

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –  
МОСКОВСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
ИМЕНИ К.А ТИМИРЯЗЕВА»  
(ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА)

На правах рукописи

**Макаров Александр Алексеевич**

**УЛУЧШЕНИЕ АГРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ ПРИМЕНЕНИЕМ  
МЕЛИОРАТИВНОГО РЫХЛИТЕЛЯ ОБЪЁМНОГО ТИПА**

Специальность: 4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
**Балабанов Виктор Иванович**

Москва – 2023 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Характеристика почвенно-климатических условий Нечернозёмной зоны России .....	11
1.2 Природно-климатические условия объектов полевых исследований.....	24
1.3 Оценка состояния полей, выбывших из сельскохозяйственного оборота.....	29
1.4 Роль глубокого мелиоративного рыхления в системе культуртехнических работ и земледелия.....	38
1.5 Обзор конструкций мелиоративных рыхлителей.....	46
1.6 Обзор и анализ патентов и технических предложений по конструкции рабочих органов рыхлителей объёмного типа.....	55
1.7 Обзор и анализ исследований в области физических основ рыхления почвы.....	58
1.8 Цель и задачи исследований.....	65
ВЫВОДЫ по ГЛАВЕ 1.....	66
ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЫХЛЕНИЯ.....	68
2.1 Анализ формирования потребительских свойств мелиоративных рыхлителей.....	68
2.2 Оценка воздействия неровностей поверхности поля на неравномерность глубины рыхления.....	72
2.3 Формирование физико-математической модели процесса рыхления.....	78
2.3.1 Кинематика элемента почвы. Действующие силы и напряжения при объёмном мелиоративном рыхлении.....	78
2.3.2 Расчёт силы сопротивления грунта рыхлению на основе известных теорий разрушения.....	84
2.4 Оценка качества рыхления методом фрактального анализа.....	89
ВЫВОДЫ по ГЛАВЕ 2.....	94
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	96

3.1 Методика проведения экспериментов в лабораторных условиях.....	96
3.1.1 Лабораторная установка и измерительные приборы.....	96
3.1.2 Последовательность проведения экспериментов.....	99
3.2 Методика проведения полевых исследований на грунтах естественного сложения.....	108
3.3 Методика определения фрактальной размерности среза грунта.....	111
ВЫВОДЫ по ГЛАВЕ 3.....	114
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	115
4.1 Влияние параметров и конструкции рабочих органов на процесс рыхления.....	115
4.1.1 Обоснование выбора углов резания и установки боковых стоек.....	115
4.1.2 Обоснование выбора конструкции рабочего органа объёмного типа.....	121
4.1.3 Результаты исследований влияния влажности грунта на процесс рыхления.....	127
4.1.4 Исследование процесса деформации и перемещения слоёв грунта рабочим органом объёмного рыхлителя при маркировке слоёв цветным мелом.....	131
4.1.5 Результаты исследования процесса рыхления с дополнительным рабочим оборудованием.....	133
4.1.6 Определение объёма и массы перемещаемого и деформируемого грунта рыхлителями.....	137
4.2 Исследование процесса разрыхления грунта рабочим органом объёмного типа в полевых условиях.....	138
4.3 Изменение водно-физических свойств переуплотненных почв в результате их крошения мелиоративным объёмным рыхлителем.....	143
4.4 Влияние технологических свойств разрыхляемых почв на сроки проведения полевых работ.....	145
4.5 Расчет водопотребления картофеля при возделывании на бесструктурных землях.....	147
ВЫВОДЫ по ГЛАВЕ 4.....	149
ГЛАВА 5. ОСНОВЫ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА СОПРОТИВЛЕНИЯ РЫХЛЕНИЮ РАБОЧИМ ОРГАНОМ ОБЪЁМНОГО ТИПА.....	153
ВЫВОДЫ по ГЛАВЕ 5.....	157
ГЛАВА 6.	

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАВЕСНОГО ОБЪЁМНОГО МЕЛИОРАТИВНОГО РЫХЛИТЕЛЯ И ЕГО ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА.....	159
6.1 Технологические приёмы проведения работ при рыхлении.....	159
6.2 Расчёт экономической эффективности применения объёмного рыхлителя с дополнительными рыхлящими элементами.....	165
ВЫВОДЫ по ГЛАВЕ 6.....	170
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	171
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное). РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ОПЫТОВ ПЕРВОГО ЭТАПА.....	197
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное). ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ 3-Х ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....	199
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное). ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ 2-Х ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....	206
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (справочное). РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ОПЫТОВ ВТОРОГО ЭТАПА.....	214
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное). ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ.....	216
ПРИЛОЖЕНИЕ Е (справочное) ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ.....	217
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (справочное) СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА СИЛЫ ES-1-3 Т ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	218
ПРИЛОЖЕНИЕ И (справочное) ЗАПИСЬ УСИЛИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ.....	220
ПРИЛОЖЕНИЕ К (рекомендуемое) ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРЕДЛОЖЕНИЕ НА ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО.....	222
ПРИЛОЖЕНИЕ Л (справочное) ПАТЕНТЫ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ И СПРАВКИ О ВНЕДРЕНИИ.....	225



## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В России и во всём мире существует проблема деградации поверхностного слоя сельскохозяйственных угодий в связи с уплотнением корнеобитаемого слоя почвы. Проблема особенно актуальна при засолении почв, особенно на орошаемых землях, где формируются иллювиальные горизонты. Значительная часть сельскохозяйственных земель Нечернозёмной зоны России за последние десятилетия выбыли из сельхоз использования и потеряли свою прежнюю продуктивность и свойства, отвечающие рекомендуемым агромелиоративным требованиям. На других угодьях почвы обладают малой мощностью гумусового слоя, повышенной кислотностью. Такие почвы слабо оструктурены, имеют высокую плотность корнеобитаемого слоя, малую вместимость и низкий коэффициент фильтрации. Одним из видов агромелиоративных работ, направленных на восстановление утраченных почвенных свойств, является глубокое объемное рыхление. Однако существующие технические средства в достаточной мере не обеспечивают требуемых полноты и качества работ. В связи с этим научные исследования были направлены на обоснование режимов и технологий восстановления плодородия почв, рекомендаций по выбору параметров и конструкций мелиоративных глубокорыхлителей, оценке влияния технологических параметров на качество и полноту рыхления, энергетические показатели процесса, что является своевременной и актуальной научной задачей.

