

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА М.Ф. РЕШЕТНЕВА

На правах рукописи

Васильев Сергей Иванович

**МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНШЕЙНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ**

Специальность

05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

Диссертация

на соискание ученой степени доктора технических наук

**Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Заслуженный изобретатель РФ
Ереско Сергей Павлович**

Красноярск – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕЗОННО-МЕРЗЛЫХ И ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ	16
1.1. Обзор ранее известных классификаций пород, описание процесса разработки грунта.....	16
1.2. Существующие методические подходы к описанию процессов деформирования и разрушения пород при различных режимах разрушения	25
1.3. Общие характеристики сезонномерзлых и условно-талых грунтов.....	37
Задачи исследования.....	51
2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ.....	52
2.1. Вероятностные физико-механические характеристики мерзлых грунтов...	52
2.2. Закономерности формирования пиковых давлений в гидроприводе роторных траншейных экскаваторов при разработке мерзлых грунтов.....	74
Выводы	94
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИВОДА ТРАНШЕЙНОГО ЭКСКАВАТОРА ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ	95
3.1. Разработка имитационной динамической модели траншейного экскаватора.....	95
3.2. Исследование адекватности вариантов имитационной математической модели гидромеханической системы привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора	125
3.3. Исследование динамических процессов в системе привода рабочих органов траншейных экскаваторов при воздействии нагрузок первого типа	132
3.4. Исследование динамических процессов в системе привода рабочих органов траншейных экскаваторов при воздействии нагрузок второго типа	135
3.5. Исследование динамических процессов в системе привода рабочих органов траншейных экскаваторов нагрузок третьего типа	137
3.6. Исследование динамических процессов гидромеханической системы привода роторного рабочего органа при изменении фазы установки гидромотора	139
Выводы	151

4. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА	153
4.1. Обоснование критерия классификации мерзлых грунтов. Выбор эталонного грунта.....	153
4.2. Коэффициент прочности мерзлых грунтов	154
4.3. Техничко-экономические показатели работы траншейных экскаваторов в различных грунтовых условиях	159
4.4. Метод оценки эффективности разработки мерзлых грунтов	169
Выводы	180
5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОПЛАСТОВ ДЛЯ ПРЕДОХРАНЕНИЯ ГРУНТОВ ОТ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ СЕЗОННОМ ПРОМЕРЗАНИИ.....	181
5.1. Эксплуатационные свойства композиционных карбамидных поропластов.....	181
5.2. Физико-химические способы повышения прочности карбамидных поропластов.....	186
Выводы	215
6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК УТЕПЛЕННЫХ ГРУНТОВ.....	216
6.1. Оценки теплоизоляционных свойств карбамидных поропластов	218
6.3. Исследование влияния поропластов на окружающую среду	252
6.4. Результаты исследования влияния карбамидных поропластов на экологическое состояние утепляемых грунтов	259
Выводы	266
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	268
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	272
Приложение П1. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	290
Приложение П2. ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ.....	300
Приложение П3. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ПОРОПЛАСТЫ.....	313
ПАСПОРТ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПОРОПЛАСТЫ.....	314

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Индустриальное развитие Сибири не повторяет общероссийских тенденций, имеет свою региональную специфику, более выражена специализация на разведке, добыче углеводородного сырья, электроэнергии, продукции лесной и лесоперерабатывающей промышленности. При этом удельная доля машин непрерывного действия, в числе которых значима и доля роторных траншейных экскаваторов, используемых при производстве землеустроительных работ, возрастает. Открытие и освоение месторождений полезных ископаемых на территории Восточно-Сибирского региона связано с выполнением большого объема строительных работ, которые в основном ведутся в зонах расположения сезонно-мерзлых и вечномерзлых грунтов. Эффективная эксплуатация землеройных машин невозможна без детального изучения физико-механических свойств сезонно-мерзлых однородных грунтов и грунтов с каменистыми включениями с учетом зоны распространения сезонного промерзания и температурных профилей промерзания грунтов. В большой степени это объясняется своеобразием грунтовых условий, сложными пространственно-климатическими условиями, характеризующихся широким распространением мерзлых грунтов и грунтов с каменистыми включениями, недостаточной изученностью характеристик грунта, процесса резания, а также параметров, влияющих на производительность. Северная часть Восточно-Сибирского региона – это высокоширотная часть территории России, характеризующаяся суровыми природно-климатическими условиями, жесткостью климата, обуславливающими повышение затрат на производство продукции и жизнеобеспечение населения. Северные территории играют ключевую роль в национальной экономике, обеспечении безопасности и геополитических интересов России. Здесь сосредоточены основные запасы углеводородного, фосфорно и алюминиево содержащего сырья, алмазов, редких металлов, добывается более 90 % природного газа, около 75 % нефти, включая газовый конденсат, около 100 % алмазов,

90 % меди, никеля, более 60 % золота, значительная часть лесной и рыбной продукции.

Все указанные виды промышленного производства связаны с землеустроительными работами на стадии подготовки производства (строительство нулевого цикла) и на стадии закрытия производства (рекультивация нарушенных земель).

Несмотря на то, что в настоящее время создано довольно большое количество типов машин и разнообразие методов, средств механизации и технологий разработки мерзлых грунтов, лишь отдельные из них удовлетворительно работают в районах холодного климата страны. Существующий парк машин отечественного производства и активно внедряемый парк землеройных машин импортного производства не в полной мере удовлетворяют современным техническим и экономическими требованиями строительного производства. Значительный объем земляных работ выполняется с использованием траншейных экскаваторов.

Эффективное применение и создание современных землеройных машин непрерывного действия невозможно без учета как физико-механических свойств грунта, так и характеристик процесса резания, параметров рабочего органа, а также без предварительной подготовки сезонно-мерзлых грунтов.

Отдельные результаты диссертационного исследования получены при выполнении научно-исследовательских работ по заказам научно-исследовательских институтов: «Разработка и исследование системы управления гидрообъемной трансмиссией землеройной машины» (ВНИИЗеммаш, государственный регистрационный номер 81002344), «Разработать классификацию грунтов» (ВНИИСтройдормаш инвентарный номер темы К19123 в рамках целевой государственной программы № 02.05.46) и при выполнении хоздоговорных работ с предприятиями строительной отрасли Якутска республики Саха и Красноярска.

Проведенный анализ состояния технологий разработки сезонно-мерзлых грунтов и механизации производства работ, основных направлений предохранения грунта от сезонного промерзания позволили сформулировать цель работы.

Цель работы. Повышение эффективности разработки сезонно-мерзлых грунтов роторными траншейными экскаваторами с учетом физико-механических свойств грунтов и их температурных режимов промерзания.

Объект исследований: траншейный экскаватор с роторным рабочим органом.

Предмет исследований: процесс взаимодействия роторного рабочего органа с грунтовым сезонно-мерзлым однородным и неоднородным массивом.

Идея работы – повышение производительности и эффективности разработки мерзлых грунтов путем оптимизации параметров режимов резания в сочетании с предварительной их подготовкой.

Задачи исследования:

1. Оценка физико-механических свойств сезонно-мерзлых грунтов Восточно-Сибирского региона и построение моделей температурных профилей промерзания.

2. Выявление закономерностей формирования составляющей усилия резания от физико-механических свойств и гранулометрического состава мерзлых грунтов, глубины и ширины резания.

3. Оптимизация работы гидромеханического привода рабочего органа с использованием экспериментальных данных о нагрузках, действующих на рабочий орган при разработке однородных мерзлых грунтов и мерзлых грунтов с включениями.

4. Исследование динамических процессов гидромеханического привода рабочего органа роторного экскаватора взаимодействующего с разрабатываемой средой на основе математического моделирования.

5. Обосновать выбор параметров траншейных экскаваторов на основе исследования физико-механических свойств и показателя прочности однородных сезонно-мерзлых грунтов и грунтов с включениями.

6. Повышение эффективности работы траншейных экскаваторов за счет уменьшения прочности грунта путем его предварительного утепления поли-

мерными экологически безопасными поропластами на основе экспериментальных данных взаимодействия рабочего органа с мерзлым грунтом.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов подтверждается:

– достаточным объемом комплексных исследований по изучению характера влияния физико-механических свойств мерзлых грунтов, гранулометрического состава на характеристики процесса резания, выполненных на полигоне ФГУП СибНИИСтройдормаш в течение 14 лет, на карьерах ООО «Мехдорострой» г. Якутска, на строительных площадках ОАО «Домостроительный комбинат» г. Красноярска при строительстве дорог ООО «ДПМК Ачинская» в Богучанского районе и производстве вскрышных работ месторождений полезных ископаемых ОАО «СУЭК-КРАСНОЯРСК»;

– соответствием результатов экспериментов на моделях по изучению характера влияния гранулометрического состава мерзлых грунтов и геометрических размеров реза на коэффициенты вариации силы резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями данным натурного эксперимента;

– результатами экспериментов по изучению профилей промерзания грунтов и их соответствием выполненным расчетам;

– полученными результатами производственных испытаний утепления грунтов поликарбонатным утеплителем до начала производства работ;

– внедрением предложенной технологии утепления грунта в практику ОАО «Домостроительный комбинат» г. Красноярска, предприятий республики Саха с получением экономического эффекта, производстве вскрышных работ месторождений полезных ископаемых ОАО «СУЭК-КРАСНОЯРСК».

Новизна научных положений заключается:

– в разработке номограммы для определения трудности разработки однородных грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями;

– в использовании вероятностных методов оценки характеристик грунтов для установления закономерностей распределения сезонно-мерзлых грунтов по

фракционному составу, температурным профилям промерзания, процентному содержанию фракций включений в грунте и значениям коэффициента прочности грунта;

- в разработке модели прочности мерзлых грунтов в функции числа ударов плотномера ДорНИИ и в функции физико-механических свойств грунта;

- в разработке регрессионных моделей температурных профилей промерзания однородных грунтов и утепленных грунтов и установлении значений коэффициентов влияния сроков нанесения карбамидного поропласта относительно начала промерзания грунта для основных видов грунта исследуемого региона;

- в определении зависимости касательной составляющей силы резания однородных мерзлых грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями от геометрических характеристик рабочего органа, параметров привода и разрабатываемой среды;

- в использовании поликарбонатного пеноутеплителя для интенсификации и экономичности разработки мерзлых грунтов (патент на полезную модель RU № 98975 U1 МПК В60Р 3/00 (2006.01), патент № 1237654 от 23.11.2010 г., заявка на патент № 89012376/ 34527654 от 10.12.2010).

Личный вклад автора состоит в постановке и обосновании цели и задач исследований; в формулировке и разработке всех основных положений, определяющих новизну представленной работы; в разработке и реализации методик экспериментальных исследований, разработке математических моделей и их численной реализации; в проведении натурных и производственных испытаний; во внедрении в производство полученных результатов исследований по разработке мерзлых однородных мерзлых грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- в разработке номограмм для экспресс-анализа сопротивления резанию однородных грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями;

- в использовании вероятностных методов оценки характеристик грунтов для установления закономерностей распределения сезонно-мерзлых грунтов по фракционному составу, температурным профилям промерзания, процентному содержанию фракций в грунте и значениям коэффициента прочности грунта;

- в создании нового поликарбонатного поропласта, обеспечивающего стабильность нанесенного слоя, теплозащитные свойства, обладающего гидрофобной способностью и новыми прочностными и противопожарными свойствами;

- в разработке методики расчета параметров поликарбонатного пеноутеплителя для предотвращения сезонного промерзания грунтов Восточно-Сибирского региона и оценки эффективности применения землеройной техники, с использованием номограммы определения трудности разработки утепленных однородных мерзлых грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями;

- даны рекомендации по расчету температур сезонно-мерзлого и утепленного грунта по глубине залегания для каждого из зимних месяцев с учетом сроков нанесения карбамидного поропласта до начала промерзания грунта;

- в разработке технических условий ТУ 2254-001-02067876-2009 «Поропласты композиционные», паспорта безопасности на поропласт карбамидоформальдегидный РПБ № 58171918-22-29285 от 23 октября 2012 г., а также РТМ (проект) «Мобильный промышленный комплекс по производству в полевых условиях полимерного теплоизоляционного материала и сорбентов» (№ 029-078-2008 Росинформресурс Красноярский Центр научно-технической информации-2008 г.).

Реализация результатов работы. Результаты исследований внедрены в ЗАО «ВНИИСтройдормаш» г. Красноярск, Управлении механизации № 11 ОАО «Домостроительный комбинат» г. Красноярск, ООО «Мехдорстрой» г. Якутск Республика Саха, ООО ДПМК Ачинская, ООО «СУЭК-Красноярск» путем передачи технической документации и методики оценки эффективности при-

менения землеройных машин по номограммам расчета коэффициента трудности разработки сезонно-мерзлых грунтом с гравийно-галечниковыми включениями, методики расчета параметров карбамидного поропласта с учетом температурных профилей для предотвращения грунтов от сезонного промерзания. Разработана и практически применена композиция карбамидного поропласта для предохранения грунтов от сезонного промерзания. На основе результатов выполненной работы разработаны технические условия ТУ 2254-001-02067876-2009 «Поропласты композиционные».

Результаты работы внедрены в учебно-научный процесс Сибирского федерального университета, используются в лекционных курсах, лабораторных и практических занятиях, курсовых и дипломных проектах студентов, диссертационных работах магистрантов и аспирантов.

Технический и экономический эффект от внедрения результатов работы обусловлен снижением коэффициента прочности сезонно-мерзлых грунтов, утепленных композиционным поропластом за счет предохранения от промерзания.

Технический и экономический эффект от внедрения результатов работы обусловлен снижением коэффициента прочности сезонно-мерзлых грунтов, укрытых композиционным поропластом.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной конференции Российской научной школы (сентябрь 2003 г.); «Информационные технологии в образовании» (МГТУ МАМИ сентябрь 2004 г.); Международной конференции Российской научной школы «Системные проблемы надежности, качества, информационные технологии» (Москва, 2004 г.); Транспортные средства Сибири (КГТУ, Красноярск 2000–2008 гг.), Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Механики – XXI веку Братск 2008 г., 2009 г., 2010 г.); на международных конференциях (Mechanics development issues 2009 Ulaanbaatar Mongolia Интерстроймех-2009, Интерстроймех-2009 НАН КР, Бишкек, Интерстроймех-2009 г. Интерстроймех-2011 Могилев), на расширенном заседании научно-технического семинара

кафедры «Механизация путевых, погрузочно-разгрузочных работ» Сибирского государственного университета путей сообщения в мае 2011, ФГБУН Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН в мае 2013, Сибирского государственного аэрокосмического университета имени акад. М.Ф. Решетнева в июне 2013 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 73 научных работы в том числе 2 монографии, 23 работы в изданиях, входящих в перечень ВАК, 4 патента РФ, 10 авторских свидетельств СССР, 4 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, заключения и приложений, изложенных на 314 страницах, содержит 146 рисунков, 61 таблицы, список литературы из 180 источников.

Во введении обоснована актуальность проблемы, подтверждающая необходимость развития научных основ прогнозирования эффективности разработки сезонно-мерзлых грунтов Сибири, сформулирована цель, идея и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна. Подтверждены личный вклад автора, практическая значимость работы и реализация результатов работы в промышленности. Даны сведения об апробации работы и публикациях автора. В заключительной части введения кратко освещено содержание каждого раздела работы.

В первой главе «Состояние вопроса. Цель и задачи исследования» выполнен анализ опыта разработки сезонно-мерзлых грунтов и проблемы подготовки грунтов к разработке в зимний период года.

Разработке теории рабочих процессов разработки сезонно-мерзлых грунтов посвящены работы по классификации грунтов и трудности разработки М.М. Протоद्याконова, Р. Юнга, Б.И. Бокия, И. Терцаги, Е.М. Сергеева, Ю.В. Ветрова, Ю.И. Белякова, Н.Г. Домбровского, Д.П. Волкова, И.А. Недорезова, В.Б. Лещинера, В.Г. Басова и др.

При рассмотрении общих вопросов теории разработки мерзлых грунтов, постановке задач исследований использованы труды А.Н. Зеленина, И.А. Недорезова, В.И. Баловнева, Н.Я. Хархуты, Е.М. Кудрявцева, Л.А. Хмары, А.И. Тархова, Н.Н. Карнаухова, Л.Л. Барона, Г.В. Родионова, А.И. Федулова, А.Р. Маттиса, И.К. Растегаева, Л.К. Соколова, В.Г. Жубрина, Б.В. Осипенко и др.

Исследованию работоспособности систем гидравлического привода строительных машин и вопросам его моделирования посвящены работы Т.М. Башта, В.Е. Вильсона, М.М. Гайцгори, Д.В. Драгомирова, С.П. Ереско, Л.Б. Зарецкого, С.В. Каверзина, Е.С. Кисточкина, Е.Ю. Малиновского, В.В. Мишке, В.Н. Прокофьева, А.И. Тархова и др.

При анализе способов предохранения грунтов от упрочнения при сезонном промерзании использованы труды М.Н. Григорьева, Н.Г. Шплета, Х. Баумана, Л.А. Поповой, Б.А. Елизарова, СибНИИпроектцемента, ВНИИГа им. Б.Е. Веденеева, СибНИИГиМ и Института теплофизики СО РАН.

Рассмотрение состояния вопроса (выполненных исследований) с точки зрения интенсификации процесса разработки сезонно-мерзлых грунтов показало:

1. Целесообразность оценки физико-механических свойств сезонно-мерзлых грунтов и показателей, влияющих на их прочность.
2. Необходимость установления влияния физико-механических свойств мерзлых грунтов и их гранулометрического состава на режимы резания и обоснования критерия оценки прочности грунтов.
3. Учет влияния динамических процессов резания грунта на характеристики гидромеханического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора.
4. Целесообразность выбора типоразмера роторного траншейного экскаватора с учетом свойств однородных и неоднородных мерзлых грунтов.
5. Необходимость создания композиций, обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики поропластов для предварительной подготовки грунта к разработке.

В результате проведенного анализа выполненных работ определены основные направления исследований в области интенсификации процесса разработки сезонно-мерзлых грунтов, сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава «Физико-механические свойства мерзлых грунтов Восточной Сибири» содержит обзор комплекса физико-механических характеристик грунтов, влияющих на эффективность разработки землеройно-транспортными машинами, в ней приведены результаты исследования физико-механических характеристик однородных мерзлых грунтов и мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями.

Выявленные закономерности распределения фракционного состава включений в сезонно-мерзлых грунтах применимы для исследования влияния физико-механических характеристик сезонно-мерзлого грунта на формирование усилий резания. Приведены результаты исследования влияния геометрических параметров инструмента и режимов на усилие резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями.

Для исследования процесса резания мерзлых грунтов проведены стендовые и натурные исследования сил резания мерзлых грунтов от угла и скорости резания, глубины, ширины и прочности грунта, получены коэффициенты вариации силы резания в зависимости от размеров среза, исследовано влияние шага, глубины, скорости резания и геометрических параметров резца.

В третьей главе «Исследование динамических режимов работы гидромеханической системы привода траншейного экскаватора» разработаны полная и упрощенная имитационные модели привода рабочих органов траншейных экскаваторов, проведены исследования динамических процессов при воздействии спектра нагрузок на рабочий орган. В главе проанализированы основные положения и выводы из работ российских и зарубежных ученых, в которых рассмотрены вопросы математического моделирования гидравлических систем. Сложность моделирования потерь в объемно-роторных гидромашинах отмечается практически во всех работах этого направления.

Для исследования динамических режимов гидромеханической трансмиссии привода рабочего органа траншейных экскаваторов разработана имитационная модель с использованием Matlab (Simulink), учитывающая влияние сил резания сезонно-мерзлых однородных грунтов и грунтов с включениями, оценивающая режим автоколебаний давления рабочей жидкости и изменения параметров гидропривода рабочего органа.

Структура предложенной математической модель, язык ее представления стандартизованы, что в совокупности с используемыми формализованными нагрузками, воздействующими на систему привода рабочего органа, применимы не только к траншейным экскаваторам, она может быть адаптирована и к другим типам землеройных машин, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл их проектирования.

Разработанная математическая модель применена для исследования статических и динамических характеристик системы гидропривода с регулируемой фазой рабочих процессов высоко моментного гидромотора, что позволяет снижать пульсации давлений в напорных магистралях гидропривода вращения ротора.

Четвертая глава «Комплексный показатель прочности мерзлых грунтов Восточно-Сибирского региона» содержит результаты теоретических исследований в области формирования показателя прочности сезонно-мерзлых грунтов и соответствия каждого из существующих типоразмеров землеройно-транспортных машин условиям применения на конкретных типах грунтов, методы оценки эффективности применения экскаваторов при разработке мерзлых грунтов.

В пятой главе «Теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию эксплуатационных свойств поропластов для предохранения грунтов от упрочнения при сезонном промерзании» представлены эксплуатационные свойства и результаты исследования повышения прочности карбамидных поропластов при изменении массовой доли наполнителей, кратности

вспенивания, плотности от вида наполнителей, изменения теплопроводности от влажности.

В шестой главе «Результаты экспериментальных исследований характеристик утепленных грунтов» рассмотрены вопросы предохранения от упрочнения грунтового массива, обосновано целесообразность предохранения грунта от промерзания с использованием карбамидных поропластов в условиях Восточно-Сибирского региона. Приведены результаты экспериментальных исследований изменения температуры утепленных различного гранулометрического состава грунтов, исследовано влияние сроков нанесения на толщину слоя поропласта, показано, что введение в карбамидный поропласт экстрактов коры хвойных пород, содержащих таннины и полифенолы, золу-унос, получаемой от сжигания углей и содержащей оксиды железа, алюминия, кальция, магния понижает токсичность и горючесть карбамидного поропласта за счет химического взаимодействия формальдегида с полифенолами одновременно способствуя повышению прочностных характеристик поропластов.

1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕЗОННО-МЕРЗЛЫХ И ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

1.1. Обзор ранее известных классификаций пород, описание процесса разработки грунта

Выполнение земляных работ в районах Сибири и Севера с продолжительностью зимнего периода семь и более месяцев осложняется не только высокой прочностью мерзлых грунтов и их абразивностью, но и наличием большого количества гравийно-галечниковых включений. Это вызывает дополнительные затраты мощности, требует специальных способов ведения работ, совершенствования и создания новых машин и рабочих органов, способных эффективно разрабатывать высокопрочный мерзлый грунт как однородный, так и содержащий гравийно-галечниковые включения.

Более 80 % территории нашей страны занимают сезонномерзлые и вечномерзлые грунты. Большой объем разработки мерзлых грунтов осуществляется траншейными экскаваторами как непосредственно при прокладке траншей, так и рыхлении путем нарезания щелей с последующей выемкой блоков одноковшовыми экскаваторами.

Преимущество использования экскаваторов непрерывного действия при выполнении земляных работ в сравнении с одноковшовыми экскаваторами определяется непрерывностью рабочего процесса, что способствует повышению производительности, уменьшению энергоемкости, частоты и амплитуды колебаний нагрузки в основных элементах металлоконструкций и системах привода при работе на грунтах различных категорий, а также увеличению их долговечности.

Роторные траншейные экскаваторы широко используются для выработки траншей под дренаж, системы связи и теплофикации, водопроводы, нефтепроводы и газопроводы.

Мерзлые грунты как разрабатываемая среда обладают рядом специфических свойств. Их изнашивающая способность и давление, действующее на рабочие поверхности инструмента, в десятки раз выше аналогичных показателей талых грунтов. Особенно сильно сказывается износ режущих кромок рабочих органов на показатели работы траншейных экскаваторов, инструмент которых при разрушении мерзлых грунтов срезает относительно тонкие стружки и проходит большой путь в контакте с грунтом. В результате, как показывает практика, при разработке высокоабразивных видов мерзлых грунтов (супесь, песок) наблюдается быстрое снижение эксплуатационной производительности траншейных экскаваторов.

Появление высокопроизводительных гидравлических машин, повышение номинального давления, применение усовершенствованной контрольно-регулирующей аппаратуры позволили получить качественно новые характеристики исполнительных механизмов, что дало возможность гидрофицировать привод основных исполнительных механизмов экскаваторов непрерывного действия и, как следствие, сгладить пиковые нагрузки на их трансмиссию при разработке мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями. К первым траншейным экскаваторам с полногидравлическим приводом рабочих органов относятся ЭТР-134 и ЭТР-160, с закрытым приводом ротора – ЭТР-172, ЭТР-126. Опыт эксплуатации полногидравлических экскаваторов и экскаваторов с механическим приводом на строительных объектах страны выявил следующие их недостатки:

- значительные колебания давления рабочей жидкости в напорных магистралях гидромеханических систем привода;
- потери мощности до 10–12 % на трение ротора о грунт, защемленный между его боковыми сторонами и стенками траншеи;
- неэффективность процесса выноса разрабатываемого грунта из траншеи, что ведет к его измельчению, многократному перемешиванию и накоплению на дне траншеи;

– снижение в 2–3 раза производительности экскаваторов при разработке мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями по сравнению с разработкой однородных мерзлых грунтов.

Следовательно, можно сделать вывод об актуальности исследования процесса разработки мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями дискофрезерными рабочими органами траншейных экскаваторов и качественной их оценки для нормирования работ при их разработке.

С точки зрения оценки технико-экономической эффективности использования в различных технологических комплексах роторные траншейные экскаваторы можно подразделить на три группы.

Экскаваторы первой группы используют в технологическом комплексе, где их эффективность определяет темп и организацию работы всего комплекса.

Экскаваторы второй группы применяют в комплексе с другими землеройными машинами (машины для подготовительных работ), которые выполняют работы по изготовлению дренажных систем, линий коммуникаций и др.

К третьей группе отнесены экскаваторы, работающие самостоятельно.

Для экскаваторов первой и второй группы вопросы повышения производительности второстепенные, наибольшую значимость имеет уменьшение энергоемкости разработки грунта при условии соответствия производительности экскаватора темпу работы всего комплекса.

Для экскаваторов третьей группы одинаково значимы вопросы повышения производительности и снижения энергоемкости выполнения работы.

Повышение объемов горных и строительных работ, как в нашей стране, так и за рубежом поставило перед специалистами задачу необходимости оценки трудности разработки горных пород и грунтов с целью обеспечения расчета производительности машин и нормирования выполняемых ими работ.

Первая известная классификация Вернера (XVIII в.) была построена лишь на качественной оценке крепости горных пород (рыхлые, мягкие, ломкие, хрупкие, крепкие, весьма крепкие), хотя и в наше время были предложения по

подобного рода классификациям (Р. Юнг – 1923 г., Б.И. Бокий – 1925 г., И. Терцаги – 1946 г., Е.М. Сергеев – 1959 г.).

Начало развитию научно обоснованных классификаций горных пород по трудности их разработки с количественной оценкой категории положил профессор М.М. Протодяконов (1926 г.) [139]. Он предложил все горные породы, включая рыхлые (грунты), разбить на десять категорий крепости. Последнюю оценивать коэффициентом крепости $f = 0,01\sigma_{сж}$, где $\sigma_{сж}$ – временное сопротивление одноосному сжатию (раздавливанию) образца правильной формы.

За истекшие с того времени десятилетия в геологоразведке, горной и нефтедобывающей промышленности нашей страны проделана огромная работа по категорированию горных пород с целью создания научно обоснованных методов расчета нагрузок на исполнительные органы машин, их производительности и нормирования механизированных работ.

За основу оценки категорий горных пород при разработке их классификаций принимали либо технические показатели производственных процессов, либо физико-механические свойства горных пород. Классификации по добываемости, развитие которых в нашей стране началось с 1930 г., строили для определенных условий с использованием результатов наблюдений конкретных способов разрушения горных пород (буримость, взрываемость, зарубаемость, откалываемость и т.п.). Все они имели между собой корреляционную связь.

Классификации по физико-механическим свойствам горных пород построены на основе механической прочности на одноосное сжатие, сопротивлений сколу и удару, угла естественного откоса (или устойчивости обнажений), объемной массы, твердости по методу вдавливания штампа конуса, сопротивления толчению (дроблению), абразивности, твердости и т.д.

Несмотря на большое разнообразие таких классификаций, основной остается шкала крепости горных пород М.М. Протодяконова. Последующие классификации, разработанные в нашей стране и за рубежом на основе использования других физических свойств горных пород, имеют второстепенное значение.

В свою очередь, при создании феноменологической модели грунтового массива, в максимальной степени отражающей его упругие, вязкостные и пластические свойства, требуется учет влияния реальных свойств сезонно-мерзлого грунта на формирование напряженно-деформированного состояния в массиве и на контакте резца с грунтом.

Многообразие различных по форме и назначению открытых и подземных выработок, проводимых в энергетике, строительстве, сельском хозяйстве является причиной того, что всеобъемлющая их классификация пока ещё не создана.

К выработкам большого сечения отнесены все надземные и подземные объекты, предназначенные в дальнейшем для длительной эксплуатации и характеризующиеся большими объемами работ.

Характерной особенностью выработок, отнесенных к «большим» является то, что их сечение колеблется от 10–12 м² до 80–100 м² в зависимости от назначения, горно-геологических и эксплуатационных факторов.

В отличие от выработок большого сечения, разнообразные по назначению выработки, отнесенные к малым (термин впервые введен Д.П. Волковым в 1945 г.) имеют как правило значительно меньшее сечение (не более 6–10 м²).

Это объясняется тем, что подготовительные, горно-разведочные, коммуникационные, трубопроводные и другие виды выработок, отнесенные в предлагаемой группировке к малым, в соответствии с СНиП 1-2, П-45-75, СН 536-81, должны минимизироваться по сечению исходя из требований прохода транспортных средств, вида крепи, а также требований техники безопасности для находящихся в выработках людей.

В значительной степени не возможность и целесообразность объединения указанных выше выработок в подгруппу малых, указывает также то, что как будет подробнее проанализировано ниже, из-за ограниченности сечения, техника и технология их проходки (сооружения) существенно отличны от того, что используется при сооружении выработок большого сечения.

Основной объем проходки (более 90 %) открытых выработок малого сечения составляют траншеи, канавы, шурфы, мелкие котлованы. В подземных

выработках более 90 % составляют штольни, квершлагы и штреки, а остальное – расщелины, восстающие и гезенки.

Ежегодно в стране около 4000–6000 км выработок малого сечения проводится в горнодобывающей сфере и около 500 км в горноразведочной отрасли, 350 км подземных и 8000 км открытых выработок для транспортировки нефти и газа, а также коммуникационного назначения.

Основной объем работ по проведению выработок в грунтах I–III категории по СНиП (VIII–X по М.М. Протоdjяконову) типа канав, траншей и шурфов эффективно выполняется механическим рыхлением одно- и многоковшовыми экскаваторами, бульдозерами, рыхлителями и различными немобильными средствами проколом и продавливанием.

В более прочных грунтах в настоящее время практически 90 % работ выполняются предварительным рыхлением зарядами в результате чего процесс сразу становится технологически значительно более длительным и сложным, а также более дорогостоящим.

Основные технологические традиционные способы работ в котлованах и траншеях проектируются в соответствии с положениями СНиП III.8-76 и правилами техники безопасности (СНиП III-A. II-70).

Ограниченность технологических возможностей существующих машин при разработке грунтов крепостью $f \geq 1,0$ (IV и выше категорий по СНиП и ЕНИР) поставили ещё в 60-е годы на повестку дня вопрос создания машин и оборудования для механического разрушения грунтов повышенной прочности при проведении открытых и подземных строительных работ.

Значительные усилия большой группы советских и зарубежных исследователей, а именно А.Н. Зеленина, Р.Ю.Подерни, Е.З. Позина, Ю.А. Ветрова, О.Д. Алимова, И.Г. Басова, С.А. Брылова и Ю.А. Ветрова, Б.М. Ребрина, Л.Г. Грабчака, Л.Б. Глатмана, А.Г. Лазуткина, И.А. Янцева, Р. Беккера, Н. Окадзаки, Дж. Вонга, Р. Риса и многих других позволили решить ряд проблем и реализовать на их базе достаточно большое количество машин и оборудования для интенсификации разработки таких грунтов.

Наиболее ранними из них можно считать работы О.Д. Алимова [9] и Л.И. Барона [19] по исследованию процессов взаимодействия баровых органов, шарошек и зубков с грунтами. В 50–60 годы А.Н. Зеленин и Л.Б. Глатман начали широкомасштабные исследования по резанию грунта. Эти работы и поныне служат основой для теоретических обобщений. Исследованию машин с точки зрения анализа их эффективности, поиску путей интенсификации на базе использования новых физических эффектов, а также анализу процессов разрушения кроме вышеуказанных посвящены работы В.К. Руднева, Р.М. Эйгелеса, Ю.И. Протасова, В.Д. Баландинского, И.А. Недорезова, а также ряд работ В.Б. Горовица. В результате анализа этих работ можно сказать, что на современном этапе интенсификация рабочего оборудования машин идет по линии совершенствования формы разрушающих элементов и ковшей, оснащению машин самозаглубляющимися элементами, динамическими активизаторами – магнитострикторами, газо- и гидроимпульсными устройствами и т.д.

В ряде работ на базе анализа связей геометрических характеристик рабочего оборудования с понятием об удельном сопротивлении разрушению предложены новые варианты рабочих органов машин для продавливания [84, 159].

Разработка техники и технологии механического рыхления грунта мощными «статическими» бульдозерами-рыхлителями позволила достигнуть себестоимости рыхления грунт в размере 2200–3200 руб./м³ (в ценах 2010 г.), т.е. позволила понизить её по сравнению с буровзрывным способом в 1,34–2,1 раза, а трудоемкость уменьшить в 4–10 раз. Это особенно важно, учитывая, что около 65 % территории страны покрыто до глубины 10–250 м, а в северных широтах и до 500 м вечномерзлыми осадочными связными грунтами [88, 89], а с учетом сезонного промерзания в зимнее время эта цифра достигает 85 % от площади территории страны. В этих условиях технологический процесс разрушения грунта в выработках малого сечения состоит из двух этапов: рыхления и последующей выемки.

Совершенствование конструктивных элементов рабочего оборудования основных грунторазрушающих машин, схем привода, двигателей достаточно широко отражено в ряде работ [95, 99, 112, 127, 150]. Определены рациональные области применения отдельных видов техники при проведении открытых горных работ в выработках малого сечения [3, 12, 72, 73, 96, 141].

Одной из основных тенденций развития конструкций машин статического действия является увеличение мощности базовых тракторов и агрегатов, создание специальных гусеничных тракторов с большими тяговыми усилиями 60–100 тс. Однако тяжелые и крупногабаритные машины не могут использоваться в стесненных условиях выработок типа траншей, канав, шурфов, т.е. в целом в выработках малого сечения.

Другим путем повышения эффективности разрушения является приложением к рабочему органу, кроме тяговых усилий, ударных или вибрационных нагрузок, позволяющих концентрировать на рабочем органе в короткий промежуток времени большую мощность.

Основы теории и схемы конструктивной реализации вибрационных активаторов-рыхлителей разработаны советскими учеными И.И. Быховским, М.А. Гуриным, П.З. Петуховым, Д.Д. Барканом, Н.А. Кильчевским, Я.Г. Пановко, О.А. Савиновым.

Резюмируя изложенное можно сказать, что в технике и технологии для открытых и подземных проходческих работ в ВМС просматривается устойчивая тенденция в совершенствовании процессов невзрывного разрушения путем создания комплектных технологических процессов и оборудования непрерывного или непрерывно-циклического типа, исключающих применение ручных работ, повышающих уровень безопасности ведения работ при увеличении интегральной технологической производительности. Эта тенденция в целом реализуется в виде двух конкретных технических направлений:

- повышение мощности и массы машин и оборудования, обеспечивающее повышение технико-экономических показателей разрушения грунта;

– создания технологических схем, машин и оборудования при сохранении энерговооруженности и массы, но обеспечивающие повышение технико-экономических показателей проходки.

Первое направление следует отнести к так называемым «экстенсивным» направлениям развития, т.к. увеличение мощности, габаритов, массы машин процесс не беспредельный по целому ряду таких факторов как: надежность, применимость к различным условиям эксплуатации, отличающихся значительной стоимостью. Поэтому его реализация может устойчиво идти в сфере проведения, например таких масштабных однородных процессов горного производства как карьерные или вскрышные работы.

В сфере технологического обеспечения проходки выработок малого сечения открытого и подземного типов это направление не имеет, по-видимому, устойчивой перспективы, т.к. данные по механизированным процессам проходки свидетельствуют о некотором снижении производительности разрушения грунта, крепления и транспорта даже при нарастании мощности отдельных агрегатов.

Это позволяет сделать предположение, что второе направление, в силу своей направленности на интенсификацию технологических процессов разрушения грунта применительно к проблеме механизации процессов невзрывного разрушения при проходке выработок малого сечения открытого типа следует признать доминирующим.

При решении поставленной проблемы принято положение о том, что рассмотрение процесса резания сезонно-мерзлого грунта в системной постановке требует считать определяющей подсистему «разрушаемый грунт – рабочее оборудование» или подсистему разрушения грунта (ПРП) [40, 62, 80]. Отсюда следует вывод о том, что совершенствование подсистемы разрушения грунта, т.е. оптимизацию подсистем в широком смысле этого понятия, следует строить в первую очередь на базе моделей, учитывающих свойства объекта разрушения – грунты и средства разрушения – рабочего оборудования. Анализ таких моделей следует проводить на базе обоснованного критерия оптимизации или целевой функции.

1.2. Существующие методические подходы к описанию процессов деформирования и разрушения пород при различных режимах разрушения

Вышеописанные свойства пород различного состояния по разному проявляются при механическом деформировании и разрушении.

В работах, направленных на исследование собственно физических особенностей взаимодействия рабочих органов с породами, при всем их многообразии, можно выделить достаточно характерные направления.

К первому из них относятся, как уже отмечалось, экспериментальные обобщающие работы [1, 19, 62, 65, 78, 90, 93, 97]. На их основе стало формироваться теоретическое направление, во главе угла которого уже лежал метод построения систем определяющих уравнений на базе какого-либо исходного параметра (удельного сопротивления, формы ядра уплотнения и т.п.).

Построенные, как правило, как теоретико-эвристические в своей основе, эти работы всё же ближе к эмпирическим, т.к. ни форма ядра, ни удельное сопротивление, ни эмпирические исходные уравнения поведения образцов пород не могут быть объективными параметрами прочности и поведения разрушаемого материала в реальных условиях.

На базе работ описанного направления в 60–70-е годы прошлого века начало формироваться направление, построенное на использовании положений теоретической механики горных пород (механики разрушения упруго-вязко-пластичных материалов). К числу наиболее законченных из них можно отнести [16, 20, 59, 61, 66, 78, 97].

В работах этого направления на базе общих уравнений теории предельного равновесия разработаны схемы решения для различных рабочих органов. Однако эти решения получались достаточно громоздкими, решались в статической постановке, для условий плоской задачи теории разрушения и, что весьма важно, количественно не всегда оказывались корректны.

С целью учета влияния скорости в ряде работ сделаны попытки ввести интегральные показатели процесса [6, 31, 33, 60, 99, 101, 110, 119, 127, 128, 155,

168, 177]. При этом выявлено, что усилие резания нарастает на 10 % при росте скорости деформирования с 1 м/с на каждый 1 м/с скорости разрушения.

Многочисленными работами по теории резания и копания глинистых грунтов, разрушения керамических и пористых материалов доказано, что основными механизмами деформирования такого рода материалов являются сжатие, разрыв и сдвиг. Протекание этих процессов идет в условиях изменения физических характеристик самого деформируемого материала [5, 20, 27, 64, 67, 95, 103, 121, 145].

При разрушении пород на инструменте возникает периодические пульсации сопротивления резанию, копанию и перемещению частиц породы. Эти пульсации определяются в основном химико-механическими процессами формирования поверхностей разрыва и выпирания (сдвига) под действием прикладываемых усилий. Значительной составляющей являются сопротивления наклонению, вдавливанию материала в ковш, или другую емкость и сопротивления перемещению призм разрыхленной породы.

Таким образом, для анализа грунторазарушающих рабочих органов исходным вопросом является построение корректных физико-математических моделей деформирования пород.

Как уже отмечалось, при решении этой задачи использовались методы теоретической механики грунтов. Применительно к рассматриваемой проблеме наиболее общей является задача о внедрении плоского штампа с произвольным отношением сторон в деформируемое полупространство или четверть – пространство [23, 28, 82, 116].

Развитие методов решения этой фундаментальной задачи основано в основном на базе строгих решений теории предельного равновесия. Интенсивно продолжаются и экспериментальные исследования, связанные с нахождением величин предельных нагрузок, форм поверхностей нагружения и характера деформирования пород. [78, 119, 124].

Теория предельного равновесия обстоятельно разработана для плоской и осесимметричной задач [107, 121]. Имеется ряд приближенных решений для

пространственных задач [112, 117, 132], т.к. для нахождения шести компонентов напряжений тензора недостаточно четырех их необходимых шести уравнений (три уравнения равновесия и условие предельного равновесия).

В теории предельного равновесия принимается допущение, что предельное состояние имеет место в любой точке массива. В действительности же наряду с осадкой из-под краев штампа происходит выпирание породы, и в тоже время локально существует область уплотнения ядра под штампом. Такое положение приводит к необходимости использовать упруго-пластические решения, развитые в [15, 105, 144], и описывающие области пластических деформаций, начиная от момента их образования до полного разрушения с учетом динамики роста нагрузки и уплотненного ядра.

В этой связи, учитывая, что в расчетах процессов разрушения решается не задача об устойчивости сооружения, а задача о минимальных нагрузках, вызывающих прогрессирующий сдвиг штампа следует отметить, что важнейшим аспектом расчета является определение зон пластического течения (сдвига) и зон упругого сжатия. При этом в первую очередь, интересует влияние всех перечисленных факторов на распределение напряжений на контакте штампы или пластины с породой. При внедрении штампов высокой жесткости, что в полной мере относится к реальным элементам рабочих органов машин, в соответствии с гипотезой Фусса-Винклера [132], даже равномерно нагруженным штампом возникают предельные напряжения только на контакте в пределах площади штампа. При упругой постановке контактной задачи контактные напряжения имеют максимальное значение вблизи центральной оси штампа с конечной жесткостью (или упругостью).

Для перехода к аналогичной эпюре контактных напряжений при абсолютно жестком штампе необходимо представить себе характер изменения поля напряжений при замене «гибкого» штампа на жесткий.

Ввиду того, что напряжение в массиве во времени реально никогда не может быть больше предела его прочности, корректировка теоретической эпю-

ры может быть достигнута путем наложения на эпюры упругопластического решения эпюр предельных напряжения, которые приближенно представляют собой треугольники [81, 106] в какой-то мере повторяющие очертания уплотненных ядер под штампами.

В теории предельного равновесия, кроме того, практически выпадает из рассмотрения кинематическая картина разрушения, т.к. её постановка квазистатическая.

При сопоставлении результатов расчет по взаимодействию штампов гибких и жестких пластин при вдавливании и сдвиге с экспериментальными данными многие исследователи [19, 90, 88, 91, 92, 95] обнаруживали качественную и количественную разницу. Многочисленными исследованиями было установлено несколько наиболее существенных причин этих расхождений [7, 15, 62, 94, 121] и, в первую очередь – некорректность условий прочности, входящих в основные системы уравнений теории пластичности связных пород.

Было установлено, что сцепление и угол внутреннего трения зависят не только от максимальных и минимальных напряжений σ_1 и σ_3 в массиве, как это формулируется в ряде известных условий прочности главного напряжения σ_2 .

В связи с этим возникла необходимость в формулировании и анализе применимости иных условий прочности, что и сделано рядом авторов в последние десятилетия.

А.Н. Зеленин [94, 95], исследуя механизмы разрушения образцов из различных материалов в условиях одноосного сжатия, уточнил механизм образования так называемых «уплотненных ядер». Уплотненные ядра, перемещаясь под действием суммы распределенной нагрузки, внедряются в неуплотненную зону и вызывают появление нормальных напряжений σ_2 и σ_3 , резко изменяющих напряженное состояние.

Анализ уравнений А.Н. Зеленина, Г.М. Ломидзе, А.И. Боткина, В.В. Малышева и экспериментальные исследования по выявлению формы ядра позволяют утверждать, что при анализе процесса разрушения материала при $\sigma_2 \neq 0$

необходимо учитывать, что угол внутреннего трения ϕ материала и его сцепление C изменяются по своей численной величине.

Эти работы представляют собой попытку найти компромиссное решение между энергетическими теориями, в частности Мизеса-Боткина и теорией Мора. При этом грунт считается средой однородной и изотропной, а скольжение разрушенного элемента происходит по площадкам с различной ориентацией.

Несколько иначе развиваются методы расчета усилий и энергии разрушения прочных горных пород. Принято считать, что их разрушение носит хрупкий характер. [2, 19, 20, 31, 32, 78, 105, 136, 138, 145].

При этом, опираясь на величину коэффициента крепости, школой проф. Л.И. Барона получено значительное число эмпирических формул для расчетов процессов резания пород многолезцовыми комбайновыми инструментами [19] и др. В большинстве своем они отражают геометрические схемы процессов взаимодействия лезцов с породой. В этой связи большой интерес представляет отличающиеся от этих работ аналитическая энергетическая теория разрушения однородных крепких пород резанием с отколом на базе общей кинематической теории прочности и учета наличия уплотнения ядер. Разработанный Ю.И. Протасовым [138] методико-теоретический подход конструктивен и может быть, видимо, использован при оценке процессов резания и разрушения ударом не только крепких, но и связных и рыхлых прочных пород.

Этот подход может корректироваться на базе многочисленных эмпирических данных, полученных в работах А.Н. Зеленина, М.И. Гальперина, В.П. Баландина, Д.П. Волкова, Н. Г. Домбровского, Л.И. Барона, В.И. Федорова, И.А. Недорезова, И.К. Растегаева, А.И. Федулова, И.А. Янцена и др. для анализа на реальных рабочих органах горнопроходческих машин [19, 70, 79, 100, 128, 140, 160, 167].

Основная трудность классификаций горных пород по физико-механическим свойствам заключается в неоднородности пород по составу, структуре, текстуре, а, следовательно, и в различном их поведении при воздействии режущих, истирающих и взрывчатых материалов. Физические свойства

горных пород, влияющие на процессы горного и бурового дела, еще недостаточно изучены. Этим в значительной степени объясняется то, что большинство существующих классификаций пород по буримости, взрываемости, разрыхляемости основывается на статистических и технических данных, на приближенных шкалах. При этом не имеется определенных и объективных критериев оценки категорий и групп пород по их физическим свойствам.

М.М. Протодяконов указывал [139], что на основе многочисленных классификаций горных пород, созданных для различных стран, отраслей промышленности, диапазонов охватываемых полезных ископаемых и т.п., необходимо разработать унифицированную классификацию.

Она должна быть приемлемой для разных стран, рассчитанной на несколько отраслей промышленности и науки, пригодной как для оценки сопротивляемости пород разрушению, так и для определения их устойчивости в обнажениях, относиться ко всем твердым полезным ископаемым породам.

Классификация должна быть количественной, пригодной для использования в технических расчетах и нормировании.

В первую очередь предлагается создать классификацию по механическим свойствам. В качестве основного показателя категорирования пород рекомендуется коэффициент крепости по М.М. Протодяконову, а дополнительного – абразивность. При оценке устойчивости необходимо учесть еще и показатель пластических свойств.

Методики определения этих показателей с целью широкого их применения должны быть простыми и унифицированными.

Число классов для одного показателя ориентировочно должно быть 5–10. Окончательно оно может быть установлено с учетом вариации свойств пород и трудоемкости экспериментов. Рекомендуется строить классификацию по закону геометрической прогрессии со знаменателем прогрессии 1,5–1,6.

Поскольку между различными показателями механических свойств существуют корреляционные связи, то с определенным приближением можно переходить от одной системы показателей к другой.

Для расчета нагрузок на рабочее оборудование одноковшовых экскаваторов, а также определения их производительности и норм выработки в 1940 г. профессор Н.Г. Домбровский предложил классификацию грунтов и горных пород по удельному сопротивлению копанию K_F , которое включает в себя удельные сопротивления резанию, наполнению ковша и перемещению призмы волочения [80]. В соответствии с этой классификацией грунты и горные породы были разбиты на 6 категорий по трудности выемки экскаваторами.

Ю.В. Ветров в 1958 г. предложил классифицировать грунты на 8 групп по удельной силе резания $m_{св}$ для преодоления сопротивления разрушению грунта передней гранью ножа при угле резания 45° . Этой классификацией охватывался более широкий диапазон грунтов, в том числе и мерзлых [59].

Ю.И. Беляков (1968 г.) предложил классифицировать грунты и породы при положительной и отрицательной температурах, а также взорванные скальные и полускальные грунты таким образом, что трудность разработки грунтов ненарушенной структуры, относящихся к любой из предложенных восьми категорий, равна трудности разработки скального или полускального взорванного грунта определенной крупности $\alpha_{ср}$ и коэффициенту разрыхления K_p [31].

В дальнейшем Н.Г. Домбровский усовершенствовал свою классификацию [80]. В уточненном варианте предусмотрено восемь категорий грунтов. Грунты в массиве ограничиваются 7 категорией, в 6–8 категории введены мерзлые грунты, к 8 категории отнесены также скальные и мерзлые взорванные породы.

Таким образом, общим для этих трех классификаций является то, что их построение основано на использовании удельного сопротивления либо резанию, либо копанию. Различие же их заключается лишь в полноте отражения видов грунтов, которые могут встречаться при работе землеройных и землеройно-транспортных машин.

Общим недостатком этих классификаций является то, что они не учитывают абразивности грунтов и горных пород.

На основе использования удельной силы резания построена классификация грунтов, предложенная А. Н. Зелениным [97, 101]. Удельная сила резания оценивается показателем C (число ударов плотномера ДорНИИ), который, как установил А.Н. Зеленин, хорошо коррелирует с ней. В этой классификации талые мерзлые грунты разбиты на 8 категорий (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Категории грунтов

Показатель	Талые грунты	Мерзлые грунты
Категория грунта	1 2 3 4	5 6 7 8
Число ударов плотномера ДорНИИ	1–4, 5–8, 9–16, 17	35, 71, 141, 281, 560

Принято считать, что классификация А.Н. Зеленина используется для нормирования параметров землеройных машин при их создании, а для определения производительности машин следует пользоваться Едиными нормами и расценками (ЕНиР, сборник 2–1) [83] применительно к рекомендуемым механизмам.

По ЕНиР не мерзлые грунты в зависимости от трудности их разработки механизированным способом разделяются на 6 категорий, мерзлые грунты – на 3 категории.

В классификации (ЕНиР, сборник 2–1, табл. 1) даны краткое описание грунтов, средняя объемная масса в плотном теле и категория грунта для конкретной машины, но недостаточно отражен диапазон грунтов по трудности экскавации, особенно взорванных скальных и мерзлых.

Поскольку для оценки прочности грунтов широкое применение получил показатель числа ударов C ударника ДорНИИ, авторами [123] предложено использовать его для характеристики категорий грунтов в ЕНиР вместо удельной силы копания K_F , кроме того, классификации А.Н. Зеленина и ЕНиР дополнить показателями временных сопротивлений сдвига τ , разрыва σ_p и одноосного сжатия $\sigma_{сж}$, а также модулем упруго-пластических деформаций E_q на основе установленных корреляционных связей между этими показателями и числом C .

Классификация грунтов по трудности разработки и вариации прочности предложенная [127, 130] И.А. Недорезовым комплексно оценивать возможность разработки мерзлых грунтов.

Авторы [32] считают, что «... необходимо разработать единую классификацию грунтов, более отвечающую физическому процессу выемки грунтов экскаваторами (исходя из научной классификации грунтов и горных пород), на основании которой можно было бы создать ЕНиР и ЕНВ по нормированию экскаваторных работ в строительстве и на открытых горных работах». Далее на основе имеющихся научных разработок и способов определения прочностных показателей мерзлых грунтов отмечается, что в условиях строительства и открытой разработки полезных ископаемых к классификации грунтов для единых норм выработки на экскавационные работы нужно предъявлять следующие требования.

1. Должен быть отражен весь известный диапазон изменения свойств грунтов и горных пород, как в целике, так и после различной степени их промерзания и разрыхления (взрывом и механическим способом). Классификация не должна быть перегруженной показателями, трудно определяемыми в производственных условиях.

2. Классификация должна содержать минимум конкретных параметров грунтов, обобщающих степень трудности выемки их ковшем экскаватора, по которым можно было бы достоверно относить грунты и породы к той или иной категории (группе).

3. В классификации следует отразить способы перевода грунтов и пород из одной категории в другую при различной степени их промерзания и разрыхления.

По мнению авторов [31, 119, 127], в основу построения единой классификации грунтов необходимо положить следующие принципы:

1. Для полного охвата грунты и породы, которые разрабатываются экскаваторами, необходимо разделить на восемь категорий.

2. Каждая из категорий (кроме первой), наряду с породами в целике (массиве), должна включать разрыхленные (взорванные) и мерзлые грунты.

3. Определять категорию следует по показателю трудности выемки грунта ковшем экскаватора, т.е. по энергоемкости процесса (параметры $m_{св}$, K_F), которую надо увязывать с физико-механическими свойствами грунтов (для грунтов в целике – плотность, сцепление, для мерзлых, кроме того, влажность и глубина или коэффициент разрыхления).

Ю.А. Ветров [60] останавливается на понятиях «разработка грунтов» и «трудность разработки грунтов» и обосновании показателя трудности разработки грунтов, по которому следует осуществлять их категорирование.

Но поскольку понятие «разработка грунтов» определяется технологическим назначением того или иного процесса производства земляных работ, то оно не будет одинаковым для разных машин.

На основе этого в работе предложено грунты разделить на категории по двум признакам:

- по трудности их разработки машинами данного типа с учетом трудности выполнения всех операций производственного процесса;
- по трудности выполнения только отдельных элементов (или части) производственного процесса, присущих всем типам землеройных или землеройно-транспортных машин или, по крайней мере, их большинству.

Далее Ю.А. Ветров утверждает, что классифицировать грунты по первому принципу нецелесообразно, поскольку при этом необходимо создать столько классификаций, сколько существует типов машин с разными процессами разработки.

Второй принцип более предпочтителен вследствие того, что позволяет иметь универсальную (одну) систему категорий, но понятием «разработка грунтов» будут охвачены только общие элементы системы для машин разных типов.

На основе анализа процесса разработки грунтов различными машинами Ю.А. Ветров предлагает оценивать грунты по трудности одновременно осуществляемых четырех элементов процесса: разрушение грунта с отделением от массива его кусков или слоя; захват грунта, отделившегося от массива; наполнение грунта; перемещение его по поверхности массива. Совокупность этих элементов представляет процесс копания.

Под понятием «трудность разработки грунта» подразумевают [60] кинематическую сложность необходимых рабочих движений машины, пиковую нагрузку, ее вариации, переменность направления и среднее значение, удельные затраты энергии и времени, удельную стоимость разработки.

Наиболее общим из этих критериев являются удельные затраты энергии разработки. С помощью этого показателя можно оценивать машины всех типов и процессы земляных работ всех видов, поскольку он характеризует и сопротивление грунта разработке, и пригодность машин для преодоления этих сопротивлений. При разработке системы категорий грунтов рекомендуется сначала определить диапазон энергоемкости копания машинами для земляных работ, разделить его на интервалы, соответствующие категории грунтов, а затем установить перечень грунтов, относящихся к каждой категории. Поскольку выполнить это в производственных условиях трудно, Ю.А. Ветров предлагает диапазон энергоемкости копания грунтов в первом приближении определить путем анализа результатов исследований копания.

В работе [60] Ю.А. Ветров на основе анализа средней удельной силы копания бульдозерами показывает принципиальную возможность категорирования грунтов по этому критерию, но при этом делает замечание о необходимости проведения анализа для других типов землеройных машин.

Ю.И. Беляков предложил [31] обобщенную классификацию грунтов и горных пород по трудности выемки экскаваторами. Обобщенной она названа потому, что в основе своей содержит принципы построения классификаций ЕНиР, ЕВВ-79, данные классификаций Н.Г. Домбровского, Ю.А. Ветрова, В.В. Ржевского, а также включает некоторые дополнения ним в связи с более широким диапазоном изменения величины K_F грунтов и пород в различных состояниях (при промерзании, разной степени разрыхления, трещиноватости, выветренности).

Распределение грунтов и пород по категориям в этой классификации дается по величине K_F и относительной продолжительности цикла экскаватора $t_{ц}$, при этом за базовую ($t_{ц} = 100 \%$) может быть принята I или II категория.

В сущности же эта классификация является одной из разновидностей классификаций грунтов, основанных на анализе технологических процессов. Сделана попытка учесть все факторы, влияющие на производительность одноковшовых экскаваторов, эмпирическими зависимостями, построенными по статистическим данным работы экскаваторов в различных условиях [27, 30].

Данная классификация более полно по сравнению с остальными учитывает свойства пород и грунтов, влияющие на трудность разработки, в то же время не включает в число факторов, подлежащих учету, изнашивающую способность разрушаемой среды.

Мерзлые грунты как разрабатываемая среда обладают рядом специфических свойств, существенно влияющих на трудность их разработки. Их изнашивающая способность и давления, действующие на изнашиваемые поверхности рабочего инструмента, в десятки раз выше аналогичных показателей талых грунтов. Особенно сильно сказывается износ на показателях работы траншейных экскаваторов, инструмент которых при разрушении мерзлых грунтов срезает относительно тонкие стружки. В результате, как показывает практика, при разработке высокоабразивных видов мерзлых грунтов (например, супесей и песков) заметное снижение производительности машин вследствие износа инструмента может наблюдаться после проходки нескольких метров траншеи, а время, затрачиваемое на замену изношенного инструмента, становится соизмеримым с периодом его стойкости.

В [103] отражены эти особенности процесса разработки мерзлых грунтов и предложено применительно к траншейным экскаваторам классифицировать их на легкие и тяжелые.

Подводя итог анализу существующих классификаций и предложений по категорированию грунтов по трудности разработки, можно сделать выводы.

1. В настоящее время отсутствует обоснованная классификация мерзлых грунтов по трудности разработки резанием.

2. Предложения по составлению классификаций грунтов (в том числе мерзлых) по трудности разработки не учитывают в полной мере всех факторов, влияющих на нее.

3. Трудность разработки мерзлых грунтов траншейными экскаваторами не может однозначно оцениваться их сопротивляемостью резанию или каким-либо показателем прочности, а должна определяться комплексом свойств, влияющих на производительность процесса разрушения.

При оптимизации параметров привода роторных траншейных экскаваторов, проводимой в пределах одной размерной группы, могут быть использованы в качестве критериев удельные приведенные затраты, показатели энергоемкости, величина динамического момента или динамической мощности, показатель материалоемкости, ресурса и производительности машин.

Представленные результаты получены при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рамках целевых комплексных программ развития отрасли строительно-дорожного и коммунального машиностроения, обобщают исследования в ФГУП СибНИИСтройдормаш и Красноярского государственного технического университета [37–58].

1.3. Общие характеристики сезонномерзлых и условно-талых грунтов

Предметом анализа в работе являются в основном осадочные грунты, т.е. грунты земной коры, подвергающиеся в процессе физико-химического выветривания разложению путем каолинизации входящих в нее элементов магматических и метаморфических грунтов.

К осадочным грунтам относят [10, 137, 153, 162]: обломочные, органо-генные и химические.

В свою очередь обломочные грунты можно подразделить на:

- рыхлые (песок, щебень, галька);
- сцементированные (песчаники, конгломераты)
- связные (глины, суглинки, супеси, аргиллиты, алевролиты).

Характерными представителями органогенных грунтов являются известняки, торфы, каменные угли, доломиты, мелы.

К химическим осадочным грунтам в основном относятся соли натрия, кальция, калия.

Мощность осадочных грунтов колеблется по территории России от метров до десятков километров.

Значительная часть сцементированных осадочных грунтов характеризуются наличием различно ориентированных внутренних трещин.

Поведение грунтов при воздействии на них определенных физических воздействий определяется совокупностью их физико-технических параметров, включающих в себя физические и горно-технологические, которые, в свою очередь, включают в себя [20]: твердость, крепость, вязкость, дробильность, разрушаемость, абразивность и т.д. общим числом более 100. Базовыми физико-техническими параметрами принято для всех горных пород (грунтов) принимать параметры [154, 172, 169, 170]: объемный вес γ_o , пористость ε , коэффициент пористости η_ε , напряжение разрыва, сжатия (σ_p , $\sigma_{сж}$), модуля деформируемости E_y , коэффициента Пуассона μ , объемной теплоемкости C_Q , коэффициента теплопроводности λ_t , удельного сопротивления ρ_ε и др., предел раскатывания и текучести w_p и w_t , числа пластичности J_p , консистенции B_k , влагоемкости G_γ и т.п.

По составу и состоянию для анализа осадочных связных грунтов дополнительно используются такие показатели как: w_p , w_t , B_k , G_γ .

При анализе параметров механической прочности существует два подхода: определение свойств грунта в массиве и по образцам. Однако с точки зрения анализа процессов разрушения грунта в массиве второй подход, при всей информативности материалов, собранных многочисленными авторами, не представляется основным. Как отмечается в [35, 36, 147], при дифференцированном подходе к задачам инженерного расчета процессов разрушения грунтов следует для конкретных рабочих органов и технологических схем использовать специализированные, но достаточно обобщенные характеристики разрушаемости грунта в массиве.

Таким показателем или характеристикой считают показатель f .

Наиболее статистически точно f определяется из выражения

$$f = 0,33 \cdot 10^{-7} G_{сж} + 0,58 \cdot 10^{-3} (G_{сж})^{0,5}, \quad (1.1)$$

где $G_{сж}$ – модуль упругости грунта, МПа.

Горные породы (грунты) делятся на 10 групп, при этом вариация f равна 20 единицам во всем диапазоне крепостей пород (грунтов).

Для анализа проявлений пластичности при разрушении применяют такие показатели как хрупкость [31, 33], статическая твердость [172], контактная прочность [63, 69], динамическая вязкость разрушения B_p , определяемая как:

$$B_p = E_y \cdot G_{сж} / E_{деф}. \quad (1.2)$$

Более высокой корреляционной связью с процессами динамического разрушения грунта чем $G_{сж}$ обладает дробимость грунта $D = 1/B_p$.

В ряде случаев используется такой показатель как абразивность разных грунтов.

Промежуточное положение по крепости между монолитными магматическими и рыхлыми осадочными грунтами занимают скальные трещиноватые грунты [31, 70, 107], в которых слоистость и трещиноватость делает их свойства существенно анизотропными. Особенностью вариаций прочностных свойств таких грунтов является расширение зоны разброса f , $G_{сж}$, G_p . Обширный статистический материал по таким грунтам с привязкой к местам нефтяных, газовых и угольных месторождений дан в [4, 21] и ряде других. На этой основе, в практике ведения горных работ всё шире практикуются различные корреляционные связи между и другими параметрами грунтов

Фундаментальные исследования отечественных ученых В.А. Флорина, Н.В. Орнатского, Н.А. Цытовича, В.В. Соколовского, М.Н. Гольдштейна и ряда зарубежных исследователей: К. Терцати, Р. Пека, Р. Фламмана, Ш. Куллона и др. [121, 159, 162, 172], позволили разработать методы определения прочности и деформативности этого класса грунта, которые в дальнейшем называются в соответствии с классификацией грунтов [119, 131, 139, 151] связными и сыпучими грунтами.

В настоящее время для связных грунтов в зависимости от числа пластичности принята классификация [121, 160, 169, 175], консистенции связных не мерзлых грунтов к которым относятся и условно талые грунты.

В талом и в условно талом состоянии связные грунты разрушаются от напряжений сдвига τ , определяемым в зависимости от C_0 и φ известным законом Кулона:

$$\tau = C_{гр} + G_{гр} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (1.3)$$

Методы расчета и табличные значения физико-механических характеристик связных грунтов приведены в [20, 117, 138, 143, 163] и ряде других, а для приближенной оценки можно воспользоваться обобщенными в данной работе показателями – табл. 1.2–1.7.

Таблица 1.2 – Классификация грунтов по числу пластичности

Наименование грунтов		Число пластичности, ω_p	Содержание песчаных частиц	
Виды	Разновидности		По размерам частиц, мм	По весу, %
Глины	Жирные	27	Не нормируется	
	Пылеватые	17–27	Не нормируется	
	Песчанистые	17–27	0,05–2,0	40
Суглинки	Тяжёлые	17–27	0,05–2,0	40
	Тяжёлые пылеватые	12–17	0,05–2,0	40
	Средние	7–12	0,05–2,0	40
	Лёгкие	7–12	0,05–2,0	40
Супеси	Тяжёлые пылеватые	1–7	0,05–2,0	20
	Пылеватые	1–7	0,05–2,0	20–50
	Тяжёлые	1–7	0,05–2,0	50
	Лёгкие	1–7	0,25–2,0	50
Пески	Пылеватые	Менее 1	0,10	75
	Мелкие	Менее 1	0,10	75
	Средние	Менее 1	0,25	50
	Крупные	Менее 1	0,50	50
	Очень крупные	Менее 1	1,0	50

Таблица 1.3 – Показатели консистенции глинистых грунтов

Наименование грунтов	Показатель консистенции B
Супеси твёрдые	$B < 0$
Супеси пластичные	$0 < B < 1,0$
Супеси текучие	$B > 1$
Суглинки твёрдые	$B < 0$
Суглинки полутвёрдые	$0 < B < 0,25$
Суглинки тугопластичные	$0,25 < B < 0,5$
Суглинки мягкопластичные	$0,5 < B < 0,75$
Суглинки текучепластичные	$0,75 < B < 1,0$
Суглинки текучие	$B > 1,0$

Таблица 1.4 – Значения углов внутреннего трения песка

Наименование грунтов	Объёмная масса γ_0 , т/м ³		Угол внутреннего трения, φ°	
	Средней плотности	Плотный	Средней плотности	Плотный
Песок тонкозернистый	1,92	2,0	26	30
Песок мелкозернистый	1,92	2,0	27	30
Песок среднезернистый	1,94	2,0	28	32
Песок разномзернистый	1,96	2,05	29	33
Песок крупнозернистый	1,98	2,05	29	33
Песок с гравием и галькой	2,0	2,10	30	35

Таблица 1.5 – Значения углов внутреннего трения φ и удельного сцепления $C_{гр}$ (МПа) глинистых грунтов в зависимости от их консистенции

Консистенция	Глина		Суглинок		Супесь	
	φ	$C_{гр}$	φ	$C_{гр}$	φ	C
Твёрдая	22	1,0	25	6,0	28	2,0
Полутвёрдая	20	6,0	23	4,0	26	1,5
Тугопластичная	18	4,0	21	2,5	24	1,0
Мягкопластичная	14	2,0	17	1,5	20	0,5
Текучепластичная	8	1,0	13	1,0	18	0,2
Текучая	6	0,5	10	0,5	14	

Таблица 1.6 – Нормативные значения углов внутреннего трения φ , удельного сцепления $C_{гр}$ (МПа) и модуля деформации E_d (МПа) песчаных грунтов

Наименование грунта	Характеристики грунта	Значение характеристик грунта при коэффициенте пористости e равно			
		0,45	0,55	0,65	0,75
Крупные и гравелистые	$C_{гр}$	2	1	—	—
	φ	43	40	38	—
	E_d	50	40	30	—
Средней крупности	$C_{гр}$	3	2	1	—
	φ	40	38	35	—
	E_d	50	40	30	—
Мелкие	$C_{гр}$	6	4	2	—
	φ	38	36	32	28
	E_d	48	38	28	18
Пылеватые	$C_{гр}$	8	6	4	2
	φ	36	34	30	26
	E_d	39	28	18	11

Таблица 1.7 – Нормативные значения углов внутреннего трения φ , удельного сцепления $C_{гр}$ (МПа) глинистых грунтов

Наименование грунта	Нормативные значения показателя текучести	Характеристики грунта	Значение характеристик грунта при коэффициенте пористости ε равном						
			0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
Супеси	$0 < B < 0,25$	$C_{гр}$ φ	21 30	17 29	15 24	13			
	$0,25 < B < 0,5$	$C_{гр}$ φ	19 28	15 26	13 24	11 21	9 18		
Суглинки	$0 < B < 0,25$	$C_{гр}$ φ	47 26	37 25	31 24	25 23	22 22	19 20	
	$0,5 < B < 0,75$	$C_{гр}$ φ			25 19	20 18	16 16	14 14	12 12
Глины	$0 < B < 0,25$	$C_{гр}$ φ			68 20	54 19	47 18	41 16	36 14
	$0,25 < B < 0,5$	$C_{гр}$ φ			57 16	50 17	43 16	37 14	32 11
	$0,5 < B < 0,75$	$C_{гр}$ φ			45 15	41 14	36 12	33 10	29 7

Важной характеристикой для оценки разрабатываемости не мерзлых (талых и условно-талых) связных грунтов является их свойство прилипать к поверхностям рабочих органов. Анализ ряда материалов позволяет рекомендовать для определения липкости в качестве основных работы [10, 143, 145].

Взаимосвязь между приведенными значениями параметров и прочности грунт с крепостью f по шкале М.М. Протоdjяконова приведена в табл. 1.7 по данным П.П. Бородавкина [32].

Как уже отмечалось выше, поверхностные грунты на территории России значительный период года находятся либо в мерзлом состоянии, либо находятся в состоянии постоянного промерзания (вечной мерзлоты). Как показали многолетние исследования российских и зарубежных авторов, в мерзлом состоянии собственно связные грунты настолько трансформируются по своим характеристикам, что вполне правомерно их отнести к полускальным грунтам. На базе анализа ряда работ по распространению на территории России вечномерзлых грунтов и сезоннопромерзающих грунтов, а также нормативных материалов Мингео России по криолитологии, построены карты распространения вечно-

мерзлых и промерзающих осадочных грунт мощностью до 500 м, температуры, характерные для различных времен года различных регионов России [153, 163].

Таблица 1.8 – Значения коэффициента крепости грунтов (F)

Вид грунта	Значение коэффициента крепости F при коэффициенте пористости ε равном			
	0,45	0,55	0,65	0,75
Песок средней крупности	0,8	0,8	0,8	0,8
Песок мелкий	0,6	0,6	0,5	0,5
Супесь	0,5	0,5	0,5	0,4
Суглинок	0,8	0,8	0,6	0,6
Глина	1,0	1,0	0,8	0,8

Анализ поведения мерзлых грунтов впервые выполнен А.Н. Зелениным [96–99]. Это же направление в исследованиях физико-механических свойств мерзлых грунт как объектов разрушения достаточно широко представлено в [13, 14, 129, 142, 145], а также в ряде других работ.

Основными показателями, определяющими свойства мерзлых грунтов при деформировании, являются: суммарная влажность ω , объемная и удельная масса γ_o и γ_y , содержание незамерзшей воды, температура грунта t . Эти показатели, стохастические по природе, имеют достаточно большой разброс значений. Наиболее стабильны значения объемной массы скелета γ_c .

Суммарная влажность грунта, определяемая влажностью льда – цемента, влажностью минерального скелета и содержанием незамёрзшей воды достаточно хорошо коррелируют с объемной массой скелета грунта γ_c и коэффициентом пористости ε .

Таблица 1.9 – Вероятные показатели физических свойств мёрзлых грунтов

Грунты	Весовая влажность ω , %	Объемная масса γ_o , т/м ³	Объемная масса скелета γ_c , т/м ³	Коэффициент пористости ε	Объемная влажность ω_o
Гравийно-галечниковые	7–15	2,35–2,10	2,20–1,85	0,25–0,50	15–30
Пески	15–30	2,10–1,85	1,85–1,40	0,50–0,90	30–50
Супеси	25–50	1,90–1,60	1,50–1,05	0,75–1,55	40–60
Суглинки	30–60	1,85–1,50	1,40–0,95	0,90–1,90	45–65

Мёрзлые грунты подразделяются на твёрдомёрзлые, характеризующиеся хрупким разрушением, и пластичномёрзлые, обладающие вязкими свойствами.

Теплофизические характеристики мёрзлых и полускальных грунтов в массиве характеризуются тремя основными параметрами и коэффициентами:

λ – коэффициент теплопроводности;

$C_{об}$ – объёмной теплоёмкостью;

α_m – коэффициент температуропроводности.

Значения данных коэффициентов приведены в табл. 1.10.

Сопротивляемость мёрзлых грунтов разрушению механическим способом и их физические характеристики существенно зависят от температуры. К прочностным характеристикам в основном относятся сопротивление сдвигу ($C_{гр}$ и ϕ), сопротивление вдавливанию ($G_{вд}$) и сопротивление одноосному и трёхосному сжатию ($G_{сж}$). При этом следует различать мгновенные и длительные значения этих величин. Мгновенные значения определяются при времени действия нагрузки менее 10 секунд. Значения механических характеристик мёрзлых грунтов приведены в табл. 1.10–1.14.

Таблица 1.10 – Вероятные значения физических и теплофизических характеристик мёрзлых грунтов

Вид грунта	Объёмная масса γ_o , т/м ³	Объёмная влажность ω , %	Объёмная теплоёмкость, $C_{гр} \cdot 10^{-3}$, Ккал/м ³ град	Коэффициент температуропроводности $\alpha_t \cdot 10^{-3}$, м ² /°с	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м °С)
Глинистые	1,10–1,30	8–11	0,26–0,34	1,26–1,91	0,39–0,59
	1,16–1,44	9–12	0,31–0,37	1,31–2,03	1,44–0,65
	1,17–1,43	17 - 23	0,35–0,44	1,78–2,14	0,67–0,93
	1,35–1,63	29–36	0,37–0,46	2,25–2,95	1,21–1,56
	1,35–1,64	10-13	0,32–0,38	1,94–2,58	0,82–0,95
	1,63–1,96	24–30	0,42–0,54	3,40–4,30	1,40–1,80
	1,62–1,95	34–42	0,47–0,59	3,50–4,30	1,61–2,04
Песчаные	1,18–1,42	5–12	0,20–0,29	1,48–3,46	0,54–0,89
	1,17–1,44	17–22	0,25–0,32	2,80–3,90	0,85–1,25
	1,34–1,64	18–25	0,28–0,35	3,75–4,56	1,29–1,67
	1,36–1,65	23–29	0,28–0,36	3,85–4,71	1,46–1,88
	1,36–1,74	10–14	0,23–0,26	3,91–4,79	1,29–1,54
	1,53–1,87	11–15	0,25–0,30	4,16–5,02	1,37–1,80
	1,64–1,96	21–27	0,38–0,41	4,81–5,49	1,86–2,48

Таблица 1.11 – Нормативное сопротивление мёрзлых грунтов нормальному давлению

Грунты	Сопротивление $G_{вд}$ кПа при температуре t °C							
	– 0,5	– 1,0	– 1,5	– 2,0	– 2,5	– 3,0	– 3,5	< – 3,5
Крупнообломочные, песчаные крупные и средней крупности	900	1200	1400	1600	1800	1900	2100	2300
Песчаные мелкие и пылеватые	900	900	1100	1300	1400	1600	1700	1800
Супеси, включая пылеватые	500	700	900	1000	1100	1300	1400	1500
Суглинки и глины, включая пылеватые	400	600	700	900	1000	1100	1200	1300
Все вышеуказанные грунты с прослойками льда	300	400	500	600	700	800	800	900

Таблица 1.12 – Механические характеристики мёрзлых грунтов

Грунты	Показатели временной прочности					
	Весовая влажность, ω %	Температура, t °C	Сжатие, $G_{сж}$	Растяжение, G_p	Сцепление, $C_{гр}$	Угол внутреннего трения, ϕ
Песок	17–23	–1,0	20,0	5,0	4–5	35–40
		–3,0	65,0	17,0	16	
		–5,0	90,0	27,5	23–28	
		–10,0	115,0	52,5	30–37	
Супесь	11–20	–1,0	14,0	9,0	10–12	25–30
		–5,0	25,0	12,0	12–15	
		–10,0	60,0	22,5	18–23	
	20–25	–1,0	19,5	16,5	12–14	10–25
		–5,0	37,5	22,5	18–23	
		–10,0	65,0	45,0	30–35	
Суглинок	20–25	–1,0	9,0	6,0		7–20
		–5,0	28,0	20,0	20	
		–10,0	39,0	30,0	20	
Глина	25–35	–1,0	15,0	5,0	5–8	10–15
		–5,0	35,0	13,0	10–12	
		–10,0	50,0	17,0	18,0	
	40–50	–5,0	31,0	25,5	20–26	
		–10,0	50,0	36,0		

Таблица 1.13 – Средние значения углов внешнего трения грунтов по грунту ρ и по металлу δ

Грунт	Весовая влажность, ω %	ρ	δ	Значение температуры, °C			
				–1	–10	–17	–40
Песок	15	25	24	26,5	24,0	22,0	17,0
Супесь	21	26	26,5	27,0	36,5	24,0	22,0
Суглинок	25	28	30	33,0	30,0	29,0	29,0
Глина	33	32	31	32,0	31,5	30,5	31,0

Таблица 1.14 – Мгновенное сопротивление мёрзлых грунтов сдвигу

Грунт	Весовая влажность, ω %	Значение температуры, $^{\circ}\text{C}$	Сопротивление сдвигу, кПа
Песок	15	–2,5	1700
Суглинок лёгкий	36	–0,4	410
		–1,2	740
		–4,2	1100
Суглинок тяжёлый	36	–0,4	570
		–4,2	1600
Глина	35	–0,5	460
		–1,4	650
		–10,0	1800

Экспериментальные исследования зависимостей сопротивления одноосному сжатию $G_{\text{сж}}$ от скорости нагружения [6, 173, 177] позволили установить следующую закономерность: совокупность экспериментальных точек в координатной плоскости «скорость – прочность» описывается семейством линий вида

$$(G_{\text{сж}})^{\text{вр}} = AV_p - BV_p - C_{\text{гр}}, \quad (1.4)$$

где A , B , $C_{\text{гр}}$ – коэффициенты, зависящие только от температуры; V_p – скорость продольных волн, м/с.

Связь между статическим $E_{\text{деф(ст)}}$ и динамическим модулями деформации $E_{\text{деф(д)}}$ может быть приближённо оценена с помощью эмпирического выражения:

$$E_{\text{деф(ст)}} = 0,6 + 0,15 E_{\text{деф(д)}} + 0,01(E_{\text{деф(д)}})^2. \quad (1.5)$$

Для оценки динамического модуля деформации $E_{\text{деф(д)}}$ по величине может быть использовано выражение:

$$E_{\text{деф(д)}} = V_p \cdot 10^{-4}. \quad (1.6)$$

Работами М.М. Протодяконова и А.Н. Зеленина обоснован принцип единства критериев разрушения связных мёрзлых трещиноватых грунтов и на его основе выдвинуто общее уравнение связи параметра разрушения и температуры грунта:

$$\dot{\epsilon} = At^n, \quad (1.7)$$

где n – показатель степени различных процессов механического разрушения, для которых различны лишь коэффициенты A ($n = 0,5$).

Величина коэффициента A определяет удельную сопротивляемость грунтов различным видам разрушения в зависимости от их температуры в диапазоне от -1 до -40 °С.

Приняв условно за 100 величину удельного сопротивления одноосному растяжению G_p получены следующие соотношения сопротивляемости мёрзлых грунтов разрушению (коэффициенты A) вне зависимости от температуры:

Таблица 1.15 – Соотношение сопротивляемости грунтов различным видам разрушения

Виды сопротивляемости	Значение A (в отношении к G_p)
Сдвиг	170
Изгиб	200
Одноосное сжатие	300
Резание резцом шириной 3 см	900
Статическое давление	2100

Из приведённого сопоставления следует, что для разрушения прочных и мёрзлых грунтов необходимо применять способы разрушения с преобладанием напряжений разрыва. Иными словами, чем больше отношение G_m/G_p , тем более энергоёмок метод разрушения по сравнению с разрывом. Данное соотношение характеризует степень несовершенства конкретно рассматриваемого метода разрушения мёрзлых грунтов по сравнению с разрушением методом отрыва.

Глубина сезоннооттаивающего слоя неодинакова в грунтах различного состава и влажности. Наибольшим эффектом протаивания характеризуются скальные щебенистые грунты, наименьшим – глинистые. Температура на поверхности грунта отличается от температуры наружного воздуха, так как летом солнечная энергия повышает температуру поверхности, а зимой снежный покров защищает ее от охлаждения.

Производительность траншейных экскаваторов в значительной степени зависит от прочности, глубины промерзания, гранулометрического состава и других характеристик мерзлых грунтов.

Распределение температуры грунтов по глубине залегания в зимний период для различных зон страны неодинаково. Согласно рекомендациям [94], вся территория страны может быть разделена на семь зон, которые определены с помощью показателя A_{Π} , учитывающего характеристики промерзания грунтов в различных районах страны:

$$A_{\Pi} = \sum_{i=1}^n (H_{\Pi i} \sqrt{t_i}), \quad (1.8)$$

где $H_{\Pi i}$ – глубина промерзания грунта в каждом зимнем месяце; t_i – среднее абсолютное значение температуры за каждый зимний месяц; n – количество месяцев, в течение которых грунт имеет отрицательную температуру.

Распределение температур для указанных выше зон приведено на рис. 1.1. Время существования мерзлых грунтов (в месяцах) по районам страны показано в табл. 1.16. Влажность грунтов (табл. 1.17) в зависимости от гранулометрического состава и района страны изменяется в значительных пределах.

Согласно СНиП II–Д.5–72 вся территория страны разделена на четыре зоны [154]:

I – вечно и многолетнемерзлые грунты;

II, III и IV – сезонномерзлые грунты.

А.А. Малышевым [115] приведено деление I зоны еще на четыре района:

I₁ – высокая влажность сезоннооттаивающего слоя (влажность грунтов выше влажности границы текучести);

I₂ – умеренная влажность [$\omega = (0,8-1,0)\omega_T$];

I₃ – малая влажность сезоннооттаивающего слоя ($\omega < 0,8\omega_T$);

I₄ – островная вечная мерзлота [$\omega = (0,7-1,0)\omega_T$].

Характерные значения влажности грунтов для указанных зон приведены в [41, 126].

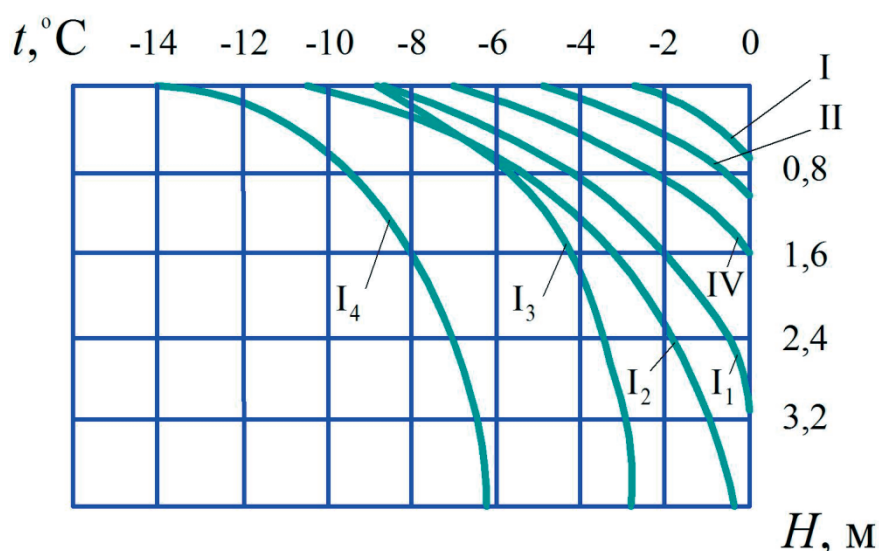


Рисунок 1.1 – Изменение средней температуры грунта в зонах в зимний период года в зависимости от глубины

Таблица 1.16 – Время существования мерзлых грунтов (в месяцах) по районам страны

Индекс района (см. рис. 1.1)	Показатель промерзания грунта $A_{\text{П}}$	Глубина залегания H , м				
		1,0	1,5	2,0	2,5	4,0
II	70–110	10	11	12		
III	50–70	9		10	11	12
IV	30–50	7		8		11
I ₁	20–30	6	7		8	
I ₂	10–20			5–6		
I ₃	5–10			4–5		
I ₄	2–5					

Таблица 1.17 – Распределение влажности в зависимости от зоны залегания грунта

Наименование грунта	Влажность ω , %						
	Зона						
	I				II	III	IV
	Район первой зоны						
	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄			
Глина	45–55	37–45	32–37	25–30	28–35	22–26	18–22
Суглинок	30–45	25–37	20–32	18–25	18–28	13–22	12–18
Супесь	20–30	16–25	13–20	12–18	12–18	8–13	7–12
Песок мелкий	18–25	18–25	18–25	8–15	6–9	5–8	4–7
Песок крупный	12–20	12–20	12–20	6–10	4–8	3–6	2–5

Прочность мерзлых грунтов по рекомендациям [97] оценивают числом ударов S динамического плотномера ДорНИИ (табл. 1.18).

Таблица 1.18 – Шкала сопротивляемости однородных мерзлых грунтов по числу ударов C

Вид грунта	Влаж ность ω , %	Температура, °C						
		–1	–3	–5	–10	–15	–25	–40
Супесь	12,0	40–50	55–65	90–95	140–155	170–185	230–240	310–330
	15,0	65–75	105–120	150–170	200–230	270–290	330–360	420–435
	19,0	75–85	140–160	200–230	270–300	340–360	450–480	500–530
	28,0	65–75	120–130	165–190	215–230	280–300	400–420	460–480
Суглинок	10,0	28–33	34–37	36–40	40–43	43–50	50–56	70–80
	20,0	60–70	110–120	150–185	215–235	240–260	375–385	450–470
	25,0	70–80	150–160	195–220	250–280	320–340	425–460	480–520
	30,0	65–75	100–110	140–150	210–230	250–270	350–370	420–440
	59,0	40–45	50–60	75–80	110–125	165–175	220–240	285–315
Глина	17,0	36–40	70–80	100–110	160–165	180–200	250–270	290–315
	24,0	55–60	90–100	125–135	190–210	200–235	270–285	340–380
	31,0	65–70	12–130	140–160	230–250	290–310	290–320	380–420
	49,0	40–45	65–70	90–100	135–145	180–190	235–245	280–310
Песок	6,0	12–14	15–18	20–22	25–27	28–30	32–35	40–45
	8,0	25–30	35–38	40–45	50–53	55–58	60–65	68–70
	11,0	50–55	65–70	85–90	95–100	110–115	120–130	140–150
	18,0	150–160	200–210	220–230	240–250	260–280	285–300	325–340

Число C – комплексный показатель, который определяет физическое состояние грунта и прямо пропорционален усилиям резания. Оно входит в расчетные зависимости для определения усилий резания.

Число ударов плотномера ДорНИИ является обобщающим показателем прочности мерзлых грунтов и показателем не только возможности их разработки, но и оценивающим эффективность применения землеройных машин. Но для комплексной оценки мерзлых грунтов как однородных по своему составу, так и содержащих включения, влажность грунта, его гранулометрический состав, температурный профиль промерзания и температура имеют определяющее значение.

Задачи исследования:

1. Оценка физико-механических свойств сезонно-мерзлых грунтов Восточно-Сибирского региона и построение моделей температурных профилей промерзания.
2. Выявление закономерностей формирования составляющей усилия резания от физико-механических свойств и гранулометрического состава мерзлых грунтов, глубины и ширины резания.
3. Оптимизация работы гидромеханического привода рабочего органа с использованием экспериментальных данных о нагрузках, действующих на рабочий орган при разработке однородных мерзлых грунтов и мерзлых грунтов с включениями.
4. Исследование динамических процессов гидромеханического привода рабочего органа роторного экскаватора взаимодействующего с разрабатываемой средой на основе математического моделирования.
5. Обосновать параметры траншейных экскаваторов на основе исследования физико-механических свойств и показателя прочности однородных сезонно-мерзлых грунтов и грунтов с включениями.
6. Повышение эффективности работы траншейных экскаваторов за счет уменьшения прочности грунта путем его предварительного утепления полимерными экологически безопасными поропластами на основе разработанной теории взаимодействия рабочих органов с мерзлым грунтом.

2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

2.1. Вероятностные физико-механические характеристики мерзлых грунтов

Исследуемый регион включает природные зоны Красноярского края, БАМа, Республики Саха, Республики Бурятия и Иркутской области. В табл. 2.1–2.2 показаны наиболее вероятные распределения значений месячных температур разрабатываемых мерзлых грунтов для отмеченных областей региона с учетом распределений перспективных объемов работ и среднемесячных температур. Анализ приведенных распределений показывает [42], что наиболее неблагоприятные условия по температурным режимам промерзания имеют место при разработке грунтов в зоне БАМа и на севере Красноярского края. Факторами, определяющими неблагоприятность условий разработки сезонно-мерзлых грунтов указанных территориальных образований является и процентное содержание гравийно-галечниковых включений, содержащих крупнообломочные фрагменты и значительный период воздействия отрицательных температур и абразивность промерзших слоев грунта.

Влажность грунта является одной из его естественных характеристик, активное воздействие на которую весьма затруднительно, также проблемным является и оперативное определение влажности в условиях строительной площадки на стадии строительства нулевого цикла, так требует не только лабораторного оборудования, но и затрат времени на выполнение исследований. Сезонно-мерзлые грунты, как правило, имеют естественную влажность, оттаивающие вечно-мерзлые и многолетние мерзлые грунты имеют повышенную влажность, причиной которой является отсутствие фильтрационных свойств нижних слоев, остающихся в мерзлом состоянии.

Показатель доверительной вероятности разработки сезонно-мерзлых весовой влажностью до 15 % имеет значение 0,32, грунтов влажностью от 15

до 25 % имеет значение 0,44, грунтов влажностью от 25 до 40 % имеет значение 0,23.

Показатели весовой влажности мерзлых глин, суглинков, супеси с доверительной вероятностью 0,74 приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Распределение весовой влажности в сезонно-мерзлой глине и суглинке

Тип грунта	Глина тяжелая		Глина		Суглинок мелкий	Суглинок средний	Суглинок тяжелый
	min	max	min	max	13	16	20
Весовая влажность, %	25	45	20	26			

Таблица 2.2 – Распределение весовой влажности в сезонно-мерзлой супеси

Тип грунта	Супесь тяже- лая крупная		Супесь легкая крупная		Супесь тяжелая мелкая		Супесь лег- кая мелкая
	min	max	min	max	min	max	9
Весовая влажность, %	16	20	13	16	11	15	

Весовые влажности песка крупного и песка мелкого с доверительной вероятностью 0,74 имеют значения 12 % и 8 %.

Показатель весовой влажности мерзлых грунтов зависит и от местоположения земляных работ относительно уровня моря.

