидаемый   
 Фактический
7. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов \_\_\_\_\_
8. Объем внедрения \_\_\_\_\_  
 что составляет \_\_\_\_\_ от объема внедрения, положенного в основу расчета гарантированного  
 экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР
9. Социальный и научно-технический эффект УСОВЕРШЕНСТВОВАНА  
 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ОЧИСТКИ ВНУТРИАЭРОПОРТОВЫХ ТЕРРИТОРИЙ  
 (КРОМЕ ВПП) И ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ И ГОЛОЛЕДНЫХ  
 ОБРАЗОВАНИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ БОЛЕЕ ВЫСОКОЕ КАЧЕСТВО РАБОТ  
 (охрана окружающей среды, недр; улучшение и оздоровление условий труда; специального назначения и т.п.)

От исполнителя

Автор разработанной методики

Ганжа В.А.



Проректор-директор Института нефти и  
 газа СФУ

Довженко Н.Н.

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор по науке  
и международному сотрудничеству  
ФГАОУ ВПО «Сибирский  
федеральный университет»

ВЕРХОВЕЦ С. В.

2010 г.



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

в учебный процесс Института Нефти и газа ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» результатов диссертационной работы Ганжи В. А. на тему «Обоснование конструкции и основных параметров дискового режущего инструмента для разрушения снежно-ледяных образований»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Ганжи В. А. внедрены в учебный процесс Института нефти и газа Сибирского федерального университета на кафедре «Топливообеспечение и горюче-смазочные материалы» и используются при изложении теоретического материала и выполнении лабораторных и практических работ по дисциплине «Машины и агрегаты для содержания аэродромов» (специальности 190204.65 «Средства аэродромно-технического обеспечения полетов авиации»).

Заведующий кафедрой ТОГСМ  
д.т.н., профессор

Безбородов Ю. Н.

Директор Института Нефти и газа  
д.т.н., профессор

Довженко Н. Н.





УТВЕРЖДАЮ  
 Главный инженер государственного  
 предприятия Красноярского края  
 «Дорожно-эксплуатационная  
 организация»

С.Н. Дворников  
 «14» сентября 2017 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**  
**результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и**  
**технологических работ**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы  
МЕТОД КОНТРОЛЯ НАГРУЗОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ  
ОСНАЩЕННЫХ ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ  
СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ  
 (наименование темы)

выполненной ГАНЖОЙ ВЛАДИМИРОМ АЛЕКСАНДРОВИЧЕМ,  
КОВАЛЕВИЧЕМ ПАВЛОМ ВАСИЛЬЕВИЧЕМ  
 (ф.и.о. исполнителя, наименование кафедры)

Кафедра ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЕ И ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИНСТИТУТА  
НЕФТИ И ГАЗА СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
 внедрены в ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ  
«ДОРОЖНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ»

Вид внедренных результатов МЕТОД КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ  
ОБРАЗОВАНИЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ С ДИСКОВЫМ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ  
 эксплуатация (изделия, работы, технологии), производство (изделия, работы, технологии) и др.

1. Характеристика масштаба внедрения ВЫБОР СКОРОСТИ БАЗОВОЙ МАШИНЫ, НЕСУЩЕЙ  
СМЕННЫЙ РАБОЧИЙ ОРГАН С ДИСКОВЫМ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ, ДЛЯ  
РАЗРУШЕНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ, ПРИ КОТОРОЙ БУДЕТ  
ДОСТИГАТЬСЯ УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И УМЕНЬШЕНИЕ  
ЭНЕРГОЕМКОСТИ
2. Форма внедрения МЕТОД КОНТРОЛЯ  
 методика (метод)
3. Новизна результатов научно-исследовательских работ КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ  
 (пионерские, принципиально новые, качественно новые, модификация, модернизация старых разработок)
4. Опытно-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ  
ВНЕДРЯЕМОГО МЕТОДА
5. Внедрены: в промышленное производство ПАРК СПЕЦМАШИН
6. Годовой экономический эффект  
 Ожидаемый —  
 Фактический —
7. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов —
8. Объем внедрения —  
 что составляет — от объема внедрения, положенного в основу расчета  
 гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР
9. Социальный и научно-технический эффект УСОВЕРШЕНСТВОВАНА ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ  
СХЕМА ОЧИСТКИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ,  
ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ БОЛЕЕ ВЫСОКОЕ КАЧЕСТВО РАБОТ  
 (охрана окружающей среды, недр; улучшение и оздоровление условий труда; специального назначения и т.п.)

**От исполнителей**

Авторы разработанного метода контроля

Ганжа В.А.  
Ковалевич П.В.

Ганжа В.А.  
 Ковалевич П.В.

Заместитель директора по научной работе  
 Института нефти и газа  
 Сибирского федерального университета

Безбородов Ю.Н.



УТВЕРЖДАЮ  
 Заместитель генерального  
 директора по развитию  
 ЗАО «СпецтехноМаш»  
 Осипов А.Ф.  
 «                    » 2019г.