Работа выполнена в рамках комплексной Федеральной целевой программы «Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации» на 2022-2031 годы, а также программами НИР РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева на 2014-2023 годы.

**Степень разработанности темы исследования.** Полевые и лабораторные исследования по динамике влагозапасов в расчетном слое бесструктурных почв проводили зарубежные и отечественные ученые: Казаков В.С., Максименко В.П.,

Кирейчева Л.В., Плавинский В.А., Кулешова С. И. и другие. Методами расчета режима восполнения влаги (подачей дополнительных объемов различными способами или перераспределением имеющихся влагозапасов в расчетном слое почвы) занимались Аверьянов С.Ф., Маслов Б.С., Мезенцев В.С., Дубенок Н.Н., Дружинин Н.И., Алексанкин А.В., Голованов А.И., Пчелкин В.В., Харченко С.И. и др. Бесструктурные почвы имеют ряд особенностей водного режима. При обосновании режима регулирования влагозапасов в корнеобитаемом слое бесструктурной почвы важным элементом является диапазон их изменения, на величину которого влияют водно-физические характеристики почвы и биологические свойства возделываемых растений. Анализ научных работ Горячкина В.П., Ветрова Ю.А., Домбровского Н.Г., Зеленина А.Н., Томина Е.Д., Уродова В.И., др. позволил выявить основные закономерности блокированного взаимодействия рабочих органов машин с грунтом. Исследования процесса рыхления почвы культиваторами и чизельными плугами, результаты которых представлены в работах Токушева Ж.Е., Татарникова В.О., Путрина С.А., Ветохина В.И., Голубева В.В. и др., проводились в основном с глубиной обработки почв примерно до 0,5 м. Исследования рабочего органа объёмного типа в нескольких вариантах с режущими элементами в виде пространственного периметра и глубиной рыхления 0,8...1,2 м выполнены Казаковым В.С., Турсуновым Б.Н., Акимовым Н.В., Каифаш Ференцом и др. Установлено, что обоснованный выбор технологии и периодичности глубокого рыхления, увязка его с другими элементами агрономелиоративного комплекса даёт увеличение урожаев сельскохозяйственных культур до 30%.

**Цель исследований** – улучшение агрофизических свойств почв с применением объёмного рыхлителя усовершенствованной конструкции.

**Задачами исследований** являются:

– изучить и проанализировать основные агрофизические свойства почв полей, выбывших из сельскохозяйственного оборота и факторы, влияющие на восстановление и повышение плодородия бесструктурных тяжёлых почв, включая агрономелиоративные мероприятия.

– получить реальную картину физических процессов при глубоком рыхлении почв тяжёлого механического состава, сформировав математическую модель процесса и апробировав её на основании результатов экспериментальных исследований;

– оценить влияние неровностей рельефа поля и параметров машины на неравномерность глубины рыхления;

– провести экспериментальные исследования с использованием физических моделей рыхлителей и опытной установки для полевых условий;

– оценить качество рыхления методом фрактального анализа, а также трансформацию основных агрофизических свойств почв в результате их рыхления объёмным рыхлителем;

– выработать рекомендации по совершенствованию методов практического расчёта сил сопротивления рыхлению;

– разработать рекомендации производству и дать экономическую оценку эффективности технологии с применением рыхлителя предлагаемой конструкции.

**Объект исследования.** Конструкции и параметры рабочих органов мелиоративных рыхлителей, агрофизические свойства почв.

**Предмет исследования.** Трансформация основных агрофизических свойств почв, качественные и энергетические показатели их рыхления усовершенствованным объёмным мелиоративным рыхлителем.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

– установлены диапазоны изменения агрофизических свойств переуплотненных почв по глубине 0,8 м в результате проведения объёмного рыхления;

– изучен и описан процесс глубокого крошения бесструктурных почв объёмным глубокорыхлителем, позволяющий представить в аналитическом виде взаимосвязь конструктивных и технологических параметров рыхлителя и обрабатываемой среды, а также показатели качества разрыхления;

– обоснован выбор конструкции и параметров рабочих органов рыхлителей объёмного типа;

– предложена методика расчёта силы сопротивления рыхлению с учётом технологического процесса, условий работы и параметров объёмных рыхлителей.

**Теоретическая и практическая значимость.** Результаты диссертационных исследований позволили теоретически и экспериментально получить следующие решения:

– обоснованы режимы обработки переуплотненных почв с целью восстановления их плодородия;

– определены рациональная конструкция объёмного глубокорыхлителя и параметры, позволяющие обеспечить восстановление агрофизических свойств переуплотненных почв при заданной степени разрыхления с условием минимизации энергоёмкости процесса;

– получены эмпирические и практические результаты фиксации изменения агрофизических свойств и составляющих водного баланса в результате проведения глубокого рыхления;

– определены рациональная конструкция и параметры объёмного рыхлителя, позволяющие обеспечить необходимую степень разрыхления грунта, удовлетворяющую агротехническим требованиям при меньшей силе сопротивления (патенты № 136673 и №2376736 и другие).

– разработана конструкторская документация и изготовлена опытная установка для исследования процесса разрыхления грунта естественного сложения в полевых условиях;

– предложен метод расчёта силы сопротивления рыхлению рабочим органом объёмного типа с учётом условий работы и параметров рабочего органа;

– доказана применимость фрактальных методов при анализе качества разрыхления;

– описана реальная картина кинематики почвенных частиц в потоке при объёмном сжатии грунта и движении рабочего органа.