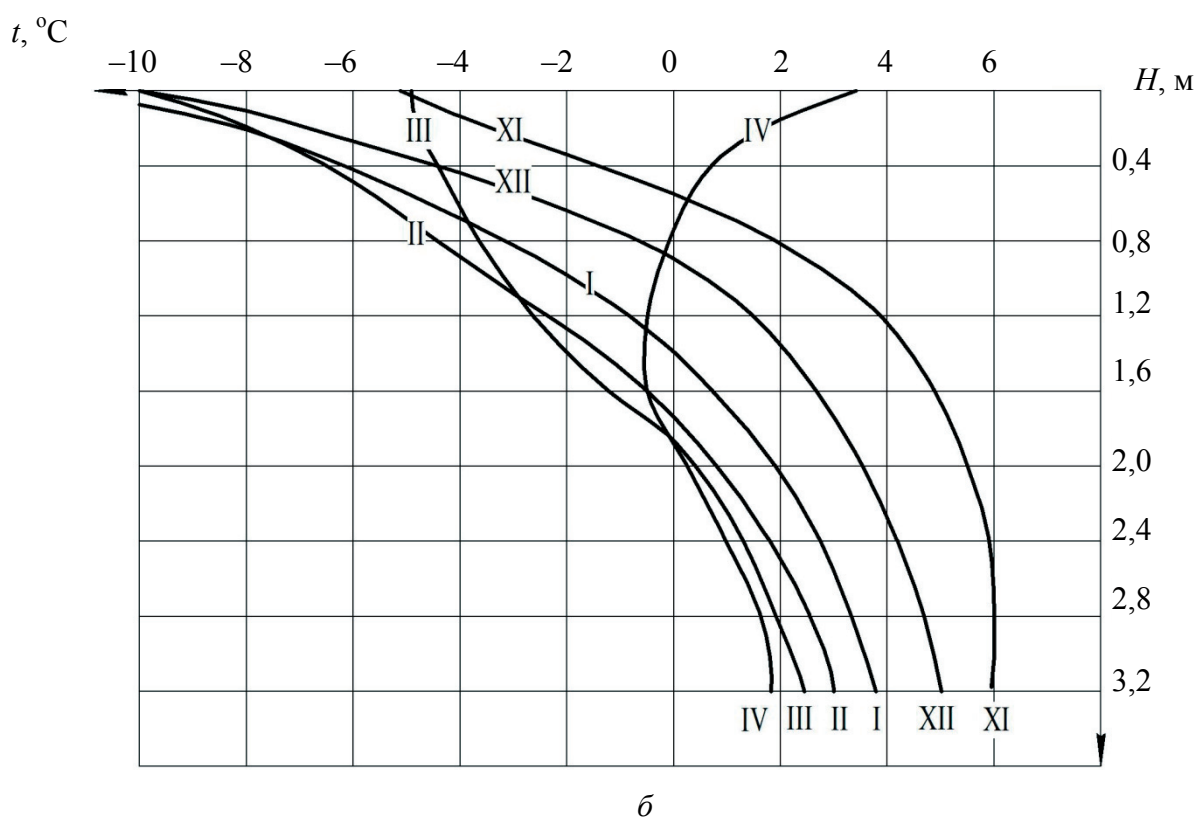
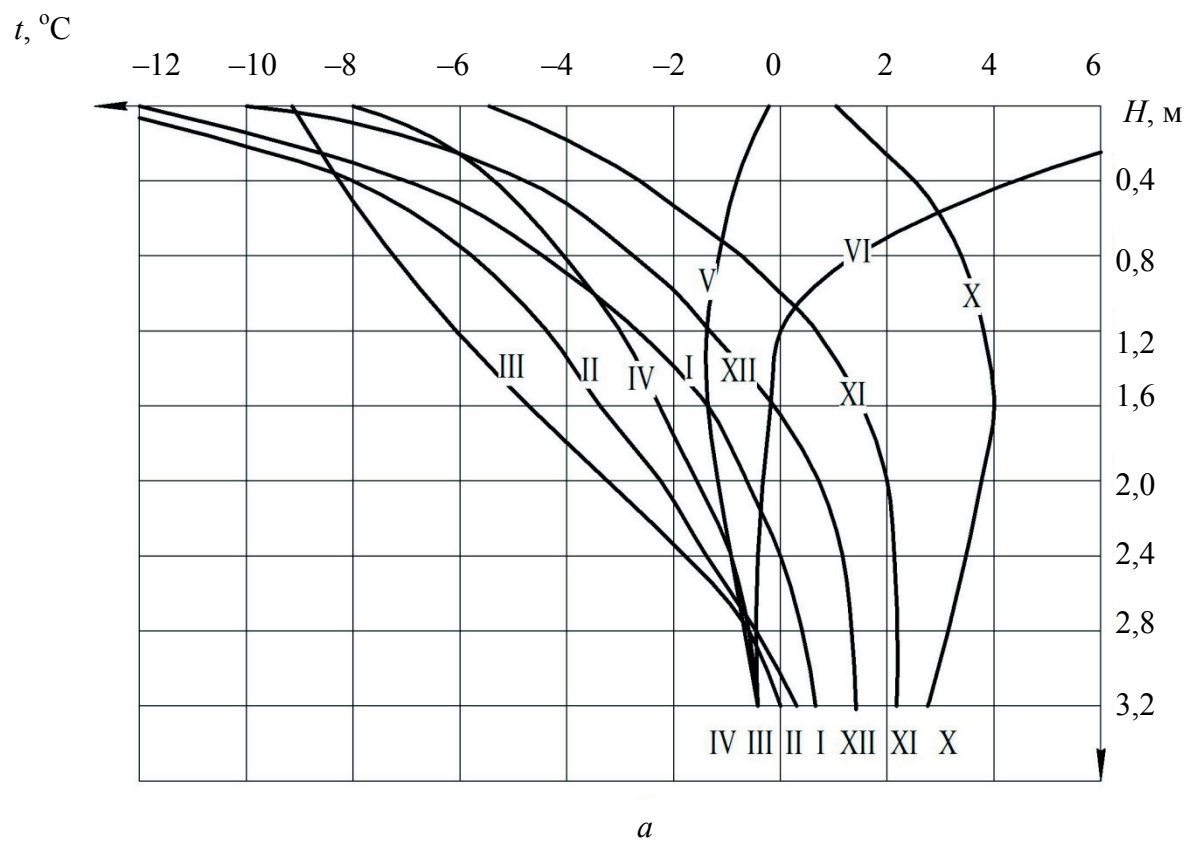


Рисунок 2.1 – Месячные распределения температуры в грунтах Красноярского края по глубине залегания: a – северная зона; b – южная зона

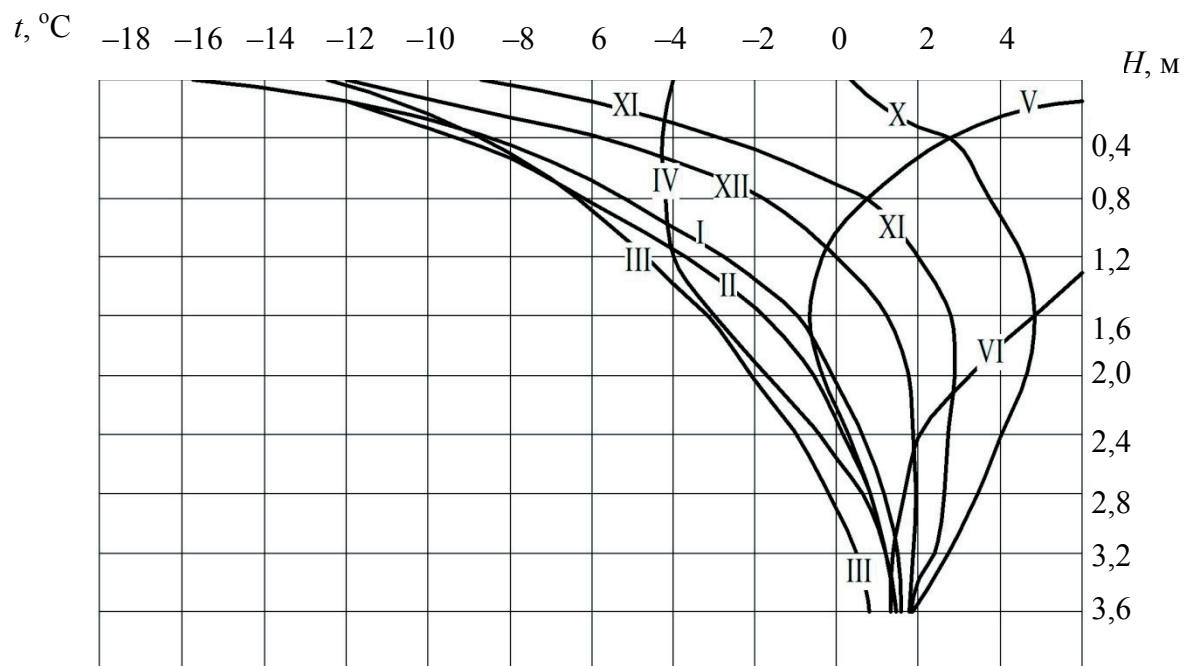


Рисунок 2.2 – Месячные распределения температуры в грунтах Республики Саха по глубине залегания

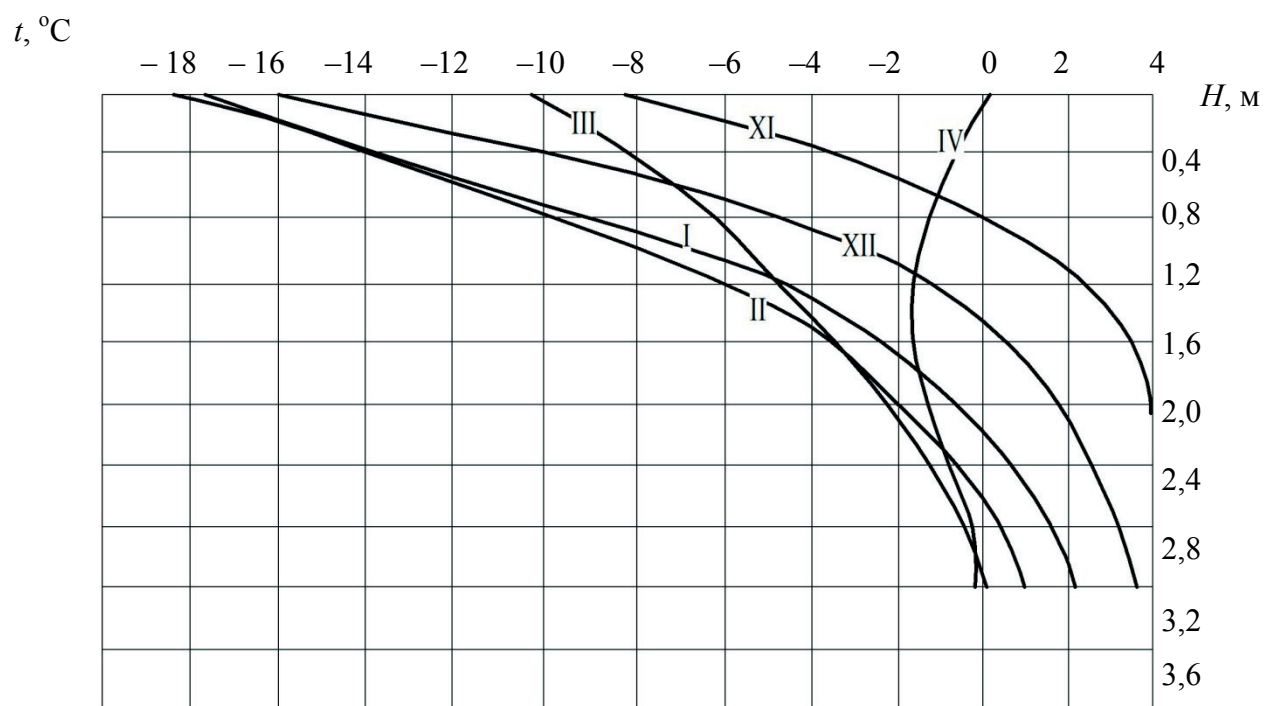


Рисунок 2.3 – Месячные распределения температуры в грунтах Республики Бурятия по глубине залегания

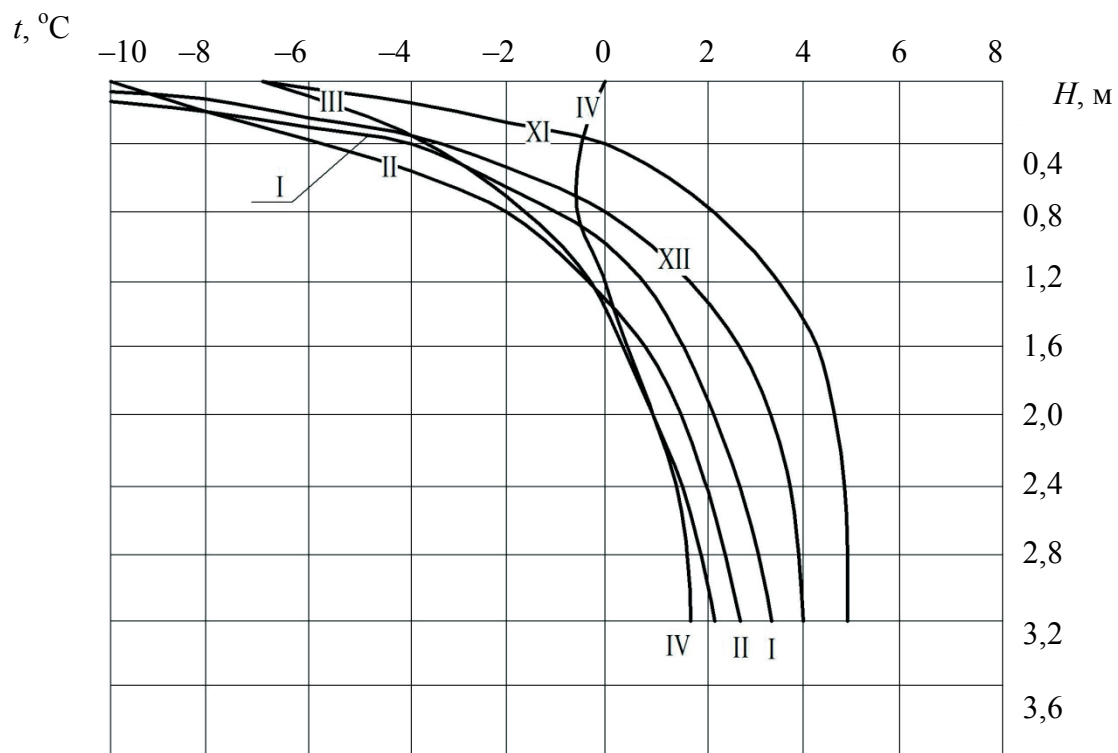


Рисунок 2.4 – Месячные распределения температуры в грунтах Иркутской области по глубине залегания

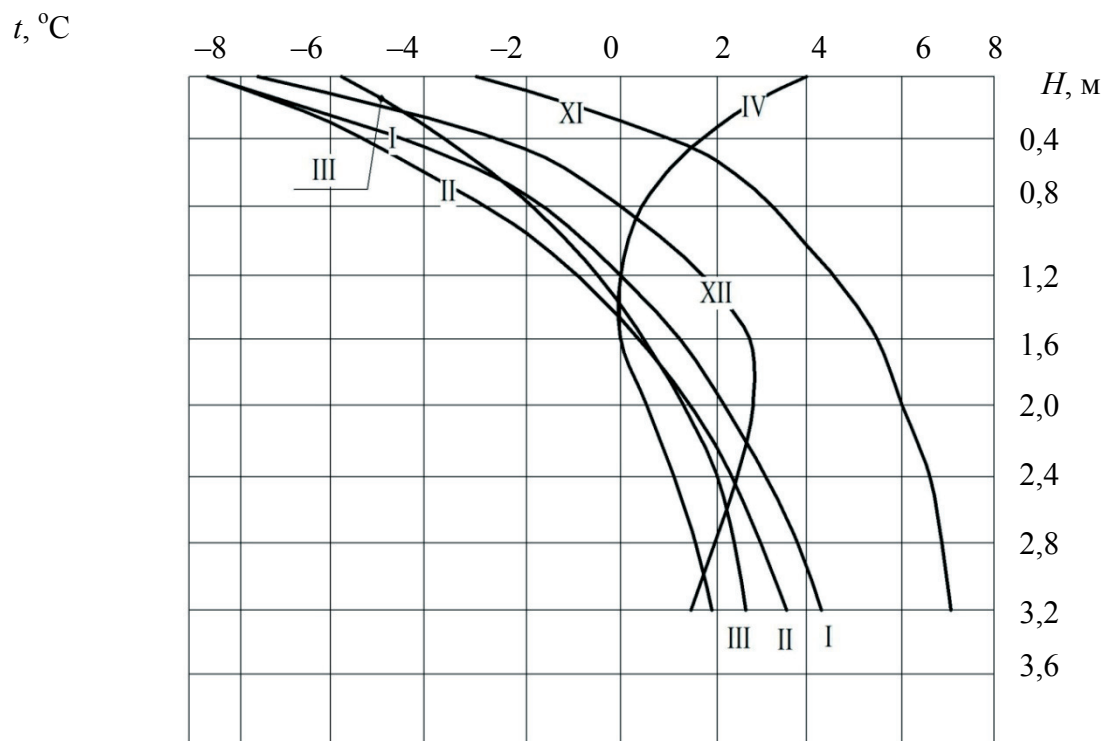


Рисунок 2.5 – Распределение температур по глубине залегания грунта на территории БАМа

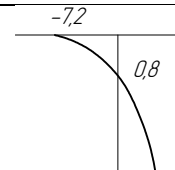
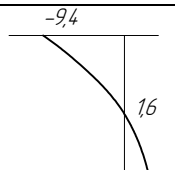
Таким образом, при формировании нагрузок на рабочем инструменте машины для разработки мерзлых грунтов с каменистыми включениями можно воспользоваться известными выражениями А.И. Зеленина [97, 98], дополненными произведением коэффициентов $k_{\text{вкл}}$ и $\xi_{\text{вкл}}$.

Распределение градиента отрицательных температур по глубине залегания и времени существования описывается уравнением второго порядка (табл. 2.3–2.6). Для расчета силы резания мерзлого грунта с включениями достаточно учесть коэффициент пропорциональности силы и процентного содержания гравийно-галечниковых включений.

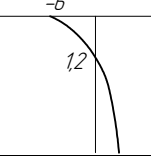
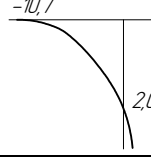
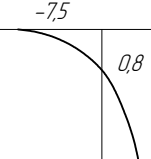
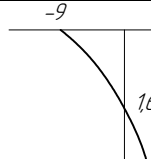
Таблица 2.3 – Распределение отрицательных температур и прочности мерзлых грунтов Восточно-Сибирского региона

Исследуемая зона	Температурный режим	Распределение отрицательных температур t по глубине H	Распределение прочности грунта C по глубине H
Красноярский край (северная зона)	T_2	$t = -5,9 + 8,7 H - 2,8 H^2$	$C = 228 - 201 H$
	T_3	$t = -10,8 + 10,5 H - 2,6 H^2$	$C = 276 - 119 H$
	T_4	$t = -9,7 + 7,6 H - 1,6 H^2$	$C = 232 - 48 H$
Республика Саха	T_4	$t = -12,5 + 10,1 H - 2,1 H^2$	$C = 277 - 57 H$
Республика Бурятия	T_2	$t = -8,1 + 16,3 H - 7,7 H^2$	$C = 236 - 256 H$
Иркутская область	T_2	$t = -8,7 + 18,1 H - 8,5 H^2$	$C = 268 - 322 H$
	T_3	$t = -5,2 + 5,7 H - 1,4 H^2$	$C = 208 - 134 H$
БАМ	T_2	$t = -6,3 + 8,9 H - 3,2 H^2$	$C = 235 - 198 H$
	T_3	$t = -12,9 + 10,7 H - 2,2 H^2$	$C = 377 - 105 H$
	T_4	$t = -1,5 + 11,3 H - 1,8 H^2$	$C = 285 - 65 H$

Таблица 2.4 – Распределение температур по глубине разрабатываемых грунтов Красноярского края и Республики Саха

Регион	Расчетные распределения температур грунтов по глубинам и объемам работ				
	T_1	T_2		T_3	
	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %
Красноярский край	49,67		13,77		22,11

Продолжение таблицы 2.4

Регион	Расчетные распределения температур грунтов по глубинам и объемов работ				
	T_1	T_2		T_3	
	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %
Северная зона	11,56		2,89		5,78
Южная зона	38,11		10,88		16,33
Республика Саха					

Окончание таблицы 2.4

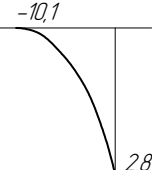
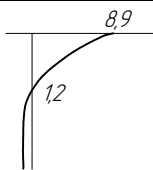
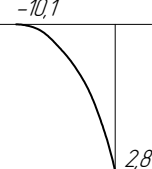
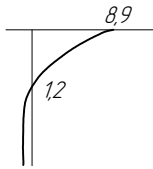
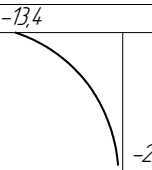
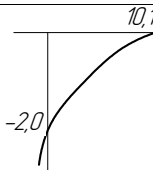
Регион	Расчетные распределения температур грунтов по глубинам и объемов работ			
	T_4		T_5	
	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %
Красноярский край		11,56		2,89
Северная зона		11,56		2,89
Южная зона				
Республика Саха		50,00		50,00

Таблица 2.5 – Распределение температур по глубине разрабатываемых грунтов Бурятии

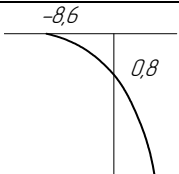
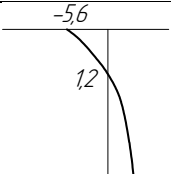
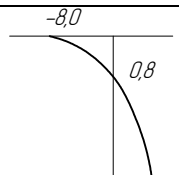
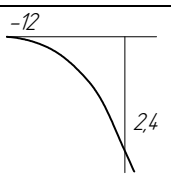
Расчетные распределения температур грунтов по глубинам и объемам работ				
T_1	T_2		T_3	
Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °C	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °C	Относительные значения объемов работ, %
50,0		25,0		25,0

Таблица 2.6 – Распределение температур по глубине разрабатываемых грунтов Иркутской области

Расчетные распределения температур грунтов по глубинам и объемам работ				
T_1	T_2		T_3	
Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °C	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °C	Относительные значения объемов работ, %
50,0		8,33		41,67

Для оценки грунтовых условий по температурным режимам грунтов использованы расчетные распределения, объединяющие периоды года по признаку близости глубины промерзания [41, 57]. Подобное обобщение позволило выделить пять расчетных случаев (табл. 2.7). Объединение нескольких месячных распределений температур в один расчетный случай требует учета объемов работ, планируемых к выполнению за каждый из этих месяцев, а не просто усреднения, приводящего порою к значительным неточностям.

Таблица 2.7 – Характеристика расчетных распределений температур грунтов

Расчетное распределение	Характеристика распределения
T_1	Мерзлый грунт отсутствует по всей глубине
T_2	Глубина промерзания до 1,2 м
T_3	Глубина промерзания от 1,2 до 2,5 м
T_4	Глубина промерзания свыше 2,5 м
T_5	Мерзлый грунт находится под слоем талого

Как показывает практика строительства, земляные работы в течение года могут выполняться весьма неравномерно. Если ввести коэффициент C_m , учитывающий сезонную неравномерность, то относительные значения перспективных объемов земляных работ W_m в грунтах с расчетным распределением температур T_i , легко найти по формуле

$$W_{Ti} = \sum_{m=1}^n W_m C_m, \quad (2.1)$$

где W_m – среднемесячное значение относительных объемов работ; n – количество месяцев, для которых распределение месячных температур по глубинам укладывается в T_i .

В свою очередь, температура грунта на j -й глубине i -го расчетного случая

$$t_{ij} = \sum_{m=1}^m C_m t_{mj}, \quad (2.2)$$

где t_{mj} – температура грунта на j -й глубине m -го месячного распределения, укладывающегося в i -й расчетный случай.

По данным ряда организаций [67, 83, 84, 126, 140], месячные объемы работ в зимний период составляют 60–80 % от таких работ в течение времени года с положительными температурами наружного воздуха, что может служить для ориентировочной оценки коэффициента C_m .

Обработка вариационных рядов средних значений влажности на начало замерзания и оттаивания позволила получить функции плотностей распределения вероятностей значений влажностей грунта для отдельных пунктов региона, а затем обобщить эти результаты на уровне областей по формуле

$$p(\omega) = \sum_{Z=1}^Z p(W_i) p(W_i/\omega), \quad (2.3)$$

где $p(\omega)$ – вероятность разработки грунтов в рассматриваемом районе с влажностью ω , %; $p(W_i)$ – вероятность разработки грунтов в i -м пункте района; $p(W_i/\omega)$ – вероятность того, что разрабатываемый в i -м пункте грунт имеет влажность ω ; Z – количество пунктов.

Как ранее отмечалось, значения влажности грунта хорошо коррелируют с распределением температуры по глубине разрабатываемого грунта.

Изучение грунтовых условий эксплуатации машин имеет первостепенное значение при проектировании перспективной землеройной техники. Несмотря на то что в настоящее время создано довольно большое количество машин для разработки мерзлых грунтов, лишь отдельные из них способны удовлетворительно работать в районах Сибири и Севера России. В большой степени это объясняется своеобразием грунтовых условий, характеризующихся обширными заболоченными участками, широким распространением грунтов вечномерзлых и с каменистыми включениями. Глубина залегания вечномерзлых грунтов колеблется от десятков до сотен метров.

По исследуемому региону зона распространения сплошной вечной мерзлоты и зона с незначительными включениями талых участков составляют 52,6 % территории.

В зонах распространения вечномерзлых грунтов планируется выполнить 13,7–14,8 % региональных объемов земляных работ на период до 2010 г. В зоне Севера в соответствии с районированием С. В. Славина [154] – 27,5–30,2 %, в макроклиматическом районе «ХЛ» – 28,2–31,0 %.

В летний период года территория региона характеризуется высокой степенью заболоченности. В наибольшей степени сказанное относится к северным районам Западной Сибири, в которой заболоченность составляет 65–70 % площади территории. Меньшие значения характерны для районов Европейского Севера – 30–35 % и Восточной Сибири – 20–27 %. В целом по исследуемому региону болотами занято 26–32 % территории.

Исследования позволили получить количественные характеристики грунтовых условий эксплуатации машин для всех административных единиц региона. Для отдельных областей, в которых выражена неравномерность распределения объемов перспективных работ в сочетании с широким диапазоном изменения природно-климатических условий их проведения, исследования грунтовых условий проводили отдельно по укрупненным районам с последующим обобщением на область.

Для надежного установления вероятных физико-механических характеристик разрабатываемых грунтов потребовалась обработка паспортов грунтов

из сотен различных пунктов территории региона. В результате было произведено разделение гранулометрического состава грунта на 10 фракций (табл. 2.8). В основу деления положены следующие положения. Разделение состава грунта на 10 фракций позволяет:

- 1) определить тип грунта в соответствии с существующими классификациями грунтов;
- 2) четко разделить группы каменистых включений (размер частиц более 2 мм), которые по-разному влияют на работоспособность и надежность землеройной техники;
- 3) определить показатели абразивных свойств грунтов, которые зависят прежде всего от процентного содержания глинистых и песчаных фракций.

Таблица 2.8 – Гранулометрический состав грунтов

Номер группы фракций	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Предельные размеры частиц, групп фракций, мм	< 0,005	0,005–0,1	0,1–0,5	0,5–2	2–10	10–30	30–70	70–100	100–200	> 200

Обобщение справочных данных за двадцатилетний период, проведение дополнительных исследований распределения влажности в грунтах Сибири с последующей обработкой вариационных рядов распределения усредненных значений влажности наиболее перспективных с точки зрения вероятности их разработки приведено в табл. 2.9.

Таблица 2.9 – Параметры функции плотности распределения вероятностей разработки мерзлых грунтов Восточной Сибири с различными значениями влажности

Наименование территории	Глубина залегания грунта, м								
	<1,5			1,5–3,0			>3,0		
	Влажность грунта, %								
	≤15			15–25			≥ 25		
	Вероятность, параметры функции плотностей распределения								
	<i>p</i>	<i>m</i>	σ	<i>p</i>	<i>m</i>	σ	<i>p</i>	<i>m</i>	σ
Красноярский край	0,253	20,20	7,76	0,475	16,73	7,15	0,271	8,65	5,45
Иркутская область	0,298	18,94	7,43	0,495	19,30	7,25	0,207	19,33	8,26
Республика Саха	0,391	17,23	8,06	0,442	18,62	7,22	0,167	21,79	8,32
Республика Бурятия	0,918	8,74	4,50	0,082	8,55	4,72	0,126	4,76	7,89

На рис. 2.6 показаны вероятности распределения фракционного состава включений, полученные для северной и южной зоны Красноярского края, на рис. 2.7–2.10 аналогичная информация представлена по грунтам республики Саха, Бурятии, Иркутской области и территории БАМа [42, 44, 45].

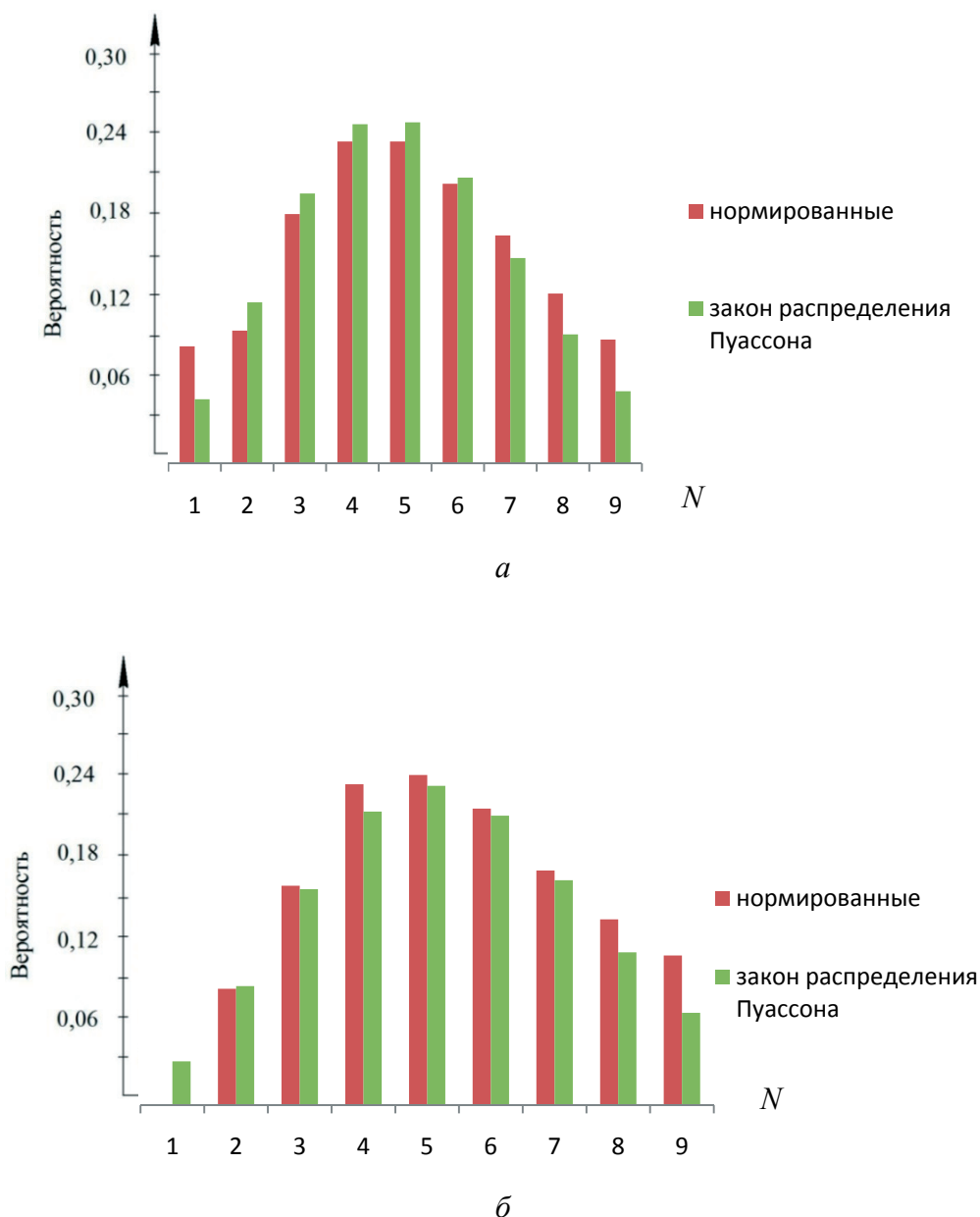


Рисунок 2.6 – Вероятность распределения фракционного состава в грунтах и частота встречаемости фракций в грунтах Красноярского края: *а* – северная зона; *б* – южная зона

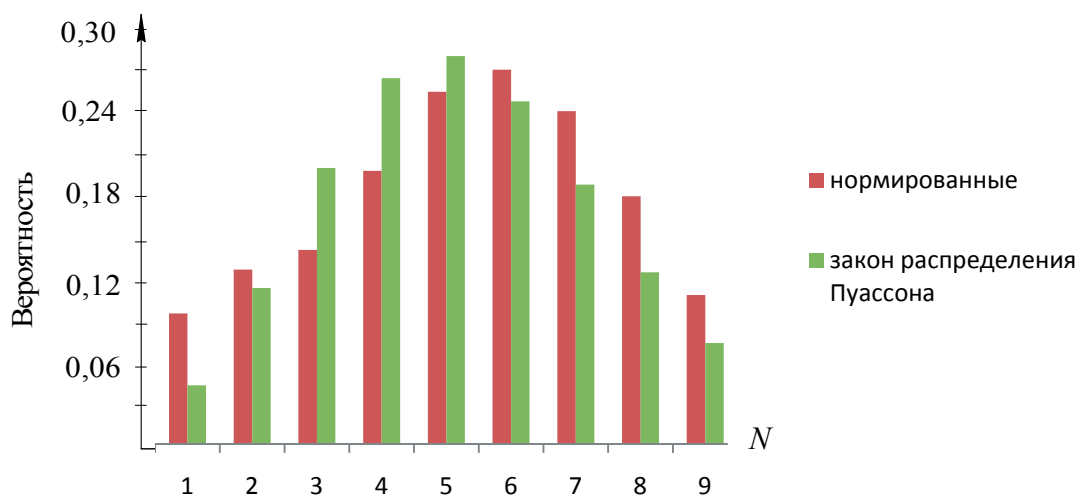


Рисунок 2.7 – Вероятность распределения фракционного состава включений в грунтах Республики Саха

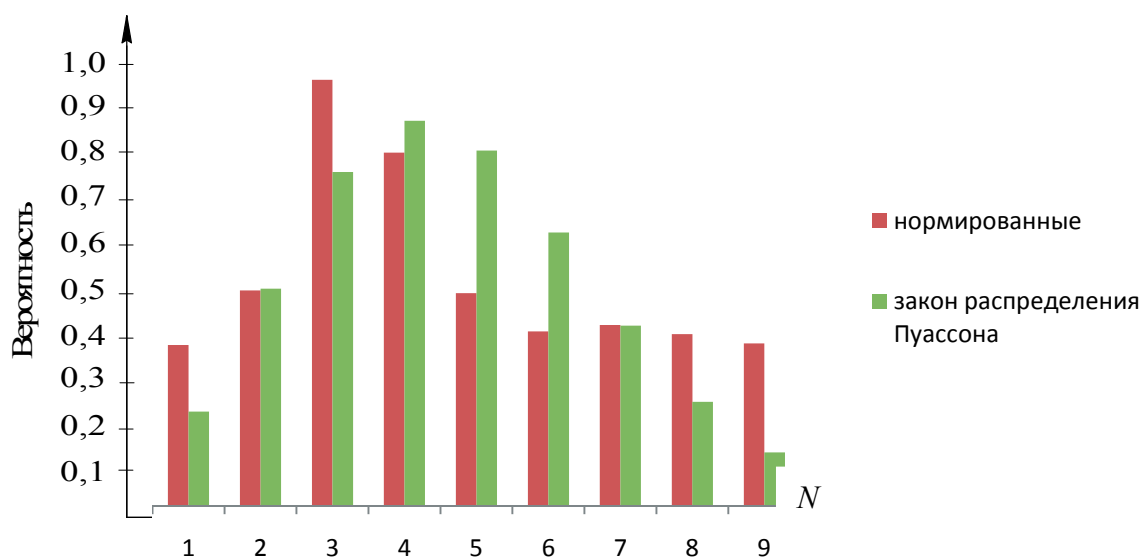


Рисунок 2.8 – Вероятность распределения фракционного состава включений в грунтах Республики Бурятия

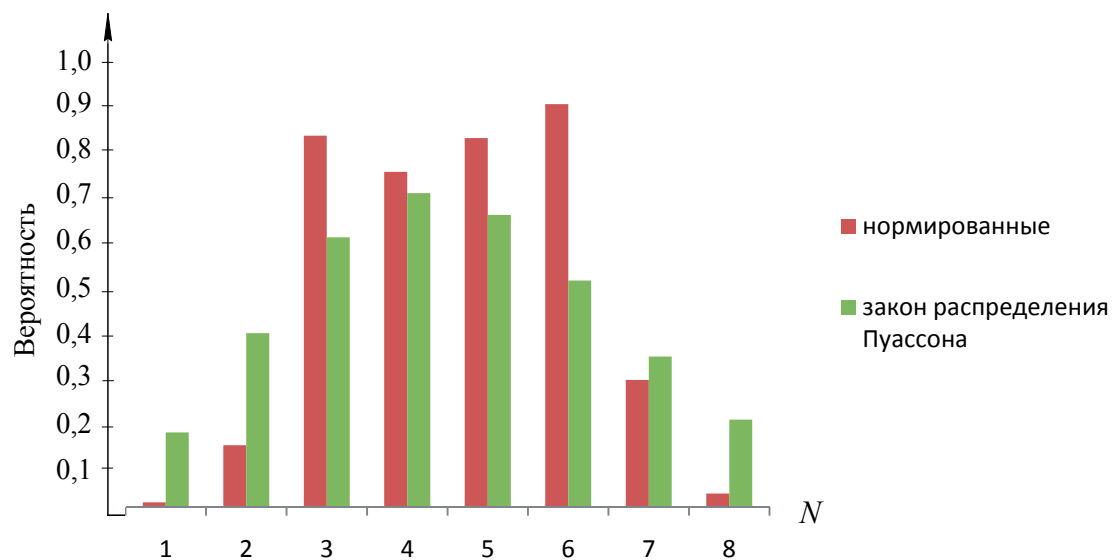


Рисунок 2.9 – Вероятность распределения фракционного состава включений в грунтах Иркутской области

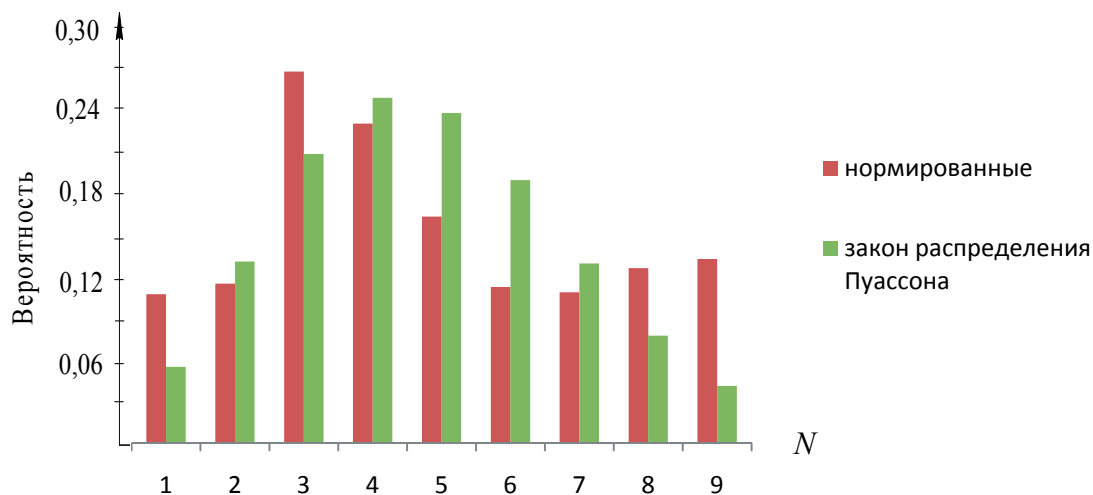


Рисунок. 2.10 – Вероятность распределения фракционного состава включений в грунтах территории БАМ

Для проверки этой гипотезы использовался критерий согласия χ^2 [111].
Согласие измеряется с помощью статистики

$$Y = n \sum_i \frac{(h_i - p_i)^2}{p_i}, \quad (2.4)$$

где n – количество наблюдений; h_i – экспериментальная относительная частота появления фракции; p_i – гипотетическая вероятность.

Таблица 2.10 – Параметры распределения

Район	ξ	χ^2	Уровень значимости
Северная зона Красноярского края	5,02	1,08	0,99
Южная зона Красноярского края	5,43	0,498	0,99
Территория БАМа	5,30	1,98	0,99
Республика Саха	4,61	4,24	0,80
Республика Бурятия	4,65	4,28	0,80
Иркутская область	4,78	5,33	0,80

Уровень значимости определен из таблицы значений квантилей χ^2 .

Из анализа таблицы следует, что фракционный состав с высокой степенью вероятности описывается законом распределения Пуассона. Результаты подтверждают аксиому о преимущественном распространении суглинистых и супесчаных грунтов на территории Сибири. Вместе с тем наблюдается образование двух кластеров [45], разделенных по параметру распределения и уровню значимости гипотезы.

На рис. 2.11 показаны изменения частоты встречаемости фракций в составах грунта, полученные для северной и южной зоны Красноярского края, на рис. 2.12–2.15 – для территорий БАМа, Республики Саха, Республики Бурятии и Иркутской области.

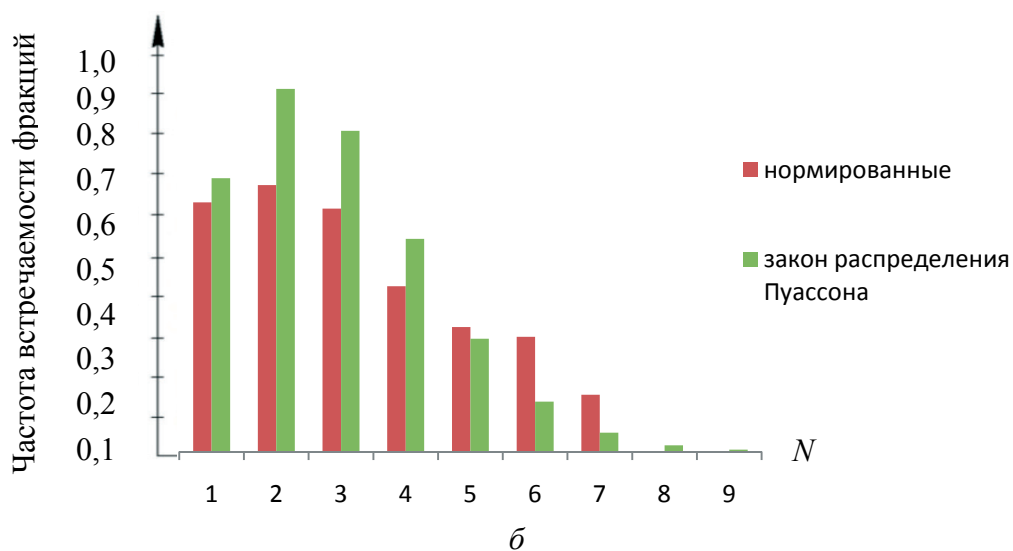
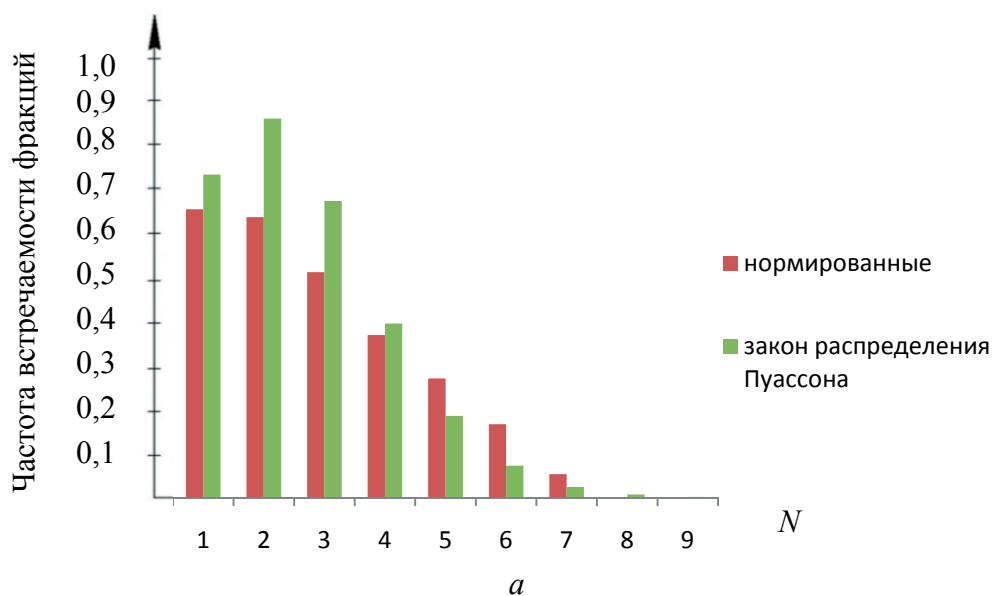


Рисунок 2.11 – Частота встречаемости фракций гравийно-галечниковых включений; в грунтах Красноярского края: a – северная зона; $б$ – южная зона

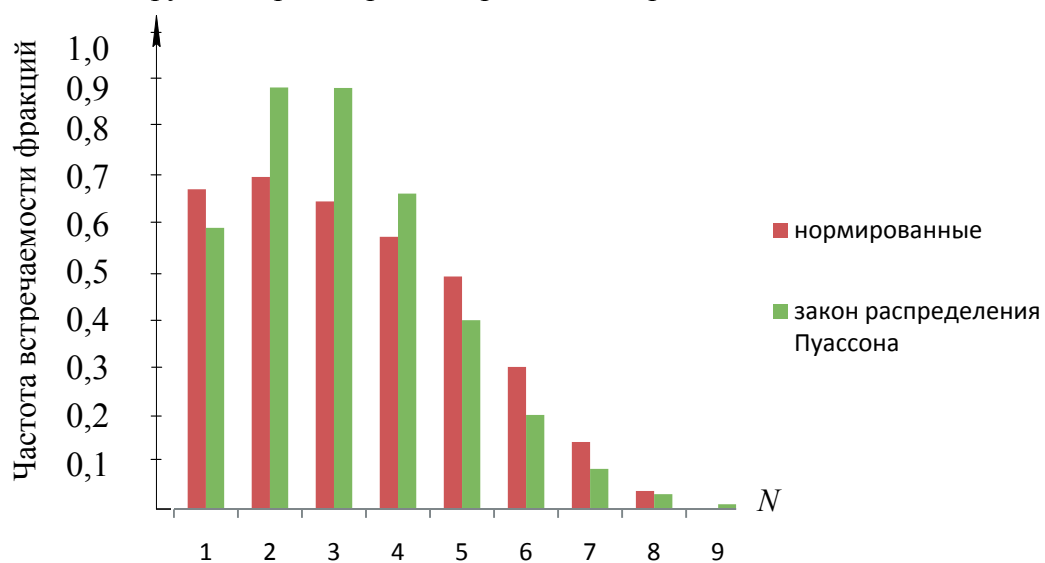


Рисунок 2.12 – Частота встречаемости числа фракций гравийно-галечниковых включений в грунтах территории БАМа

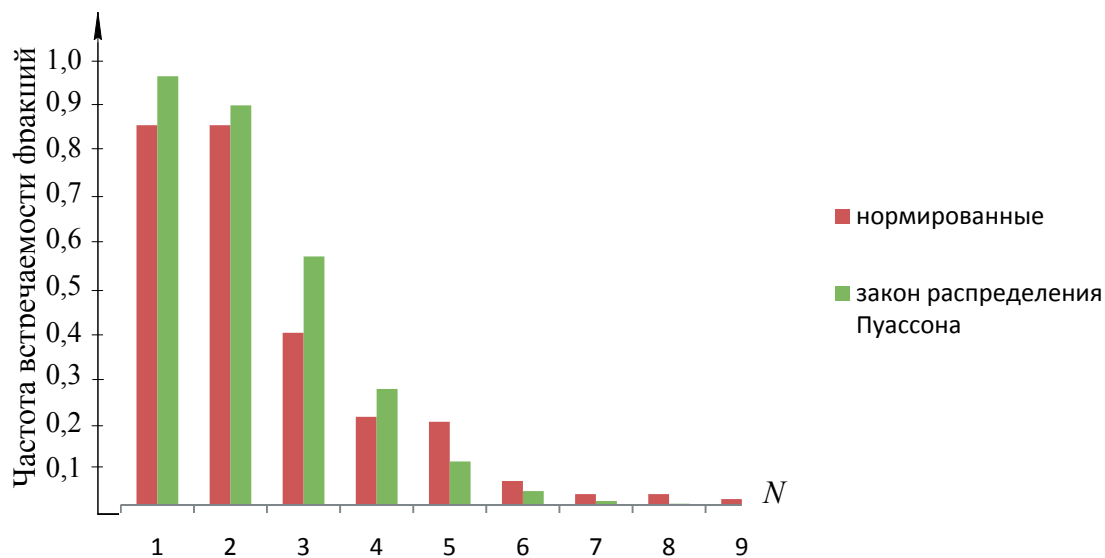


Рисунок 2.13 – Частота встречаемости числа фракций гравийно-галечниковых включений в грунтах Республики Саха

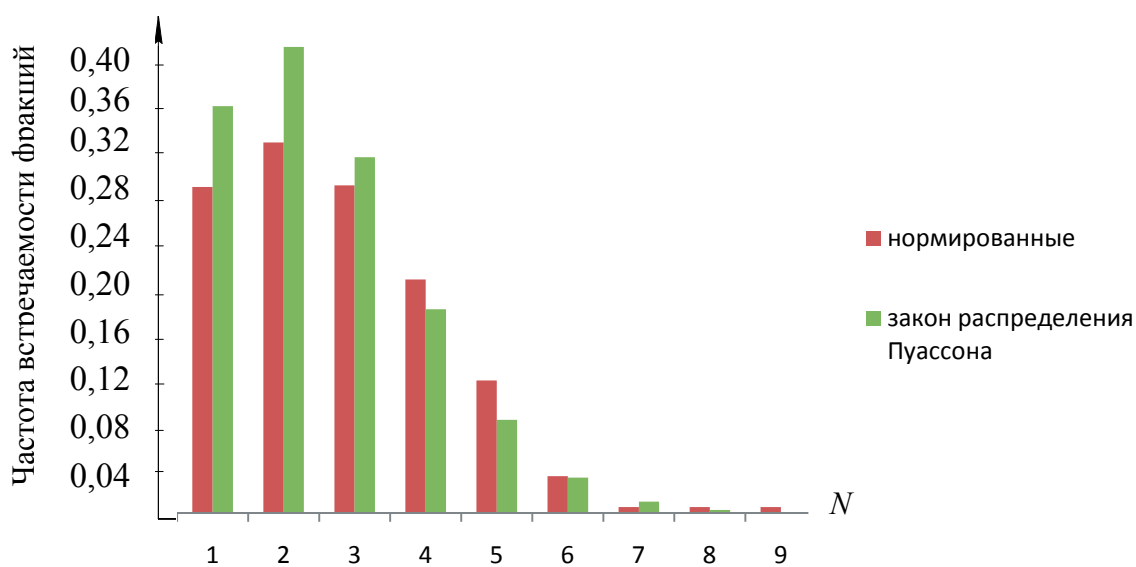


Рисунок 2.14 – Частота встречаемости числа фракций гравийно-галечниковых включений в грунтах Республики Бурятия

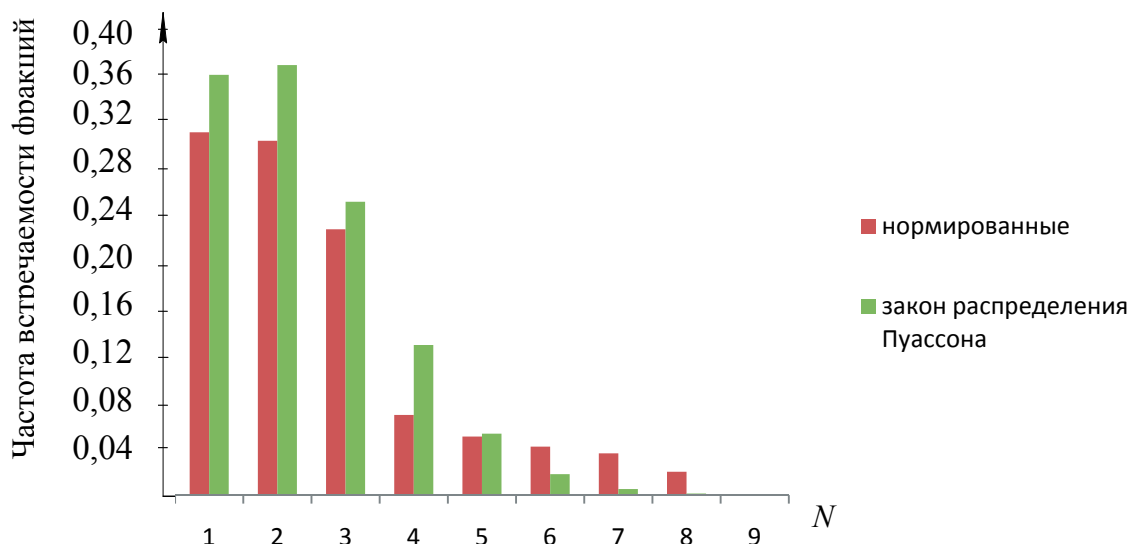


Рисунок 2.15 – Частота встречаемости числа фракций гравийно-галечниковых включений в грунтах Иркутской области

Каменистые включения размером 0,5–10 мм с наибольшей вероятностью встречаются в северной и южной зоне Красноярского края. Грунты северной зоны Красноярского края в основном содержат две фракции, в то время как число фракций в грунтах южной зоны не менее трех.

Грунты зоны освоения БАМа (рис. 2.12) имеют другую характеристику, в частности наиболее вероятной фракцией каменистых включений здесь являются включения размером 10–30 мм. Грунты зоны БАМа многофракционны по своему составу, двухфракционные имеют частоту встречаемости 0,278, трехфракционный грунт имеет частоту встречаемости 0,244, четырех – и пятифракционные грунты имеют частоту встречаемости 0,225 и 0,2 соответственно.

Грунты Республики Саха (рис. 2.13) содержат каменистые включения размером 0,1–0,5 мм, вероятность наличия в грунтах включений данного размера составляет 0,42, а каменистые включения размером более 30 мм маловероятны, и их вероятность составляет не более 0,22. Наиболее вероятное число фракций в разрабатываемых грунтах этого региона не более трех, при этом грунты, содержащие две и три фракции гравийно-галечниковых включений, имеют одинаковую частоту встречаемости – 0,98, а вероятность их разработки достигает 0,415.

Республика Бурятия (рис. 2.14) и Иркутская область (рис. 2.15) имеют свою специфику, в частности, в Иркутской области наиболее вероятными являются включения размером 0,1–0,5 мм, при этом вероятность их в грунте достигает 0,98. Вероятность включений размером 100–200 мм достигает 0,175, частота встречаемости двухфракционного состава – 0,4, а однофракционного и трехфракционного – 0,39. Грунты Республики Бурятия по своему составу содержат до шести фракций. При этом вероятность встречаемости третьей фракции в грунте – 0,23, четвертой фракции – 0,21, а шестой фракции достигает 0,26.

Грунты Республики Бурятия содержат традиционные для Сибири включения размером 0,1–0,5 мм и вероятность их в качестве включений достигает 0,58. Наряду с ними присутствуют включения размером 10–30 мм с вероятностью их наличия, достигающей 0,65, и включения размером 0,5–2,0 мм с вероятностью их наличия в разрабатываемом грунте до 0,218. По числу фракций грунты Республики Бурятии неоднородны, наиболее часты грунты трехфракционного состава, их частота встречаемости – 0,4, четырехфракционный состав имеет частоту встречаемости 0,358, при этом включения размером более 70 мм практически отсутствуют.

Для проверки этой гипотезы распределения частоты встречаемости отдельных фракций в мерзлых грунтах использовался критерий согласия Пирсона χ^2 . Согласие измеряется с помощью статистики

$$Y = n \sum_i \frac{(h_i - p_i)^2}{p_i},$$

где n – количество наблюдений; h_i – относительная частота встречаемости фракции; p_i – гипотетическая вероятность.

Таблица 2.11 – Параметры распределения

Район	ξ	χ^2	Уровень значимости
Северная зона Красноярского края	2,35	1,86	0,98
Южная зона Красноярского края	2,65	2,98	0,90
Территория БАМа	2,99	1,21	0,99
Республика Саха	1,86	4,87	0,80
Республика Бурятия	2,29	1,12	0,99
Иркутская область	2,05	7,61	0,70

Уровень значимости определен из таблицы значений квантилей χ^2 .

Из анализа таблицы следует, что частота встречаемости фракций, достоверно описывается законом распределения Пуассона. Вместе с тем наблюдается образование двух кластеров, разделенных по параметру распределения и уровню значимости гипотезы.

Число фракций в грунте может колебаться в очень широком диапазоне (1–10). Наибольшее количество фракций характерно для грунтовых условий БАМа, число фракций здесь составляет до девяти, а особенно вероятен шестифракционный состав грунта [45]. Частота встречаемости шестой фракции составляет 0,170, седьмой фракции – 0,103, восьмой фракции – 0,053. В то же время в Иркутской области преобладают грунты с малым количеством фракций, здесь частота встречаемости грунтов с двумя фракциями – 0,4.

Эмпирические распределения процентного содержания фракции в грунтах надежно описываются полиномом [37, 41, 92]:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n. \quad (2.5)$$

Максимальный показатель степени при аргументе полинома не превышает четвертой степени. Коэффициенты $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ сведены в табл. 2.12–1.27. Использование полинома четвертой степени и табличных данных показателей степени коэффициентов дает возможность в конечном виде определить наиболее вероятные гранулометрические составы грунтов путем перебора возможных вариантов с использованием полученных распределений.

Таблица 2.12 – Распределение коэффициентов полинома в зависимости от фракционного состава грунтов и региона залегания (Южная зона Красноярского края, Северная зона Красноярского края, Иркутская область)

Регион	Коэффициент	Размер фракции, мм				
		0,005	0,005–0,1	0,1–0,5	0,5–2,0	2,0–10
Красноярский край. Южная зона	a_0	0,1189	0,1162	0,05745	0,12009	0,03770
	a_1	–0,01658	–0,01424	–0,003816	0,012928	$-9,840 \cdot 10^{-4}$
	a_2	$8,650 \cdot 10^{-4}$	$6,301 \cdot 10^{-4}$	$1,001 \cdot 10^{-4}$	$5,2872 \cdot 10^{-4}$	$6,686 \cdot 10^{-6}$
	a_3	$-1,834 \cdot 10^{-5}$	$-1,152 \cdot 10^{-5}$	$-1,136 \cdot 10^{-6}$	$-9,2245 \cdot 10^{-6}$	0
	a_4	$1,349 \cdot 10^{-7}$	$7,404 \cdot 10^{-8}$	$4,71 \cdot 10^{-9}$	$5,733 \cdot 10^{-8}$	0

Продолжение таблицы 2.12

Регион	Коэффициент	Размер фракции, мм				
		0,005	0,005–0,1	0,1–0,5	0,5–2,0	2,0–10
Красноярский край. Северная зона	a ₀	0,07724	0,04824	0,04934	0,1384	0,1003
	a ₁	$-5,678 \cdot 10^{-3}$	$-4,694 \cdot 10^{-3}$	$-2,371 \cdot 10^{-3}$	-0,01603	$-9,270 \cdot 10^{-3}$
	a ₂	$1,433 \cdot 10^{-4}$	$1,677 \cdot 10^{-4}$	$3,939 \cdot 10^{-5}$	$6,703 \cdot 10^{-4}$	$3,282 \cdot 10^{-4}$
	a ₃	$-1,147 \cdot 10^{-6}$	$-2,261 \cdot 10^{-6}$	$-2,078 \cdot 10^{-7}$	$-1,171 \cdot 10^{-5}$	$4,959 \cdot 10^{-6}$
	a ₄	0	$1,012 \cdot 10^{-8}$	0	$7,258 \cdot 10^{-8}$	$2,665 \cdot 10^{-8}$
Иркутская область	a ₀	0,0444	0,01491	0,05120	0,1717	0,07626
	a ₁	-0,001311	$-9,154 \cdot 10^{-4}$	-0,002878	-0,02340	-0,004374
	a ₂	$9,746 \cdot 10^{-6}$	$3,072 \cdot 10^{-5}$	$7,374 \cdot 10^{-5}$	0,001082	$8,393 \cdot 10^{-5}$
	a ₃	0	$-2,489 \cdot 10^{-7}$	$-8,669 \cdot 10^{-7}$	$-1,632 \cdot 10^{-5}$	$-5,197 \cdot 10^{-7}$
	a ₄	0	0	$3,710 \cdot 10^{-9}$	0	0

Окончание таблицы 2.12

Регион	Коэффициент	Размер фракции, мм				
		10–30	30–70	70–100	100–200	> 200
Красноярский край. Южная зона	a ₀	0,1991	0,02397	0,1589	0,3195	1,012
	a ₁	0,001240	0,002227	-0,01921	-0,06238	-0,5853
	a ₂	$-5,887 \cdot 10^{-5}$	$-1,307 \cdot 10^{-4}$	$7,716 \cdot 10^{-4}$	0,003904	0,09111
	a ₃	$5,582 \cdot 10^{-7}$	$1,585 \cdot 10^{-6}$	$-9,987 \cdot 10^{-6}$	0	0
	a ₄	0	0	0	0	0
Красноярский край. Северная зона	a ₀	0,1039	0,07781	0,1501	-0,02240	0,712
	a ₁	-0,01404	$-7,202 \cdot 10^{-3}$	-0,01467	0,2367	-0,08056
	a ₂	$8,239 \cdot 10^{-4}$	$3,325 \cdot 10^{-4}$	$3,563 \cdot 10^{-4}$	-0,04365	$9,781 \cdot 10^{-3}$
	a ₃	$-2,047 \cdot 10^{-5}$	$-7,114 \cdot 10^{-6}$	0	0	$-3,707 \cdot 10^{-4}$
	a ₄	$1,765 \cdot 10^{-7}$	$5,445 \cdot 10^{-8}$	0	0	0
Иркутская область	a ₀	0,04525	0,005919	-0,02086	-0,02141	
	a ₁	0,004064	0,007392	0,01526	0,009989	
	a ₂	$-4,126 \cdot 10^{-4}$	$-4,090 \cdot 10^{-4}$	-0,001098	$-5,329 \cdot 10^{-4}$	
	a ₃	$7,565 \cdot 10^{-6}$	$5,517 \cdot 10^{-6}$	$2,784 \cdot 10^{-5}$	$8,965 \cdot 10^{-6}$	
	a ₄	0	0	$-2,372 \cdot 10^{-7}$	0	

Таблица 2.13 – Распределение коэффициентов полинома в зависимости от фракционного состава грунтов и региона залегания (Республика Бурятия, БАМ, Республика Саха)

Регион	Коэффициент	Размер фракции, мм				
		0,005	0,005–0,1	0,1–0,5	0,5–2,0	2,0–10
Республика Бурятия	a ₀	0,2309	0,0996	0,02231	0,07134	0,03836
	a ₁	-0,03721	$-2,268 \cdot 10^{-3}$	$-2,947 \cdot 10^{-5}$	$-4,237 \cdot 10^{-3}$	$-8,818 \cdot 10^{-4}$
	a ₂	$1,975 \cdot 10^{-3}$	$3,648 \cdot 10^{-5}$	$-2,738 \cdot 10^{-5}$	$9,611 \cdot 10^{-5}$	$1,484 \cdot 10^{-6}$
	a ₃	$-3,427 \cdot 10^{-5}$	$-1,922 \cdot 10^{-7}$	$5,1837 \cdot 10^{-7}$	$9,5875 \cdot 10^{-7}$	$4,564 \cdot 10^{-8}$
	a ₄	0	0	$-3,263 \cdot 10^{-9}$	$3,520 \cdot 10^{-9}$	0
БАМ	a ₀	0,1441	0,04752	0,06476	0,09816	0,03858
	a ₁	-0,02067	-0,002417	-0,003796	-0,01017	0,00093
	a ₂	$1,167 \cdot 10^{-3}$	$5,055 \cdot 10^{-5}$	$8,874 \cdot 10^{-5}$	$4,541 \cdot 10^{-4}$	$-1,444 \cdot 10^{-4}$
	a ₃	$-2,823 \cdot 10^{-5}$	$-4,553 \cdot 10^{-7}$	$-9,285 \cdot 10^{-7}$	$-9,076 \cdot 10^{-6}$	$3,560 \cdot 10^{-6}$
	a ₄	$2,432 \cdot 10^{-7}$	$1,419 \cdot 10^{-9}$	$3,593 \cdot 10^{-9}$	$6,553 \cdot 10^{-8}$	$-2,660 \cdot 10^{-8}$

Продолжение таблицы 2.13

Регион	Коэффициент	Размер фракции, мм				
		0,005	0,005–0,1	0,1–0,5	0,5–2,0	2,0–10
Республика Саха	a ₀	0,1808	0,10861	0,01949	0,17194	0,04780
	a ₁	–0,03339	–0,01212	$-1,548 \cdot 10^{-3}$	–0,02405	$-3,639 \cdot 10^{-3}$
	a ₂	$2,552 \cdot 10^{-3}$	$5,259 \cdot 10^{-4}$	$5,902 \cdot 10^{-5}$	$1,265 \cdot 10^{-3}$	$2,675 \cdot 10^{-4}$
	a ₃	$-8,451 \cdot 10^{-3}$	$-9,534 \cdot 10^{-6}$	$-9,385 \cdot 10^{-7}$	$-2,8626 \cdot 10^{-5}$	$-8,539 \cdot 10^{-6}$
	a ₄	$9,931 \cdot 10^{-7}$	$6,047 \cdot 10^{-8}$	$5,393 \cdot 10^{-9}$	$2,2939 \cdot 10^{-7}$	$8,608 \cdot 10^{-8}$

Окончание таблицы 2.13

Регион	Коэффициент	Размер фракции, мм				
		10–30	30–70	70–100	100–200	> 200
Республика Бурятия	a ₀	0,06502	0,01635	0,00251	0	10
	a ₁	$-7,658 \cdot 10^{-3}$	$-7,022 \cdot 10^{-4}$	0,01250	3,435	1185,7
	a ₂	$33,952 \cdot 10^{-4}$	$-1,552 \cdot 10^{-5}$	$-4,628 \cdot 10^{-4}$	–0,2153	–142,69
	a ₃	$-8,112 \cdot 10^{-7}$	0	0	0	0
	a ₄	$5,614 \cdot 10^{-8}$	0	0	0	0
БАМ	a ₀	0,02318	0,003045	0,03762	0,02747	0,1901
	a ₁	0,0005059	0,005841	0,002174	0,002866	–0,02244
	a ₂	$-2,82 \cdot 10^{-5}$	$-3,313 \cdot 10^{-4}$	$-2,3 \cdot 10^{-4}$	$-1,840 \cdot 10^{-4}$	$8,199 \cdot 10^{-4}$
	a ₃	$2,264 \cdot 10^{-7}$	$6,257 \cdot 10^{-6}$	$5,423 \cdot 10^{-6}$	$2,403 \cdot 10^{-6}$	$-8,193 \cdot 10^{-6}$
	a ₄	0	$-3,940 \cdot 10^{-8}$	$-3,925 \cdot 10^{-8}$	0	0
Республика Саха	a ₀	0,03589	0,09066	0,1223	0,1223	0,05792
	a ₁	$7,906 \cdot 10^{-4}$	$-7,508 \cdot 10^{-3}$	–0,02202	–0,02202	$-6,747 \cdot 10^{-3}$
	a ₂	$-1,033 \cdot 10^{-4}$	$2,194 \cdot 10^{-4}$	$2,207 \cdot 10^{-3}$	$2,207 \cdot 10^{-3}$	$3,19704 \cdot 10^{-4}$
	a ₃	$2,145 \cdot 10^{-6}$	$-2,615 \cdot 10^{-6}$	0	0	0
	a ₄	$-1,321 \cdot 10^{-8}$	$1,094 \cdot 10^{-8}$	0	0	0

Вероятность распределения гравийно-галечниковых включений по фракционному составу и частота встречаемости числа фракций в разрабатываемых грунтах исследуемого региона имеют нормальные законы распределения.

По закону распределения гравийно-галечниковые включения в грунтах Восточной Сибири разделяются на две группы. К первой группе относятся грунты Красноярского края, включающие как северную, так и южную зону, и Республики Саха. Ко второй группе относятся грунты Республики Бурятия, Иркутской области и БАМа.

2.2. Закономерности формирования пиковых давлений в гидроприводе роторных траншейных экскаваторов при разработке мерзлых грунтов

Преимущество использования экскаваторов непрерывного действия при выполнении земляных работ в сравнении с одноковшовыми экскаваторами определяется непрерывностью рабочего процесса, что способствует повышению производительности, уменьшению энергоемкости, частоты и амплитуды колебаний нагрузки в основных элементах металлоконструкций и системах привода при работе на грунтах различных категорий, а также увеличению их долговечности.

Появление высокопроизводительных гидравлических машин, повышение номинального давления, применение усовершенствованной контрольно-регулирующей аппаратуры позволили получить качественно новые характеристики исполнительных механизмов, что дало возможность гидрофицировать привод основных исполнительных механизмов экскаваторов непрерывного действия. Опыт эксплуатации экскаваторов, оснащенных гидромеханическим приводом рабочих органов, на мерзлых грунтах с гравийно-галечниковым включениями, выявил значительные колебания давления рабочей жидкости в напорных магистралях систем, разрушение трубопроводов, гидромоторов и гидравлических насосов и как следствие – недостаточную надежность системы привода [55] и роторного траншейного экскаватора в целом [58, 103].

Особенностью процесса резания грунтов рабочими органами роторных траншейных экскаваторов является изменение суммарной нагрузки на роторе, связанных с изменением толщины грунтовой стружки в процессе колебаний рабочего органа (рис. 2.16) [37, 87, 88].

Из условия реализации процесса резания мерзлых грунтов определим необходимый момент на валу гидромотора привода ротора ($M_{пр}$) зависящий не только от физико-механических характеристик разрабатываемой среды, но от передаточного числа редуктора:

$$M_{пр} > (M_{mc} \cdot K_n + M_c) / i, \quad (2.6)$$

где M_{mc} – математическое ожидание суммарного момента на режущих зубьях ротора, зависящий от глубины резания грунта; K_n – коэффициент, зависящий от количества одновременно контактирующих с грунтом зубьев; i – передаточное число редуктора системы привода ротора; M_c – момент сопротивления, учитывающий вариацию гравийно-галечниковых включений и физико-механических свойств сезонно-мерзлого грунта:

$$M_c = P_K \cdot R_r, \quad (2.7)$$

где P_K – усилие резания грунта на зубьях ротора; R_r – радиус установки зубьев относительно вала привода ротора.

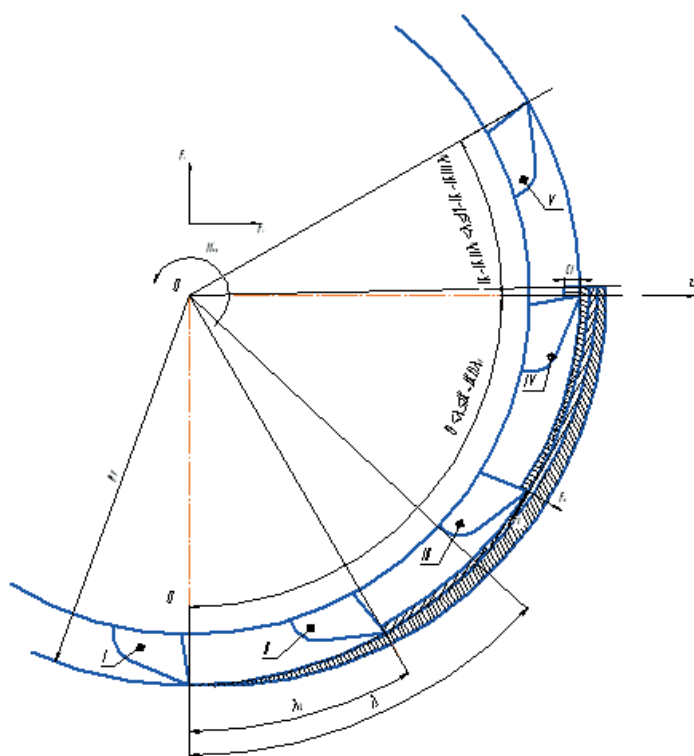


Рисунок 2.16 – Схема действующих сил на роторный рабочий орган

Методикой экспериментальных исследований процесса резания сезонно-мерзлых грунтов предусмотрено принятие гипотезы состояния грунта и модели взаимодействия с ним рабочих органов роторных траншейных экскаваторов.

Процесс разрушения мёрзлых грунтов поступательно движущимся инструментом землеройно-транспортных машин в соответствии с исследованиями [99, 157] может быть разбит на два этапа. Первый этап – образование и развитие зоны пластических деформаций перед инструментом или включением. Вто-

рой этап характеризуется отделением крупных элементов, вызванный повышением напряжений в упругой зоне до критической величины.

Для описания модели взаимодействия мёрзлого грунта и поступательно движущегося инструмента предпочтительно использована модель плоской деформации жёстко – пластического тела при неустановившемся пластическом течении с геометрическим подобием [15, 16].

Однородный мёрзлый грунт в зависимости от его типа и состояния может вести себя как материал, обладающий различной степенью сжимаемости, т.е. может быть практически несжимаемым или обладать способностью сжиматься в начальный период взаимодействия с резцом до перехода в пластическое состояние. Одной из особенностей роторных рабочих органов является переменная толщина стружки при движении резца из нижнего положения до точки выхода из грунтового забоя (рис. 2.17). В процессе движения резца в среде однородного мерзлого грунта возникает пластическая зона, а в момент достижения предельного напряженного состояния происходит смещение ядра уплотнения и его отрыв от массива грунта.

При внедрении резца роторного траншейного экскаватора в мерзлый грунт с гравийно-галечниковыми включениями формируется сложное напряженное состояние в зоне расположения включений, перед которыми формируется опережающее напряженное состояние с образованием уплотненного ядра. В момент достижения предельного напряженного состояния в верхней части массива грунта гравийно-галечниковые включения выталкиваются в зоны с наименьшим напряженным состоянием или разрезаются резцом (рис. 2.17) [41, 156]. Вектор выталкивающего усилия определяется не только формой включений, но и толщиной стружки и схемой приложения нагрузки со стороны резца на включение (выше геометрического центра или ниже геометрического центра), в частности как показали исследования, для малых подач (малой толщине стружки) включения как правило выталкиваются в разработанный грунт (в сторону свободной поверхности).

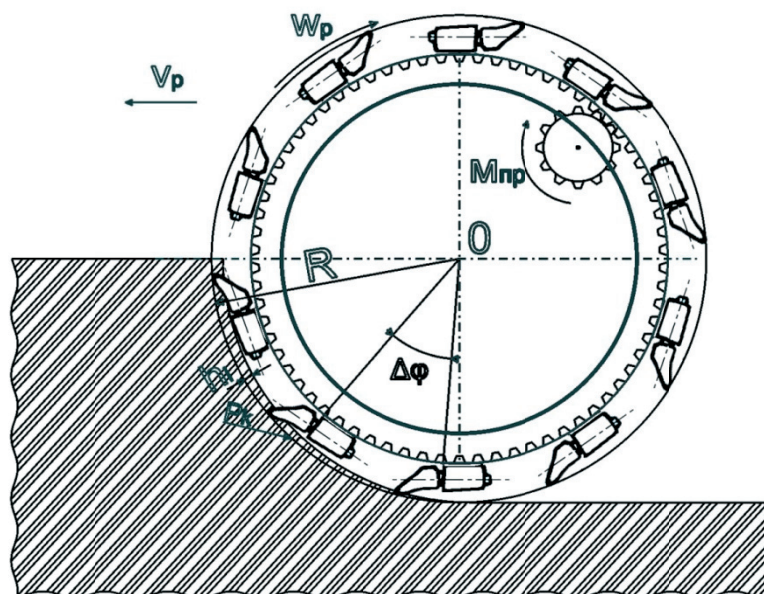


Рисунок 2.17 – Расчетная схема разработки грунта траншейным экскаватором

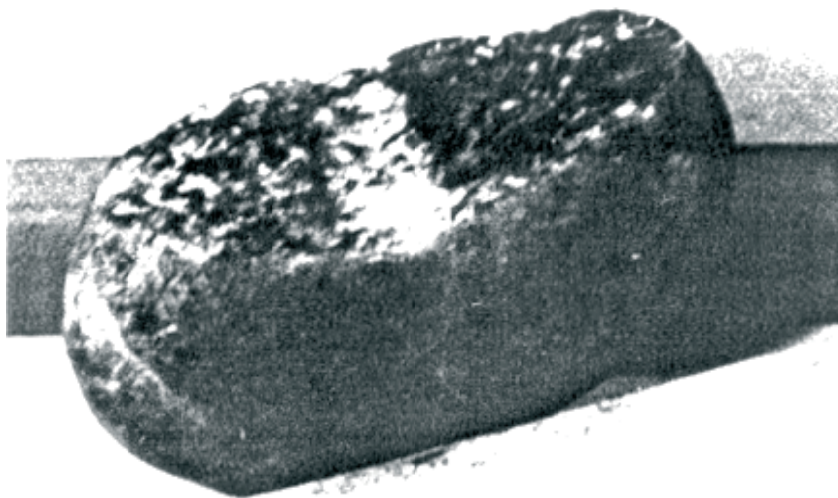


Рисунок 2.18 – Разрезанное включение жильного кварца

В обоих случаях процесс разрушения грунта рассматривается как частный случай внедрения соответствующего штампа в жёстко – пластическую среду, ограниченную плоскостью.

На рис. 2.19 и рис. 2.20 показаны схемы резания грунта резцом траншейного экскаватора. В качестве допущений принимаем: инструмент острый и абсолютно жесткий, объёмные силы равны нулю.

инструмента может наблюдаться после проходки нескольких метров траншеи, а время, затрачиваемое на замену изношенного инструмента, становится соизмеримым с периодом его стойкости. Специфика рабочего процесса траншейного экскаватора такова, что его рабочий орган контактирует с грунтом по достаточно большой траектории, при этом проходит от нижней точки грунта, где располагаются талые – теплые слои грунта к слоям, имеющей максимальную отрицательную температуру, что позволяет рассматривать разрабатываемый грунт как двухфазную среду. Значит, при оценке температурного режима грунта следует учитывать распределение температур по глубине забоя.

При стендовых исследованиях температура грунта находилась в пределах от 0 до -15°C , что соответствует числу ударов плотномера ДорНИИ от 50 до 150, влажность грунта в пределах 17–21 % и характеризует естественное состояние грунтов Сибири. Параметры резцов и режимы резания варьировались в диапазоне, характерном для работы траншейных экскаваторов: ширина резца $b = 10\text{--}35$ мм; глубина резания $h = 10\text{--}35$ мм; скорость резания $V_p = 0,8\text{--}3,2$ м/с; угол резания $\alpha = 45\text{--}80^{\circ}$, с углом резания 80° , задним углом 10° и углом клина передней поверхности 140° . Размеры включений приняты согласно табл. 2, варьировались от 20 до 80 мм, что соответствует с 1 по 4 расчетный вид (табл. 2.14).

Экспериментальные исследования однородных грунтов и грунтов с включениями проведены на стенде с использованием методики планирования трехфакторного эксперимента (табл. 2.15). Методикой экспериментальных исследований по определению сил резания сезонно-мерзлых грунтов предусматривалось решение следующих задач [52]:

- экспериментальное установление влияния прочности грунта, геометрических параметров резца на усилие резания сезонно-мерзлых грунтов;
- проверка результатов теоретических исследований влияния размеров включений и их процентного содержания в мерзлом грунте на усилие резания;
- уточнение, на основании наблюдений за процессом разрушения мерзлого грунта с включениями, модели формирования сложного напряженного состояния в зоне расположения включений.

Таблица 2.15 – Матрица планирования трехфакторного эксперимента на стенде одиночного резания мерзлого суглинка

№ опыта	Уровни факторов в кодированных значениях			Уровни факторов в натуральных значениях			Усилие резания
	x_1	x_2	x_3	Прочность грунта, $C(x_1)$	Подача резца, h , мм (x_2)	Ширина резца, b , мм (x_3)	P_k , кН
1	–	–	+	50	10	35	66,89
2	+	–	–	150	10	10	423,38
3	–	+	–	50	35	35	74,48
4	+	+	+	150	35	35	266,38
5	–	–	–	50	10	10	27,92
6	+	–	+	150	10	35	239,22
7	–	+	+	50	35	35	74,48
8	+	+	–	150	35	10	11,21

С целью получения расчетных зависимостей по определению усилия резания на резцах при различных соотношениях толщины стружки и шага резания были проведены исследования процесса резания мерзлого грунта с гравийно-галечниковыми включениями резцами с параметрами, характерными для траншейных экскаваторов типа ЭТР-132Б, ЭТР-134, ЭТР-160, ЭТР-254 и БТМ-ТМГ.

Для обеспечения повторяемости температуры и влажности в образцах мерзлых грунтов и уменьшения чистой ошибки экспериментальных исследований каждый из лабораторных образцов выдерживался во влагонепроницаемой оболочке в течение 24 часов при той температуре, которая соответствует температуре при эксперименте. Относительная погрешность показателей температуры и влажности грунта в лабораторных образцах для начальных отрицательных температурах составила 5 %, для нижних значений отрицательных температур составила 10 %, что соответствует рекомендациям [99].

Экспериментальные исследования процесса резания грунтов с гравийно-галечниковыми включениями на роторных стендах затруднительны, так как задачу моделирования распределения включений необходимо решать как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости одновременно. С этой точки зрения исследование процесса резания грунтов на стендах одиночного резания предпочтительно. Исследования проведены на искусственно приготовленных

образцах мерзлого суглинка, верхний слой которых насыщался отдельными включениями, расположенными в образце по линии движения резца.

Для сопоставления результатов экспериментальных и теоретических исследований по влиянию размеров включений и их процентного содержания в мерзлом грунте на усилие резания проведены двухфакторные исследования.

При исследовании влияния размеров и процентного содержания включений на величину коэффициента усилия резания, включения рассортированы на 10 групп по их максимальному размеру (табл. 2.9).

Весь спектр нагрузок, действующих на рабочие органы роторных траншейных экскаваторов при разработке мерзлых грунтов с включениями, формализован расчетным случаем:

P , кН

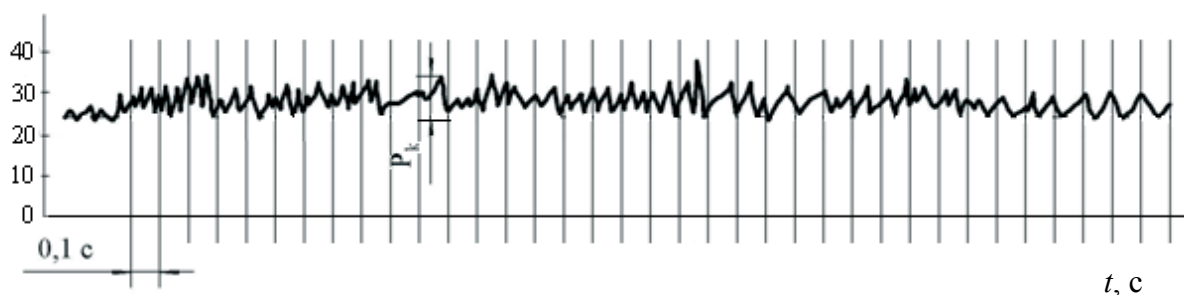


Рисунок 2.21 – Выборочная осциллограмма нагрузок при разработке однородных мерзлых грунтов резцом 18 мм

P , кН

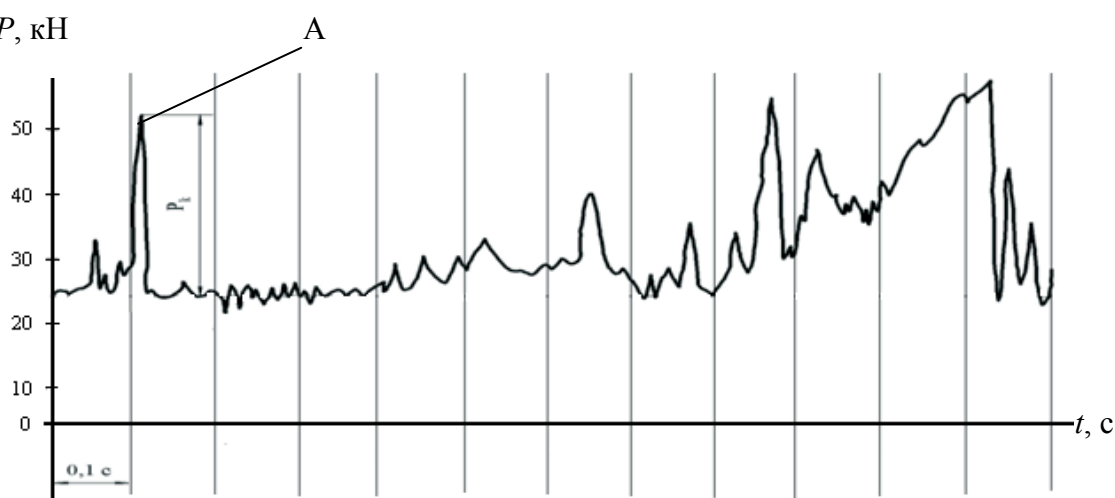


Рисунок 2.22°– Выборочная осциллограмма нагрузок при разработке мерзлых грунтов с множественными гравийно-галечниковыми включениями различного размера резцом 24 мм

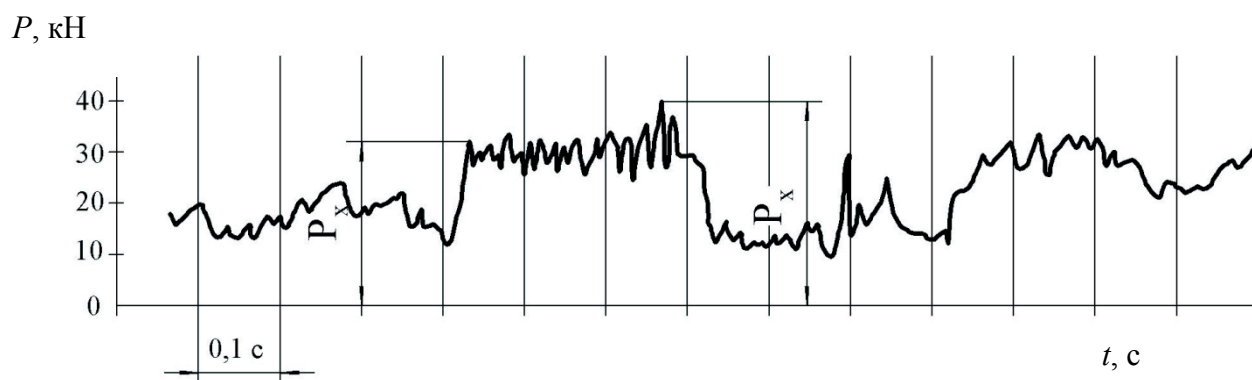


Рисунок 2.23 – Осциллограмма нагрузок, возникающих на резце при разрезании единичных массивных включений в среде мерзлого суглинка и глины резцом 18 мм

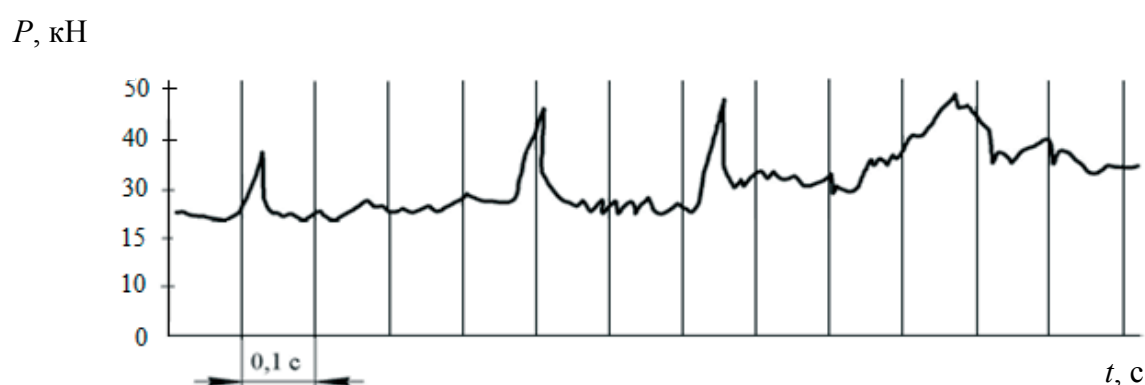


Рисунок 2.24 – Осциллограмма нагрузок, возникающих на резце при разрезании единичных мелких включений в среде мерзлой глины резцом 24 мм

Как показывают экспериментальные данные, полученные при резании однородных мерзлых грунтов и мерзлых грунтов с включениями (рис. 2.21–2.24), зависимости их не могут быть описаны гладкими функциями. Созданная база экспериментальных данных по действующим нагрузкам на рабочем органе при разработке сезонно-мерзлых грунтов, полученная по результатам натурных испытаний работы роторных траншейных экскаваторов подвергнута двухэтапной проверке (очистке) – логической и математической [10, 93, 94].

При логической очистке произведена выбраковка тех значений экспериментальных данных, которые несколько выпадают из общего ряда, то есть измерение прошло успешно и значение было записано, но это значение сильно отличается от предыдущих и последующих и не подтверждается при воспроизведении эксперимента. При встрече режущих зубьев с зонами сплошного льда

(замерзшей грунтовой воды) в толще мерзлого грунта, или при затирании боковыми зубьями массивных включений размерами более 150 мм, с одновременным вдавливанием этих включений в массив цельного мерзлого грунта появляются экспериментальные данные, выпадающие из массива принимаемых результатов. Экспериментальные значения сил резания могут отличаться на несколько порядков от остальных, и одна экспериментальная точка может существенно изменить результат обработки. Кроме этого экспериментальные данные резания мерзлых грунтов рабочими органами траншейных экскаваторов подвергались очистке от шумов-результатов замера сил резания в условиях натурного эксперимента, дисперсия которых меняется по кусочно-постоянному закону или по неизвестному закону.

Наиболее часто встречающимся в статистике видом средних величин действующих сил резания мерзлого грунта с включениями является средняя арифметическая, представляющая собой частное от деления суммы значений всех значений сил резания на общее число единиц (n), она рассчитывалась по формуле

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}. \quad (2.9)$$

Среднее линейное отклонение действующей на рабочий орган нагрузок представляет собой среднюю арифметическую из абсолютных значений отклонений отдельных значений нагрузки от средней. Если обозначить среднее линейное отклонение буквой $\bar{d}$, то для не сгруппированных нагрузок, возникающих при резании сезонно-мерзлого грунта

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |x_i - \bar{x}|}{n}. \quad (2.10)$$

Коэффициент вариации действующих сил резания мерзлого грунта используется для сравнения рассеивания двух и более признаков, имеющих различные единицы измерения. Коэффициент вариации представляет собой относительную меру рассеивания, выраженную в процентах и вычисляется по формуле

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (2.11)$$

где σ – среднее квадратичное отклонение сил резания мерзлого грунта; $\bar{x}$ – средняя величина нагрузки.

Среднее квадратичное отклонение для не сгруппированных экспериментальных данных сил резания определяется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (2.12)$$

т.е. среднее квадратичное отклонение представляет собой корень квадратный из арифметической суммы квадратов разности отклонений сил резания от средней.

Таблица 2.16 – Характеристика выборки сил резания на рабочем органе роторных экскаваторов при разработке сезонно-мерзлых грунтов Восточной Сибири

Наименование показателя	Величина
ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ	
Количество опытов, шт.	132
Количество связей, шт.	3
Уровень значимости	0,5
Фактор	X
ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ	
Минимальное значение фактора	21,5000000000
Максимальное значение фактора	45,0000000000
Выборочное среднее значение фактора	30,7242424242
Среднее линейное отклонение фактора	3,5707529844
Среднее квадратическое отклонение фактора	4,5717697855
Стандартное отклонение фактора	4,5891861144
Средняя квадратическая ошибка фактора	0,3994373808
Ошибка в % от среднего значения фактора	1,3000723509
Эмпирическая дисперсия выборки	21,0606291927
Вариации отклонения от среднего значения	12,7502768755
Риск отклонения от среднего значения	3,5707529844
Коэффициент вариации	0,1488000818
Вычисленное значение критерия Пирсона	1,3305733200
Табличное значение критерия Пирсона	7,8562849000
Количество интервалов	8

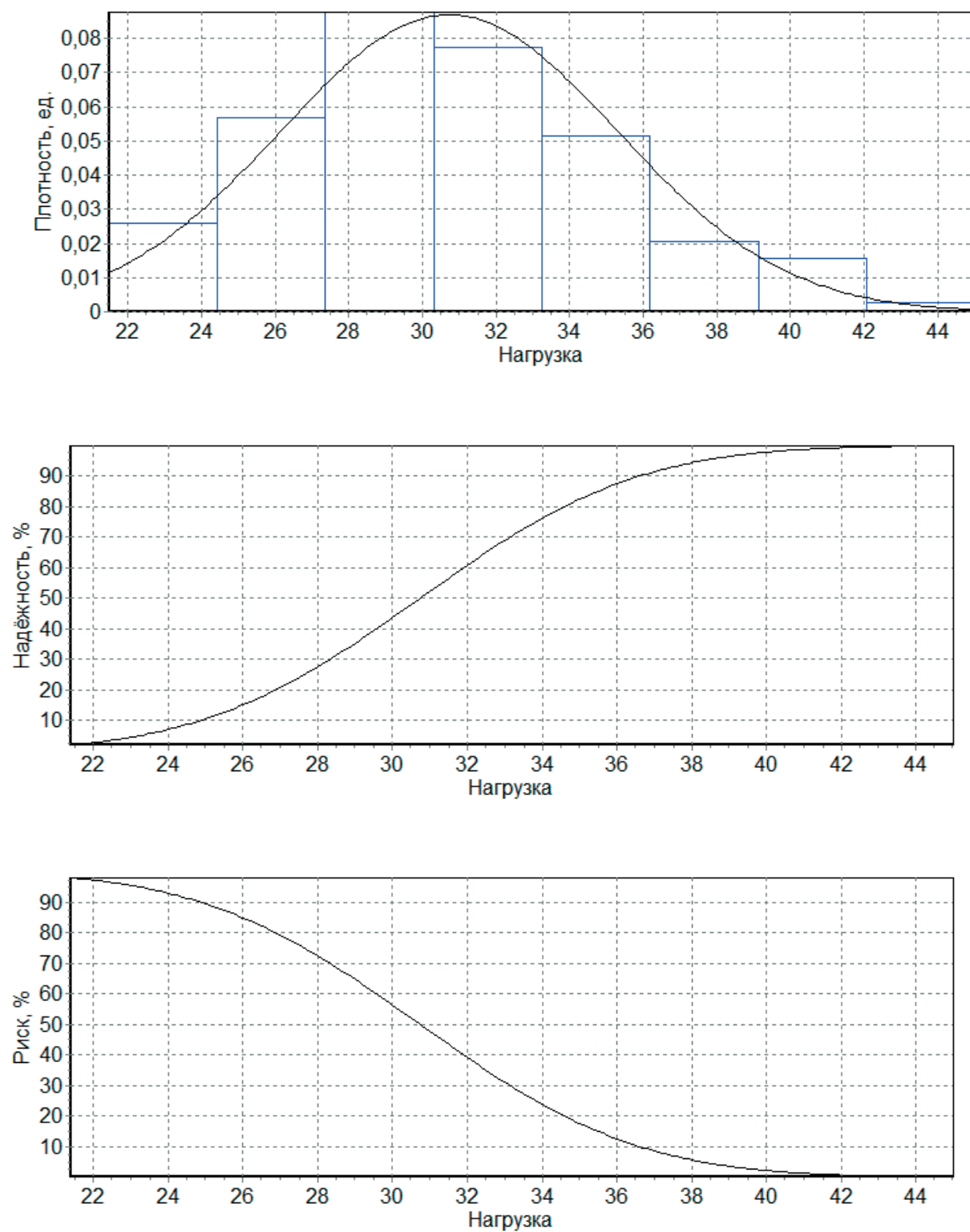


Рисунок 2.25 – Зависимость между плотностью, надёжностью, риском и значениями сил резания сезонно-мерзлых грунтов рабочими органами роторных экскаваторов

Стандартное отклонение используют при расчёте стандартной ошибки среднего арифметического, при построении доверительных интервалов, при статистической проверке гипотез, при измерении линейной взаимосвязи между случайными величинами нагрузок

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{n}{n-1}} \sigma^2, \quad (2.13)$$

где s – стандарт, стандартное отклонение, несмещенная оценка среднеквадратического отклонения случайной величины силы резания X относительно её математического ожидания; σ – среднеквадратическое отклонение нагрузки; σ^2 – дисперсия; x_i – i -й элемент выборки; $\bar{x}$ – среднее арифметическое выборки; n – объём выборки.

Средняя квадратичная ошибка выборки определена по формуле

$$\varepsilon = \pm \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}. \quad (2.14)$$

Вариация отклонения от среднего значения выборки сил резания определена по формуле

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} V_{ij}}{n^2}, \quad (2.15)$$

где V_{ij} – ковариация i -го и j -го члена выборки.