**АКТ**  
**внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы  
СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ  
СНЕГООЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ОСНАЩАЕМОГО ДИСКОВЫМ  
РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ

выполненной ГАНЖОЙ ВЛАДИМИРОМ АЛЕКСАНДРОВИЧЕМ

Кафедра ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЕ И ГОРЮЧЕСМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИНСТИТУТА  
НЕФТИ И ГАЗА СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

внедрены в ЗАО «СПЕЦТЕХНОМАШ»

Вид внедренных результатов: ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ – КОНСТРУКЦИЯ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПЕНЕТРАЦИОННОГО ПРИБОРА – ТВЕРДОМЕРА В  
СООТВЕТСТВИИ С ПАТЕНТОМ РФ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ № 2550375 МПК G01N3/42

1. Характеристика масштаба внедрения ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ  
(НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ) УПЛОТНЕННОГО СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ДОРОЖНЫХ  
И АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЯХ

2. Форма внедрения ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

3. Новизна результатов научно-исследовательских работ МОДИФИКАЦИЯ

4. Опытнo-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ  
ПРИБОРА – ПРОТОТИПА

5. Социальный и научно-технический эффект: ПРАКТИЧЕСКИМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПРЕДЛАГАЕМОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ОБЕСПЕЧИВАЕТСЯ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ПОКАЗАТЕЛЯ ПРОЧНОСТИ (НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ) УПЛОТНЕННОГО  
СНЕЖНОГО ПОКРОВА ГРУНТОВЫХ АВТОДОРОГ И АЭРОДРОМОВ С ВЫСОКОЙ  
ТОЧНОСТЬЮ И МАЛОЙ ТРУДОЕМКОСТЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

(охрана окружающей среды, недр; улучшение и оздоровление условий труда; специального назначения и т.п.)

От исполнителя

Автор технического решения



Ганжа В.А.

И.о. директора Института нефти и газа  
 СФУ



Калякина О.П.





УТВЕРЖДАЮ  
 Начальник ФГКУ «Специализированная  
 пожарно-спасательная часть по  
 Красноярскому краю»  
 Калмыков И.И.  
 «20» 8/11/2019 2019г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**  
**результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и**  
**технологических работ**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы  
СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ  
СНЕГООЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ОСНАЩАЕМОГО ДИСКОВЫМ РЕЖУЩИМ  
ИНСТРУМЕНТОМ

выполненной ГАНЖОЙ ВЛАДИМИРОМ АЛЕКСАНДРОВИЧЕМ  
 Кафедра ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЕ И ГОРЮЧЕСМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИНСТИТУТА  
НЕФТИ И ГАЗА СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
 внедрены в ФГКУ «Специализированная пожарно-спасательная часть по Красноярскому краю»

Вид внедренных результатов: ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ – КОНСТРУКЦИЯ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПЕНЕТРАЦИОННОГО ПРИБОРА – ТВЕРДОМЕР В СООТВЕТСТВИИ С  
ПАТЕНТОМ РФ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ № 2550375 МПК G01N3/42

1. Характеристика масштаба внедрения ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ  
(НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ) УПЛОТНЕННОГО СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА  
АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЯХ, ПОКРЫТИЯХ БОЛЬШИХ ПЛОЩАДЕЙ, ВОДОЕМАХ В  
ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА.
2. Форма внедрения ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ
3. Новизна результатов научно-исследовательских работ МОДИФИКАЦИЯ
4. Опытно-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ  
ПРИБОРА – ПРОТОТИПА
5. Внедрены: в деятельность ФГКУ «Специализированная пожарно-спасательная часть по Красно-  
 ярскому краю»
6. Годовой экономический эффект  
 Ожидаемый \_\_\_\_\_  
 Фактический \_\_\_\_\_
7. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов \_\_\_\_\_
8. Объем внедрения \_\_\_\_\_  
 что составляет \_\_\_\_\_ от объема внедрения, положенного в основу расчета гарантированного  
 экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР
9. Социальный и научно - технический эффект: ПРАКТИЧЕСКИМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПРЕДЛАГАЕМОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ОБЕСПЕЧИВАЕТСЯ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ПОКАЗАТЕЛЯ ПРОЧНОСТИ (НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ) УПЛОТНЕННОГО СНЕЖНОГО  
ПОКРОВА С ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТЬЮ И МАЛОЙ ТРУДОЕМКОСТЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
ОПЕРАЦИЙ

(охрана окружающей среды, недр; улучшение и оздоровление условий труда; специального назначения и т.п.)

**От исполнителя**

Автор технического решения

\_\_\_\_\_ Ганжа В.А.

И.о. директора Института нефти и газа  
 СФУ

\_\_\_\_\_ Калякина О.П.



УТВЕРЖДАЮ



Проректор по науке  
ФГАОУ ВПО «Сибирский  
Федеральный университет»

Гладышев М.И.

«11» января 2019 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**в учебный процесс Института Нефти и газа ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» результатов диссертационной работы Ганжи В. А. на тему «Средства и методы измерительного контроля силовых параметров снегоочистительного оборудования, оснащаемого дисковым режущим инструментом»**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Ганжи В. А. внедрены в учебный процесс Института нефти и газа Сибирского федерального университета в форме нового структурного подразделения – учебно-научной лаборатории «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур» в составе кафедры «Топливообеспечение и горюче-смазочные материалы».

Учебная и научная деятельность лаборатории организованы в соответствии с Положением об учебно-научной лаборатории «Мерзлотоведение и испытания рабочего оборудования машин нефтегазового комплекса в условиях низких температур» (ПСП МИРОМ – 2016), утвержденным на заседании УС СФУ, Протокол №9 от 31.10.2016.

Заведующий кафедрой ТОГСМ

д.т.н., профессор

Безбородов Ю. Н.

И.о. директора Института нефти и газа

к.х.н., доцент

Калякина О.П.