**Методология и методы исследования.** В работе применён комплексный метод исследований, заключающийся в теоретическом анализе и обобщении результатов предшествующих работ, проведении лабораторных и полевых

исследований, приёмов регулирования параметров почвенной среды с целью повышения плодородия почв. В работе использованы основы теории блокированного резания грунтов, теория прочности, в том числе теории Кулона-Мора, а также методы математической статистики и фрактального анализа, теории случайных функций и методов статистической динамики. Применён метод последовательных экспериментальных исследований для выбора приёмов восстановления продуктивности переуплотнённых почв объёмным мелиоративным рыхлением, рационального рыхлительного оборудования и основных параметров в лабораторных и полевых условиях с использованием стандартных методов и методик физического моделирования. При обработке и представлении опытных данных применялись методы корреляционного и дисперсионного анализа, теории вероятностей и математической статистики, а также инновационный комплексный способ оценки качества разрыхления с использованием методов фрактального анализа с использованием современных средств и прикладных программ Компас 3D, Mathcad, Gwyddion и других.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты улучшения агрофизических свойств переуплотнённых почв от воздействия на них глубокого рыхления, повышения урожайности картофеля на обработанных участках;
- обоснование рациональной конструкции и параметров мелиоративного рыхлителя объёмного типа, способствующей восстановлению и повышению плодородия бесструктурных почв, на основе теоретических представлений физических явлений процесса разрыхления вследствие объёмного сжатия, позволяющее сформировать в аналитическом виде взаимосвязь параметров процесса разрыхления грунта;
- способ оценки качества обработки почв рыхлителем с использованием методов фрактального анализа, а также влияния неровностей поля и параметров машины на неравномерность глубины рыхления (как показателя качества работы);
- метод расчёта сил сопротивления грунта крошению рабочим органом объёмного рыхлителя.

**Степень достоверности и апробация результатов исследований.**

Достоверность результатов исследования обеспечена использованием современных приборов и оборудования, применением цифровых технологий исследований и обработки опытных данных, большим объёмом экспериментальных исследований, сходимостью теоретических и опытных данных с вероятностью 95 %, полученных лабораторными и полевыми испытаниями.

Основные результаты исследований доложены, обсуждены и одобрены на международных научно–практических конференциях: МГУП, Всероссийском НИИ гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова (г.Москва); Всероссийском НИИ сельскохозяйственного использования мелиорированных земель (г. Тверь), Всероссийском НИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (г. Коломна), Национальном политехническом университете Армении (г. Ереван), а также на заседаниях кафедры «Организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ» РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А. Н. Костякова в период 2014 – 2023 годы.

**Внедрение.** Результаты диссертационного исследования прошли широкую апробацию и внедрены в ООО «Научно-производственное объединение ЭКАР», а также в учебный процесс РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева при курсовом проектировании и выполнении выпускных квалификационных работ.

**Публикации результатов исследований.** Результаты исследований и практические рекомендации опубликованы в 41 научной работе, в том числе 7 в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ, конструкторские решения реализованы в 5 патентах на изобретения и полезные модели.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных выводов и заключений по работе, списка используемых источников, включает 212 наименований, в том числе 17 – на иностранном языке и приложений. Диссертация изложена на 232 страницах, содержит 29 таблиц и 69 рисунков.

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

### **1. 1 Характеристика почвенно-климатических условий Нечернозёмной зоны России**

Нечерноземная зона России расположена в центральной и северной части Восточно - Европейской (Русской равнины), для которой характерны невысокие возвышенности (Валдайская, Среднерусская, Приволжская, Смоленская, Московская, Тиманский кряж, Северные Увалы). Высоты нигде не превышают 500 м, а средняя высота составляет около 170 м, что облегчает проникновение атлантических и арктических воздушных масс вглубь страны. Атлантические воздушные массы, сталкиваясь с холодным арктическим или прогретым континентальным воздухом, вызывают сильные дожди и снегопады. Здесь преобладает западный перенос воздушных масс и наибольшее влияние на климат страны оказывает Атлантический океан. Так как климат зоны складывается под интенсивным воздействием циклонической деятельности, характерной её особенностью является избыточное увлажнение. В северной части равнины расположены следы деятельности древних ледников в виде моренного холмисто - грядового рельефа Валдайской возвышенности. Характерной особенностью этой части равнины являются многочисленные озера, в том числе большие, и болота. С Валдайской возвышенности берут начало реки: Волга, Западная Двина, Днепр, Ловать, Мста, Пола, Сясь, Молога, Тверца и др. В центральной и южной частях равнины преобладает овражно - балочный рельеф. Как известно по В.В. Докучаеву, почвы формируются под влиянием климата, материнских горных пород, рельефа, растительности и животного мира, возраста земли. Эти факторы играют важную роль в выборе наиболее целесообразного способа мелиорации. Обширные территории, образованные флювиогляциальными и древнеаллювиальными отложениями полей, представляют собой равнинные низменности с незначительными дюнными повышениями пойменные ландшафты Русской равнины, приуроченные к полирельефным поймам, представлены повышенной,

легкой по гранулометрическому составу, прирусловой, суглинистой плоской центральной и глинистой пониженной притеррасной поймами.

Хотя природно-климатические и хозяйственно-экономические условия зоны отличаются большим разнообразием, что необходимо учитывать при выполнении сельскохозяйственных, водохозяйственных и мелиоративных работ при строительстве, эксплуатации и первичном или вторичном освоении земель, зона, в том числе благодаря центральному географическому и экономическому положению, имеет многие благоприятные для развития сельского хозяйства факторы, позволяющие получать здесь более устойчивые урожаи сельскохозяйственных культур, даже чем в южных районах страны. [53, 54, 58]. Повышенная увлажнённость дерновых и дерново-подзолистых почв Нечернозёмной зоны является очень важным положительным агрономическим свойством, в результате которого сельскохозяйственная производительность этих почв может быть сравнительно быстро поднята при помощи агротехнических и мелиоративных мероприятий.

В Нечерноземной зоне насчитывается шесть генетически резко отличных по своим свойствам глинистых почвообразующих пород, на которых формируются однородные по генезису подзолистые и болотно-подзолистые почвы, существенно отличающиеся по своим свойствам, в частности по водопроницаемости. Свойства почв определяются генезисом и составом почвообразующих пород, гидрологическими условиями, а в свою очередь генезис и состав почвообразующих пород предопределяют рельеф территории, вековые процессы его формирования и развития. Почвенный покров Нечерноземной зоны представлен в основном подзолистыми (33,5%), формирующимися под пологом хвойных и смешанных лесов в условиях превышения осадков над испарением при возникновении нисходящих токов воды и дерново-подзолистыми (35%) почвами различного механического состава и разной степени подзоленности [34].