Ковариация i -го и j -го члена выборки определены по формуле

$$V_{ij} = (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}). \quad (2.16)$$

Минимальный риск отклонения от среднего значения выборки сил резания мерзлого грунта с включениями определен по формуле [4]

$$r = \sqrt{V}, \quad (2.17)$$

где V – вариация отклонения от среднего значения выборки.

В результате отработки статистической информации с помощью программы «Sample» получена следующая информация (табл. 2.16). Кривая нормального распределения сил резания по времени приведена на рис. 2.25.

Закон теоретического распределения сил резания мерзлых грунтов с включениями подобран исходя из вида гистограммы. Вначале весь интервал изменения данных $[x_{\min}, x_{\max}]$ разбивался на участки одинаковой длины. Для определения количества участков есть несколько подходов. Один из них – это использование формулы Стёрджесса:

$$l = \text{Round}[1 + 3,322 \cdot \lg(n)], \quad (2.18)$$

где *Round* – округление чисел с плавающей запятой до целого числа.

Для оценки случайности или существенности расхождений между частотами эмпирического и теоретического распределений воспользуемся критериями согласия. Одним из основных и наиболее распространенным показателем является критерий χ^2 (хи-квадрат), предложенный английским статистиком К. Пирсоном.

По таблицам [111] определено предельное верхнее значение «хи-квадрата» (критическое значение) при данном числе степеней свободы и заданном уровне значимости. Затем полученное значение «хи-квадрата» сравнивается с табличным (критическим). Если фактическое «хи-квадрат» меньше табличного ($\chi_{\text{ф}}^2 < \chi_{\text{табл}}^2$), то при заданном уровне значимости расхождения между эмпирическими и теоретическими частотами считаем случайными, а гипотезу о принятом законе распределения сил резания мерзлых грунтов приемлемой.

Нормальное распределение плотности сил резания на графике рис. 2.25 представляет собой симметричную куполообразную кривую, имеющую максимум в точке, соответствующей средней арифметической ряда. Эта же точка является модой и медианой ряда. Точки перегиба у нормальной кривой находится на расстоянии от средней арифметической.

После обработки выборки результатов натурных исследований усилий резания мерзлых грунтов рабочими органами траншейных экскаваторов произведено построение регрессионных уравнений усилий резания однородных и неоднородных мерзлых грунтов. Реализация шагового регрессионного метода начата с построения простой корреляционной матрицы и включения в

регрессионное уравнение переменной, наиболее коррелируемой с откликом, для включения в уравнение выбрана переменная с наибольшим квадратом частного коэффициента корреляции.

Для проверки введенных на раннем шаге переменных, на предмет их взаимосвязи с другими переменными, на каждом шаге определен частный F -критерий для каждой переменной уравнения и сравнивается с заранее избранной процентной точкой соответствующего F -распределения. Это позволило оценить вклад переменной в предположении, что она введена в модель последней, независимо от момента ее фактического введения. Переменная, дающая незначительный вклад, исключалась из модели. Этот процесс выполнялся до тех пор, пока не были рассмотрены все переменные.

Общий F -критерий служит для определения статистической значимости модели, рассматриваемой на каждом этапе, рассчитывался следующим образом:

$$F = \frac{\text{Средний квадрат, обусловленный регрессией}}{\text{Средний квадрат, обусловленный остатком}}. \quad (2.19)$$

Для сравнения влияния и установления относительной важности каждого из факторов используется нормирование коэффициентов регрессии:

где b_i – коэффициент уравнения регрессии после нормирования;

a_i – коэффициент уравнения регрессий до нормирования;

S_{xi} – средняя квадратичная ошибка переменной X_i ;

S_{yi} – средняя квадратичная ошибка отклика Y_i .

$$b_i = a_i \cdot S_{xi} / S_{yi}. \quad (2.20)$$

Нормирование коэффициентов регрессии возможно лишь при случайных переменных X_i , которыми и являются усилия резания однородных грунтов и грунтов с включениями.

Необходимым условием для использования критериев t и F при получении доверительных интервалов строится вектор ошибок и проверяется соответствие его закону нормального распределения.

Проверка принадлежности вектора ошибок закону нормального распределения осуществляется с помощью критерия согласия Пирсона – χ^2 . Для чего строится эмпирическое распределение вектора ошибок, определяется значение χ^2 , и, в соответствии с выбранным уровнем надёжности критерия – α (чаще всего выбирается $\alpha = 0,05$ [95 %] или $\alpha = 0,01$ [99 %]), по таблицам определяется теоретическое значение χ^2_{α} .

Если $\chi^2 = \chi^2_{\alpha}$, то нет основания отвергать гипотезу о нормальности распределения вектора ошибок.

Для проверки неадекватности модели использован средний квадрат ошибки S^2 , как оценка величины σ^2 , исходя из предположения, что регрессионная модель правильна. Если эти величины отличаются на порядок и более модель отвергалась.

Для «статистически значимого» уравнения регрессии дисперсионное отношение должно превосходить теоретическое значение $F(p - 1, v, 1 - \alpha)$ с заданным уровнем значимости α .

Теоретические и экспериментальные исследования вероятности распределения фракционного состава включений в грунтах, закономерности распределения температур грунта и его прочности по глубине для рассматриваемых регионов Восточной Сибири [42, 43, 87] позволяют определить влияние свойств сезонно-мерзлых грунтов на формирование нагрузки [57, 58] на режущей кромке ковша:

Для однородного грунта

$$P_k = 11,7(-0,32 + 0,01C - 0,02 \cdot 10^{-3} C^2)(-0,04 + 0,06h - 0,64 \cdot 10^{-3} h^2) \times \\ \times (0,20 \cdot 10^{-2} + 0,06b - 0,68 \cdot 10^{-3} b^2), \quad (2.21)$$

Для грунтов с включениями [128]

$$P'_{\xi} = P_k \cdot K_v \cdot K_{\alpha} \cdot K_{\zeta} \cdot \mu, \quad (2.22)$$

где t – шаг резания, мм; P_k – усилие блокированного резания; K_v – коэффициент влияния скорости резания; K_α – коэффициент, учитывающий влияние угла резания α° ; μ – коэффициент блокированности реза; K_ζ – коэффициент влияния размера гравийно-галечниковых включений.

Коэффициент влияния скорости резания зависит и от скорости резания (V_p) и от шага расстановки резцов (t) и от ширины резца (b) и от глубины резания (h)

$$K'_v = (0,9244 + 0,063V_p) \left(0,98 + 0,023 \frac{t-b}{h} \right). \quad (2.23)$$

Коэффициент влияния угла резания (α°)

$$K'_\alpha = (0,456 + 0,068\alpha) \left(0,98 + 0,03 \frac{t-b}{h} \right). \quad (2.24)$$

Исследования момента сопротивления резания сезонно-мерзлых однородных грунтов от угла резания при прохождении резца из нижней точки траншеи на дневную поверхность выявили нелинейность зависимости (рис. 2.26).

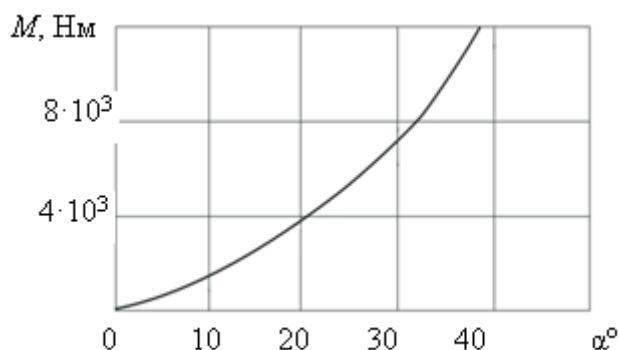


Рисунок 2.26 – Зависимость момента сопротивления резания грунта от угла резания

Коэффициент влияния размера гравийно-галечниковых включений (ζ)

$$K_\xi = 0,1033 + 0,03918\zeta - 0,00043n^2, \quad (2.25)$$

где n – процентное содержание гравийно-галечниковых включений.

Коэффициент, учитывающий степень блокированности реза определяется по формуле:

$$\mu = 0,516 + 0,2622 \left(\frac{t-b}{h} \right). \quad (2.26)$$

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить следующие зависимости по определению среднемаксимальной состав-

ляющей силы блокированного резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями для резцов с клиновидной пластиной, имеющих установившуюся площадку износа:

$$P'_k = 8,32(-0,283 + 0,149 \cdot 10^{-1}C - 0,221 \cdot 10^{-4}C^2) \times \\ \times (-0,419 \cdot 10^{-1} + 0,75 \cdot 10^{-1}h - 0,54 \cdot 10^{-3}h^2) \times \\ \times (0,178 \cdot 10^{-2} + 0,06b - 0,67 \cdot 10^{-3}b^2), \text{ кН}, \quad (2.27)$$

где C – число ударов ударника ДорНИИ; b – ширина резца, мм; h – толщина стружки, мм (подача резца).

Таким образом, результаты исследований процесса резания мерзлых грунтов с включениями устанавливают влияние геометрических параметров рабочего органа, режимов резания для однородных и неоднородных грунтов на закономерности формирования нагрузок.

Сравнительный анализ осциллограмм нагрузок на рабочем органе при разработке однородных мерзлых и мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями наглядно показывает явно выраженный характер изменения нагрузки на рабочем органе (M_{mc}) при разработке мерзлых грунтов с включениями и значительное увеличение ее амплитуды.

Математическое ожидание момента сопротивления резанию на роторе M_{mc} зависит от количества ковшей, одновременно участвующих в резании мерзлых грунтов и является периодической функцией времени [48], что подтверждается осциллограммами нагрузок (рис. 2.21–2.24).

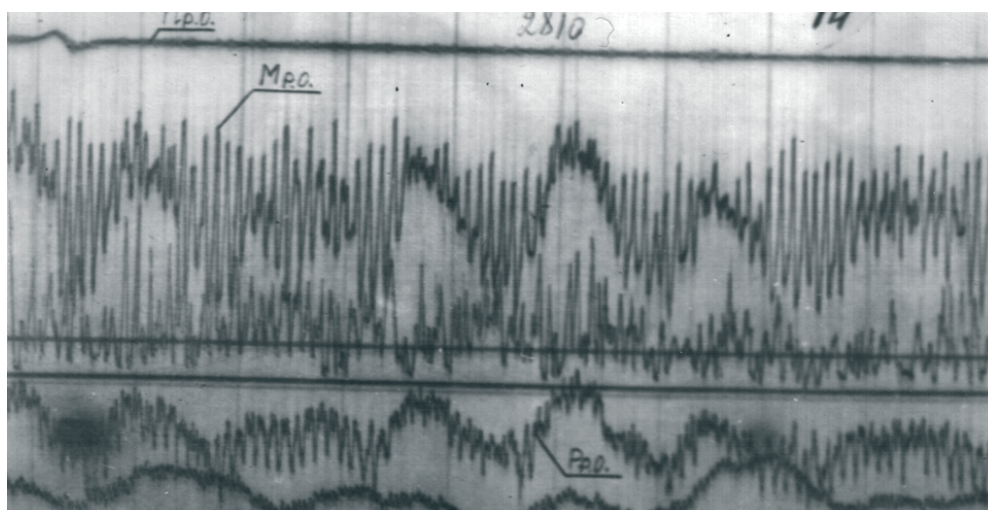


Рисунок 2.27 – Общий вид осциллограммы основных характеристик гидромеханического привода роторного траншейного экскаватора

Для реализации процесса разработки грунта роторным траншейным экскаватором, оснащенным гидромеханической системой привода рабочего органа необходимо выполнение условия:

$$\Delta p \cdot w_{\text{гм}} \cdot \eta_{\text{г.п.}} \cdot (M_{\text{мс}} \cdot K_n + M_c) / i. \quad (2.28)$$

Подставим в левую часть формулы (2.14) зависимость момента на валу высокомоментного гидромотора от таких конструктивных характеристик как рабочий объем гидромотора ($w_{\text{гм}}$) и коэффициент полезного действия гидропривода ($\eta_{\text{г.п.}}$).

Вычисление момента на валу гидромотора привода ротора $M_{\text{пр}}$ позволяет определить давление в напорной магистрали системы гидропривода:

$$\Delta p \cdot (M_{\text{мс}} \cdot K_n + M_c) / i \cdot w_{\text{гм}} \cdot \eta_{\text{г.п.}} \quad (2.29)$$

Из уравнения (2.15) становится очевидна зависимость явно выраженного колебательного характера изменения усилия резания как однородных сезонно-мерзлых грунтов так и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями с колебательным режимом изменения давления в напорной магистрали гидропривода, приводящим к формированию пиковых значений давления и способствующих появлению автоколебательного режима работы всей системы гидропривода роторных траншейных экскаваторов при разработке сезонно-мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями [87, 88]. Пиковые величины давления в напорных магистралях гидропривода рабочего органа роторного траншейного экскаватора существенно превышают настроечные характеристики клапанной предохранительной аппаратуры вследствие инерционности ее характеристик. Отличие характера изменения давления в напорной магистрали от характера изменения усилия резания сезонно-мерзлых грунтов, как по амплитуде, так и по частоте обусловлено демпфирующими свойствами гидропривода, в первую очередь зависящих от величины давления и от температуры гидравлической жидкости в локальной точке привода, которые могут существенно отличаться от усредненных значений в напорной магистрали.

Выводы

1. Вероятность распределения гравийно-галечниковых включений по фракционному составу и частоте встречаемости числа фракций в разрабатываемых грунтах Восточно-Сибирского региона имеют законы распределения Пуассона.

2. По количеству фракций гравийно-галечниковых включений и частоте их встречаемости грунты Восточной Сибири разделяются на два кластера:

– к первому кластеру относятся грунты Красноярского края, включающие как северную, так и южную зону и Республики Саха;

– ко второму кластеру относятся грунты Республики Бурятия, Иркутской области и зоны БАМа.

3. Коэффициент вариации сил резания мерзлых грунтов с включениями описывается уравнением второго порядка, зависящим от процентного содержания включений и их размеров.

4. Установлено, что среднепиковые нагрузки при резании мерзлых грунтов с включениями превышают среднепиковые нагрузки при резании мерзлого однородного грунта в 4–6 раз.

5. Наибольшие по величине усилия резания и подачи возникают при разрезании включений, размеры которых в каждой из плоскостей превышают ширину резца.

6. Установлено, что геометрические параметры гравийно-галечниковых включений в мерзлых грунтах адекватно описываются зависимостями второго-третьего порядка, а процентное содержание гравийно-галечниковых включений в грунтах Восточно-Сибирского региона подчиняется закон распределения Пуассона.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИВОДА ТРАНШЕЙНОГО ЭКСКАВАТОРА ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Ранее выполненные разработки Т.М. Башта, В.Е. Вильсона, М.М. Гайцго-ри, Д.В. Драгомирова, Л.Б. Зарецкого, С.В. Каверзина, Е.С. Кисточкина, Е.Ю. Малиновского, В.В. Мишке и др. не позволяют исследовать характер временных динамических процессов, обусловленных изменением переменных состояний системы, судить об устойчивости в зависимости от типа нагрузок на резцах землеройных машин при разработке сезонно-мерзлых грунтов.

3.1. Разработка имитационной динамической модели траншейного экскаватора

Имитационное моделирование работы гидромеханического привода рабочего органа траншейного экскаватора выполнено на математической модели с использованием Matlab (Simulink), учитывающая влияние сил резания сезонно-мерзлых однородных грунтов и грунтов с включениями, оценивающая режим автоколебаний давления рабочей жидкости и изменения параметров гидропривода рабочего органа (рис. 3.1).

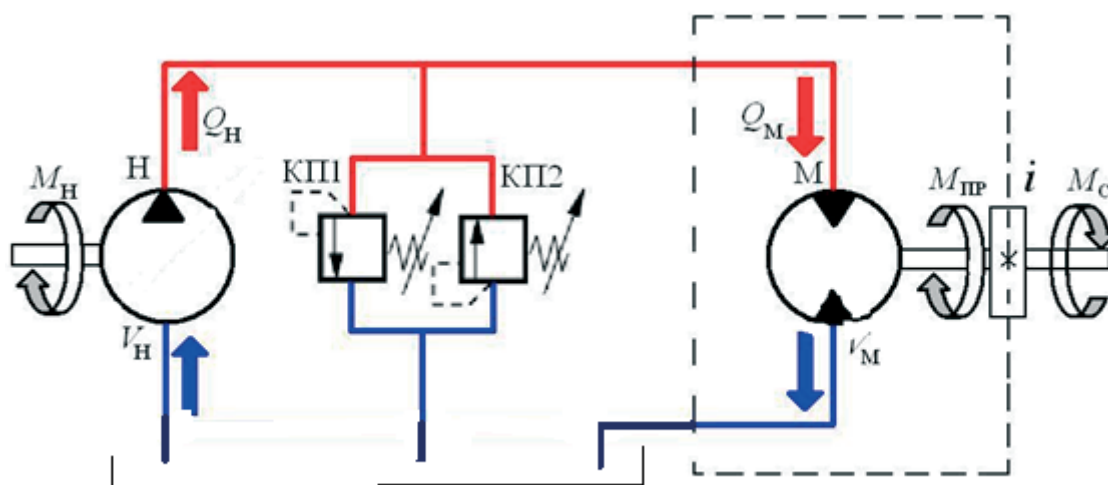


Рисунок 3.1 – Расчетная схема гидравлического привода роторного траншейного экскаватора

Исходными данными для математической модели динамической модели гидравлического привода роторного траншейного экскаватора являются ее дифференциальные уравнения в пространстве переменных состояния.

В качестве переменных приняты:

- давление рабочей жидкости в гидравлической системе;
- перемещения рабочих элементов клапанно-регулирующей аппаратуры в функции давления;
- скорость вращения вала гидромотора;
- скорость вращения рабочего органа;
- нагрузка на рабочем органе.

Для реализации уравнений состояния, в Matlab (Simulink) разработана имитационная модель гидропривода, соответствующая приведённой выше системе уравнений и дающая наглядное представление о взаимосвязи физических процессов, имеющих место при функционировании систем объемного гидропривода, показана на (рис. 3.2, 3.3).

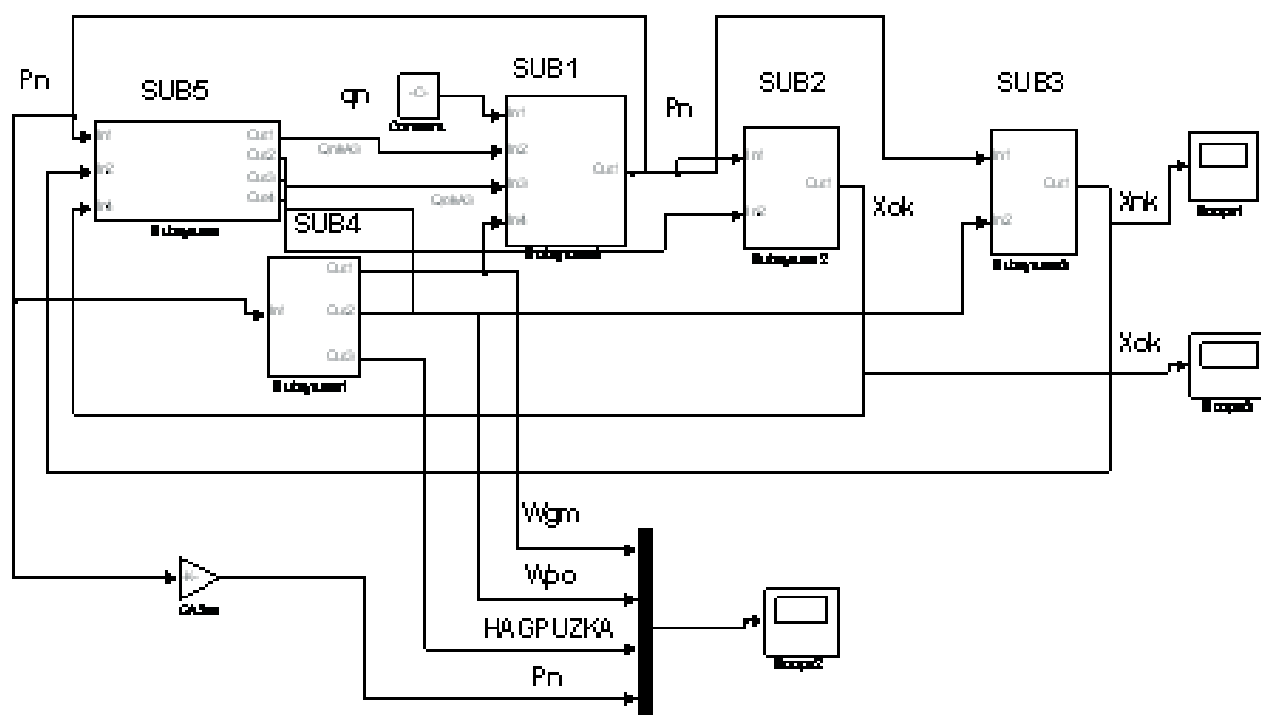


Рисунок 3.2 – Структурная схема системы управления привода роторного траншейного экскаватора

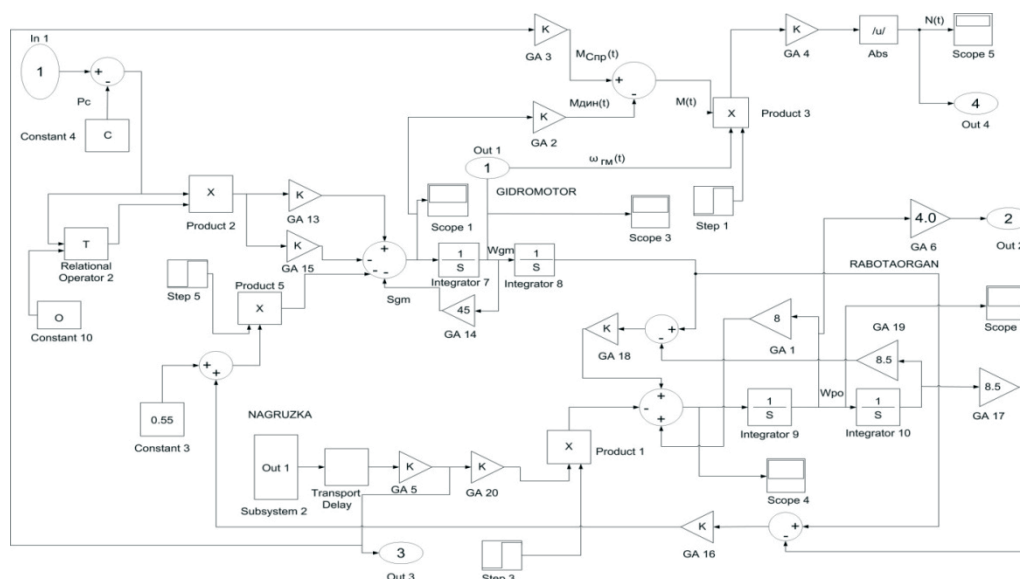


Рисунок 3.3 – Имитационная динамическая модель гидрообъемной трансмиссии подсистемы привода рабочего органа траншейного экскаватора

Имитационная динамическая модель траншейного экскаватора предназначена для исследования динамических режимов работы гидромеханической трансмиссии привода рабочего органа и позволяет исследовать характер временных динамических процессов, обусловленных изменениями нагрузок на рабочем органе, зависящих от свойств сезонномерзлых грунтов [41] (рис. 3.3).

Выходными параметрами динамической модели определены следующие переменные: $\omega_{\text{ГМ}}$ – угловая скорость вращения вала гидромотора, $\omega_{\text{РО}}$ – угловая скорость вращения вала рабочего органа, давление жидкости в напорной магистрали и NAGRUZKA, одноименное название имеет внутренняя подсистема, которая формирует временную диаграмму возможной нагрузки траншейного экскаватора.

Выход этого сумматора S_{gm} представляет правую часть уравнения – угловое ускорение вращения вала гидромотора $d\omega_{\text{ГМ}}(t)/dt$. Эта переменная интегрируется блоком «integrator 7».

Вычисление абсолютного значения мгновенной механической мощности осуществляется в верхней части гидромеханической подсистемы имитационной модели блоком суммирования, в соответствии с (2), блоком умножения в соответствии с (1) и блоком, определяющим абсолютное значение (рис. 3.3).

Математическая модель, содержащая уравнения состояния и уравнения связи, позволяет установить функциональную зависимость между пульсацией давления гидропривода, конструктивными параметрами привода рабочего органа траншейного экскаватора, характеристиками разрабатываемой среды и критерием оценки работоспособности системы привода.

Выходными параметрами динамической модели определены следующие переменные: $\omega_{гм}$ – угловая скорость вращения вала гидромотора, $\omega_{ро}$ – угловая скорость вращения вала рабочего органа, давление жидкости в напорной магистрали и NAGRUKA, одноименное название имеет внутренняя подсистема, которая формирует временную диаграмму возможной нагрузки траншейного экскаватора.

Компоненты правой части четвертого уравнения состояния поступают на вход сумматора S_{gm} . Коэффициенты A_{13} , A_{14} , A_{15} , A_{16} имитируются одноименными усилителями GA13–GA16. Выход этого сумматора представляет правую часть уравнения $d\omega_{гм}(t)/dt$ – угловое ускорение вращения вала гидромотора. Эта переменная интегрируется в блоке 7.

Нелинейная математическая модель линеаризована с последующим анализом работоспособности системы гидропривода с регулируемой фазой рабочего процесса высокомоментного гидромотора привода рабочего органа траншейного органа, позволяющей изменить рабочий объем гидромотора.

Уравнения состояния учитывают нелинейность перемещения рабочих элементов клапанно-регулирующей аппаратуры, представлены относительно скорости изменения переменных и являются существенно нелинейными.

Уравнения связи также нелинейны, к ним относятся расходы рабочей жидкости через клапанно-регулирующую аппаратуру.

Разработанная математическая модель гидравлического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора [39, 77], состоящая из уравнений состояния (3.1)–(3.5), уравнений связи (3.6) и (3.7) и ограничений на перемещения обратного (4.8) и предохранительного клапанов (3.9) и учитывающая модуль упругости гидравлических линий (3.10, 3.11).

Уравнения состояния

Давление рабочей жидкости в гидросистеме (P_H)

$$\frac{dP_H(t)}{dt} = -A_4 \cdot P_H(t) + A_3 \cdot Q_{OK}(X_{OK}(t)) - A_3 \cdot Q_{PK}(X_{PK}(t)) - A_2 \cdot \omega_{ГМ}(t) + A_1 \cdot q_M, \quad (3.1)$$

$$A_1 = \frac{\omega_{ДВ}}{K_{упр} \cdot i_{пр}}; \quad A_2 = \frac{q_M}{K_{упр}}; \quad A_3 = 1/K_{упр}; \quad A_4 = \frac{K_p}{K_{упр}}.$$

Смещение обратного клапана в функции давления

$$\frac{dX_{OK}(t)}{dt} = A_5 \cdot \int_0^t (P_H(t) - P_{OK}) dt - A_6 \cdot \int_0^t \frac{Q_{OK}^2(t)}{X_{OK}(t)} dt - A_7 \cdot X_{OK}(t) - A_8 \int_0^t X_{OK}(t) dt; \quad (3.2)$$

$$A_5 = \frac{S_{OK}}{M_{OK}}; \quad A_6 = \frac{B_{OK}}{M_{OK}}; \quad A_7 = \frac{h_{OK}}{M_{OK}}; \quad A_8 = \frac{C_{OK}}{M_{OK}}.$$

Смещение предохранительного клапана в функции давления

$$\frac{dX_{PK}(t)}{dt} = A_9 \cdot \int_0^t (P_H(t) - P_{PK}) dt - A_{10} \cdot \int_0^t \frac{Q_{PK}^2(t)}{X_{PK}(t)} dt - A_{11} \cdot X_{PK}(t) - A_{12} \int_0^t X_{PK}(t) dt; \quad (3.3)$$

$$A_9 = \frac{S_{PK}}{M_{PK}}; \quad A_{10} = \frac{A_{PK}}{M_{PK}}; \quad A_{11} = \frac{h_{PK}}{M_{PK}}; \quad A_{12} = \frac{C_{PK}}{M_{PK}}.$$

Скорость вращения вала гидромотора в функции давления

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_{ГМ}(t)}{dt} = & (A_{13} - A_{15})(P_H(t) - P_c) - A_{14} \cdot \omega_{ГМ}(t) - A_{16} \times \\ & \times \left(\int_0^t \omega_{ГМ}(t) dt - A_{17} \int_0^t \omega_{po}(t) dt \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$A_{13} = \frac{q_M}{J_{ГМ}}; \quad A_{14} = \frac{k_{ГМ}}{J_{ГМ}}; \quad A_{15} = \frac{b_1}{J_{ГМ}}; \quad A_{16} = \frac{C_{21}}{i_{po} \cdot J_{ГМ}}; \quad A_{17} = i_{po}.$$

Скорость вращения вала привода рабочего органа в функции скорости вращения вала гидромотора и действующих нагрузок (моментов $-M_1, M_2, M_3$) сопротивления, являющихся функцией физико-механических свойств разрабатываемого грунта

$$\frac{d\omega_{po}(t)}{dt} = A_{18} \cdot \left(\int_0^t \omega_{ГМ}(t) dt - A_{19} \cdot \int_0^t \omega_{po}(t) dt \right) - A_{20} \cdot \omega_{po}(t) - A_{21} \cdot M_H(t) \quad (3.5)$$

$$A_{18} = \frac{C_{22}}{J_{po}}; \quad A_{19} = \frac{i_{po}}{J_{po}}; \quad A_{19} = 8,5; \quad A_{20} = \frac{K_n}{i_{пр} \cdot J_{po}}; \quad A_{21} = \frac{1}{i_{пр} \cdot J_{po}}.$$

Уравнения связи:

Расход гидравлической жидкости через обратный клапан, зависящий от давления рабочей жидкости P_n и давления насоса подпитки $P_{np}(const)$.

Если $P_{np} < P_n$, то $Q_{ок} = 0$.

$$\text{Если } P_{np} > P_n, \text{ то } Q_{ок} = B \cdot x_{ок} \cdot \sqrt{(P_{np} - P_n)}. \quad (3.6)$$

Расход гидравлической жидкости через предохранительный клапан, зависящий от давления рабочей жидкости P_n и давления настройки клапана предохранительного $P_{нк}(const)$

Если $P_n \leq P_{нк}$, то $Q_{нк} = 0$.

$$\text{Если } P_n > P_{нк}, \text{ то } Q_{нк} = A \cdot x_{нк} \cdot \sqrt{(P_n - P_{нк})}. \quad (3.7)$$

Ограничения.

$$0 \leq X_{ок}(t) \leq 1,5 \cdot 10^{-3}, \quad (3.8)$$

$$0 \leq X_{нк}(t) \leq 1,5 \cdot 10^{-3}. \quad (3.9)$$

Модуль упругости гидравлических трубопроводов

$$K_{упр. тр} = \pi \cdot \ell \left(\frac{1-\mu}{8} \cdot \frac{d^3}{E_t \delta} + \frac{d^2}{4E_{ж}} \right); \quad K_{упр. p} = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4E_p} \ell_p; \quad (3.10)$$

$$E_p = \frac{E_{ж} \cdot E_{тр}}{E_{ж} + E_{тр} \frac{d_{тр}}{c_{\Sigma} \delta_{тр}}}; \quad c_{\Sigma} = \left(\mu + \frac{r_1^2 + r_2^2}{r_1^2 + r_2^2} \right). \quad (3.11)$$

Момент от силы резания грунта, зависящие от силы резания P'_K

$$M_1 = (P'_K) \cdot R_r; \quad R_r = 1,15 \text{ м.}$$

Уравнения состояния содержат нагрузки, воздействующие со стороны разрабатываемой среды – мерзлых грунтов. По результатам обработки большого объема осциллограмм экспериментальных исследований процесса резания

сезонномерзлых грунтов произведена аппроксимация нагрузок воздействующих на рабочие органы траншейных экскаваторов.

Сила резания грунта, зависящая от физико-механических свойств грунта C , толщины стружки h , ширины резца b , скорости резания V_p , шага расстановки резцов t , размера включений ζ (табл. 3.1) и коэффициента блокированности μ задается в математической модели аналитическими зависимостями (3.12), кроме этого весь спектр нагрузок, действующих на рабочие органы роторных траншейных экскаваторов при разработке мерзлых грунтов с включениями может быть формализован тремя расчетным случаем (рис. 2.23–2.26):

$$\left. \begin{aligned} T'_K &= N_k \cdot K'_V \cdot K'_\alpha \cdot K_\zeta \cdot \mu; \\ T_k &= 8,32(-0,283 + 0,149 \cdot 10^{-1} C - 0,221 \cdot 10^{-4} C^2) \times \\ &\times (-0,419 \cdot 10^{-1} + 0,75 \cdot 10^{-1} h - 0,54 \cdot 10^{-3} h^2) \times \\ &\times (0,178 \cdot 10^{-2} + 0,06b - 0,67 \cdot 10^{-3} b^2) \cdot 10^2; \\ K'_V &= (0,9244 + 0,063 V_p) \left(0,98 + 0,023 \frac{t-b}{h} \right); \\ K'_\alpha &= (0,456 + 0,068 \alpha) \left(0,98 + 0,03 \frac{t-b}{h} \right); \\ K_\zeta &= 0,1033 + 39,18 \zeta - 0,00043 n^2; \\ \mu &= 0,516 + 0,2666 \left(\frac{t-b}{h} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Таблица 3.1 – Фракционный состав гравийно-галечниковых включений сезонномерзлых грунтов

Размер частиц (ζ) $\cdot 10^{-3}$ м	0,1	0,1–2	2–8	8–30	30–50	50–90
Состав частиц (n), %	28–32	20–24	16–18	16–18	9–11	3–5

где $J_n, J_{np}, J_{gm}, J_{ж}$ – момент инерции основного гидравлического насоса и насоса подпитки, гидромотора, рабочей жидкости в гидролиниях; ω_{gm} – частота вращения выходного вала гидромотора; M_n, M_{gm} – момент привода насоса, момент на валу гидромотора; P_{n1} – давление жидкости в напорной магистрали; $Q_n, Q_{gm}, Q_{пк}$,

$Q_{ок}$ – расход гидравлической жидкости насоса, гидромотора, предохранительного и обратного клапанов; V_H , V_M , $\bar{e}_H$ – рабочие объемы насоса, гидромотора и параметры регулирования насоса; E – эквивалентный модуль упругости системы «жидкость – стенка трубопровода»; $E_{ж}$, $E_{тр}$ – модуль упругости рабочей жидкости и трубопровода; $d_{тр}$ – внутренний диаметр трубопровода; c_{Σ} – жесткость трубопровода; $\delta_{тр}$ – толщина стенки трубопровода; μ – модуль упругости материала трубопровода; r_1 , r_2 – внутренний и внешний радиусы трубопровода; P_{ki} – позиционная составляющая нагрузки резания мерзлого грунта; φ_m , φ_p – угол поворота вала гидромотора и рабочего органа; λ_1 , λ_2 – гидравлические сопротивления напорной и сливной гидролиний; M_{mc} – математическое ожидание суммарного момента на режущих зубьях ротора, зависящий от глубины резания грунта; K_n – коэффициент, зависящий от количества одновременно контактирующих с грунтом зубьев; M_c – момент сопротивления, учитывающий вариацию гравийно-галечниковых включений и физико-механических свойств сезонно-мерзлого грунт; M_G – момент сопротивления от веса грунта в ковше; i , i_p – передаточное число редуктора привода насоса, привода ротора; $x_{ок}$, $x_{пк}$ – перемещение рабочего элемента обратного и предохранительного клапанов; $S_{ок}$, $S_{пк}$ – эффективная площадь рабочих элементов обратного и предохранительного клапанов; $C_{ок}$, $C_{пк}$ – жесткость пружины обратного и предохранительного клапанов; $P_{ок}$, $P_{пк}$ – давление срабатывания обратного и предохранительного клапанов; $B_{ок}$, $A_{пк}$ – коэффициент гидродинамической силы обратного и предохранительных клапанов; $\eta_{гп}$ – общий коэффициент полезного действия системы гидропривода.

Для реализации имитационной модели с использованием Matlab (Simulink), учитывающей влияние сил резания сезонно-мерзлых однородных грунтов и грунтов с включениями, оценивающей режим автоколебаний давления рабочей жидкости и изменения параметров гидропривода рабочего органа приняты исходные данные (табл. 3.2), размерность которых указана в системе СИ.

Таблица 3.2 – Исходные данные имитационной модели режима автоколебаний давления рабочей жидкости и изменения параметров гидропривода рабочего органа

Константа	Формула	Значение	Размерность
A_1	$A_1 = \frac{\omega_{дв}}{K_{упр} \cdot i_{пр}}$	$7,63 \cdot 10^{12}$	КГ/(м ⁴ ·с ³)
A_2	$A_2 = \frac{q_m}{K_{упр}}$	$1,347 \cdot 10^7$	Па
A_3	$A_3 = 1/K_{упр}$	$4,696 \cdot 10^{10}$	КГ/(м ⁴ ·с ²)
A_4	$A_4 = \frac{K_p}{K_{упр}}$	10,890	·с ⁻¹
A_5	$A_5 = \frac{S_{ок}}{M_{ок}}$	0,0402	м ³ /(КГ·с ²)
A_6	$A_6 = \frac{B_{ок}}{M_{ок}}$	1123,700	м ⁻⁴
A_7	$A_7 = \frac{h_{ок}}{M_{ок}}$	3,270	с ⁻¹
A_8	$A_8 = \frac{C_{ок}}{M_{ок}}$	1721,310	с ⁻²
A_9	$A_9 = \frac{S_{пк}}{M_{пк}}$	$7,53 \cdot 10^{-3}$	м ³ /(КГ·с ²)
A_{10}	$A_{10} = \frac{A_{пк}}{M_{пк}}$	1,860	м ⁻⁴
A_{11}	$A_{11} = \frac{h_{пк}}{M_{пк}}$	106,670	с ⁻¹
A_{12}	$A_{12} = \frac{C_{пк}}{M_{пк}}$	$5,533 \cdot 10^6$	с ⁻²
A_{13}	$A_{13} = \frac{q_m}{J_{гм}}$	0,034	м/КГ
A_{14}	$A_{14} = \frac{k_{гм}}{J_{гм}}$	3,012	с ⁻¹
A_{15}	$A_{15} = \frac{b_1}{J_{гм}}$	$2,35 \cdot 10^{-5}$	м/КГ
A_{16}	$A_{16} = \frac{C_{21}}{i_{по} \cdot J_{гм}}$	$7,172 \cdot 10^4$	с ⁻²

Окончание табл. 3.2

Константа	Формула	Значение	Размерность
A_{17}	$A_{17} = i_{po}$	8,500	—
A_{18}	$A_{18} = \frac{C_{22}}{J_{po}}$	33,229	м ⁻⁴
A_{19}	$A_{19} = \frac{i_{po}}{J_{po}}$	$4,94 \cdot 10^{-2}$	(кг·м ²) ⁻¹
A_{20}	$A_{20} = \frac{K_n}{i_{np} \cdot J_{po}}$	$7,41 \cdot 10^{-2}$	кг/м ²
A_{21}	$A_{21} = \frac{1}{i_{np} \cdot J_{po}}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	кг/м ²
$P_{пк}$		$1,569 \cdot 10^7$	Па
$P_{ок}$		$1,569 \cdot 10^5$	Па
$P_{нп}$		$1,079 \cdot 10^6$	Па
P_c		$4,904 \cdot 10^5$	Па

Осциллограммы нагрузок на рабочем органе роторного траншейного экскаватора полученные при разработке сезонно-мерзлого грунта показывают, что данный входной сигнал может быть задан в модели не только уравнениями (3.12), но и в виде единичных импульсов (см. рис. 2.22 – зона А), скачков (приложение нагрузки и сброс нагрузки – рис. 3.5, зона В и зона С), что существенно повышает достоверность результатов исследования модели.

Из условия реализации процесса резания мерзлых грунтов необходимый момент на валу гидромотора в уравнениях состояния привода ротора принят:

$$M_P(t) > M_{mc}(t) \cdot K_n + M_c(t), \quad (3.13)$$

где $M_{mc}(t)$ – математическое ожидание момента на режущих зубьях ротора, зависящий от глубины резания грунта; K_n – коэффициент, зависящий от количества одновременно контактирующих с грунтом зубьев; M_c – момент сопротивления, учитывающий вариацию гравийно-галечниковых включений и физико-механических свойств сезонно-мерзлого грунта.

Момент сопротивления резания сезонно-мерзлого грунта, учитывающий вариацию гравийно-галечниковых включений и физико-механических свойств грунта

$$M_c = T_K \cdot R_r, \quad (3.14)$$

где T_K – усилие резания грунта на зубьях ротора; R_r – радиус установки зубьев относительно вала привода ротора.

Разработанная математическая модель применена для исследования статических и динамических характеристик системы гидропривода с регулируемой фазой рабочих процессов отдельных поршней высоко моментного гидромотора, что позволяет снижать пульсации давлений в напорных магистралях гидропривода вращения ротора.

Надежность математической модели зависит от количества и значений вводимых эмпирических констант, а также зависимостей, обусловленных типоразмером роторного траншейного экскаватора, а также существенно связанных с режимами работы их привода.

Существующие критерии оценки работоспособности динамических нелинейных систем привода трудно применимы для оценки динамических процессов гидромеханических систем привода рабочих органов траншейных экскаваторов, взаимодействующих с мерзлым грунтом. Поэтому лучшей демонстрацией нахождения системы в работоспособном состоянии является характер изменения выходного управляемого сигнала, в качестве комплексного критерия [47] предложена величина нормированного динамического момента привода рабочих органов землеройно-транспортных машин.

Момент $M(t)$, развиваемый радиально-поршневым гидромотором, согласно теории привода, при постоянстве приведенного к валу момента инерции $J_{пр}$, может быть представлен в виде суммы суммарного приведенного к валу статического момента $M_{спр}(t)$ и динамической составляющей $J_{пр} \cdot \frac{d\omega_{гм}(t)}{dt}$, пропорцио-

нальной ускорению вала гидромотора $\frac{d\omega_{гм}(t)}{dt}$:

$$M(t) = J_{\text{пр}} \cdot \frac{d\omega_{\text{гм}}(t)}{dt} + M_{\text{спр}}(t). \quad (3.15)$$

Эту составляющую назовем динамическим моментом

$$M(t) = J_{\text{пр}} \frac{d\omega_{\text{гм}}(t)}{dt}.$$

Динамический момент привода, таким образом, полностью определяется изменениями скорости $\frac{d\omega_{\text{гм}}(t)}{dt}$. Так, при изменениях скорости, вызванных изменениями нагрузки на рабочем органе, разрабатывающем мерзлый грунт, этот динамический момент полностью отвечает на изменения $M_{\text{спр}}(t)$ и отображает их влияние на работоспособность системы привода.

Динамический момент определяется из уравнения:

$$J_{\text{пр}} \cdot \frac{d\omega_{\text{гм}}(t)}{dt} = M_{\text{гм}}(t) - M_{\text{с}}(t). \quad (3.16)$$

где $\omega_{\text{гм}}(t)$ – угловая скорость вала высоко моментного гидромотора привода рабочего органа; $M_{\text{гм}}(t)$ и $M_{\text{с}}(t)$ – моменты на валу гидромотора и моменты сопротивления со стороны разрабатываемого грунта, приведенные к валу высоко моментного гидромотора; $J_{\text{пр}}$ – приведенный к валу гидромотора момент инерции рабочего органа.

Исследования имитационной динамической модели гидрообъемной трансмиссии подсистемы привода рабочего органа траншейного экскаватора [50, 51] позволили получить диаграммы изменения значений динамического момента и мгновенной мощности при воздействии на систему привода рабочего органа траншейного экскаватора всех формализованных видов нагрузки при разработке сезонно-мерзлых грунтов.

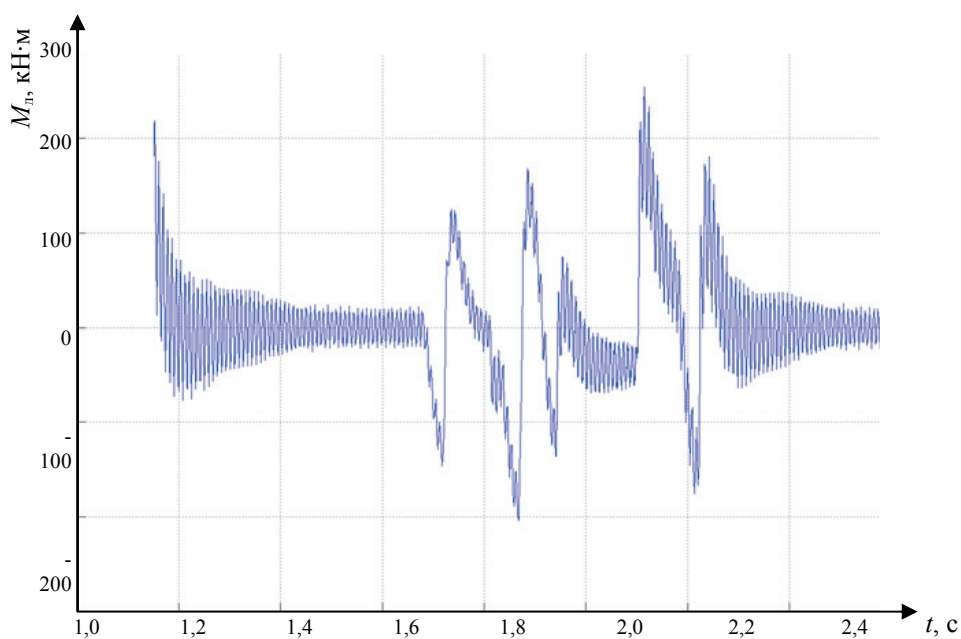


Рисунок 3.4 – Изменение динамического момента гидропривода рабочего органа при воздействии нагрузок первого типа (фрагмент осциллограммы, начальное время подключения нагрузки $t = 1$ с)

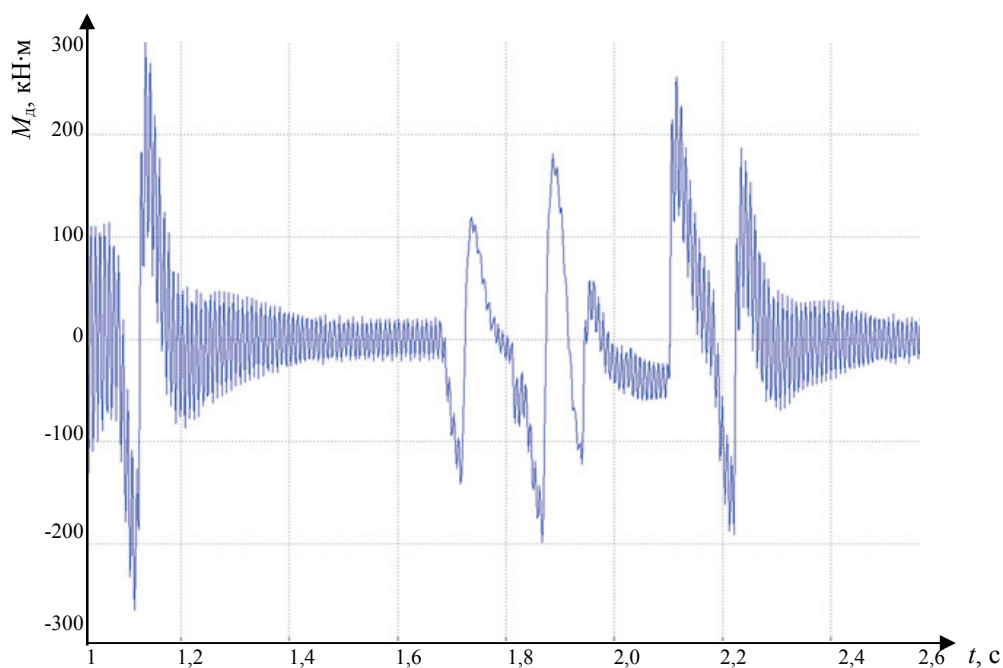


Рисунок 3.5 – Динамический момент привода, при увеличении q_m на 2,7 % и воздействии нагрузок первого типа (фрагмент осциллограммы, начальное время подключения нагрузки $t = 1$ с)

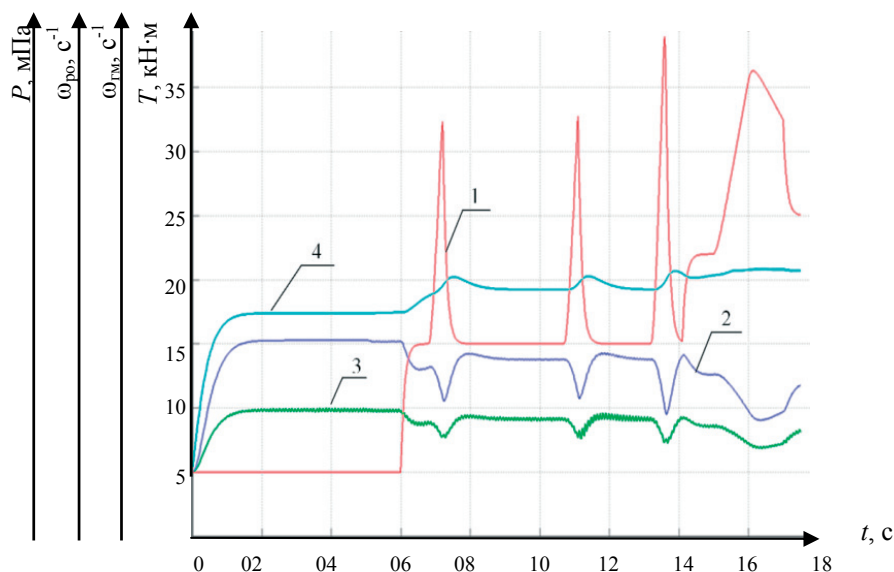


Рисунок 3.6 – Изменение параметров привода при воздействии нагрузок третьего типа на привод рабочего органа (начальное время подключения нагрузки $t = 0,55$ с)

На рис. 3.4 в качестве примера приведены диаграммы изменения динамического момента, на рис. 3.5 – изменения динамического момента при увеличении рабочего объема гидромотора на 2,7 % за счет регулирования фазы при воздействии на рабочий орган нагрузки первого типа.

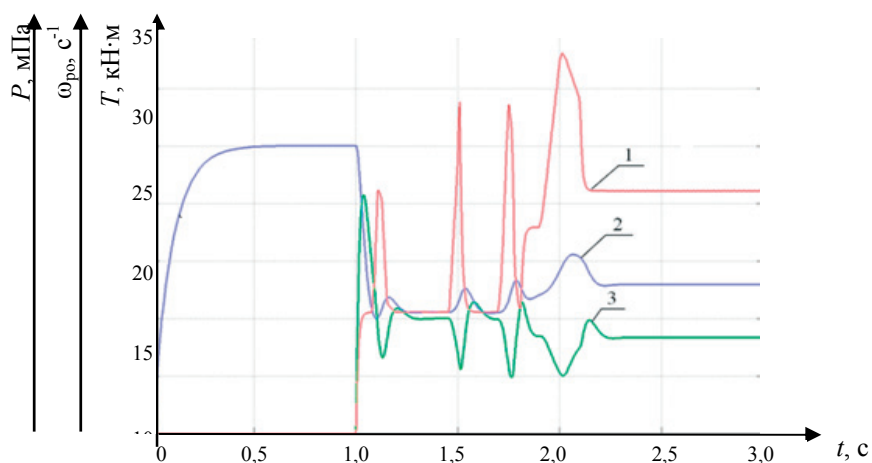


Рисунок 3.7 – Изменение параметров привода рабочих органов при воздействии нагрузок третьего типа и увеличении q_m на 2,7 % по упрощенной имитационной модели: 1 – осциллограмма нагрузки; 2 – угловая скорость вала гидромотора; 3 – угловая скорость вала рабочего органа экскаватора

Нагрузка (осциллограмма – позиция 1) определяет характер динамических процессов изменения основных переменных состояния исследуемой системы (рис. 3.9, 3.10) гидромеханического привода траншейного экскаватора: давления рабочей жидкости P_n в гидравлической системе (осциллограмма – позиция 4), угловой скорости вращения вала гидромотора $\omega_{гм}$ (осциллограмма-позиция 2), угловой скорости вращения вала рабочего органа $\omega_{ро}$ экскаватора (осциллограмма-позиция 3), величины смещения предохранительного клапана $X_{пк}$ (осциллограмма – позиция 5). Для удобства представления на одном графике угловая скорость вращения вала рабочего органа траншейного экскаватора на осциллограммах приведена в масштабе 4:1, а величина давления в МПа. Определяющими являются первые три переменных состояния, поэтому, они и приведены вместе на фоне действующей нагрузки. Некоторые осциллограммы представлены в виде фрагментов по разным интервалам времени и легко могут быть состыкованы визуально.

Изменение параметров гидромеханического привода рабочего органа на привере воздействия нагрузок третьего типа и изменении рабочего объема радиально-поршневого гидромотора приведено на рис. 3.10, 3.11.

Из графиков следует, что наиболее существенное влияние на работоспособность системы привода «насос–гидромотор–рабочий орган» траншейного экскаватора оказывает нагрузка со стороны разрабатываемого мерзлого грунта и изменение фазы рабочих процессов высокомоментного гидромотора (рис. 3.7–3.10).

Уменьшение динамики изменения давления (осциллограмма позиция 2) в напорной магистрали при изменении фазы гидромотора обусловлено снижением относительной нагрузки (осциллограмма позиция 1) на систему гидропривода и как следствие–увеличение динамического момента привода в условиях действующих динамических нагрузок со стороны разрабатываемого сезонно-мерзлого грунта. Изменения динамического момента системы гидропривода с регулируемой фазой радиально-поршневого гидромотора привода

роторного рабочего органа для действующих значений суммарных нагрузок на роторе, связанной с изменением толщины грунтовой стружки, физико-механических свойств сезонно-мерзлого грунта приведены на рис. 3.11.

Полученное значение динамического момента позволяет определить значение динамической мощности.

Предложенная в качестве критерия нормированная динамическая мощность $P(t)$ на валу гидромотора привода роторного рабочего органа траншейного экскаватора без учета потерь, как критерий оценки состояния системы привода рабочего органа траншейного экскаватора, определяется из уравнения:

$$\overline{P(t)} = \frac{M(t) \cdot \omega_{\text{гм}}(t)}{P_{\text{дв}}(t)}. \quad (3.17)$$

где $P_{\text{дв}}(t)$ – мощность двигателя траншейного экскаватора при разработке эталонного грунта.

Преимуществом такого критерия является возможность не только оперативно оценить адаптивные свойства привода по отношению к входным нагрузкам, воздействующих на рабочие органы землеройно-транспортных машин, но и появляющаяся возможность решения задач управления параметрами гидромеханического нерегулируемого привода и оценки уровня его соответствия условиям эксплуатации.

Величина динамического момента привода рабочего органа позволяет получить значение мгновенной мощности:

$$P_{\text{пр}}(t) = \left(J_{\text{пр}} \cdot \frac{dw(t)}{dt} + M_c(t) \right) \cdot w(t). \quad (3.18)$$

Произведение суммы нормированного динамического момента и момента сопротивления со стороны разрабатываемого грунта на значение угловой скорости рабочего органа роторного траншейного экскаватора позволяет получить величину мгновенной мощности (рис. 3.11).

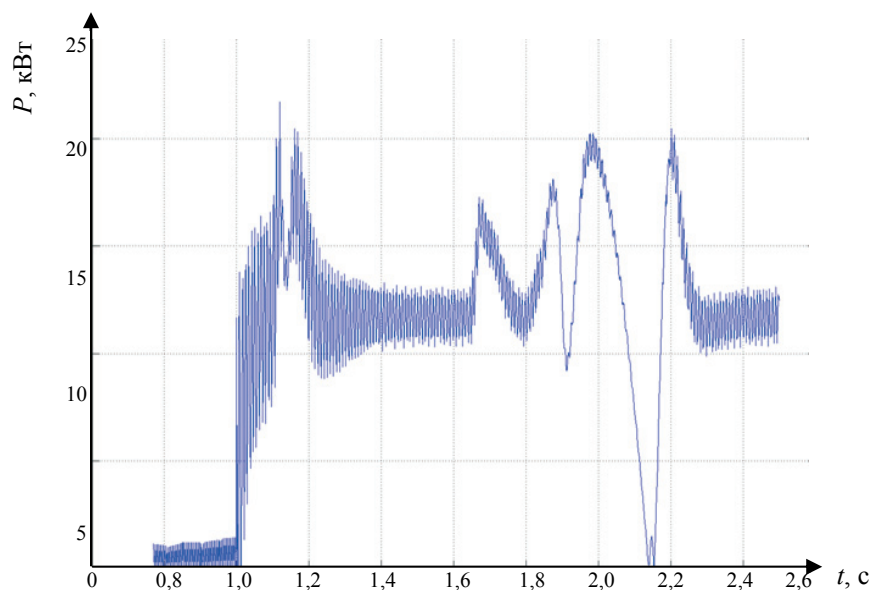


Рисунок 3.8 – Абсолютное значение мгновенной мощности на валу гидромотора без учета потерь при воздействии нагрузки первого типа (начальное время подключения нагрузки $t = 1$ с)

Показатель динамической мощности на валу гидромотора привода ротора применим на стадии проектирования гидрообъемных трансмиссий траншейных экскаваторов и позволяет уточнить коэффициент запаса мощности при выборе типоразмера гидромотора с учетом конструктивных особенностей рабочего органа, прочностных характеристик разрабатываемого сезонно-мерзлого грунта и действующих на систему привода моментов сопротивления.

Мгновенная механическая мощность $P(t)$ на валу гидромотора привода роторного рабочего органа траншейного экскаватора без учета потерь определяется по выражению:

$$P(t) = M(t) \cdot \omega(t). \quad (3.19)$$

Здесь $M(t)$ момент на валу, а $\omega(t)$ – угловая скорость гидромотора. При этом

$$M(t) = J_{\text{пр}} \cdot \frac{d\omega_{\text{зм}}(t)}{dt} + M_{\text{с пр}}(t), \quad (3.20)$$

где $J_{\text{пр}}$ приведенный к валу момент инерции, а $M_{\text{с пр}}(t)$ – приведенный к валу высокомоментного гидромотора момент сопротивления, создаваемый нагрузкой, приложенной к рабочему органу.

Структура математической модели позволяет исследовать возможность влияния переменных рабочего процесса гидропривода роторного траншейного экскаватора на характер процессов, устойчивость системы и позволяет определить границы устойчивости.

Единственным методом исследования математической модели является моделирование уравнений состояния и связи на цифровой вычислительной машине.

В качестве метода исследования выбран метод представления уравнений в программе моделирования SIMULINK системы математического исследования MATLAB.

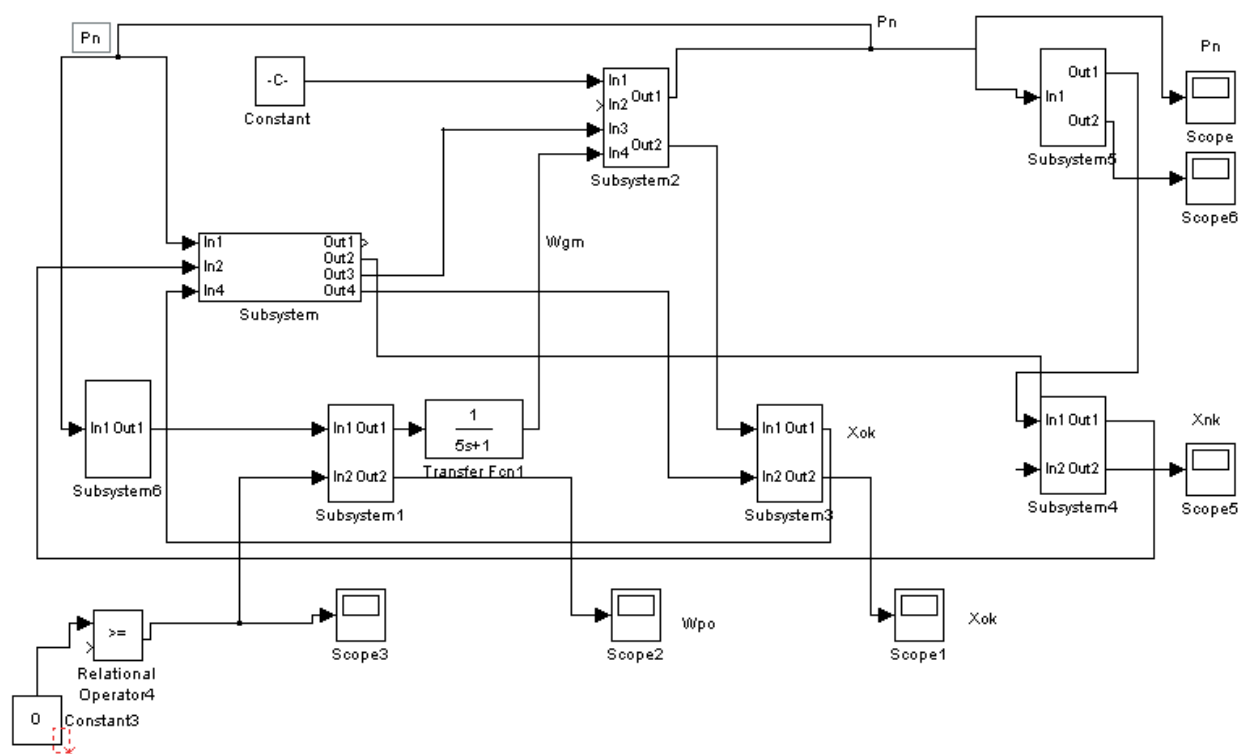


Рисунок 3.9 – Структурная схема математической модели

Результатом исследования являются действительные характеристики временных процессов переменных модели.

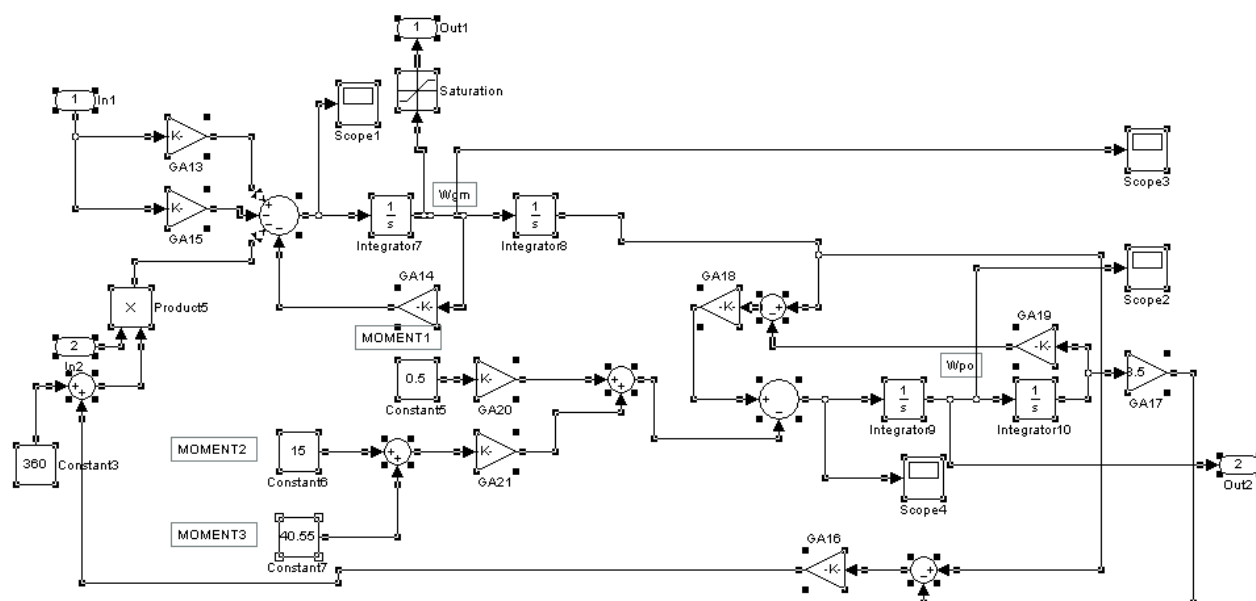


Рисунок 3.10 – Структурная схема подсистемы отображения действующих моментов на рабочем органе

Одним из методов выхода из неустойчивости системы управления является использование явной схемы с корректором. Использование корректора предполагает предсказание скорости изменения границы устойчивости со стороны привода и нагрузки со стороны разрабатываемого сезонно-мерзлого грунта на следующем шаге расчета. Так как нагрузки, используемые в модели, приняты по результатам натурного эксперимента, что позволяет точно предсказать результаты исследования модели и обеспечивает ее устойчивость за счет изменения закона корректора, зависящего от действующей нагрузки.

Разработка имитационной динамической модели траншейного экскаватора осуществляется на основе системы уравнений состояния и экспериментальных данных, включающих осциллограммы нагрузок, возникающих на резце рабочего органа траншейного экскаватора при резании мерзлых однородных грунтов, а также при разрезании включений в мерзлых грунтах различного гранулометрического состава. Модель предназначена для исследования различных динамических режимов, имеющих место при работе траншейного экскаватора. Она позволяет исследовать характер временных динамических процессов, обусловленных изменениями переменных состояния системы, судить об устойчи-

ности этих процессов, например, в зависимости от возможных изменений параметров системы, типа нагрузок, возникающих на резце рабочего органа траншейного экскаватора.

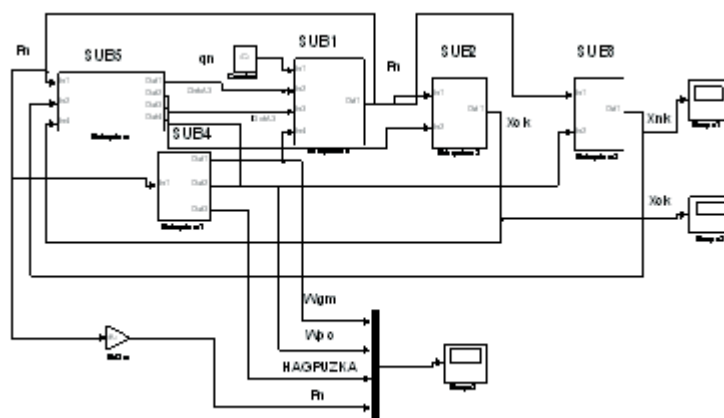


Рисунок 3.11 – Структурная функциональная схема имитационной динамической модели траншейного экскаватора

Структурная функциональная схема имитационной динамической модели траншейного экскаватора (рис. 3.14) состоит из пяти подсистем (Subsystems: SUB1- SUB5). Подсистемы SUB1, SUB2, SUB3, SUB5 имитируют процессы в гидравлической питающей подсистеме динамической модели траншейного экскаватора. Связи этих подсистем характеризуют связи соответствующих уравнений состояния.

Первая подсистема (Sub1) имитирует решение первого уравнения состояния. Входными переменными этой подсистемы являются переменные, представленные в правой части первого уравнения: производительность нагнетающего насоса q_n , скорость гидравлического мотора $\omega_{гм}$, расходы гидравлической жидкости через предохранительный клапан $Q_{пк}$ и обратный клапан $Q_{ок}$. Выходной переменной этой подсистемы определена переменная, характеризующая величину давления рабочей жидкости P_n в гидросистеме.

Внутренняя структура этой подсистемы (рис. 3.15), позволяет получить представление о внутренних связях и коэффициентах A_1 , A_2 , A_4 представленных в первом уравнении. Отсюда видно, что при решении переменная P_n использу-

ется в качестве отрицательной обратной связи. Выходная переменная сумматора (левая часть первого уравнения состояния) характеризует скорость изменения во времени гидравлического давления рабочей жидкости $dP_n(t)/dt$ и поступает на вход интегратора подсистемы. Выход этого интегратора является выходом этой гидравлической подсистемы, которую можно назвать питающей.

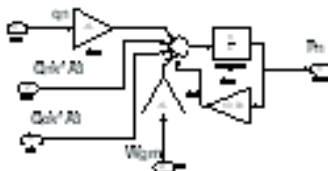


Рисунок 3.12 – Имитационная динамическая модель SUB1 напорной гидравлической подсистемы траншейного экскаватора

Вторая подсистема (Sub2).

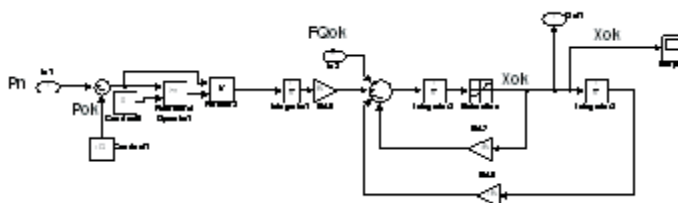


Рисунок 3.13 – Имитационная динамическая модель SUB2 обратного клапана гидравлической подсистемы траншейного экскаватора

Вторая подсистема (Sub2 рис 3.16), имитирует решение второго уравнения состояния.

Входными переменными этой подсистемы являются переменные, представленные в правой части второго уравнения: величина давления рабочей жидкости P_n в гидросистеме и нелинейная функция расхода гидравлической жидкости через обратный клапан $FQ_{ок}$. Выходной переменной этой подсистемы определена переменная, характеризующая величину смещения обратного клапана $X_{ок}$.

Внутренняя структура этой подсистемы, позволяет получить представление о внутренних связях и коэффициентах A_5 , A_7 , A_8 представленных во втором

уравнении. Отсюда видно, что при решении этого уравнения переменная $X_{ок}$ и ее интеграл используются в качестве отрицательных обратных связей. Выходная переменная сумматора (левая часть второго уравнения состояния) характеризует скорость изменения во времени величины смещения обратного клапана $dX_{ок}(t)/dt$ и поступает на вход интегратора подсистемы. Выход этого интегратора является выходом $X_{ок}$ этой гидравлической подсистемы.

Внутри этой подсистемы также задается величина $P_{ок}$ уставки давления обратного клапана. Нелинейный блок Saturation настроен так, что учитываются реальные физические ограничения на диапазон изменения величины смещения обратного клапана $X_{ок}$.

Третья подсистема (Sub3).

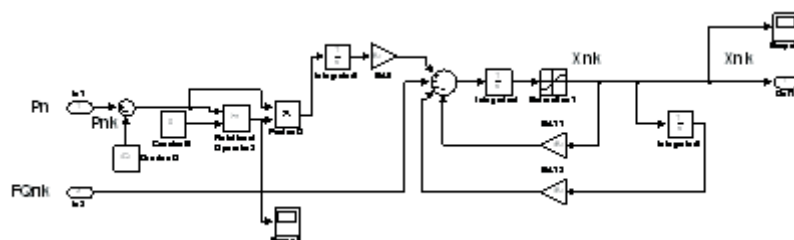


Рисунок 3.14 – Имитационная динамическая модель SUB3 предохранительного клапана гидравлической подсистемы траншейного экскаватора

Третья подсистема (Sub3) (рис. 3.17), имитирует решение третьего уравнения состояния.

Входными переменными этой подсистемы являются переменные, представленные в правой части второго уравнения: величина давления рабочей жидкости P_n в гидросистеме и нелинейная функция расхода гидравлической жидкости через предохранительный клапан $FQ_{пк}$. Выходной переменной этой подсистемы определена переменная, характеризующая величину смещения предохранительного клапана $X_{пк}$.

Внутренняя структура этой подсистемы, позволяет получить представление о внутренних связях и коэффициентах A_9 , A_{11} , A_{12} представленных во втором уравнении. Отсюда видно, что при решении этого уравнения переменная $X_{пк}$ и ее интеграл используются в качестве отрицательных обратных связей.

Выходная переменная сумматора (левая часть третьего уравнения состояния) характеризует скорость изменения во времени величины смещения предохранительного клапана $dX_{пк}(t)/dt$ и поступает на вход интегратора подсистемы. Выход этого интегратора является выходом $X_{пк}$ этой гидравлической подсистемы.

Четвертая подсистема (Sub4).

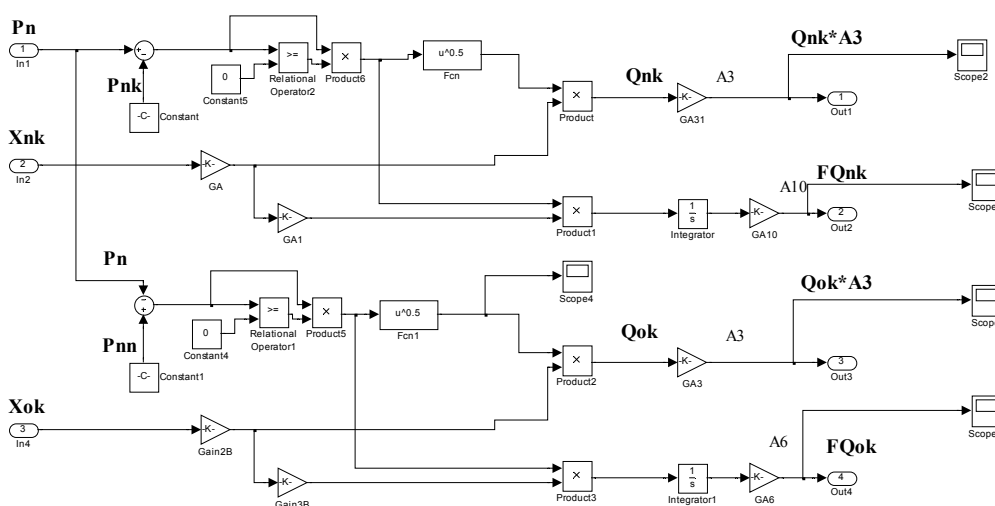


Рисунок 3.15 – Имитационная динамическая модель SUB4 вычисления функций, зависящих от расхода рабочей жидкости через клапаны гидравлической подсистемы траншейного экскаватора

Внутри этой подсистемы также задается величина $P_{пк}$ настройки давления предохранительного клапана. Нелинейный блок Saturation1 настроен так, что учитываются реальные физические ограничения на диапазон изменения величины смещения предохранительного клапана $X_{пк}$.

В четвертой подсистеме Sub4 (рис. 3.18) имитируются расходы рабочей жидкости через обратный и предохранительные клапаны $Q_{ок}$ и $Q_{пк}$, нелинейная функция расхода гидравлической жидкости через обратный клапан $FQ_{ок}$, нелинейная функция расхода гидравлической жидкости через предохранительный клапан $FQ_{пк}$, используемые при имитационном моделировании трех первых уравнений состояния. Указанные функции рассчитываются в соответствии с выражениями. Входными переменными подсистемы являются: величина дав-

ления рабочей жидкости P_n в гидросистеме, величина смещения обратного клапана $X_{ок}$, величина смещения предохранительного клапана $X_{пк}$. Внутренние связи в этой подсистеме и используемые вычислительные и логические блоки определяют условия работы указанных клапанов. Выходные переменные определены в соответствии с вычисляемыми компонентами в уравнениях состояния гидравлической подсистемы траншейного экскаватора.

Пятая подсистема (Sub5).

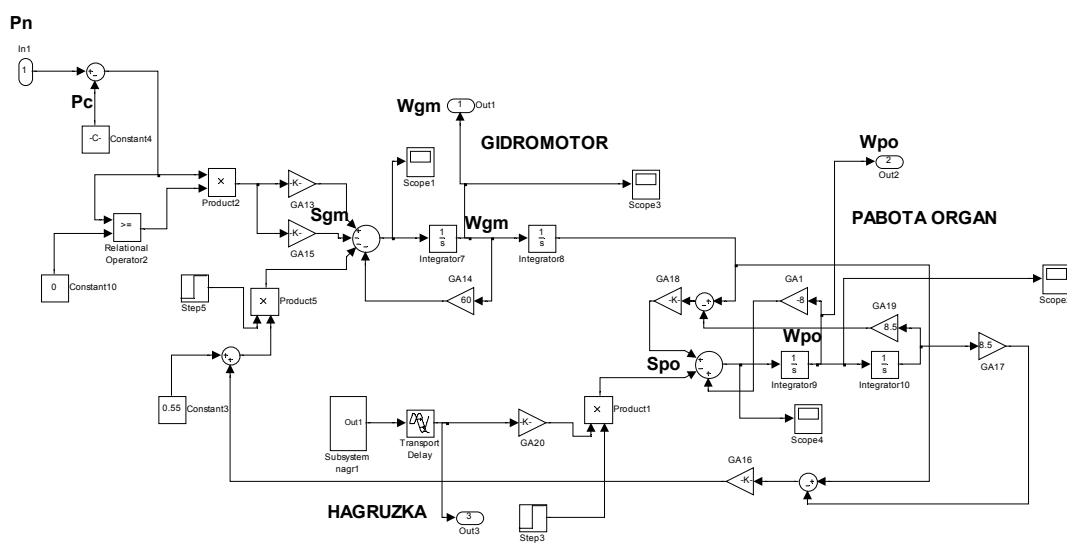


Рисунок 3.16 – Имитационная динамическая модель SUB5 гидромеханической подсистемы траншейного экскаватора

Пятая подсистема (Sub5) (рис. 3.19) имитирует решение четвертого и пятого уравнений состояния. Входной переменной этой подсистемы является величина давления рабочей жидкости P_n в гидравлической системе. А выходными определены следующие переменные: $W_{гм}$ – угловая скорость вращения вала гидромотора, $W_{ро}$ – угловая скорость вращения вала рабочего органа и NAGRUSKA, одноименное название имеет внутренняя подсистема, которая формирует временную диаграмму возможной нагрузки траншейного экскаватора. В подсистеме задается давление слива P_c .

Коэффициенты $A_1, \dots, A_{21}$ отражают конструктивные особенности гидромеханической системы привода роторного рабочего органа (рабочие объемы насоса и гидромотора, длины и диаметры гидролиний, рабочие характеристики

регулирующей аппаратуры, состояние гидравлической жидкости, передаточное число редуктора привода ротора) и геометрические размеры рабочего органа (диаметр, количество и порядок расстановки режущих зубьев) для конкретного траншейного экскаватора.

Компоненты правой части четвертого уравнения состояния поступают на вход сумматора S_{gm} . Коэффициенты A_{13} , A_{14} , A_{15} , A_{16} имитируются одноименными усилителями GA13–GA16. Выход этого сумматора представляет правую часть уравнения $dW_{gm}(t)/dt$ – угловое ускорение вращения вала гидромотора. Эта переменная интегрируется интегратором 7. В результате четвертое уравнение решается. Переменная, соответствующая углу поворота вала гидромотора, выход интегратора 8, используется при решении пятого уравнения.

Компоненты правой части пятого уравнения состояния поступают на вход сумматора S_{po} . Коэффициенты A_{17} , A_{18} , A_{19} , A_{20} имитируются одноименными усилителями GA17–GA20. Выход этого сумматора представляет правую часть уравнения $dW_{po}(t)/dt$ – угловое ускорение вращения вала рабочего органа траншейного экскаватора. Эта переменная интегрируется интегратором 9. В результате пятое уравнение решается. Переменная, соответствующая углу поворота вала рабочего органа, выход интегратора 10, используется в качестве обратной связи при решении пятого уравнения. Время подключения нагрузки имитируется звеном идеального запаздывания (Transport Delay), выход которого – переменная NAGRUZKA – можно наблюдать в блоке системы (Scope2) (рис. 3.19).

В качестве метода исследования переходных процессов в гидромеханических системах привода рабочего органа роторных траншейных экскаваторов выбран метод представления уравнений в программе моделирования SIMULINK системы математического исследования MATLAB. Результатом исследования модели являются действительные характеристики временных процессов выходных характеристик модели привода и переходные характеристики системы, а также границы устойчивости системы управления.

Исходными данными для математической модели динамики гидравлического привода роторного траншейного экскаватора являются ее дифференциальные уравнения в пространстве переменных состояния.

Выходом подсистемы Sabsistem 4 является давление рабочей жидкости $P(t)$ в напорной магистрали гидрообъемной системы привода, входными параметрами являются рабочий объем насоса $q_n(t)$, расход жидкости через предохранительный клапан $Q_{ок}(X_{ок}(t))$, расход жидкости через обратный клапан $Q_{пк}(X_{пк}(t))$, скорость вала гидромотора $\omega_{гм}(t)$ привода рабочего органа. Давление рабочей жидкости P_n , в свою очередь является входной величиной для остальных подсистем Sabsistem, Sabsistem 1, Sabsistem 2, Sabsistem 3.

Выходом подсистемы Sabsistem 2 является перемещение рабочего элемента обратного клапана $X_{ок}(t)$, входным сигналом данной подсистемы является кроме давления P_n являются величина настройки обратного клапана $P_{ок}$ и расход рабочей жидкости через клапан $Q_{ок}(X_{ок}(t))$.

Выходом Sabsistem 3 является перемещение рабочего элемента предохранительного клапана $X_{пк}(t)$, входным сигналом кроме давления величина настройки предохранительного клапана $P_{пк}$ является расход рабочей жидкости через клапан $Q_{пк}(X_{пк}(t))$.

Выходом Sabsistem является расходы рабочей жидкости через обратный $Q_{ок}(X_{ок}(t))$. и предохранительный клапаны $Q_{пк}(X_{пк}(t))$, входным являются давление, перемещения рабочих элементов обратного $X_{ок}(t)$ и предохранительного клапанов $X_{пк}(t)$.

Давление рабочей жидкости в напорной магистрали P_n является входным сигналом подсистемы Sabsistem 1, имеющей четыре выходных параметра – скорость гидромотора $\omega_{гм}(t)$, скорость рабочего органа $\omega_{ро}(t)$, формализацию нагрузки M_c и мгновенной мощности $P_{пр}(t)$.

Все выходные параметры подсистемы Sabsistem 1 выводятся на экран электронного осциллографа (осциллоскопа) Skope 2. В подсистему Sabsistem 1 входит нагрузка возникающая на режущем органе роторного траншейного экскаватора при разработке сезонно-мерзлых грунтов.

Перемещение рабочего элемента обратного клапана подсистемы Subsistem 3 выводятся на экран электронного осциллографа (осциллоскопа) Skope 3, перемещения рабочего элемента предохранительного элемента на экран Skope 1.

Подсистема NAGRUZKA (рис. 3.20–3.22) является внутренней подсистемой Sub5.

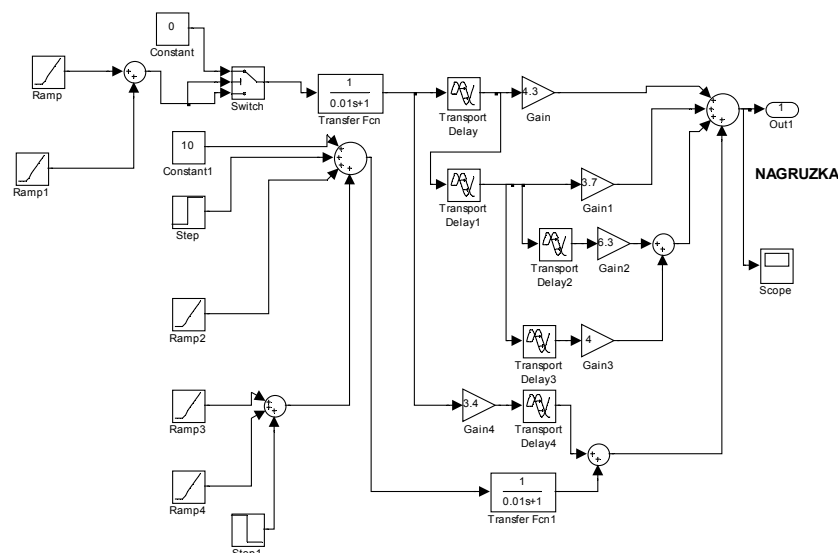


Рисунок 3.17 – Имитационная динамическая модель нагрузки первого типа гидромеханической подсистемы траншейного экскаватора

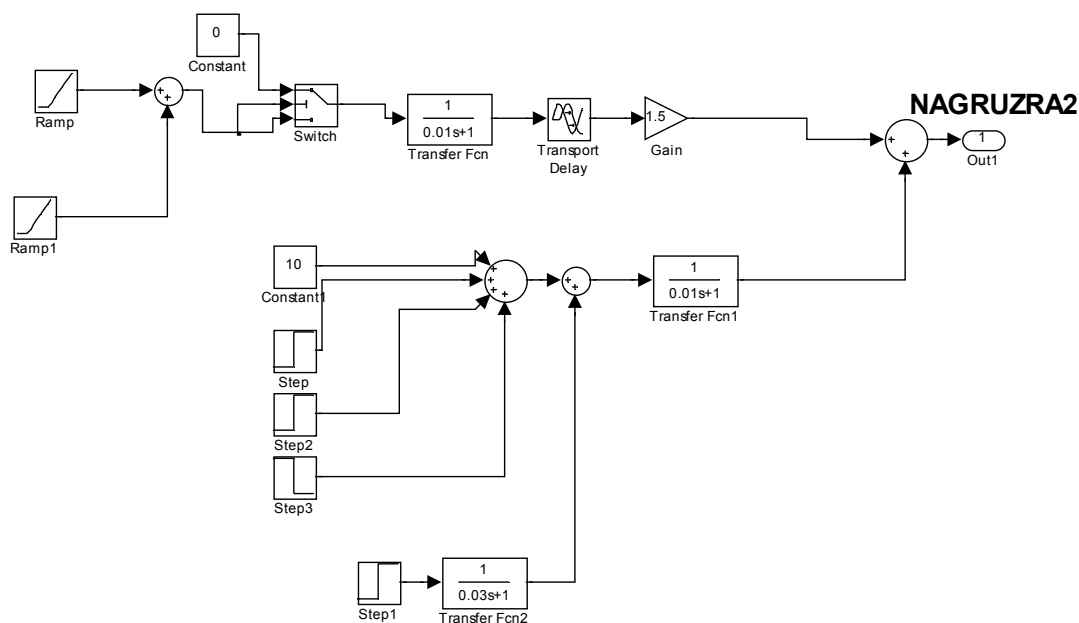


Рисунок 3.18 – Имитационная динамическая модель нагрузки второго типа гидромеханической подсистемы траншейного экскаватора

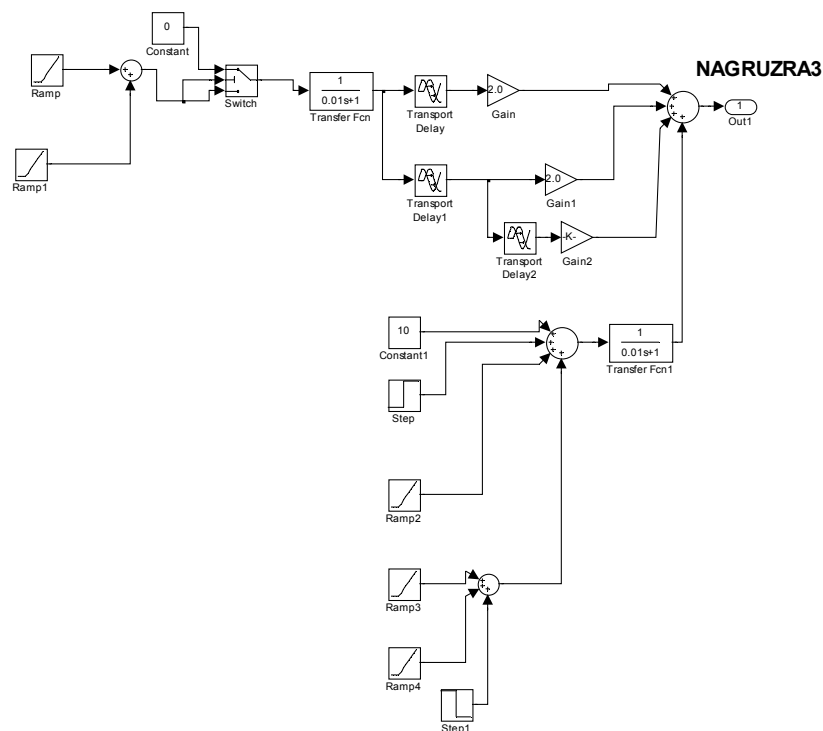


Рисунок 3.19 – Имитационная динамическая модель нагрузки третьего типа гидромеханической подсистемы траншейного экскаватора

Выбор типа нагрузки определяется конкретным исследованием. Имитационные динамические модели нагрузок воспроизводят экспериментальные данные, полученные при обработке осциллограмм. Так подсистема NAGRUZRA1 имитирует усилия, возникающие на резце при разработке мерзлых грунтов с гравийно-галечными включениями резцом шириной 18 мм. Подсистема NAGRUZRA2 имитирует усилия, возникающие на резце рабочего органа при разрезании включения в среде мерзлого суглинка и глины. Подсистема NAGRUZRA3 воспроизводит усилия, возникающие на резце рабочего органа при разрезании включений в массиве мерзлого грунта.

В подсистемах NAGRUZRA используются блоки Gain, Transport Delay, Step и Ramp для формирования значений соответствующих усилий, времени их возникновения, их скоростей нарастания и длительностей воздействия на резец рабочего органа экскаватора. Временные фазы возникновения усилий формируют звенья Transport Delay. Этой же цели служат блоки Switch.

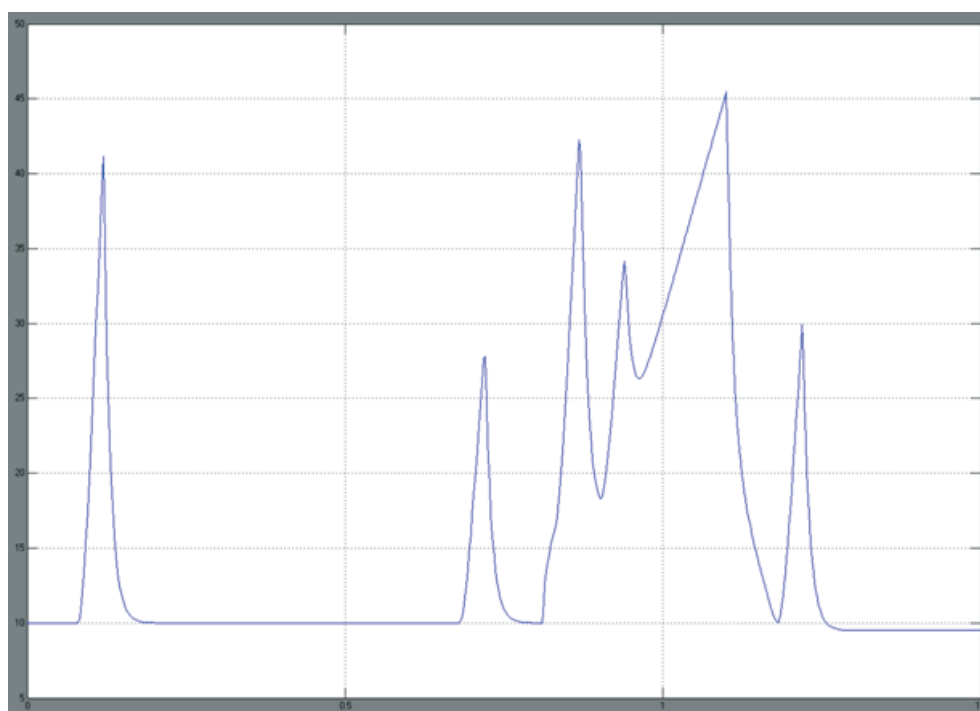


Рисунок 3.20 – Осциллограмма нагрузок первого типа

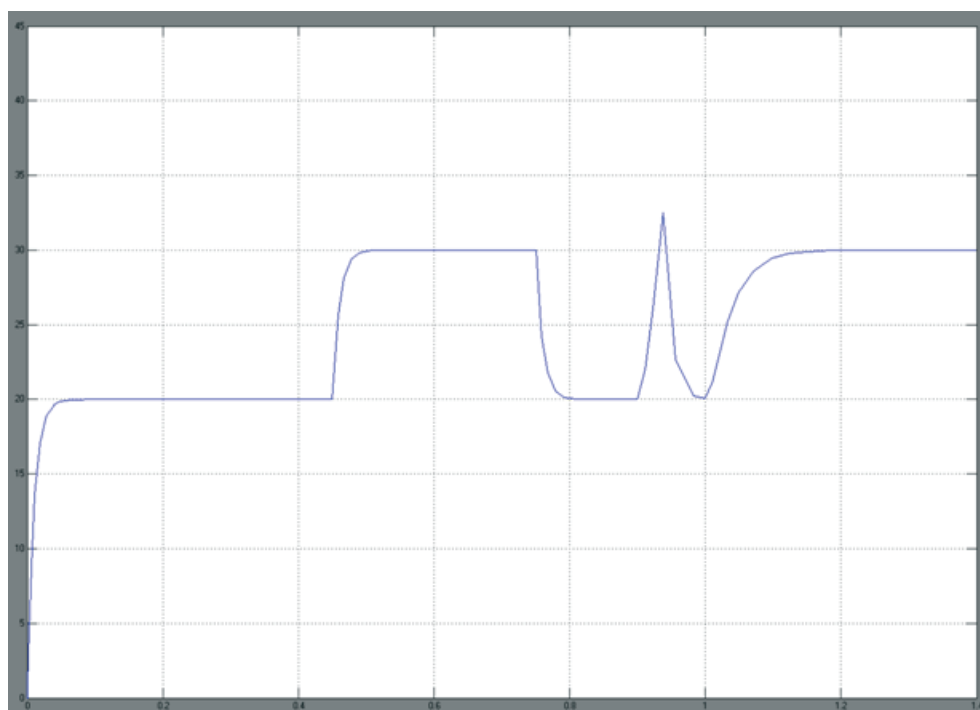


Рисунок 3.21 – Осциллограмма нагрузок второго типа

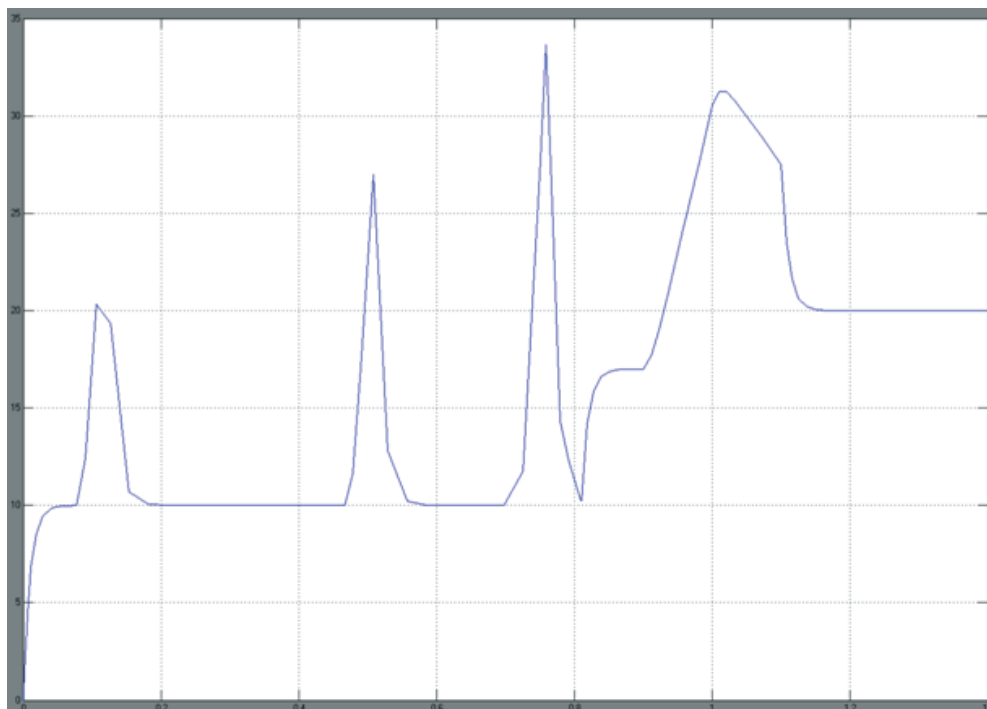


Рисунок 3.22 – Осциллограмма нагрузок третьего типа

На рисунках 3.23–3.25 представлены формализованные нагрузки полученные как результаты имитационного моделирования нагрузок различного типа, возникающие при разработке сезонномерзлых грунтов. Размерность для нагрузок по оси ординат – кН·м, по оси абсцисс (время) – с.