Около 40% площади земель Нечерноземной зоны закреплено за предприятиями, занимающимися сельскохозяйственным производством, в гослесфонде находится примерно 17...18 %. Многие поля в зоне имеют сложную



конфигурацию, вызванную неровностями рельефа, конфигурацией опушек леса, речек, ручьев, канав, дорог и ям. Удельный вес таких полей в зоне более 60 %. На большей части сельхозугодий (свыше 80 %) Нечернозёмной зоны России преобладают слабоводопроницаемые глины и суглинки с более рыхлыми покровными породами, так называемые почвы тяжёлого механического состава (табл. 1.1) [36, 191, 192].

Таблица 1.1 – Характеристика минеральных почв сельскохозяйственных угодий Нечернозёмной зоны России по механическому составу и кислотности

Экономический Район	Механический состав почв, (%)				Кислые почвы, (%)		
	Глинистые и тяжелосуглинистые	Суглинистые	Супесчаные	Песчаные	Слабо кислые	Средне - кислые	Сильно кислые
Северо-Западный	3,5	59,6	31,1	5,8	9,2	15,2	9,1
Центральный	15,5	66,6	15,6	2,3	17,2	20,9	14,5
Волго-Вятский	39,4	46,7	11,3	2,6	19,8	20,4	10,6
Уральский (Пермский край Свердловская область Удмуртия)	56,9	38,0	4,0	1,1	14,2	16,9	10,3
Калининградский	21,1	65,6	11,8	1,5	20,4	20,8	7,2
В среднем по зоне	24,8	57,3	15,2	2,7	14,2	16,7	10,5

Коэффициент фильтрации этих почв  $K_f$  составляет 0,1...0,01 м/сутки, при среднегодовом количестве осадков 800...900 мм. Водопроницаемость верхнего пахотного слоя данных почв выше, чем подпахотного, что приводит к их переувлажнению и в результате к эрозийным процессам. Нечернозёмная зона России богата природными ресурсами, но для рационального использования их

необходимо проведение мелиоративных работ. Тип и состав почв этой зоны приводит к проявлению эрозионных процессов, что является негативным явлением для земледелия.

За последние десятилетия в результате прекращения хозяйственной деятельности выбыло из сельскохозяйственного использования 17 млн. га пастбищ и пашни, посевные площади сократились более чем на 30 млн. га. и 35 % сельскохозяйственных угодий нуждаются в коренном улучшении [12, 51, 166].

Характеристика минеральных почв приведена в работе [115], где отмечается, что в среднем по зоне глинистые почвы составляют 24 %, суглинистые до 66 %.

Механический состав почв является важной генетической и агрономической характеристикой почвы. Плодородие в значительной степени связано с механическим составом почв, от которого зависят такие физические свойства почв, как порозность, влагоемкость, водопроницаемость, водоподъемная способность, воздушный и тепловой режимы и др. Эти свойства определяют рост, развитие и урожай сельскохозяйственных культур. От механического состава зависят также и технологические свойства почвы: твердость, прилипание к почвообрабатывающим орудиям, крошение пласта при вспашке, а, следовательно, качество обработки и удельное сопротивление почвы при обработке. Наличие глинистых частиц в почвах и грунтах придает им лучшую пластичность [49].

Условиями плодородия являются совокупность свойств и режимов, взаимодействие которых определяет возможность обеспечения растений жизненными факторами, т. е. конкретные показатели почвенных режимов. Биологические химические и агрофизические факторы плодородия взаимосвязаны между собой. Рассмотрим более подробно агрофизические свойства почвы. Согласно теории В.Р. Вильямса, структура почвы имеет существенное значение для её плодородия и определяет наиболее благоприятный водный и пищевые режимы почвы [66].

Для окультуривания почвы могут быть применены биологические, химические и физические приёмы воздействия на факторы плодородия. Физический метод направлен на улучшение агрофизических свойств почвы, таких

как плотность, пористость строение пахотного слоя и его структурное состояние. При этом наиболее эффективна обработка почвы в сочетании с мелиоративными мероприятиями, позволяющими оперативно регулировать почвенные режимы. При мелиоративной или сельскохозяйственной обработке почв подзолистого типа они подвергаются значительным изменениям: в результате изменения соотношения между твёрдой фазой и порами изменяется весь механизм передвижения расходования воды в почве, происходит резкое изменение условий накопления и разложения растительных остатков, характера воздухообмена, накопления гумуса, содержания химических соединений минеральной части и многие другие. При правильной культуре благодаря повышению содержания органического вещества, усилению микробиологической деятельности и более интенсивному дыханию корней растений усиливается приток азота и углекислоты в почве, мобилизуются и переходят в формы доступные для растений минеральные питательные вещества. Наиболее лучшие результаты достигаются при сочетании вышеперечисленных методов по повышению плодородия почв. Важным агрофизическим показателем физического метода воздействия на почву является структура почвы, способность её распадаться на структурные агрегаты, состоящие из склеенных между собой перегноем и коллоидными минеральными частицами механических элементов почвы. По гранулометрическому составу дерново-подзолистая почва содержит физической глины 28%, песка 39%, крупной пыли 33%, средней и мелкой пыли 17%, ила 11% – основное название гранулометрического состава такой почвы легкоуглинистая [5, 72, 76, 144, 203].

Совокупностью агрегатов различной величины, формы и состава определяется почвенная структура, а процесс их формирования – структурностью. В процессе распада почвы структурные агрегаты могут формировать глыбистую структуру – комки более 10 мм (крупно-глыбистую – более 100 мм и мелко глыбистую 10...100 мм); макроструктуру – 0,25...10 мм и микроструктуру – менее 0,25 мм. Водно-физические характеристики почв зависят от структуры почвы. Почвенная структура улучшает физические и механические свойства почвы, а также повышает противоэрозионную устойчивость почв. При агрономически

ценной структуре почвы образуется рациональное сочетание капиллярной и некапиллярной пористости. В процессе структурообразования почва сначала механическим способом разделяется на агрегаты, которые затем объединяются, образуя почвенные комки. При этом на формирующуюся структуру влияют физико-механические, физико-химические и биологические факторы. Значительно влияет на формирование почвенной структуры глубокая обработка почвы, при которой вместе с образованием почвенных отдельностей происходит их разрушение. По исследованиям А. В. Снегирёвой, глубокая обработка способствовала увеличению агрономически ценных водопрочных агрегатов размером 0,25 – 10 мм в слое 10 – 20 сантиметров на 22% больше, чем при обычной вспашке.