В каждом рассматриваемом варианте неизменными являются все подсистемы разработанной динамической модели, кроме модели нагрузки. В каждом случае вначале исследуются пусковые режимы на холостом ходу, затем подключается нагрузка соответствующего типа (поз. 1). Нагрузка определяет характер динамических процессов изменения основных переменных состояния исследуемой дорожной машины: давления рабочей жидкости P_n в гидравлической системе (поз. 2), угловой скорости вращения вала гидромотора $W_{гм}$ (поз. 3), угловой скорости вращения вала рабочего органа $W_{ро}$ экскаватора (поз. 4), величины смещения предохранительного клапана $X_{пк}$ (поз. 5). Определяющими являются первые три переменных состояния. Поэтому, они и приводятся вместе. Некоторые осциллограммы представлены в виде фрагментов по разным интервалам времени, которые легко могут быть состыкованы визуально.

3.2. Исследование адекватности вариантов имитационной математической модели гидромеханической системы привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора

В качестве метода исследования переходных процессов в гидромеханических системах привода рабочего органа роторных траншейных экскаваторов выбран метод представления уравнений в программе моделирования SIMULINK системы математического исследования MATLAB. Результатом исследования модели являются действительные характеристики временных процессов выходных характеристик модели привода и переходные характеристики системы, а также границы устойчивости системы управления.

Исходными данными для математической модели динамики гидравлического привода роторного траншейного экскаватора являются ее дифференциальные уравнения в пространстве переменных состояния.

Имитационная математическая модель взаимодействия гидромеханической системы привода рабочего органа с мерзлым грунтом имеет нелинейный характер, ее реализация сопровождается значительным временем на численные исследования.

Реализация исследований имитационных моделей большего порядка связана и со значительным увеличением потребляемого процессорного времени. При исследовании подсистем привода и частных расчетных случаев взаимодействия рабочего органа с мерзлым грунтом целесообразно использовать упрощенные модели. В этом случае встает вопрос о степени адекватности имитационных упрощенных моделей реальным динамическим процессам взаимодействия рабочего органа с разрабатываемым мерзлым грунтом и процессам в системе гидромеханического привода рабочего органа, зарегистрированным в условиях натурного эксперимента

Система интегро-дифференциальных уравнений модели является нелинейной. Она используется для имитационного моделирования динамических

процессов в системе гидравлического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора.

Полная модель «Динамика» [77], имеющая пятый порядок, позволила исследовать динамические процессы при разработке различных мерзлых грунтов экскаватором, предложить ряд характеристик гидравлического привода для оценки качества работы исследуемой системы.

При качественном исследовании этих характеристик систему уравнений состояния можно существенно упростить, исключив из нее переменные $X_{ок}(t)$, $X_{пк}(t)$, перемещения рабочих элементов обратного и предохранительного клапанов и соответствующие функции, на которые влияют эти переменные. Влияние этих переменных учтено за счет введения нелинейного статического звена, параметры которого обуславливаются условиями, входящими в уравнения связи (3.6) и (3.7) и определяющими ограничения подавлению рабочей жидкости в гидравлической системе ($P_n(t)$). Данные упрощения позволяют существенно сократить время реализации имитационной модели, но приводят к игнорированию пульсациями давления рабочей жидкости в напорной магистрали гидропривода. Для сохранения достоверности модели работа обратных и предохранительных клапанов задана функцией, отражающей их действие в гидравлической системе. Система уравнений $\{(3.1)–(3.5), (3.6), (3.7)\}$ принимает вид модели, состоящей из более простых уравнений $\{(3.21)–(3.23)\}$.

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -A_4 \cdot P_n(t) - A_2 \cdot \omega_{гм}(t) + A_1 \cdot q_n(t) \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_{гм}(t)}{dt} = & (A_{13} - A_{15}) \cdot (P_n(t) - P_c) - A_{14} \cdot \omega_{гм}(t) - \\ & - A_{16} \cdot \left(\int_0^t \omega_{гм}(t) dt - A_{17} \cdot \int_0^t \omega_{по}(t) dt \right) - A_{19} \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\frac{d\omega_{по}(t)}{dt} = A_{20} \cdot \left(\int_0^t \omega_{гм}(t) dt - A_{21} \cdot \int_0^t \omega_{по}(t) dt \right) - A_{22} \cdot M_n(t) \quad (3.23)$$

$$P_{пк} \geq P_n(t) \geq P_{нп} \quad (3.24)$$

Первая упрощенная имитационная модель «Динамика 1» приведена на рис. 2 с подсистемами на рис. 3.25 и 3.26 и позволяет исследовать динамиче-

ские процессы в системе гидравлического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора при разработке мерзлых грунтов и осуществлять оценку результатов исследования. Имитационная модель «Динамика 1» отличается от модели «Динамика» отсутствием в ней подсистем, определяющих перемещения рабочих элементов обратного и предохранительного клапанов $X_{OK}(t)$, $X_{ПК}(t)$ и нелинейных функции производных от них – расход рабочей жидкости через клапан обратный $Q_{OK}(X_{OK}(t))$ и расход рабочей жидкости через предохранительный клапан $Q_{ПК}(X_{ПК}(t))$, входящих в уравнение состояния (1). Порядок первой упрощенной модели равен трём.

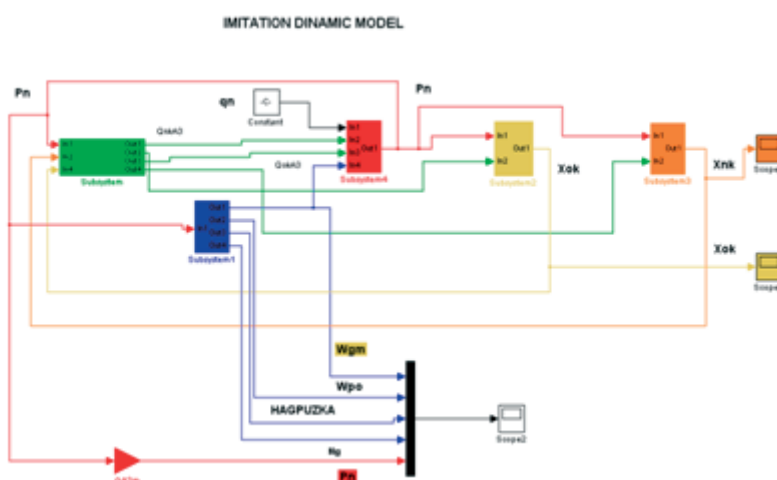


Рисунок 3.23 – Полная имитационная модель «Динамика» привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора

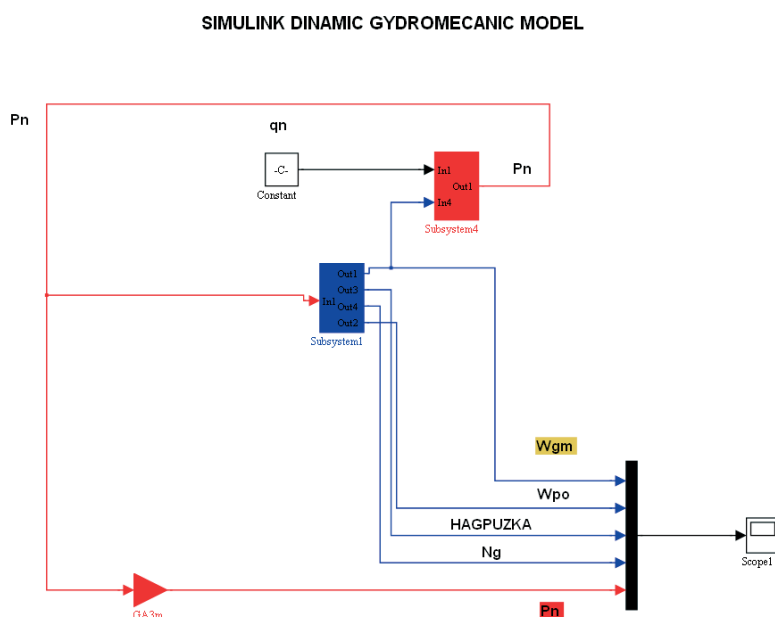


Рисунок 3.24 – Упрощенная имитационная модель «Динамика 1» подсистемы привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора

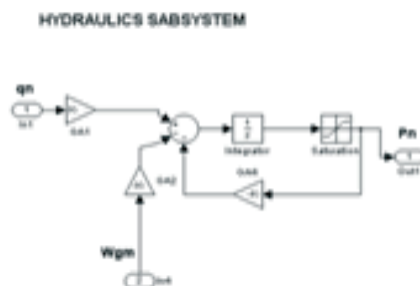


Рисунок 3.25 – Гидравлическая подсистема упрощенной имитационной модели «Динамика 1» привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора

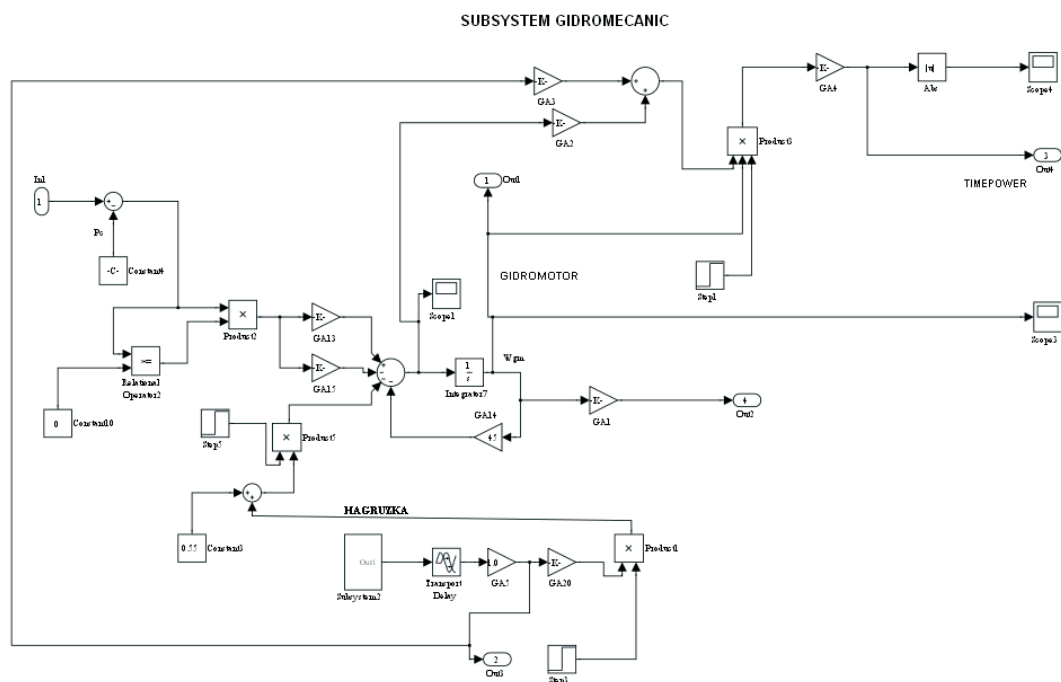


Рисунок 3.26 – Гидромеханическая подсистема упрощенной имитационной модели «Динамика 1» гидравлического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора

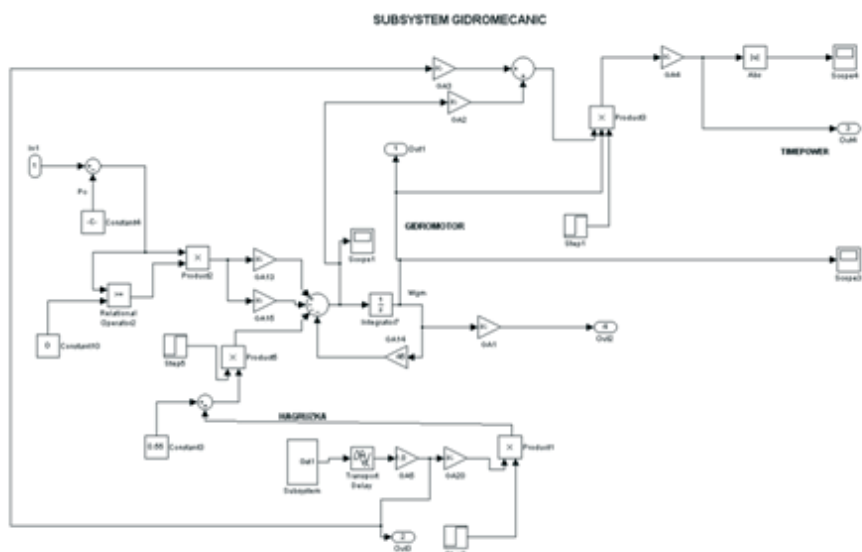


Рисунок 3.27 – Гидромеханическая подсистема упрощенной имитационной модели «Динамика 2» гидравлического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора

На рис. 3.31, 3.32 и 3.32 представлены фрагменты исследования динамических процессов, полученные с помощью указанных трех моделей.

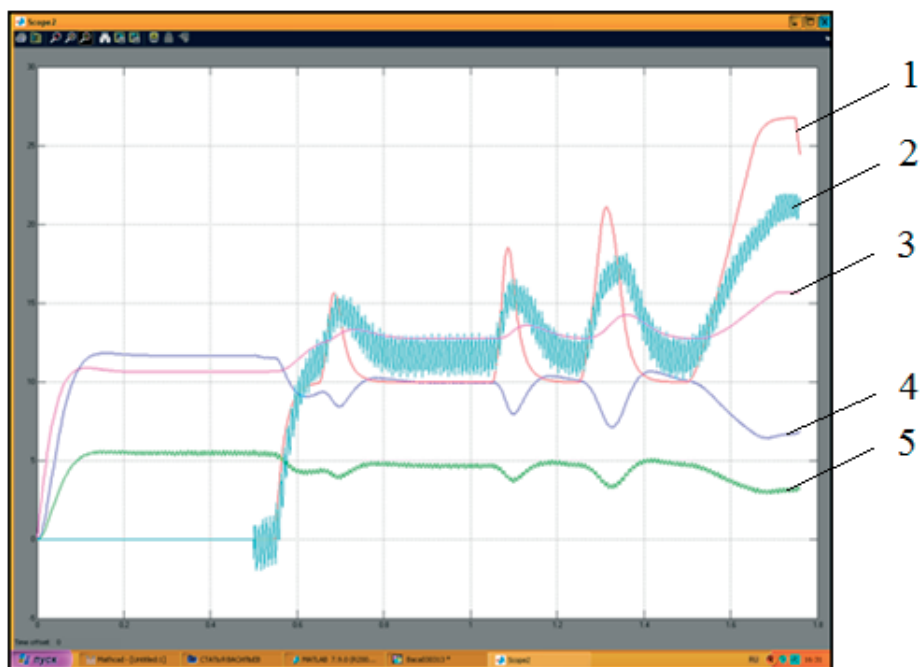


Рисунок 3.28 – Динамика процессов, полученных по точной имитационной модели «Динамика» гидравлического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора. 1 – осциллограмма нагрузки; 2 – динамический момент гидро-механического привода рабочего органа; 3 – давление рабочей жидкости в напорной магистрали привода ротора; 4 – угловая скорость вала гидромотора; 5 – угловая скорость вала рабочего органа экскаватора

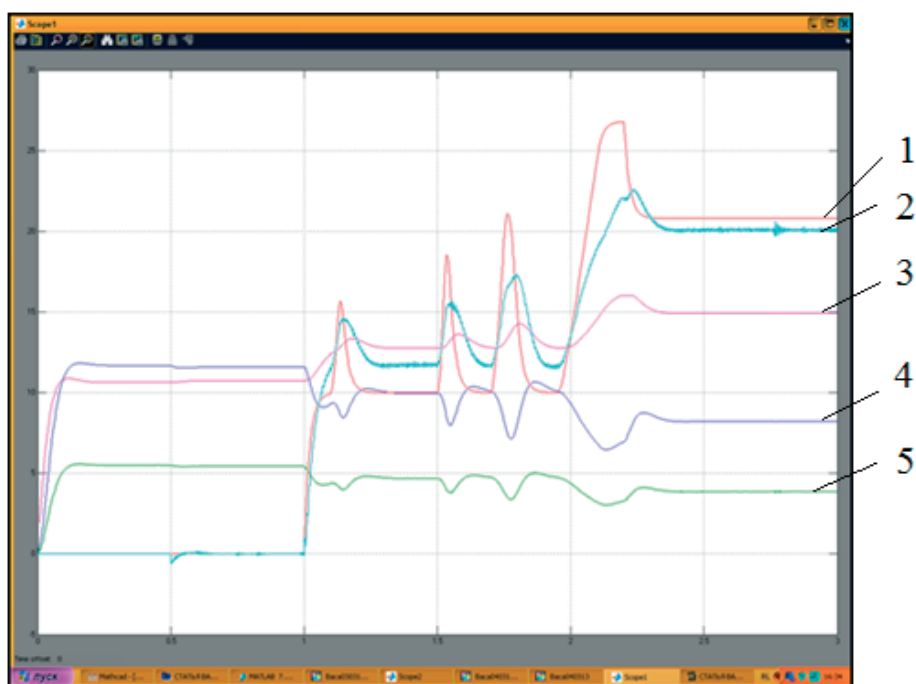


Рисунок 3.29 – Динамика процессов, полученных по упрощенной имитационной модели «Динамика 1» гидравлического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора

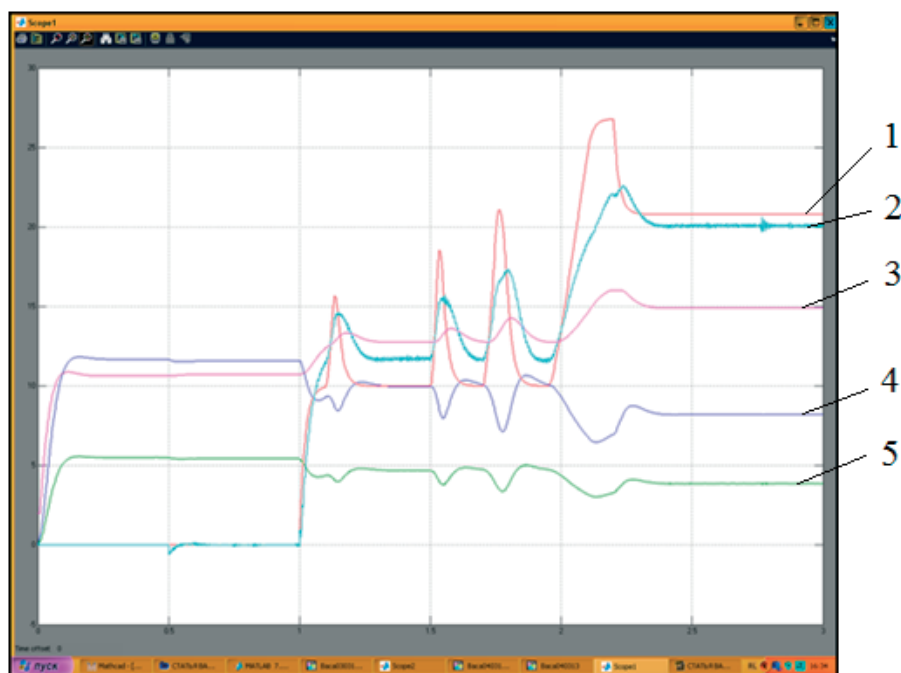


Рисунок 3.30 – Динамика процессов, полученных по упрощенной имитационной модели «Динамика2» гидравлического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора

Дальнейшее упрощение модели достигается эквивалентным приведением уравнения (5) к уравнению (4). В этом случае в имитационной модели исключается переменная состояния – угловая скорость вращения рабочего органа ($\omega_{po}(t)$). Выбор этого исключаемого параметра обусловлен значительной инерционностью процессов изменения угловых скоростей вращения гидромотора $\omega_{гм}(t)$ и рабочего органа $\omega_{po}(t)$, и связи этих параметров через передаточное число редуктора, а также допущении о бесконечной жесткости механической системы передачи вращения от вала гидромотора через редуктор к рабочему органу.

Система уравнений второй упрощенной модели представлена уравнениями (3.25), (3.26) и (3.27).

$$\frac{dP_H(t)}{dt} = -A_4 \cdot P_H(t) - A_2 \cdot \omega_{гм}(t) + A_1 \cdot q_H(t) \quad (3.25)$$

$$\frac{d\omega_{гм}(t)}{dt} = (A_{13} - A_{15}) \cdot (P_H(t) - P_c) - A_{14} \cdot \omega_{гм}(t) - A_{23} \cdot M_H(t) - A_{19} \quad (3.26)$$

$$P_{пк} \geq P_H(t) \geq P_{нп} \quad (3.27)$$

Результаты серии экспериментальных исследований гидромеханической системы привода рабочего органа на мерзлых грунтах [57, 58] (рис. 2.21–2.24) использованы в сравнительном анализе с результатами, полученными численным путем.

Анализ результатов исследования показывает, что упрощенная имитационная модель позволяет получить приемлемую точность решения, при условии введения формализованных нагрузок в виде осциллограмм, учитывающих законы распределения включений в мерзлых грунтах и температурных профилей промерзания грунта.

Имитационная модель «Динамика 2», разработанная по этой системе уравнений, отличается от модели «Динамика 1» более простой гидромеханической подсистемой Subsystem Gidromecanic – рис. 3.29. В ней угловая скорость рабочего органа определена через угловую скорость вращения гидромотора. Модель также позволяет исследовать динамические процессы в системе гидравлического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора при разработке различных мерзлых грунтов и осуществлять оценку результатов исследования. Таким образом, порядок второй упрощенной модели «Динамика 2» равен двум.

Исследование адекватности упрощенных имитационных моделей динамических процессов в гидромеханических системах привода роторных траншейных экскаваторов показало рациональность модели второго порядка, учитывающей характер действующих нагрузок, температурных профилей промерзания грунта и законов распределения гравийно-галечниковых включений.

Снижение порядка имитационной модели гидромеханической системы привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора за счет введения функций, описывающих работу контрольно-регулирующей аппаратуры до третьего порядка, обеспечивает сокращение процессорного времени до 10 процентов при снижении точности теоретических результатов до 3 процентов в широком спектре нагрузок действующих на систему привода при разработке мерзлого грунта.

За счёт упрощения математической модели гидромеханического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора возможно уменьшение ее порядка с пятого до второго, что обеспечивает значительное, до 25 процентов, сокращение потребляемого при моделировании процессорного времени при не-

значительном снижении точности теоретических результатов до 3 процентов во всем спектре нагрузок, действующих на систему привода при разработке мерзлого грунта.

3.3. Исследование динамических процессов в системе привода рабочих органов траншейных экскаваторов при воздействии нагрузок первого типа

Исследование динамических процессов при воздействии на систему привода рабочих органов траншейных экскаваторов нагрузок первого типа.

На рис. 3.34 наблюдаем за началом процесса от времени $t = 0$ до момента подключения нагрузки первого типа $t = 1$ с. Видно, что наиболее быстро заканчивается процесс установления гидравлического давления, затем скорости гидромотора, наименьшее быстродействие наблюдаем у скорости рабочего органа. Это объясняется различной инерционностью наблюдаемых объектов, в частности значительным моментом инерции рабочего органа. Менее инерционной, таким образом, является гидравлическая подсистема. Взаимное влияние переменных состояния в начале процесса не прослеживается. Начальный этап процессов не зависит от типа нагрузки и для других типов далее не описывается.

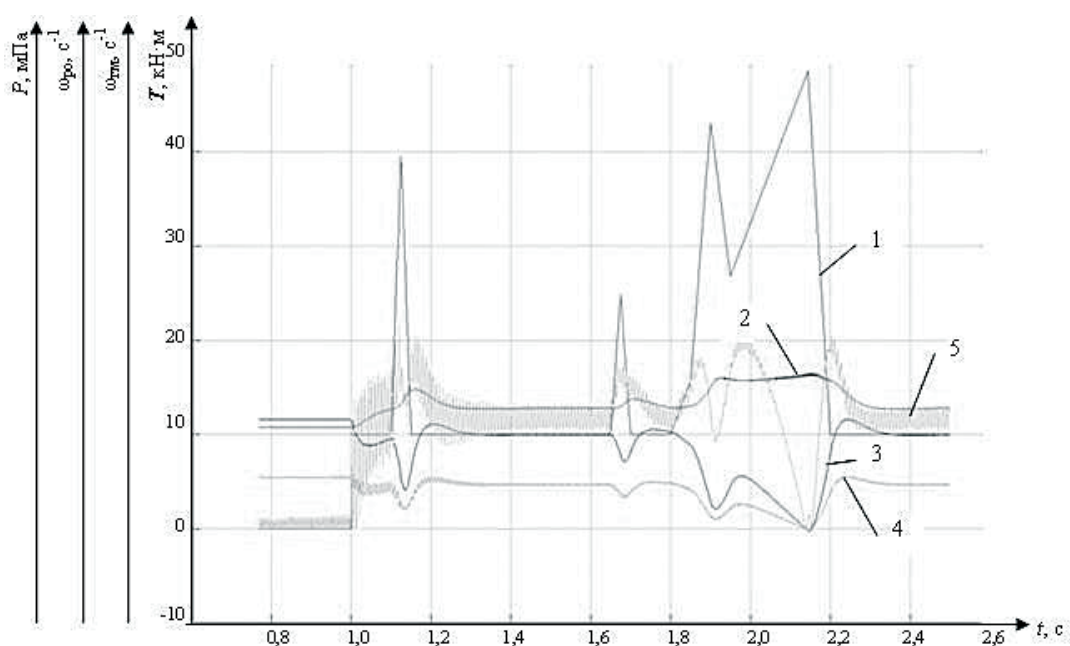


Рисунок 3.31 – Изменение параметров при воздействии нагрузок первого типа на привод рабочего органа. Фрагмент осциллограммы. Время подключения нагрузки $t_b = 1$ с

Этап работы траншейного экскаватора под нагрузкой первого типа, начинается с момента ее подключения $t = 1$ с, действует до момента окончания моделирования $t = 2,6$ с, в этот период времени наблюдается взаимное влияние переменных состояния и характер их изменения. Так уменьшение (увеличение) скорости вала рабочего органа, обусловленное изменением нагрузки, вызывает соответствующее уменьшение (увеличение) скорости вала гидромотора и соответствующее увеличение (уменьшение) давления в гидросистеме. Скорости валов имеют колебательную составляющую, обусловленную их конечными жесткостями и соотношением этих жесткостей. При этом амплитуда колебаний скорости вала рабочего органа примерно в 3 раза превышает соответствующую амплитуду колебаний скорости вала гидромотора траншейного экскаватора этого типа.

На этом этапе вступает в работу и предохранительный клапан (рис. 3.35), величина перемещения которого определяется глубиной просадки скорости вала гидромотора и регулированием этого клапана по давлению.

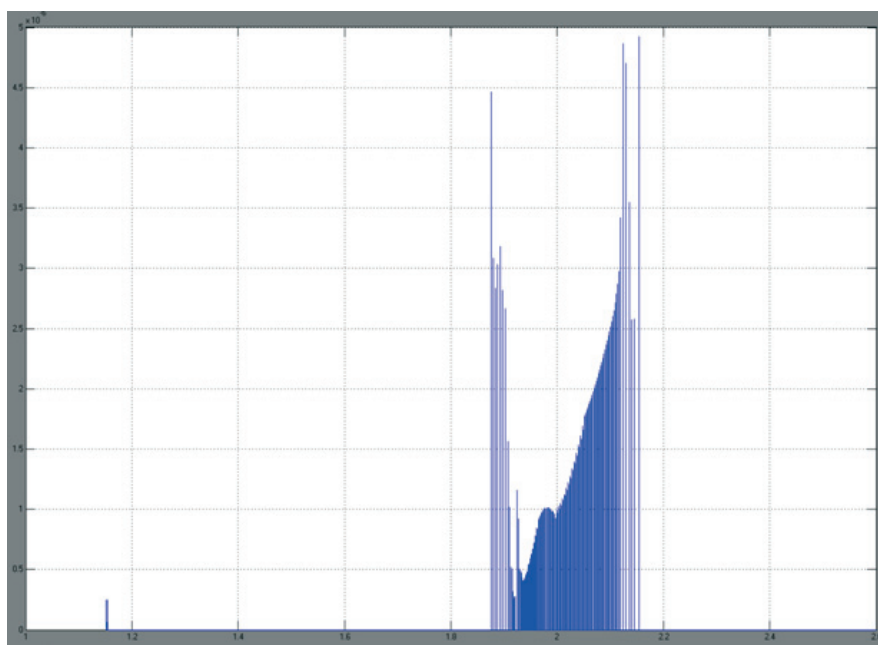


Рисунок 3.32 – Перемещение предохранительного клапана при воздействии на систему привода нагрузок первого типа (фрагмент осциллограммы отработки, начальное время подключения нагрузки $t = 1$ с)

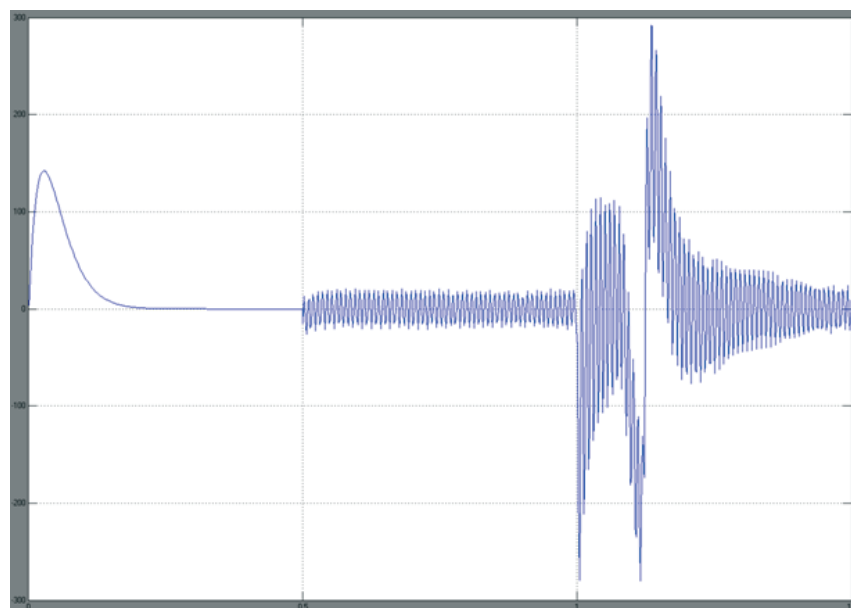


Рисунок 3.33 – Изменение динамического момента гидромотора, отнесенного к приведенному моменту инерции при воздействии нагрузок первого типа (фрагмент осциллограммы, начальное время подключения нагрузки $t = 1$ с)

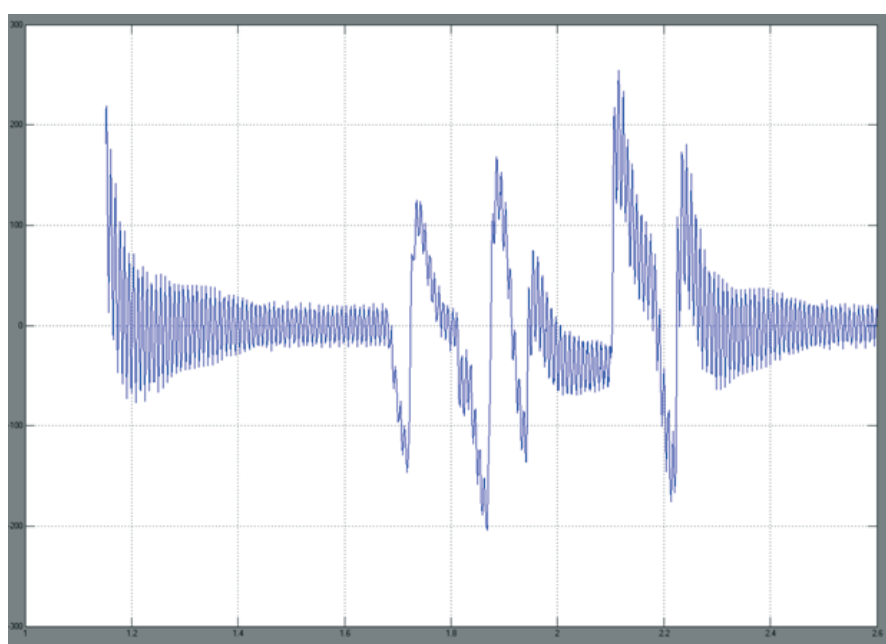


Рисунок 3.34 – Изменение динамического момента гидромотора, отнесенного к приведенному моменту инерции при воздействии нагрузок первого типа (фрагмент осциллограммы, начальное время подключения нагрузки $t = 1$ с)

Важной динамической характеристикой работы экскаватора в динамических режимах является динамический момент, развиваемый гидравлическим двигателем. Динамический момент парирует соответствующие изменения мо-

мента нагрузки рабочего органа. Характер изменения динамический момента гидравлического двигателя при отработке нагрузок первого типа показан на рис. 3.37 и 3.38. Величина динамического момента пропорциональна ускорению вала гидромотора $dw_{\text{ГМ}}(t)/dt$ и приведенному к этому валу моменту инерции $J_{\text{ГМпр}}$.

3.4. Исследование динамических процессов в системе привода рабочих органов траншейных экскаваторов при воздействии нагрузок второго типа

Характерной особенностью нагрузки второго типа (рис. 3.21) является более равномерный характер изменения параметров гидромеханического привода рабочего органа (рис. 3.35) по сравнению с воздействиями нагрузок первого и третьего типов при сохранении верхней величины диапазона нагрузки ($40 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$).

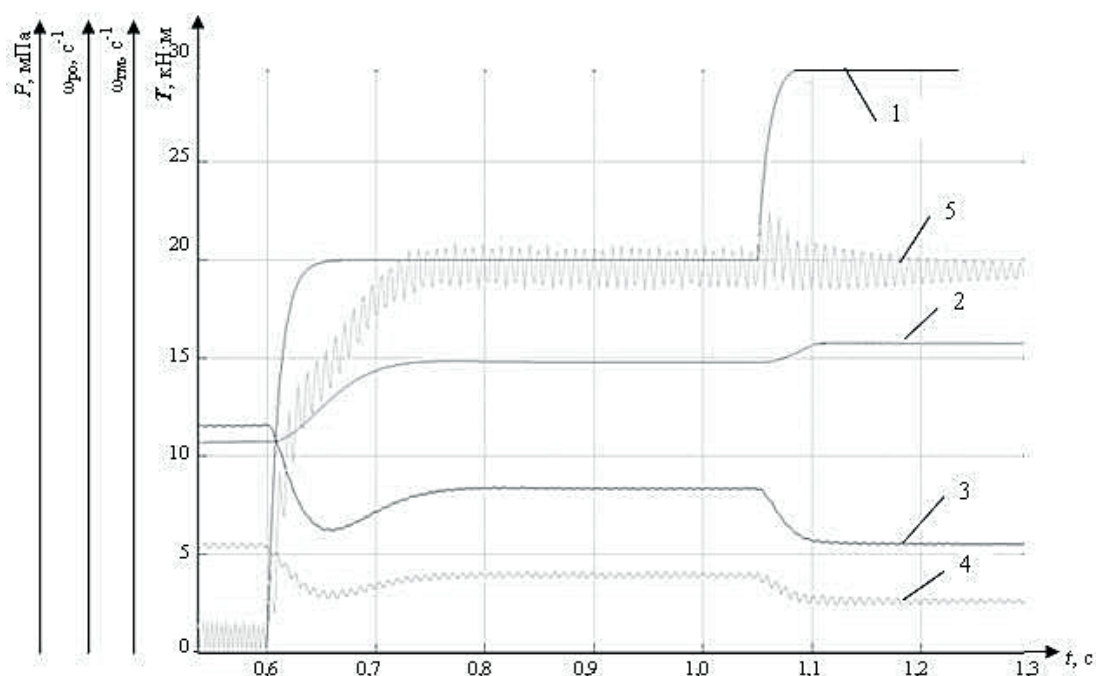


Рисунок 3.35 – Изменение параметров при воздействии нагрузок второго типа на привод рабочего органа (начало осциллограммы)

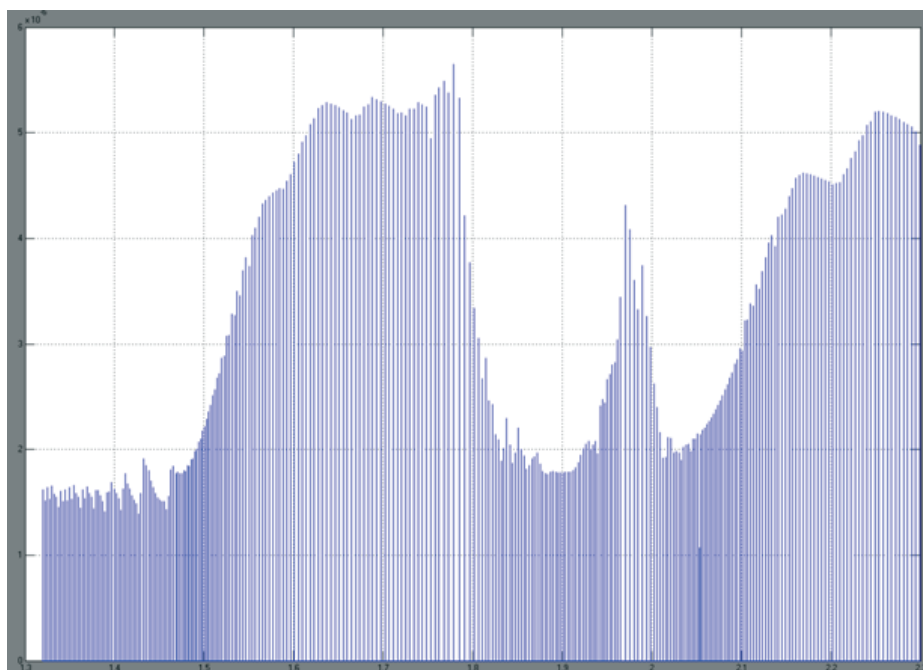


Рисунок 3.36 – Перемещение предохранительного клапана при воздействии на систему привода нагрузок второго типа

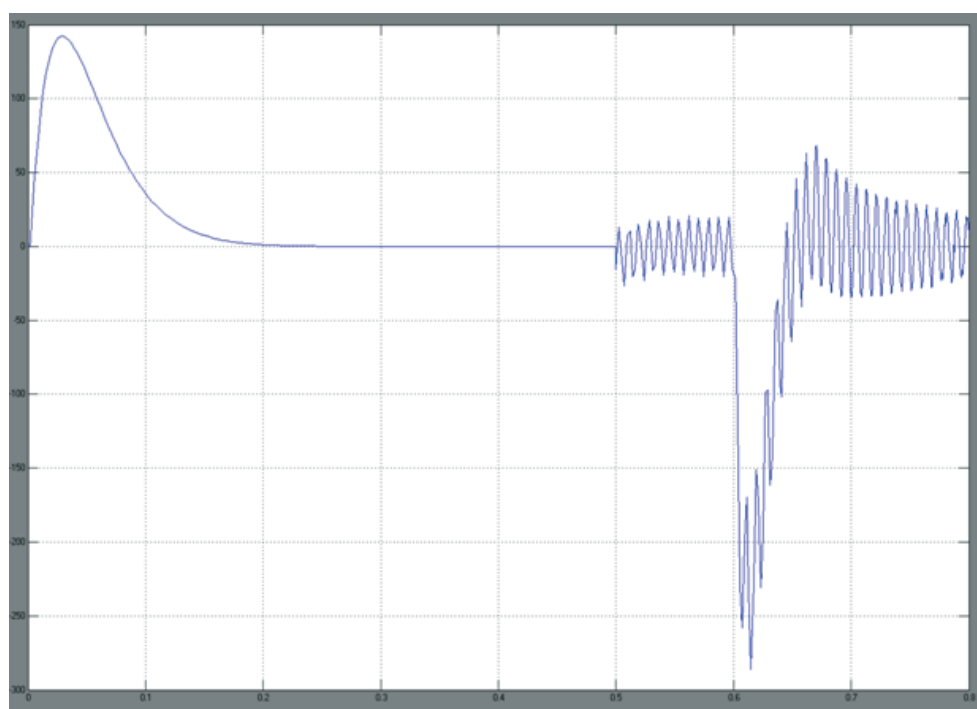


Рисунок 3.37 – Изменение динамического момента гидромотора, отнесенного к приведенному моменту инерции при воздействии нагрузок второго типа (начало осциллограммы)

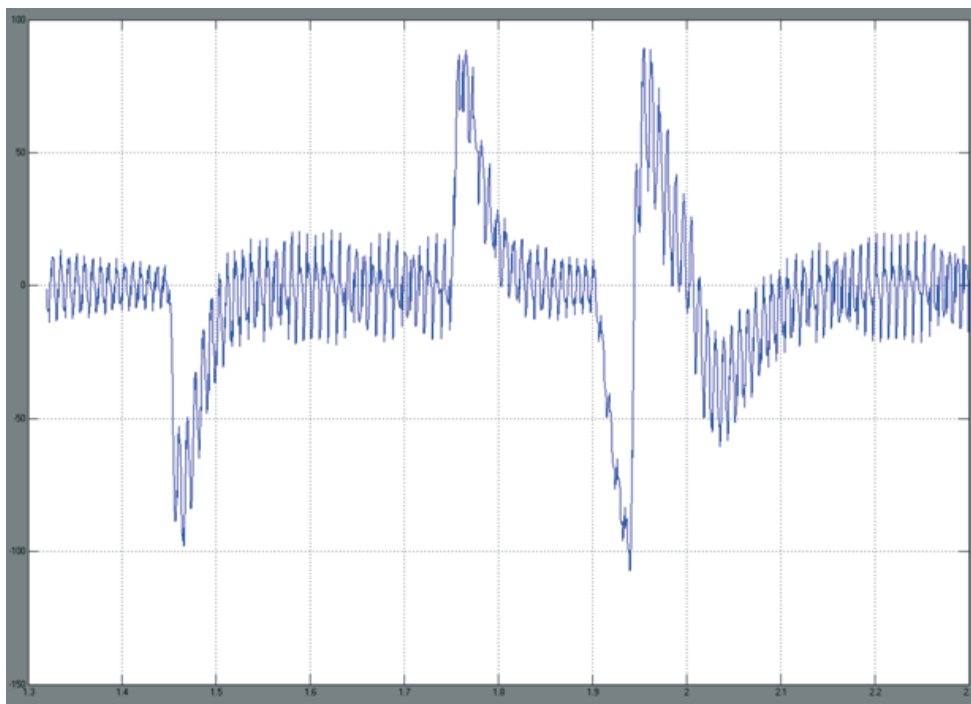


Рисунок 3.38 – Изменение динамического момента гидромотора, отнесенного к приведенному моменту инерции при воздействии нагрузок второго типа

Это приводит к уменьшению величины установившейся скорости (ниже 5 рад/с) и, как следствие, к повышению рабочего давления в гидросистеме, что вызывает срабатывание предохранительного клапана, рис. 3.36. Динамический момент имеет значительную, до 50 %, пульсацию, рис. 3.37 и 3.38.

3.5. Исследование динамических процессов в системе привода рабочих органов траншейных экскаваторов нагрузок третьего типа

Величины моментов нагрузки этого типа находятся в том же диапазоне, что и нагрузки первого и второго типов. Результаты исследования приведены, рис. 3.39–3.43. Разница заключается в большей величине возникающих усилий при встрече резцов с валунами, находящимися в среде мерзлого грунта, обуславливающих импульсный характер нагрузки и большей их частоте. Это приводит к более значительным, по сравнению с первым типом, изменениям в скоростях механических валов гидромеханической подсистемы, ниже 6 рад/с для гидромотора, что вызывает срабатывание предохранительного клапана, рис. 3.40.

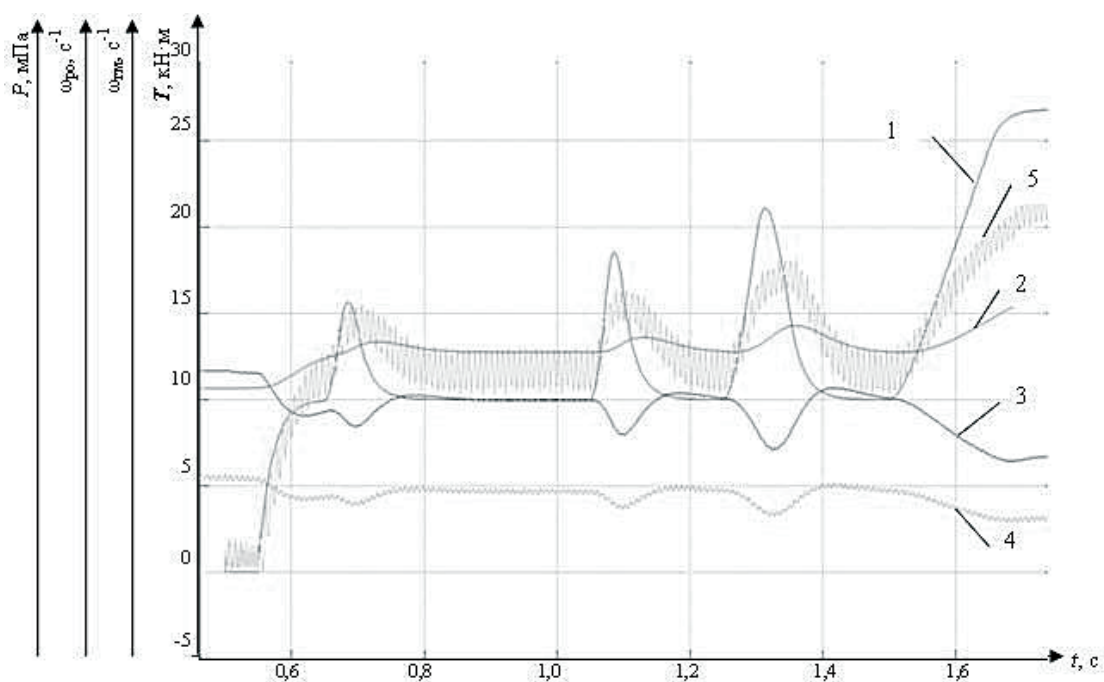


Рисунок 3.39 – Изменение параметров привода при воздействии нагрузок третьего типа на привод рабочего органа

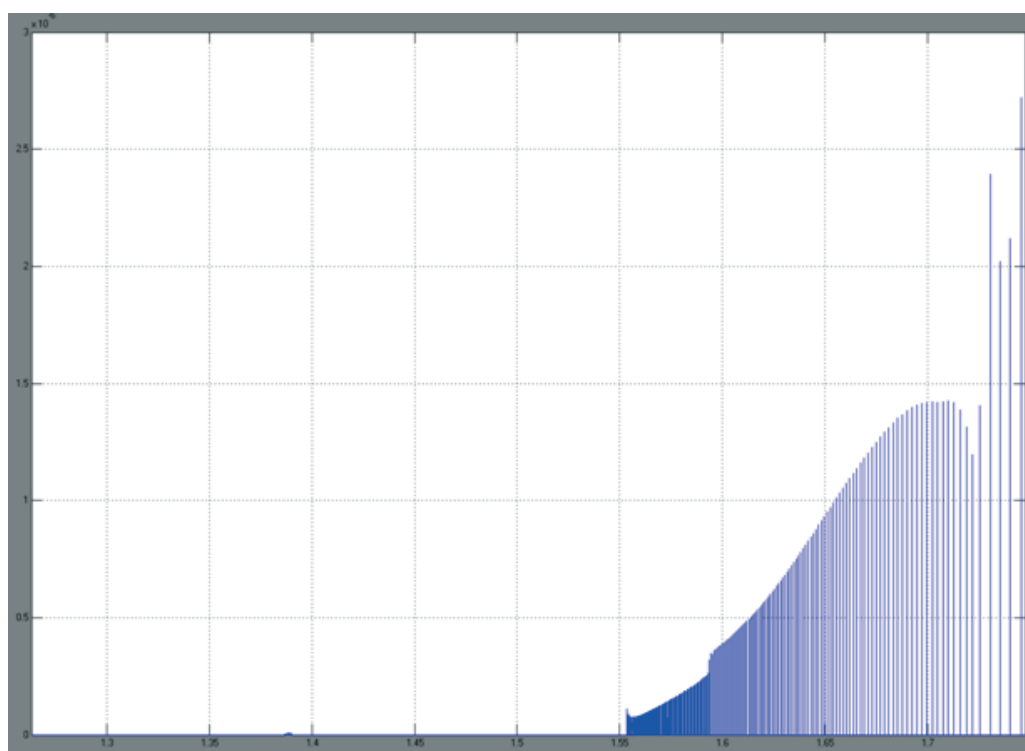


Рисунок 3.40 – Перемещение предохранительного клапана при воздействии нагрузок третьего типа на привод рабочего органа

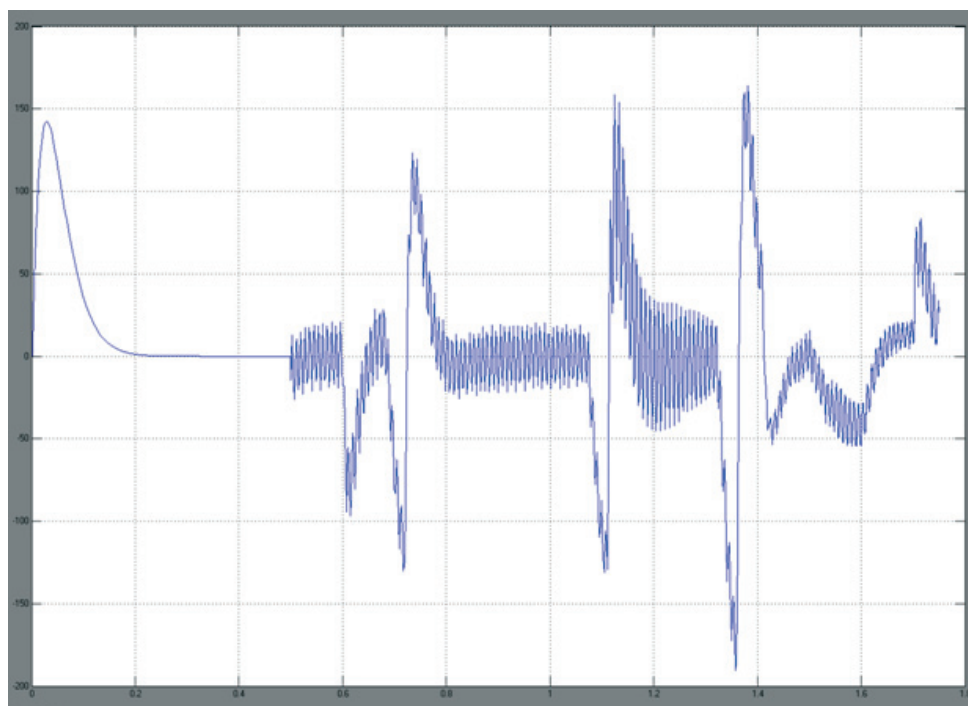


Рисунок 3.41 – Изменение динамического момента гидромотора, отнесенного к приведенному моменту инерции при воздействии нагрузок третьего типа

Следует также отметить, как показывает проведенное имитационное моделирование, что во всех исследуемых режимах, динамические процессы, наблюдаемые при работе траншейного экскаватора, остаются устойчивыми. Колебательный характер процессов в механических элементах (амплитудные значения) зависит от типа нагрузки. Относительные амплитудные значения этих колебаний достигают 50 % для нагрузок второго типа.

3.6. Исследование динамических процессов гидромеханической системы привода роторного рабочего органа при изменении фазы установки гидромотора

Как следует из четвертого уравнения состояния для ускорения вала, определяющего динамический момент гидромотора, последний зависит от производительности мотора $q_{гм}$. В свою очередь производительность не регулируемого гидромотора может изменяться за счет вариации угловой скорости вала, что является весьма очевидным или за счет изменения фазы установки корпуса

гидромотора относительно приводного вала. В этой части работы исследованы динамические характеристики гидромеханического привода за счет изменения фазы установки не регулируемого гидромотора привода роторного рабочего органа траншейного экскаватора, разрабатывающего сезонно-мерзлый грунт. Конструктивные особенности фланцевого соединения высоко моментного гидромотора позволяют изменить рабочий объем гидромотора на 2,7 % за счет изменения фазы установки относительно приводного вала.

Каким образом изменятся динамические характеристики процессов при различных типах нагрузок, из уравнений состояния напрямую не следует и это не очевидно. Колебания, вносимые работой предохранительного клапана, с учетом конечной жесткости механических валов и редуктора, передающих механический момент к рабочему органу, затрудняют исследования характера изменения динамического момента по осциллограммам процессов.

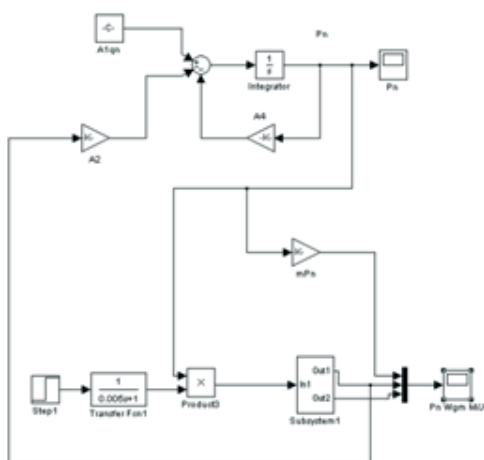


Рисунок 3.42 – Схема упрощенной имитационной динамической модели траншейного экскаватора

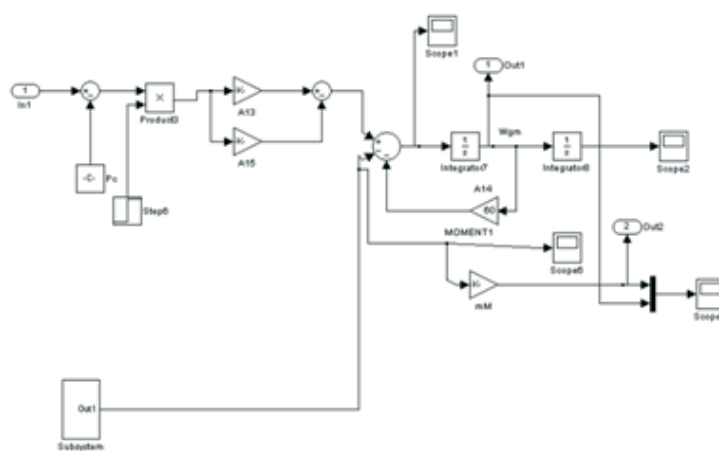


Рисунок 3.43 – Схема гидромеханической подсистемы упрощенной имитационной динамической модели траншейного экскаватора

Поэтому на основе первого, четвертого и пятого уравнений, была разработана имитационная упрощенная динамическая модель без учета работы предохранительного и обратного клапанов и при допущении о бесконечной жесткости элементов, передающих механический момент (рис. 3.42).

Осуществлено приведение к выходному валу гидромотора нагрузки и моментов инерции рабочего органа, в результате число уравнений сократилось до двух.

Упрощенные схемы имитационной динамической модели гидромеханической системы привода рабочих органов траншейного экскаватора, разработанной для исследования динамических процессов, связанных с изменением производительности гидравлического мотора приведены на рис. 3.42 и 3.43.

Сравнение результатов моделирования показывает, что увеличение производительности высоко моментного радиально-поршневого гидравлического мотора на 2,7 % за счет изменения фазы установки корпуса гидромотора относительно приводного вала приводит к пропорциональным увеличениям динамического момента (рис. 3.45, 3.47) и скорости гидромотора при снижении давления в гидросистеме, что хорошо видно из сравнения рисунков 3.44 и 3.46, 3.48. При этом суммарное время работы предохранительного клапана за цикл нагружения системы привода нагрузкой любого типа уменьшается (рис. 3.32 и 3.49).

На рис. 3.44–3.47, 3.54–3.56 представлены результаты моделирования при помощи упрощенной имитационной модели и отработке нагрузки первого типа, а на рис. 3.41–3.44 – результаты моделирования при помощи точной модели.

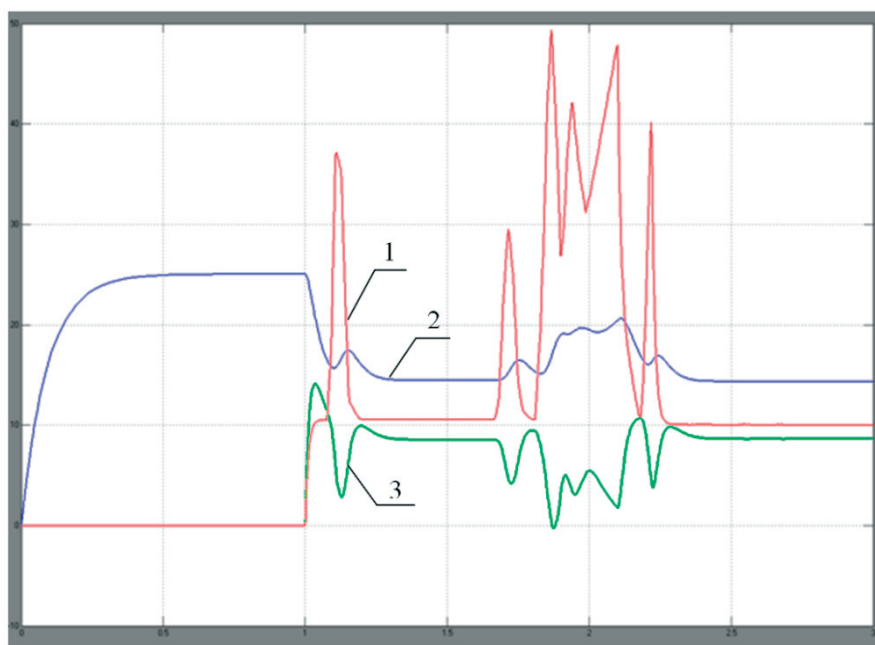


Рисунок 3.44 – Изменение параметров привода траншейного экскаватора при воздействии нагрузок первого типа по упрощенной имитационной модели. 1 – нагрузка; 2 – давление в напорной магистрали гидромеханической системы привода; 3 – угловая скорость рабочего органа

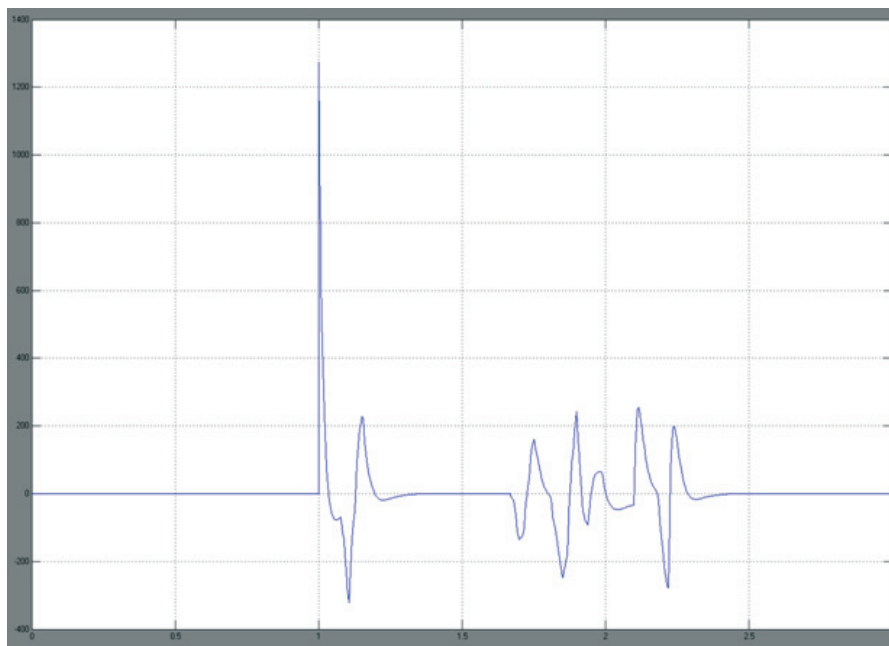


Рисунок 3.45 – Осциллограмма динамического момента, отнесенного к моменту инерции при воздействии на систему привода нагрузок первого типа по упрощенной имитационной модели

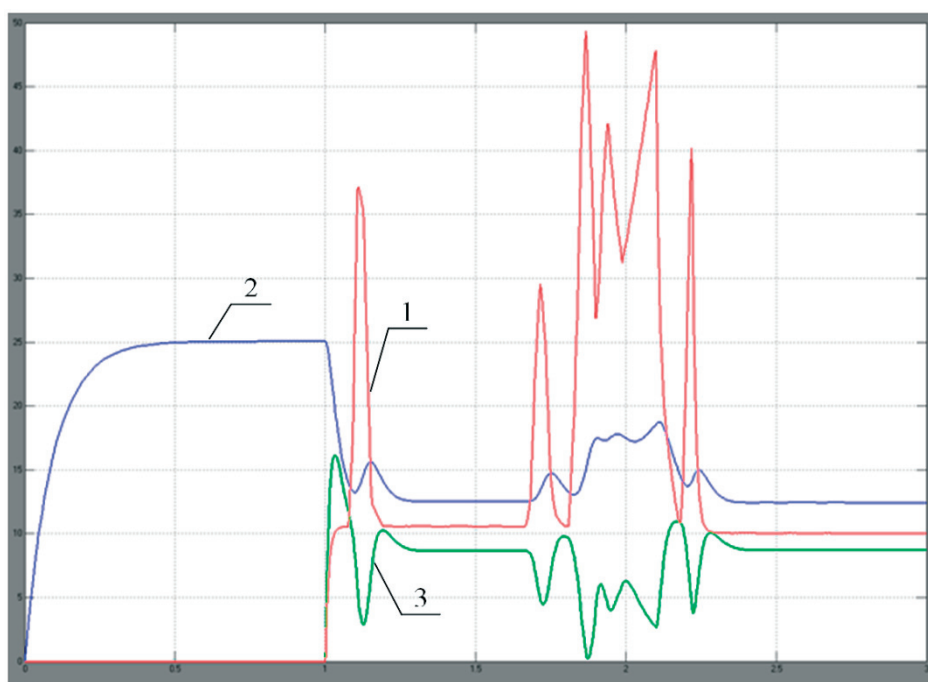


Рисунок 3.46 – Изменение параметров привода при воздействии нагрузок первого типа по упрощенной имитационной модели и увеличении значения q_m на 2,7 %. 1 – нагрузка; 2 – давление в напорной магистрали гидромеханической системы привода; 3 – угловая скорость рабочего органа

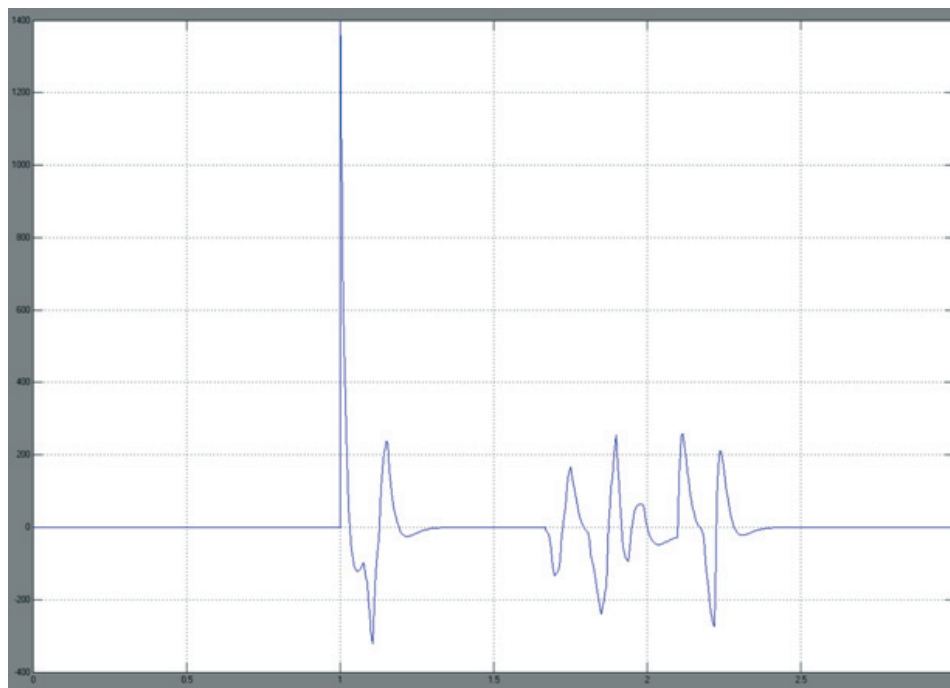


Рисунок 3.47 – Осциллограмма динамического момента, отнесенного к моменту инерции при воздействии на систему привода траншейного экскаватора нагрузок первого типа по упрощенной имитационной модели, значение q_m увеличено на 2,7 %

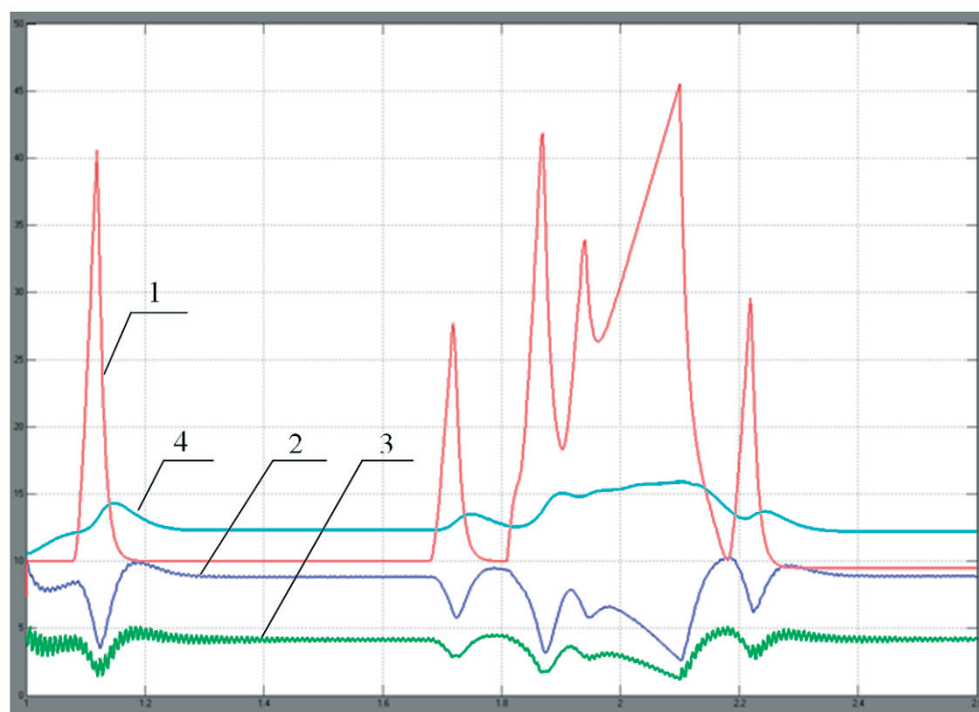


Рисунок 3.48 – Изменение параметров привода при воздействии нагрузок первого типа по точной имитационной модели при увеличении q_m на 2,7 %. Время подключения нагрузки $t = 1$ с. 1 – нагрузка; 2 – угловая скорость вала гидромотора; 3 – угловая скорость рабочего органа; 4 – давление в напорной магистрали гидромеханической системы привода

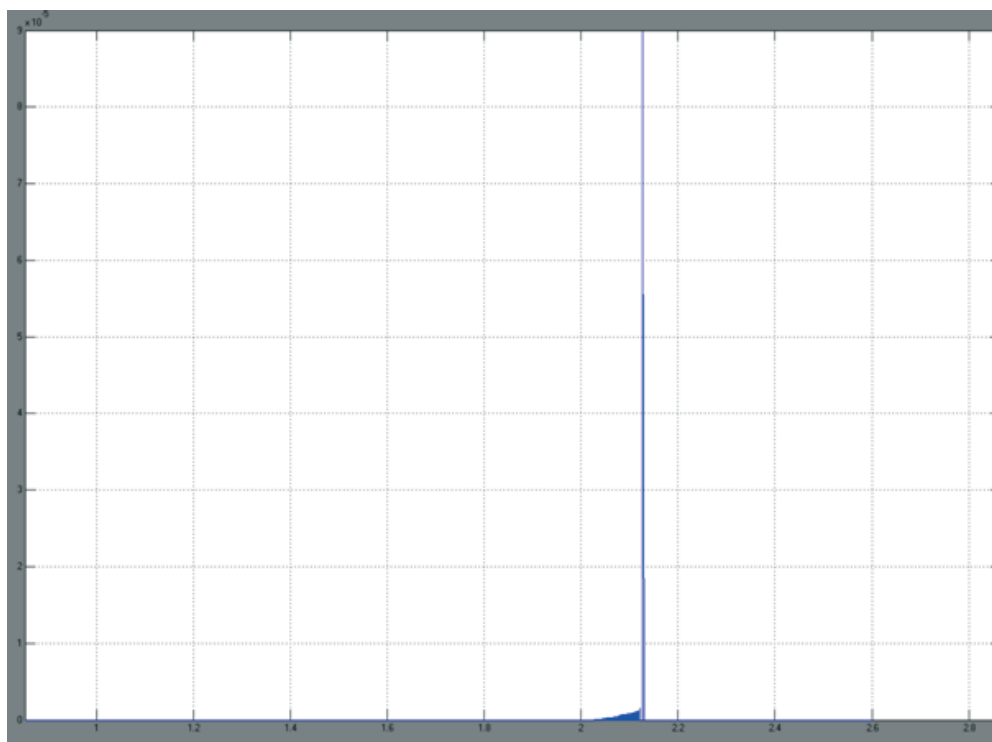


Рисунок 3.49 – Фрагмент осциллограммы перемещения предохранительного клапана при воздействии на систему привода нагрузок первого типа. Время подключения нагрузки $t = 1$ с

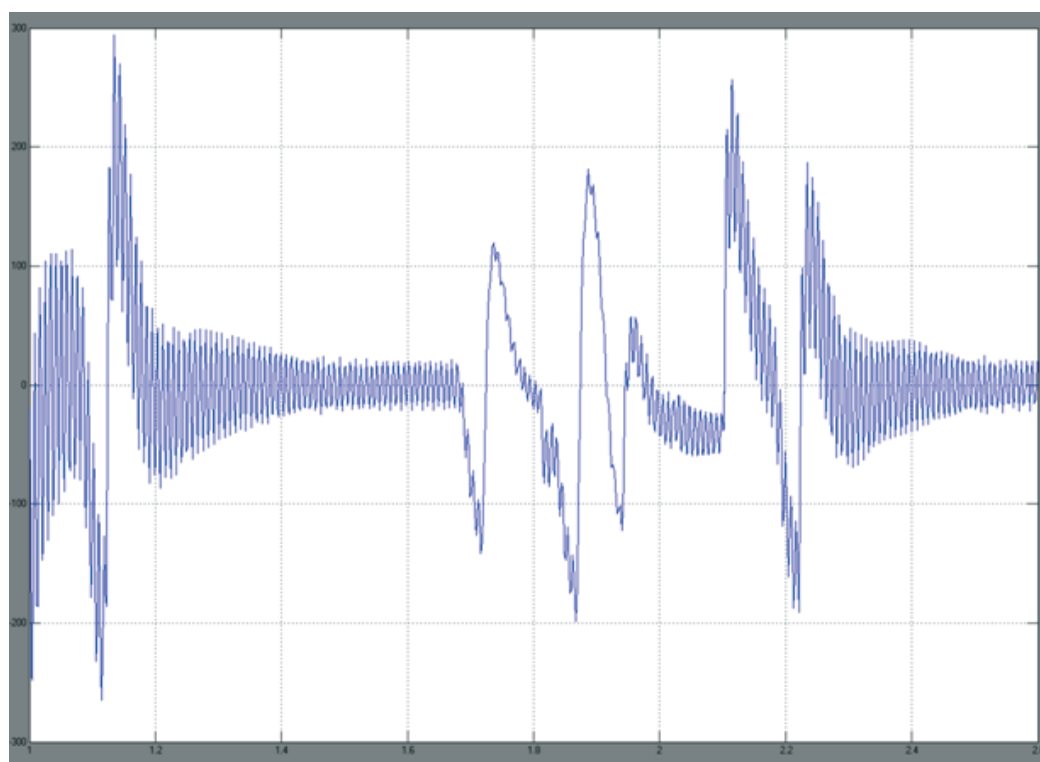


Рисунок 3.50 – Изменение динамического момента при воздействии на систему привода нагрузок первого типа и увеличении q_m на 2,7 %. (фрагмент осциллограммы, начальное время подключения нагрузки $t = 1$ с)

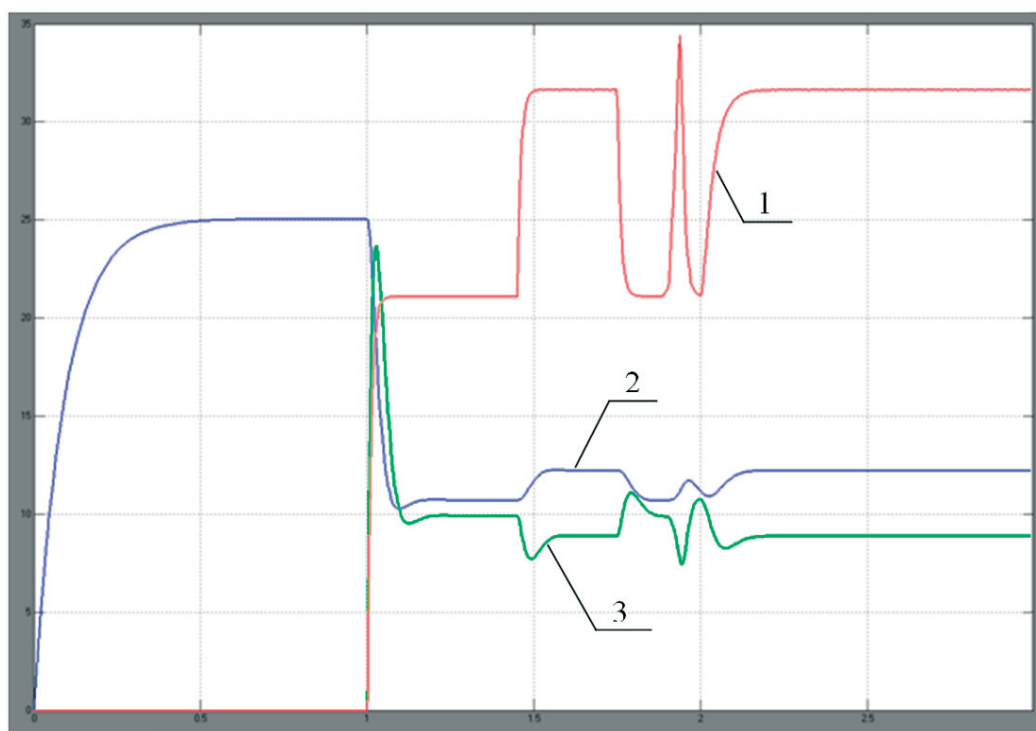


Рисунок 3.51 – Изменение параметров привода траншейного экскаватора при воздействии нагрузок второго типа по упрощенной имитационной модели. 1 – нагрузка; 2 – давление в напорной магистрали гидромеханической системы привода; 3– угловая скорость рабочего органа

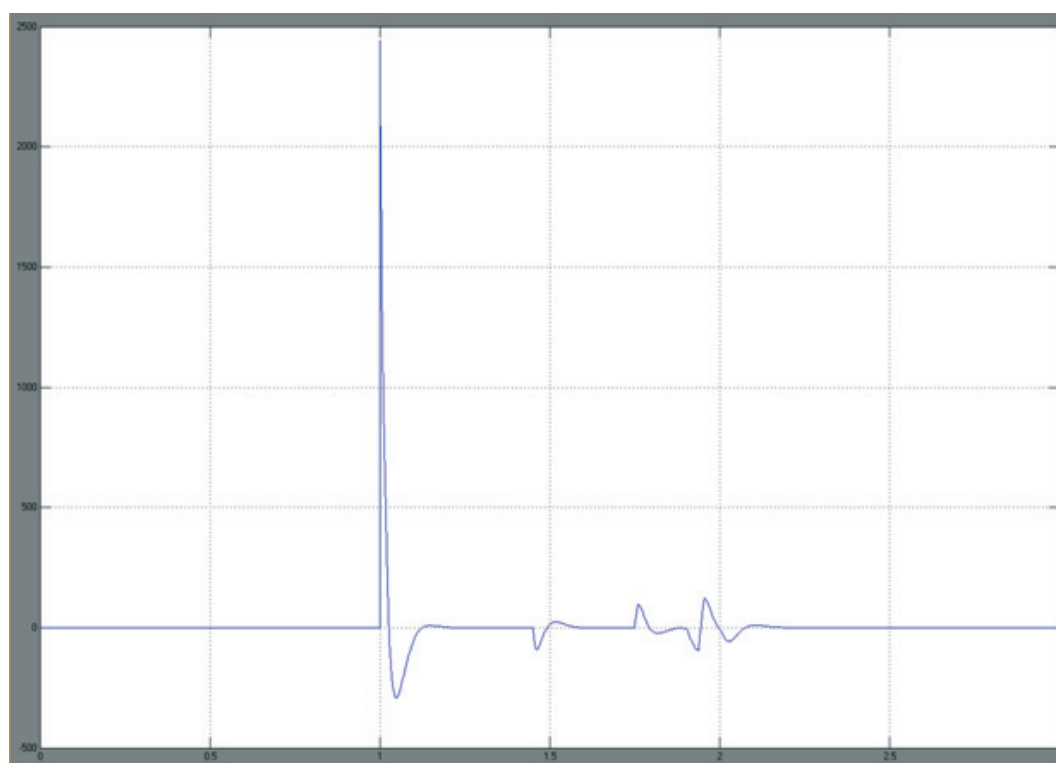


Рисунок 3.52 – Осциллограмма динамического момента, отнесенного к моменту инерции при воздействии на систему привода нагрузок второго типа по упрощенной имитационной модели

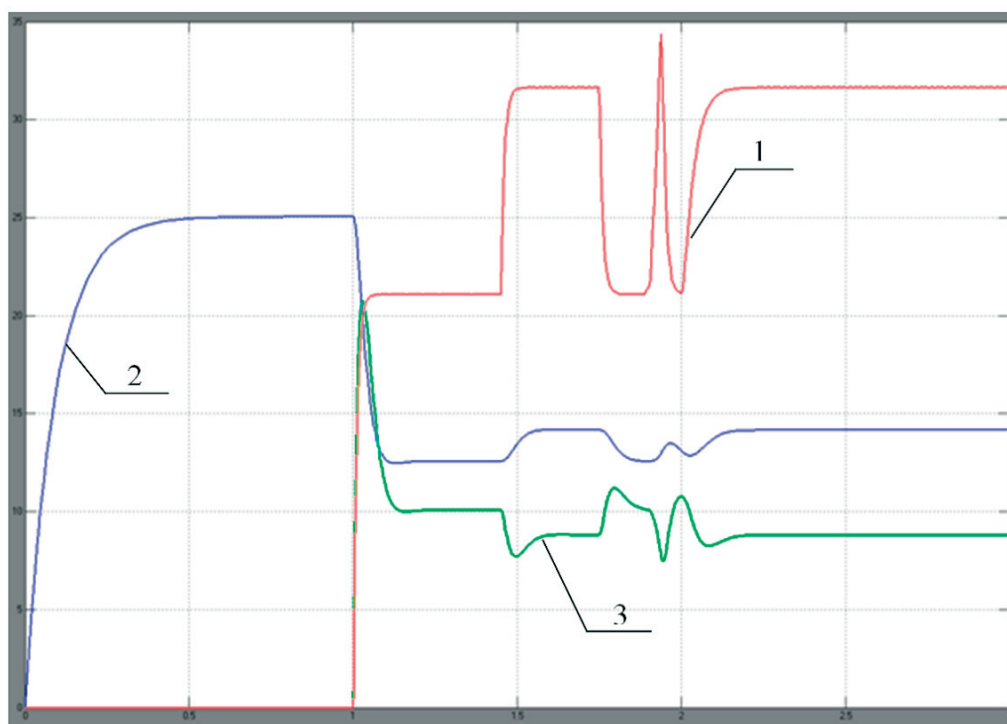


Рисунок 3.53 – Изменение параметров привода рабочих органов траншейного экскаватора при воздействии нагрузок второго типа по упрощенной имитационной модели, значение q_m увеличено на 2,7 %. 1 – нагрузка; 2 – давление в напорной магистрали гидромеханической системы привода; 3 – угловая скорость рабочего органа

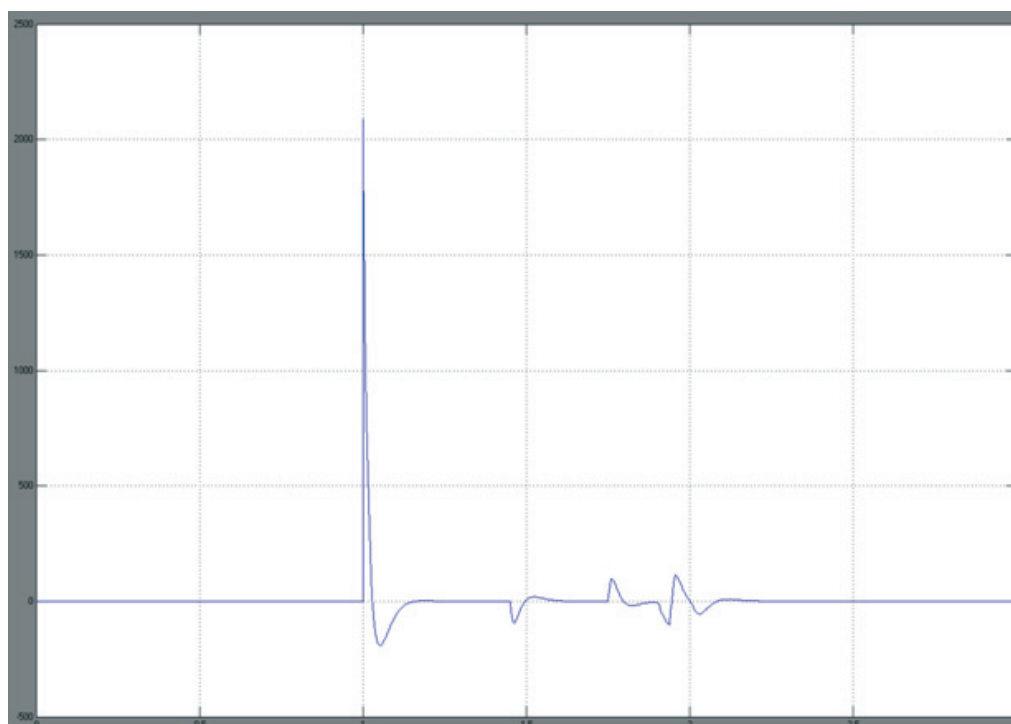


Рисунок 3.54 – Изменение динамического момента, отнесенного к моменту инерции при воздействии на систему привода нагрузок второго типа и увеличении q_m на 2,7 % по упрощенной имитационной модели

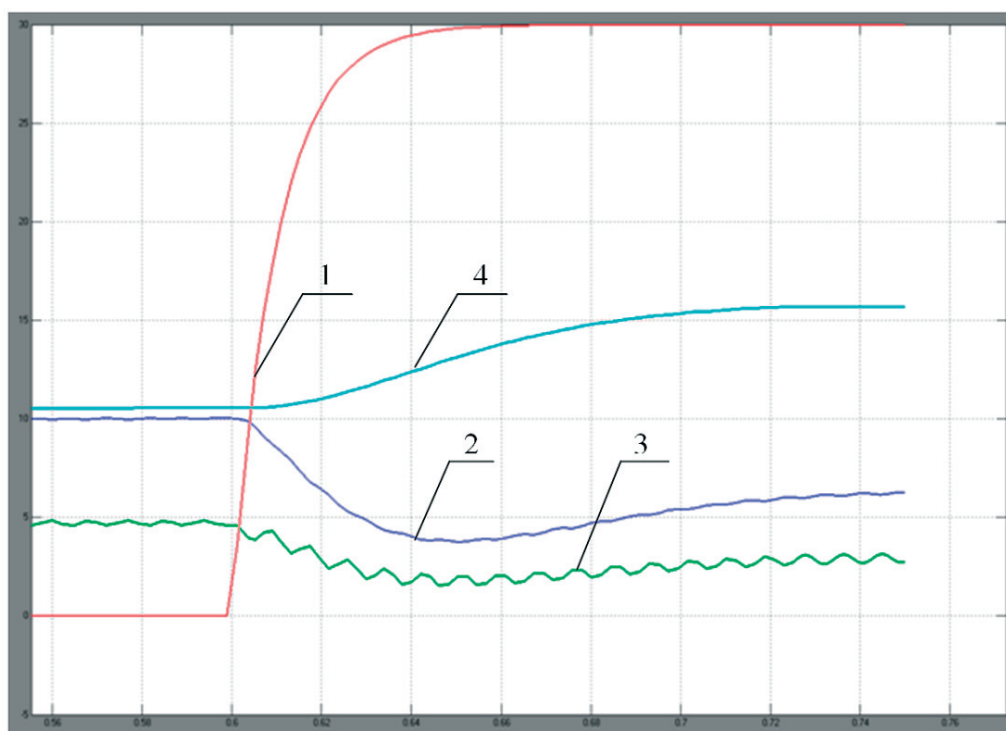


Рисунок 3.55 – Изменение параметров привода рабочих органов траншейного экскаватора при воздействии нагрузок второго типа и увеличении q_m на 2,7 %. 1 – нагрузка; 2 – угловая скорость вала гидромотора; 3 – угловая скорость рабочего органа; 4 – давление в напорной магистрали гидромеханической системы привода

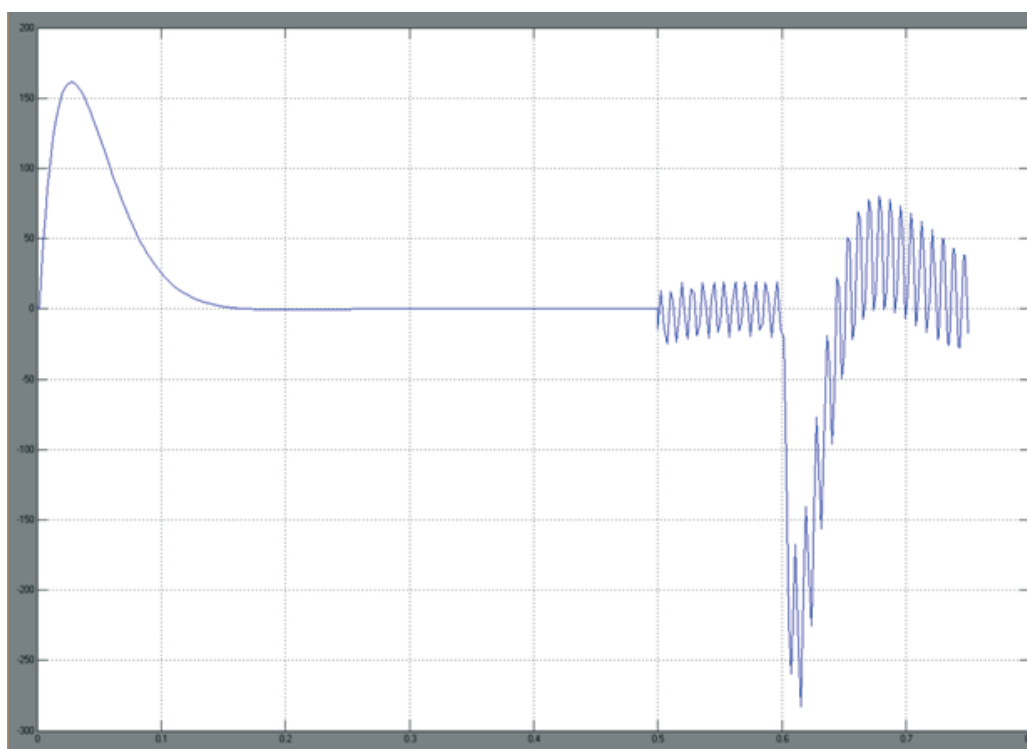


Рисунок 3.56 – Изменение динамического момента, отнесенного к моменту инерции, при воздействии на систему привода рабочих органов траншейного экскаватора нагрузок второго типа и увеличении q_m на 2,7 %

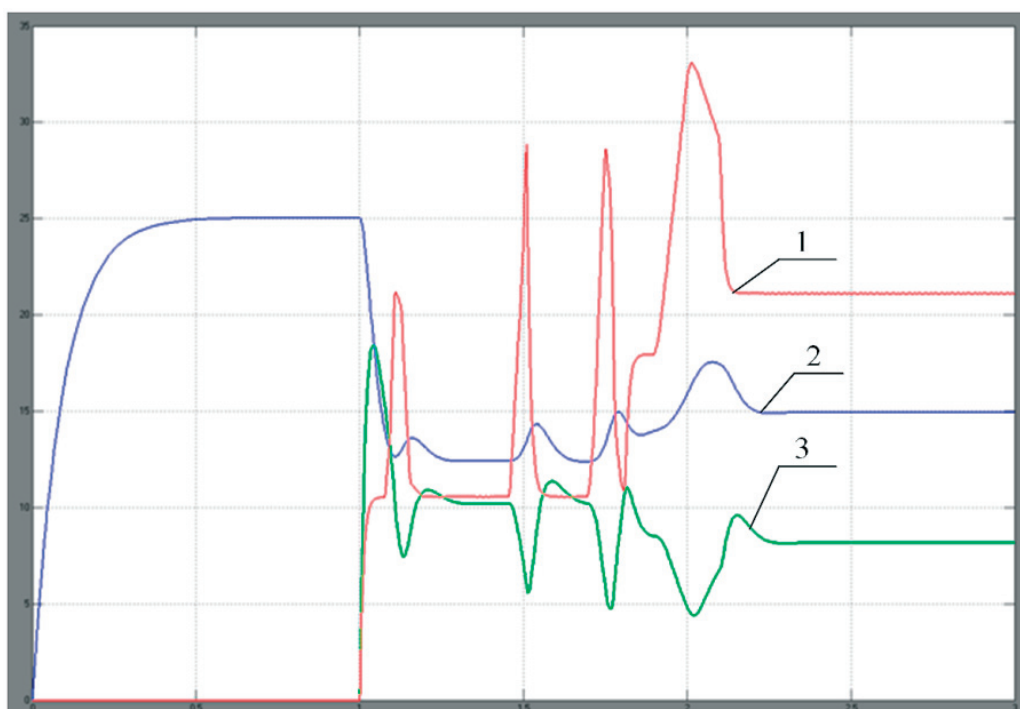


Рисунок 3.57 – Изменение динамического момента, отнесенного к моменту инерции при воздействии на систему привода нагрузок третьего типа по упрощенной имитационной модели. 1 – нагрузка; 2 – давление в напорной магистрали гидромеханической системы привода; 3 – угловая скорость рабочего органа

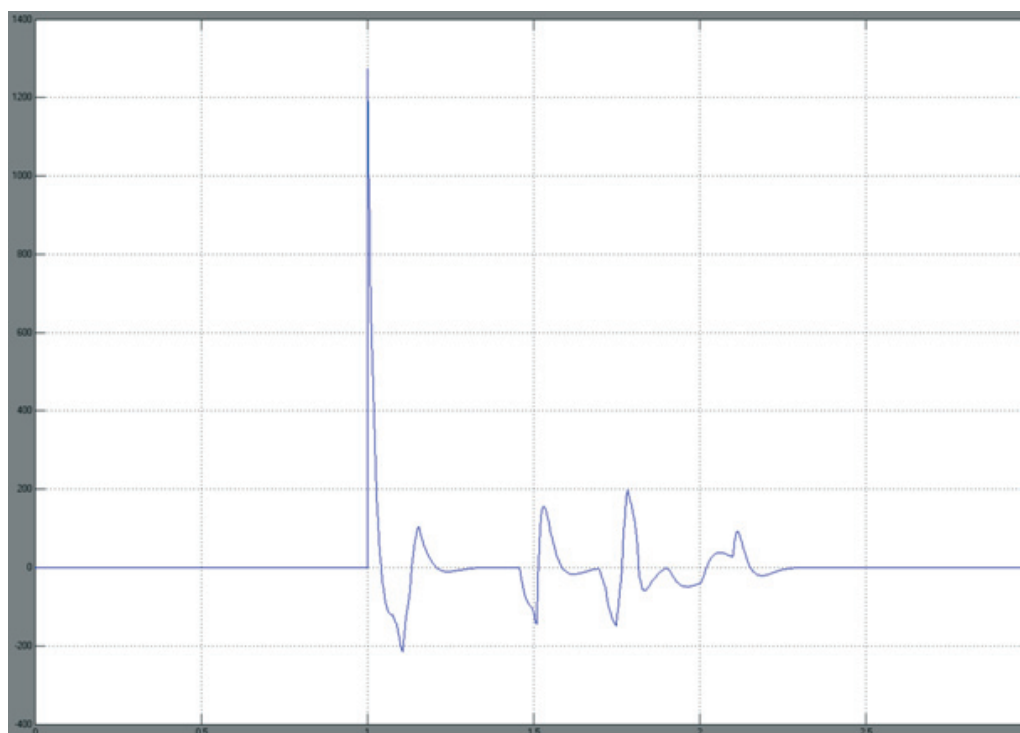


Рисунок 3.58 – Изменение динамического момента, отнесенного к моменту инерции при воздействии на систему привода нагрузок третьего типа по упрощенной имитационной модели

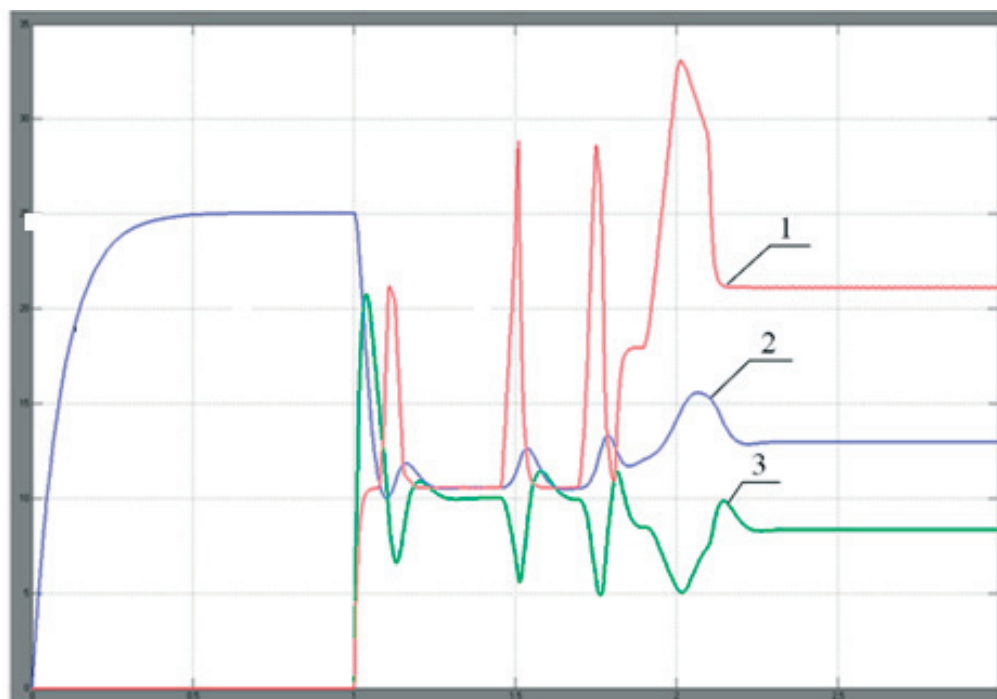


Рисунок 3.59 – Изменение параметров привода рабочих органов при воздействии нагрузок третьего типа и увеличении q_m увеличено на 2,7 % по упрощенной имитационной модели.
 1 – нагрузка; 2 – давление в напорной магистрали гидромеханической системы привода;
 3 – угловая скорость рабочего органа

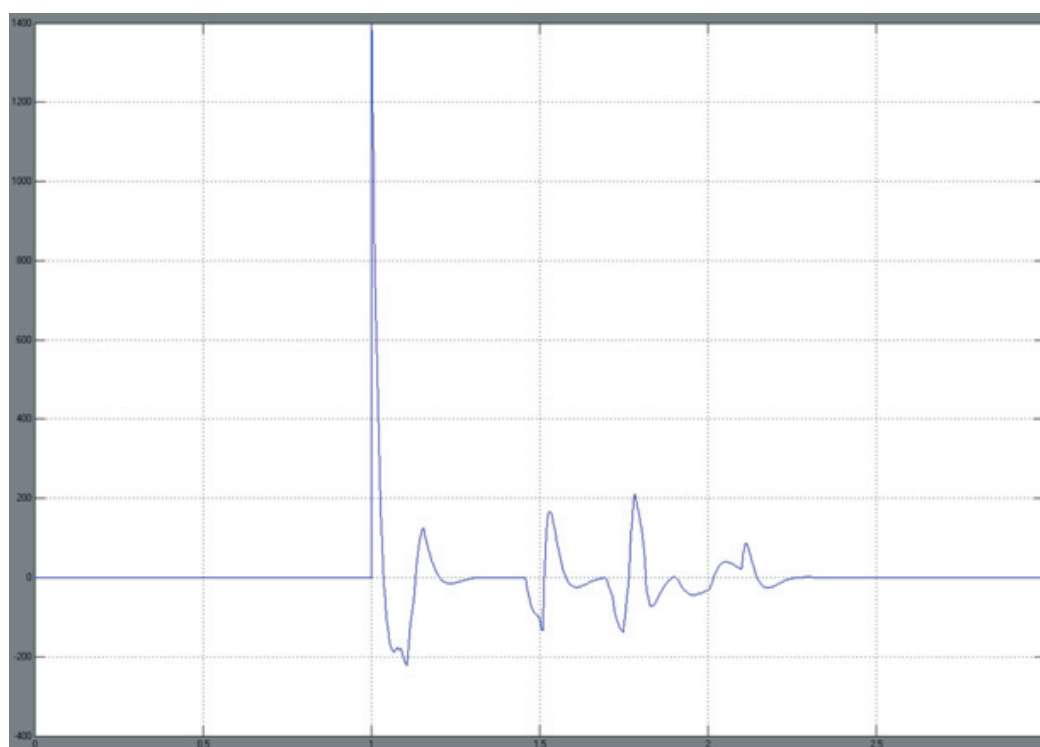


Рисунок 3.60 – Изменение динамического момента, отнесенного к моменту инерции при воздействии нагрузок третьего типа и увеличении q_m на 2,7 % по упрощенной имитационной модели

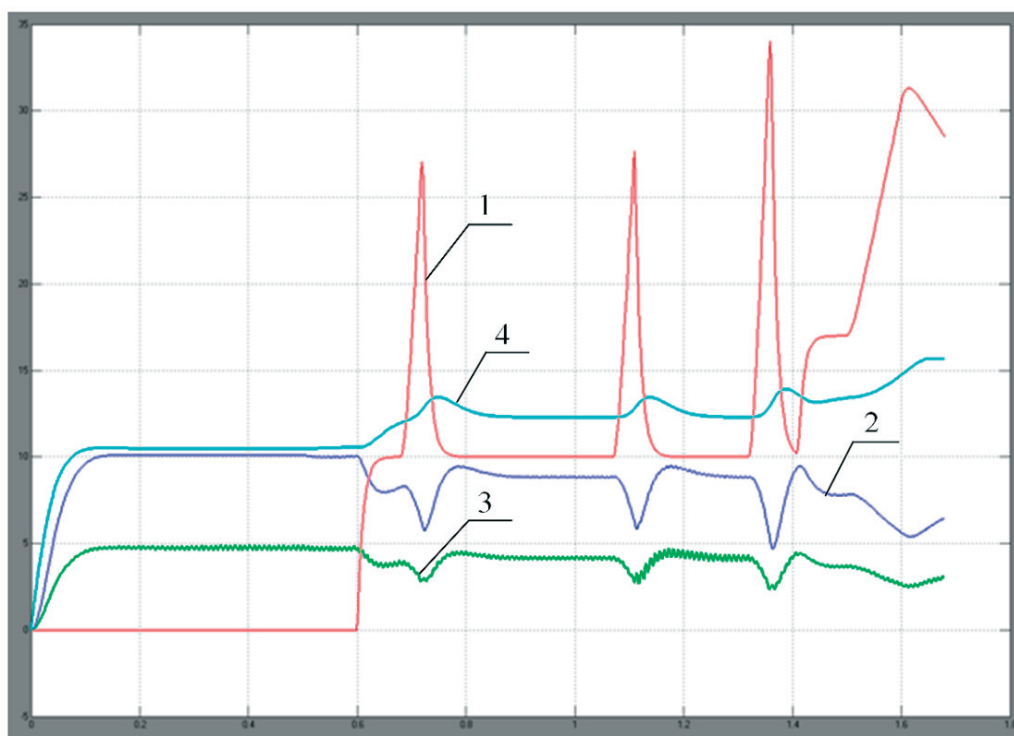


Рисунок 3.61 – Изменение параметров привода рабочих органов при воздействии нагрузок третьего типа и увеличении q_m на 2,7 % по точной имитационной модели: 1– нагрузка; 2 – угловая скорость вала гидромотора; 3 – угловая скорость рабочего органа; 4 – давление в напорной магистрали гидромеханической системы привода

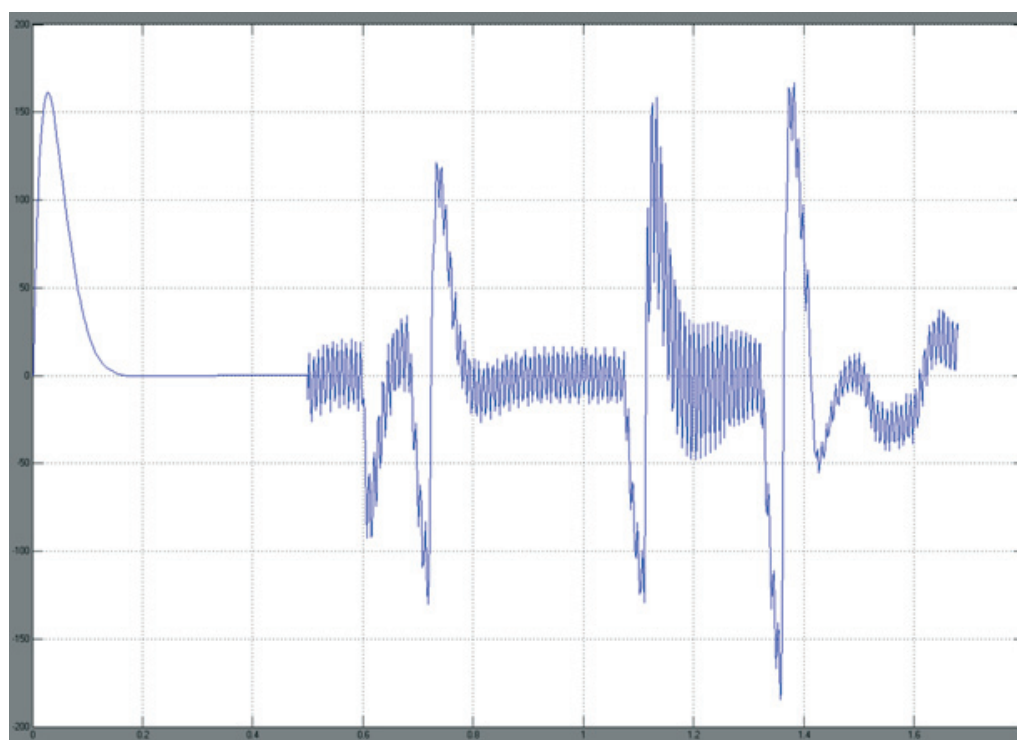


Рисунок 3.62 – Изменение динамического момента, отнесенного к моменту инерции, при воздействии на систему привода нагрузок третьего типа и увеличении q_m на 2,7 % по точной имитационной моделью

На рис. 3.56– 3.59 представлены результаты моделирования при помощи упрощенной имитационной модели и отработке нагрузки третьего типа, а на рис. 3.61–3.62 – результаты моделирования на точной модели при воздействии этого же типа нагрузки.