В Центральном регионе Нечерноземной зоны, к которому относятся наряду с другими Московская и Тверская области, наибольшее распространение получили дерново-подзолистые почвы, значительная часть из них характеризуются тяжелым механическим составом и бесструктурностью, наличием переуплотненных горизонтов, неблагоприятными агрофизическими свойствами. На сельскохозяйственных землях с подобными типами почв возделываются различные покровные и пропашные культуры. Для данного региона за вегетацию наблюдается наличие засушливых периодов, в некоторые годы довольно продолжительных. Так, например, в Московской области в 2010 году такой период продолжался около 60 суток. Во время засушливых периодов, для которых характерны минимальное количество выпавших осадков, существует острый недостаток доступной почвенной влаги, необходимой возделываемым сельхозкультурам, при этом необходимо проведение мелиоративных мероприятий по оперативному регулированию водного режима, особенно на полях с бесструктурными почвами.

Важную роль в жизни растений играет вода, от её содержания в почве зависят все важнейшие показатели почвенного плодородия, о которых говорилось ранее. При определении водообеспеченности культур необходимо учитывать количество воды в почве, а также способность почвы впитывать, фильтровать, удерживать и

отдавать её растениям. Основным водными свойствами почв при этом являются влагоёмкость, водопроницаемость, водоудерживающая и водоподъёмная способности. Важным водным свойством почвы является её водопроницаемость (фильтрационная способность), зависящая от механического состава почвы. В тяжёлых глинистых почвах водопроницаемость низкая. При анализе водного режима использовалась градация почв по водопроницаемости, предложенная Качинским Н.А. [49]. Водоподъёмная способность – свойство почвы вызывать и удерживать капиллярный подъём воды. Водный режим определяет все поступления влаги в почву, её перераспределения, передвижения, удержания в почвенных горизонтах и расхода из почвы.

Гидромелиоративные мероприятия прежде всего влияют на водный режим почв. Увлажненность территории Костяков А.Н. предложил определять при помощи коэффициента влагообеспеченности [62]:

$$\alpha = \frac{\mu \cdot P}{E} \quad (1.1)$$

где:  $\mu$  — единица минус коэффициент поверхностного стока (отношение объема поверхностного или грунтового стока к объему атмосферных осадков, выпавших на данную территорию за то же время.);  $P$  — осадки, мм;  $E$  — испаряемость, мм. Н.Н. Иванов [97] рекомендует характеризовать климатические и гидрологические условия с помощью коэффициента увлажнения КУ:

$$КУ = \frac{P}{E}, \quad (1.2)$$

где:  $P$  — осадки за год,  $E$  — испаряемость.

Еще одним из основных физических свойств почв является способность пропускать через себя жидкости и газы, называемое проницаемостью, которая проявляется в фильтрационных свойствах породы, характеризуемых коэффициентом фильтрации  $k_f$  и коэффициентом проницаемости  $k_n$  [39]. Эти два параметра связаны между собой соотношением:

$$k_f = k_n \cdot \left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \quad (1.3)$$

где  $k_{п}$  – коэффициент проницаемости,  $k_{п} = d_3^2 \cdot Sl(n, \epsilon)$ ;  $\gamma$  – плотность фильтрующей жидкости, г/см<sup>3</sup>;  $\mu$  – вязкость фильтрующей жидкости, Па·с;  $d_3$  – эффективный диаметр частиц, слагающих пористую среду, мм;  $Sl$  – коэффициент (число Слихтера), зависящий от пористости породы  $n$  и структуры порового пространства, характеризуемой безразмерным параметром – коэффициентом извилистости  $\epsilon$  (отношение кратчайшего расстояния между двумя точками в направлении потока к длине извилистого пути частицы жидкости через поровые каналы). Пористость  $n$  является основным параметром, определяющим величину показателя  $Sl$  и коэффициента проницаемости в целом. Согласно данным [47], при увеличении пористости от 0,3 до 0,4 коэффициент проницаемости в глинах возрастает в несколько порядков.

Методами расчета режима восполнения влаги (подачей дополнительных объемов различными способами или перераспределением имеющихся влагозапасов в расчетном слое почвы) занимался ряд ученых: Аверьянов С.Ф. [1], Маслов Б.С. [94], Мезенцев В.С., Дружинин Н.И., Алексанкин А.В. [5], Голованов А.И. [97], Пчелкин В.В. [138], Харченко С.И. [179] и др. Однако, известные методики не учитывают особенности водного режима бесструктурных почв, что требует уточнения методов расчета отдельных параметров и статей водного баланса.

Полевые и лабораторные исследования по динамике влагозапасов в расчетном слое бесструктурных почв проводили наряду с зарубежными и отечественные ученые: Казаков В.С. [44], Максименко В.П. [89], Кирейчева Л.В. [53, 54, 55], Плавинский В.А., Кулешова С.И. и другие. Изучение и анализ зависимостей входящих в формулы коэффициентов, полученных для конкретных почв и сельскохозяйственных культур, показывает, что для разработки уточненных рекомендаций необходимо проведение дополнительных натурных исследований, в том числе и на тяжелых почвах. При обосновании режима регулирования влагозапасов в корнеобитаемом слое бесструктурной почвы важным элементом является диапазон их изменения, который зависит от водно-физических показателей почвы и биологических свойств выращиваемых культур.