Сравнение результатов моделирования с использованием точной имитационной модели и упрощенной имитационной модели показывает, что увеличение производительности гидравлического мотора на 2,7 % за счет изменения фазы установки приводит к увеличению динамического момента и снижению скорости гидромотора и рабочего органа при снижении давления в гидросистеме, время работы предохранительного клапана при всех видах формализованных нагрузок существенно уменьшается.

Выводы

1. Разработанные точная и упрощенная имитационные модели исследования режимов работы гидромеханической системы привода рабочего органа траншейного экскаватора адекватно отражают динамические процессы и оценить уровень динамической мощности при разработке однородных мерзлых грунтов и мерзлых грунтов с включениями. Точная модель позволяет, кроме того, исследовать устойчивость возникающих динамических процессов, проводить численные эксперименты с учетом спектра действующих нагрузок и изменений конструктивных параметров траншейного экскаватора.

2. Имитационная модель позволяет исследовать устойчивость системы управления по изменению динамического момента, отнесенного к моменту инерции при воздействии на систему привода рабочего органа нагрузок всех типов и может использоваться для прогнозирования эффективности разработки мерзлых грунтов траншейными экскаваторами может быть положена в основу создания CALS-технологии оценки эффективности применения землеройных машин различного назначения на всех этапах их жизненного цикла.

3. Численные эксперименты, проведенные на разработанных имитационных моделях, показали, что во всех исследуемых режимах, динамические процессы, наблюдаемые при работе траншейного экскаватора, являются устойчивыми. Колебательный характер процессов изменения скорости механических элементов привода (амплитудные значения) зависит от типа нагрузки. Наибольшие относительные амплитудные значения этих колебаний наблюдаются на валу рабочего органа. Они достигают 50 % для мерзлого суглинка и глины с включением.

4. Нагрузки первого, второго и третьего типа, используемые в имитационном моделировании процессов привода рабочего органа траншейного экскаватора, адекватно отражают реальные условия нагружения систем привода при разработке мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями мерзлых, однородных грунтов и мерзлых грунтов с отдельными включениями в виде валунов.

5. Сравнение результатов моделирования показало, что увеличение производительности гидравлического мотора на 2,7 % приводит к соответствующим увеличениям значений динамического момента и скорости гидромотора и рабочего органа, при одновременном снижении давления и уменьшении времени работы предохранительного клапана в гидросистеме.

6. Доказана рациональность имитационной модели гидромеханической системы привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора второго порядка, учитывающей температурные профили промерзания грунта и законы распределения гравийно-галечниковых включений, что обеспечивает сокращение потребляемого при моделировании процессорного времени на 25 процентов при незначительном снижении точности теоретических результатов до 3 процентов во всем спектре нагрузок, действующих на систему привода при разработке мерзлого грунта и формализуемых в упрощенной модели осциллограммами.

4. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА

Одним факторов, оказывающих существенное влияние на производительность землеройных машин является правильность оценки физико-механических свойств мерзлых грунтов и их показателя прочности. Исследованиями А.Н. Зеленина, И.А. Недорезова, В.И. Баловнева, Н.Я. Хархута, Е.М. Кудрявцева, Л.А. Хмара, А.И. Тархова, Н.Н. Карнаухова, Л.Л. Барона, Г.В. Родионова, А.И. Федулова, А.Р. Маттиса, И.К. Растегаева, Л.К. Соколова, В.Г. Жубрина, Б.В. Осипенко и др. внесен значительный вклад в проблему оценки прочности мерзлых грунтов.

Однако грунты Восточно-Сибирского региона отличаются рядом специфических особенностей, связанных с температурами грунта, гранулометрическим составом, частотой его встречаемости.

4.1. Обоснование критерия классификации мерзлых грунтов.

Выбор эталонного грунта

В соответствии с поставленной целью создания классификации мерзлых грунтов, дающей сравнительную оценку их прочности при разработке траншейными экскаваторами, а стало быть, позволяющей качественно и количественно оценить технико-экономические показатели работы машин, представляется целесообразным введение коэффициента прочности сезонно-мерзлых грунтов в виде относительной величины:

$$K_{\text{пр}} = \frac{\Pi_i}{\Pi_3} \quad (4.1)$$

где Π_i – показатель работы машины в i -х грунтовых условиях; Π_3 – то же при разработке мерзлого грунта, принятого за эталон.

В качестве показателя работы машины могут быть использованы производительность машины, энергоемкость процесса разработки грунта, удельные приведенные затраты.

Относительный же характер показателя позволяет исключить влияние факторов, связанных с конструктивными особенностями машин.

За эталонный целесообразно принять грунт, имеющий однородный мелкодисперсионный гранулометрический состав. Это определяется, во-первых, его низкой изнашивающей способностью, а во-вторых, меньшим влиянием изменения влажности на сопротивляемость различного рода нагружению. Всем этим требованиям в наибольшей степени отвечает глина, влажность которой близка к ее полной влагоемкости. Температура грунта по всей толщине принята неизменной и равной $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выбор указанной температуры связан с методикой определения прочностных характеристик грунта $P_{\text{уд}}$ и характеристик изнашивающей способности q . Характеристика эталонного грунта приведена в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристика эталонного грунта

Наименование грунта	Гранулометрический состав (содержание фракций), %			Влажность, %	Число пластичности	Коэффициент абразивности
Глина	Размер частиц, мм			32	23	$0,47 \cdot 10^{-3}$
	< 0,005	0,005–0,1	> 0,1			
	35–38	65–65	–			

Требованиям эталонного грунта для оценки показателей эффективности траншейных экскаваторов, разрабатывающих мерзлые грунты как однородной структуры, так и содержащие включения, в полной мере отвечает глина влажностью 32 %.

4.2. Коэффициент прочности мерзлых грунтов

Обобщение показателей работы современных траншейных экскаваторов в различных грунтовых условиях позволяет установить границы коэффициента

прочности $K_{\text{ПР}}$, по которым тот или иной мерзлый грунт можно отнести к группе типовых условий[29].

При определении количества групп грунтов были учтены следующие положения:

- количество групп и грунтовые интервалы должны обеспечивать удобство практического пользования классификацией;
- малое количество групп предопределяет недостаточную точность оценки;
- слишком большое количество групп не гарантирует существенного отличия между ними.

В связи с этим представляются целесообразными рекомендации М.М. Протодьяконова о том, что ориентировочное число групп должно находиться в пределах 5–10, а величины интервалов определяться по закону геометрической прогрессии.

Принимая во внимание вышеизложенное, диапазон коэффициента прочности мерзлого грунта $K_{\text{ПР}}$ разбит на 6 групп.

В данном случае учтено, что полученный общий диапазон изменения $K_{\text{ПР}}$ составляет в основном 0,3–10. Однако со значения $K_{\text{ПР}} = 4$ применение траншейных экскаваторов становится либо нецелесообразным, либо невозможным.

В связи с этим можно утверждать, что данная классификация не только оценивает прочность грунтов, но и определяет область возможного использования техники. Так экскаваторы, отрывающие траншеи более 1,2 м и глубиной 2 м и более, практически не применимы на грунтах 5 и 6-й группы.

Целью экспериментального исследования являлось определение производительности при разработке траншей в мерзлых грунтах реальными конструкциями траншейных экскаваторов, получение данных для сопоставления экспериментальных и теоретических результатов и оценки адекватности математической имитационной модели.

В качестве основных объектов исследований были выбраны четыре типа экскаваторов: экспериментальный образец ЭТР-134, а также ЭТЦ-208В и ЭТР-254. Их технические параметры приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Основные параметры траншейных экскаваторов

Наименование показателя	Марка траншейного экскаватора									
	ЭТЦ-165	ЭТЦ-208Д	ЭТЦ-208В	ЭТР-134	ЭФ-131	ЭТР-204	ЭТР-223	ЭТР-224	ЭТР-253А	ЭТР-254
Глубина траншеи, м	1,6	2,0	2,0	1,3	1,3	2,0	2,2	2,2	2,5	2,5
Ширина траншеи, м	0,4 0,27 0,2	0,14	0,6	0,28	0,23	1,2	1,5	0,8	2,1	1,8 2,1
Масса, кг	5800	20000	23700	17940	20000	31500	33500	31500	59800	43000
Мощность силовой установки, кВт	59	118	118	81	118	118	118	118	243	221
База	Трактор МТЗ-82	Трактор Т-130.1Г		Трактор ТТ-4	Трактор Т-130.1Г	Специальная с использованием сборочных единиц трактора Т-130			Трактор ДЭТ-250М	Специальная с испол. ед. тракторов К-700 и Т-130

Цель экспериментальных исследований достигалась решением ряда задач:

- определение основных режимных параметров;
- определение показателей физико-механических свойств грунта;
- сопоставление результатов натурного эксперимента с расчетными характеристиками.

В соответствии с перечисленными задачами программа натурных исследований включала выполнение траншейными экскаваторами типичных технологических операций в определенных грунтовых условиях. Испытания проводились в районе г. Красноярск в период с января по апрель 1985 г. [52, 58, 126].

При этом произведен сбор следующей информации:

- производительность машины, которую определяли методом выборочного хронометража с параллельной записью процесса на осциллограмму;

– грунтовые условия, включающие определение числа ударов плотномера ДорНИИ на различных уровнях траншеи, температуры грунта, его влажности и гранулометрического состава.

Результаты экспериментальных исследований даны в табл. 4.3 и 4.4. Как видно из таблиц, сопоставление данных эксперимента и расчетов с применением математической модели дает расхождение не более 15 %, что позволяет судить о достаточно высокой достоверности теоретических результатов. Сравнение при этом вели относительно производительности машин, как основной величины, определяющей характер рабочего процесса.

Таблица 4.3. – Характеристика условий проведения экспериментальных исследований

Объект исследований	Номер участка	Вид грунта	Распределение числа ударов C по глубине H	Глубина промерзания
ЭТР-160	1	Суглинок	$C = 77,9 + 21,7H - 49,6H^2$	1,20
	2	Суглинок	$C = 98,2 - 46,1H - 18,9H^2$	1,02
ЭТЦ-208В	1	Суглинок	$C = 72,9 - 39,0H + 5,7H^2$	1,20
	2	Суглинок	$C = 50,1 + 40,1H - 50,4H^2$	1,10
ЭТР-253А	1	Суглинок	$C = 75,7 - 94,6H + 41,3H^2$	0,85
	2	Суглинок	$C = 53,0 - 5,2H - 20,1H^2$	0,60
ЭТР-223	1	Глина	$C = 39,0 - 12,9H$	0,7

Таблица 4.4 – Экспериментальные и расчетные показатели работы траншейных экскаваторов

Объект исследования	Номер участка	Общая длина участка, м	Глубина отрываемой траншеи, м	Средняя производительность на участке, м/ч	
				Экспериментальное значение	Расчетная величина
ЭТР-160	1	90	1,3	45,4	49,0
	2	50	1,0–1,3	59,2	56,9
ЭТЦ-208В	1	20	2,0	37,2	43,3
	2	25	2,0	40,2	47,7
ЭТР-253А	1	15	1,25	104,1	120,3
	2	40	0,95	154,5	155,0
ЭТР-223	1	15	1,5	40,9	45,1

Проведенные исследования дают основание сформулировать следующие выводы.

Коэффициент прочности мерзлых грунтов землеройными машинами, полагаемый в основу классификации, должен определяться физико-механическими

характеристиками разрабатываемых грунтов и не зависеть от конструктивных особенностей машин. В результате исследований установлено, что таким показателем может служить коэффициент прочности мерзлого грунта $K_{\text{ГР}}$, рассчитанный как отношение удельных приведенных затрат при разработке конкретного и эталонного грунтов.

Многообразие физико-механических свойств мерзлых грунтов, влияющих на трудность их разработки машинами, может быть сконцентрировано в ряде показателей:

- 1) число пластичности;
- 2) число ударов плотномера ДорНИИ на поверхности (или влажность и температура грунта);
- 3) глубина промерзания;
- 4) наличие и процентное содержание в грунте гравийно-галечниковых включений.

В основе классификации мерзлых грунтов по коэффициенту прочности траншейными экскаваторами лежит разбиение на 6 групп [130] в зависимости от уровня значений коэффициента $K_{\text{ГР}}$ (табл. 4.5).

Таблица 4.5 – Предельные значения показателя прочности сезонномерзлых грунтов

	Группа разрабатываемого грунта					
	I	II	III	IV	V	VI
Предельные значения коэффициента прочности сезонномерзлых грунтов	<0,25	0,25–0,5	0,5–1,0	1,0–2,0	2,0–4,0	>4,0

По результатам исследований разработаны рекомендации для уточнения классификации мерзлых грунтов, положенной в основу ЕниР. Группы грунтов при этом ориентированы на наиболее вероятные грунтовые условия эксплуатации землеройной техники в районах Сибири и Севера страны.

Разработанная классификация мерзлых грунтов с учетом ранее исследованных вероятных условий эксплуатации землеройных машин позволяет осу-

пещество инженерное районирование исследованной территории с точки зрения возможности и эффективности применения существующих машин для разработки траншей, обосновать выбор их типоразмера и направления создания новых средств механизации.

Предложен показатель оценки эффективности разработки мерзлых однородных грунтов и грунтов с включениями траншейными экскаваторами.

4.3. Техничко-экономические показатели работы траншейных экскаваторов в различных грунтовых условиях

В соответствии с указанными принципами построения классификации и ранее проведенными исследованиями условий эксплуатации землеройных машин в районах Сибири и Севера [37, 39], в том числе в Красноярском крае, Иркутской области, Республики Саха и Бурятии области, выделены группы типовых грунтовых условий с соответствующими интервалами значений физико-механических свойств.

Из всего многообразия однородных грунтов региона выбрано 11 видов, разделенных по гранулометрическому составу в соответствии с классификацией. Осуществлен выбор 14 видов грунтов с гравийно-галечниковыми включениями от 10 до 200 мм и выше (табл. 4.6).

Анализ распределений температур мерзлого грунта по глубине позволил установить четыре наиболее вероятных расчетных случая, обозначенных T_1 , T_2 , T_3 и T_4 (табл. 4.7).

Для каждого вида грунта установлены интервалы изменения влажности, охватывающие характерные пределы данной характеристики, а также рассчитаны коэффициенты абразивности K_A и давление q_1 при $t = -1$ °C (табл. 4.8).

В соответствии с каждым расчетным температурным режимом распределение числа ударов плотномера ДорНИИ по глубине определено в зависимости от вида, температуры и влажности грунта [42].

Таблица 4.6 – Виды и гранулометрический состав исследуемых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями

Тип грунта	Гранулометрический состав грунтов				
	Содержание фракций, %				
	Размеры частиц, мм				
	< 0,005	0,005–0,1	0,1–0,5	0,5–2,0	2,0–10,0
Суглинок с гравием и галькой	14–16	13–16	14–27	12–15	17–19
	10–13	29–43	25–27	9–12	6–8
	11–14	29–53	18–20	10–13	5–7
	11–14	10–14	6–25	10–13	16–20
	12–13	9–12	19–34	7–9	14–17
	9–12	26–39	17–19	9–11	8–9
Супесь с гравием и галькой	4–5	33–40	17–18	12–13	9–11
	6–7	8–11	7–10	8–11	20–35
Песок с галечниковыми включениями		12–17	28–29	18–19	12–13
		40–43	21–29	16–19	10–11
			46–58	12–14	7–10
Гравийно-галечниковый		5–8	23–24	10–11	18–19
		7–10	15–17	11–13	15–16
			22–37	11–14	15–18

Окончание таблицы 4.6

Тип грунта	Гранулометрический состав грунтов				
	Содержание фракций, %				
	Размеры частиц, мм				
	10,0–30,0	30,0–70,0	70–100	100–200	> 200
Суглинок с гравием и галькой	17–20				
	7–11				
	6–8	6–8			
	14–17	14–16			
	12–15	11–13	1–2		
	10–12	7–9	1–2		
Супесь с гравием и галькой	7–8	11–12			
	12–13	6–7	4–5	6–7	8–9
Песок с галечниковыми включениями	25–27				
	5–6				
	11–13	8–10	2–3	1–2	1–2
Гравийно-галечниковый	25–26	16–17			
	27–28	16–17	6–7		
	18–21	15–18	2–3	1–2	1–2

Таблица 4.7 – Распределение отрицательных температур по глубине грунта

Расчетный случай	Глубина промерзания, м	Распределение температур t , °С, по глубине H , м
T_1	От 0,7 до 1,0	$t = -5,1 + 14,6 H - 10,6 H^2$
T_2	От 1,0 до 2,0	$t = -9,0 + 7,0 H - 0,9 H^2$
T_3	$> 2,0$	$t = -9,7 + 7,6 H - 1,6 H^2$
T_4	Под слоем талого	$t = 3,96 - 3,93 H + 0,51 H^2$

Указанные распределения достаточно надежно выравниваются полиномами второй степени:

$$C = \alpha_1 + \alpha_2 H + \alpha_3 H^2, \quad (4.2)$$

где α_1 , α_2 , α_3 – коэффициенты; H – глубина, м.

Значения коэффициентов α_1 , α_2 и α_3 для всех видов грунтов и температурных режимов приведены в табл. 4.8.

Таким образом, общий комплекс возможных сочетаний физико-механических свойств мерзлых грунтов составил 140 вариантов из числа наиболее вероятных.

Исследование показателей работы траншейных экскаваторов при разработке различных грунтов проводилось с применением экономико-математической модели, позволяющей определить максимальные и среднемаксимальные нагрузки, действующие на машину, стойкость режущего инструмента и его расход, производительность машины, оценить годовые и удельные приведенные затраты.

Поскольку классификация носит общий характер для всех типоразмеров траншейных экскаваторов из числа существующих конструкций траншейных машин было выбрано пять: ЭТР-134, ЭТЦ-208Д, ЭФ-224, ЭТР-223, ЭТР-254, т.е. охвачены практически все виды и типоразмеры данного класса техники. Их основные параметры приведены в табл. 4.9.

Для каждой машины-представителя получен следующий комплекс выходной информации:

- средняя производительность за период стойкости комплекта режущего инструмента $V_{\text{п}}$;
- эксплуатационная производительность B ;
- длина отрываемой траншеи, соответствующая периоду стойкости инструмента L ;
- удельные приведенные затраты при разработке конкретного грунта $Z_{\text{уд}}$.

Таблица 4.8 – Распределение показателей физико-механических свойств грунтов

Тип грунта	Коэф- фициент абразив- ности $K_A 10^3$	Влаж- ность ω , %	Удельное давление на площадку износа g_1 при $V_P = 2$ м/с, кг/см ²	Температурный режим					
				T_1			T_2		
				Коэффициенты уравнения					
				α_1	α_2	α_3	α_1	α_2	α_3
Глина тяжелая	0,470	25–30	135	174,02	–331,81	273,93	173,13	–23,24	–16,51
		30–35	125	187,63	–245,25	104,93	198,96	–60,82	–8,40
		35–40	115	106,08	–91,53	24,30	160,83	–40,16	–9,84
		40–45	105	92,32	243,08	245,95	133,41	–59,85	–0,32
Глина	0,510	17–20	130	123,48	–284,0	230,26	153,91	–35,47	–15,32
		20–23	135	155,26	–219,07	67,01	168,27	–52,86	4,25
		23–26	135	178,14	–386,97	346,10	184,91	–71,52	9,63
Суглинок мелкий	1,485	13	105	58,5	–87,68	80,36	81,14	–17,53	–18,0
Суглинок средний	1,087	16	105	155,0	–344,64	267,86	178,82	–45,3	–32,0
Суглинок тяжелый	0,750	20	130	174,50	–395,89	312,58	190,0	–21,0	–53,2

Окончание таблицы 4.8

Тип грунта	Коэффици- ент абра- зивности $K_A 10^3$	Влаж- ность ω , %	Удельное давле- ние на площадку износа g_1 при $V_P = 2$ м/с, кг/см ²	Температурный режим				
				T_3		T_4		
				Коэффициенты уравнения				
				α_1	α_2	α_3	α_1	α_2
Глина тяжелая	0,470	25–30	135	179,60	–42,45	–7,39	4,50	45,17
		30–35	125	193,03	–39,22	–4,68	–20,73	
		35–40	115	165,33	–57,60	0,25	8,54	
		40–45	105	137,32	–74,89	9,49	9,35	
Глина	0,510	17–20	130	162,01	–62,90	0,18	–24,22	46,61
		20–23	135	165,69	–40,49	–5,23	–27,35	60,36
		23–26	135	181,97	–60,16	2,19	5,56	43,04
Суглинок мелкий	1,485	13	105	91,02	–51,28	11,33	21,21	9,75
Суглинок средний	1,087	16	105	197,45	–95,98	11,69	–32,82	54,64
Суглинок тяжелый	0,750	20	130	217,0	–96,83	9,46	–34,32	59,64

Таблица 4.9 – Основные параметры траншейных экскаваторов

Показатель	Марка траншейного экскаватора									
	ЭТЦ-165	ЭТЦ-208Д	ЭТЦ-208В	ЭТР-134	ЭФ-131	ЭТР-204	ЭТР-223	ЭТР-224	ЭТР-253А	ЭТР-254
Глубина траншеи, м	1,6	2,0	2,0	1,3	1,3	2,0	2,2	2,2	2,5	2,5
Ширина колеи, м	0,4 0,27 0,2	0,14	0,6	0,28	0,23	1,2	1,5	0,8	2,1	1,8 2,1
Масса, т	5,8	20	23,7	17,94	20	31,5	33,5	31,5	59,8	43
Мощность силовой установки, кВт	59	118	118	81	118	118	118	118	243	221
База	трактор МТЗ-82	трактор Т-130,1Г		трактор ТТ-4	трактор Т-130.1 Г	специальная с использованием сборочных единиц трактора Т-130			трактор ДЭТ-250М	специальная с испол. ед. К700 Т-130

Для выбора наиболее приемлемого варианта классификации сделана попытка рассмотрения критерия прочности разработки сезонно-мерзлых грунтов в виде отношения производительностей и отношения удельных приведенных затрат, т.е.

$$K_{\text{ПР}} = \frac{V_{\text{Пл}}}{V_{\text{ПЭ}}}; \quad K_{\text{ПР}} = \frac{Z_{\text{уд}i}}{Z_{\text{удЭ}}}. \quad (4.3)$$

Обобщенные показатели применительно к экскаватору ЭТЦ-208Д приведены в табл. 4.10.

Анализ полученных результатов показал, что для различных машин, но одинаковых сочетаний грунтовых условий, значения коэффициента $K_{\text{ПР}1}$ достаточно близки. Так для среднего суглинка при влажности 16 % и температуре, соответствующей значению T_2 , значение $K_{\text{ПР}1}$ варьируется в пределах 0,5–0,9; для тяжелой супеси 0,20–0,35.

Общий диапазон изменения $K_{\text{ПР}}$ для различных грунтов составляет от 0,1 до 3,0.

Как видно из графиков, несмотря на незначительное различие абсолютных значений $K_{\text{ПР2}}$, интенсивность и закон его изменения для обеих машин носит весьма близкий характер, как в плоскости $T - \text{const}$, $\omega - \text{inv}$, так и в плоскости $T - \text{inv}$, $\omega - \text{const}$.

Результатом обобщения полученной информации стали зависимости коэффициента прочности $K_{\text{ПР}}$ от основных физико-механических характеристик мерзлого грунта [39, 41]. Следует отметить, что зависимости даны в двух вариантах: от числа ударов C и температуры грунта, что позволяет произвести пересчет $K_{\text{ПР2}}$ при появлении новых методов оценки состояния грунта.

Для однородных грунтов данная зависимость имеет следующий вид:

$$K_{\text{ПР1}} = 3,324(1,038 - 0,0227C + 0,00015C^2) (-0,436 + 1,157H - 0,146H^2) \times \\ \times (1,975 - 0,159J_p + 0,00412 J_p^2); \quad (4.4)$$

$$K_{\text{ПР2}} = 3,206(0,202 + 0,210t + 0,002t^2) (-0,509 + 1,258H - 0,1380H^2) \times \\ \times (1,026 + 0,0181\omega - 0,00082\omega^2) (1,615 - 0,115J_p + 0,00345 J_p^2) \quad (4.5)$$

при $C \geq 75$; $0,4 \leq H \leq 4,5$ м.

Для грунтов с гравийно-галечниковыми включениями:

$$K_{\text{ПР1}} = 5,841 (11,922 - 0,310C + 0,00203C^2) (-0,912 + 3,106H - 0,405H^2) \times \\ \times (0,264 + 0,0375\xi_1 + 0,00044 \xi_1^2) (0,696 + 0,0828\xi_2 - 0,00388 \xi_2^2) \times \\ \times (0,687 + 0,199\xi_3 - 0,0943 \xi_3^2) (1,158 + 0,0987J_p - 0,0184 J_p^2) \quad (4.6)$$

при $0,5 \leq H \leq 2,5$ м; $9 \leq \xi_1 \leq 30$ %; $0 \leq \xi_2 \leq 18$ %; $0 \leq \xi_3 \leq 6$ %; $C \geq 75$.

$$K_{\text{ПР2}} = 5,836 (0,354 + 0,240t + 0,0385t^2) (1,005 - 0,00448H + 0,00097H^2) \\ \times (0,741 - 0,0332\xi_1 + 0,00265 \xi_1^2) (0,685 + 0,0609\xi_2 - 0,00210 \xi_2^2) \times \\ \times (0,638 + 0,172\xi_3 - 0,00627 \xi_3^2) (1,090 + 0,199J_p - 0,0301 J_p^2) \quad (4.7)$$

при $t \leq -3$ °С,

где C – число ударов плотномера ДорНИИ; H – глубина промерзания, м; J_p – число пластичности; t – отрицательная температура грунта, °С; ω – влажность грунта, %; ξ_1 – процентное содержание гравийно-галечниковых включений размером от 10 до 30 мм; ξ_2 – то же, от 30 до 70 мм; ξ_3 – то же, свыше 70 мм.

Таблица 4.10 – Техничко-экономические показатели работы экскаватора ЭТР-224 на однородном мерзлом грунте

Вид грунта (влажность, %)	Температурный режим											
	T_1				T_2				T_3			
	V_{Π}	$Z_{\text{уд}}$	$K_{\text{ПР } 1}$	$K_{\text{ПР } 2}$	V_{Π}	$Z_{\text{уд}}$	$K_{\text{ПР } 1}$	$K_{\text{ПР } 2}$	V_{Π}	$Z_{\text{уд}}$	$K_{\text{ПР } 1}$	$K_{\text{ПР } 2}$
Суглинок легкий (13)	71,3	0,081	1,595	0,353	47,5	0,193	1,064	0,839	46,7	0,359	1,045	1,560
Суглинок средний (16)	53,5	0,111	1,196	0,484	18,8	0,338	0,420	1,470	17,8	0,559	0,399	2,432
Суглинок тяжелый (20)	48,6	0,124	1,088	0,537	17,0	0,405	0,381	1,759	13,1	0,618	0,293	2,688

Число ударов C и число пластичности J_p в выражениях (4.4)–(4.7) определены для сезонно-мерзлого суглинка в учетом его влажности и температуры, характерных температурных профилей промерзания в соответствии с методикой [119].

Анализ данных результатов показывает, что характер изменения коэффициента $K_{\text{ПР}}$ для различных машин идентичен. Данный факт хорошо иллюстрируется с помощью так называемых поверхностей отклика, выражающих собой зависимость $K_{\text{ПР } 2}$ от влажности и температурного режима грунта. На рис. 4.1 показаны подобные зависимости для экскаваторов ЭФ-131 и ЭТР-224.

Очевидно, что практическое использование полученных выражений для определения величины $K_{\text{ПР}}$ затруднено в связи со сложным влиянием каждого задающего фактора. Анализ качественной и количественной картины изменения критерия прочности грунта позволил сделать вывод о возможности достаточно точной его оценки с помощью номограмм (графиков), построенных применительно к наиболее вероятным распределениям температур грунта и его видам.

Рассмотрим поверхности отклика коэффициентов прочности сезонно-мерзлых грунтов при $K_{\text{пр}}$ разработке экскаваторами ЭТР-223 и ЭТР-254. В качестве разрабатываемых грунтов исследованы суглинок, глина, глина тяжелая, имеющие профили промерзания T_1 , T_2 , T_3 .

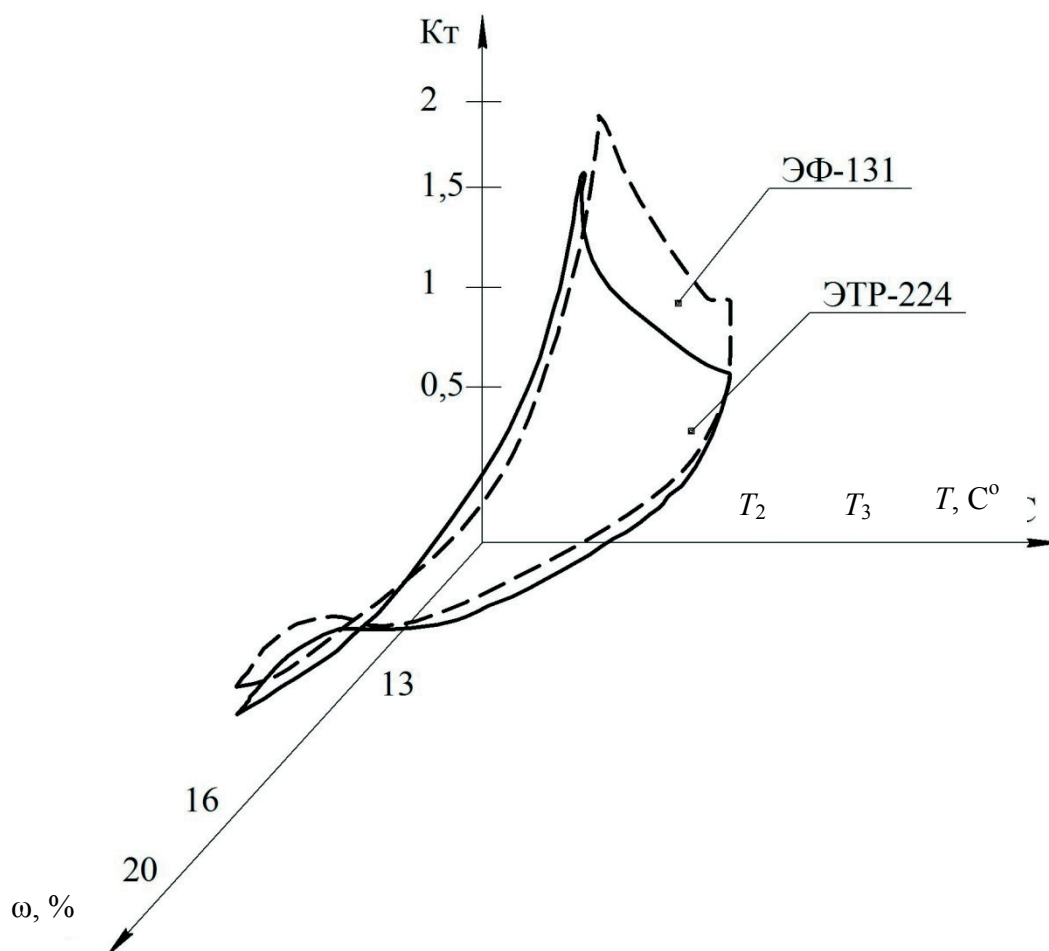


Рисунок 4.1 – Зависимость коэффициента прочности грунта $K_{\text{пр}}$ от влажности и профиля промерзания грунта

На рис. 4.2 приведены поверхности отклика изменения коэффициента прочности $K_{\text{пр}}$ сезонномерзлого суглинка в условиях изменения влажности ω от 13 до 20 % и температурного режима промерзания T_i . Сравнительный анализ полученных поверхностей отклика показывает, что экскаватор ЭТР-254 более эффективен во всем диапазоне влажности суглинка при первом температурном режиме промерзания грунта.

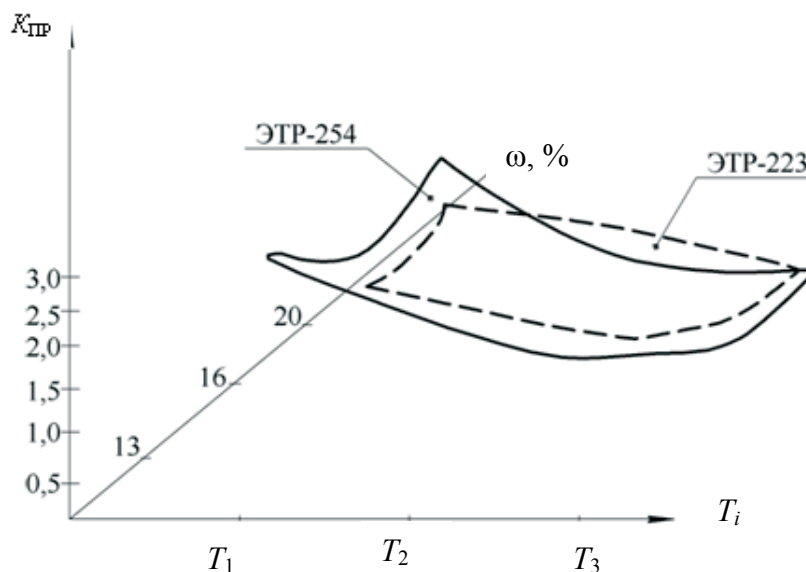


Рисунок 4.2 – Зависимость коэффициента прочности грунта при разработке траншейными экскаваторами сезонномерзлого суглинка

При втором температурном режиме промерзания суглинка в исследуемом диапазоне влажности грунта более предпочтительно использование экскаватора ЭТР-224, так как коэффициент прочности грунта для (эффективности) этого экскаватора выше в среднем на 0,12.

Для третьего режима промерзания экскаватор ЭТР-254 более эффективен при влажности грунта не более 14 %. В оставшемся диапазоне предпочтительно использование экскаватора ЭТР-224.

На рис. 4.3 приведены поверхности отклика коэффициентов прочности мерзлой глины влажностью от 18 до 24,5 %. Применительно к этому типу сезонномерзлой глины во всем диапазоне влажности и температурного промерзания более эффективен с точки зрения производительности и энергоемкости роторный экскаватор ЭТР-254.

Аналогичный вывод о предпочтительном выборе экскаватора ЭТР-254 для разработки глины тяжелой необходимо сделать по сравнительному анализу поверхностей отклика коэффициентов прочности (рис. 4.4). Исключением из исследованной области является диапазон влажности грунта от 37,5 до 39,0 % в первом температурном режиме, где эффективность экскаваторов одинакова.

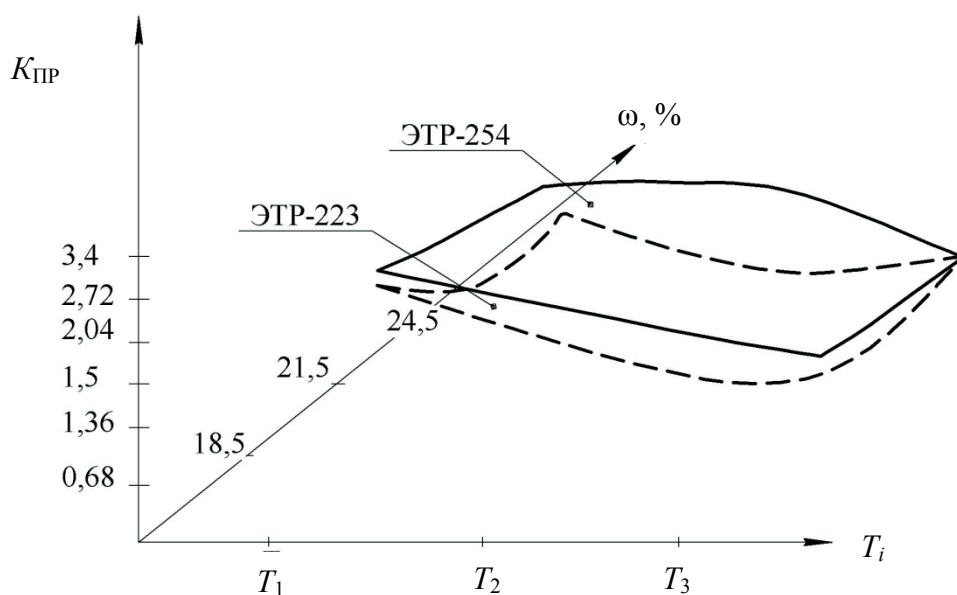


Рисунок 4.3 – Зависимость коэффициента прочности грунта при разработке траншейными экскаваторами сезонномерзлой глины

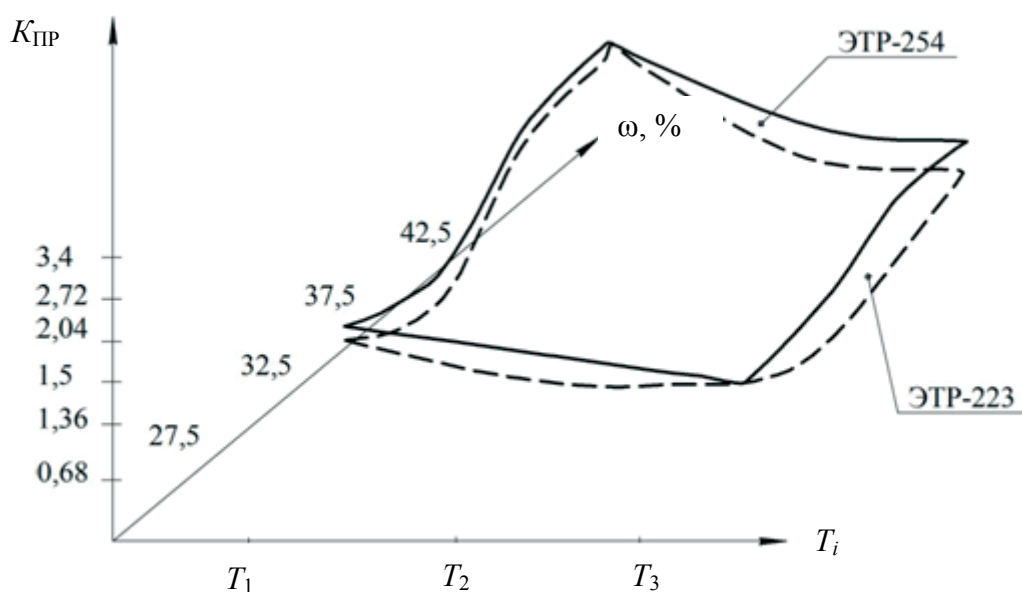


Рисунок 4.4 – Изменение коэффициента прочности сезонно мерзлой тяжелой глины при разработке траншейными экскаваторами

Приведенная информация по узкой выборке механических средств разработки грунта и типам разрабатываемых грунтов показывает, что коэффициент прочности сезонномерзлых грунтов позволяет в полной мере оценить эффективность каждого механического средства и определить область его рационального использования.

Получены зависимости коэффициента прочности для мерзлого грунта однородного по составу и грунта с включениями как в функции физико-механических характеристик мерзлого грунта, так и в функции температуры грунта и его прочности, оцениваемой по числу ударов плотномера ДорНИИ.

4.4. Метод оценки эффективности разработки мерзлых грунтов

Представленные в работах [38, 39] математические зависимости, определяющие влияние физико-механических свойств мерзлого грунта на показатель трудности разработки, неудобны для практического использования. В этой связи большую наглядность и меньшую трудоемкость при определении коэффициента прочности мерзлых грунтов представляют собой номограммы (рис. 4.5, 4.6).

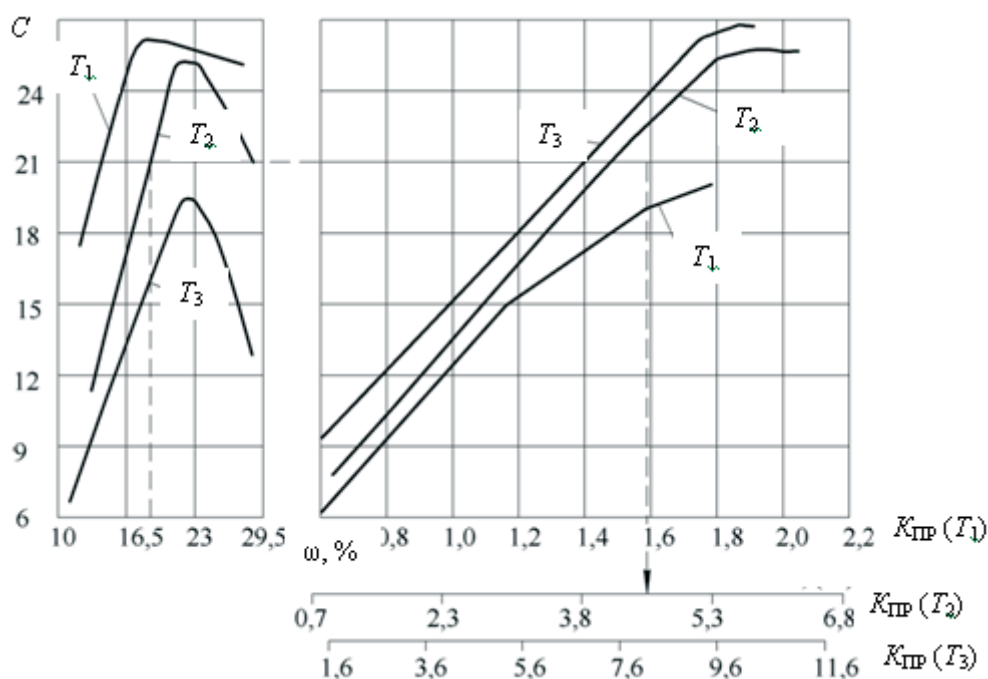


Рисунок 4.5 – Номограмма определения коэффициента прочности однородных мерзлых грунтов

Здесь приведена номограмма определения трудности разработки мерзлого однородного грунта, полученная при использовании его паспортных характеристик ω , J_p и профиля промерзания T_1 . Левая часть номограммы отражает

зависимость числа ударов плотномера ДорНИИ от влажности ω и температурного профиля промерзания T_1

Вид грунта при этом задан числом пластичности J_p , а температура – наиболее вероятным для рассматриваемого случая профилем промерзания T_1 :

T_2 – глубина промерзания до 1,2 м, температура на поверхности – 5 °С;

T_3 – глубина промерзания грунта находится в диапазоне от 1,2 до 2,5 м, температура на поверхности от –5 до –10 °С;

T_4 – глубина промерзания больше 2,5 м, температура на поверхности менее –10 °С.

В правой части номограммы показано изменение коэффициента прочности грунта в функции числа ударов ударника C и профиля промерзания T_1 .

Например, разрабатываемая супесь имеет число пластичности $J_p = 2,0$, влажность ω 18,0 %, температура поверхностного слоя составляет 5,5 °С при глубине сезонного промерзания до 1,5 м.

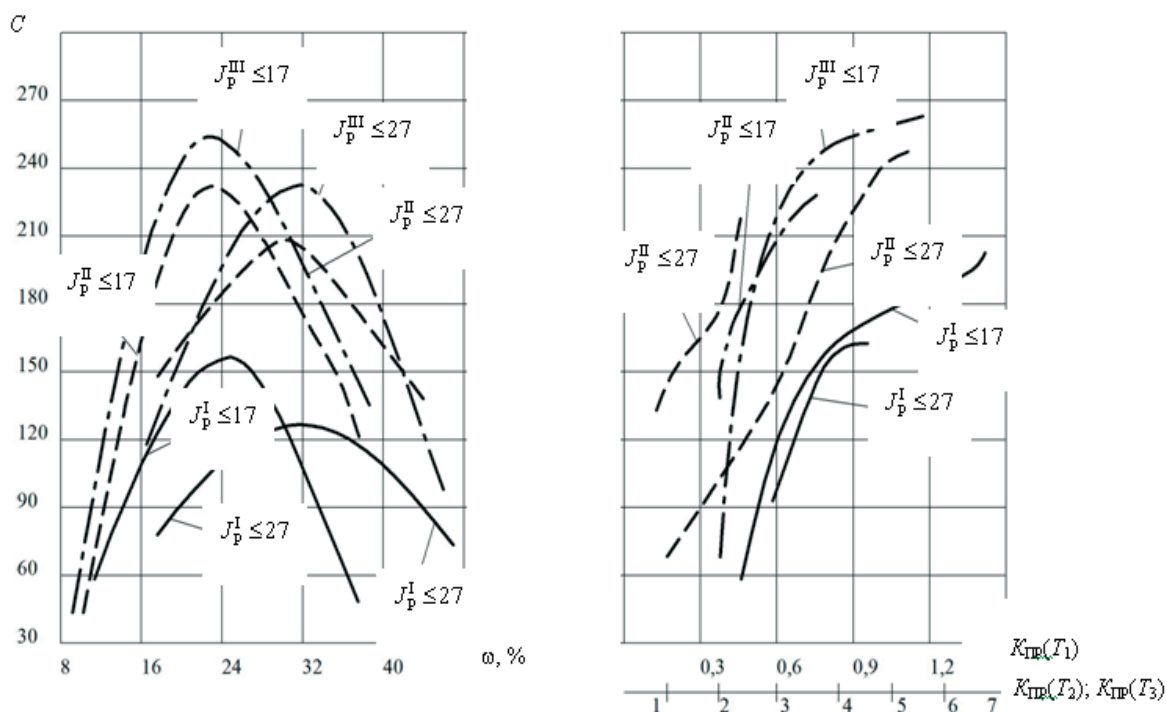


Рисунок 4.6 – Номограмма определения коэффициента прочности однородных мерзлых грунтов (глина, суглинок)

Температура t на поверхности до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$; глубина промерзания H до 1,0 м;

$K_{\text{ПР}}(T_2)$; $-10\text{ }^{\circ}\text{C} < t < -5\text{ }^{\circ}\text{C}$; $1,2 < H \leq 2,5$ м; $K_{\text{ПР}}(T_3)$;

t ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; H более 2,5 м; $K_{\text{ПР}}(T_4)$

Значения температуры грунта $t = -5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и глубины промерзания (см. табл. 4.7) позволяют отнести условия промерзания грунта ко второму профилю. Значение влажности ω , %, откладываем на графике зависимости $C = f(\omega, T_1)$. Из полученной точки пересечения с графиком T_2 проводим горизонтальную линию до пересечения с графиком $K_{\text{ПР}} = f(C, T, J_H)$ правой части номограммы. На шкале абсцисс получаем величину $K_{\text{ПР}} = 4,18$.

Рассмотрим графический метод определения коэффициента прочности сезонномерзлого грунта с включениями на примере суглинка и супеси (рис. 4.7 и 4.8).

Наиболее вероятными температурными профилями неоднородного суглинка являются профили T_1 , T_2 , T_3 , а профили T_1 , T_2 характерны для супеси.

При температурном профиле T_2 глубина промерзания достигает 1,2 м, а температура на поверхности колеблется от -1 до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для температурного профиля T_3 глубина промерзания находится в диапазоне от 1,2 до 2,5 м, температура грунта на поверхности от -5 до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При температурном профиле T_4 глубина промерзания больше 2,5 м, а температура грунта на поверхности -10° .

На рис. 4.7–4.9 приведены графики для определения коэффициентов прочности грунтов с гравийно-галечными включениями. Входными параметрами при этом являются суммарное содержание гравийно-галечных включений ξ и состояние грунта-заполнителя.

На рис. 4.7 приведен график определения коэффициента прочности суглинка влажностью до 35 %, с содержанием гравийно-галечниковых включений 23 %. Используя паспортную характеристику суглинка (ω %) и профили промерзания T_i определим коэффициенты прочности при различных профилях промерзаниях.

Например, при первом профиле промерзания коэффициент прочности суглинка равен 0,542, при втором его значение равно 1,32, при третьем профиле промерзания – 2,32.

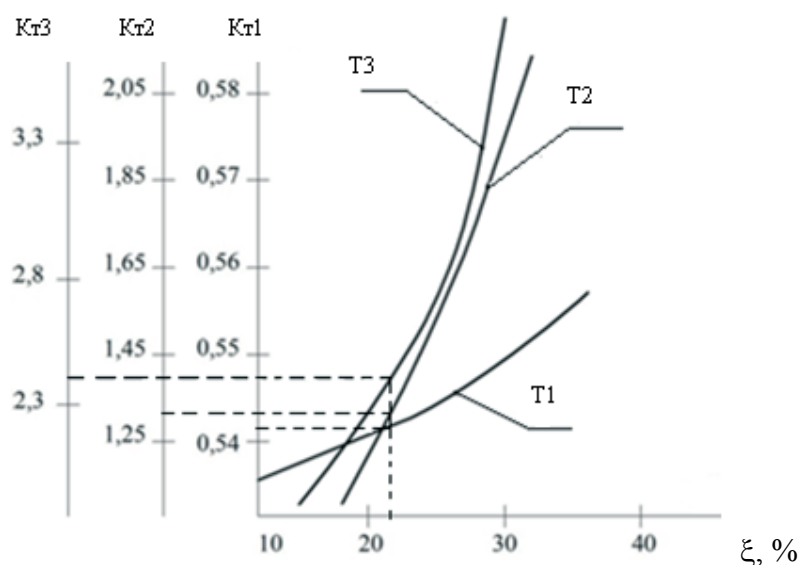


Рисунок 4.7 – Коэффициент прочности мерзлого суглинка влажностью до 23 % с включениями

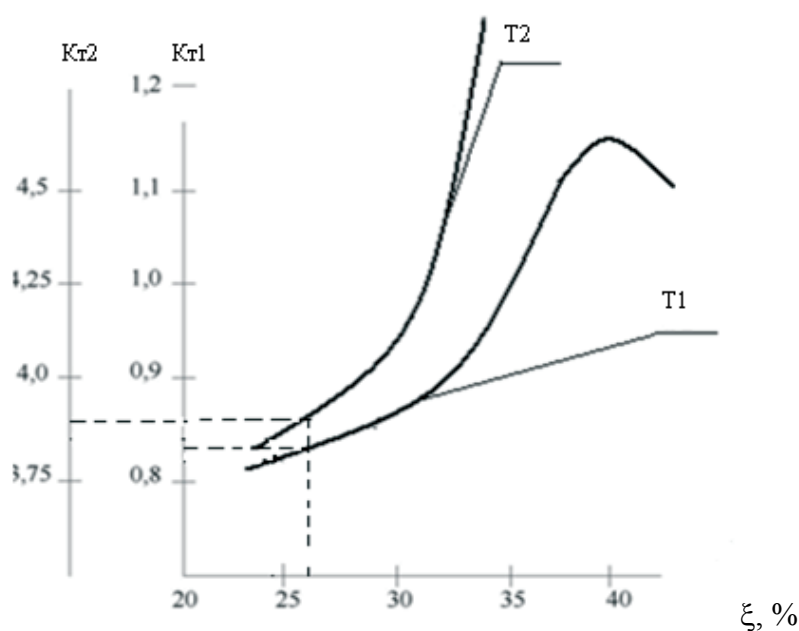


Рисунок 4.8 – Коэффициент прочности мерзлой супеси влажностью до 9 % с включениями

Аналогично проводится экспрессная оценка коэффициента прочности супеси (рис. 4.8). В частности, супесь влажностью до 9 % при 26 % гравийно-галечниковых включений и первом температурном профиле промерзания имеет коэффициент прочности $K_{\text{ПР}} = 0,83$, при втором температурном профиле промерзания коэффициент ее прочности равен 3,87.

Полученные значения коэффициентов прочности грунтов сравним с допустимыми коэффициентами прочности грунтов различными землеройно-транспортными машинами (табл. 4.11).

Мерзлый суглинок с 23 % гравийно-галечниковых включений, с третьим температурным профилем промерзания, имеющий коэффициент прочности 1,32, со вторым профилем промерзания, (коэффициент прочности грунта равен 2,43) не может быть эффективно разработан ни одной из исследованных машин, Этот же грунт при первом профиле промерзания, характеризуемый коэффициентом прочности ($K_{пр} = 0,541$), эффективно разрабатывается экскаваторами, ЭФ-131, ($K_{пр} = 1,579$), экскаватором ЭТР-223 ($K_{пр} = 1,920$), экскаватором ЭТР-224 ($K_{пр} = 1,720$), экскаватором ЭТР-254, способном разработать грунты с коэффициентом прочности 1,937. Из этого примера следует, что температурный режим промерзания грунта одинаковой влажности, гранулометрического состава, имеющий равное содержание гравийно-галечниковых включений существенно влияет на возможность разработки землеройными машинами.

Мерзлая супесь влажностью 9 % при 26 % гравийно-галечниковых включений и первом температурном профиле ($K_{пр} = 0,83$) эффективно разрабатывается всеми роторными экскаваторами, так как значение его коэффициента прочности наиболее близко значению коэффициента, найденного экспрессным методом, при втором температурном режиме промерзания (глубина промерзания достигает 1,2 м, а температура на поверхности колеблется от -1 до -5 °C), коэффициент прочности грунта равен 3,87 эффективно может быть разработан только экскаватором ЭТР-254, способном разрабатывать грунты с коэффициентом прочности 4,109 (см. табл. 4.13).

На рис. 4.9 приведены графики для определения значений нормированных коэффициентов прочности мерзлых грунтов (суглинок, супесь, песок) с гравийно-галечными включениями. Входными параметрами при этом являются суммарное содержание гравийно-галечных включений ξ , гранулометрических состав грунта и температурный профиль промерзания грунта.

$$K_{\text{норм}} = \frac{K_{\text{пр}}^{\text{вкл}}}{K_{\text{пр}}^{\text{одн}}} \quad (4.8)$$

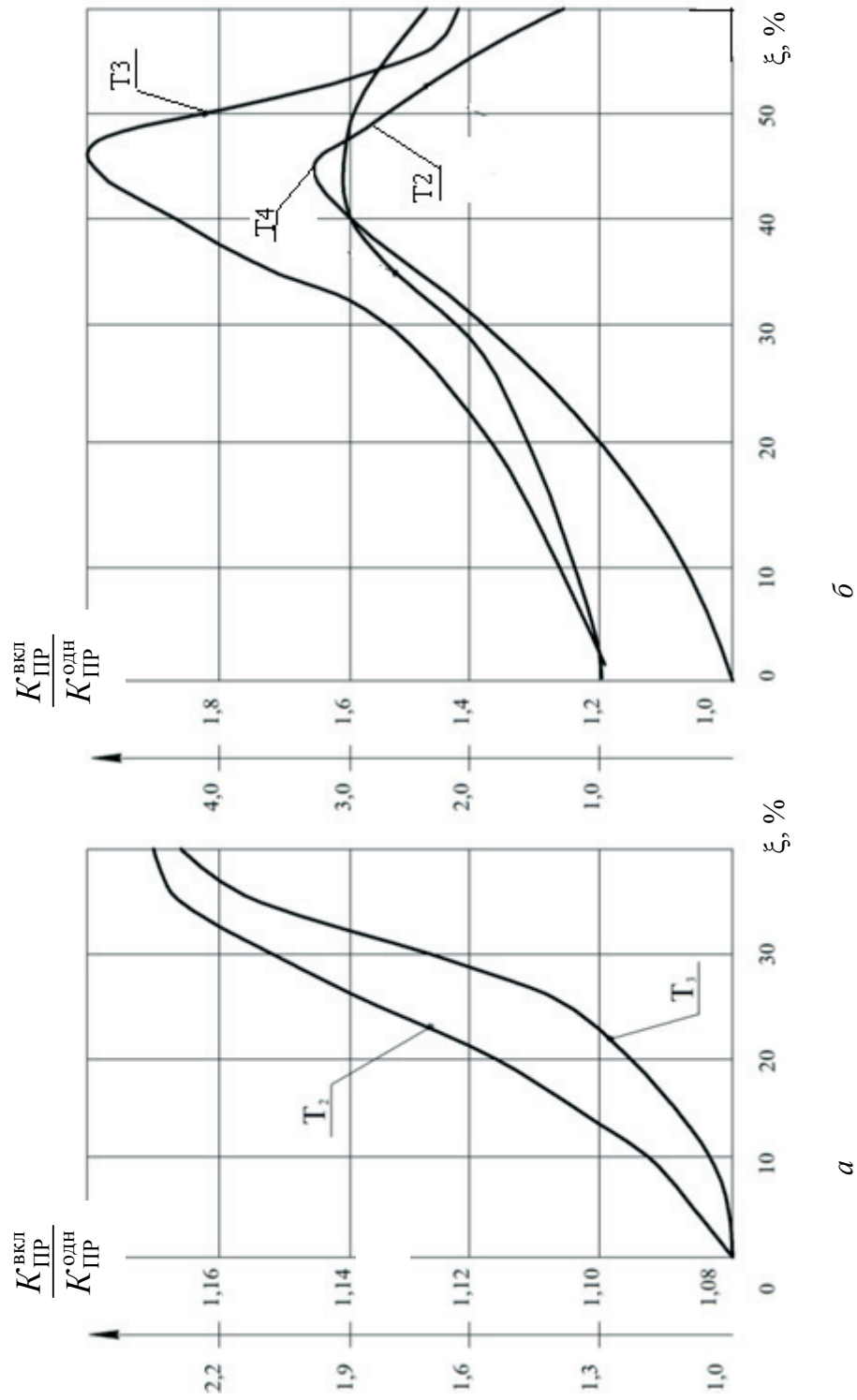


Рисунок 4.9 – Зависимость коэффициента прочности разработки грунтов с гравийно-галечниковыми включениями по отношению к однородным грунтам: *a* – для вмещающей среды – суглинок; *б* – для вмещающей среды – супесь и песок

Таблица 4.11 – Коэффициенты прочности мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями

Вид грунта (влаж- ность, %)	Сум- марное содер- жание включе- ний	Температурный режим													
		T_1						T_2						T_3	
		Марка машины													
		ЭФ-131	ЭТР-223	ЭТР-224	ЭТР-254	ЭФ-131	ЭТР-223	ЭТР-224	ЭТР-254	ЭФ-131	ЭТР-223	ЭТР-224	ЭТР-254	ЭТР-223	ЭТР-224
Суглинок (13)	9	1,590	1,939	1,729	1,979										
	16	1,585	1,931	1,725	1,962	1,001	1,195	1,286	1,375	0,813	0,916	0,953			1,069
	18	1,583	1,927	1,723	1,953	0,920	1,107	1,181	1,278	0,810	0,911	0,949			1,068
	23	1,579	1,920	1,720	1,937	0,815	0,993	1,073	1,099	0,720	0,792	0,851			1,009
	30	1,573	1,909	1,712	1,915	0,686	0,883	0,926	0,990	0,636	0,648	0,759			1,002
	33	1,566	1,896	1,708	1,889	0,647	0,831	0,882	1,055	0,599	0,604	0,716			1,007
Супесь (9)	26	1,441	1,464	1,306	1,455	0,575	0,738	0,798	1,055	0,488	0,516	0,608			1,014
	40	1,086	1,117	1,117	1,122	0,399	0,512	0,611	0,968	0,352	—	0,426			—

Таблица 4.12 – Значения коэффициентов прочности $K_{ДР}$ однородных мерзлых грунтов

Вид грунта (влажность, %)	Температурный режим															
	T ₁				T ₂				T ₃				T ₄			
	Марка машины															
	ЭФ- 131	ЭТР- 223	ЭТР- 224	ЭТР- 254	ЭФ- 131	ЭТР- 223	ЭТР- 224	ЭТР- 254	ЭФ- 131	ЭТР- 223	ЭТР- 224	ЭТР- 254	ЭФ- 131	ЭТР- 223	ЭТР- 224	ЭТР- 254
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Суглинок легких (13)	0,561	0,425	0,498	0,365	0,835	0,714	0,799	0,821	1,237	1,239	1,102	2,130	0,515	0,378	0,5	0,358
Суглинок средний (16)	0,673	0,733	0,814	0,571	1,722	1,655	1,484	1,748	2,616	2,476	2,120	—	0,515	0,468	0,599	0,436
Суглинок тяжелый (20)	0,719	0,788	0,855	0,609	1,977	1,857	1,556	1,617	2,922	—	2,491	—	0,517	0,487	0,62	0,481
Глина тяжелая (27,5)	1,013	0,766	0,841	0,610	1,934	2,086	1,637	1,759	2,427	2,671	2,118	—	0,515	0,522	0,68	0,493
Глина тяжелая (32,5)	1,015	0,825	0,895	0,650	1,992	2,160	1,709	1,989	2,572	—	2,449	—	0,512	0,623	0,786	0,6
Глина тяжелая (37,5)	0,742	0,523	0,635	0,436	1,603	1,638	1,436	1,104	2,040	2,212	1,767	—	0,512	0,452	0,593	0,39
Глина тяжелая (42,5)	0,648	0,495	0,604	0,401	1,197	1,048	1,073	0,809	1,593	1,353	1,269	1,533	0,512	0,364	0,491	0,306
Глина (18,5)	0,721	0,606	0,707	0,463	1,559	1,706	1,367	1,122	2,088	2,096	1,621	2,536	0,515	0,425	0,553	0,39
Глина (21,5)	0,773	0,720	0,807	0,558	1,795	2,042	1,536	1,522	2,231	2,998	1,965	—	0,515	0,527	0,672	0,494
Глина (24,5)	1,008	0,790	0,861	0,622	1,962	2,143	1,645	2,933	2,471	3,759	2,151	—	0,515	0,514	0,663	0,484
Супесь тяжелая крупная (16)	0,731	0,759	0,773	0,870	3,643	4,001	2,464	—	5,633	—	4,488	—	0,525	0,631	0,728	1,033
Супесь тяжелая крупная (18)	1,122	1,250	1,137	1,554	6,182	—	3,868	—	10,138	—	8,883	—	0,529	0,836	0,91	1,673
Супесь тяжелая крупная (20)	1,180	1,233	1,083	1,465	6,509	—	4,202	—	10,43	—	10,432	—	0,529	0,986	1,031	2,166
Супесь легкая крупная (20)	0,795	0,835	0,823	1,304	3,552	4,814	2,487	10,801	5,424	12,810	4,878	—	0,536	0,717	0,773	1,595
Супесь легкая крупная (16)	1,339	1,597	1,236	3,018	10,132	—	5,388	—	17,884	—	16,169	—	0,546	1,223	1,169	3,959
Супесь тяжелая мелкая (11)	0,575	0,668	0,734	0,636	1,327	1,504	1,198	1,692	2,075	2,753	1,823	6,998	0,519	0,454	0,557	0,526

Окончание таблицы 4.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Супесь тяжелая мелкая (13)	0,742	0,815	0,837	0,784	1,944	2,152	1,555	2,951	2,898	4,67	2,447	15,402	0,522	0,556	0,677	0,729
Супесь тяжелая мелкая (15)	0,894	0,988	0,998	0,982	2,808	3,150	2,071	16,517	4,407	7,79	3,109	–	0,522	0,632	0,743	0,937
Супесь легкая мелкая (9)	0,534	0,627	0,671	0,704	1,610	1,930	1,283	2,534	2,454	3,585	2,098	11,318	0,522	0,262	0,597	0,677
Песок крупный (12)	0,996	0,888	0,807	1,617	5,732	5,790	2,726	–	7,119	–	6,959	–	0,546	0,771	0,817	1,156
Песок мелкий (8)	0,702	0,593	0,595	0,899	4,037	3,868	2,011	–	2,681	5,108	2,659	19,873	0,536	0,515	0,603	0,909

Таблица 4.13 – Коэффициенты прочности мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями

Вид грунта (влажность, %)	Суммарное содержание гравийно- галечниковых включений	Температурный режим											T_3			
		T_1											T_2			
		Марка машины														
		ЭФ-131	ЭТР-223	ЭТР-224	ЭТР-254	ЭФ-131	ЭФ-131	ЭТР-223	ЭТР-224	ЭТР-254	ЭТР-254	ЭФ-131	ЭТР-223	ЭТР-224	ЭТР-224	ЭТР-254
Суглинок с гравием и галькой (13)	9	0,627	0,491	0,563	0,416											
	16	0,631	0,495	0,565	0,423	1,129	1,129	0,936	0,829	0,867	0,867	1,420	1,512	1,222	1,222	2,800
	18	0,631	0,497	0,566	0,427	1,234	1,234	1,019	0,893	0,949	0,949	1,434	1,539	1,234	1,234	2,898
	23	0,634	0,500	0,568	0,434	1,407	1,407	1,153	0,989	1,143	1,143	1,627	1,801	1,394	1,394	3,316
	30	0,637	0,506	0,571	0,445	1,695	1,695	1,328	1,157	1,335	1,335	1,875	2,034	1,593	1,593	–
	33	0,644	0,512	0,575	0,459	1,827	1,827	1,447	1,227	1,493	1,493	2,027	2,592	1,723	1,723	–
Супесь с гравием и галькой (9)	26	0,749	0,749	0,795	0,817	2,786	2,786	2,424	1,642	4,109	4,109	3,512	6,375	2,97	2,97	–
	40	1,014	1,023	0,943	1,168	4,437	4,437	4,079	2,282	–	–	5,437	–	4,841	4,841	–
Песок с гра- вием и галь- кой, гравий- но-галечнико- вый грунт (8)	20	0,736	0,671	0,640	1,094	6,359	6,359	6,321	2,908	–	–	3,725	8,533	3,626	3,626	–
	30	0,790	0,763	0,695	1,350	8,207	8,207	8,049	3,577	–	–	4,793	–	4,669	4,669	–
	48	0,898	0,814	0,753	1,515	9,831	9,831	–	4,352	–	–	5,966	–	5,792	5,792	–
	45	1,092	0,920	,857	1,528	12,454	12,454	–	4,21	–	–	6,688	–	5,871	5,871	–

Сравнительный анализ прочности однородных грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями дал возможность установить важную закономерность, заключающуюся в следующем: при одном и том же гранулометрическом составе и физико-механических характеристиках (влажность и температура) наибольшее значение коэффициента прочности грунтов с гравийно-галечниковыми включениями достигается при содержании гравийно-галечниковых включений в диапазоне ξ от 40 до 45 %.

Данное утверждение хорошо согласуется с результатами исследований резания грунтов с каменистыми включениями [130, 158].

Значения коэффициентов прочности мерзлых грунтов для основных видов траншейных экскаваторов приведены в табл. 4.14.

Наиболее вероятными профилями промерзания неоднородного суглинка являются профили T_1 , T_2 , T_3 , а профили T_1 , T_2 характерны для супеси.

Таблица 4.14 – Значения коэффициентов прочности $K_{пр}$ однородных мерзлых грунтов

Вид грунта (влажность, %)	Температурный режим							
	T ₁				T ₂			
	Марка машины							
	ЭФ-131	ЭТР-223	ЭТР-224	ЭТР-254	ЭФ-131	ЭТР-223	ЭТР-224	ЭТР-254
Суглинок легкий (13)	0,561	0,425	0,498	0,365	0,835	0,714	0,799	0,821
Суглинок средний (16)	0,673	0,733	0,814	0,571	1,722	1,655	1,484	1,748
Суглинок тяжелый (20)	0,719	0,788	0,855	0,609	1,977	1,857	1,556	1,617
Глина тяжелая (27,5)	1,013	0,766	0,841	0,610	1,934	2,086	1,637	1,759
Глина тяжелая (32,5)	1,015	0,825	0,895	0,650	1,992	2,160	1,709	1,989
Глина тяжелая (37,5)	0,742	0,523	0,635	0,436	1,603	1,638	1436	1,104
Глина тяжелая (42,5)	0,648	0,495	0,604	0,401	1,197	1,048	1,073	0,809
Глина (18,5)	0,721	0,606	0,707	0,463	1,559	1,706	1,367	1,122
Глина (21,5)	0,773	0,720	0,807	0,558	1,795	2,042	1,536	1,522
Глина (24,5)	1,008	0,790	0,861	0,622	1,962	2,143	1,645	2,933
Супесь тяжелая крупная (16)	0,731	0,759	0,773	0,870	3,643	4,001	2,464	—
Супесь тяжелая крупная (18)	1,122	1,250	1,137	1,554	6,182	—	3,868	—
Супесь тяжелая крупная (20)	1,180	1,233	1,083	1,465	6,509	—	4,202	—
Супесь легкая крупная (20)	0,795	0,835	0,823	1,304	3,552	4,814	2,487	10,801
Супесь легкая крупная (16)	1,339	1,597	1,236	3,018	10,132	—	5,388	—
Супесь тяжелая мелкая (11)	0,575	0,668	0,734	0,636	1,327	1,504	1,198	1,692
Супесь тяжелая мелкая (13)	0,742	0,815	0,837	0,784	1,944	2,152	1,555	2,951
Супесь тяжелая мелкая (15)	0,894	0,988	0,998	0,982	2,808	3,150	2,071	16,517
Супесь легкая мелкая (9)	0,534	0,627	0,671	0,704	1,610	1,930	1,283	2,534
Песок крупный (12)	0,996	0,888	0,807	1,617	5,732	5,790	2,726	—
Песок мелкий (8)	0,702	0,593	0,595	0,899	4,037	3,868	2,011	—

Окончание таблицы 4.14

Вид грунта (влажность, %)	Температурный режим							
	T ₃				T ₄			
	Марка машины							
	ЭФ-131	ЭТР-223	ЭТР-224	ЭТР-254	ЭФ-131	ЭТР-223	ЭТР-224	ЭТР-254
Суглинок легкий (13)	1,237	1,239	1,102	2,130	0,515	0,378	0,5	0,358
Суглинок средний (16)	2,616	2,476	2,120	—	0,515	0,468	0,599	0,436
Суглинок тяжелый (20)	2,922	—	2,491	—	0,517	0,487	0,62	0,481
Глина тяжелая (27,5)	2,427	2,671	2,118	—	0,515	0,522	0,68	0,493
Глина тяжелая (32,5)	2,572	—	2,449	—	0,512	0,623	0,786	0,6
Глина тяжелая (37,5)	2,040	2,212	1,767	—	0,512	0,452	0,593	0,39
Глина тяжелая (42,5)	1,593	1,353	1,269	1,533	0,512	0,364	0,491	0,306
Глина (18,5)	2,088	2,096	1,621	2,536	0,515	0,425	0,553	0,39
Глина (21,5)	2,231	2,998	1,965	—	0,515	0,527	0,672	0,494
Глина (24,5)	2,471	3,759	2,151	—	0,515	0,514	0,663	0,484
Супесь тяжелая крупная (16)	5,633	—	4,488	—	0,525	0,631	0,728	1,033
Супесь тяжелая крупная (18)	10,138	—	8,883	—	0,529	0,836	0,91	1,673
Супесь тяжелая крупная (20)	10,43	—	10,432	—	0,529	0,986	1,031	2,166
Супесь легкая крупная (20)	5,424	12,810	4,878	—	0,536	0,717	0,773	1,595
Супесь легкая крупная (16)	17,884	—	16,169	—	0,546	1,223	1,169	3,959
Супесь тяжелая мелкая (11)	2,075	2,753	1,823	6,998	0,519	0,454	0,557	0,526
Супесь тяжелая мелкая (13)	2,898	4,67	2,447	15,402	0,522	0,556	0,677	0,729
Супесь тяжелая мелкая (15)	4,407	7,79	3,109	—	0,522	0,632	0,743	0,937
Супесь легкая мелкая (9)	2,454	3,585	2,098	11,318	0,522	0,262	0,597	0,677
Песок крупный (12)	7,119	—	6,959	—	0,546	0,771	0,817	1,156
Песок мелкий (8)	2,681	5,108	2,659	19,873	0,536	0,515	0,603	0,909

Пределы изменения показателя $K_{ГР}$ по группам сведены в табл. 4.15.

Таблица 4.15 – Пределы изменения показателя $K_{ГР}$ по группам

Группы	1	2	3	4	5	6
Пределы изменения $K_{ГР}$	До 0,25	0,25–0,5	0,5–1,0	1,0–2,0	2,0–4,0	Свыше 4,0

Таким образом, группа прочности разрабатываемого грунта с включением может быть определена относительно группы однородного грунта, вид и состояние которого аналогичны грунту-заполнителю, с помощью номограмм (рис. 4.7, 4.8) и графиков (рис. 4.9).

Предложенный графический метод номограмм позволяет с достаточной степенью точности определить прочность мерзлых однородных грунтов и грунтов с включениями для различных сочетаний показателей их свойств.

Выводы

1. Сопротивляемость разработке мерзлых грунтов целесообразно оценивать коэффициентом прочности, учитывающим вероятностные характеристики гранулометрического состава, температурный режим промерзания, влажность, позволяющим повысить точность прогнозирования оптимального комплекта машин для выполнения земляных работ. При оценке коэффициента прочности мерзлых грунтов неоднородных по составу дополнительно учитываются не только температура, влажность и температурный режим промерзания, но и процентное содержание гравийно-галечниковых включений.

2. При одном и том же гранулометрическом составе и физико-механических характеристиках (влажность и температура) наибольшее значение коэффициента прочности грунта достигается при содержании гравийно-галечниковых включений в диапазоне ξ от 40 до 45 %.

3. Предложенные номограммы определения прочности мерзлых однородных и неоднородных грунтов, полученные графо-аналитическим методом, позволяют надежно определить область использования каждого из типоразмеров траншейных экскаваторов, обоснованно осуществлять инженерное районирование Восточно-Сибирского региона с точки зрения возможности и эффективности применения существующих типоразмеров машин, а также определять перспективные направления создания новой техники для разработки сезонно-мерзлых грунтов.

5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОПЛАСТОВ ДЛЯ ПРЕДОХРАНЕНИЯ ГРУНТОВ ОТ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ СЕЗОННОМ ПРОМЕРЗАНИИ

5.1. Эксплуатационные свойства композиционных карбамидных поропластов

Анализ технических характеристик траншейных экскаваторов позволяет сделать утверждение, что возможная глубина разработки грунта значительно меньше глубины промерзания грунта [97, 120].

Следовательно, для условий Сибири более эффективным является предохранение грунта от промерзания вспененными заливочными вспененными полимерными материалами, изготавливаемых непосредственно на месте утепления грунта.

Утепляющий полимерный материал в традиционном исполнении имеет ряд существенных эксплуатационных недостатков – высокая горючесть, воспламеняемость, недостаточная прочность, а также большой индекс токсичности 140–150 %, при этом равномерная концентрация HCHJ содержания формальдегида в рабочей зоне превышает нормы предельно допустимой концентрации, что и сдерживает его широкое использование.

Выбор поропластов для утепления грунтов осуществляется с учетом основных эксплуатационных свойств поропластов, физико-механических свойств утепляемых грунтов. В основе оценки применимости композиционные поропластов лежат физические и химические методы оценки.

Композиционные карбамидные поропласты относятся к малоопасным веществам по степени воздействия на организм – к четвертому классу опасности. Поропласты обладают некоторой токсичностью по отношению к экосистеме (содержание свободного формальдегида – 0,35 %).

Свойства товарных поропластов существенно влияют на качество процесса предохранения грунтов от сезонного промерзания. Контроль характе-

ристик поропластов производится как на стадии фасовки готовой продукции, так и на стадии применения. Опыт использования поропластов показывает, что гарантийный срок хранения поропластов невозможно регламентировать, так как срок зависит от условий хранения и условий применения. В условиях защиты поропласта от солнечной энергии, ветровой эрозии, механического воздействия и соблюдения регламента утепления грунтов поропласт может использоваться в течение трех лет. В условиях правильного хранения поропласт сохраняет свои эксплуатационные свойства в течение семи лет, по истечению которых поропласт не может удовлетворительно использоваться для утепления грунтов. В условиях создания запаса поропласта на стадии производства используются модифицирующие добавки, существенно повышающие сроки его хранения.

Анализ литературных данных показывает, что в зависимости от природы и свойств наполнителя, размера его частиц и содержания наполнителя в матрице поропласта возможно получать материалы с сохранением хороших теплозащитных характеристик [40, 42, 43, 48, 53–56, 167].

Предварительные исследования показали возможность устранения данного недостатка путем введения в смоляную композицию в качестве модифицирующих агентов растительных дубильных экстрактов коры лиственницы сибирской: спирто-щелочного экстракта, спирто-щелочного сульфитированного экстракта и щелочного экстракта.

Основными компонентами дубильных экстрактов коры лиственницы сибирской являются таннины, молекулы которых имеют фенольные остатки, содержащие несколько гидроксильных групп. Таким образом, все таннины являются производными многоатомных фенолов, т.е. полифенолами. Находящиеся в реакционных положениях атомы водорода способны участвовать в реакциях присоединения и конденсации. В результате присоединения формальдегида в орто- и параположениях к фенольной гидроксильной группе количество свободного формальдегида в смоляной композиции снижается [41].

Характеристикой реакционной способности дубильного экстракта могут служить функциональные группы или реакционные центры. А именно – наличие бромлируемых веществ характеризует возможность фенольных веществ экстракта вступать в реакции конденсации. В композицию модифицирующие агенты вводились в количестве 10–50 % от массы воды в составе композиции.

На эксплуатационные свойства карбамидного поропласта большое влияние оказывает порядок внесения карбамидно-формальдегидной смолы в композицию. На основании имеющейся информации и проведенных предварительных исследований были выбраны следующие варианты внесения компонентов в композицию:

- кислота, экстракт, вода, пенообразователь, смола (вариант I);
- смола, экстракт, вода, пенообразователь, кислота (вариант II).

Установлено, что внесение компонентов по варианту II позволяет получить поропласт с более высокой кратностью вспенивания (4,4) и меньшей усадкой (13 %), чем по варианту I (соответственно 2,7 и 15,3 %). Поэтому в дальнейшей работе внесение компонентов в полимерную композицию осуществляли по варианту II [49].

Кратность вспенивания у поропласта, полученного без модификатора, равна 4,4. При введении спирто-щелочного экстракта в количестве 10–50 % кратность вспенивания уменьшается и составляет 3,7. Спирто-щелочной сульфитированный и щелочной экстракты ведут себя аналогично, кратность вспенивания соответственно составила 3,5 и 3,1. На основании вышеизложенного делаем вывод о том, что введение растительных экстрактов в смоляную композицию, с одной стороны, привело к уменьшению кратности вспенивания, а с другой – к уменьшению хрупкости пеносорбента, что связано с изменением его пространственной структуры.

При введении спирто-щелочного, спирто-щелочного сульфитированного и щелочного экстрактов в качестве 10–25 % усадка уменьшается и составляет 9,9 %. При дальнейшем увеличении доли вводимого модифицирующего

агента до 50 % усадка начинает возрастать. Это связано с усилением конденсационных процессов, которые приводят к структурным изменениям и, как следствие, повышению усадки.

Главным недостатком пенопластов при использовании их в качестве утеплителя грунтов от сезонного промерзания является их пожароопасность. Пенополистиролы и пенополиуретаны при пожаре способствуют распространению пламени и разрушению конструкции, что ограничивает область их применения и требует принятия специальных технических решений, обеспечивающих пожаробезопасность [179, 180].

Установлено [179], что при введении в смоляную композицию растительных дубильных экстрактов происходят сразу два типа взаимодействия между полимером и фенольными веществами экстракта:

- физико-химическое сцепление, соединяющее полярные группы, т.е. водородная связь;
- химические реакции, приводящие к образованию ковалентной связи, которая необратимо связывает первоначальные компоненты.

Благодаря этим взаимодействиям значительно снижаются хрупкость, усадка, улучшается структурообразование, что и подтверждают полученные нами результаты.

Таким образом, для улучшения прочностных характеристик поропласта и повышения его пожаробезопасности целесообразно вводить в смоляную композицию экстракты из коры лиственницы сибирской в количестве 10–25 %.

В процессе сушки поропласта вода и формальдегид удаляются из материала одновременно. При этом общее количество выделенной воды изменяется незначительно, а количество выделяемого формальдегида существенно возрастает. Поэтому помимо улучшения физико-механических свойств полимерных материалов стоит задача снижения их токсичности, что является очень важным с экологической точки зрения.

Учитывая, что снижение содержания формальдегида в исходной карбамидно-формальдегидной смоле, на базе которой получают поропласт, имеет свои пределы, имеется способ химического связывания свободного формальдегида при отверждении поропласта путем введения в пенообразующий состав перед его изготовлением растительных экстрактов коры лиственницы сибирской.

Неоднозначное влияние экстрактов на содержание свободного формальдегида связано с особенностями их химической природы. Содержание формальдегида в образце, полученном без модификатора составляет 0,35 %. При введении спирто-щелочных и спирто-щелочного сульфитированных экстрактов в количестве 10 % содержание свободного формальдегида снижается до 0,15 %. Максимально уменьшить содержание свободного формальдегида до 0,08 % удалось при использовании в качестве модифицирующего агента щелочного экстракта, вводимого в количестве 30 %.

Отсутствием способности к развитию стабильного процесса горения обладают карбамидные поропласты на основе карбамидо-формальдегидной смолы. Однако при всех положительных характеристиках карбамидные поропласты уступают пенополистиролам и пенополиуретанам из-за свойственных им низкой механической прочности, хрупкости, значительной усадочной деформации при отверждении и сушке. Одним из путей улучшения механических характеристик карбамидных поропластов, является применение принципов физической модификации за счет введения в их структуру наполнителей в виде опилок осины, окорки осины, коры осины и коры хвойных деревьев. Для наполнения карбамидных поропластов используется те же наполнители, которые применяются и для монолитных пластмасс, но при этом выбор наполнителя определяется с учетом физико-механических особенностей процесса образования полимерных пен, их морфологией и назначением. Главной сложностью при введении традиционных наполнителей в воздушно-механическую карбамидную пену является резкое снижение кратности механического вспенивания и, как следствие, ухудшение ячеистой структуры пе-

нопласта, что требует разработки эффективных методов наполнения и поиск эффективных наполнителей [51].

Материалами для наполнения карбамидных пенопластов являются любые органоминеральные отходы химической, металлургической промышленности и лесопромышленного комплекса. Анализ характеристик сырьевой базы растительных отходов лесоперерабатывающих предприятий Восточной Сибири показывает, что наибольший интерес для создания карбамидных поропластов представляют отходы деревопереработки благодаря своей доступности и малой стоимости. Введение в матрицу карбамидного пенопласта гидролизного лигнина до 90 массовых частей (далее масс. ч) на 100 масс. ч смолы, позволяет получать композиционный материал с высокими прочностными и теплоизоляционными свойствами. При этом введение антипиренов позволяет снизить горючесть композиционных материалов [29, 53, 119].

Вовлечение такого сырья в производство карбамидного поропласта позволяет сократить долю древесных отходов, вывозимых в отвалы. За счет использования органических наполнителей уменьшается доля синтетического материала в композите, что снижает экологическую техногенную нагрузку при утилизации отработанных пеноутеплителей. Одновременно достигается снижение себестоимости карбамидного поропласта, что увеличивает его конкурентоспособность на рынке пеноутеплителей.

5.2. Физико-химические способы повышения прочности карбамидных поропластов

Для производства композиционных поропластов используют смолу карбамидно-формальдегидную, кислоту ортофосфорную, воду питьевую ГОСТ 2874–82.

Смола карбамидо-формальдегидная КФ-МТ015 по ГОСТ 14231–88, ТУ 6–06–12–88, представляет собой продукт поликонденсации карбамида

или раствора карбамида и формальдегида. Внешний вид – однородная суспензия от белого до светло-желтого цвета без механических включений.

Массовая доля сухого остатка $-65,5 \pm 2,0$, массовая доля свободного формальдегида не более 0,15 %. Вязкость условная по вискозиметру ВЗ-4, с 50–80 сСт – после изготовления в конце гарантийного срока хранения не более 200 сСт. Концентрация водородных ионов, pH 7,5–8,5. Время желатинизации при 20 ± 1 °C не менее 8 ч.

Смолу транспортируют в зимнее время в цистернах, имеющих водяную рубашку или теплоизоляцию, в летнее время – при температуре воздуха выше 26 °C не более 10 сут, хранят смолу при 5–20 °C, в чистых закрытых емкостях, защищенных от воздействия солнечных лучей и атмосферных осадков, периодически перемешивая.

Гарантийных срок хранения смолы 45 сут со дня изготовления. По истечении указанного гарантийного срока смолу испытывают на соответствие требованиям технических условий.

Пенообразователь ПО-1 (табл. 5.1) состоит:

- из контакта Петрова (керосиновый контакт с содержанием сульфокислот не менее 55 %), нейтрализованный натром едким техническим по ГОСТ 2263 – $89,5 \pm 3$ %;
- клея костного по ГОСТ 2067 – $4,5 \pm 1$ %;
- спирта этилового синтетического – $6,0 \pm 2$ %.

Внешний вид ПО-1 – жидкость коричневого цвета без посторонних включений. По токсичности пенообразователь ПО-1 соответствует третьему классу опасности, вызывает раздражение кожных покровов и слизистых оболочек глаз. Рабочие растворы пенообразователя безвредны. При работе с пенообразователем необходимо применять индивидуальные средства защиты.

Производственные помещения должны быть оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией. Заправка пенообразователя в емкости для хранения и транспортирования должна быть механизирована.

Таблица 5.1 – Характеристики пенообразователя ПО-1

Показатель	Норма
Наличие осадка	Отсутствие
Вязкость кинематическая при 20 °С, м ² /с (сСт), не более	40,0 · 10 ⁻⁶ (40)
Кратность пены водного раствора, не менее	6,0
Устойчивость пены, с, не менее	270
Водородный показатель (рН) концентрата	7,0–9,0
Плотность при 20 °С, кг/м ³ , не менее	1,1
Температура застывания, °С, не выше	–8
Минимальная температура пенообразователя при применении, °С, не выше	–2
Время тушения, с, не более	300
Кратность пены, не менее, на генераторе: ГПС-200 (ГПС-600)	60(70)
Показатель смачивающей способности 4 %-го (по объему) водного раствора, не более	9,0

Пенообразователь ПО-1 является биологически жестким продуктом, слив которого запрещен в водоемы и сточные воды. Он относится к легко-воспламеняющимся жидкостям.

Пенообразователь ПО-3 (ТУ–6–14–508–80) представляет собой триэтаноламиновую соль алькилсульфата, полученную сульфатированием синтетических первичных спиртов фракции С10–С16 хлорсульфоновой кислотой и последующей нейтрализацией сульфозфира техническим триэтаноламином. Внешний вид ПО-6 – легкоподвижная жидкость от коричневого до темно-коричневого цвета. Водородный показатель (рН) 10 %-го водного раствора 6,0–8,0. Содержание активного вещества – не менее 37 %. Содержание сульфатов в пересчете на сернокислый триэтаноламин – не менее 12,0 %. Пенообразующая способность 1 %-го раствора (в расчете на активное вещество), мл, не менее: через 30 с – 350, через 1 мин – 320. Коэффициент устойчивости пены 0,92 (не менее).

Пенообразователь ПО-3 хранят в закрытой таре в закрытых складских помещениях. Перед использованием продукт необходимо нагреть до 30–35°С. Гарантийный срок хранения пенообразователя ПО-3 – один год со дня изготовления продукта.

Кислота ортофосфорная техническая (ГОСТ 10678–76) представляет собой продукт гидратации фосфорного ангидрида, образующегося при сжигании желтого фосфора.

Ортофосфорную кислоту хранят в стальных футерованных закрытых емкостях или стеклянных бутылках. Гарантийный срок хранения технической ортофосфорной кислоты – шесть месяцев со дня изготовления.

Все применяемые материалы должны иметь технические паспорта завода-изготовителя и удовлетворять по качеству требованиям соответствующих ГОСТов и ТУ.

Характеристики пенообразователя (ПО-6) представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2 – Характеристики пенообразователя ПО-6

Показатель	Норма
Внешний вид	Однородная жидкость без осадка и расслоения
Плотность при 200 °С, кг/м ³	1000–1200
Кинематическая вязкость при 200 °С, мм ² ·с ⁻¹ , не более	200
Водородный показатель (рН) при 200 °С, в пределах	6,5–10,0
Температура застывания, 0°С, не выше	минус 5
Кратность пены водных растворов: низкая, не более средняя, не менее высокая, не менее	 20 80 200
Показатель смачивающей способности 2 % раствора, не более	9
Гарантийный срок хранения в таре изготовителя, мес., не менее	48

Исходными материалами (табл. 5.3) для получения быстротвердеющей пены служат мочевино-формальдегидная смола «Крепитель М» (МРТУ 6–05–1101–67), пенообразователь ПО-1 (ГОСТ 6948–54), соляная кислота (ГОСТ 1382–42) и вода.

Таблица 5.3 – Соотношение компонентов (по объему) для получения карбамидного поропласта

№ п/п	Наименование компонента	Процентное содержание
1	Смола «Крепитель М»	35 %
2	Пенообразователь ПО-1	4 %
3	Вода	45 %
4	Соляная кислота 5–6 % -й концентрации	16 %

Смола, пенообразователь и кислота широко производятся отечественной промышленностью, поэтому они дефицита не представляют.

Соляная кислота служит отвердителем для поликонденсации вспененной смолы. Для изготовления поропласта пригодна любая вода, не содержащая соду или щелочь, так как при их наличии происходит нейтрализация кислоты и пена не твердеет.

Быстротвердеющий поропласт является мелкопористым материалом белого цвета. Объемная масса воздушно-сухого образца поропласта колеблется в пределах 10–15 кг/м³.

Влажность быстротвердеющей пены сразу после изготовления колеблется в пределах 400–500 % (весовая), а после высыхания в естественных условиях снижается до 90–100 %.

Быстротвердеющая пена является поропластом, так как в ней преобладают открытые поры. Как все открытопористые материалы, поропласт гидрофилен. Увлажнение его происходит от жидких осадков, выпадающих в период между ее нанесением и наступлением устойчивых морозов. Зависимость влажности поропласта от количества осадков, выпадающих в период между ее нанесением и временем устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С, полученная по данным наблюдений в различных климатических районах, приведена на рис. 5.2. Для практического расчета основных параметров утепления грунта (толщины утепления и рационального срока его нанесения) можно принять, что в течение зимнего периода влажность поропласта остается постоянной.

После нанесения поропласта на грунт наблюдается его технологическая усадка. При нанесении ее в рациональные сроки усадка происходит

в период 7–10 дней и колеблется в пределах 5–15 % от первоначальной толщины. При расчете основных параметров утепления грунта можно принять усадку, равную 10 %.

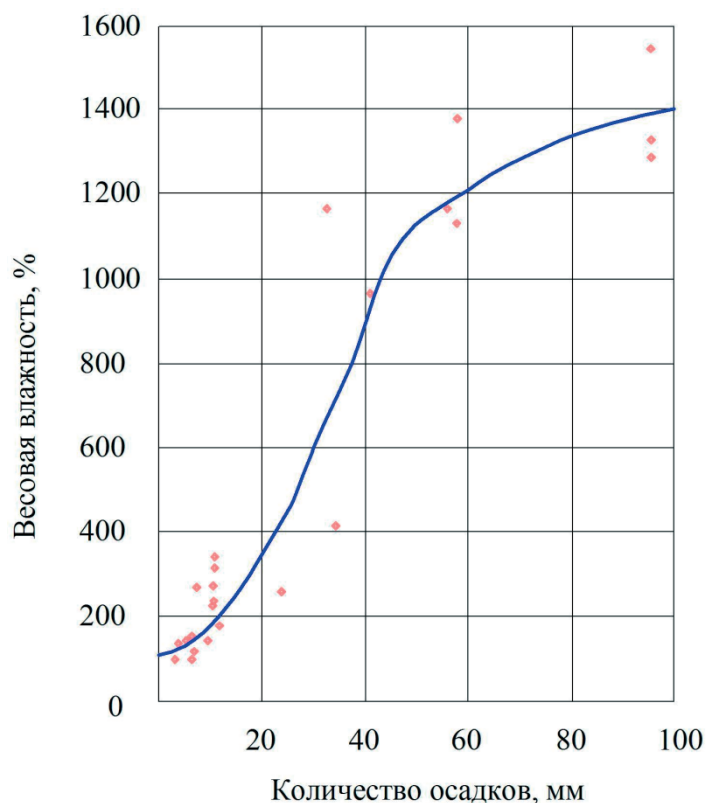


Рисунок 5.1 – Зависимость влажности поропласта от количества осадков

Затем приготовленная композиция подается в реактор первой ступени пеногенерирующей установки ПГУ-М, где воздушно-механическим способом композиция вспенивается до кратности 25–40 объем. ед. далее вспененная композиция поступает в реактор второй ступени, оснащенный форсункой для ввода катализатора отверждения – 10–12 % ортофосфорной кислоты H_3PO_4 . Вспененная желеобразная масса пневмотранспортом отправляется в заливочные формы и выдерживается в течение 40 ± 5 мин в стандартных температурных условиях с последующей сушкой согласно технологическому регламенту.

Прочность поропласта небольшая, в связи с чем возможно разрушение теплоизоляционного слоя поропласта ветром со скоростью более 25 м/с.

Удельная теплоемкость поропласта составляет 0,34 ккал/(кг · град) [40, 124]. Коэффициент теплопроводности поропласта зависит от температуры,

объемной массы и влажности (рис. 5.1). Для практических расчетов следует учитывать только зависимость коэффициента теплопроводности поропласта от влажности, так как влияние изменения объемной массы и температуры на коэффициент теплопроводности поропласта незначительно по сравнению с влажностью.

Физические свойства поропласта в течение зимнего периода изменяются весьма незначительно, поэтому для практических расчетов теплоизоляционные свойства ее можно принять постоянными.

В процессе изготовления карбамидных поропластов и во время их отверждения происходит выделение свободного формальдегида [124], обладающего токсичными свойствами в больших концентрациях. Ввиду того, что карбамидные поропласты находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности, в том числе для предохранения грунта от промерзания, в качестве теплозвукоизоляции для строительных конструкций, в сельском хозяйстве для теплоизоляции животноводческих помещений, для структурирования почв, возрастает проблема исследования влияния карбамидных поропластов на окружающую среду. В литературе по этому вопросу имеются довольно немногочисленные и разобщенные данные.

Х. Бауманом [29] установлено, что следы формальдегида в растительном субстрате не приносят ущерба росту растений. Считалось, что формальдегидный остаток, содержащийся в карбамидном пенопласте, имеет бактерицидное свойство и может тормозить рост растений, но в опытах Х. Баумана это не подтвердилось.

Исследованиями установлено, что при утеплении грунта в условиях Сибири карбамидным поропластом выпадающие осенью осадки не будут смывать формальдегид из теплоизоляционного слоя, так как водоудерживающая способность его превышает количество выпадающих осадков. Свободный формальдегид из теплоизоляционного слоя переходит в верхний слой утепленного грунта. Содержащийся в грунте формальдегид может попасть в водоем следующим летом при вымывании его атмосферными осадками,

фильтрующимися через грунт земляных сооружений или отвала утепленного грунта. Расчеты показывают, что концентрация формальдегида, поступающего в водоем фильтрующимися атмосферными осадками и грунтовыми водами, будет ниже предельно допустимой концентрации.

Результаты проведенного эксперимента показывают, что влияние состава компонентов композиции на различные свойства поропласта неодинаково. На кратность вспенивания существенное влияние оказывает количество поверхностно-активного вещества (ПАВ) (рис. 5.2), в частности с увеличением его более чем на 50,0 мас.ч кратность вспенивания растет.

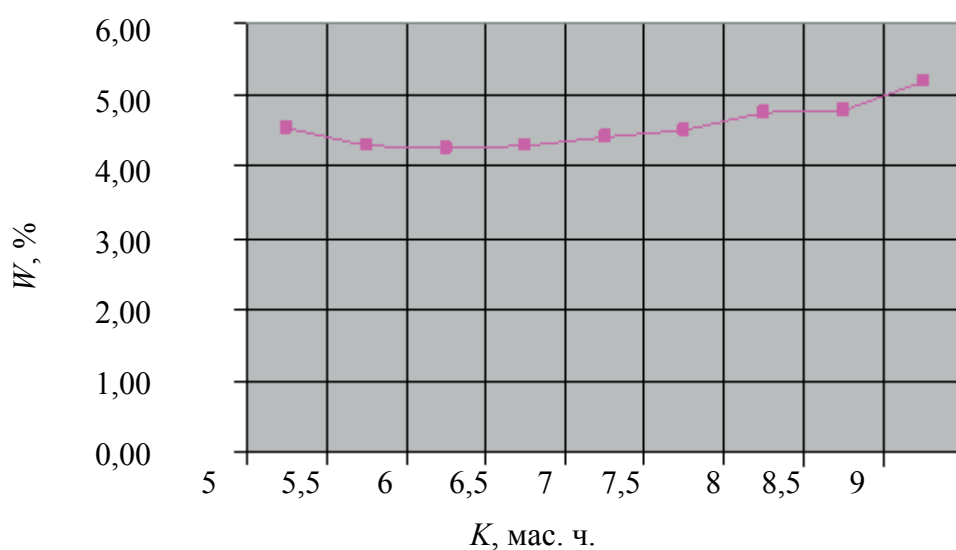


Рисунок 5.2 – Влияние поверхностно-активных веществ на кратность вспенивания поропласта

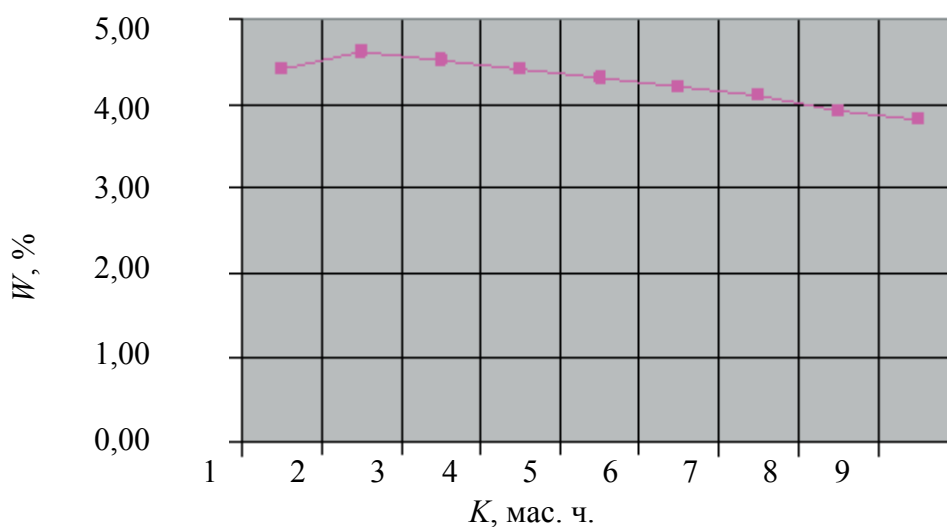


Рисунок 5.3 – Влияние синтезированной полимерной смолы на кратность вспенивания поропласта

С увеличением количества синтезированной поливиниловым спиртом полимерной смолы (СПС) кратность вспенивания снижается (рис. 5.3). При добавлении количества от 5 до 5,5 мас.ч. кратность вспенивания немного увеличивается, а от 5,5 до 9 мас.ч. – уменьшается до 3,8 %.

Таким образом, исследованиями установлены рациональные параметры поверхностно-активных веществ и синтезированной полимерной смолы для получения карбамидо-формальдегидного поропласта наибольшей кратности вспенивания при наименьших экономических затратах.

Возможные способы улучшения прочностных характеристик карбамидных поропластов согласно требованиям разработанных ТУ 2254–001–02067876–2009 представлены на рис. 5.4.

Одним из способов улучшения карбамидных поропластов является подбор оптимального режима сушки. Недостаток данного способа заключается в длительности процесса сушки, так как испарение влаги идет весьма интенсивно из-за открытопористой структуры, характерной для карбамидных поропластов. Уменьшение усадочной деформации путем увеличения объемной доли полимерной основы за счет снижения пористости карбамидного поропласта, т.е. увеличение плотности, приводит к повышению полимероёмкости, что отрицательно сказывается на теплозащитных характеристиках карбамидного поропласта и не всегда экономически целесообразно. Другой способ улучшения прочностных свойств карбамидных поропластов – химическая модификация карбамидных смол на стадии синтеза. Однако применение известных, специально синтезированных карбамидных смол для производства поропласта «Униполимер-Т» приводит к незначительному увеличению его прочности (до 0,03 МПа).

Для снижения токсичности, уменьшение степени горючести и повышение прочности пенопласта разработана и используется для предохранения от сезонного промерзания грунтов различного гранулометрического состава, влажности и температурного режима промерзания композиция карбамидного пенопласта [170, 171].

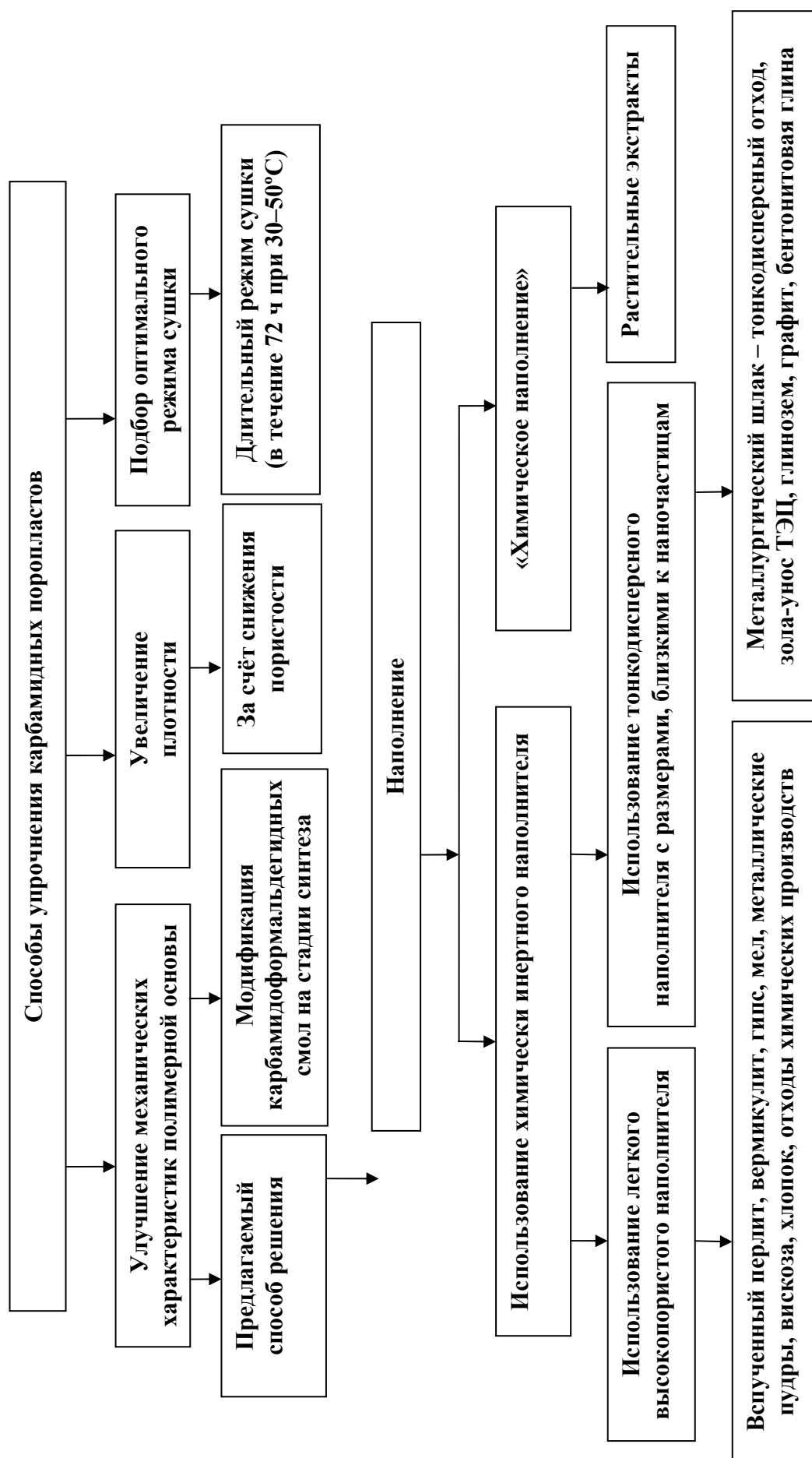


Рисунок 5.4 – Блок-схема возможных способов упрочнения карбамидных поропластов

В карбамидном поропласте массовая доля свободного формальдегида не превышает 0,15 %, экстракты коры хвойных пород содержат таннины и полифенолы, в качестве пенообразователя использована альфобензосульфаноислота или сульфано, в качестве органоминерального модификатора, повышающего прочность, используется зола-унос, получаемая от сжигания углей содержащая оксиды железа, алюминия, кальция, магния.

Введение на стадии изготовления в эмульсионный раствор экстрактов коры хвойных пород, содержащих таннины и полифенолы, понижает токсичность и горючесть карбамидного пенопласта за счет химического взаимодействия формальдегида с полифенолами.

Следовательно, для предохранения грунта от промерзания наиболее подходящим утеплителем является быстротвердеющий поропласт [52, 160].

На наш взгляд, наиболее рациональным путем улучшения механических свойств карбамидных поропластов является применение принципов физической модификации полимерной основы, в частности за счет введения наполнителя [42, 54].

В данной работе рассмотрена возможность применения промышленных отходов в качестве наполнителей карбамидных поропластов с целью улучшения их физико-механических свойств.

С этой целью использован как классический способ наполнения (введение химически инертного наполнителя), так и метод самонаполнения, когда наполнитель создается в ходе образования самого поропласта.

В качестве химически инертных наполнителей были использованы легкие высокопористые наполнители и тонкодисперсные наполнители с размерами, близкими к наночастицам.

Легкие наполнители низкой плотности более целесообразны для применения, поскольку при наполнении карбамидных поропластов возникают сложности из-за резкого снижения кратности вспенивания и стабильности пены. В качестве легкого наполнителя низкой плотности был выбран вспученный перлитовый песок (насыпная плотность 38 кг/м^3) или вермикулит.

Вспученный перлитовый песок состоит в основном из пористого бесцветного прозрачного алюмосиликатного стекла и характеризуется открыто пористой структурой. Было исследовано влияние гранулометрического состава вспученного перлитового песка на свойства карбамидного поропласта и установлены оптимальные фракции – от 250 до 63 мкм.

Отличительной особенностью наполнения карбамидного поропласта другим химически инертным наполнителем – золой-уносом ТЭЦ, состоящим на 80 % из оксида железа, размер которого близок к наночастицам (удельная поверхность $135\,000\text{ см}^2/\text{гр}$), является возможность введения большого количества наполнителя (до 40 масс. ч) без существенного снижения кратности вспенивания и ухудшения стабильности пены. При реализации способа «самонаполнения» наполнитель создается в ходе реакции взаимодействия реакционно способных компонентов с катализатором отверждения карбамидоформальдегидной смолы – ортофосфорной кислотой.

В качестве реакционно способного компонента был выбран шлам – алюмонатриевый отход, состоящий на 96 % из гидроксида алюминия, и отход водоочистки ТЭЦ, состоящий примерно на 87 % из карбонатов кальция и магния, а роль наполнителей играют фосфаты алюминия, кальция и магния, образующиеся в результате реакции взаимодействия наполнителей с катализатором отверждения карбамидной смолы. В случае использования отхода водоочистки ТЭЦ применялось сочетание механического вспенивания и газообразования за счет выделяющегося углекислого газа в результате реакции взаимодействия ортофосфорной кислоты с карбонатами кальция и магния.

Однако недостатком использования отхода водоочистки ТЭЦ является необходимость введения большого количества кислоты, кроме того, за счет интенсивной химической реакции появляются остаточные усадочные напряжения, которые приводят к трещинообразованию поропласта.

В связи с этим была проведена частичная замена отхода водоочистки ТЭЦ менее активным наполнителем – цеолитсодержащей породой (ЦСП) и

установлено оптимальное соотношение ЦСП: отход водоочистки ТЭЦ, равное 1:6 [51, 135].

Зависимости основных технологических показателей – времени гелеобразования и кратности вспенивания пеномассы – показаны, соответственно, на рис. 5.5 и 5.6, где 1 – вспученный вермикулит; 2 – зола-унос; 3 – металлическая пудра; 4 – мел.

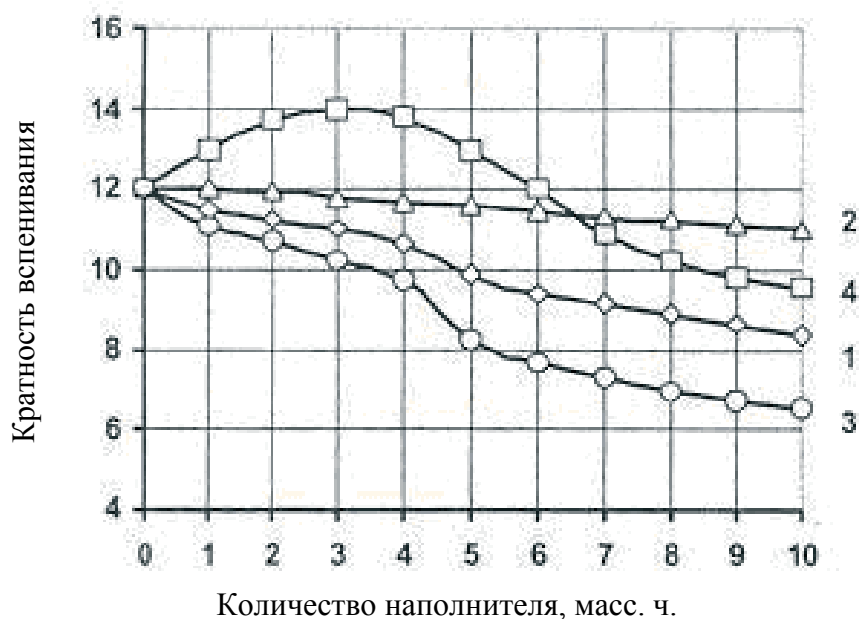


Рисунок 5.5 – Зависимость кратности вспенивания пеномассы от содержания наполнителя

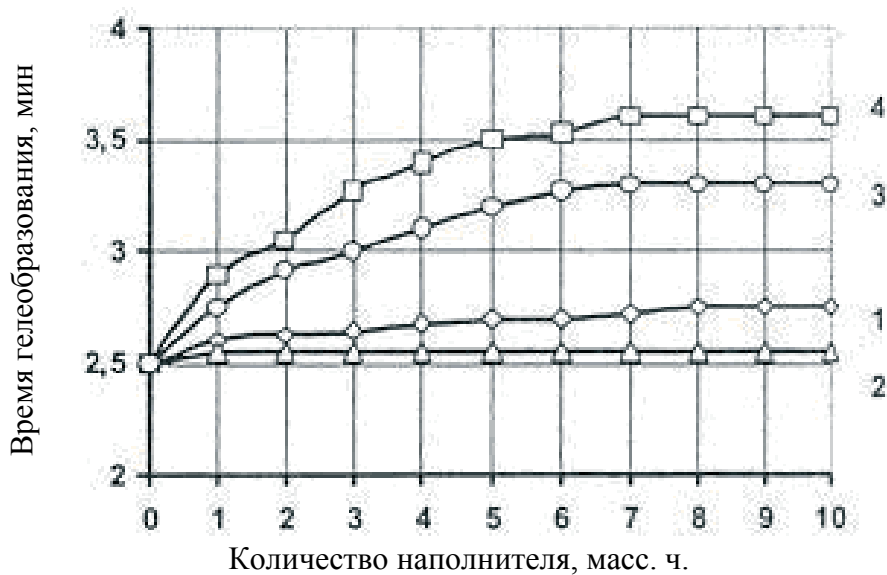


Рисунок 5.6 – Зависимость времени гелеобразования пеномассы от содержания наполнителя

Увеличение времени гелеобразования при использовании алюмонатриевого отхода и смеси отхода водоочистки ТЭЦ с ЦСП обусловлено тем, что значительная часть ортофосфорной кислоты взаимодействует с ними, что и приводит к ослаблению каталитического влияния ортофосфорной кислоты на процесс отверждения карбамидоформальдегидной смолы. Увеличение кратности вспенивания при наполнении смесью отхода водоочистки ТЭЦ с ЦСП объясняется выделением углекислого газа в результате реакции взаимодействия ортофосфорной кислоты с карбонатами кальция и магния.

Из анализа изменений плотности и прочности поропласта (рис. 5.7, 5.8) следует, что введение наполнителя закономерно увеличивает плотность, а наибольшая упрочняющая способность характерна для наполнителя на основе алюмонатриевого отхода. Вспученный перлитовый песок в качестве объемного наполнителя в силу своего размера является межструктурным, что объясняет незначительное увеличение прочности карбамидного поропласта. Однако наполнение карбамидного поропласта вспученным перлитовым песком позволяет снизить линейную усадку на 70–80 %.

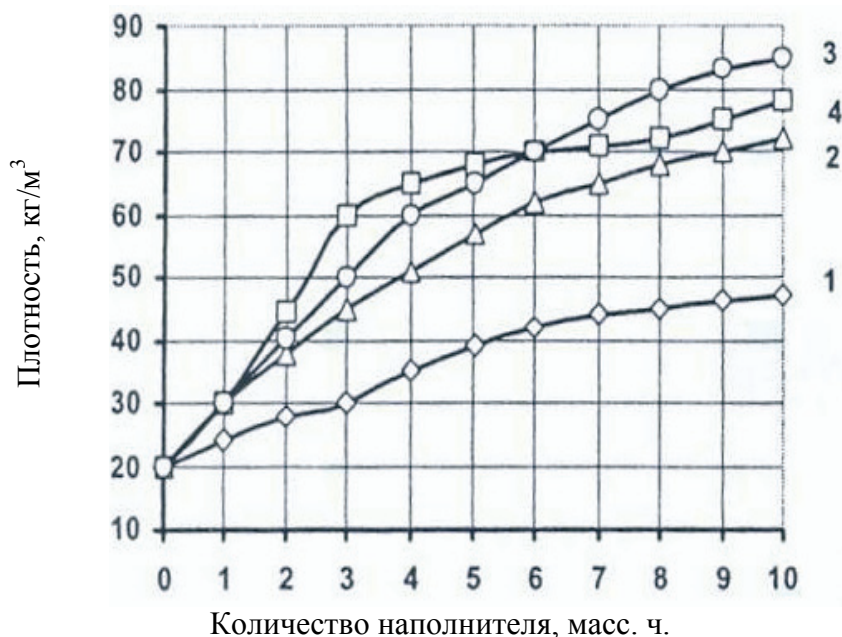


Рисунок 5.7 – Зависимость плотности карбамидного поропласта от содержания наполнителя

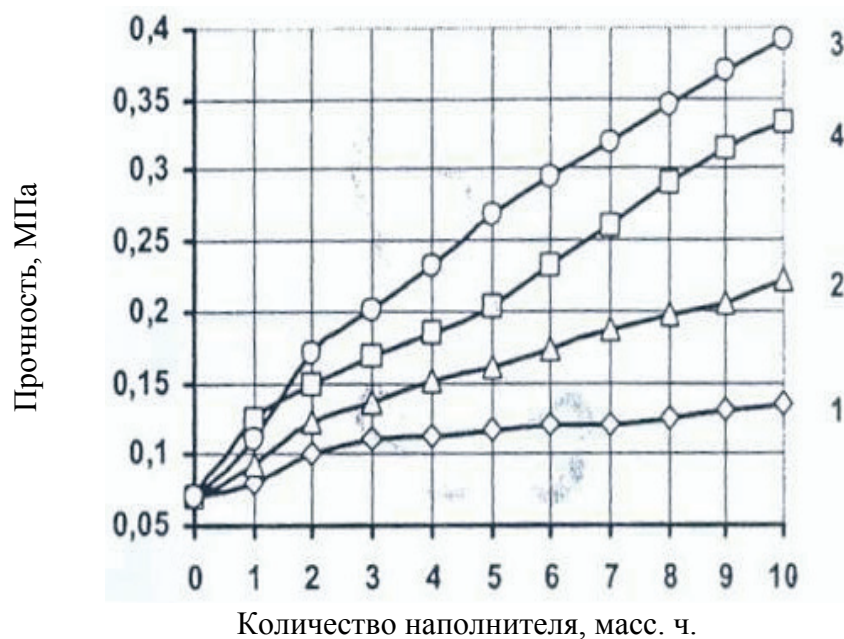


Рисунок 5.8 – Зависимость прочности карбамидного поропласта от содержания наполнителя

В табл. 5.4 представлены разработанные составы карбамидных поропластов, наполненных промышленными отходами, характеризующиеся высокими физико-механическими показателями – прочностью на сжатие, низким сорбционным увлажнением, высокими теплозащитными свойствами и низкими значениями усадочных деформаций.

Таблица 5.4 – Характеристики карбамидных поропластов

Составы, масс. ч.	Плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Сорбционное увлажнение за 24 ч, %	Линейная усадка, %
Униполимер-Т теплоизоляционный	20–30	0,007–0,05	0,035–0,047	15–20	8
Карбамидный поропласт, наполненный смесью отхода золы-уноса	40	0,11	0,038	10	1
Карбамидный поропласт, наполненный вспученным вермикулитом	65	0,2	0,037	8	3
Карбамидный поропласт, наполненный металлической пудрой	50	0,22	0,032	15	2,5
Карбамидный поропласт, наполненный мелом	60	0,16	0,035	18	2

На основе водорастворимой смолы, ПАВ, катализатора отверждения (КО) и дубильных растительных экстрактов по заданной рецептуре были получены образцы поропластов, исследовано влияние модифицированных агентов на механические характеристики и сорбционные свойства поропластов.

Практически во всем мире быстрому росту производства и применению поропластов способствуют высокие эксплуатационные показатели, многообразие способов получения и переработки, обеспечение высокого экономического эффекта, но перспективы использования карбамидных поропластов сдерживаются прежде всего из-за низкой механической прочности и токсичности, связанной с выделением из них формальдегида за счёт гидролитической или термодеструкции химической структуры материала по концевым группам и эфирным связям. В связи с повышением требований к экологичности используемых материалов в строительстве основные усилия разработчиков направлены на разработку новых технологий получения пеноматериалов с целью расширения области их эффективного применения.

В качестве древесных наполнителей использовалась [54] береста, опилки, окорка (смесь опилок и коры в соотношении 1:1), кора осины и сосны с размером частиц 0,25–1,0 мм. Древесные наполнители предварительно активировали методом взрывного автогидролиза (ВАГ) на установке, при следующих условиях: температура 200 °С, давление 4 МПа, время выдержки равна 60 с. Сущность метода ВАГ заключается в пропитке в реакторе измельченных древесных материалов водяным паром при заданной температуре, давлении и времени выдержки. Затем производится резкий (менее 1 с) сброс давления. При этом пар вырывается из частиц и разрушает их структуру. Размер частиц активированных древесных наполнителей также составляет 0,25–1,00 мм. Количество вводимых в поропласт наполнителей варьировали от 10 до 70 масс. %.

Прочность на сжатие композиционных материалов определена по общепринятым методикам для теплоизоляционных материалов.

Как показывают данные табл. 5.1, исследованные свойства композиционных материалов, наполненных необработанными исходными древесными материалами, практически не зависят от природы наполнителя, но существенно зависят от количества наполнителя.

Статистический анализ с учетом ошибок воспроизводимости результатов эксперимента при уровне значимости $q = 0,05$ и числе степеней свободы $f = 2$ показал, что различие прочности карбамидного поропласта для исследованных наполнителей не значимо.

Методом регрессионного анализа были получены уравнения, описывающие зависимость прочности карбамидного поропласта на сжатие ($\sigma_{\text{пр}}$) от количества наполнителей (K):

$$\sigma_{\text{пр}} = 0,1991 - 0,0123 K + 0,0005 K^2, \quad R^2 = 0,937. \quad (5.1)$$

Использование уравнения аппроксимации позволяет на предварительной оценить возможную прочность поропласта, при этом достоверность аппроксимации (R^2) составляет 0,937.

Оценка значимости коэффициентов уравнений регрессии (5.1) при уровне значимости $q = 0,05$ показала, что все коэффициенты значимы. Проверка адекватности регрессионного уравнения по критерию Фишера подтвердила их адекватность. Уравнение (5.1) позволяет определить прочность карбамидных поропластов при варьировании количества наполнителя и обоснованно подходить к получению пеноутеплителей с заданными теплоизоляционными свойствами.

Расчетное значение прочности на сжатие $\sigma_{\text{пр}}$ для карбамидного поропласта, содержащего 75 масс. % лигнина фракции 0,25–1,0 мм составляет 2,09 МПа, экспериментальное значение $\sigma_{\text{пр}}$ для этого образца составляет 1,93 МПа, сравнение значений прочности карбамидного поропласта с учетом доверительного интервала показывает, что уравнение (5.1) эффективно прогнозирует исследуемую характеристику, что подтверждает применимость уравнения.

Увеличение количества древесных наполнителей приводит к значительному росту прочности модифицированных карбамидных поропластов в сравнении с серийно выпускаемыми (табл. 5.5). Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что для получения утепляющих композиционных карбамидных поропластов с высокими прочностными характеристиками и высокими теплоизоляционными характеристиками целесообразно внесение более 50 масс. % древесных наполнителей.

Таблица 5.5 – Свойства карбамидных поропластовых утеплителей в зависимости от природы и количества древесных наполнителей

Материал для наполнения карбамидных пеноутеплителей	Количество наполнителя, масс. %	Прочность при сжатии карбамидных пеноутеплителей $\sigma_{пр}$, МПа	
		Наполнитель исходный	Наполнитель после ВАГ
Опилки осины	10	0,22	0,27
	30	0,39	0,45
	50	0,63	0,82
	70	1,76	1,82
Окорка осины	10	0,21	0,25
	30	0,41	0,47
	50	0,65	0,81
	70	1,78	1,84
Кора осины	10	0,20	0,24
	30	0,38	0,53
	50	0,63	0,79
	70	1,80	1,85
Кора сосны	10	0,20	0,26
	30	0,39	0,51
	50	0,65	0,82
	70	1,79	1,83
Береста березы	10	0,20	0,28
	30	0,40	0,47
	50	0,67	0,58
	70	1,81	0,72
Экстракты хвойных деревьев	10	0,23	0,33
	30	0,42	0,51
	50	0,73	0,85
Карбамидный пенопласт «карбопен»	—	0,19	1,93

Прочность исследованных модифицированных карбамидных поропластов не зависит от природы древесных наполнителей, предварительно не активированных методом взрывного автогидролиза. Наблюдаемый факт повы-

шения прочности поропластов после активации взрывным автогидролизом объясняется тем, что при использовании инертного наполнителя свойства формирующегося пенополимера в большей степени зависят от фракционного состава наполнителя [42, 53, 54]. Поскольку для получения композитов использовали одинаковые фракции наполнителей, влияние этого фактора на формирование прочности одинаково для всех древесных добавок.

Известно, что в процессе взрывного автогидролиза происходит механическая деформация структуры обрабатываемого материала в момент быстрой декомпрессии (взрыва). В результате наблюдается разрыхление и разрушение древесных частиц с образованием волокон [54, 75].

Разрушение и разрыхление древесных частиц в процессе автогидролиза также приводит к росту удельной поверхности по сравнению с исходным материалом [42, 75]. В результате увеличивается площадь контакта частиц наполнителя с компонентами реакционной смеси, что приводит к большему увеличению прочности в сравнении с неактивированными наполнителями (табл. 5.1). Следует отметить, что композиционные материалы, наполненные автогидролизованной берестой, демонстрируют меньшее увеличение прочности по сравнению с остальными активированными наполнителями. Наиболее существенное снижение прочности наблюдается для образцов, содержащих 50 и 70 масс. % берестяного наполнителя. Однако все образцы с берестой по показателю прочности превосходят образец сравнения карбамидного пенопласта по ТУ [180].

В процессе взрывного автогидролиза помимо механической деформации структуры древесных материалов происходит также гидролиз и деполимеризация лигноуглеводного комплекса древесины. Причем по мере увеличения количества кислот, образующихся в ходе процесса, ускоряется общий гидролиз углеводов. Это приводит к увеличению реакционно-активных функциональных групп различного характера для автогидролизованных древесных материалов [53, 54, 75]. Наглядным подтверждением служат данные ИК-спектров опилок осины до и после взрывного автогидролиза (рис. 5.9).

Как следует из рис. 5.9, в ИК-спектре автогидролизованного образца опилок осины наблюдается значительное увеличение интенсивности полос поглощения в интервале $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$. Реакционные функциональные группы этого образца представлены следующим набором:

- карбоксильные группы и их функциональные производные (полосы поглощения валентных колебаний $\nu_{\text{C=O}}$ при $1717,7\text{ см}^{-1}$, полосы в области $1264\text{--}1225\text{ см}^{-1}$ за счет валентных $\nu_{\text{C=O}}$ и деформационных колебаний $\delta_{\text{O-H}}$ соответствующих связей);

- простые эфирные группы (полосы поглощения в области $1058,6\text{--}1033,5\text{ см}^{-1}$ за счет колебаний $\nu_{\text{C-O-C}}$ связей в циклических и алифатических простых эфирах);

- спиртовые группы (полосы поглощения при $1058,6$, $1113,3$ и $1161,8\text{ см}^{-1}$ за счет колебаний $\nu_{\text{C-O}}$ связи в первичных, вторичных и третичных спиртах соответственно).

Об увеличении доли поверхностных структур ароматического характера, в частности фенолов, в процессе автогидролиза можно судить по увеличению интенсивности полосы поглощения $1608,0\text{ см}^{-1}$ за счет колебаний сопряженных углерод-углеродных связей C=C в ароматической структуре. Увеличение интенсивности полосы с максимумом при $1515,2\text{ см}^{-1}$ свидетельствует о росте доли неконденсированных ароматических структур для продукта ВАГ. Рост количества активных функциональных групп в образце после взрывного автогидролиза позволяет прогнозировать снижение количества свободного формальдегида в карбамидных поропластах, что достигается в результате взаимодействия формальдегида с функциональными группами (в частности, с фенольными гидроксильными группами) растительных экстрактов, применяемых для модификации карбамидных утепляющих поропластов [42, 122].

Как показывают данные рис. 5.9, использование автогидролизованных образцов опилок и окорки осины и коры сосны и экстрактов хвойных деревьев в качестве наполнителей карбамидных поропластов приводят к уменьше-

нию количества свободного формальдегида, что существенно снижает уровень экологической нагрузки на утепляемый мерзлый грунт и на грунт, контактирующий с ним.

Причем наибольшее снижение свободного формальдегида достигается для образца с экстрактами хвойных деревьев, наименьшее снижение характерно для опилок осины. Это объясняется различием в химическом составе компонентов древесных наполнителей, активированных взрывным автогидролизом.

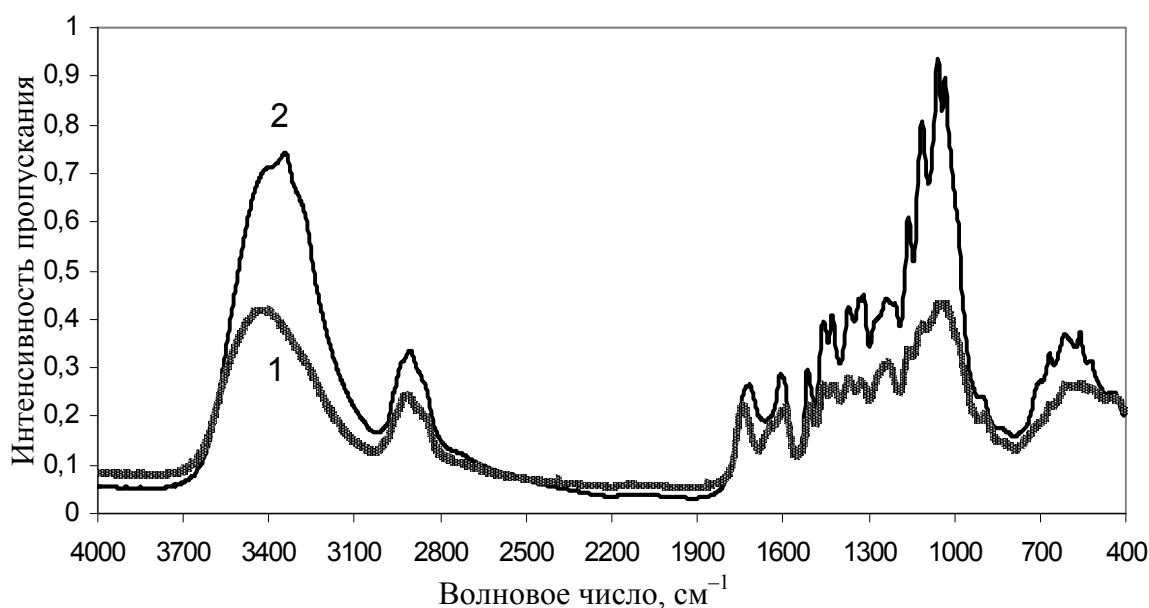


Рисунок 5.9 – ИК-спектры опилок осины до обработки (1) и после взрывного автогидролиза (2)

Эффективность снижения формальдегида увеличивается в ряду исследованных наполнителей: опилки осины < окорка осины < кора сосны < экстракты хвойных деревьев. Установлено, что для приведенного выше ряда наполнителей наблюдается увеличение выхода веществ, экстрагируемых 1 %-м раствором NaOH, –32, 42 и 53 % соответственно. Известно, что обработка водным раствором щелочи сопровождается переходом в раствор смол, жиров, лигнотуминовых веществ, низкомолекулярного лигнина, полисахаридов и полифенольных кислот [52]. Поэтому выход таких экстрактивных продуктов может использоваться для характеристики содержания активных (в отношении формальдегида) веществ в автогидролизированных древесных материалах.

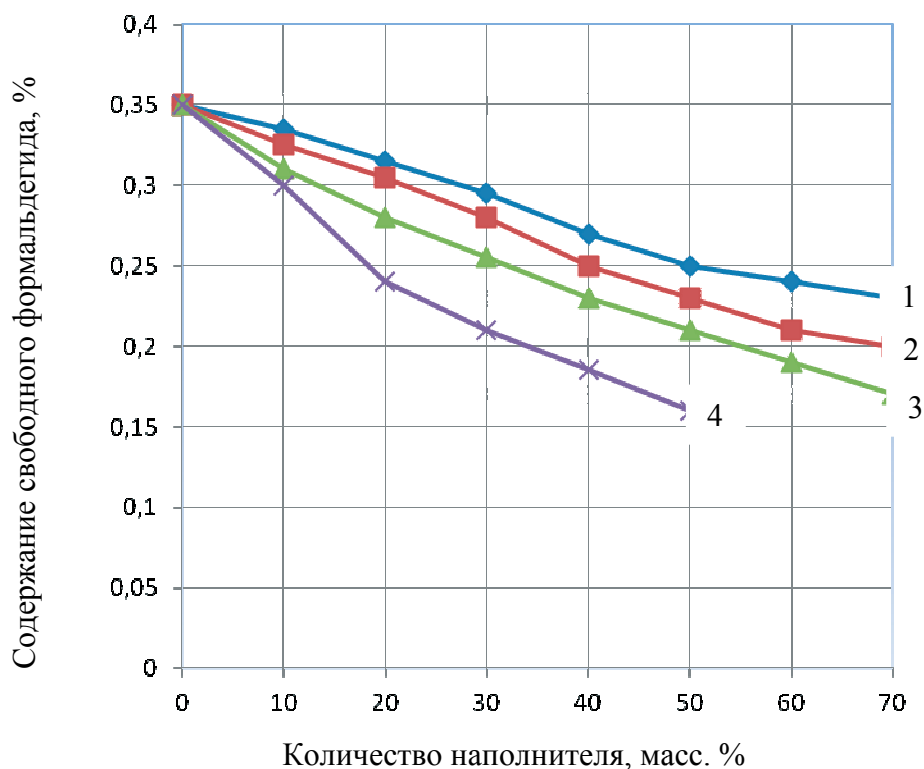


Рисунок 5.10 – Зависимость содержания свободного формальдегида в карбамидном поропласте от количества древесного наполнителя: 1 – опилки осины; 2 – окорка осины; 3 – кора сосны; 4 – экстракт коры хвойных деревьев

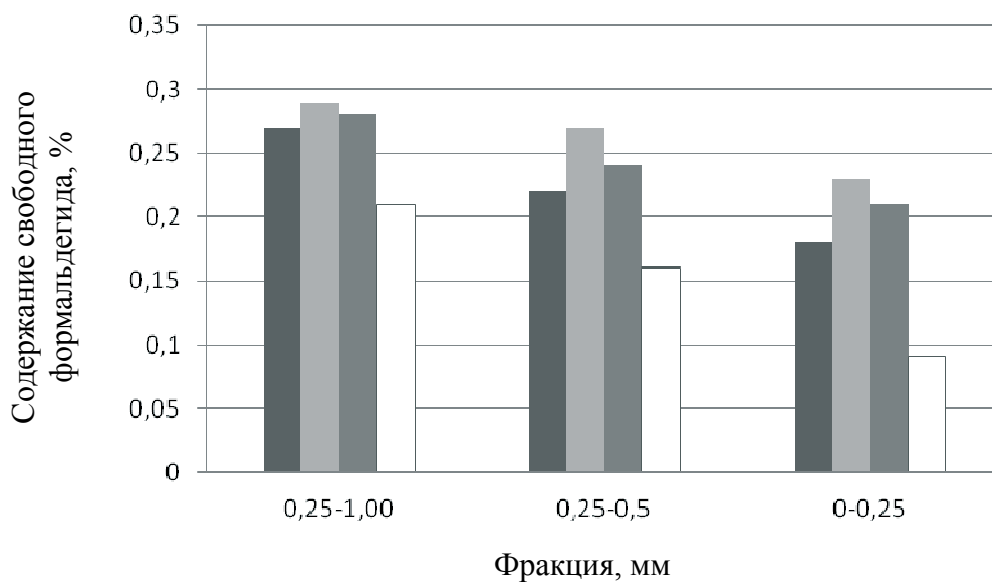


Рисунок 5.11 – Влияние размера частиц наполнителей на содержание свободного формальдегида в карбамидном пенопласте: ■ – кора сосны; ■ – опилки сосны; ■ – окорка осины; □ – экстракт хвойных деревьев

Эффективность снижения свободного формальдегида для композиции карбамидного утепляющего поропласта увеличивается с уменьшением размера частиц наполнителя. На рис. 5.11 приведены данные о влиянии размера фракции древесных наполнителей, активированных взрывным автогидролизом, на содержание свободного формальдегида в карбамидных поропластах (содержание наполнителя 30 масс. %).

Фракции различного размера изготовлены измельчением исходного автогидролизованного материала с размером частиц от 0,25 до 1 мм.

Наблюдаемый эффект обусловлен увеличением контакта частиц наполнителя и компонентов реакционной смеси за счет роста контурной поверхности частиц при уменьшении размера фракции. В результате взаимодействия формальдегида с активными веществами наполнителя протекает более интенсивно.

При проведении исследований дополнительно установлено, что поропласты как при производстве так и нанесении обладают значительной усадкой. Последняя зависит от условий испарения влаги при отверждении пены. При нанесении материала на участок в полевых условиях механизированным способом с помощью мобильного комплекса испарение влаги из поропласта приводит к его усадке в естественных условиях в пределах от 7 до 15 % как показали промышленные испытания усадку можно уменьшить при технологическом процессе изготовления поропласта:

- эффективным перемешиванием компонентов;
- пластифицированием водорастворимой смолы эмульсиями термопластичных полимеров;
- введением в исходную композицию, содержащую водорастворимую смолу, сополимера этой смолы с триэтиленгликолем;
- обработкой газообразным аммиаком отверждающегося поропласта или раствором аммиака водорастворимой смолы до вспенивания.

При этом необходимо учесть, указанные мероприятия значительно удорожают стоимость поропласта. Кроме того при отверждении водораство-

римой смолы выделяется значительное количество воды, поэтому начальная влажность (массовая) доходит до 150–400 %. Одним из способов улучшения поропласта является оптимизация технологических режимов изготовления поропласта, его сушки и дробления с использованием различных композиций полимерных составов, включая наполнители, стабилизаторы, пластификаторы и модификаторы. Исследованием определено – уменьшение усадочной деформации путем увеличения объемной доли полимерной основы за счет снижения пористости полимерного поропласта, не всегда экономически целесообразно. Другой способ улучшения прочностных свойств полимерных сорбентов – химическая модификация полимерных смол на стадии синтеза, с целью увеличения прочности отвержденной смолы. Однако применение известных, специально синтезированных для производства поропластов, полимерных смол приводит к незначительному увеличению прочности поропласта (0,03 МПа).

На наш взгляд, наиболее рациональным путем улучшения механических свойств поропластов является применение принципов физической модификации полимерной основы, в частности, за счет введения инертных и других наполнителей. Проведены исследования возможности применения промышленных отходов в качестве наполнителей и их влияния на физико-механические и эксплуатационно-экологические свойства, с этой целью был использован как классический способ наполнения (введение химически инертного наполнителя), так и метод «самонаполнения», когда наполнитель создается в ходе образования самого поропласта.

В качестве химически инертных наполнителей использованы легкие высокопористые наполнители и тонкодисперсные наполнители с размерами, близкими к наночастицам. Легкие наполнители низкой плотности целесообразны для применения, учитывая сложности, возникающие при наполнении полимерных сорбентов ввиду резкого снижения кратности вспенивания и стабильности пены. В качестве легкого наполнителя низкой плотности был выбран вспученный вермикулит или зола-унос, исследовано влияние грану-

лометрического состава вспученного вермикулита на свойства поропласта и установлены оптимальные фракции – от 250 до 63 мкм. Отличительной особенностью наполнения поропласта другим химически инертным наполнителем – золой-унос ТЭЦ, состоящим на 80 % из оксида железа, размер которого близок к наночастицам (удельная поверхность 135 000 см²/гр), является возможность введения большого количества наполнителя (до 40 масс. ч) без существенного снижения кратности вспенивания и ухудшения стабильности пены. При реализации способа «самонаполнения», наполнитель создается в ходе реакции взаимодействия реакционноспособных компонентов с катализатором отверждения карбамидоформальдегидной смолы – ортофосфорной кислотой.

В качестве реакционно-способного компонента был выбран шлам - алюмонатриевый отход, состоящий на 96 % из гидроксида алюминия, и отход водоочистки ТЭЦ, состоящий примерно на 87 % из карбонатов кальция и магния, а роль наполнителей играют фосфаты алюминия, кальция и магния, образующиеся в результате реакции взаимодействия наполнителей с катализатором отверждения карбамидной смолы. В случае использования отхода водоочистки ТЭЦ использовалось сочетание механического вспенивания и газообразования, за счет выделяющегося углекислого газа в результате реакции взаимодействия ортофосфорной кислоты с карбонатами кальция и магния.

Однако недостатком использования отхода водоочистки ТЭЦ является необходимость введения большого количества кислоты, а за счет интенсивной химической реакции появляются остаточные усадочные напряжения, которые приводят к трещинообразованию поропласта. В связи с этим, проведена частичная замена отхода водоочистки ТЭЦ менее активным наполнителем – цеолитсодержащей породой (ЦСП), и установлено оптимальное соотношение ЦСП : отход водоочистки ТЭЦ, равное 1:6. Изменения основных технологических показателей – времени гелеобразования и кратности вспенивания пеномассы показаны, соответственно, на рис. 5.12 и 5.13.

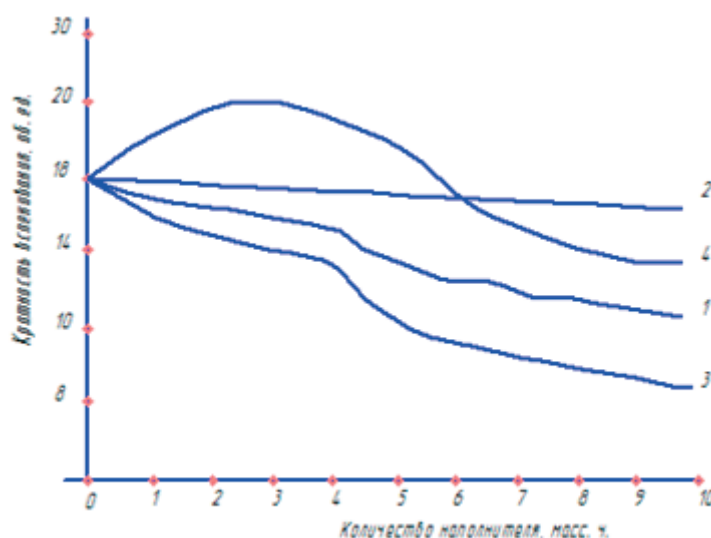


Рисунок 5.12 – Зависимость кратность вспенивания от наполнителя:
1 – вспученный вермикулит; 2 – зола-унос; 3 – металлическая пудра; 4 – мел

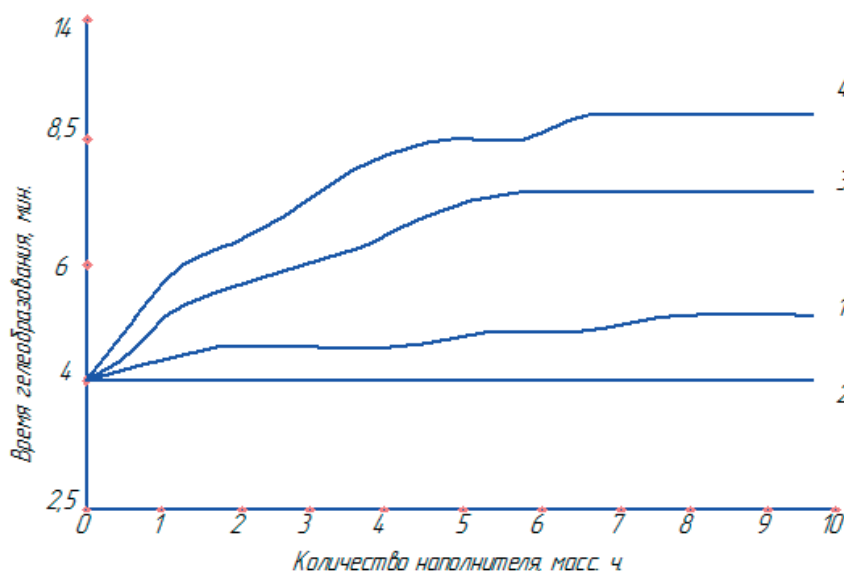


Рисунок 5.13 – Зависимость времени гелеобразования от количества наполнителя:
1 – вспученный вермикулит; 2 – зола-унос; 3 – металлическая пудра; 4 – мел

Увеличение времени гелеобразования при использовании алюмонат-риевого отхода и смеси отхода водоочистки ТЭЦ с ЦСП обусловлено тем, что значительная часть ортофосфорной кислоты взаимодействует с ними, что приводит к ослаблению каталитического влияния ортофосфорной кислоты на процесс отверждения карбамидоформальдегидной смолы.

Увеличение массовой доли наполнителя приводит к снижению горючести с Γ_4 до Γ_1 (рис. 5.14), повышению плотности (рис. 5.15) и прочности по-ропласта (рис. 5.16).

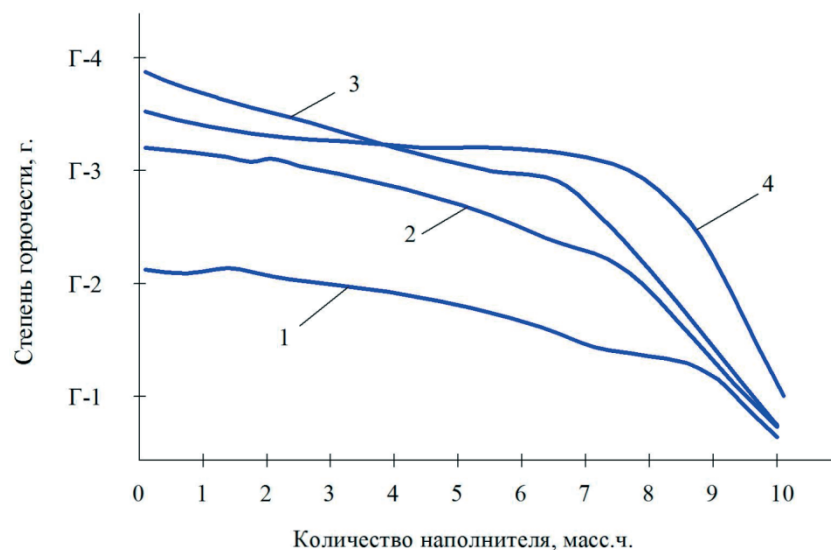


Рисунок 5.14 – Влияние массовой доли наполнителя на горючесть порошковых материалов:
1 – вспученный вермикулит; 2 – зола-унос; 3 – металлическая пудра; 4 – мел

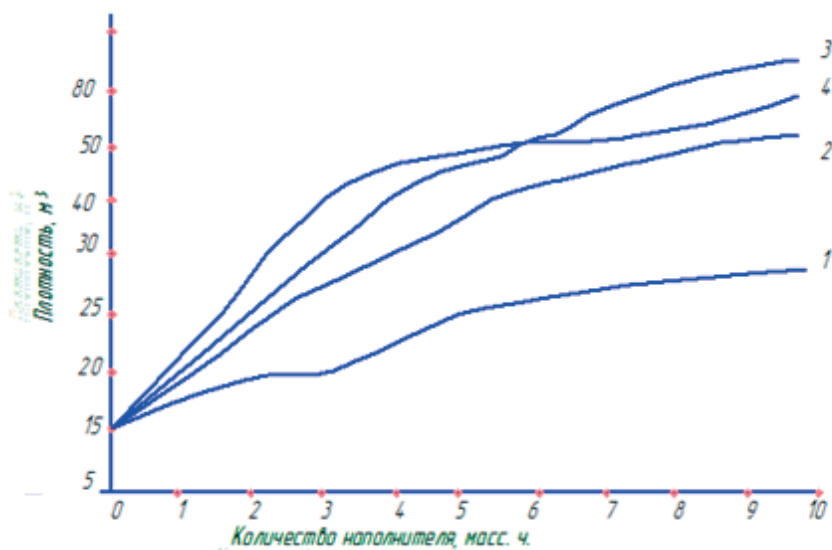


Рисунок 5.15 – Влияние массовой доли наполнителя на плотность порошковых материалов:
1 – вспученный вермикулит; 2 – зола-унос; 3 – металлическая пудра; 4 – мел

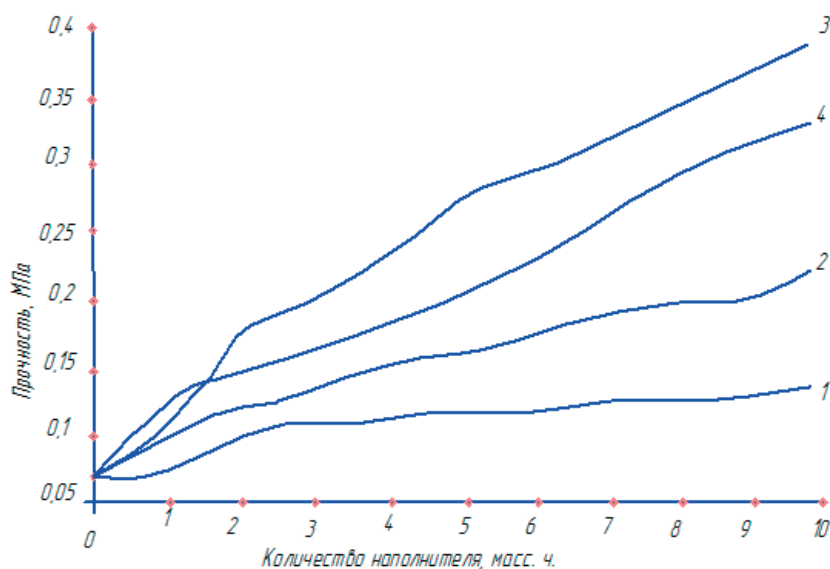


Рисунок 5.16 – Зависимость прочности порошковых материалов от массовой доли наполнителя:
1 – вспученный вермикулит; 2 – зола-унос; 3 – металлическая пудра; 4 – мел

Увеличение кратности вспенивания при наполнении смесью отхода водоочистки ТЭЦ (рис. 5.17) объясняется выделением углекислого газа в результате реакции взаимодействия ортофосфорной кислоты с карбонатами кальция и магния.

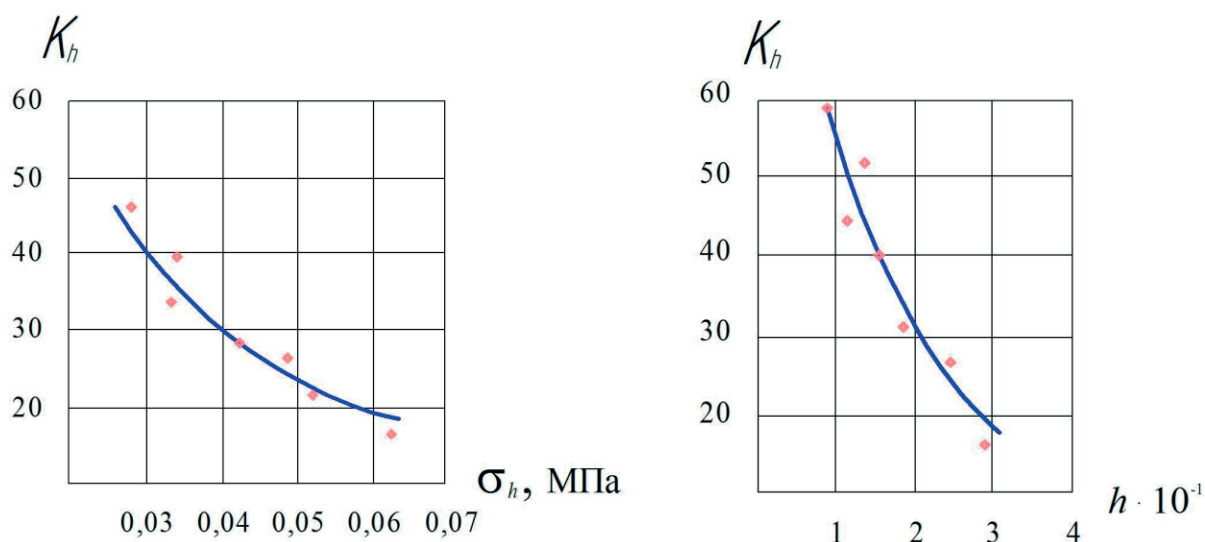


Рисунок 5.17 – Зависимость кратности пены от прочности σ_h и глубины слоя поропласта h

Быстротвердеющая пена поропласта является мелкопористым материалом белого цвета. Объемная масса воздушно-сухого образца поропласта колеблется в пределах $10\text{--}15 \text{ кг/м}^3$.

Влажность быстротвердеющей пены сразу после изготовления колеблется в пределах $400\text{--}500 \%$ (весовая), а после высыхания в естественных условиях снижается до $90\text{--}100 \%$.

Быстротвердеющая пена является поропластом, в ней преобладают открытые поры. Как все открытопористые материалы, поропласт гидрофилен. Увлажнение ее происходит от жидких осадков, выпадающих в период между ее нанесением и наступлением устойчивых морозов. Влажность поропласта существенно влияет на коэффициент теплопроводности (рис. 5.18).

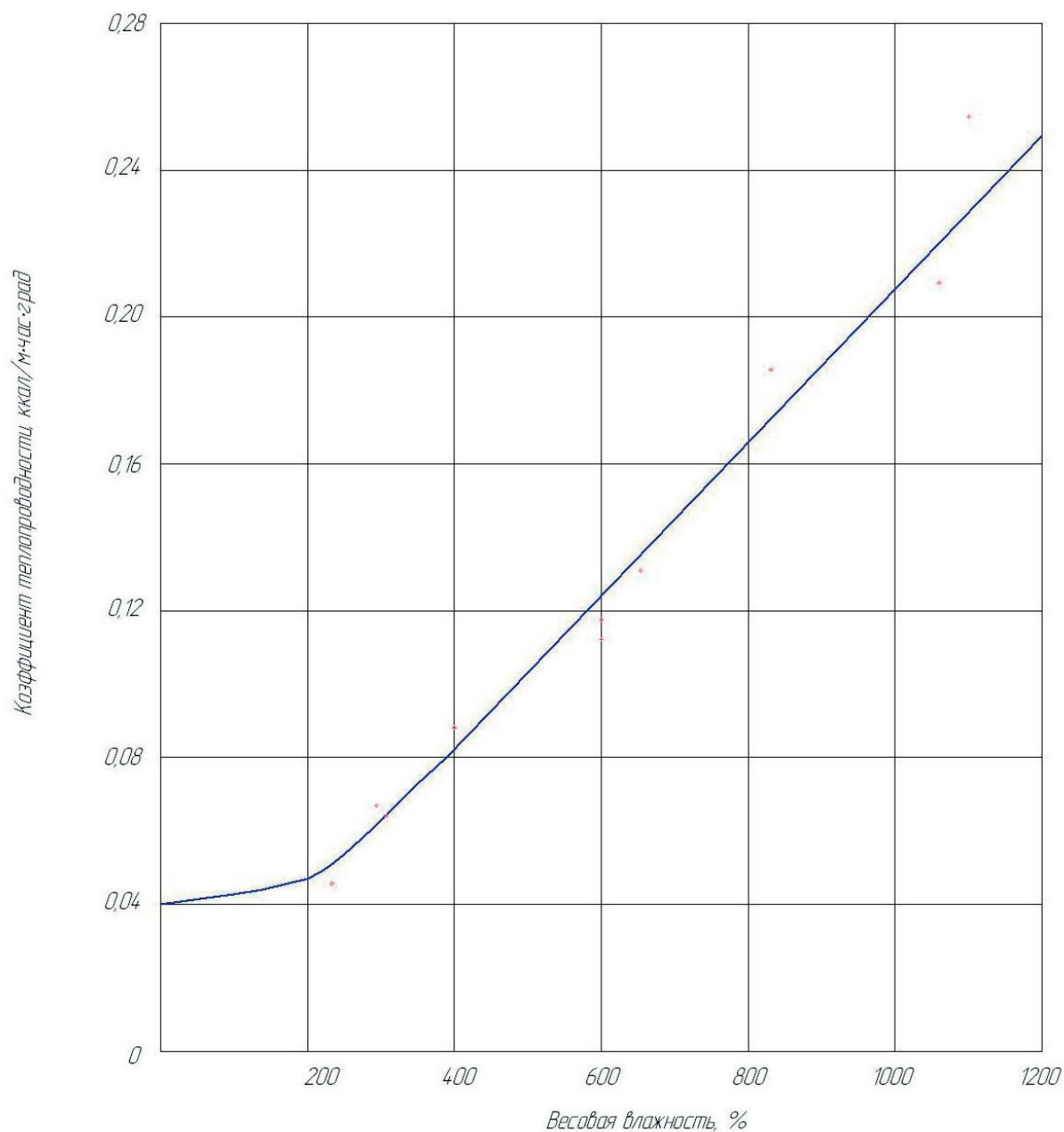


Рисунок 5.18 – Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности карбамидного поропласта от влажности

Для практического расчета основных параметров утепления грунта (толщины утепления и рационального срока его нанесения) можно принять, что в течение зимнего периода влажность поликарбонатного поропласта остается постоянной. При этом следует отметить значительное влияние сроков нанесения поропласта на предохраняемый от промерзания грунт.

Выводы

1. Введение древесных наполнителей и последующая активация их свойств методом взрывного автогидролиза является эффективным средством повышения прочности на сжатие карбамидного поропласта и к снижению содержания свободного формальдегида до уровня предельно допустимой концентрации, что повышает их механическую прочность и экологическую безопасность для снижения прочности на сезонно-мерзлых грунтах Восточной Сибири.

2. Оптимальным размером фракций древесных наполнителей, активированных взрывным автогидролизом, снижающим содержание свободного формальдегида в карбамидном поропласте, является величина до 0,25 мм.

3. Высокие прочностные и теплоизоляционные характеристики карбамидных поропластов обеспечиваются внесением более 50 мас. % древесных наполнителей.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК УТЕПЛЕННЫХ ГРУНТОВ

Прочность поропласта небольшая, в связи с чем, возможно разрушение теплоизоляционного слоя из поропласта ветром со скоростью более 25 м/с.

Удельная теплоемкость поропласта составляет 0,34 ккал/кг·град [124, 179, 180]. Коэффициент теплопроводности поропласта зависит от температуры, объемной массы и влажности. Для практических расчетов следует учитывать только зависимость коэффициента теплопроводности поропласта от влажности, так как влияние изменения объемной массы и температуры на коэффициент теплопроводности поропласта незначительно по сравнению с влажностью.

Физические свойства поропласта в течение зимнего периода изменяются весьма незначительно, поэтому для практических расчетов теплоизоляционные свойства ее можно принять постоянными.

Эксплуатационными недостатками карбамидного поропласта являются малая прочность и малый удельный вес, что накладывает дополнительные требования к процессу нанесения его на грунт и сохранения на утепленном грунте.

С практической точки рекомендуется использовать технологию дифференцированного нанесения поропласта (рис. 6.1), что существенно снижает стоимость предохранения грунтов от сезонного промерзания.

Естественным путем невозможно повысить прочность верхних слоев и достичь эрозийной стойкости утепляющего покрытия поропласта. Одним из решений данной проблемы является послойное нанесение поропласта различной кратности (рис. 6.2), при этом поропласты большей кратности 2 наносятся на утепляемый грунт 1, а поропласт меньшей кратности в качестве защитного экрана 3, закрывающего нижний (рабочий) слой и предохраняющего его от ветровой эрозии.

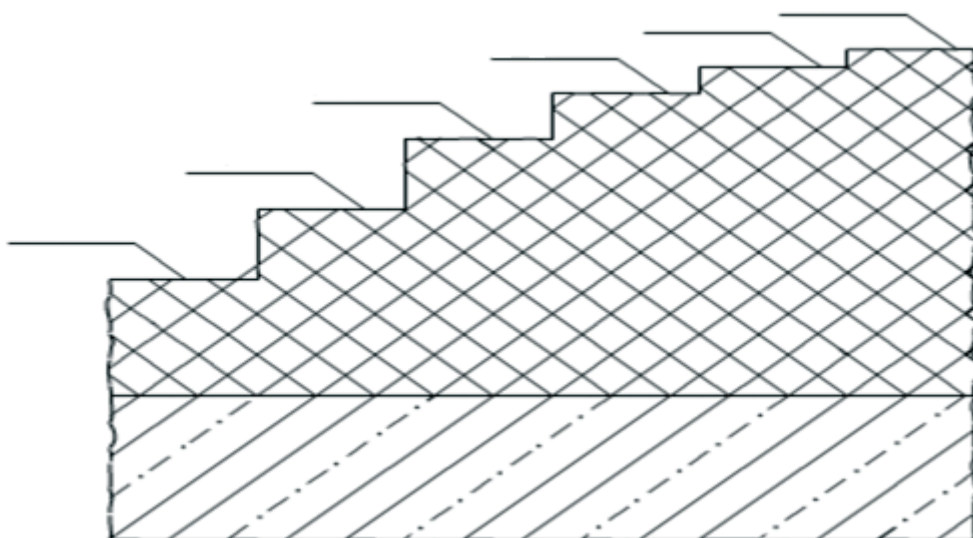


Рисунок 6.1 – Дифференцированная схема нанесения карбамидного поропласта

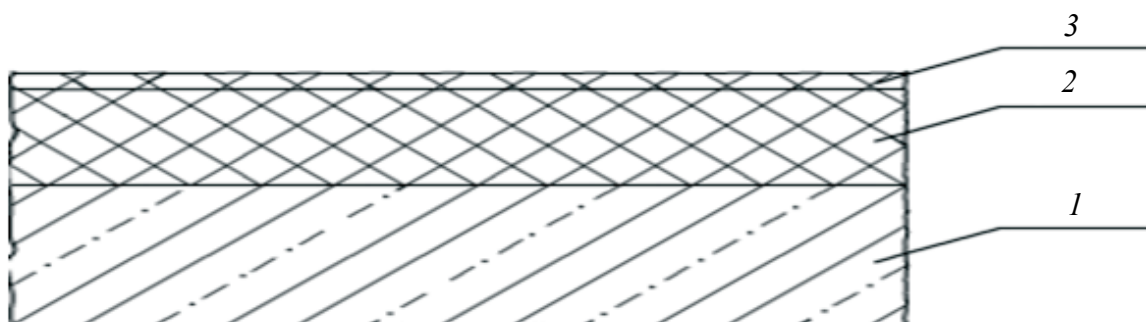


Рисунок 6.2 – Схема нанесения поропластов различной кратности на утепляемый грунт

Показатель кратности зависит от способа приготовления поропласта, но при этом следует отметить, что данный показатель не постоянен по глубине слоя закладки поропласта даже при одном из выбранных способов.

Мобильные комплексы как правило, применимы при объемах утепления грунтов до 250 м^3 и в условиях распределенного по времени процесса нанесения поропласта. Такие комплексы малоприменимы в условиях севера, когда зимний период наступает в сжатые сроки, а летний – подготовительный период весьма краток по продолжительности.

Технологические мобильные комплексы по производству и нанесению поропласта в полевых условиях. Комплекс позволяет, в отличие от ранее рассмотренных, получать быстротвердеющие самоотверждающиеся полимерные

покрытия различных рецептур, кратности и кажущейся плотности объемом более 300 м³.

Компоновка мобильного комплекса зависит от разновидности применяемых компонентов, составов композиций и их способов получения (физико-энергетический, воздушно-механический с применением ультразвуковых диспергаторов, а также с применением ротационно-гидродинамических устройств, агрегатов термостатирования, парогенераторов и реакторов вспенивания, созревания и отверждения).

Результаты исследования эксплуатационных характеристик полимерных сорбентов показывают:

- наибольшей упрочняющей способностью полимерных сорбентов обладает алюмонатриевый наполнитель
- наполнение полимерного сорбента вспученным вермикулитом или золой-уносом позволяет снизить линейную усадку на 70–80 %.
- внесение отхода водоочистки ТЭЦ приводит к снижению степени горючести полимерного сорбента смеси с Г₁ до Г₄.
- увеличение плотности сорбента при внесении до 6 масс. частей обеспечивается наполнителем в виде мела, но при большем содержании масс. частей большую плотность обеспечивает внесение металлической пудры.
- при использовании автогидролизированных древесных материалов достигается снижение содержания свободного формальдегида в карбамидных поропластах, что повышает их экологическую безопасность.

6.1. Оценки теплоизоляционных свойств карбамидных поропластов

Для расчета необходимой толщины пены-утеплителя на карбамидной основе для предохранения грунта от сезонного промерзания по среднестатистическим метеорологическим данными месячных температур, высоты снежного покрова, плотности снежного покрова и количества суточных градусочасов отрицательных температур воспользуемся формулой:

$$h = K_y L_u (K_p K_w K_\tau R_o - R_c), \quad (6.1)$$

где K_y – коэффициент усадки пены-утеплителя; L_u – коэффициент теплопроводности утеплителя, ккал/м·час·°С; K_p – коэффициент влияния плотности грунта; K_w – коэффициент влияния влажности грунта; K_τ – коэффициент влияния срока нанесения карбамидного поропласта на предохраняемый от сезонного промерзания грунт; R_o – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта от промерзания, м²·час·°С/ккал; R_c – термическое сопротивление снега, м²·час·°С/ккал.

Значения фактических градусо-часов отрицательных температур каждого месяца позволяют определить величины градусо-суток и по графику рис. 6.3 термическое сопротивление мерзлого грунта [53, 54].

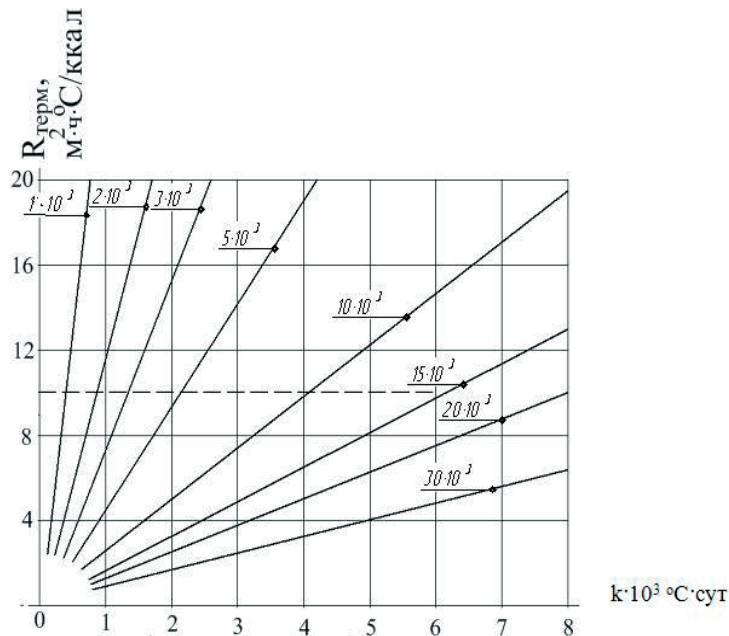


Рисунок 6.3 – Зависимость термического сопротивления грунта от индекса промерзания и допустимых тепловых потерь

Для определения общего термического сопротивления необходимо найти удельные допустимые тепловые потери с 1 м² утепляемой поверхности с учетом значения удельной теплоты плавления льда ($L_{\text{л}} = 80$ ккал/кг):

$$Q = H(g_{\text{л}} \cdot 80 + 0,5T \cdot C_{\text{гр}}), \quad (6.2)$$

где H – допустимая глубина промерзания грунта (определяется исходя из имеющегося типоразмера землеройной машины); $g_{\text{л}}$ – содержание льда в се-

зонно-мерзлом грунте; T – температура поверхности сезонно-мерзлого грунта; $C_{гр}$ – объемная теплоемкость сезонно-мерзлого грунта.

Влияние теплоизоляции на глубину промерзания утепленного грунта можно проследить по известному уравнению В.С. Лукьянова:

$$h = \sqrt{\frac{4\lambda_r \Delta t \tau}{2Q + C_r \Delta t}} + S^2 - S, \quad (6.3)$$

где h – глубина промерзания грунта, м; λ_r – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/(м·°C); Δt – разность температуры промерзания грунта и средней температуры воздуха за зимний сезон, °C; τ – продолжительность промерзания грунта, с; Q – скрытая теплота замерзания влаги грунта, Дж/м ; C_r – объемная теплоемкость мерзлого грунта, Дж/(м³·°C); S – толщина слоя грунта, термическое сопротивление которого равно термическому сопротивлению слоя изоляции поверхности грунта и сопротивлению теплоотдачи с поверхности, м.

При утеплении грунта толщина слоя грунта определялась по формуле:

$$S = \lambda_r (R_\alpha + R_o). \quad (6.4)$$

Уравнение (6.4) подтверждает, что глубина промерзания утепленного грунта будет тем больше, чем больше коэффициент теплопроводности грунта, разность температур Δt промерзающего грунта и воздуха, а так же продолжительность промерзания. На увеличение глубины промерзания одинаково влияют как температура воздуха в течение короткого промежутка времени, так и более высокая температура воздуха в течение продолжительного времени. Следовательно, влияние температуры воздуха и продолжительности процесса на промерзание утепленного грунта можно учитывать составляющей собой произведение количества градусо-часов отрицательной температуры и количества часов промерзания грунта. Выявленное влияние температуры грунта в момент нанесения утеплителя (т.е. начальных условий) на продолжительность предохранения грунта от промерзания позволило существенно уточнить инже-

нерную методику расчета толщины карбамидного поропласта, используемого для предохранения грунта от сезонного промерзания.

При различных начальных условиях для промерзания грунта заодно и то же время на определенную глубину требуется разное общее термическое сопротивление. В этом случае темпы промерзания грунтов сильно отличаются.

Коэффициент влияния объемной плотности (K_p) зависит от типа грунта и его гранулометрического состава. Для практических расчетов рекомендуется принимать значение $K_p = 1,00$ для грунтов плотностью от 1500 до 1700 кг/м³ и $K_p = 0,85$ для грунтов плотностью от 1700 кг/м³ и более.

Для расчета объема утеплителя по уравнению (6.1) необходимо:

Определить вид грунта, его влажность и объемную массу, получить сведения о температуре воздуха, толщине и плотности снежного покрова в зимнее время, о количестве осадков осенью (в период между нанесением утеплителя и появлением устойчивого покрова).

По продолжительности времени предохранения грунта от промерзания и температуры воздуха рассчитать количество градусо-часов; сумму произведений среднемесячной температуры воздуха на продолжительность промерзания в течение месяца в часах.

Исходя из типа и мощности применяемого землеройного оборудования и из требований на содержание мерзлых кусков в разрабатываемом грунте, определить допустимую глубину промерзания утепленного грунта. При условии, что разработка грунта осуществляется экскаваторами типа ЭМ-302 следовательно, допустимая глубина промерзания принимается в пределах 0,02–0,05 м.

В соответствии с типом утепленного грунта, исходя из количества градусо-часов и допускаемой глубины промерзания грунта представлен способ определения общего термического сопротивления по номограммам рис. 6.4, 6.8, требуемое для предохранения грунта от промерзания. Для этого, расчетное количество градусо-часов требуется отложить на оси абсцисс, на оси координат – значение допускаемой глубины промерзания [48].

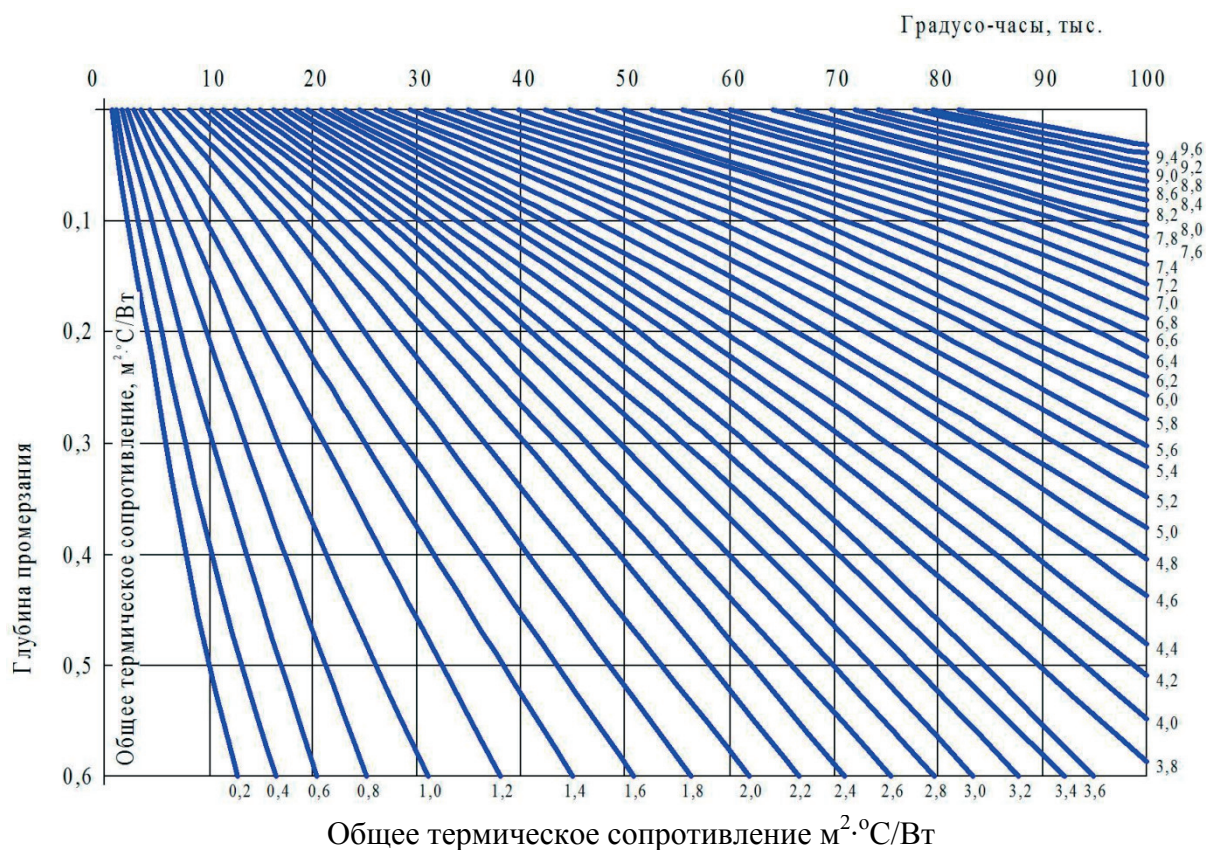


Рисунок 6.4 – Зависимость глубины промерзания глинистых грунтов от количества градусо-часов при различных общих термических сопротивлениях

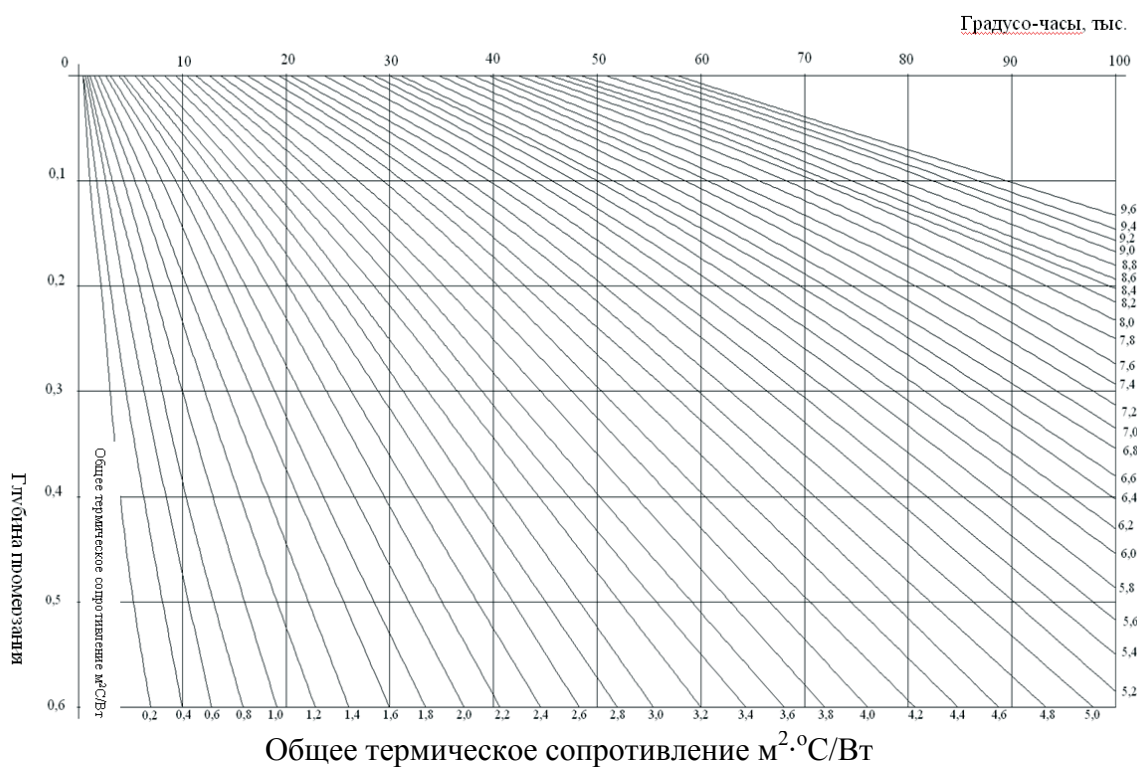


Рисунок 6.5 – Зависимость глубины промерзания песчаных грунтов от количества градусо-часов при различных общих термических сопротивлениях

Исходя из объемной массы и влажности утепляемого грунта, определяются коэффициенты влияния влажности и объемной массы (табл. 6.1, 6.2, 6.3).

Таблица 6.1 – Коэффициент влияния объемной массы грунта K_γ

Вид грунта	Объемный вес грунта, кг/м ³						
	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Глинистый	1,32	1,24	1,12	1,00	0,87	0,80	–
Песчаный	1,28	1,25	1,13	1,00	0,93	0,85	0,77

Таблица 6.2 – Коэффициент влияния влажности глинистого грунта K_W

Влажность, %	10	15	20	25	30
Коэффициент	1,60	1,26	1,00	0,85	0,72

Таблица 6.3 – Коэффициент влияния влажности песчаного грунта K_W

Влажность, %	4	8	12	16	20	24
Коэффициент	1,90	1,35	1,00	0,84	0,71	0,61

Исходя из метеорологических сведений, рассчитываются коэффициент теплопроводности снега и его термическое сопротивление, а также влажность карбамидного поропласта и соответствующий ей эффективный коэффициент теплопроводности.

Термическое сопротивление снега определяется по известному уравнению:

$$R_c = \frac{h_c}{L_c}, \quad (6.5)$$

где h_c – толщина снежного покрова, м.

Эффективный коэффициент теплопроводности поропласта определить по следующим уравнениям:

- при влажности поропласта до 300 %

$$L_U = 0,04 + 10^{-3} \cdot W_U^{2,78}, \quad (6.6)$$

- при влажности поропласта от 300 % до 1200 %

$$L_U = 0,021 \cdot W_U - 0,002, \quad (6.7)$$

где W_U – весовая влажность поропласта в долях единицы;

- при влажности поропласта 300 % $L_U = 0,074$ Вт/м°C.

Экспериментальными исследованиями [53] установлено влияние сроков нанесения карбамидного поропласта на предохраняемые от промерзания и упрочнения (повышения $K_{пр}$ в связи с эти грунты различного гранулометрического состава. Значение коэффициента влияния влажности грунта (K_W) рекомендуется принимать при влажности грунта от 8 % до 20 % равным 1,35, а при влажности грунта более 20 % значение коэффициента равняется 0,71.

Сроки нанесения карбамидного поропласта на предохраняемый от сезонного промерзания грунт определяемые относительно начала промерзания грунта существенно влияют на толщину карбамидного поропласта.

Различие требуемого термического сопротивления при разных начальных условиях вычислялось через коэффициент влияния срока нанесения утеплителя, показывающий, насколько изменяется требуемое общее термическое сопротивление при нанесении утеплителя в различные сроки по отношению к требуемому термическому сопротивлению, когда наносят утеплитель в начале промерзания грунта:

$$K_\tau = \frac{R_t}{R_o}, \quad (6.8)$$

где K_τ – коэффициент влияния срока нанесения утеплителя; R_t – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта от промерзания при нанесении утеплителя в различные сроки, (м²·°C) /Вт; R_o – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта от промерзания при нанесении утеплителя в начале промерзания грунта, (м²·°C) /Вт.