У глинистой почвы физическая спелость почвы находится в интервале влажности 50...65% ПВ (полной влагоёмкости почвы), у суглинистых и супесчаных – 40...70% ПВ. Для спелой среднесуглинистой дерново - подзолистой почвы агротехнический интервал влажности спелой среднесуглинистой почвы находится в пределах 12...21% массы абсолютно сухой почвы. Согласно некоторым исследованиям, оптимальная влажность почвы должна находиться в пределах 60...65 % ПВ [34], для среднесуглинистой почвы – 70...75 % ПВ [62, 64], то есть рекомендуемые разными учеными значения по диапазону влажности почвы при выращивании картофеля существенно различаются.

Водный режим богарных и осушаемых земель в общем случае характеризуется следующей зависимостью:

$$W_Q + O + W_{zp} + W_K + W_{bn} + W_{nn} = E_{II} + E_T + W_{II} + W_{bc} + W_{nc} + W_t \quad (1.4)$$

где в левой части уравнения запасы влаги:  $W_Q$ ,  $W_{zp}$ ,  $W_{bc}$ ,  $W_K$ ,  $W_{nn}$ ,  $O$  в почвенном слое, поступившей в почву из грунтовых вод, за счёт бокового притока почвенных и грунтовых вод, поверхностного притока воды и сумма осадков за период наблюдения соответственно; в правой – расход влаги:  $E_{II}$ ,  $E_T$ ,  $W_{II}$ ,  $W_{bc}$ ,  $W_{nc}$ ,  $W_t$ , на испарение, на транспирацию инфильтрацию, боковым внутрипочвенным стоком, поверхностным стоком и запас влаги в почвенном слое в конце периода наблюдения соответственно.

Величина конденсирующейся влаги незначительна и в расчетах может не учитываться. На равнинных возвышенных территориях обычно отсутствуют поверхностный и боковой притоки влаги. На склонах они уравниваются поверхностным и боковым стоком. При этих допущениях уравнение водного баланса принимает вид, не учитывающий отдельные статьи, мало влияющие на изменения за вегетационный период:

$$O + W_{zp} = E_{II} + E_T + W_{II} \quad (1.5)$$

В верхнем слое почвенного горизонта влажность бесструктурных почв, изменяется от полной влагоемкости до влажности завядания, а в нижних находится между влажностью завядания и влажностью разрыва капилляров (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Норма полива в зависимости от механического состава, влагоёмкости и влажности почвы перед поливом [23]

Почва	Влажность почвы			Норма полива, м <sup>3</sup> /га при глубине увлажнения, м			
	предельно-полевая, % от массы	завядания, % от массы	перед поливом, % ППВ	0,2	0,3	0,4	0,5
Суглинок лёгкий	22-26	11-14	70-80	125-175	175-275	225-350	275-425
Суглинок средний	27-30	15-17		150-225	225-325	275-400	325-475
Суглинок тяжёлый	30-34	18-20		175-250	250-275	325-475	375-500

Мероприятия по окультуриванию почвы способствуют накоплению и сохранению запасов влаги в почве, направлены на увеличение мощности пахотного слоя и улучшение структурного состояния, пористости, плотности сложения.

С учётом статей водного баланса необходимо осуществлять комплекс приёмов, направленных на устранение неблагоприятных условий водоснабжения растений. Основными способами регулирования водного режима являются осушительные и оросительные мелиоративные мероприятия, тесно связанные между собой, использование агротехнических приёмов по регулированию агрофизических свойств, особенно плотности пахотного и подпахотных слоёв. Регулирование плотности почвы в процессе глубокой обработки способствует



увеличению влагозапасов в осенний, зимний и весенний периоды, одновременно предотвращая поверхностный сток и проявление водной эрозии. При оструктуривании в почве увеличивается содержание капиллярно подвешенной воды. К приёмам такой обработки относят глубокое рыхление, глубокую вспашку, щелевание, кротование [50, 65, 76, 166].

Кроме этого, показателем плодородия почв являются общие физические свойства почвы, такие как плотность и пористость, влажность, липкость и другие. Глубокое позволяет уменьшить плотность почвы, но с течением времени она постепенно увеличивается до определённой постоянной величины – равновесной плотности, характерной для определённой почвы. Оптимальная плотность устанавливает наилучшее соотношение объёмов капиллярной и некапиллярной скважности, максимальное количество доступной для растений воды при достаточной степени аэрации. По разнице между равновесной и оптимальной плотностями устанавливается интенсивность и глубина обработки почвы, соответственно, чем она больше, тем чаще и интенсивнее необходимо проводить механическую обработку [3, 6, 135].

По данным Ревута И.Б., оптимальной для разных почв является плотность порядка 1,1...1,3 г/см<sup>3</sup>. Более широкий диапазон плотности имеют песчаные и супесчаные почвы, а меньший - глинистые и суглинистые (табл. 1.3) [144].

Таблица 1.3 – Оптимальные значения плотности почв

Почва и её механический состав	Плотность, г/см <sup>3</sup>		
	Равновесная	Оптимальная для культур	
		зерновых	пропашных
Дерново-подзолистая:			
Песчаная	1,5...1,6	–	1,4...1,5
Супесчаная	1,3...1,4	1,2...1,35	1,4...1,45
Суглинистая	1,35...1,5	1,1...1,3	1,0...1,2
Дерново-карбонатная суглинистая	1,4...1,5	1,1...1,25	1,0...1,2
Дерново-глеевая суглинистая	1,35...1,4	1,2...1,4	1,0...1,2
Луговая пойменная суглинистая	1,15...1,2		1,0...1,2
Серая лесная тяжёлосуглинистая	1,4...1,5	1,15...1,25	1,2...1,4
Серозём суглинистый	1,5...1,6		

Строение почвенного слоя определяется гранулометрическим составом, агрегатностью почвы и взаимным расположением почвенных частиц и комков, при этом для создания оптимальных условий влаги и воздухообмена необходимо, чтобы некапиллярная пористость составляла 55...60%. Для дерново - подзолистых глеевых почв при соотношении между твердой фазой и порами 1:1, где 25 % от общего объёма занимает воздух и 25 % влага устанавливаются наилучшие условия почвенных режимов для сельскохозяйственных растений.