Считается, что высокая температура грунта в момент нанесения утеплителя содействует более продолжительному предохранению от промерзания и при одинаковой продолжительности предохранения от промерзания потребуется меньшее общее термическое сопротивление. Отсюда требуемое сопротивление в случае нанесения утеплителя до начала промерзания грунта будет меньше, чем когда наносят утеплитель в начале промерзания грунта, а коэффициент K_{τ} – меньше единицы. Если карбамидный поропласт наносится после начала промерзания, то K_{τ} будет больше единицы. Его величина будет тем больше, чем больше период времени после начала промерзания грунта.

Как правило, использование графических зависимостей дает хорошую наглядность (рис. 6.4–6.9), но для инженерной методики трудно применимы, уравнения регрессии позволяют произвести вычисления поправочных коэффициентов, представленных в таблице. Уравнение регрессии действительны в пределах изменения срока нанесения поропласта (T) от 30 дней до начала промерзания глинистого грунта до 15 дней после начала промерзания.

Коэффициент влияния срока нанесения карбамидного поропласта (K_{τ}) может определяться из графиков (рис. 6.6–6.11) или уравнениями регрессии (6.9)–(6.14), сведенными в табл. 6.4.

Учитывая среднестатистические данные северной зоны Красноярского края при утеплении грунта, начало работ по утеплению грунта карбамидным поропластом рекомендуется проводить, начиная с октября месяца до наступления промерзания грунта.

Натурные исследования подтвердили, что для одинаковых сроков нанесения грунта до начала промерзания глинистых и песчаных грунтов поправочный коэффициент толщины поропласта существенно уменьшается для грунтов. В частности, если наносить поропласт через 10 дней после начала промерзания глинистых грунтов, значение коэффициента равно 1,37, а для песчаных составит 1,72, если произвести нанесение поропласта за 10 дней до начала промерзания, то эти коэффициенты принимают значения 0,82 и 0,85. Таким образом, своевременное нанесение на глинистый грунт карбамидного

поропласта, позволяет уменьшить толщину слоя в 1,67 раза, а для песчаных грунтов в 2,02 раза.

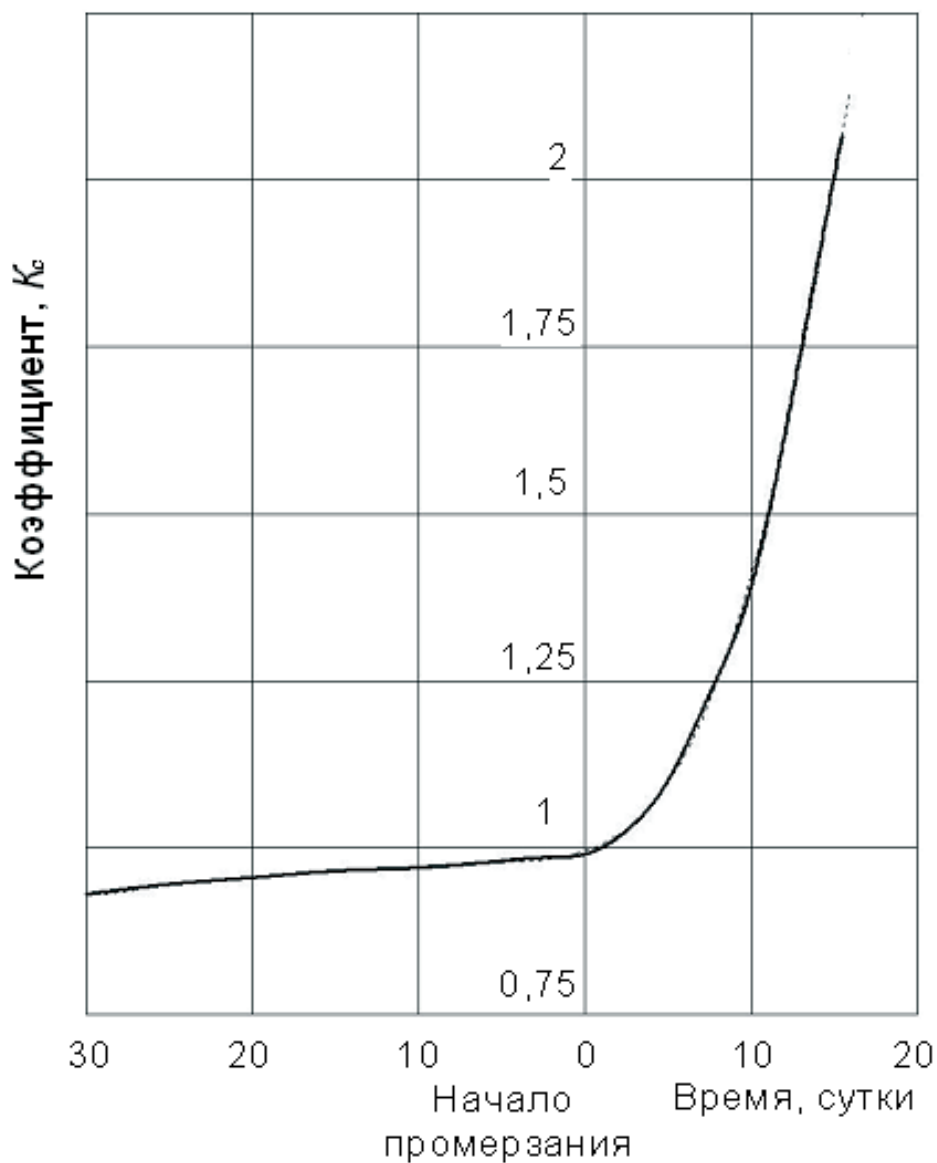


Рисунок 6.6 – Изменение коэффициента влияния сроков нанесения поропласта на предохраняемый от сезонного промерзания глинистый грунт
 — экспериментальная зависимость, ----- кривая аппроксимации

$$K_{\tau} = -1,204 \cdot 10^{-10} \cdot T^7 - 8,107 \cdot 10^{-9} \cdot T^6 - 9,91 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 + 4,36 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 1,45 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,002 \cdot T^2 + 0,008 \cdot T + 0,995. \quad (6.9)$$

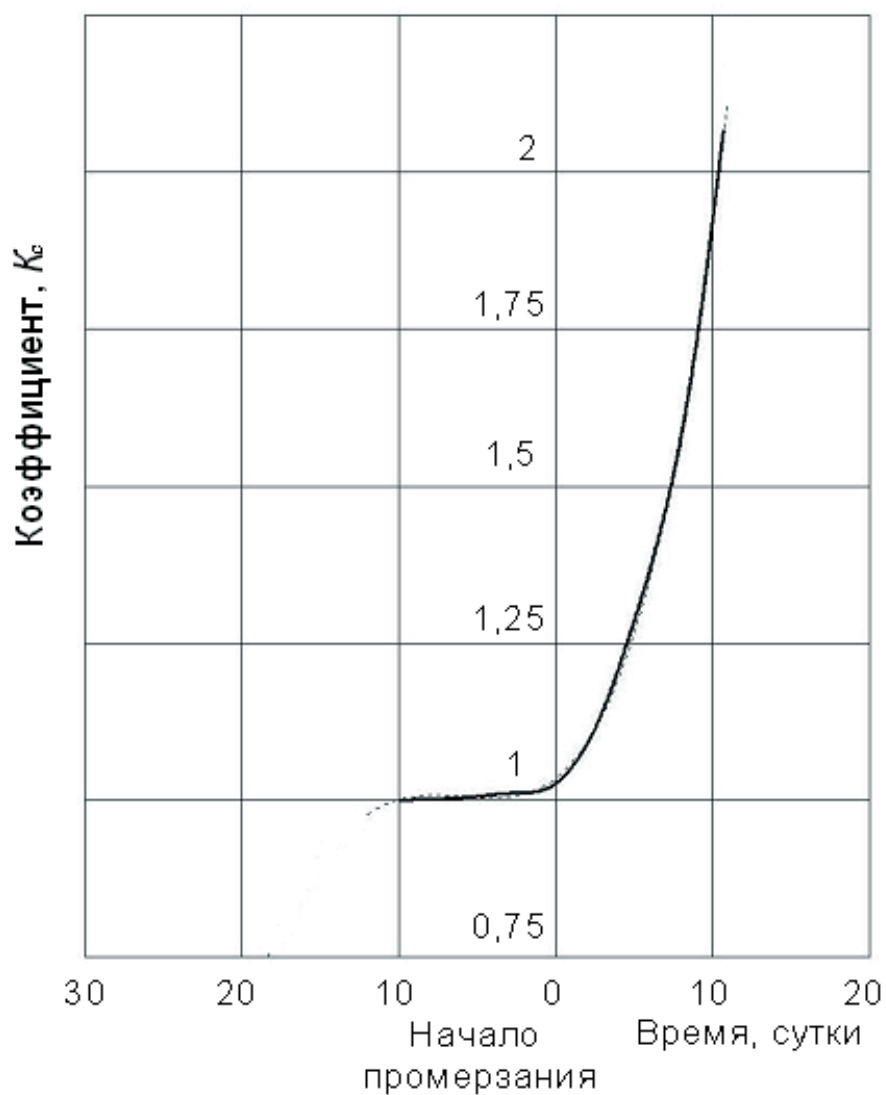


Рисунок 6.7 – Изменение коэффициента влияния сроков нанесения поропласта на предохраняемый от сезонного промерзания гравийно-галечниковый грунт
 — — экспериментальная зависимость, ----- — кривая аппроксимации

$$K_{\tau} = 3,46 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 2,653 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,004 \cdot T^2 + 0,02 \cdot T + 1,035. \quad (6.10)$$

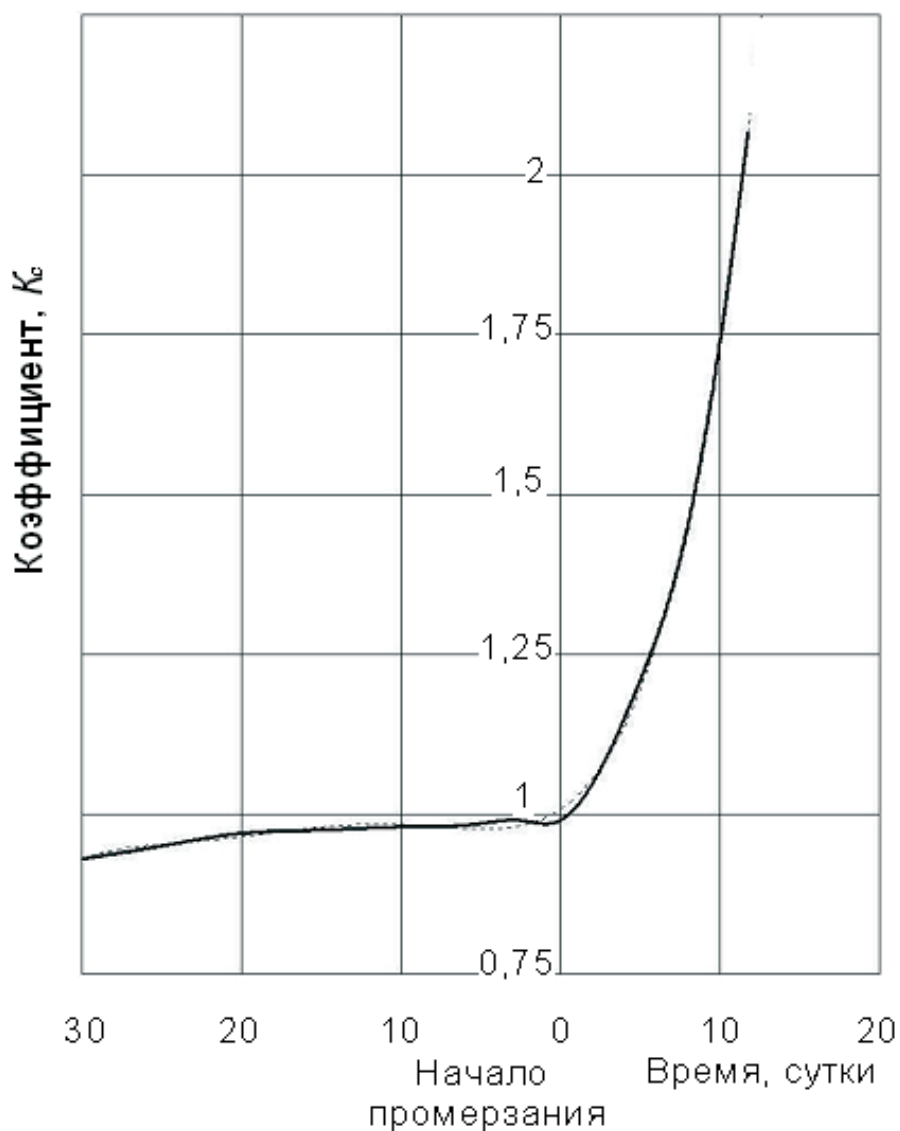


Рисунок 6.8 – Изменение коэффициента влияния сроков нанесения поропласта на предохраняемый от сезонного промерзания песчаный грунт
 ———— — экспериментальная зависимость, ———— — кривая аппроксимации

$$\begin{aligned}
 K_{\tau} = & -9,411 \cdot 10^{-10} \cdot T^6 + 1,694 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 + 5,558 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + \\
 & + 2,10 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,003 \cdot T^2 + 0,017 \cdot T + 1,008.
 \end{aligned}
 \tag{6.11}$$

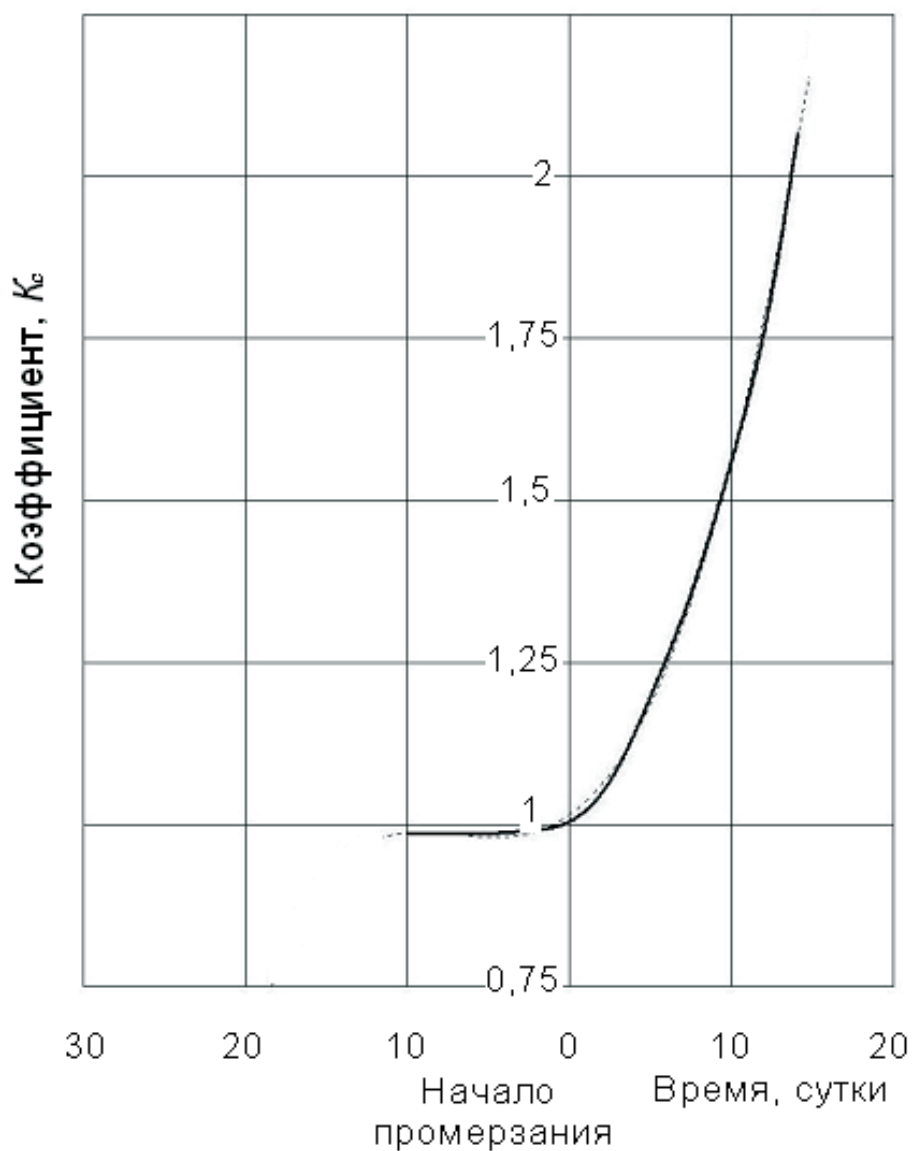


Рисунок 6.9 – Изменение коэффициента влияния сроков нанесения поропласта на предохраняемый от сезонного промерзания суглинок с гравием
 — экспериментальная зависимость, ----- кривая аппроксимации

$$K_{\tau} = -1,741 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,003 \cdot T^2 + 0,018 \cdot T + 1,015. \quad (6.12)$$

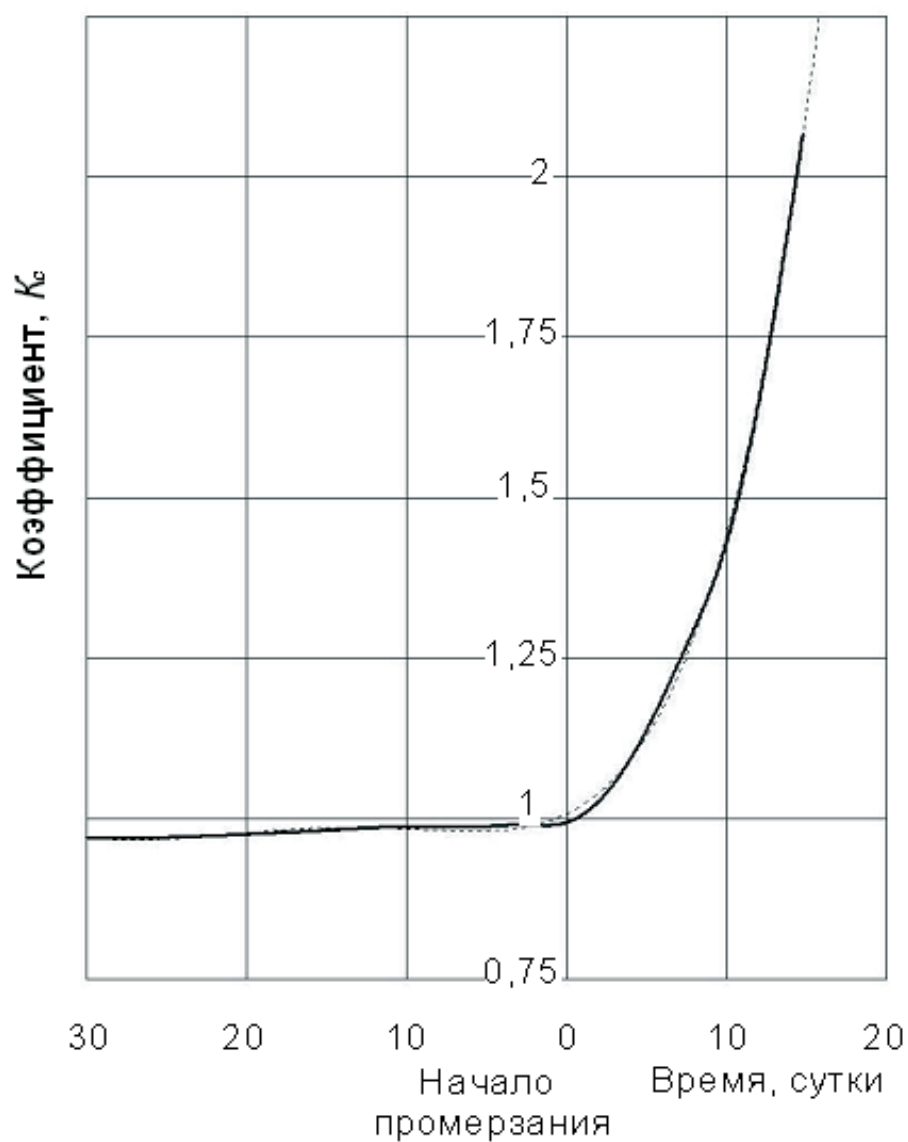


Рисунок 6.10 – Изменение коэффициента влияния сроков нанесения поропласта на предохраняемый от сезонного промерзания суглинок
 — — экспериментальная зависимость, ----- — кривая аппроксимации

$$K_{\tau} = 2,138 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 + 2,627 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 1,07 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,002 \cdot T^2 + 0,012 \cdot T + 1,008. \quad (6.13)$$

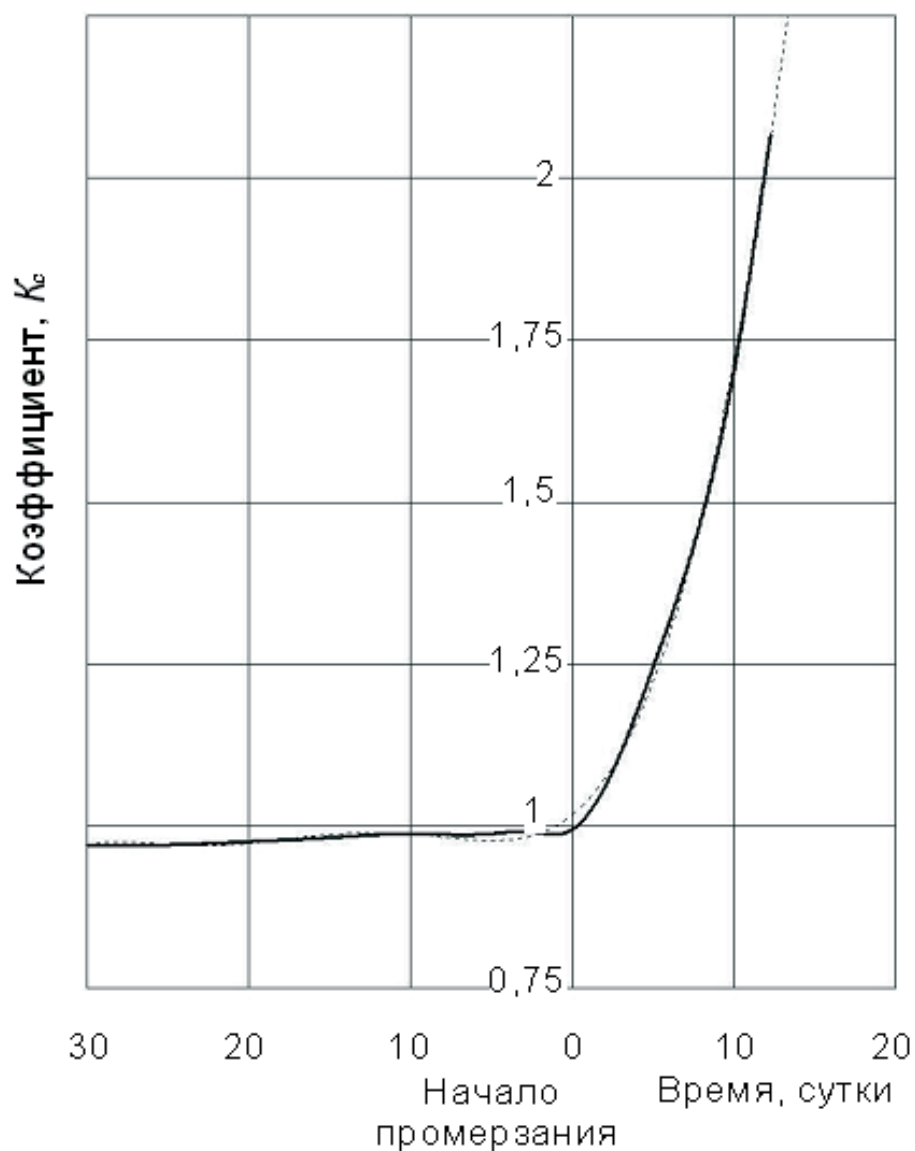


Рисунок 6.11 – Изменение коэффициента влияния сроков нанесения поропласта на предохраняемую от сезонного промерзания супесь
 ———— экспериментальная зависимость, - - - - - кривая аппроксимации.

$$K_{\tau} = -3,09 \cdot 10^{-9} \cdot T^6 - 1,515 \cdot 10^{-7} \cdot T^5 + 1,318 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 1,803 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,003 \cdot T^2 + 0,02 \cdot T + 1,017. \quad (6.14)$$

Таблица 6.4 – Распределения коэффициента влияния сроков нанесения карбамидного поропласта относительно начала промерзания грунта

Тип грунта	Изменение коэффициента влияния срока нанесения поропласта	Коэффициент корреляции
Глинистый грунт	$K_{\tau} = -1,204 \cdot 10^{-10} \cdot T^7 - 8,107 \cdot 10^{-9} \cdot T^6 - 9,91 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 + 4,36 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 1,45 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,002 \cdot T^2 + 0,008 \cdot T + 0,995$	0,97
Суглинок	$K_{\tau} = 2,138 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 + 2,627 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 1,07 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,002 \cdot T^2 + 0,012 \cdot T + 1,008$	0,98
Супесь	$K_{\tau} = -3,09 \cdot 10^{-9} \cdot T^6 - 1,515 \cdot 10^{-7} \cdot T^5 + 1,318 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 1,803 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,003 \cdot T^2 + 0,02 \cdot T + 1,017$	0,99
Песчаный грунт	$K_{\tau} = -9,411 \cdot 10^{-10} \cdot T^6 + 1,694 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 + 5,558 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 2,10 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,003 \cdot T^2 + 0,017 \cdot T + 1,008$	0,98
Суглинок с гравием	$K_{\tau} = -1,741 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,003 \cdot T^2 + 0,018 \cdot T + 1,015$	0,99
Гравийно-галечниковый грунт	$K_{\tau} = 3,46 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 2,653 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,004 \cdot T^2 + 0,02 \cdot T + 1,035$	0,98

Дополнительная ширина теплоизоляционного слоя, обусловлена боковым промерзанием, равна глубине промерзания в естественных условиях.

Исходя из полученных значений фактических градусо-часов отрицательных температур, воздействующих на грунт по номограмме (рис. 6.10) находится общее термическое сопротивление пены утеплителя, способное защитить грунт от промерзания [42, 108].

При разработке грунта в январе значение термического сопротивления пены утеплителя равно $1,9 \text{ м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$, в феврале $2,7 \text{ м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C/ккал}$, в марте $3,0 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C/ккал}$. Принимаем характеристики планируемого к разработке грунта – значение плотности грунта 1700 кг/м^3 , а значение влажности 20 %. При этом коэффициент влияния плотности $K_p = 0,85$, а коэффициент влияния влажности грунта $K_w = 0,71$.

Термическое сопротивление снега определяется по формуле:

$$R_c = h_c / \alpha_c, \quad (6.15)$$

где h_c – высота снежного покрова, м; α_c – коэффициент теплопроводности снега, ккал/час·град.

Коэффициент теплопроводности снега рассчитывается по уравнению Б.В. Проскурякова:

$$\alpha_c = (0,87 \rho_c + 0,018) \cdot 1,16, \quad (6.16)$$

где ρ_c – плотность снега, $\rho_c = 0,2 \text{ т/м}^3$.

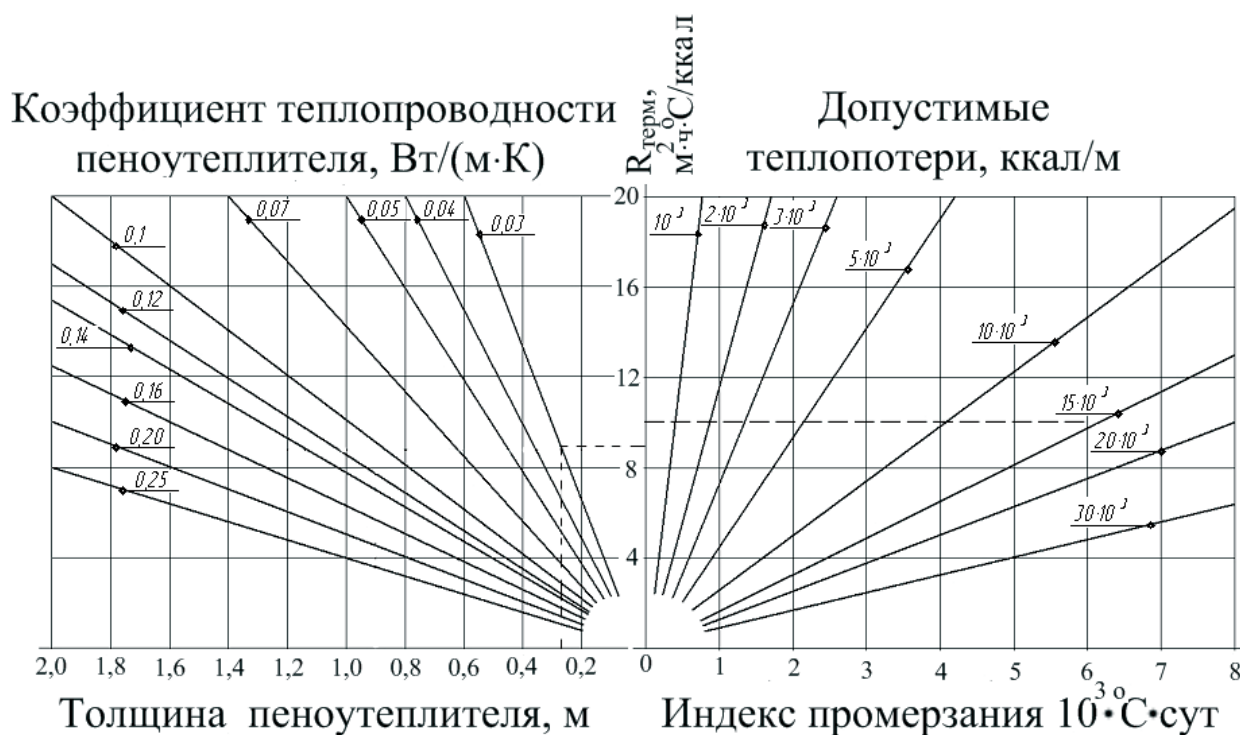


Рисунок 6.12 – Зависимость общего термического сопротивления карбамидного порошката от индекса промерзания

Коэффициент теплопроводности α_c снежного покрова является величиной непостоянной и зависит от плотности покрова ρ_c и от его температуры (рис. 6.13).

Экспериментальные исследования теплопроводности снежного покрова выявили существенное влияние температуры окружающего воздуха и плотности покрова (ρ).

По результатам исследования влияния температуры и плотности снежного покрова (ρ) на значение коэффициента теплопроводности выявлено пороговое значение температуры и получены уравнения аппроксимации:

Для диапазона температур от $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_c = 1,7445987 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 5,9389402 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 0,0273363. \quad (6.17)$$

Для диапазона температур от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_c = 1,9629831 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 4,1298844 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 0,0351067. \quad (6.18)$$

Для диапазона температур от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_c = 1,7112416 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 4,238921 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 0,0332151. \quad (6.19)$$

Для диапазона температур от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_c = 1,7676153 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 3,8117726 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 0,0337707. \quad (6.20)$$

Для диапазона температур от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_c = 2,1880885 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 2,8098883 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 0,0365393. \quad (6.21)$$

Полученные уравнения (6,17–6.21) имеют хорошую сходимость с графиками изменения коэффициента теплопроводности снега от плотности при различных отрицательных температурах [48].

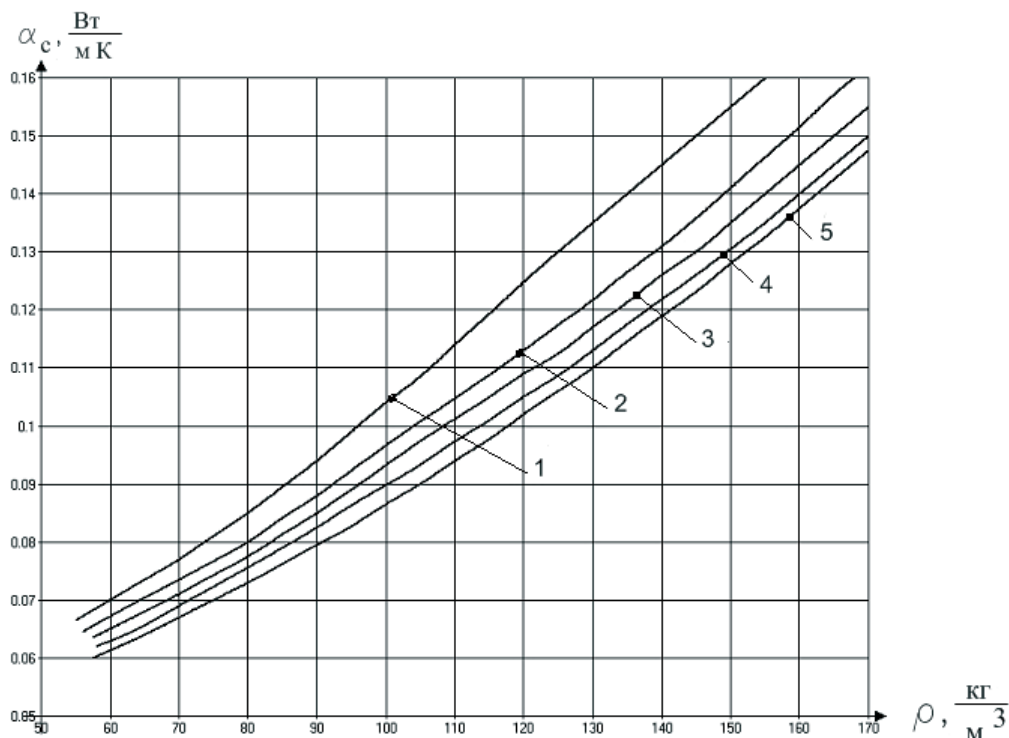


Рисунок 6.13 – Зависимость коэффициента теплопроводности снега от плотности при различных отрицательных температурах: 1 – от 0 до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – от -10 до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – от -20 до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – от -30 до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 от -40 до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Приведены результаты сравнительного анализа изменения температурных режимов промерзания в условиях применения композиционного поропласта в сочетании с защитным гидроизоляционным покрытием наиболее представительных видов грунта, находящихся в различных режимах промерзания северной зоны Красноярского края.

Сопротивление резания утепленных от промерзания грунтов зависят от влажности и не зависят от их гранулометрического состава.

Приведенные удельные затраты на разработку подготовленных (утепленных) однородных грунтов траншейными экскаваторами снижаются на 10–15 %, а удельные затраты на разработку подготовленных грунтов с гравийно-каменистыми включениями в первую очередь зависящие от гранулометрического состава и процентного содержания фракций.

В настоящее время до уровня практического применения разработаны методы расчета теплового режима промерзающих влажных грунтов. Они построены при условии наличия влаги в грунте, но без учета миграции влаги. Такой подход является оправданным, так как процесс промерзания грунта, зависит прежде всего от изменений всего температурного поля рассматриваемой области [42, 140, 153].

Их применение позволяет получать достаточно достоверные результаты. При этом в качестве исходных данных принимают эффективный коэффициент теплопроводности, который учитывает не только теплоперенос, но и наличие влаги в грунте.

Исследования, выполненные с использованием такого метода, позволили выявить закономерности теплового режима утепленного грунта.

Увеличение общего термического сопротивления приводит к изменению распределения температуры грунта по глубине, резко отличающемуся от ее распределения в условиях естественного промерзания.

Для расчета толщины слоя утеплителя по уравнению (6.1) необходимо:

Определить вид грунта, его влажность и объемную массу, получить сведения о температуре воздуха, толщине и плотности снежного покрова

в зимнее время, о количестве осадков осенью (в период между нанесением утеплителя и появлением устойчивого покрова).

По продолжительности времени предохранения грунта от промерзания и температуры воздуха рассчитать количество градусо-часов; сумму произведений среднемесячной температуры воздуха на продолжительность промерзания в течение месяца в часах.

Исходя из типа и мощности применяемого землеройного оборудования и из требований на содержание мерзлых кусков в разрабатываемом грунте, определить допустимую глубину промерзания утепленного грунта. При условии, что разработка сезонно-мерзлой глины осуществляется экскаваторами типа ЭМ-302 следовательно, допустимая глубина промерзания принимается в пределах 0,02–0,05 м.

Дополнительная ширина теплоизоляционного слоя, обусловлена боковым промерзанием, равна глубине промерзания в естественных условиях.

При большем общем термическом сопротивлении температура грунта оказывается ниже, чем при меньшем термическом сопротивлении.

Например, на глубине 200 мм температура грунта в естественных условиях была равна 0,7 °С, при общем термическом сопротивлении, равном $5,16 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С} / \text{Вт} - 0,1 \text{ } ^\circ\text{С}$; на глубине 0,6 м – соответственно 3,9 и 1,3 °С; на глубине 1,0–6,0 м и – 2,5 °С и т.д. Такое распределение температуры грунта достигается при различных значениях градусо-часов: с нарастанием общего термического сопротивления увеличивается количество градусо-часов. Более высокая температура грунта при малом общем термическом сопротивлении обусловлена тем, что поток тепла из нижних горизонтов в верхние движется медленно и не успевает компенсировать за сравнительно малый промежуток времени потери тепла, происходящие через низкое термическое сопротивление грунта. В результате этого температура в нижних горизонтах грунта значительно выше, чем в верхних, где происходит интенсивное охлаждение. С увеличением общего термического сопротивления поток тепла из нижних горизонтов в некоторой степени компенсирует тепло,

отводимое от грунта в воздух через теплоизоляцию, так как этот процесс протекает дольше. Такой процесс приводит к дополнительному изменению продолжительности предохранения грунта от промерзания.

После промерзания грунта на определенную глубину распределение температуры в талой зоне его имеет характер, аналогичный описанному выше. При промерзании глины на глубину 0,50 м (рис. 6.14) разница температур грунтов, утепленных снегом и теплоизоляцией с общими термическими сопротивлениями 0,86 и 5,16 $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$, достигала 2,7 $^\circ\text{С}$. Такое распределение температуры грунта в первом случае наблюдалось при 22,8 тыс. градусо-часов, а во втором – при 146,4 тыс. градусо-часов.

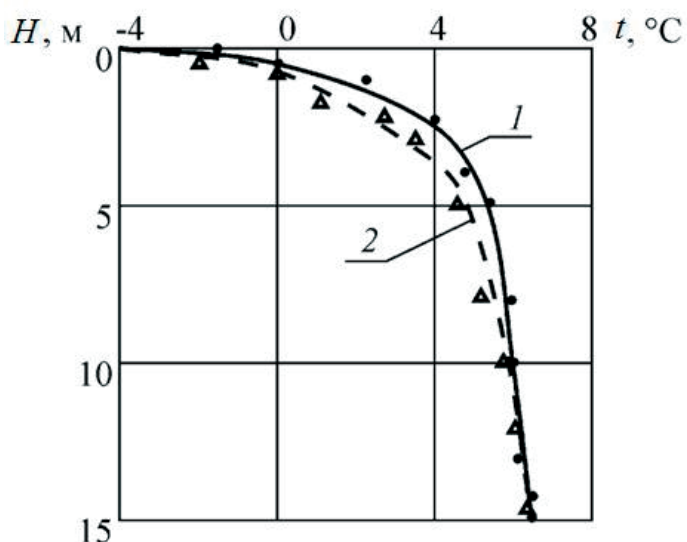


Рисунок 6.14 – Изменения температуры глины после первых 10 дней промерзания:
1 – утепленной карбамидным поропластом; 2 – в условиях естественного промерзания

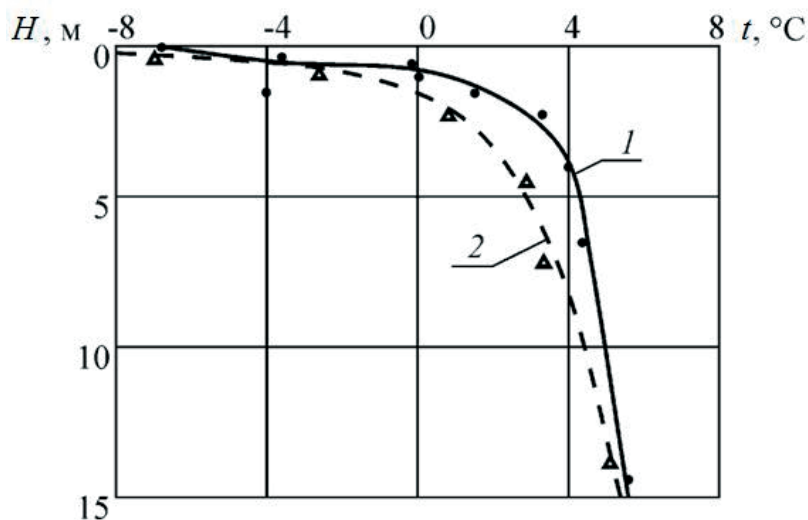


Рисунок 6.15 – Изменение температуры супеси при промерзании на глубину 0,5 м:
1 – утепленной карбамидным поропластом; 2 – в условиях естественного промерзания

В промерзшем слое грунта наблюдается обратный процесс. Если в естественных условиях температура поверхности грунта равна $-5,0^{\circ}\text{C}$, то при общем термическом сопротивлении, равном $5,16 \text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$, только $-2,5^{\circ}\text{C}$. Вследствие этого прочность смерзания грунта в первом случае значительно больше, чем во втором, что потребует больших затрат на рыхление или оттаивание. Здесь с увеличением общего термического сопротивления поток тепла, поступающий из нижних горизонтов, идет более на поддержание сравнительно высокой температуры промерзшего слоя грунта, чем на потери через теплоизоляцию. При промерзании грунта на глубину $0,50 \text{ м}$ температура грунта в естественных условиях изменяется на глубину до $6,00 \text{ м}$, а при общем термическом сопротивлении, равном $5,16 \text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$, изменения ее доходят до глубины $11,00 \text{ м}$ (рис. 6.12). Это свидетельствует о том, что с увеличением общего термического сопротивления содержащееся в толще грунта тепло полностью используется для предохранения его от промерзания.

Исследование процесса промерзания утепленного грунта позволило выявить, что с увеличением общего термического сопротивления, помимо прямого возрастания количества градусо-часов, требуемого для промерзания любого типа грунта, происходит также увеличение их количества, необходимого для приращения глубины промерзания на определенную величину. Об этом свидетельствует уменьшение угла наклона кривой промерзания грунта при увеличении общего термического сопротивления (рис. 6.16) и линеаризация зависимости при малых значениях термического сопротивления поропласта.

Например, при общем термическом сопротивлении, равном $0,86 (\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$, для приращения глубины промерзания грунта от $0,10$ до $0,20 \text{ м}$ потребовалось 6 тыс. градусо-часов, а при общем термическом сопротивлении, равном $1,72 (\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$, – 10 тыс. градусо-часов.

Серия кривых глубины промерзания утепленного грунта, построенная в зависимости от количества градусо-часов (рис. 6.12–6.17) при различных значениях общего термического сопротивления и оформленная в виде графи-

ков, позволяет облегчить задачу определения эффективного сопротивления, требуемого для предохранения грунта от промерзания. Для определения требуемого общего термического сопротивления по таким графикам исходными данными служат климатические условия района (температура воздуха), продолжительность предохранения от промерзания и допустимая глубина промерзания грунта.

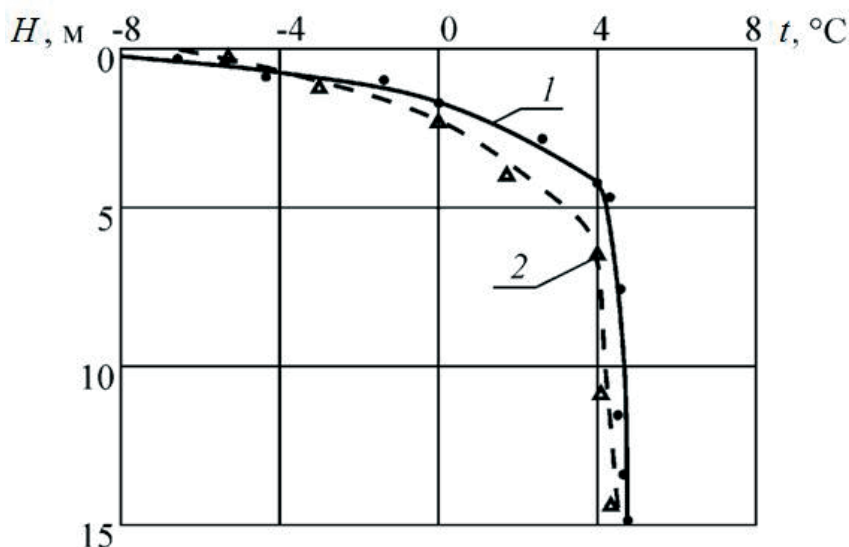


Рисунок 6.16 – Изменение температуры суглинка с 30 % гравелистых включений при промерзании на глубину 0,5 м: 1 – утепленного карбамидным порошлатом; 2 – в условиях естественного промерзания

Для наглядного представления распределения температуры грунта в начале его промерзания при разных значениях общего термического сопротивления (рис. 6.17) приняты такие значения этого сопротивления, которые сильно отличаются друг от друга: 0,86 и 16 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт. Термическое сопротивление, равное 0,86 $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ /Вт, приблизительно соответствует естественному состоянию грунта, когда он покрыт снежным покровом высотой 200 мм.

Исследованиям характера изменения температуры, как одного из управляемых параметров, определяющего значение коэффициента прочности грунта в работе уделено значительное внимание как в части экспериментальных исследований, так и в части теоретических разработок.

Графики изменения температуры грунта при его промерзании на 0,5 м (рис. 6.14–6.19) дают общее представление о характере ее изменения, но не

характеризуют ее через температурный режим промерзания грунта, в частности промерзание грунта на глубину 0,5 м. в целом характерно для всей территории Восточной Сибири и имеет место при втором, третьем, четвертом и пятом режимах промерзания грунта, являясь одним из промежуточных этапов промерзания грунта.

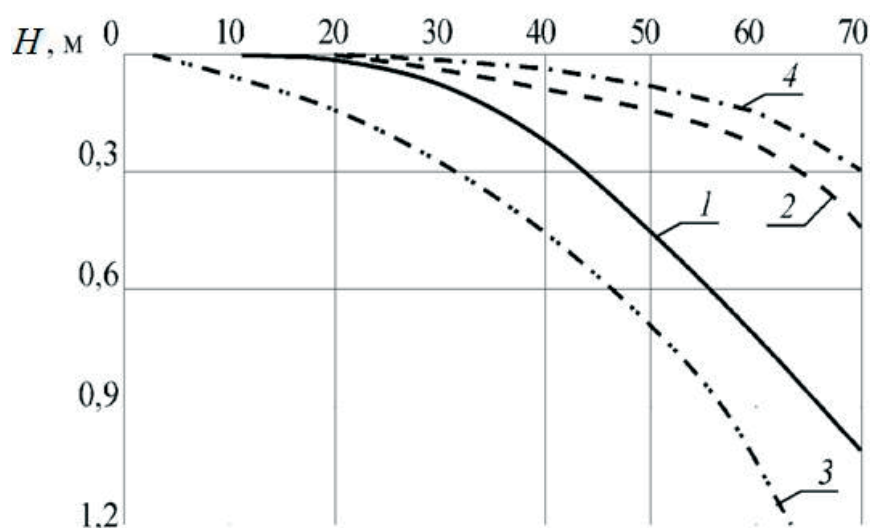


Рисунок 6.17 – Изменение глубины промерзания суглинка при различных коэффициентах термического сопротивления: 1 – $R_0 = 1,0 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{ккал.}$; 2 – $R_0 = 1,9 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/ккал.}$; 3 – $R_0 = 2,7 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{ккал.}$; 4 – $R_0 = 3,0 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{ккал.}$

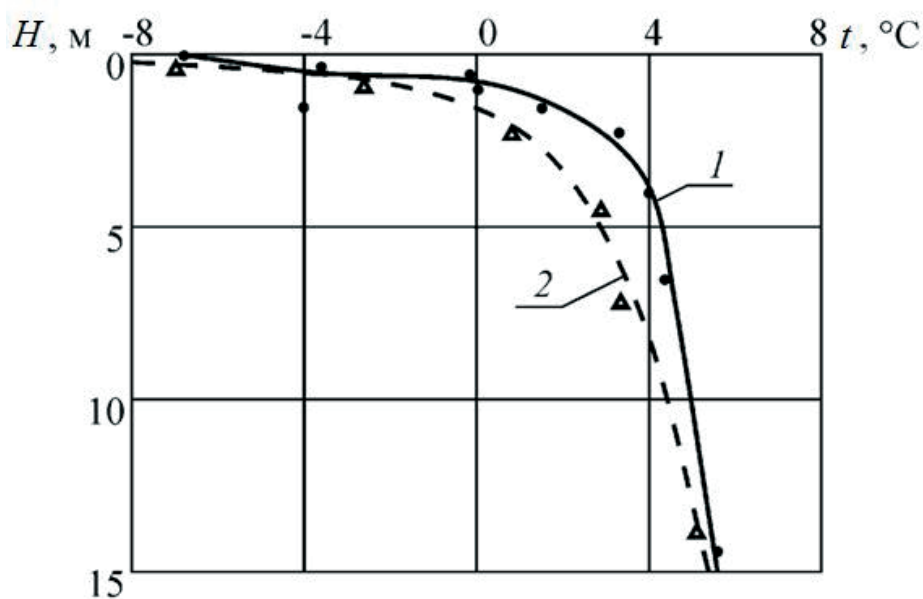


Рисунок 6.18 – Изменение температуры супеси при промерзании на глубину 0,5 м: 1 – утепленной карбамидным порошлом; 2 – в условиях естественного промерзания

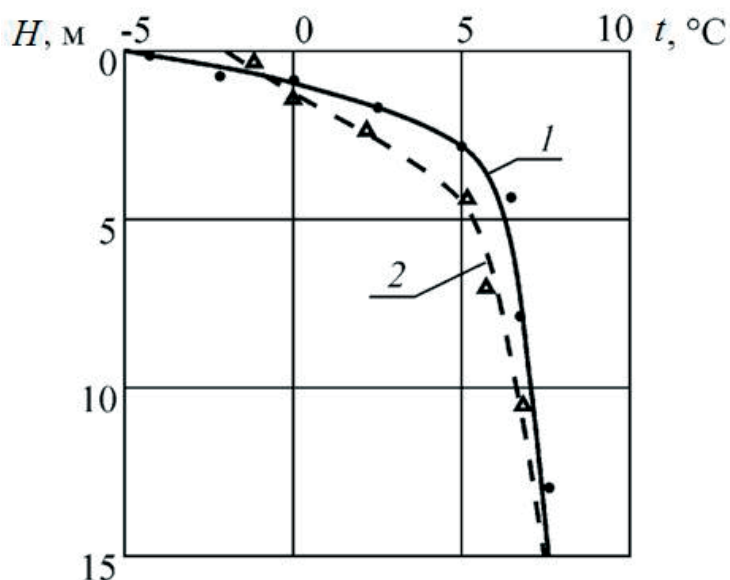


Рисунок 6.19 – Изменение температуры суглинка влажностью 20 % при промерзании на глубину 0,5 м: 1 – утепленного карбамидным поропластом; 2 – в условиях естественного промерзания

Более наглядную картину дают графики изменения температуры грунта при его окончательном промерзании на глубину до 1,2 м – режим промерзания Т2 или на глубину свыше 2,5 м – режим промерзания Т4. Каждый из указанных режимов характеризуется значительной статистической вероятностью применения землеройных машин, в частности для режим промерзания Т2 ее значение равно 0,243, для режим промерзания Т4 – 0,065 [39].

Рассмотрим графики изменения температуры грунта по глубине его залегания при промерзании грунта на глубину до 1,2 м – режим промерзания Т2.

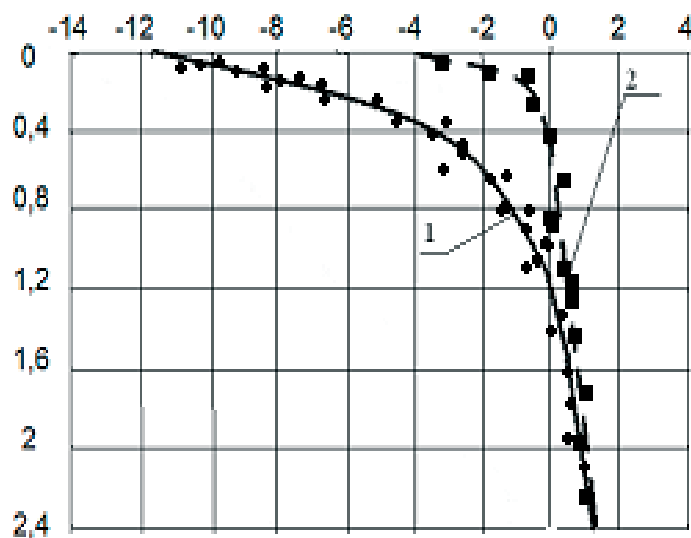


Рисунок 6.20 – Изменение температуры глины влажностью 12–23 % по глубине залегания при режиме промерзания Т2: 1 – в условиях естественного промерзания; 2 – в условиях утепления карбамидным поропластом

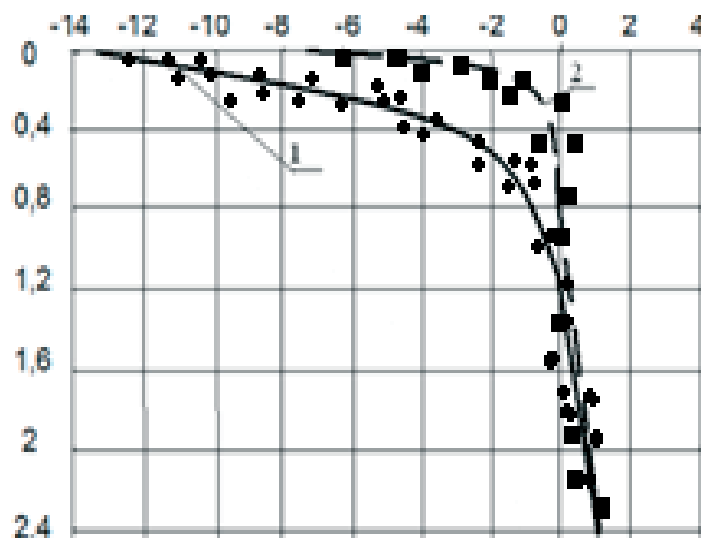


Рисунок 6.21 – Изменение температуры супеси влажностью 10–18 % по глубине залегания при режиме промерзания Т2: 1 – в условиях естественного промерзания; 2 – в условиях утепления карбамидным поропластом

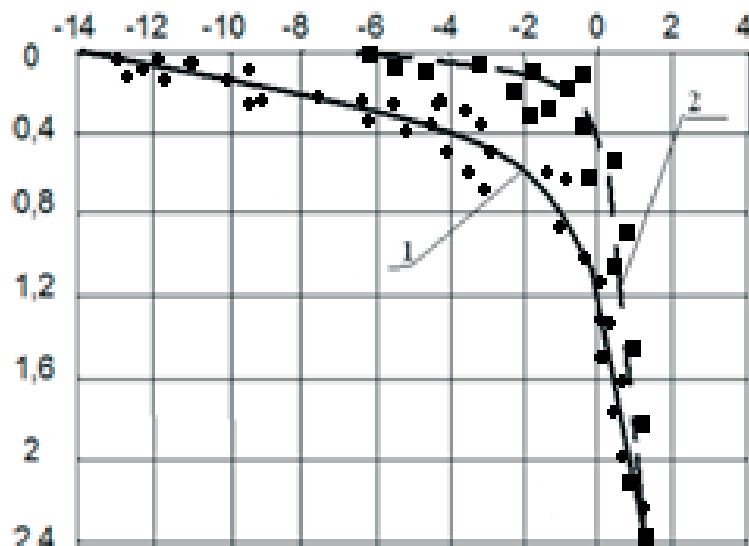


Рисунок 6.22 – Изменение температуры суглинка влажностью 13–20 % по глубине залегания при режиме промерзания Т2: 1 – в условиях естественного промерзания; 2 – в условиях утепления карбамидным поропластом

Исследования температуры грунтов одинакового гранулометрического состава однородного и с каменистыми включениями в условиях второго режима промерзания, проведенных на суглинках выявили более интенсивное понижение температуры грунтов, в состав которых входят гравийно-галечниковые включения в условиях естественного промерзания и в условиях утепления поропластом (рис. 6.23). Сравнение графических зависимостей температуры суглинка различных влажностей (рис. 6.20 $\omega = 13\text{--}20\%$) по

глубине залегания (рис. 6.23 $\omega = 16\%$) показывает, что интенсивность снижения температур выше в грунтах, содержащих включения.

На глубине 0,4 м однородного суглинка температура составляет $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, на этой же глубине суглинок с гравийно-галечниковыми включениями равна $5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, градиент температуры возрастает с увеличением глубины залегания грунта. На глубине 0,8 м температура однородного суглинка равна $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, суглинка с гравийно-галечниковыми включениями равна $-1,85\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом однородные утепленные суглинки имеют максимальную глубину промерзания 0,4 м, а суглинки с гравийно-галечниковыми включениями 0,6 м.

Сравнительная характеристика экспериментальных графиков изменения температуры грунта показывает, что промерзание грунтов практически одинаковой влажности существенно зависит от их гранулометрического состава и интенсивность промерзания супесчаных и песчаных грунтов при одинаковом режиме промерзания выше.

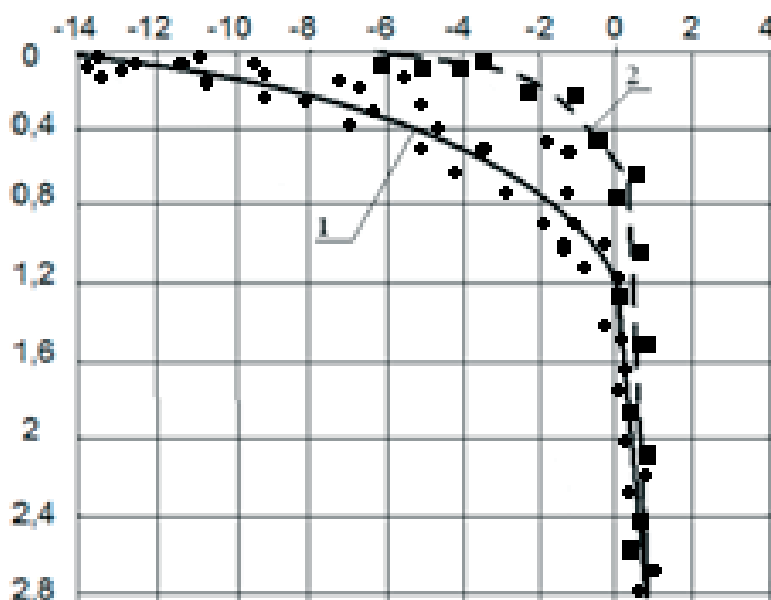


Рисунок 6.23 – Изменение температуры суглинка влажностью 16 % с 13–30 % содержанием гравийно-галечниковых включений по глубине залегания при режиме промерзания T2: 1 – в условиях естественного промерзания; 2 – в условиях утепления карбамидным поропластом

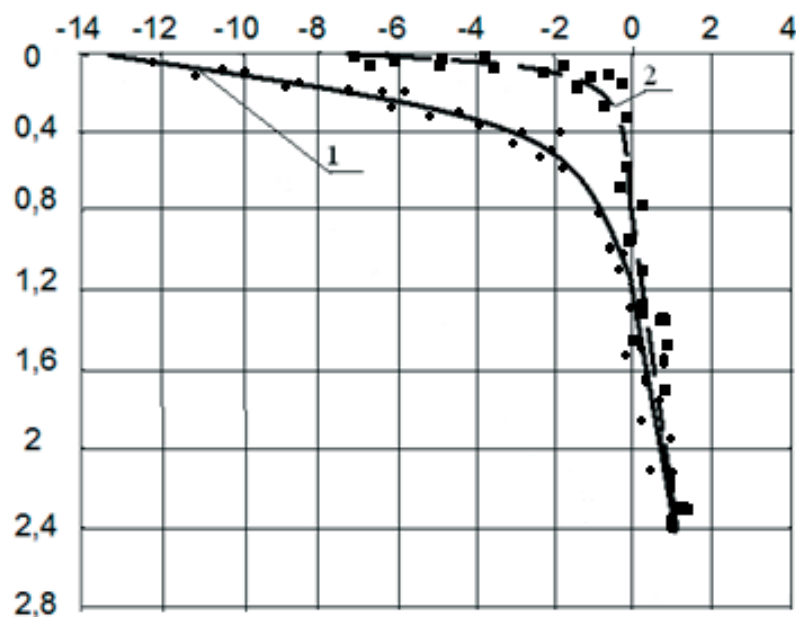


Рисунок 6.24 – Изменение температуры супеси влажностью 10–18 % по глубине залегания T2: 1 – в условиях естественного промерзания; 2 – в условиях утепления карбамидным поропластом

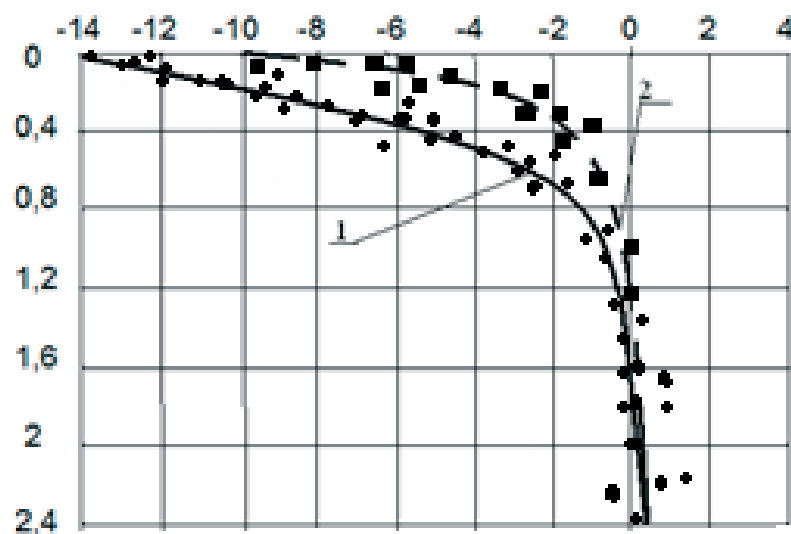


Рисунок 6.25 – Изменение температуры песка влажностью 9–12 % по глубине залегания T2: 1 – в условиях естественного промерзания; 2 – в условиях утепления карбамидным поропластом

Исследования изменений температуры грунта по глубине его залегания при промерзании грунта на глубину до 2,5 м – режим промерзания T4 выполнены с меньшей выборкой, так как трудоемкость таких исследований гораздо выше чем для второго режима промерзания, что в первую очередь объясняется удаленностью территорий, грунты которых промерзают на глубину более 2,5 м. Исследования проведены на участках, отведенных

ООО «Мехдорстрой» республики Саха под строительство автомобильных дорог. На указанном участке преимущественно залегают грунты глинистые и суглинки.



Рисунок 6.26 – Изменение температуры суглинка влажностью 13–20 % по глубине залегания при Т4: 1 – в условиях естественного промерзания; 2 – в условиях утепления карбамидным поропластом

Нанесение карбамидного поропласта за 25 суток до начала промерзания суглинка приводит к сохранению грунта в немерзлом состоянии на глубине 1,2 м, в условиях естественного промерзания грунт не замерзает на глубине 2,8 м. Разница температур на глубине 0,8 м. составляет 6,5 °С, грунт на указанной глубине имеет температуру –1,5 °С и поддается разработке землеройно-транспортной техникой как непрерывного действия – траншейными экскаваторами так и циклического действия – одноковшовыми экскаваторами.



Рисунок 6.27 – Изменение температуры глины влажностью 12–23 % по глубине залегания T4: 1 – в условиях естественного промерзания; 2 – в условиях утепления карбамидным поропластом

Изменение температуры глинистых грунтов происходит менее интенсивнее, чем суглинка. На глубине 0,8 м экспериментальное значение температуры суглинка составило $-8,1^{\circ}\text{C}$, глина на указанной глубине имеет температуру $-5,8^{\circ}\text{C}$, такая же разница температур глины и суглинка $-2,3^{\circ}\text{C}$ и на глубине 1,2 м и составляет $-3,9^{\circ}\text{C}$ и $6,2^{\circ}\text{C}$ соответственно. Температура, определяющая показатель прочности мерзлого грунта, в условиях утепления карбамидным поропластом на первом этапе промерзания грунта уменьшается менее интенсивно, к контактному с поропластом слою не опускается ниже $-6,8^{\circ}\text{C}$ (в условиях естественного промерзания достигает -14°C) и в немерзлом состоянии находится с глубины 1,0 м (в условиях естественного промерзания на глубине 2,5 м).

Общее термическое сопротивление утепленного грунта определяется по номограмме (рис. 6.12) [51, 106].

С использованием зависимости термического сопротивления грунта от индекса промерзания и допустимых тепловых потерь (рис. 6.1) [106] по известному индексу промерзания грунта проводим вертикальную линию до пересечения с графиком найденного значения допустимых тепловых потерь, из точки пересечения проводится горизонтальная линия до пересечения с линией ординат, на которой определяется общее термическое сопротивление сезонно-мерзлого грунта, карбамидного поропласта и снежного покрова

Когда известны общее термическое сопротивление карбамидного поропласта и термическое сопротивление снега, то можно определить требуемое термическое сопротивление карбамидного поропласта.

$$R_{\text{ку}} = R_{\text{общ}} - R_{\text{с}}.$$

Если же последнее найдено, то по уравнению (6.1) можно рассчитать толщину слоя теплоизоляции.

Выявленное влияние температуры грунта в момент нанесения утеплителя (т.е. начальных условий) на продолжительность предохранения грунта от промерзания позволяет существенно уточнить инженерную методику расчета толщины карбамидного поропласта, эффективно предохраняющего грунт от сезонного промерзания.

При различных начальных условиях для промерзания грунта за одно и то же время на определенную глубину потребуется разное общее термическое сопротивление.

Если высокая температура грунта в момент нанесения утеплителя способствует более продолжительному предохранению от промерзания, то при одинаковой продолжительности предохранения от промерзания потребуется меньшее общее термическое сопротивление. Отсюда требуемое сопротивление в случае нанесения утеплителя до начала промерзания грунта будет

меньше, чем когда наносят утеплитель в начале промерзания грунта, а коэффициент K_{τ} – меньше единицы. Если карбамидный поропласт наносится после начала промерзания, то K_{τ} будет больше единицы. Его величина будет тем больше, чем больше период времени после начала промерзания грунта.

Плотность и влажность грунта влияют не только на продолжительность периода предохранения грунта от промерзания, но на общее термическое сопротивление карбамидного поропласта и снежного покрова.

Коэффициент влияния плотности грунта:

$$K_{\gamma} = \frac{R_{\gamma}}{R_{1500}}, \quad (6.22)$$

где K_{γ} – коэффициент влияния плотности грунта; R_{γ} – общее термическое сопротивление, требующиеся для предохранения грунта некоторой плотности от промерзания, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$; R_{1500} – термическое сопротивление грунта с плотностью 1500 кг/м^3 , $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$.

На термическое сопротивление существенно влияет влажность грунта, степень влияние этого параметра оценивается уравнением:

– для глины и суглинка:

$$K_W = \frac{R_W}{R_{20}}; \quad (6.23)$$

– песка и супесчаных грунтов:

$$K_W = \frac{R_W}{R_{12}}, \quad (6.24)$$

где K_W – коэффициент, учитывающий влияние влажности грунта; R_W – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения от промерзания грунта с различной влажностью, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$; R_{20} – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения от промерзания для глины и суглинка с влажностью не более 20 %, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$; R_{12} – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения от промерзания песчаного грунта и супесчаного с влажностью не более 12 %, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$.

Если с повышением влажности грунта продолжительность предохранения грунта от промерзания увеличивается, то при тех же условиях будет требоваться меньшее общее термическое сопротивление. Соответственно, с повышением влажности грунта будет уменьшаться коэффициент влияния влажности. Аналогично этому с увеличением плотности грунта будет уменьшаться также коэффициент влияния плотности.

Приведенные удельные затраты на разработку подготовленных (утепленных) однородных грунтов траншейными экскаваторами снижаются на 10–15 %, а удельные затраты на разработку подготовленных грунтов с гравийно-каменистыми включениями, в первую очередь зависящие от гранулометрического состава и процентного содержания фракций в разрабатываемых грунтах, в отдельных случаях могут снижаться и на 20 %.

Графики функции температуры утепленного грунта по глубине его залегания для зимних месяцев года (рис. 6.26) позволяют оценить коэффициент их прочности, повысить эффективность разработки сезонно-мерзлых грунтов.

Разница температур грунта при промерзании на глубину 1,2 м в естественных условиях залегания и в условиях утепления увеличивается по глубине залегания грунта и на глубине 0,83 м достигает наибольшего значения минус 2,1 °С, а на глубине 1,2 м температура утепленного грунта стабилизируется на величине + 1,64 °С.

Математический анализ экспериментальных данных проведен с применением программы Advanced Grapher, с помощью которой по табличным экспериментальным данным, произведена математическая обработка натурального эксперимента.

Для каждой функции распределения температур утепленного суглинка, характерных для зимних месяцев северной зоны Красноярского края надежно описаны полином второй степени табл. 6.5.



Рисунок 6.28 – Распределение температуры суглинка по глубине залегания для зимних месяцев года XI – ноябрь, XII – декабрь, I – январь, II – февраль
 — в условиях естественного промерзания грунта
 - - - - в условиях утепления грунта карбамидным пенопластом

Таблица 6.5 – Распределения температур по глубине утепленного суглинка

Расчетный месяц	Распределение отрицательных температур (t) по глубине залегания (H) утепленного суглинка	Коэффициент корреляции
Ноябрь	$t = -0,1013729H^2 - 0,5575497H - 0,4741855$	0,98
Декабрь	$t = -0,0360997H^2 - 0,5072688H - 1,6369544$	0,94
Январь	$t = -0,0239553H^2 - 0,4517715H - 2,1028933$	0,98
Февраль	$t = -0,0250972H^2 - 0,4950154H - 2,4443109$	0,96

Графики функции температуры утепленного грунта по глубине его залегания для зимних месяцев года позволяют оценить коэффициент их прочности, повысить эффективность разработки сезонно-мерзлых грунтов.

Натурные исследования процесса сезонного промерзания грунтов выявили одинаковый характер зависимости глубины промерзания и температуры всего разнообразия грунтов под слоем карбамидного поропласта, исследуемого региона, не зависимо от их гранулометрического состава с учетом

краевого эффекта рис. 6.27, что позволяет определить дополнительную ширину утепляемого участка.

Отличительной характеристикой изменения температуры утепленных грунтов под слоем карбамидного пенопласта является глубина залегания разрабатываемого слоя (рис. 6.27, 6.28).

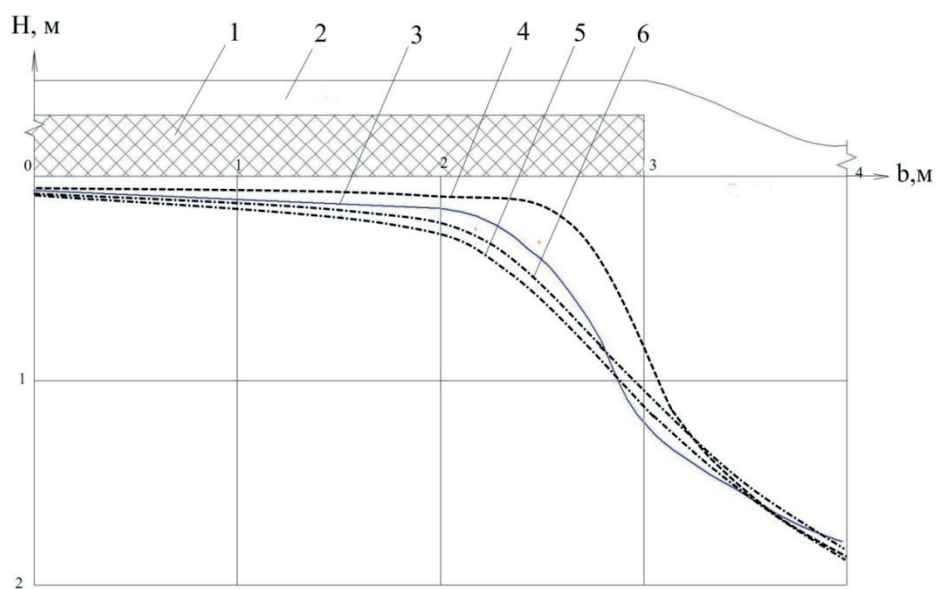


Рисунок 6.29 – Изменение глубины сезонного промерзания грунта под теплоизоляционным слоем карбамидного пенопласта (1) и снега (2) с учетом бокового эффекта: 3 – суглинка; 4 – глины; 5 – песок; 6 – супеси

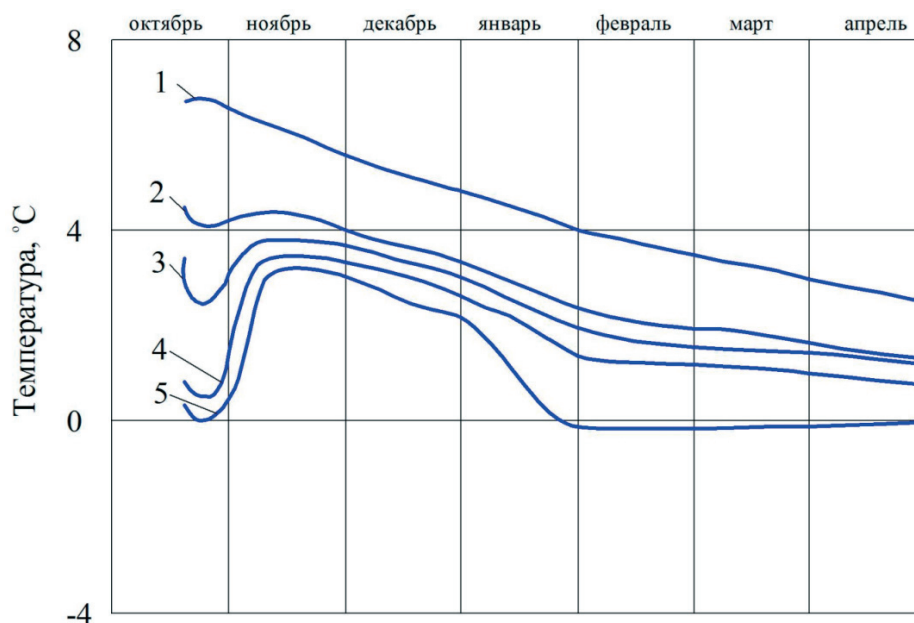


Рисунок 6.30 – Изменение температуры грунта от времени промерзания в середине утепленной полосы на различных глубинах: 1 – 2 м; 2 – 1 м; 3 – 0,5 м; 4 – 0,2 м; 5 – под теплоизоляцией

Таким образом нанесение карбамидного поропласта расчетной толщиной в осенний подготовительный период месяце на участок, расположенный в Восточно-Сибирском регионе, планируемый к разработке землеройными машинами в зимний период года надежно предохраняет от сезонного промерзания на глубину не более допустимой технологической глубины промерзания.

Пороговым значением температуры окружающего воздуха, изменяющим коэффициент теплопроводности снежного покрова является температура -10°C , а зависимость коэффициента теплопроводности снежного покрова от плотности надежно описываются уравнениями 2 порядка.

Экспоненциальная зависимость величины проникновения фронта отрицательных температур под утепляемый слой не существенно зависит от гранулометрического состава грунта, основным параметром является влажность грунта.

Плотность и влажность грунта влияют не только на продолжительность предохранения от промерзания, но и на общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта.

6.3. Исследование влияния поропластов на окружающую среду

Определение содержания свободного формальдегида в грунте, утепленном поропластом, проводили по 3 образцам, отобраным на различных глубинах: 0–20 мм, 90–110 мм и 190–210 мм. Приготовление водной вытяжки почвы осуществляли согласно методики [145], для этого 60г утепленного грунта, отвешенного на электронных весах, помещали в плоскодонную колбу емкостью 500 мл и заливали 250 мл дистиллированной воды (отношение воздушно-сухой почвы и воды 1:5). Колбу закрывали пробкой и содержимое ее

взбалтывали в течение 3 минут. Водную вытяжку фильтровали через складчатый фильтр «синяя лента».

Определение свободного формальдегида в атмосферном воздухе, утеплителе и грунте было проведено в течение 28 дней, начиная с момента получения быстротвердеющего поропласта и нанесения его на утепляемый грунт. В первые восемь дней определение содержания формальдегида велось ежедневно (с перерывом в один день), затем – на 10, 12, 17, 24, 27-е сутки с момента получения утеплителя.

Одновременно с определением формальдегида находили влажность поропласта и грунта (на глубинах 0–20 мм, 90–110 мм, 190–210 мм) и объемную массу поропласта.

Для определения объемной массы поропласта из теплоизоляционного слоя на экспериментальном участке вырезали образцы в виде куба с размером грани 50 мм, высушивали их до воздушно-сухого состояния и взвешивали на лабораторных весах. Объемную массу находили как отношение массы образца к его объему.

Для нахождения влажности поропласта его образцы тех же размеров взвешивали на электронных весах, высушивали в сушильном шкафу при температуре не более +40 °C в течение 2 ч. и повторно взвешивали (до достижения постоянного веса). Влажность (весовую, %) вычисляли делением градиента веса образца на его вес в воздушно-сухом состоянии.

Объемную массу грунта определяли следующим образом: на грунте вырезали параллелепипед размером 70×80×30мм, взвешивали его на лабораторных весах и делением веса грунта на занимаемый объем находили объемную массу грунта.

Влажность грунта (весовую, %) определяли как отношение разности весов образца грунта до и после высушивания к весу образца после высушивания. Высушивание грунта производилось в сушильном шкафу при температуре +105 °C до достижения постоянного веса образца.

Определение содержания формальдегида в атмосферном воздухе проводили колориметрическим методом с применением хромотроповой кислоты в соответствии с известной методикой [120]. Сущность метода состоит в том, что формальдегид реагирует в сильнокислой среде с хромотроповой кислотой, образуя соединение, окрашенное в фиолетовый цвет, удобное для колориметрического определения.

Чувствительность метода $0,3 \text{ мг/м}^3$. Исследуемый атмосферный воздух с помощью аспиратора (воздуходувки) протягивался через 2 поглотительных прибора, содержащих по 5 мл дистиллированной воды. При наличии ветра отверстие поглотительного прибора направлялось в сторону, противоположную направлению ветра.

Скорость отбора воздуха аспиратором регулировалась поплавковым ротаметром и составляла $0,33 \text{ л/мин}$, продолжительность одного отбора – 15 мин.

Отбор проб воздуха производили 1 раз в сутки над серединой каждого из трех экспериментальных участков. Высота, с которой осуществлялся отбор проб воздуха, составляла 1,5 м от поверхности утеплителя. Одновременно производился контрольный отбор атмосферного воздуха в месте, значительно удаленном от экспериментальных участков.

Во время отбора проб атмосферного воздуха фиксировали атмосферное давление и температуру окружающего воздуха.

Содержание формальдегида определяли визуальным сравнением окраски исследуемого раствора со стандартной шкалой.

Определение содержания свободного формальдегида в поропласте проводили йодометрическим методом. Для сравнения использовали колориметрический метод с применением хромотроповой кислоты. Оба метода показали хорошую сходимость результатов.

Йодометрический метод основан на количественном окислении формальдегида в муравьиную кислоту йодом в щелочной среде с последующим титрованием избытка йода серноватистокислым натрием

Далее определение свободного формальдегида в водной вытяжке грунта проводили йодометрическим методом.

При проведении анализов по содержанию формальдегида йодометрическим методом применяли следующие реактивы и посуду: вода дистиллированная; 0,1 н раствор йода; 0,1 н раствор тиосульфата натрия; 0,1 н раствор серной кислоты; 0,1 н раствор едкого натрия; 0,5 % раствор крахмала; стакан химический емкостью 300 мл; палочка стеклянная; воронка стеклянная для фильтрования; мерные колбы емкостью 1 л; бюретки емкостью 25 и 50 мл; пипетки емкостью 100 мл; колбы конические для титрования емкостью 500 мл; колбы плоскодонные емкостью 1,5 л.

Водную вытяжку формальдегида из БТП готовили следующим образом: предварительно отмеряли в мерной колбе 1 л дистиллированной воды. Образец БТП размером 50×50×50 мм сразу же после взятия с экспериментального участка помещали в стакан емкостью 300 мл, тщательно растирали при помощи стеклянной палочки в небольшом объеме дистиллированной воды (части от объема 1 л) до однородной кашицы. Переносили размельченную БТП в плоскодонную колбу емкостью 1,5 л, добавляли оставшуюся в мерной колбе дистиллированную воду, плотно закрывали колбу пробкой и для полной экстракции формальдегида водой интенсивно встряхивали колбу с содержимым в течение 10 мин. После этого водную вытяжку из БТП отфильтровывали через бумажный складчатый фильтр «черная лента». Аликвотную часть фильтрата (100 мл) с помощью пипетки переносили в коническую колбу для титрования, добавляли 40 мл 1 % раствора едкого натрия, 25 мл 0,1 % раствора йода, тщательно перемешивали и оставляли стоять в темном месте на 20 мин. Затем добавляли 55 мл 1 н раствора серной кислоты и через 20 мин оттитровывали избыток йода в присутствии крахмала 0,1 н раствором тиосульфата натрия до обесцвечивания титруемого раствора. Параллельно проводили контрольный (холостой) опыт. Все определения осуществлялись при комнатной температуре.

Содержание свободного формальдегида анализировали по четырем образцам.

Содержание свободного формальдегида в БТП (г/дм³) определяли по формуле

$$G = \frac{(a - б) \cdot 0,0015 \cdot H}{V_{\text{т}} \cdot V_{\text{п}}} \cdot 1,54, \quad (6.25)$$

где a , $б$ – объем раствора тиосульфата натрия, затраченные на титрование контрольной и анализируемой проб, мл; 0,0015 – количество формальдегида, соответствующее 1 мл раствора тиосульфата натрия, г; $V_{\text{т}}$ – объем фильтрата, взятый для титрования, мл; H – навеска грунта, г; 1,54 – объемный вес грунта, г/см³.

Исследования по определению содержания свободного формальдегида в поропласте проводились на двух участках: на первом участке с 22 сентября по 21 октября 1975 г., на втором – с 1 по 28 октября 1976 г. Объемная масса карбамидного поропласта на первом участке была равна в среднем 27 кг/м³, на втором – 8,5–9 кг/м³. Влажность поропласта на первом участке колебалась в пределах 160–550 % весовых, на втором – 100–350 % весовых. Содержание свободного формальдегида в поропласте на участках сразу после изготовления поропласта резко различались. На первом участке оно было равно 2,9 г/дм³, на втором – 0,71 г/дм³. На обоих участках со временем происходило значительное уменьшение содержания формальдегида в поропласте. Наиболее интенсивное уменьшение содержания формальдегида в поропласте происходило в первые дни после нанесения его на грунт. Так, например, через сутки содержание свободного формальдегида на первом участке уменьшилось до 1,72 г/дм³, т.е. на 41 %, на втором – до 0,44 г/дм³, т.е. на 38 %. Через двое суток оно уменьшилось соответственно до 1,5 и 0,38 г/дм³ (на 48 и 46 %). На пятые сутки – до 1,27 и 0,33 г/дм³ (56 и 53 %) и т.д.

В конце наблюдений на первом участке (через 29 суток) содержание формальдегида уменьшилось до $0,45 \text{ г/дм}^3$, а на втором (через 27 суток) – до $0,06 \text{ г/дм}^3$.

Как видно из приведенных данных, уменьшение содержания свободного формальдегида в поропласте на первом участке (начальное содержание формальдегида – $2,9 \text{ г/дм}^3$) происходило более интенсивно, чем на втором (начальное содержание формальдегида в поропласте – $0,71 \text{ г/дм}^3$). Очевидно, чем больше концентрация свободного формальдегида, тем более интенсивно происходит его выделение из поропласта.

Различие между первым и вторым участками состояло в том, что поропласт, как было сказано выше, имел неодинаковую объемную массу. При изготовлении поропластов различной объемной массы в них меняется содержание свободного формальдегида. Так, при объемной массе, равной 27 кг/м^3 содержание формальдегида в поропласте (на 10 сутки после приготовления) составляло $0,7\text{--}1,13 \text{ г/дм}^3$, при объемной массе $8,5 \text{ кг}$ – $0,12\text{--}0,17 \text{ г/дм}^3$, и при объемной массе равной $4,4\text{--}4,6 \text{ кг/м}^3$, содержание свободного формальдегида составляло $0,072\text{--}0,096 \text{ г/дм}^3$.

Таким образом, нами выявлена качественная зависимость содержания свободного формальдегида в поропластах от его объемной массы – чем меньше объемная масса, тем ниже концентрация в них свободного формальдегида.

Установлено, что концентрация свободного формальдегида в поропласте с течением времени уменьшается вследствие миграции его в атмосферу и утепленный грунт.

Исследования содержания формальдегида в атмосферном воздухе проводились на трех экспериментальных участках, покрытых поропластом, размерами $10 \times 10 \text{ м}$, $3 \times 3 \text{ м}$ и $1 \times 1 \text{ м}$. Отбор проб атмосферного воздуха осуществлялся с высоты $1,5 \text{ м}$ над поверхностью поропласта, примерно с середины участков, т.е. в рабочей зоне.

Температура окружающего воздуха во время отбора проб колебалась в пределах от +16 до $-7,5^{\circ}\text{C}$. Атмосферное давление равнялось 700–750 мм рт.ст. Среднесуточная влажность воздуха (абсолютная) составляла величину 2–7 мб.

Динамика выделения формальдегида, относящегося к летучим химическим веществам, в атмосферный воздух из поропласта на участке размером 10×10 м определялась точечными пробами почвы пробоотборником.

После отбора грунт рассыпают на бумаге или кальке и разминают пес-тиком крупные комки. Затем выбирают включения – корни растений, насекомые, камни, стекло, уголь, кости животных а также новообразования – друзы гипса, известковые журавчики и др., после чего почва помещалась во флаконы или стеклянные банки с притертыми пробками, заполняя их полностью до пробки.

Концентрация формальдегида в атмосферном воздухе над участком сразу после нанесения поропласта на грунт составляла $0,9 \text{ мг/м}^3$. Со временем происходило резкое уменьшение содержания формальдегида. Наиболее значительное уменьшение концентрации формальдегида в атмосферном воздухе происходило в первые дни после нанесения поропласта на грунт. Так, через сутки концентрация формальдегида в воздухе снизилась до $0,5 \text{ мг/м}^3$, т.е. на 44 %, на вторые сутки – до $0,35 \text{ мг/м}^3$ (61 %), на пятые – до $0,16 \text{ мг/м}^3$ (82 %). К концу срока наблюдений (через 24 дня) содержание формальдегида в атмосферном воздухе уменьшилось практически до 0.

Исходя из проведенных исследований содержания формальдегида в атмосферном воздухе рабочей зоны при утеплении грунта поропластом (размер участка 10×10 м), можно сказать, что уже на вторые сутки после изготовления поропласта концентрация формальдегида в воздухе становится ниже предельно-допустимой концентрации для рабочей зоны, равной $0,5 \text{ мг/м}^3$ [125, 151].

Содержание свободного формальдегида на поверхности утепляемого грунта в течение всего срока наблюдений находилось примерно на одном и том же уровне и колебалось в пределах $0,12\text{--}0,60 \text{ мг/см}^3$ грунта.

Необходимо заметить, что с уменьшением объемной массы БТП и снижением концентрации свободного формальдегида в ней происходит уменьшение количества формальдегида, попадающего из БТП в грунт.

Так на участке, где объемная масса БТП составляла 27 мг/м^3 , содержание свободного формальдегида в поверхностном слое утепленного грунта равнялось $2\text{--}9 \text{ мг/см}^3$, на участке с объемной массой БТП, равной $8,5\text{--}9 \text{ кг/м}^3$, – $0,12\text{--}0,60 \text{ мг/см}^3$.

6.4. Результаты исследования влияния карбамидных поропластов на экологическое состояние утепляемых грунтов

Попытки определить зависимость концентрации формальдегида в воздухе от площади покрытых поропластами участков успеха не принесли. Экспериментальные участки равных размеров были расположены близко друг к другу (6.15), очевидно, произошло наложение результатов, в связи с чем фактор масштабности выяснить не представилось возможным.

Свободный формальдегид, содержащийся в поропласте, при его нанесении в небольшом количестве попадает на утепленный грунт. Проведенные исследования по определению концентрации свободного формальдегида в утепляемом грунте дают основание говорить, что при утеплении БТП (объемная масса $8,5\text{--}9,0 \text{ кг/м}^3$) суглинистых грунтов формальдегид содержится лишь в верхних слоях грунта и вглубь утепляемой поверхности не проникают. На глубинах 10 и 20 см формальдегид в утепляемом грунте обнаружен не был.

Исходя из полученных данных, нами были исследованы возможные пути миграции свободного формальдегида, выделяющегося из поропласта при утеплении грунта, в водоемы. Проникновение формальдегида в водоемы может осуществляться за счет вымывания его жидкими атмосферными осадками из поропласта и утепленного грунта.

Формальдегид из поропласта может вымываться осадками, если их количество превысит его водоудерживающую способность. Для выяснения этого явления был проведен расчет, исходя из наихудших условий. Последнее в данном случае означало минимальную толщину утеплителя и максимальное количество осадков, выпадающих за 1 раз в октябре, когда в основном утепляется грунт. Минимальная толщина утеплителя, которая требуется для утепления грунта, разрабатываемого в декабре, составляет 80 мм. Максимальное количество осадков, выпадающих в г. Красноярске в октябре за 1 раз равняется 15 мм, что составляет 15 л воды на 1 м² площади. При толщине слоя поропласта 80 мм на площади 1 м² он может удержать не менее 17,3 л воды, что больше того количества, которое выпадает в виде осадков за один раз. С увеличением толщины слоя утеплителя количество воды, удерживаемой поропластом, еще более увеличивается. Следовательно, формальдегид не будет вымываться из поропласта атмосферными осадками. Из вышесказанного следует также, что осенью атмосферными осадками формальдегид из утепленного грунта вымываться не будет.

Вымывание формальдегида из утепленного грунта возможно лишь следующим летом после разработки грунта и укладки его в отвал или земляное сооружение.

Выпадающие летом осадки частично стекают по поверхности и частично проникают в грунт и фильтруются. Стекающая по поверхности вода практически не будет вымывать формальдегид из грунта.

Формальдегид из грунта вымывается фильтрующейся через грунт водой и, попадая в грунтовые воды, стекающие в водоем, будет загрязнять последний. Здесь следует иметь в виду следующее обстоятельство. Содержащийся в грунте формальдегид вымывается фильтрующейся водой не весь сразу, а постепенно. Об этом свидетельствуют наши лабораторные работы по определению формальдегида в грунте. В лабораторных условиях формальдегид из навески грунта 46–70 г вымывается в течение 6 и более суток. При этом содержание формальдегида в отфильтрованной воде составляло

0,0113 г/л. Для расчетов можно принять эту величину за концентрацию формальдегида в фильтрующейся через грунт воде.

По наблюдениям гидрометслужбы за 1914–1990 гг. максимальное количество осадков, выпадающих летом за сутки, составляет 96 мм [176]. Эта величина, принятая для расчета, является наихудшим случаем в рассматриваемом вопросе.

Экспериментально установлено, что в течение первых суток после выпадения осадков первая порция инфильтрационных вод составляет 20–30 % объема осадков [176]. Принятое нами предположение о том, что эта первая порция полностью достигнет уровня грунтовых вод и загрязнит их, является также наихудшим условием. Количество инфильтровавшейся воды составит:

$$96 \times 0,3 = 28,8 \text{ мм.}$$

В горизонтальном сечении площадью 1 м² объем инфильтровавшейся воды равен:

$$0,288 \text{ дм} \times 100 \text{ дм}^2 = 28,8 \text{ л,}$$

а концентрация формальдегида в ней, как сказано выше, равна 11,3 мг/л. Общее количество формальдегида в отфильтровавшейся воде:

$$28,8 \times 11,3 = 325,4 \text{ мг.}$$

В дальнейших расчетах исходили из следующих предпосылок, которые характерны для условий Средней Сибири:

- мощность водоносного горизонта 3,5 и 10 м;
- коэффициент фильтрации пород водоносного горизонта 1,5 и 10 м в сутки.

Просочившиеся осадки повышают уровень грунтовых вод. Повышение уровня грунтовых вод определяется по формуле:

$$\Delta H = \frac{W \Delta t}{\mu},$$

где ΔH – повышение уровня грунтовых вод, м; W – инфильтрация, м; Δt – период инфильтрации, сутки; μ – недостаток насыщения.

Из вышесказанного следует, что период инфильтрации составляет 1 сутки, а инфильтрация равна 0,0288 м. Значение недостатка насыщения приняты для супесчаных и песчаных грунтов, когда наблюдается усиленная инфильтрация, являющаяся также наихудшим случаем для проводимых расчетов. Приняты $\mu = 0,1$ и $\mu = 0,25$. В результате расчета выявилось, что повышение уровня грунтовых вод составит соответственно 0,25 и 0,1 м. Тогда мощность водоносных горизонтов после инфильтрации равна соответственно 3,25; 5,25; 10,25 и 3,1; 5,1; 10,1 м.