Строение пахотного слоя можно регулировать путем изменения плотности и структуры почвы. Наиболее быстрым и эффективным способом изменения строения является регулярная обработка, приемы которой повышают общую пористость, увеличивая в основном объем некапиллярных пор, это в свою очередь улучшает водно – воздушные свойства и усиливает микробиологическую активность почвы.

Наряду с водно-воздушным и пищевым режимами, на продуктивность почв влияет состояние поверхностного слоя, характеризующегося микрорельефом.

Проведённые в СевНИИГиМе исследования по влиянию микрорельефа на урожай сельскохозяйственных культур на тяжёлых минеральных почвах показали, что в понижениях глубиной до 30 см вода стоит в течение всего вегетационного периода, а в западинах глубиной до 10 см урожай овощей снижается на 20 %, при глубине понижений 10...30 см – на 50 % [11, 12]. На мелиорируемых землях с волнистым рельефом целесообразно проведение поверхностной планировки, способствующей выравниванию поверхности полей и регулированию поверхностного стока.

Физико-механические и агробиологические свойства переуплотнённых почв оказывают значительное влияние не только на урожайность сельхозкультур, но и на энергоёмкость процесса их рыхления.

При определении энергоёмкости процесса рыхления необходимо учитывать силы, зависящие в большей степени от коэффициентов внешнего и внутреннего трения. В зависимости от механического состава почвы, коэффициент трения почвы о сталь, по данным Синеокова Г.Н. [158, 159], составляет от 0,25...0,35 для

песчаных и малосвязных, до 0,6...0,9 – для тяжёлых суглинков и глин. Причём по данным Никольса М.Л., при низкой влажности почвенная масса не прилипает к металлу, а коэффициент трения не зависит от содержания влаги в почве. Дальнейший рост влажности почвы увеличивает коэффициент трения грунта по металлу. Среднее значение удельного сопротивления при механической обработке составляет для глины – 6,8 Н/см<sup>2</sup>, суглинка тяжёлого – 4,8 Н/см<sup>2</sup>, среднего – 3,5 Н/см<sup>2</sup>, лёгкого – 2,7 Н/см<sup>2</sup>, супеси – 1,8 Н/см<sup>2</sup> (табл. 1.4) [3, 134].

Таблица 1.4 – Удельное сопротивление при механической обработке почв  
Нечернозёмной зоны Российской Федерации [158]

Районы зоны	Механический состав почв, % от общей площади / пределы изменения удельного сопротивления, Н/см <sup>2</sup>					
	Песчаные	Супесчаные	Легко-Суглинистые	Средне-Суглинистые	Тяжёло-Суглинистые	Глинистые
Северо-Западный	6 3,5...3,8	31 3,8...4,1	35 4,2...4,6	24 5,0...5,8	3 5,2...5,9	1 5,5...6,3
Центральный	2 3,8...4,0	16 4,0...4,3	36 4,1...5,1	30 4,8...6,0	13 5,2...6,2	3 5,6...6,5
Волго-Вятский	3 3,8...4,0	11 4,0...4,2	20 4,0...4,7	27 4,5...5,4	31 5,2...6,3	8 5,6...7,1
Уральский	1 3,9...4,1	4 4,1...5,3	10 4,0...5,5	28 4,2...5,5	39 4,6...6,0	18 5,2...6,9

Таким образом, основными факторами, определяющими технологические свойства почвы, являются: плотность, влажность, структура, гранулометрический и минералогический состав. Для лучшего регулирования водно - физических и физико – механических свойств почв в соответствии с агрономическими

требованиями, а также выбора технологии их обработки необходимо оценить параметры этих свойств, а также определить факторы, которые на них влияют.

От почвообразующих пород зависит не только формирование агроландшафтов, но и вид мероприятий по улучшению свойств почв (агрономических, мелиоративных и других).

Под структурой здесь понимается показатель физического состояния плодородной почвы. От влажности зависят технологические и физико-механические свойства почвы, такие как способность почвы крошиться, удельное сопротивление обработке, липкость почвы, величина сил трения, возникающих между почвой и рабочими органами машин, влажность почвы оказывает существенное влияние на проходимость, тягово-сцепные свойства тракторов и качество производимых работ [35, 188].

Ещё одним показателем плодородия почв является воздушный режим. Переуплотнённые и переувлажнённые почвы нуждаются в улучшении воздушного режима. При изменении плотности и влажности в процессе обработки воздух проникает в слои почвы и лучше взаимодействует с фазами почвы, при этом происходит изменение её состава и физического состояния возникают благоприятные условия для произрастания растений.

## **1.2 Природно-климатические условия объектов полевых исследований**

В 2015 году посевные площади в Московской области составили 595,5 тыс. гектаров, в том числе на бесструктурных почвах – 244 тыс. гектаров, в Тверской области – соответственно 278,8 и 125,5 тыс. гектаров.

Первый участок проведения полевых экспериментов, принадлежащий опытно-мелиоративному пункту «Дубна» (ОМП «Дубна») РГАУ-МСХА им. К.А.Тимирязева, находится в северо-западной части Московской области, около

дер. Селково Сергиево-Посадского района и в Тверской области на границе Торжокского и Вышневолоцкого районов (рис. 1.1).

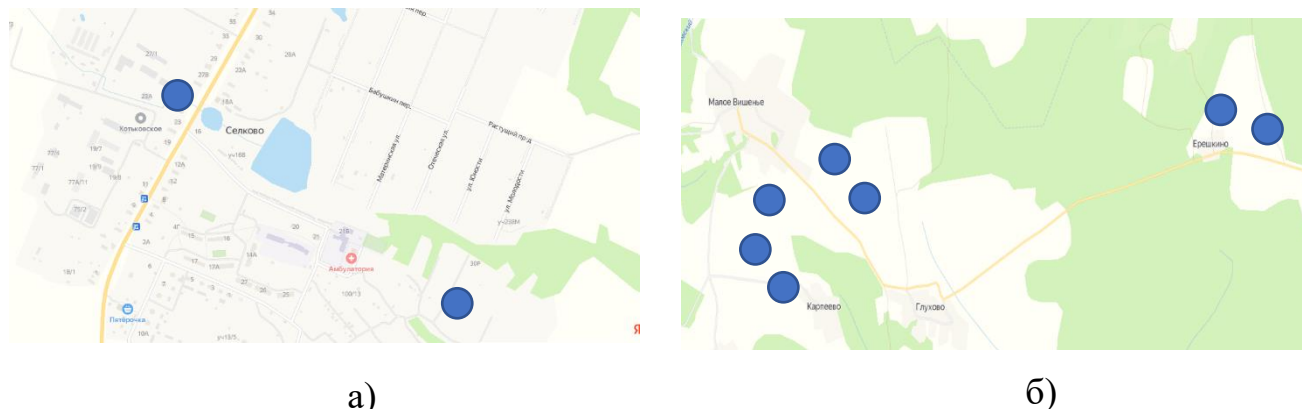


Рисунок 1.1 – Месторасположение полевых участков:  
а - Московской (на землях ОМП «Дубна») и б - Тверской областей.