Как сказано выше, на столб площадью 1 м^2 (в горизонтальном сечении) попадает 28,8 л загрязненной воды (или 325,4 мг формальдегида) в первые сутки. В упрощенном случае попавшая на этот столб загрязненная инфильтровавшаяся вода будет двигаться к водоему со скоростью, равной скорости движения грунтовой воды в упомянутом столбе. При этом будет происходить перемешивание загрязненной инфильтровавшейся воды с грунтовой водой в силу свойственного ей турбулентного характера движения. Расстояние от отвала утепленного грунта до водоема, равное не менее 100 м, загрязненный фронт пройдет за 10–100 суток (при коэффициенте фильтрации 1,10 м/сут). За это время число перемешиваний составит не менее 10. Вследствие этого загрязненная инфильтрационная вода сравнительно равномерно распределится в грунтовой воде, излившейся в водоем. Отсюда концентрация формальдегида в грунтовой воде при мощности водоносного горизонта в 3 м и превышении уровня грунтовых вод в 0,1 м составит:

$$K_{\text{ст}} = \frac{325,4}{3100} = 0,105 \text{ мг/л},$$

при превышении уровня грунтовых вод в 0,25 м:

$$K_{\text{ст}} = \frac{325,4}{3250} = 0,1 \text{ мг/л}.$$

С увеличением мощности водоносного горизонта уменьшается концентрация формальдегида в грунтовой воде, изливающейся в водоем. Так, при

мощности водоносного горизонта в 5 м она составляет 0,06 мг/л, а при 10 м – 0,03 мг/л.

При принятых нами предпосылках максимальная концентрация формальдегида в грунтовой воде, изливающейся в водоем, составляет 0,105 мг/л, что почти в 2 раза превышает ПДК для водоемов (0,05 мг/л). Однако следует отметить, что эта максимальная концентрация в грунтовой воде до разгрузки ее в водоеме может снизиться до ПДК и ниже, так как на снижение уровня загрязнения помимо разбавления влияют:

- сорбционная и поглощающая способность грунтов зоны аэрации и водоносного горизонта;
- поглочительные и удерживающие свойства пластовых экранов в местах разгрузки потоков грунтовых вод.

В наихудшем случае можно игнорировать 2 последние предпосылки, тогда необходимо определить максимальное расстояние в водоеме, где концентрация формальдегида снизится до ПДК. Это расстояние рассчитывали, используя формулу С.Н. Черкинского [169] по определению содержания вредных примесей в загрязненной воде, исходя из условия смешения ее в водоеме.

Допустимое содержание формальдегида в грунтовой воде рассчитывается по формуле [169]:

$$K_{\text{ст}} = \frac{aQ}{q} \times (K_{\text{пд}} - K_{\text{р}}) + K_{\text{пд}}, \quad \text{мг/л}, \quad (6.26)$$

где $K_{\text{ст}}$ – допустимая в сточных (в нашем случае грунтовых) водах концентрация вещества, угрожающего ухудшением санитарно-токсикологических свойств воды водоема; $K_{\text{пд}}$ – предельно-допустимая концентрация вещества, мг/л; $K_{\text{р}}$ – возможная концентрация аналогичного вещества в воде водоема в месте предполагаемого выпуска сточных вод, мг/л; $\frac{aQ}{q}$ – степень возможного разбавления сточных вод до ближайшего пункта водопользования с учетом местных условий; Q, q – соответственно расходы воды в водоеме и сточ-

ных вод, поступающих в водоем, $\text{м}^3/\text{с}$; a – коэффициент смещения, определяющий долю расчетного расхода водоема, которая участвует в разбавлении сточных вод, определяется по формуле Н.Д. Родзиллера:

$$a = \frac{1-\beta}{1+\frac{Q}{q}\beta}, \quad (6.27)$$

$$\beta = \frac{1}{2,72 \alpha^3 \sqrt{L_\Phi}}, \quad (6.28)$$

L_Φ – расстояние от места выпуска сточных вод до места водопользования по фарватеру реки, м. В нашем случае, это расстояние, где происходит снижение концентрации формальдегида в водоеме ПДК; α – коэффициент, учитывающий гидравлические факторы смещения,

$$\alpha = \xi \varphi \sqrt[3]{\frac{E}{q}} \quad (6.29)$$

ξ – коэффициент, зависящий от места выпуска стока в реку, при выпуске у берега реки он равен 1; φ – коэффициент извилистости реки,

$$\varphi = \frac{L_\Phi}{L_{\text{пр}}}, \quad (6.30)$$

$L_{\text{пр}}$ – расстояние от места выпуска сточных вод до места водопользования по прямой, м. На небольшом участке реки $L_\Phi = L_{\text{пр}}$, отсюда $\varphi = 1$; E – коэффициент турбулентной диффузии, для равнинных рек определяется по формуле В.М. Маккавеева:

$$E = \frac{g H_{\text{ср}} v_{\text{ср}}}{2 m c}, \quad (6.31)$$

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $H_{\text{ср}}$ – средняя глубина реки, м; $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость течения на участке смешения, м/с; m – коэффициент Буссинского, для воды $m = 22,3$; c – коэффициент Шези,

$$c = \frac{1}{n} \sqrt[6]{H_{\text{ср}}} \quad (6.32)$$

n – коэффициент шероховатости по М.Ф. Срибному.

После подстановки уравнений (6.15), (6.16), (6.18) и (6.19) в уравнение (6.17) и ряда преобразований получаем:

$$L_{\phi} = \frac{q \sqrt[6]{H_{\text{ср}}}}{0,22 H_{\text{ср}} \vartheta_{\text{ср}}} \left(\ln \frac{K_{\text{ст}}}{K_{\text{пл}} \left(1 + \frac{q}{Q} \right) - \frac{q}{Q} K_{\text{ст}}} \right)^3, \text{ м}$$

При расчете определяли расход загрязненной грунтовой воды. Расход грунтовой воды определяли по известной формуле:

$$q = K_{\phi} H i B, \text{ м}^3/\text{сут},$$

где K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, м/сут; H – мощность водоносного горизонта, м; i – уклон; B – ширина потока, м.

Для расчета был принят максимальный расход грунтовой воды при максимальном загрязнении, которое наблюдается при $H + \Delta H = 3,1$ м. Такой расход будет в том случае если $K_{\phi} = 10$ м/сут и $i = 0,1$ (по принятым нами предпосылкам). Для определения ширины потока нами был принят отвал площадью 1 га, тогда $B = 100$ м

$$q = 10 \times 3,1 \times 0,1 \times 100 = 310 \text{ м}^3/\text{сут},$$

или

$$q = 0,0036 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Остальные параметры определяются по принятому водоему. При расчете в качестве водоема нужно было принять малую реку, так как при малом расходе воды в водоеме будут также наихудшие условия. Нами была принята река Кача, протекающая через г. Красноярск и впадающая в р. Енисей в районе Стрелка. У нее по Гидрологическому ежегоднику $Q = 6,14 \text{ м}^3/\text{с}$, $v_{\text{ср}} = 0,6 \text{ м/с}$, $H_{\text{ср}} = 0,43 \text{ м}$. По характеристике ее русла $n = 0,04$. Отсюда

$$L_{\phi} = \frac{0,0036 \sqrt[6]{0,43}}{0,22 \times 0,43 \times 0,6 \times 0,04} \left(\ln \frac{0,105}{0,05 \left(1 + \frac{0,0036}{6,14} \right) - \frac{0,0036}{6,14} 0,105} \right)^3 =$$

$$= 1,02 \text{ м},$$

т.е. практически концентрация формальдегида в водоеме (р. Кача) снизится до ПДК на расстоянии 1 м.

Следовательно водоемы не будут загрязняться формальдегидом из БТП после ее нанесения, так как максимальные осадки, выпадающие осенью, не превышают водоудерживающую способность БТП. Загрязнение водоемов формальдегидом возможно только от утепленного грунта после его разработки и укладки в отвал (или земляное сооружение).

Возможно загрязнение водоема формальдегидом после вымывания его атмосферными осадками, фильтрующимися через грунт, и попадания вместе с грунтовыми водами в водоем.

Проведенные расчеты (исходя из наихудших условий) показали, что при расположении земляного сооружения (или отвала) из утепленного грунта не ближе 100 м от водоема концентрация формальдегида в грунтовой воде в месте спуска ее в водоем равняется 0,1 мг/л. Далее в малой реке (р. Кача) концентрация формальдегида успевает снизиться до предельно-допустимой концентрации (0,05 мг/л) на расстоянии всего 1 м от места выпуска грунтовых вод, т.е. практически сразу же после попадания их в водоем.

Следовательно, применение БТП для утепления грунта не будет загрязнять окружающую среду и вредно влиять на нее.

Анализ протекающих в утепленном грунте процессов позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Пороговым значением температуры окружающего воздуха, изменяющим коэффициент теплопроводности снежного покрова является температура -10°C , а зависимость коэффициента теплопроводности снежного покрова от плотности надежно описываются уравнениями 2 порядка.

2. Исследованием на экспериментальном участке установлено, что после изготовления быстротвердеющей пены в ней содержится свободный формальдегид, при этом, чем меньше объемная масса поропласта, тем ниже концентрация свободного формальдегида (например, при объемной массе поропласта 27 кг/м^3 она составляет $2,9 \text{ г/дм}^3$, а при объемной массе $8,5 \text{ кг/м}^3$ – $0,71 \text{ г/дм}^3$).

3. Концентрация свободного формальдегида в поропласте с течением времени снижается вследствие миграции его в атмосферу и утепленный грунт (при объемной массе поропласта $8,5 \text{ кг/м}^3$ за 27 суток концентрация снижается с $0,71 \text{ г/дм}^3$ до $0,06 \text{ г/дм}^3$). Концентрация формальдегида в пробе воздуха, отобранного с середины экспериментального участка (размером $10 \times 10 \text{ м}$), уже на вторые сутки после изготовления и нанесения поропласта становится ниже ПДК для воздуха рабочей зоны. С уменьшением объемной массы поропласта и снижением концентрации формальдегида в поропласте также уменьшается содержание формальдегида в грунте (например, на глубине 20 мм при объемной массе поропласта 27 кг/м^3 оно составляет $2\text{--}9 \text{ мг/см}^3$, а при объемной массе $8,5 \text{ кг/м}^3$ от $0,12$ до $0,60 \text{ мг/см}^3$). С целью уменьшения влияния утепления грунта быстротвердеющей пеной на окружающую среду необходимо применять поропласт малой объемной массы (не более 10 кг/м^3).

4. Экспоненциальная зависимость величины проникновения фронта отрицательных температур под утепляемый слой не существенно зависит от гранулометрического состава грунта, основным параметром является влажность грунта.

5. Экспоненциальная зависимость величины проникновения фронта отрицательных температур под утепляемый слой не существенно зависит от гранулометрического состава грунта, основным параметром является влажность грунта.

6. Концентрация свободного формальдегида в поропласте с течением времени снижается вследствие миграции его в атмосферу и утепленный грунт (при объемной массе поропласта $8,5 \text{ кг/м}^3$ за 27 суток концентрация снижается с $0,71 \text{ г/дм}^3$ до $0,06 \text{ г/дм}^3$). Концентрация формальдегида в пробе воздуха, отобранного с середины экспериментального участка (размером $10 \times 10 \text{ м}$), уже на вторые сутки после изготовления и нанесения поропласта становится ниже ПДК для воздуха рабочей зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении диссертационной работе получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Установлено, что вероятность распределения гравийно-галечниковых включений по фракционному составу и частоте встречаемости числа фракций в разрабатываемых мерзлых грунтах Восточно-Сибирского региона подчинены законам распределения Пуассона.

2. По количеству фракций гравийно-галечниковый включений и частоте их встречаемости грунты Восточной Сибири разделяются на два кластера:

– к первому кластеру относятся грунты Красноярского края, включающие как северную, так и южную зону и Республики Саха;

– ко второму кластеру относятся грунты Республики Бурятия, Иркутской области и зоны БАМа.

3. Установлено, что среднепиковые нагрузки при резании мерзлых грунтов с включениями превышают среднепиковые нагрузки при резании мерзлых однородных грунтов от 4 до 6 раз.

4. Выявленное распределение сезонно-мерзлых грунтов Восточно-Сибирского региона по фракционному составу и профилям промерзания является базой данных для оценки эффективности их разработки роторными траншейными экскаваторами.

5. Экспериментальные исследования показали, что усилия резания мерзлого грунта существенно зависят от влажности, а их максимальные значения достигаются при граничном значении влажности 17–19 %. Коэффициент вариации сил резания мерзлых грунтов с включениями обратно пропорционален значению глубины резания, ширины резания и слабо зависит от степени затупления линейно установленных резцов. При этом увеличение абсолютного значения отрицательных температур грунта с включениями приводит к уменьшению касательной составляющей силы резания.

6. Разработанные точная и упрощенная имитационные модели исследования режимов работы гидромеханической системы привода рабочего органа траншейного экскаватора адекватно отражают динамические процессы при разработке однородных мерзлых грунтов и мерзлых грунтов с включениями. Точная модель позволяет, кроме того, исследовать устойчивость возникающих динамических процессов, проводить численные эксперименты с учетом спектра действующих нагрузок и изменений конструктивных параметров траншейного экскаватора.

7. Предложенная математическая имитационная модель позволяет с высокой точностью оценить уровень динамической мощности, затрачиваемой системой привода на разработку мерзлых грунтов, являющейся критерием оценки работоспособности системы гидромеханического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора.

8. Доказана рациональность математической имитационной модели второго порядка гидромеханической системы привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора, учитывающей температурные профили промерзания грунта и законы распределения гравийно-галечниковых включений. Модель обеспечивает сокращение потребляемого процессорного времени на 25 процентов при незначительном снижении точности теоретических результатов до 3 процентов во всем спектре нагрузок, действующих на систему привода при разработке мерзлого грунта и формализуемых в упрощенной модели осциллограммами.

9. Доказано, что сопротивляемость разработке мерзлых грунтов целесообразно оценивать коэффициентом прочности, учитывающим вероятностные характеристики гранулометрического состава, температурный режим промерзания, влажность, позволяющим повысить точность прогнозирования выбора оптимального типоразмера машин для выполнения земляных работ. При оценке коэффициента прочности мерзлых грунтов, неоднородных по составу, целесообразно дополнительно учитывать не только температуру,

влажность и температурный режим промерзания, но и процентное содержание гравийно-галечниковых включений.

При одном и том же гранулометрическом составе и физико-механических характеристиках (влажность и температура) наибольшее значение коэффициента прочности грунта достигается при содержании гравийно-галечниковых включений в диапазоне ξ от 40 до 45 %.

10. Предложенные номограммы определения прочности мерзлых однородных и неоднородных грунтов, полученные графо-аналитическим методом, позволяют оперативно определить область использования каждого из типоразмеров траншейных экскаваторов, обоснованно осуществлять инженерное районирование Восточно-Сибирского региона с точки зрения возможности и эффективности применения существующих типоразмеров машин, а также определять перспективные направления создания новой техники для разработки сезонно-мерзлых грунтов.

11. Исследованием карбамидных поропластов на полигоне установлено, что после изготовления быстротвердеющей пены в ней содержится свободный формальдегид, при этом, чем меньше объемная масса поропласта, тем ниже концентрация свободного формальдегида (например, при объемной массе поропласта 27 кг/м^3 она составляет $2,9 \text{ г/дм}^3$, а при объемной массе $8,5 \text{ кг/м}^3 - 0,71 \text{ г/дм}^3$).

12. Экспериментальными исследованиями установлено снижение концентрации свободного формальдегида в поропласте с течением времени вследствие миграции его в атмосферу и утепленный грунт (при объемной массе поропласта $8,5 \text{ кг/м}^3$ за 27 суток концентрация снижается с $0,71 \text{ г/дм}^3$ до $0,06 \text{ г/дм}^3$). Концентрация формальдегида в пробе воздуха, отобранного с середины экспериментального участка (размером $10 \times 10 \text{ м}$), уже на вторые сутки после изготовления и нанесения поропласта становится ниже ПДК для воздуха рабочей зоны. С уменьшением объемной массы поропласта и снижением концентрации формальдегида в поропласте также уменьшается содержание формальдегида в грунте (например, на глубине 20 мм при объемной

массе поропласта 27 кг/м^3 оно составляет $2\text{--}9 \text{ мг/см}^3$, а при объемной массе $8,5 \text{ кг/м}^3$ от $0,12$ до $0,60 \text{ мг/см}^3$). С целью уменьшения влияния утепления грунта быстротвердеющей пеной на окружающую среду необходимо применять поропласт малой объемной массы (не более 10 кг/м^3).

13. Результаты диссертационной работы (номограммы определения коэффициента прочности мерзлых однородных грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями, регрессионные зависимости коэффициента прочности мерзлых грунтов от физико-механических свойств и состава грунта, числа ударов плотномера ДорНИИ, регрессионные модели температурных профилей глубины промерзания однородных утепленных грунтов, рекомендации по предохранению грунтов от сезонного промерзания посредством укрытия поликарбонатным утеплителем до начала производства земляных работ) используются в Сибирском федеральном университете.

14. Представленная в работе методология прогнозирования эффективности разработки мерзлых грунтов траншейными экскаваторами может быть положена в основу создания CALS-технологии оценки эффективности применения землеройных машин различного назначения на всех этапах их жизненного цикла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абезгауз, В.Д. Режущие органы машины фрезерного типа для разработки горных пород и грунтов / В.Д. Абезгауз. – М. : Машиностроение. – 1965. – 280 с.
2. Абезгауз, В.Д. Усилия сопротивления копанию при работе роторных экскаваторов / В.Д. Абезгауз // Строительство трубопроводов. – 1972. – № 6.
3. Абезгауз, В.Д. Вопросы разработки и применения машины для резания мерзлого грунта / В.Д. Абезгауз, М.И. Гальперин // Строительные и дорожные машины. – 1961.
4. Абрамсон, М.Г. Справочник по механическим и абразивным свойствам пород нефтяных и газовых месторождений / М.Г. Абрамсон [и др.]. – М. : Недра, 1984. – С. 207.
5. Албул, И.Н. Характер разрушения и максимальные нагрузки при резании твердых включений / И.Н. Албул // Физико-технические методы разрушения горных пород и углей. : сб. науч. тр. – М. : ИГД им. А.А. Скочинского, 1976. – Вып. 140. – С. 31–38.
6. Албул, И.Н. Исследование влияния скорости резания на характер разрушения твердых включений / И.Н. Албул // Физико-механические свойства углей и горных пород и методы их разрушения : сб. науч. тр. – М. : ИГД им. А.А. Скочинского, 1977. – Вып. 155. – С. 20–23.
7. Алексеева, Т.В. Дорожные машины. Машины для земляных работ / Т.В. Алексеева. – 3–6-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1972. – 504 с.
8. Алексеев, Г.П. Справочник конструктора-машиностроителя / Г.П. Алексеев, И.С. Мазовер. – Л. : Судпромгиз, 1961. – 448 с.
9. Алимов, О.Д. Баровые землерезные машины / О.Д. Алимов. – Илим – Фрунзе, 1969. – 281 с.
10. Ананьев, В.П. Инженерная геология и гидрогеология / В.П. Ананьев, Л.В. Передельский. – М., 1980. – С. 271.

11. Анферов, В.Н. Оценка надежности работы роторных экскаваторов / В.Н. Анферов, С.И. Васильев, С.М. Кузнецов // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 1. – С. 50–52.
12. Арендт, Г.А. Износостойкие резцы роторных траншейных экскаваторов / Г.А. Арендт, В.Я. Крикун, И.А. Марченко // Строительные и дорожные машины. – 1969. – № 4. – С. 36.
13. Артемьев, К.А. Основы теории копания грунта скреперами / К.А. Артемьев. – М. : Машгиз, 1963. – 128 с.
14. Балбачан, И.П. Состояние и перспективы разработки мерзлых и вечномёрзлых грунтов / И.П. Балбачан // Механизация строительства. – М., 1980. – С. 16–19.
15. Баловнев, В.И. Моделирование процесса взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – М. : Высш. шк., 1981. – 335 с.
16. Баловнев, В.И. Физическое моделирование резания грунтов / В.И. Баловнев. – М. : Машиностроение, 1969. – 159 с.
17. Баловнев, В.И. Методы физического моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – М. : Машиностроение, 1974. – С. 232.
18. Баловнев, В.И. Определение параметров и выбор землеройных машин / В.И. Баловнев. – Омск–М. : ЗАО «Полиграф», 2010. – 224 с.
19. Барон, Л.Л. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Разрушение шарошками / Л.Л. Барон. – М. : Наука, 1969. – 151 с.
20. Барон, Л.И. К оценке сопротивляемости пластичных (мягких) пород разрушению механическими способами / Л.И. Барон, В.М. Курбатов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1973. – № 3. – С. 59–64.
21. Барон, Л.И. Горно-технологическое породоведение / Л.И. Барон. – М. : Наука, 1977. – С. 324.

22. Басе, Б.А. Возможности уменьшения колебаний нагрузок при работе экскаваторов в мерзлых грунтах / Б.А. Басе // Строительство трубопроводов. – М., 1975.

23. Басов, И.Г. Исследование влияния формы режущей части инструмента на износостойкость при разрушении мерзлых грунтов / И.Г. Басов // Исследования землеройных машин : сб. науч. тр. / Томский гос. ун-т. – Томск, 1977. – С. 39–44.

24. Басов, И.Г. Дискофрезерные машины для разработки мерзлого грунта / И.Г. Басов. – Томск : Изд-во Томского гос. ун-та, 1974. – 123 с.

25. Басов, И.Г. Влияние схем расстановки и конструкции резцов на процесс фрезерования мерзлого грунта / И.Г. Басов, Ф.Ф. Кириллов // Динамика и долговечность машин : сб. тр. науч.-техн. конференции / Томский гос. ун-т. – Томск, 1970. – С. 91–94. – Ч. 1.

26. Басов, И.Г. О выборе рациональной величины заднего угла инструмента при резании мерзлого грунта / И.Г. Басов // Динамика и долговечность машин : сб. тр. науч.-техн. конф. / Томский гос. ун-т. – Томск, 1970. – С. 94–99.

27. Басов, И.Г. Исследования машин для проходки траншей под кабели в мерзлых грунтах / И.Г. Басов // Динамика и долговечность машин : сб. тр. науч.-техн. конф. / Томский гос. ун-т. – Томск, 1970. – С. 99–103.

28. Басов, И.Г. Влияние геометрических параметров режущей части инструмента на его работу в процессе изнашивания / И.Г. Басов, В.Б. Лищинер // Исследование землеройных машин : сб. науч. тр. / Томский гос. ун-т. – Томск, 1977. – С. 45–50.

29. Бауман, Х. Пластопоника. В сельском хозяйстве / Х. Бауман. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – 67 с. Ил.

30. Беляев, Ю.И. Исследование работы роторного экскаватора при выемке мерзлых грунтов / Ю.И. Беляев // Горные машины и автоматика. – 1961.

31. Беляков, Ю.И. О новой классификации грунтов и горных пород по сопротивлению экскавации / Ю.И. Беляков // Горные, строительные и дорожные машины : сб. науч. тр. – Киев, 1979. – Вып. 28. – С. 3–11.

32. Бородавкин, П.П. Механика грунтов в практике строительства / П.П. Бородавкин. – М. : Недра, 1976. – 224 с.
33. Берон, А.И. Свойства горных пород при разных видах и режимах разрушения / А.И. Берон, Е.С. Ватолин, М.И. Койфман. – М. : Недра, 1984. – С. 276.
34. Беляков, Ю.И. Обобщенная классификация грунтов и горных пород по трудности выемки экскаваторами / Ю.И. Беляков // Горный журнал. – 1983. – № 12. – С. 24–27.
35. Булычев, В.Г. Механика дисперсных грунтов / В.Г. Булычев. – М. : Стройиздат, 1974. – С. 227.
36. Васильев, Л.М. Влияние угла резания на процесс скола горных пород / Л.М. Васильев // Механика и разрушение горных пород. – Омск, 1974. – С. 303–307.
37. Васильев, С.И. Анализ показателей, определяющих эффективность разработки мерзлых грунтов рабочими органами землеройных машин / С.И. Васильев, С.П. Ереско, Б.В. Осипенко, В.Л. Шустов // Горные машины и автоматика. – М. : Новые технологии, 2003. – № 10. – С. 22–26.
38. Васильев, С.И. Обоснование критерия оценки эффективности разработки мерзлых грунтов траншейными экскаваторами / С.И. Васильев, В.Г. Жубрин ; ЦНИИТЭСтроймаш. – М., 1986. – Деп. 4. 07. 1986, № 12СД.
39. Васильев, С.И. Результаты исследования технико-экономической модели оценки эффективности разработки мерзлых грунтов траншейными экскаваторами / С.И. Васильев, В.Г. Жубрин, З.С. Ташпаева. – М., 1987. – Деп. ЦНИИТЭСтроймаш 29.04.1987, № 56 СД87.
40. Васильев, С.И. Повышение эффективности разработки мерзлых грунтов / С. И. Васильев, Д.Г. Носков, В.Г. Жубрин // Транспортные средства Сибири, Красноярск вып. № 6. – 2000. – С. 358–359.
41. Васильев, С.И. Разработка сезонномерзлых грунтов Восточной Сибири траншейными экскаваторами : монография / С.И. Васильев, С.П. Ереско, В.Г. Жубрин, Б.В. Осипенко. – Красноярск : ИПК СФУ, 2010. – 140 с.

42. Васильев, С.И. Технология подготовки грунтов к разработке в зимний период при освоении полезных ископаемых Восточно-Сибирского региона : монография / С.И. Васильев, В.Н. Анферов, В.М. Мелкозеров. – Красноярск : ИПК СФУ, 2012. – 152 с.

43. Васильев, С.И. Свойства карбамидных поропластов с древесными наполнителями для утепления сезонномерзлых грунтов / С.И. Васильев, В.М. Мелкозеров ; ГАОУ ВПО Сибирский федеральный университет. – Красноярск.

44. Васильев, С.И. Вероятностные характеристики грунтового массива Восточно-Сибирского региона / С.И. Васильев, С.П. Ереско, В.Г. Жубрин // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БрГУ, 2013. – № 1 (17). – С. 85–92.

45. Васильев, С.И. Вероятностные физико-механические характеристики грунтов Восточно-Сибирского региона / С.И. Васильев, В.И. Иванчура, С.П. Ереско // Транспортное строительство. – М., 2013. – № 3. – С. 28–30.

46. Васильев, С.И. Побочное влияние карбамидных поропластов на аквабионты при утеплении грунтов Сибири / С.И. Васильев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе». – 2012. – Вып. 9. – С. 42–47.

47. Васильев, С.И. Обоснование критериев оценки динамических процессов гидромеханического привода рабочих органов землеройно-транспортных машин / С.И. Васильев, В.И. Иванчура // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 1 (13). – С. 62–66.

48. Васильев, С.И. Эффективность экскавации утепленных мерзлых грунтов с каменистыми включениями / С.И. Васильев // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 2. – С. 90–92.

49. Васильев, С.И. Исследование эксплуатационных характеристик карбамидного поропласта как утеплителя грунтов для предохранения от сезонного промерзания / С.И. Васильев, В.М. Мелкозеров // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БрГУ, 2010. – № 3(7). – С. 109–115.

50. Васильев, С.И. Результаты численного моделирования рабочего органа траншейного экскаватора / С.И. Васильев, В.И. Иванчура // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 1(13). – С. 57–61.

51. Васильев, С.И. Численное моделирование рабочего процесса привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора / С.И. Васильев, В.И. Иванчура // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – № 4 (7). – С.15–21.

52. Васильев, С.И. Методика экспериментальных исследований процесса резания сезонно-мерзлых грунтов с включениями / С.И. Васильев // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – № 4 (7). – С.164–151.

53. Васильев, С.И. Экспериментальные и теоретические исследования свойств пеноутеплителя для предохранения грунта от промерзания в условиях Сибири / С.И. Васильев, В.М. Мелкозеров, А.С. Ортман // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – № 3 (6). – С. 154–161.

54. Васильев, С.И. Свойства карбамидных порошковых наполнителей для утепления сезонно-мерзлых грунтов / С.И. Васильев, В.М. Мелкозеров // Науч. журнал СФУ. Сер. Техника и технологии. – 2011. – № 4 (4). – С. 380–388.

55. Васильев, С.И. Закономерности формирования пульсаций давления в гидроприводе траншейных роторных экскаваторов при разработке мерзлых грунтов / С.И. Васильев, С.П. Ереско, Т.Т. Ереско // Строительные и дорожные машины. – М., 2011. – № 8. – С. 30–33.

56. Васильев, С.И. Повышение эффективности разработки сезонно-мерзлых грунтов / С.И. Васильев // Вестник ТГАСУ. – 2010. – № 1. – С. 194–200.

57. Васильев, С.И. Исследование прочностных характеристик сезонно-мерзлых грунтов Сибири и Севера / С.И. Васильев, С.П. Ереско // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 1 (5). – С. 93–99.

58. Васильев, С.И. Исследование процесса резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями роторными рабочими органами / С.И. Васильев, С.П. Ереско // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 4(8). – С.145–153.

59. Ветров, Ю.А. Разрушение прочных грунтов / Ю.А. Ветров, В.Л. Баландинский, В.Ф. Баранников. – Киев : Будевельник, 1972. – 351 с.

60. Ветров, Ю.А. Принципы категорирования грунтов по трудности разработки / Ю.А. Ветров // Горные, строительные и дорожные машины. – Киев, 1980. – Вып. 29. – С. 3–9.

61. Ветров, Ю.А. Анализ средней удельной силы копания бульдозерами / Ю.А. Ветров // Горные, строительные и дорожные машины. – Киев, 1980. – Вып. 30. – С. 5–10.

62. Ветров, Ю.А. Расчеты сил резания и копания грунтов / Ю.А. Ветров. – Киев : Киевский ун-т, 1965.

63. Ветров, Ю.А. Сопротивление грунтов резанию / Ю.А. Ветров. – Киев : Киевский ун-т, 1962. – 79 с.

64. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров. – М. : Машиностроение, 1971. – 357 с.

65. Ветров, Ю.А. Машины для земляных работ / Ю.А. Ветров, А.А. Кархов, А.С. Кондра, В.Л. Станевский. – Киев : Вища школа, 1981. – 384 с.

66. Вильдерман, В.Н. Исследование процессов резания мерзлых грунтов землеройными машинами с учетом распределения значений показателей их физико-механических свойств в районах Сибири : автореферат дисс. ... канд. техн. наук / В.Н. Вильдерман. – М., 1977.

67. Вотяков, И. Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаиваемых грунтов Якутии / И.Н. Вотяков. – Новосибирск : Наука, 1975. – 176 с.

68. Втюрина, Е.А. Динамика промерзания-протаивания пород сезонно-талого слоя в пределах СССР / Е.А. Втюрина // Почвенный криогенез. – М., 1974. – С. 141–146.

69. Вялов, С.С. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов / С.С. Вялов, С.Е. Городецкий, В.Ф. Ермаков, А.Е. Зацарская, Н.К. Пекарская. – М. : Наука, 1966. 350 с.

70. Гальперин, А.М. Геомеханика открытых горных работ / А.М. Гальперин. – М. : Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2003. – 473 с.

71. Гыурман, В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистики / В.Е. Гыурман. – М. : Высш. шк., 1970. – 239 с.
72. Гилета, В.П. Проходка скважин с частичной экскавацией грунта / В.П. Гилета, Б.Н. Смоляницкий // Строительные и дорожные машины. – 2001. – № 4. – С. 7–8.
73. Гилета, В.П. Использование циклических средств экскавации грунта из скважин при выполнении подземных переходов / В.П. Гилета, Б.Н. Смоляницкий. – Известия вузов. Строительство. – 1998. – № 11. – С. 80–84.
74. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация. – М. : Изд-во стандартов, 1995.
75. Гривитис, Я.А. Теоретические и прикладные аспекты метода взрывавтогидролиза растительной биомассы / Я.А. Гривитас // Химия древесины. – 1987. – № 5. – С. 18–23.
76. Двойных, М.А. Некоторые вопросы расчета и конструирования машин непрерывного действия для разработки мерзлых грунтов резанием : сб. науч. тр. ГШИУМ / М.А. Двойных. – М. : Госгортехиздат, 1966. – № 10.
77. Динамическая модель привода роторного траншейного экскаватора с формализацией сил резания сезонно-мерзлых грунтов, работы контрольно-регулирующей аппаратуры и механического привода рабочего органа : Свидетельство об государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616904 / С.И. Васильев, В.И. Иванчура, В.С. Васильев ; заявитель Сибирский федеральный университет ; зарегистрировано в реестре программ 25.07. 2013.
78. Домбровский, И.Г. Основные вопросы разрушения твердых и мерзлых грунтов / И.Г. Домбровский, М.И. Гальперин // Вопросы механизации открытых горных и земляных работ : сб. – МИСИ. – 1961. – Вып. 39. – С. 50–54.
79. Домбровский, Н.Г. Экскаваторы. Общие вопросы теории проектирования, исследования и применения / Н. Г. Домбровский. – М. : Машиностроение, 1969. – 318 с.

80. Домбровский, Н.Г. Повышение производительности траншейных экскаваторов при разработке мерзлых грунтов / Н.Г. Домбровский, С.А. Шемякин // Оптимальное использование машин в строительстве : сб. тр. ; Хабаровский политехн. ин-т. – Хабаровск, 1974. – Вып. 3.

81. Дроздов, В.И. Сравнительная оценка схем резания мерзлых грунтов / В.И. Дроздов // Строительные и дорожные машины : сб. науч. тр. ЦНИИТЗ Строймаш. – 1968. – № 5.

82. Евдокимов, А.Н. Аналитическое определение силы сопротивления внедрению инструмента в мерзлый грунт / А.Н. Евдокимов, С.И. Васильев, В.Г. Жубрин // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – № 3 (6). – С.115–118.

83. Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы : сб. 2 : Земляные работы. Механизированные и ручные работы земляные работы. – Вып. I. – М. : Стройиздат, 1980. – 202 с.

84. Емелин, В.И. Использование землеройных машин по времени в условиях Севера / В.И. Емелин // Комплексная механизация и автоматизация производственных процессов в строительстве инженерных сооружений : сб. науч. тр. – Л., 1976. – С. 59–65.

85. Ереско, С.П. Программа измерения и записи температуры жидкости TERMOGID / С.П. Ереско, С.И. Васильев, Б.И. Ковальский, В.С. Ереско, Ю.Н. Безбородов, М.А. Шунькина // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005611135. – М. : РОСПАТЕНТ, 16.05.2005 г.

86. Ереско, С.П. Программа оптимизации мате-матических моделей симплексным методом (SIMPLEX) / С.П. Ереско, С.И. Васильев, Д.Б. Колбасинский, А.С. Ереско, В.С. Ереско, М.А. Незнамов, О.М. Преснов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006611380 : Зарегистр. – М. : РОСПАТЕНТ 09.08.2006 г.

87. Ереско, С.П. Совершенствование конструкции гидропривода роторного траншейного экскаватора Механики XXI века / С.П. Ереско, С.И. Васильев, В.Г. Жубрин, Т.Т. Ереско, В.Л. Шустов // VI всероссийская науч.-техн. конф. с международным участием : сб. докл. – Братск : ГОУ ВПО БрГУ. – 2007. – С. 22–24.

88. Ереско, С.П. Совершенствование конструкции гидропривода траншейных экскаваторов / С.П. Ереско, С.И. Васильев, В.Г. Жубрин // Вестник университетского комплекса. – Красноярск : ВСФРГУИТП НИИ СУВПТ. – 2006. – Вып. 8 (22). – С. 218–228.

89. Желукевич, Р.Б. Анализ режущего инструмента для разработки мерзлого грунта / Р.Б. Желукевич, Л.А. Желукевич // Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. – Красноярск : ПромстройНИИ-проект, 1980. – Вып. 52. – С. 20–28.

90. Желукевич, Р.Б. Процесс разрушения мерзлого грунта дисковым инструментом / Р.Б. Желукевич // Организация и экономика строительства в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. – Красноярск : ПромстройНИИпроект, 1982. – С. 36–46.

91. Живейнов, Н.Н. Аналитическое определение силы резания грунта элементарными профилями, периметром и плоским отвалом : авторефер. дисс. ... канд. техн. наук / Н.Н. Живейнов. – М. : МАДИ, 1970. – 27 с.

92. Жубрин, В.Г. Обоснование технических параметров машин для разработки траншей в районах Сибири и Севера : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В.Г. Жубрин. – М., 1987. – 24 с.

93. Зажигаев, Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев. – М. : Атомиздат, 1978. – 231 с.

94. Зайдель, А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А.Н. Зайдель. – 3-е изд. испр. и доп. – Л. : Наука, 1968. – 96 с.

95. Захаров, В.А. Об определении сопротивления движению инструмента при разрушении мерзлых грунтов / В.А. Захаров // Строительные и дорожные машины. – 1971. – № 10. – С. 18–23.

96. Зедгенизов, В.Г. Моделирование взаимодействия скребкового рабочего органа цепного траншейного экскаватора с грунтом / В.Г. Зедгенизов // Строительные и дорожные машины. – 2002. – № 12. – С. 24–26.

97. Зеленин, А.Н. Машины для земляных работ : учеб. пособие для вузов / А.Н. Зеленин, В.И. Баловнев, И.П. Керов. – М. : Машиностроение, 1975. – 424 с.

98. Зеленин, А.Н. Основы разрушения грунта механическими способами / А.Н. Зеленин. – М. : Машиностроение, 1968. – 375 с.
99. Зеленин, А.Н. Лабораторный практикум по резанию грунтов / А.Н. Зеленин, Г.Н. Карасев, Л.В. Красильников. – М. : Выс. шк., 1969. – 308 с.
100. Зеленин, А.Н. Состояние и перспектива развития машин для разработки мерзлых грунтов / А.Н. Зеленин // Строительные и дорожные машины, 1961. – № 10.
101. Зеленин, А.Н. К вопросу применения классификации грунтов по трудности их разработки / А.Н. Зеленин, И.Н. Живейнов, Г.А. Авиатор // Строительные и дорожные машины. – 1970. – № 2. – С. 15–17.
102. Иванов, К.И. Влияние формы ударника на коэффициент передачи энергии удара в породу / К.И. Иванов // Горный породоразрушающий инструмент : сб. – Киев : Техника, 1970. – С. 166–169.
103. Карнаухов, Н.Н. Приводы траншейных экскаваторов : науч. изд. / Н.Н. Карнаухов, А.И. Тархов. – М. : Недра, 1999. – 381 с.
104. Карнаухов, А.В. Сменный твердосплавный режущий инструмент для разработки мерзлых грунтов к экскаваторам ЭТР-132А и ЗТР-132Б / А.В. Карнаухов // Механизация строительства и технологический транспорт : реферативный сб. – М., 1974. – № 1.
105. Качан, Л.М. Основы механики разрушения / Л.М. Качан. – М. : Наука, ГРФМЛ, 1974. – С. 312.
106. Кислонко, А.А. Экспериментальное исследование процесса резания мерзлых грунтов / А.А. Кислонко // Строительные и дорожные машины. – 1963. – № 12.
107. Клейн, Г.К. Строительная механика сыпучих тел / Г.К. Клейн. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1977. – 256 с.
108. Киселев, А.В. Эффективный способ защиты от промерзания глин в карьерах / А.В. Киселев, А.И. Заика, В.М. Мелкозеров, А.Б. Гентош. – Л. : Цемент, 1981. – № 8. – С. 4–8.
109. Кислонко, А.А. Экспериментальное исследование процесса резания мерзлых грунтов / А.А. Кислонко // Строительные и дорожные машины. – 1963. – № 12.

110. Клиопа, Т.И. Влияние скорости на сопротивление копанию и технико-экономические параметры машин / Т.И. Клиопа // Вопросы механизации открытых горных и земляных работ. – 1961.
111. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 832 с.
112. Крупно, В.А. О разрушении грунта перед любой гранью плоского вертикального ножа / В.А. Крупно // Горные, строительные и дорожные машины. – Киев : Техника, 1973. – Вып. 15. – С. 12–15.
113. Кудрявцев, Е.М. Основы автоматизации проектирования машин : учебник для вузов / Е.М. Кудрявцев. – М. : Машиностроение, 1993. – 334 с.
114. Кудрявцев, Е.М. Моделирование, проектирование и расчет механических систем / Е.М. Кудрявцев. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 400 с.
115. Лещинер, В.Б. Исследование износа инструмента бесковшовых траншеекопателей при резании мерзлых грунтов : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В.Б. Лещинер. – Томск, 1972. – 25 с.
116. Лещинер, В.Б. О рациональной форме и размерах армирующего твердосплавного элемента резцов землерезных машин / В.Б. Лещинер // Исследования землеройных машин : сб. науч. тр. – Томск : Томский гос. ун-т. – 1973. – С. 23–33. – Т. 18.
117. Ломидзе, Г.М. Условия предельного равновесия глинистых и песчаных грунтов / Г.М. Ломидзе, А.Л. Крыжановский, Э.И. Воронцов // Гидротехническое строительство. – 1969. – № 2. – С. 11–15.
118. Лукьянов, А.Д. Определение мощности на фрезерование сплошной торфяной залежи / А.Д. Лукьянов // Труды ВНИИТП. – Вып. 41. – 1978. – С. 60–65.
119. Любимов, Н.И. Принципы классифицирования и эффективности разрушения горных пород при разведочном бурении / Н. И. Любимов. – М. : Недра, 1967. – 318 с.
120. Малышев, А.А. Земляное полотно автомобильных дорог в условиях Севера / А.А. Малышев. – М. : Транспорт, 1974. – 285 с.

121. Маслов, Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов / Н.Н. Маслов. – М. : Высш. шк., 1982. – С. 511.

122. Мелкозеров, В.М. Свойства карбамидных композиционных поропластов с древесными наполнителями для ликвидации нефтяных загрязнений / В.М. Мелкозеров, С.И. Васильев [и др.] // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2011. – № 3. – С. 4–9.

123. Методика оценки и классификация показателей разрушаемости угольных пластов основных бассейнов СССР. Ч. 1. Методика определения показателей разрушаемости углей и угольных пластов. – М. : ИГМ им. А.А. Скочинского, 1978. – 47 с.

124. Морозов, Г.А. Из опыта применения на строительстве Красноярской ГЭС быстротвердеющей пены как утеплителя / Г.А. Морозов // Сборник науч. работ / ВНИИГ им. Веденеева, Сиб. филиал. – М.–Л. : Энергия, 1996. – С. 79–92 с. Ил.

125. МУК 4.1.1045-01 ВЭЖХ определение формальдегида и предельных альдегидов (С2–С10) в воздухе.

126. Натурные исследования, определение группы мерзлых и вечномерзлых грунтов по трудности их разработки роторными, цепными, одноковшовыми экскаваторами, навесными рыхлителями статического действия на объектах Минтяжстроя СССР, Миннефтегазстроя / Красноярский край, Тюменская область / и разработать предложения для включения в ЕНиР роторными (типа ЭТР-254), цепными (типа ЭТЦ-208Д), одноковшовыми экскаваторами (типа ЭО-4121А): отчет о НИР № гос. Регистрации 0286.0039574–Красноярск, Красноярский филиал ВНИИстройдормаш, 1985.– 73 с.

127. Недорезов, И.А. Прогнозирование трудности разработки грунтов землеройными машинами / И.А. Недорезов // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 4. – С. 43–44.

128. Недорезов, И.А. Статистические оценки сопротивления резанию и копанию грунтов землеройными машинами / И. А. Недорезов, Ф.А. Дианов // Строительные и дорожные машины. – 1979. – № 9. – С. 20–22.

129. Недорезов И.А. Вариации прочности грунтов разрабатываемых в строительстве/ И.А. Недорезов // Транспортное строительство. – № 8. – 2013. – С. 29–30.

130. Норенков, И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий (CALS-технологии) / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.

131. Оптимизация затрат на эксплуатацию транспортно-технологических машин (ОЗЕТМ-ТМ) / С.И. Васильев, Л.Н. Родикова, Г.Ф. Яричина, В.С. Васильев. Св. ГР№2009616246; зарег. в реестре программ 11.11 2009 г.

132. Орнатский, Н.В. Механика грунтов / Н.В. Орнатский. – М. : Изд-во МГУ, 1962. – 447 с.

133. Осипенко, Б.В. Исследование процесса разрушения мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями резцами траншейных экскаваторов с дискофрезерным рабочим органом / Б.В. Осипенко Л.К. Соколов // Проблемы развития строительной и дорожной техники для работы в условиях Сибири и Севера : тезисы докл. всесоюзной науч.-исслед. конф. – М., 1981. – 191 с.

134. Осипенко, Б.В. Разработка мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями роторными траншейными экскаваторами : авторефер. дисс. ... канд. техн. наук / Б.В. Осипенко ; НИИстройдормаш, 1986. – 24 с.

135. Пат. 2411267РФ, МКИ Композиция для карбамидного пенопласта / С.И. Васильев, В.М. Мелкозеров // Б.И. 2011. № 4.

136. Позин, Е.З. Использование в инженерных расчетах показателей, характеризующих разрушаемость угольных пластов / Е.З. Позин // Горнотехнологические свойства пород и прикладные вопросы геотехнической механики. – М. : ИГД им. А.А. Скочинского, 1974. – Вып. 125. – С. 10–11.

137. Позин, Е.З. Определение максимальных нагрузок на инструментах исполнительных органов угледобывающих машин / Е.З. Позин // Научные основы создания, эксплуатации и повышения надежности горношахтного оборудования. – М. : ИГД им. А.А. Скочинского, 1973. – Вып. 163. – С. 16–25.

138. Протасов, Ю.И. Теоретические основы механического разрушения горных пород / Ю.И. Протасов. – М. : Недра, 1985. – 242 с.

139. Протодяконов, М.М. К вопросу о рациональной классификации горных пород / М. М. Протодяконов // Материалы первой всесоюзной научной конференции по механике горных пород. – Алма-ата : Наука, 1966. – С. 345–353.

140. Растегаев, И.К. Разработка мерзлых грунтов в северном строительстве / И.К. Растегаев. – Новосибирск : ВО Наука, 1992. – 347 с.

141. Растегаев, И.К. Фон эксплуатации систем землеройно-транспортных машин по территории СССР / И.К. Растегаев // Строительство в районах Вост. Сибири и Крайнего Севера. – Красноярск : Красноярск. Пром-стройинипроект, 1974. – № 31. – С. 126–148.

142. Растегаев, И.К. Машины для вечно-мерзлых грунтов / И.К. Растегаев. – М. : Машиностроение, 1986. – 213 с.

143. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика / П.А. Ребиндер. – М. : Изд-во МГУ, 1979. – С. 170.

144. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород : учебник для ... / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. – М. : Недра, 1984. – 359 с.

145. Ровинский, М.И. Влияние ядер уплотнения на характер разрушения мёрзлого грунта при послойном рыхлении / М.И. Ровинский, В.Д. Тёлушкин // Строительные и дорожные машины. – 1968. – № 2.

146. Руднев, В.К. Интенсификация процесса копания грунтов и повышение эффективности землеройно-транспортных машин применением газовой смазки рабочих органов : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / В.К. Руднев ; КИСИ. – Киев, 1977. – 42 с.

147. Руководство по проведению инженерных изысканий ускоренными методами. – М. : Стройиздат, 1972. – С. 88.

148. Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Рушимский. – М. : Наука, 1971. – 192 с.

149. Румянцев, В.А. Траншейные экскаваторы / В.А. Румянцев. – М. : Машиностроение, 1980. – 102 с.
150. Санников, В.П. Влияние неравномерности физико-механических свойств грунта на производительность землеройной машины / В.П. Санников, Г.А. Данькова // Совершенствование технологии и организации строительства мелиоративных систем Сибири. – Красноярск, 1898. – С. 58–63.
151. Сергеев, Е.М. Грунтоведение / Е.М. Сергеев. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1971. – 595 с.
152. Скубневская, Г.И. Загрязнение атмосферы формальдегидом / Г.И. Скубневская, Г.Г. Дульцева. – Новосибирск : Ин-т хим. кинетики и горения, 1994. – 70 с.
153. Сладкова, Л.А. Разработка многолетнемерзлых грунтов : монография / Л.А. Сладкова, Н.Г. Жидков ; под общ. ред. Л.А. Сладковой. – Балашиха, ВТУ, 2009. – 96 с.
154. Славин, В.С. Промышленное и транспортное освоение Севера СССР / В.С. Славин. – М. : Экономиздат, 1961. – 56 с.
155. СНИП II –Д.5-72. Автомобильные дороги. Нормы проектирования.
156. Соколов, Л.К. Исследование процесса резания мерзлого грунта с целью обоснования и выбора рациональных параметров органов траншейных экскаваторов : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Л. К. Соколов. – М., 1977. – 725 с.
157. Соколов, Л.К. Методика расчета рациональных параметров рабочих органов траншейных машин для разработки мерзлых грунтов / Л.К. Соколов // Механизация гидромелиоративных работ в Сибири. – Красноярск : СибНИИГИМ, 1979. – С. 32–38.
158. Соколов, Л.К. Расчет сил резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями / Л.К. Соколов, Б.В. Осипенко, А.Г. Дашевский // Строительные и дорожные машины. – 1986. – № 4.
159. Соколовский, В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. – М. : Высш. шк., 1969. – 608 с.

160. Соколовский, В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. 1960. – 260 с.
161. Тайбашев, В.Н. Характер деформирования и изменения прочности мерзлых крупноблочных пород в зависимости от их состава и сложения : сб. документов II межвуз. конф. по мерзлотоведению / В.Н. Тайбашев. – М. : МГИ, 1973. – Вып. 4. – С. 93–98.
162. Терцаги, Н. Теория механики грунтов / Н. Терцаги. – М. : Госстройиздат, 1961. – 507 с.
163. Толстихин, Н.И. Общее мерзлотоведение / Н.И. Толстихин, С.П. Качурин, З.А. Нерсесова [и др.] ; отв. ред. П.И. Мельников, Н.И. Толстихин. – Новосибирск : Наука, 1974. – 288 с.
164. Упиров, П.П. Совершенствование рабочих органов строительных и дорожных машин / П.П. Упиров, Р.Б. Желудкевич // Проблемы развития строительной и дорожной техники для работы в условиях Сибири и Севера : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Красноярск, 1981. – С. 75–76.
165. Уткин, А.И. Вариация силы резания грунтов и пород с твердыми включениями / А.И. Уткин, В.В. Власов // Горные, строительные и дорожные машины. – Киев : Техника, 1970. – С. 16–21.
166. Федоров, В.И. Методика оценка прочности и сжимаемости обломочно-глинистых грунтов / В.И. Федоров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М. : Стройиздат, 1984. – С. 18–21.
167. Федулов, А.И. Ударное разрушение мерзлых грунтов / А.И. Федулов. – Новосибирск : Наука, 1975. – 136 с.
168. Филиппов, Г.С. Предохранение грунта от промерзания / Г.С. Филиппов. – Красноярск : Стройиздат, 1991. – 112 с.
169. Фомичев, В.П. Классификация грунтов по механическим характеристикам / В.П. Фомичев, Е.Б. Тетевосян // Исследования по теории и расчету строительных машин : сб. науч тр. – Ростов н/Д., 1972. – С. 78–83.
170. Фонарев, П.А. Методика определения показателей прочности на сдвиг сыпучих грунтов / П.А. Фонарев // Автомобильные дороги. – 1984. – № 11. – С. 15.

171. Ципурских, И.Л. Определение тяговых усилий траншеекопателя для рытья узких траншей / И.Л. Ципурских // Строительство трубопроводов. – 1963. – № 3.
172. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М. : Высш. шк., 1979. – 272 с.
173. Часовских, М.П. Выбор параметров разрушения мерзлого грунта грунтовым резцовым органом / М.П. Часовских // Исследование землеройных машин : сб. науч. тр. – Томск : Томский гос. ун-т, 1973. – Т. 18. – С. 22–28.
174. Чепурной, Н.П. Экспериментальное исследование процесса проходки криволинейных скважин в уплотняемых грунтах / Н.П. Чепурной, Б.Н. Смоляницкий, В.В. Лервов, В.В. Трубицын // ФТПРПИ. – 1996. – № 6.
175. Шилинский, А.Ю. Прикладные задачи механики / А.Ю. Шилинский. Кн. 1. Механика вязкопластичных и не вполне упругих тел. – М. : Наука, 1971. – С. 360.
176. Шлойдо, Г.А. О влиянии скорости на сопротивляемость мерзлых грунтов разрушению / Г.А. Шлойдо, З.Г. Сосенкова // Исследование навесных машин. – М. : ВНИИстройдормаш, 1973. – Вып. 59. – С. 109–114.
177. Черкинский, С.Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы / С.Н. Черкинский. – М. : Изд-во Минкоммунхоза РСФСР, 1962. – 237 с.
178. Янцен, И.А. Исследование и создание активных ковшей экскаваторов / И.А. Янцен, В.И. Сафонов // Машины ударного действия. – Караганда : КарПИ, 1980. – С. 31–40.
179. Паспорт безопасности Поропласты Композиционные РПБ 581719.22.29284.
180. Поропласты композиционные ТУ 2254-001-02067876-2009 / С.И. Васильев, В.М. Мелкозеров (введены с 28.12.2009 г.).

Приложение П1. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Директор УМ-11
ОАО ДСК г. Красноярск
Н.Н. Жарков
«20» февраля 2008г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Васильева Сергея Ивановича в
Управлении механизации № 11 ОАО «Домостроительный комбинат»

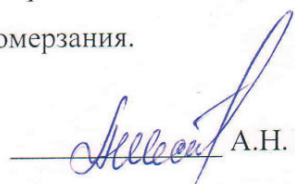
Настоящим актом подтверждается, внедрение результатов докторской диссертации кандидата технических наук, доцента ФГОУ ВПО Сибирского федерального университета Васильева С. И.

Практическое применение нашли следующие научные и практические результаты диссертационной работы:

1. Методика оценки эффективности применения землеройной техники с использованием номограммы определения коэффициента трудности разработки мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями.

2. Методика определения параметров карбомидных пен-утеплителей для предотвращения грунта от сезонного промерзания.

Главный инженер

 А.Н. Шестаков



ЗАО «НИИСтройдормаш»

Юридический адрес: 660079 Красноярск
ул. 60 лет Октября, д. 105
Для писем: 660079, 60 лет Октября, 105
Телефон: (8-3912)36-33-06, факс (8-3912)36-41-56
e-mail: Sibniisdsm@mail.ru

ИНН/КПП: 2464084389/246401001
Р/с 40702810831000001337 в ЗАО КБ«КЕДР»,
г. Красноярск
К/с 30101810100000000819
БИК 040436819 ОКПО 00240980
ОКОНХ 95130,14511,14512,14941

от _____ 2008 г.

№ _____



Настоящим подтверждается внедрение результатов докторской диссертации кандидата технических наук, доцента ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» Васильева С.И., использованных при выполнении хозяйственно-договорных тем № МИ-6/506-81, № МИ-6/621-85 № гос. рег. 01.83.0000216:

1. Техничко-экономическая модель процесса разработки мерзлых грунтов траншейными экскаваторами;
2. Номограммы для определения трудности разработки мерзлых однородных грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями;
3. Регрессионные модели трудности разработки мерзлых грунтов как в функции числа ударов плотномера ДорНИИ, так и в функции физико-механических свойств грунта;
4. Регрессионные модели температурных профилей промерзания однородных грунтов (в соавторстве с к.т.н. В.Г. Жубриным);
5. Экспериментальные зависимости касательной составляющей силы резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями от геометрических характеристик рабочего органа, характеристик привода и разрабатываемой среды (в соавторстве с к.т.н. Осипенко Б.В.)

Председатель комиссии

Зам. директора по научной
работе, кандидат технических наук

В.Г. Жубрин

Члены комиссии:

Зам. директора, кандидат технических наук

В.А. Ронгонен

Ведущий научный сотрудник отдела рабочих
органов, кандидат технических наук

Л.К. Соколов



ЗАО «НИИСтройдормаш»

Юридический адрес: 660079 Красноярск
ул. 60 лет Октября, д. 105
Для писем: 660079, 60 лет Октября, 105
Телефон: (8-3912)36-33-06, факс (8-3912)36-41-56
e-mail: Sibniisdsm@mail.ru

ИНН/КПП: 2464084389/246401001
Р/с 40702810831000001337 в ЗАО КБ«КЕДР»,
г. Красноярск
К/с 30101810100000000819
БИК 040436819 ОКПО 00240980
ОКОНХ 95130,14511,14512,14941

от _____ 2008 г.

№ _____

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ЗАО «НИИСтройдормаш»

В.И. Шустов
«*14*» октября 2008г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим подтверждается внедрение результатов докторской диссертации кандидата технических наук, доцента ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» Васильева С.И., использованных при выполнении хозяйственно-договорных тем № МИ-6/506-81, № МИ-6/621-85 № гос. рег. 01.83.0000216:

1. Техничко-экономическая модель процесса разработки мерзлых грунтов траншейными экскаваторами;
2. Номограммы для определения трудности разработки мерзлых однородных грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями;
3. Регрессионные модели трудности разработки мерзлых грунтов как в функции числа ударов плотномера ДорНИИ, так и в функции физико-механических свойств грунта;
4. Регрессионные модели температурных профилей промерзания однородных грунтов (в соавторстве с к.т.н. В.Г. Жубриным);
5. Экспериментальные зависимости касательной составляющей силы резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями от геометрических характеристик рабочего органа, характеристик привода и разрабатываемой среды (в соавторстве с к.т.н. Осипенко Б.В.)

Председатель комиссии

Зам. директора по научной
работе, кандидат технических наук

В.Г. Жубрин

Члены комиссии:

Зам. директора, кандидат технических наук

В.А. Ронгонен

Ведущий научный сотрудник отдела рабочих
органов, кандидат технических наук

Л.К. Соколов



АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов диссертационной работы
Васильева Сергея Ивановича в ООО «Мехдорстрой»

Акт подтверждает внедрение результатов докторской диссертации кандидата технических наук, доцента ФГОУ ВПО Сибирского федерального университета г. Красноярск Васильева С. И.

Практическое применение нашли следующие научные, методические и практические результаты диссертационной работы:

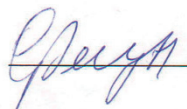
1. Методика оценки эффективности применения землеройных машин по номограммам расчета коэффициента трудности разработки сезонно-мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями.

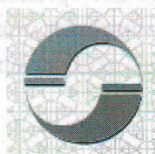
2. РТМ (проект) Метод расчета параметров пен-утеплителей для предотвращения грунтов с каменисто-галечниковыми включениями, карьерных запасов и буртов инертных материалов от сезонного промерзания. В настоящее время эффективно защищены от сезонного промерзания грунты с каменистыми включениями площадью 600 м^2 , разработанные в декабре 2008г.

3. Рекомендации к расчетам температур неутепленного и утепленного грунта по глубине для каждого из зимних месяцев в условиях залегания Республики Саха.

Экономия за счет снижения эксплуатационных затрат при разработке годового объема мерзлых грунтов с каменисто-галечниковыми включениями за счет использования пен-утеплителей, составляет в расчете на 15000 м^3 2651000 (два миллиона шестьсот пятьдесят одна тысяча) рублей.

Главный инженер

 Н.В. Фесюн



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

СКТБ «НИИстройдормаш»

Юридический адрес: 660079 Красноярск, ул. 60 лет Октября, д. 105 ИНН/КПП:

2464230167/246401001

Телефон: (8-391) 236-47-07 e-mail: sibniisdsm@mail.ru

Утверждаю:

Директор ООО СКТБ

«НИИстройдормаш», к.т.н.

В.Г. Жубрин

2010 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы кандидата технических наук, доцента
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
СЕРГЕЯ ИВАНОВИЧА ВАСИЛЬЕВА

Конструкторским отделом СКТБ при проектировании систем привода рабочих органов траншейных экскаваторов применяются следующие результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Методология расчета динамических нагрузок при разработке мерзлых грунтов и определения мощности системы привода землеройных машин в программе моделирования SIMULINK системы математического исследования MATLAB, учитывающая характер действующих нагрузок, температурных профилей промерзания грунта и законов распределения гравийно-галечниковых включений.

2. Полная имитационная модель «DYNAMICSPower» гидромеханической системы привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора, имеющая пятый порядок, применяемая для исследования динамических процессов изменения давления в напорных магистралях, угловой скорости вала гидромотора и рабочего органа, нормированной динамической мощности

3. Упрощенная математическая модель «HYDRODYNAMICS» гидромеханического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора второго порядка, обеспечивающая 25 процентов сокращения потребляемого процессорного времени при моделировании и снижение точности теоретических результатов не более 3 % во всем спектре нагрузок, действующих на систему привода при разработке мерзлого грунта и формализуемых в упрощенной модели осциллограммами.

4. Критерий оценки гидромеханических систем привода рабочих органов траншейных экскаваторов, представленный в виде нормированной динамической мощности на валу гидромотора привода роторного рабочего органа траншейного экскаватора.

Главный конструктор СКТБ

В.Л.Шустов





«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор по науке и международному сотрудничеству
ФГАОУ ВПО СФУ

С.В. Верховец

2010г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС

Результаты научных исследований докторанта кафедры «Проектирование и эксплуатация строительно-дорожных и транспортно-технологических машин» института нефти и газа Сибирского федерального университета **С.И. Васильева**, выполненных в рамках диссертационной работы, в частности:

- математическая модель вариаций давления в гидроприводе многоковшового роторного траншейного экскаватора в процессе разработки неоднородного грунта;
- регрессионные модели температурных профилей глубины промерзания однородных утепленных грунтов;
- Рекомендации по предохранению сезонно-мерзлого грунта от промерзания посредством укрытия поликарбонатным утеплителем до начала производства земляных работ.

Используются в учебном процессе кафедры «Проектирование и эксплуатация строительно-дорожных и транспортно-технологических машин» и используются при подготовке магистров по направлению 15040068.68 «Технологические машины и оборудование» по образовательным программам 15040068.14 «Строительно-дорожные машины» 150400.68.01 «Машиноведение и детали машин».

Зав. кафедрой ПЭСТМ, д.т.н., профессор,
Заслуженный изобретатель РФ,
член-корр. СО МАН ВШ

Ереско Сергей Павлович.



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ЗАО «НИИСтройдормаш»

Юридический адрес: 660079 Красноярск
ул. 60 лет Октября, д. 105
Для писем: 660079, 60 лет Октября, 105
Телефон: (8-3912)36-33-06, факс (8-3912)36-41-56
e-mail: Sibniisd@mail.ru

ИНН/КПП: 2464084389/246401001
Р/с 40702810831000001337 в ЗАО КБ«КЕДР», г. Красноярск
К/с 30101810100000000819
БИК 040436819 ОКПО 00240980
ОКОНХ 95130,14511,14512,14941

Утверждаю
Генеральный директор
ЗАО «НИИСтройдормаш»



В.Л.Шустов
2010 г.

Акт внедрения

результатов диссертационной работы кандидата технических наук, доцента
ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
ВАСИЛЬЕВА СЕРГЕЯ ИВАНОВИЧА
в ЗАО «НИИСтройдормаш».

Техническое предложение по модернизации привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора ЗАО «НИИСтройдормаш», выполненное доцентом ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» ВАСИЛЬЕВЫМ СЕРГЕЕМ ИВАНОВИЧЕМ, принято к использованию в конструкторском отделе ЗАО «ВНИИСтройдормаш», г. Красноярск.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения модернизированной конструкции привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора составляет 630000 (шестьсот тридцать тысяч рублей).

Зам генерального директора
по научной работе, канд.техн.наук

В.Г. Жубрин



УТВЕРЖДАЮ

Исполнительный директор
А.В. Фёдоров
«10» сентября 2012г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**Результатов диссертационной работы кандидата технических наук, доцента каф.
«Бурение нефтяных и газовых скважин» ФГАОУ ВПО Сибирский Федеральный
университет г. Красноярск
Васильева Сергея Ивановича**

В практике производства вскрышных работ месторождений полезных ископаемых применены результаты научных исследований, полученных в диссертационной работе:

- Метод обоснования и определения оптимальных параметров полимерных порошковых по ТУ 2254-001-02067876-2009, примененных при предварительной подготовке грунтов к разработке в зимний период года, основанный на учете температурных профилей промерзания грунта пат.РФ 2411267 МКП СО08Л61/24 СО 8J/06 (Васильев С.И., Мелкозеров В.М.);
- Рекомендации по определению глубины промерзания суглинка, супеси и глины при различных коэффициентах термического сопротивления с учетом эффекта бокового промерзания утепленного грунта;
- Зависимости коэффициента теплопроводности снега от плотности при различных отрицательных температурах.

**Заместитель исполнительного директора –
технический директор**

Н.И. Лалетин



ООО «ДПМК Ачинская»

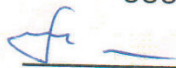
Россия 662153, Красноярский край,
г. Ачинск, Южная Промзона,
квартал V, строения 12

Тел.: (39151) 6-95-00
Факс: (39151) 6-95-54, 6-70-94
ИНН 2443018219
E-mail: dpmk@mail.ru

УТВЕРЖДАЮ:

Директор

ООО ДПМК Ачинская

 Ю.А. Лебедев

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результатов диссертационной работы кандидата технических наук, доцента
каф. ПТМИР ФГАОУ ВПО Сибирский федеральный университет г. Красноярск
Васильева Сергея Ивановича

В практике строительства дорог Богучанского района Красноярского
края применены результаты научных исследований, полученные в
диссертационной работе:

- Метод обоснования и определения оптимальных параметров полимерных поропластов, примененных при предварительной подготовке грунтов к разработке в зимний период года, основанный на учете температурных профилей промерзания грунта пат. РФ № 2411267, СО8L 61\24 СО8J 9\06 (Васильев С.И., Мелкозеров В.М.)
- Рекомендации по определению глубины промерзания суглинка, супеси и глины при различных коэффициентах термического сопротивления с учетом эффекта бокового промерзания утепленного грунта;
- Зависимости коэффициента теплопроводности снега от плотности при различных отрицательных температурах.



Главный механик

ООО «ДПМК Ачинская»



С.Л.Деревягин

Вход. № 284
«13» 02.20 12.
подпись



РОСИНФОРМРЕСУРС
Красноярский Центр научно-технической информации

660017, г. Красноярск, пр. Мира, 108

тел. 22-13-98, 22-45-15, факс 22-29-88

Исх. № 238 от 01.12.08

на Ваш исх. № _____

Справка

Научные работы к.т.н., доцента Васильева Сергея Ивановича по темам:
«Способ предохранения грунтов Восточно-сибирского региона от промерзания с использованием инновационных материалов» №029-077-2008, «Мобильный промышленный комплекс по производству в полевых условиях полимерного теплоизоляционного материала и сорбентов» №029-078-2008 включены в базу данных «Промышленные инновации России» в качестве основы для разработки и внедрения методики предохранения грунтов Восточной Сибири от сезонного промерзания и утверждения конкретных федеральных и региональных технологических программ.

Директор Красноярского ЦНТИ

Аганов О.Г.

Исполнитель: Соколова Л.С
Тел: 8(391) 223-16-06
e-mail: operator@cnti.krsn.ru

Приложение П2. ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Мехдорстрой»

г. Якутск республика Саха

С.И. Ефимов



РАСЧЕТ

экономического эффекта применения карбамидного пенопласта для предотвращения от сезонного промерзания грунтов Восточно-Сибирского региона при выполнении работ по экскавации мерзлого грунта

Экономическая эффективность технологических и организационных мероприятий характеризуется соотношением экономического эффекта, полученного за год (или за определенный объем работ), и затрат, обусловленных внедрением технологических решений [1].

Экономический эффект от применения карбамидного пенного утеплителя выражается показателем экономии на единицу продукции, т. е. экономии затрат на экскавацию 1 м³ мерзлого грунта

1. Расчет затрат на эксплуатацию экскаватора

Затраты от использования карбамидной пены-утеплителя для подготовительных работ по экскавации грунта применительно к экскаватору 5 – ой размерных групп – экскаватор типа ЭО 5122 на гусеничном ходу - определяются с учетом переменных и постоянных издержек, связанных с эксплуатацией экскаватора (формула 1) [2].

$$C_{\text{экс}} = C_{\text{пер}} + C_{\text{пост}} \quad (1)$$

Где $C_{\text{пер}}$ – переменные расходы на 1 м³, руб.,

$C_{\text{пост}}$ – постоянные расходы на 1 м³, руб.

Затраты определяются исходя из расчета на 1 м³ экскавации грунта.

Годовая программа для предприятия условно принимается 15000 м³.

Эксплуатационные переменные затраты на экскаватор 4-ой размерной группы определяются по отдельным статьям калькуляции с учетом амортизационных отчислений и капитального ремонта по формуле 2.

$$\Sigma C_{\text{пер}} = C_{\text{оп}} + C_{\text{зр}} + C_{\text{зт}} + C_{\text{м}} + C_{\text{э}} + C_{\text{см}} + C_{\text{гж}} + C_{\text{мр}} + C_{\text{ич}} + C_{\text{пб}} + C_{\text{кр}} + C_{\text{ам}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{оп}}$, $C_{\text{зр}}$, $C_{\text{зт}}$ – заработная плата операторов техники; рабочих, выполняющих операции технологического процесса вручную; ремонтных рабочих, выполняющих техническое обслуживание и текущий ремонт машины, руб.;

$C_{\text{м}}$ – затраты на материалы, используемые в технологическом процессе, руб.;

$C_{\text{э}}$ – затраты на энергоносители, руб.;

$C_{\text{см}}$ – затраты на смазочные материалы, руб.;

$C_{\text{гж}}$ – затраты на гидравлическую жидкость, руб.;

$C_{\text{мр}}$ – затраты на материалы для технического обслуживания и текущего ремонта, руб.;

$C_{\text{ич}}$ – затраты на замену быстроизнашивающихся частей, руб.;

$C_{\text{пб}}$ – затраты на перебазировки, руб.;

$C_{\text{кр}}$ – затраты на капитальный ремонт, руб.;

$C_{\text{ам}}$ – амортизационные отчисления, руб..

Заработная плата машинистов экскаватора в расчете на 1 м³ определяется по формуле:

$$C_{\text{оп}} = (K_p \cdot T_r \sum_{i=1}^n C_{Ti}) / B \quad (3)$$

где K_p – коэффициент, учитывающий все виды доплат к заработной плате и начисления (в том числе районные коэффициенты, доплаты за работу во 2-ю и 3-ю смены);

T_r – количество машино-часов работы машины в году, маш-ч;

C_{Ti} – часовая тарифная ставка рабочего i -го разряда, соответствующая действующим ставкам, например, на основе отраслевого тарифного соглашения, руб.

B – годовой объем экскавации грунта, м^3 .

Заработная плата рабочих, выполняющих технологические операции вручную, определяются методами технического нормирования с учетом действующих тарифных ставок, и рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{зр}} = Z_p \cdot K_p \cdot B_p \quad (4)$$

где Z_p – расценка за выполнение ручных операций, руб.;

B_p – объем ручных работ, приходящийся на 1 м^3 разработанного грунта, ч.

Затраты на заработную плату ремонтных рабочих рассчитываются следующим образом:

$$C_{\text{зт}} = (C_{\text{ср}} \cdot K_p \cdot T_p \cdot \tau_{\text{уд}}) / B \quad (5)$$

где $C_{\text{ср}}$ – средняя часовая тарифная ставка работ по ремонту машин, руб.;

$\tau_{\text{уд}}$ – удельная трудоемкость технического обслуживания и текущего ремонта, чел-ч/ м^3 .

Нормативные и расчетные коэффициенты $\tau_{\text{уд}}$ для экскаватора 5-й размерной группы принимают следующие значения 0,302 и 0,364 соответственно [3].

T_p – время, отведенное на ремонт машин в год, ч.

Затраты на материалы, используемые в технологическом процессе, определяются по формуле:

$$C_{\text{м}} = \sum P_{\text{mj}} \cdot W_{\text{mj}}, \quad (6)$$

где P_{mj} – цена 1 кг. j -го материала, руб.;

W_{mj} – удельный расход материала, кг/ м^3 ;

Затраты на энергоносители для двигателей внутреннего сгорания рассчитываются по формуле:

$$C_3 = (P_T \cdot w_T \cdot T_T) / B, \quad (7)$$

где P_T – цена 1 кг. топлива, руб.;

w_T – часовой расход топлива, кг.;

T_T – время работы двигателей внутреннего сгорания в год, ч.

При этом часовой расход топлива определяется формулой:

$$w_T = 1,03 \cdot 10^{-3} N_{\text{ен}} \cdot g_{\text{ен}} \cdot K_N \cdot K_{\text{дв}} \cdot K_{\text{дм}} \quad (8)$$

где $N_{\text{ен}}$ – номинальная мощность двигателя, л.с.;

$g_{\text{ен}}$ – удельный расход топлива при номинальной мощности, г/л.с.ч.;

K_N – коэффициент, учитывающий изменение расхода топлива в зависимости от степени использования двигателя по мощности;

$K_{\text{дв}}$ – коэффициент использования двигателя по времени;

$K_{\text{дм}}$ – коэффициент использования двигателя по мощности.

Значения K_N могут быть приняты с использованием таблицы 1.

Значения коэффициентов $K_{\text{дв}}$ и $K_{\text{дм}}$ для экскаваторов 5 размерной группы приняты соответственно 0,9 и 0,5 [3].

Таблица 1

$N_{\text{ен}}$	$g_{\text{ен}}$	Значение K_N при соответствующих значениях $K_{\text{дм}}$								
		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,66	0,7	0,8	0,9
Тракторные дизели										
40	185	1,19	1,14	1,09	1,06	1,025	1,0	0,97	0,94	0,93
80	185	1,28	1,215	1,16	1,12	1,09	1,07	1,05	1,015	0,99
100	175	1,26	1,20	1,14	1,11	1,08	1,07	1,05	1,03	1,02
180	175	-	-	-	-	1,06	1,01	0,97	0,92	0,85
250	160	1,21	1,17	1,12	1,11	1,09	1,07	1,06	1,04	1,03
330	170	1,39	1,24	1,21	1,16	1,09	1,07	1,0	0,97	0,96
370	165	1,25	1,22	1,16	1,13	1,12	1,07	1,06	1,02	1,01

Затраты на смазочные материалы для техники с приводом от двига-

телей внутреннего сгорания рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{см}} = (K_{\text{сг}} \cdot C_3) / B, \quad (9)$$

где $K_{\text{сг}}$ – коэффициент перехода от годовых затрат на топливо к затратам на смазочные материалы ($K_{\text{сг}} = 0,19-0,22$).

Затраты на гидравлическую жидкость рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{гж}} = (V_{\text{г}} \cdot q_{\text{м}} \cdot P_{\text{гж}} \cdot k_{\text{д}} \left(\frac{T_{\text{г}}}{T_{\text{м}}} \right)) / B, \quad (10)$$

где $V_{\text{г}}$ – емкость гидросистемы, дм^3 ;

$q_{\text{м}}$ – объемная масса гидравлической жидкости, кг/дм^3 ;

$P_{\text{гж}}$ – цена 1 кг. гидравлической жидкости, руб.;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доливок ($k_{\text{д}} = 1,5$);

$T_{\text{м}}$ – периодичность замены гидравлической жидкости, маш-ч.

Затраты на материалы для технического обслуживания и текущего ремонта определяются по нормативам пропорционально первоначальной стоимости (цене) машины, отнесенные к 1 м^3 разрабатываемого грунта:

$$C_{\text{м}} = (P_0 \cdot \left(\frac{H_{\text{р}}}{100} \right)) / B, \quad (11)$$

где P_0 – первоначальная цена машины, руб.;

$H_{\text{р}}$ – норма годовых затрат на все виды технического обслуживания и ремонта, %.

Затраты на замену быстроизнашивающихся узлов и деталей рассчитываются по отношению к 1 м^3 разрабатываемого грунта по формуле:

$$C_{\text{ич}} = \left(\sum_{j=1}^m P_j \cdot n_j \cdot \left(\frac{T_{\text{г}}}{T_{\text{сл}j}} \right) \right) / B, \quad (12)$$

где m – количество видов быстроизнашивающихся узлов и деталей;

P_j – цена 1 шт. быстроизнашивающейся j -й части, руб.;

n_j – количество одновременно заменяемых быстроизнашивающихся j -х частей, шт.;

$T_{\text{сл}j}$ – нормативный срок службы быстроизнашивающихся j -х частей, маш-ч.

Затраты на перебазировки экскаватора определяются различными методами в зависимости от способа перемещения с объекта на объект и рассчитываются по отношению к 1 м^3 разрабатываемого грунта по формуле:

$$C_{\text{пб}} = (P_{\text{пб}} \cdot n_{\text{пб}}) / B, \quad (13)$$

где $P_{\text{пб}}$ – затраты (цена) на одну перебазировку, руб.;

$n_{\text{пб}}$ – число перебазировок в течение года;

а) при перемещении экскаватора своим ходом затраты на одну перебазировку рассчитываются следующим образом:

$$P_{\text{пб}} = (C_{\text{оп}} + C_{\text{з}} + C_{\text{см}}) \cdot \left(\frac{T_{\text{пб}}}{T_{\text{г}}} \right) / B, \quad (14)$$

где $T_{\text{пб}}$ – продолжительность одной перебазировки, маш-ч;

б) при перемещении техники без разборки (или с частичной разборкой) на трейлере затраты на перебазировки можно рассчитать так:

$$P_{\text{пб}} = \left[\left(C_{\text{тр}} + \left(\frac{B \cdot C_{\text{оп}}}{T_{\text{г}}} \right) + C_{\text{вр}} \right) \cdot T_{\text{пр}} / B \right], \quad (15)$$

где $C_{\text{тр}}$ – часовой тариф использования трейлера, руб.;

$C_{\text{вр}}$ – часовая ставка заработной платы вспомогательных рабочих, руб.;

$T_{\text{пр}}$ – время погрузки-разгрузки машины, ч.

Затраты на капитальный ремонт в расчете на 1 м^3 могут быть определены по формулам:

$$\text{а) } C_{\text{кр}} = P_{\text{кр}} \cdot \left(T_{\text{г}} \cdot \frac{k_{\text{ч}}}{T_{\text{мр}}} \right) / B, \quad (16)$$

$$\text{б) } C_{\text{кр}} = (C_{\text{ср}} \cdot K_{\text{р}} \cdot \tau_{\text{кр}} + C_{\text{зчк}}) \cdot \left(T_{\text{г}} \cdot \frac{k_{\text{ч}}}{T_{\text{р}}} \right) / B, \quad (17)$$

где $P_{\text{кр}}$ – средние затраты на один капитальный ремонт, руб.;

$k_{\text{ч}}$ – коэффициент перехода от мото-часов к машино-часам;

$T_{\text{мр}}$ – ресурс до капитального ремонта, мото-час;

$C_{\text{ср}}$ – средняя часовая тарифная ставка работ по ремонту машин, руб.;

$\tau_{\text{кр}}$ – трудоемкость капитального ремонта, чел-ч;

$C_{\text{зчк}}$ – расход запасных частей на один капитальный ремонт, руб.

Расход запасных частей на один капитальный ремонт можно приближенно рассчитать по формуле:

$$C_{зчк} = H_{зчк} \cdot P_0 \quad (18)$$

где $H_{зчк}$ – доля затрат на запасные части от первоначальной цены машины

Значения $\tau_{кр}$ и $H_{зчк}$ для экскаватора представлены в таблице 2 [3].

Таблица 2

Трудоемкость капитального ремонта и доля затрат на запасные части

Показатель	Индекс машины
	Э5
$\tau_{кр}$, чел-ч	2000
$H_{зчк}$	0,362

Кроме указанных выше затрат, связанных непосредственно с производством услуг, при эксплуатации экскаватора на 1 м³ в смету затрат входят прочие затраты общехозяйственного характера, например затраты, связанные хранением, транспортировкой карбамидного пенопласта.

В фактические издержки предприятия при составлении отчетной калькуляции, кроме перечисленных, включаются также: потери от брака, потери от простоев по внутрипроизводственным причинам, выплаты работникам, увольняемым с предприятия в связи с его реорганизацией, сокращением численности работников [4].

Все эти прочие расходы носят внепроизводственный общеприемный характер, а поэтому должны относиться на себестоимость единицы продукции, работ или на затраты на эксплуатацию единицы техники косвенным путем.

Кроме указанных ранее затрат ($C_{пер}$), приведенных в таблице 3, дополнительно учитываются и постоянные затраты, например, косвенные затраты на заработную плату административно-управленческого, вспомога-

тельного и обслуживающего персонала, косвенные материальные издержки (общепроизводственного и непроизводственного характера), а также прочие косвенные расходы (на маркетинговые исследования, на подготовку производства новых видов услуг, на рекламу и т.п.), суммарные производственно-хозяйственные расходы, относимые на эксплуатационные затраты экскаватора и др. Принимаем постоянные затраты на 1 м³ в размере 248,60 руб. (усредненное значение для Северных территорий).

Таблица 3

Эксплуатационные переменные затраты ($C_{\text{пер}}$)

Показатели на 1 м ³ , руб.	Показатели на 1 м ³ , руб.									
	$\sum C_{\text{зп}}$	$C_{\text{э}}$	$C_{\text{м}}$	$C_{\text{см}}$	$C_{\text{гж}}$	$C_{\text{мр}}$	$C_{\text{ич}}$	$C_{\text{пб}}$	$C_{\text{кр}}$	$C_{\text{ам}}$
	331,90	353,75	74,87	77,83	75,80	100,52	60,24	49,05	136,28	223,46
Итого $C_{\text{пер. руб}}$	1483,70									

где $\sum C_{\text{зп}} = C_{\text{оп}} + C_{\text{зр}} + C_{\text{зт}}$;

Суммарные эксплуатационные затраты в расчете на 1 м³ экскавации грунта экскаватором рассчитываются по формуле 1:

$$C_{\text{экс}} = C_{\text{пер}} + C_{\text{пост}},$$

$$C_{\text{экс}} = 1483,70 + 248,60 = 1732,30 \text{ руб.}$$

Расчетный тариф на экскавацию 1 м³ грунта составляет

$$T = C_{\text{экс}} \cdot R = 1732,3 \cdot 1,2 = 2078,76 \text{ руб.}$$

где R – уровень рентабельности.

2. Расчет сопутствующих затрат для подготовки к экскавации поверхностного и нижнего слоев мерзлого грунта глубиной 2 м.

Ниже приведены два способа укрупненного расчета сопутствующих затрат на экскавацию (базовый и проектный варианты).

Первый способ: Использование традиционного способа круглосуточного

разогрева с применением угля (базовый вариант)

Исходные данные расчета:

годовой объем производства работ – 15 тыс. м³, условия работы - северные территории Западной и Восточной Сибири с сезонно- мерзлым грунтом. За расчетную единицу применяется площадь разогрева грунта площадью 10 м² глубиной 2 м., время на транспортировку угля - 2 часа; тариф на груженный и порожний пробег транспортного средства принимается в одинаковом размере и составляет 280 руб.; цена 1 т бурого угля - 760 руб.; расход угля для разогрева грунта площадью на 10 м² - 1,8 т.

Расчет затрат на разогрев мерзлого грунта:

- транспортировка угля

$$C_{\text{тр}} = 280 \cdot 2 = 560 \text{ руб.};$$

- стоимость угля, используемого для разогрева поверхностного слоя грунта

$$C_{\text{уг}} = 760 \cdot 1,8 = 1368 \text{ руб.}$$

- стоимость производства работ: разбрасывание угля на площади 10 м², дежурство рабочего в течение шести суток (в период разогрева), т.е. 144 часа, часовая тарифная ставка – 17 руб. (по укрупненным данным предприятия).

- прочие затраты принимаем в размере 20% от общих затрат.

$$C_{\text{раз}} = 17 \cdot 144 \cdot 1,2 = 2937,6 \text{ руб.}$$

Суммарные сопутствующие затраты для экскавации с применением угля

$$C_1 = 560 + 1368 + 2937,6 = 4865,60 \text{ руб.}$$

Второй способ подготовки почвы для экскавации - методом утепления карбамидным пенопластом

Исходные данные:

- цена карбамидной пены 1 м³ - 330 руб. (по данным предприятия-изготовителя),

- расходы пены на утепление площади 5 м² - 1 м³ карбамидной пены

утеплителя;

- расходы на транспортировку пены определяется аналогично первому способу, но с учетом расходов на разбрасывание (укладку) пены принимаются 670 руб.

Расчет затрат на утепление сезонно-мерзлого грунта:

Затраты на пену для утепления грунта площадью 10 м^2

$$C_{\text{пены}} = 330 \cdot 2 = 660 \text{ руб.}$$

Суммарные сопутствующие затраты в условиях производства с подготовительными работами по утеплению грунта с использованием карбамидного пенопласта

$$C_2 = 670 + 660 = 1330 \text{ руб.}$$

3. Экономия затрат на экскавацию 1 м^3 сезонно-мерзлого грунта

Суммарные эксплуатационные затраты в расчете на 1 м^3 экскавации грунта в базовом и проектном вариантах одинаковые и составляют 1732,30 руб.

Суммарные сопутствующие затраты на разогрев грунта по базовому и проектному вариантам составляют:

Базовый вариант $C_1 = 4865,60 \text{ руб.}$

Проектный вариант $C_2 = 1330,00 \text{ руб.}$

Общие затраты (эксплуатационные и сопутствующие) составляют:

Базовый вариант $C_{\text{баз}} = 6597,90 \text{ руб.}$

Проектный вариант $C_{\text{проект.}} = 3062,30 \text{ руб.}$

Экономия от использования проектного варианта производства работ составляет:

$$\mathcal{E}_{10\text{м}^2} = 6597,90 - 3062,30 = 3535,6 \text{ руб.}$$

Учитывая, что объем экскавации мерзлого грунта на площади 10 м^2 составляет 20 м^3 экономия на 1 м^3 составляет

$$\mathcal{E}_{1\text{м}^3} = 3535,6 / 20 = 176,78 \text{ руб.}$$

4. Экономический эффект производства земляных работ с утеплением карбамидным пенопластом

Принятый годовой объем производства работ (по данным ООО «Мехдорстрой» г. Якутск) 15 тыс. м³. Экономия от снижения затрат в проектном варианте в пересчете на годовой объем производства работ составит:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 176,78 \cdot 15000 = 2\,651\,000 \text{ руб.}$$

Таким образом, использование метода подготовки грунта к экскавации с применением карбамидного пенопласта дает возможность предприятию получить годовой эффект при производстве работ по экскавации мерзлого грунта в размере 2 651 000 (два миллиона шестьсот пятьдесят одну тысячу) руб.

СОГЛАСОВАНО:

Главный бухгалтер

 /Зуева И.Г./

Начальник производственно-
технического отдела

 /Заморшиков В.И./



Данные укрупненного расчета затрат на разогрев грунта для экскавации сведем в табл. 4. Гистограмма методики оценки сравнительной экономической эффективности приведена на рис. 1. Результаты расчета технико-экономической эффективности предохранения грунтов от сезонного промерзания – табл. 5.

Таблица 4 – Укрупненный расчет затрат на разогрев грунта для экскавации

Статьи затрат	Базовый вариант (способ круглосуточного разогрева с применением угля)		Проектный вариант (метод утепления карбамидным пенопластом)	
Стоимость материалов применяемых для технологического процесса	Количество угля в т. при разрабатываемой площади 10 м ³ и глубине 2 м	1,8	Количество карбамидного поропласта в м ³ при разрабатываемой площади 10 м ³ и глубине 2 м	2
	Стоимость 1 т. угля в руб.	760	Стоимость 1 м ³ карбамидной пены в руб.	330
	Площадь разогрева грунта, м ²	10	Площадь разогрева грунта, м ²	10
	Стоимость угля в руб. с учетом разрабатываемой площади	1368	Стоимость карбамидного поропласта в руб. с учетом разрабатываемой площади	660
Стоимость транспортировки материалов применяемых для технологического процесса	Тариф на транспортировку угля, в руб.	560	Тариф на транспортировку карбамидного поропласта с учетом расходов на разбрасывание (укладку), в руб.	670
Стоимость прочие затраты	Период разогрева в часах	144		
	Часовая тарифная ставка в руб.	17		
	Коэффициент при расчете прочих затрат	1,2		
	Прочие затраты в руб.	2937,6	Прочие затраты в руб.	
Суммарные затраты (дополнительные) на разогрев грунта для экскавации	Суммарные затраты в руб. с применением угля	4865,6 руб.	Суммарные затраты в руб. с применением карбамидной пены	1330
Затраты (основные) на экскавацию грунта	Затраты на экскавацию грунта в руб.	1732,3	Затраты на экскавацию грунта в руб.	1732,3
Суммарные затраты (основные + дополнительные) на разогрев грунта для экскавации	Затраты на экскавацию грунта в руб.	6944,36	Затраты на экскавацию грунта в руб.	3408,76

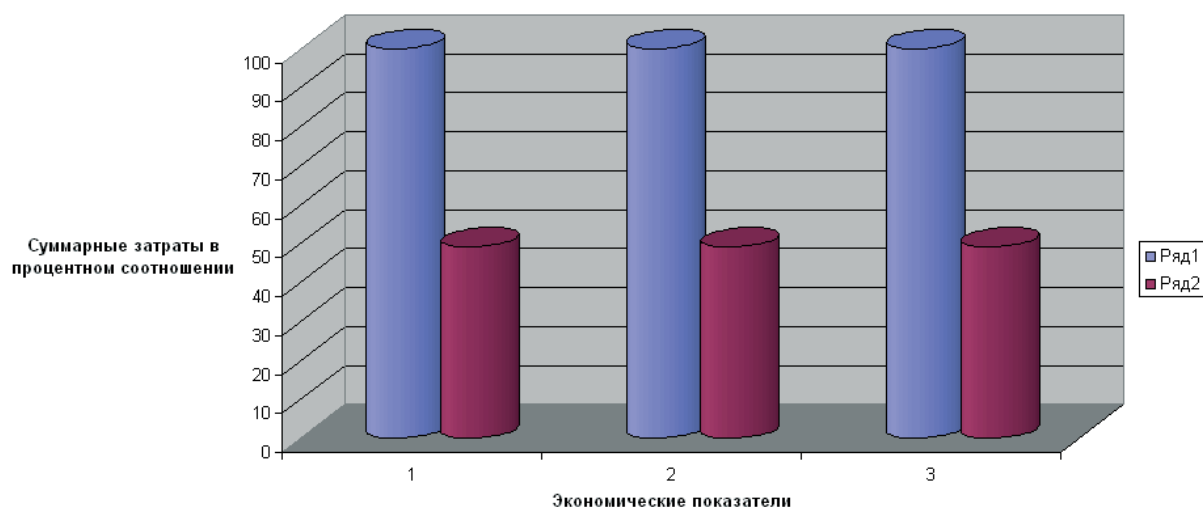


Рисунок 1 – Гистограмма методики оценки сравнительной экономической эффективности экскавации грунта для Базового и Проектного вариантов:
 1 – Суммарные затраты (основные + дополнительные) на разогрев грунта для экскавации; 2 – Стоимость экскавации грунта; 3 – Стоимость годового объема работ.
 Ряд 1 – Базовый вариант (способ круглосуточного разогрева с применением угля)
 Ряд 2 – Проектный вариант (метод утепления карбамидным поропластом)

Таблица 5 – Экономическая эффективность экскавации грунта

Статьи затрат	Базовый вариант (способ круглосуточного разогрева с применением угля)		Проектный вариант (метод утепления карбамидным пенопластом)	
Стоимость экскавации грунта	Площадь разогрева грунта площадью в м ²	10	Площадь разогрева грунта площадью в м ²	10
	Глубина разогрева в м	2	Глубина разогрева в м	2
	Суммарные затраты (основные + дополнительные)	6944,36	Суммарные затраты (основные + дополнительные)	3408,76
	Стоимость экскавации грунта в руб.	347,22	Стоимость экскавации грунта в руб.	170,44
Стоимость годового объема работ	Годовой объем Производства работ, в м ³	15000	Годовой объем Производства работ, в м ³	15000
	Стоимость экскавации 1 м ³ грунта в руб.	347,22	Стоимость экскавации 1 м ³ грунта в руб.	170,44
	Стоимость годового объема работ в руб.	5208300	Стоимость годового объема работ в руб.	255 600

Приложение ПЗ. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ПОРОПЛАСТЫ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Федеральное государственное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ОКП 22 5420

Группа Л27



УТВЕРЖДАЮ

Ректор СФУ, академик
М.А. Ваганов Е.А. Ваганов
«28» декабря 2009г.

ПОРОПЛАСТЫ КОМПОЗИЦИОННЫЕ
Технические условия

ТУ 2254 – 001 – 02067876 – 2009
(Вводятся впервые)

Срок действия с 28.12.2009 г

РАЗРАБОТАНО

С.н.с. СФУ

В.М. Мелкозеров В.М. Мелкозеров
«14» декабря 2009г.

Доцент СФУ,

К.И. Васильев К.И. Васильев
«14» декабря 2009г.

Аспирант СФУ

А.Я. Вельп А.Я. Вельп
«14» декабря 2009г.

ПАСПОРТ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПОРОПЛАСТЫ

ПАСПОРТ БЕЗОПАСНОСТИ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ (Safety Data Sheet)

Внесен в Регистр	
РПБ № <u>5 8 1 7 1 9 1 8 . 2 2 . 2 9 2 8 4</u>	от «23» октября 2012 г.
	Действителен до «23» октября 2017 г.
Росстандарт	
Информационно-аналитический центр «Безопасность веществ и материалов» ФГУП «ВНИЦСМВ»	Руководитель 



НАИМЕНОВАНИЕ:

техническое (по НД)

Поропласты композиционные

химическое (по IUPAC)

Не имеет

торговое

Поропласты композиционные различных марок

синонимы

Не имеет

Код ОКП:

2 2 5 4 2 0

Код ТН ВЭД:

3 9 0 9 0 0 0 0 0 0

Условное обозначение и наименование основного нормативного, технического или информационного документа на продукцию (ГОСТ, ТУ, ОСТ, СТО, (M)SDS и т.д.)

ТУ 2254-001-02067876-2009. Поропласты композиционные.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОПАСНОСТИ:

Сигнальное слово: **Осторожно**

Краткая (словесная): Умеренно опасная по степени воздействия на организм продукция. Пыль продукции может оказывать раздражающее, фиброгенное и сенсибилизирующее действие. Трудногорючее вещество. Может загрязнять окружающую среду.

Подробная: в 16-ти прилагаемых разделах паспорта безопасности.

ОСНОВНЫЕ ОПАСНЫЕ КОМПОНЕНТЫ	ПДКр.з, мг/м ³	Класс опасности	№ CAS	№ ЕС
Смола карбаминоформальдегидная	не установлена	нет	9011-05-6	отсутствует
Формальдегид	0,5	2	50-00-0	200-001-8

ЗАЯВИТЕЛЬ: ООО «ПТМ-ТЕСТ», г. Красноярск
(наименование организации) (город)

Тип заявителя: производитель, поставщик, продавец, экспортер, импортер
(ненужное зачеркнуть)

Код ОКПО: 5 8 1 7 1 9 1 8

Телефон экстренной связи:

Руководитель организации-заявителя:



(подпись)

/С.И. Васильев /
расшифровка