Второй и третий опытные участки располагаются в центральной части Тверской области (Торжокский район): второй - на неиспользуемых (6...7 лет) пахотных землях, третий на заброшенных культурных пастбищах, иногда используемых в настоящее время для выпаса скота.

В Московской и Тверской областях преобладает рельеф, чередующийся с холмистыми плато и плоскими равнинами. Московская область с юго-запада на северо-восток разделена границей московского оледенения. Для северной части данной территории характерны ледниково-эрозионные формы рельефа и преобладание моренных отложений для южной эрозионные и развитие покровных суглинков.

Так как обследуемые участки в широтном отношении находятся сравнительно недалеко друг от друга, все объекты располагаются удаленно от больших водоемов, рек и открытых каналов, с определенной достоверностью можно считать климатические условия одинаковыми. Температура воздуха на водоразделах, где располагаются участки с полевыми опытами, обычно выше, чем на поймах рек или территориях, прилегающих к открытым водным объектам.

Климат данного региона согласно уже сложившимся характеристикам умеренно-континентальный со средними температурами января  $-10 \dots -11^{\circ} \text{C}$ , июля

17...18<sup>0</sup> С. Максимальные температуры могут достигать 38...40<sup>0</sup>С – в летний и – 40...- 45<sup>0</sup> С – в зимний (табл. 1.5).

Таблица 1.5 – Основные температурные данные Московской области [23]

Гидротермический коэффициент	Среднегодовая температура воздуха, <sup>0</sup> С	Средняя температура воздуха, <sup>0</sup> С		Продолжительность безморозного периода, дней	Сумма температур выше 10 <sup>0</sup> С за вегетационный период, <sup>0</sup> С
		января	июля		
1,3 – 1,6	3,2 – 3,7	-10...-11	17...18	120...149	1750...2200

Среднегодовое количество осадков в северо-западной части Подмосковья равно 450 – 650 мм, для центра Тверской области – 550 – 750 мм.

Неравномерность распределения осадков по месяцам летнего периода приведена в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Сумма осадков, мм за теплый период средне влажного года (метеостанция г. Дмитров)

апрель, май	июнь	июль	август	сентябрь	Сумма за год	За период с температурой >10 <sup>0</sup> С
100	71	80	75	62	680	292

По данным метеостанции г. Дмитрова Московской области за 2013 – 2015 годы были определены возможные дефициты влаги при возделывании картофеля на дерново-подзолистых глеевых почвах (табл.1.7).

Таблица 1.7 – Осадки, значения потенциального водопотребления и дефицитов естественного увлажнения для картофеля [139]

Годы	Показатели, мм		
	Осадки, О <sub>с</sub>	Водопотребление, Е <sub>п</sub>	Дефицит, Д
2013	175	252	48
2014	183	340	71
2015	252	284	56

Данные таблицы подтверждают, что дефицит естественного увлажнения можно восполнить не только подачей оросительной воды, но и проведением

агромелиоративных мероприятий, включающих повышение влагозапасов за счет увеличения водовместимости почвенного расчетного слоя путем глубокого рыхления и оструктуривания почвы.

Перед проведением полевых экспериментов на выбранных участках изучены почвенно-геологические разрезы массивов сельскохозяйственных полей, выполненных картографическими службами Московской и Тверской областей. Описание строения почвенных разрезов приведено в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Характеристика горизонтов опытных участков.

Слой, см	Тверская область	Московская область
1	2	3
0-10	Верхний слой включает в себя остатки стерни, стеблей и остатки прошлогодних растений. Стадия появления сплошной корневой системы	Дерновый слой, состоящий из плотного сплетения корней и остатков прошлогодней растительности. Плотного сложения из многолетних корневых систем
10-20	Дерновый гумусовый слой серо-коричневого цвета пронизан корневой системой растений	Дерновый гумусовый горизонт с корневой системой и остатками разложения корней.
20-30	Подзолистый горизонт бежево-белого цвета с уплотнёнными прослойками плужной подошвы	Подстилающий подзолистый горизонт с глеевыми включениями имеет слоистую структуру
30-40	Иллювиальный слой буро-серого цвета плотного сложения. Слоистый слабоводопроницаемый горизонт.	Иллювиальный горизонт – буро – ржавого цвета, комковато-глыбистой структуры. Слоистая структура сцементированная глеем.

1	2	3
40-60	Иллювиальный тяжело	Иллювиальный тяжело
60-80	суглинистый буровато серого цвета до медного.	суглинистый, при воздействии распадается на крупные агрегаты, при крошении которых не образуются фракции с агрономически ценными размерами. При силовом воздействии распадается на крупные элементы

Участки для полевых экспериментов подбирались в соответствии с почвенно-геологическими разрезами с типичным расположением дерново-подзолистых глеевых почв. Первый полевой участок (ОМП «Дубна») находится на возвышенной фации (абсолютная отметка 160 – 172 м над уровнем моря) и является залежью, заросшей плотной травянистой растительностью [140]. На опытных площадках (две: одна – на западной окраине д. Селково, другая в 500-550 м восточнее первой) (см. рис 1.1). Изучение почвенных разрезов производилось посредством отрывки шурфов на глубину 60 – 80 см с последующим отображением строения почв (рисунок 1.2).

На опытных участках имеются небольшие различия почвенных профилей. На одном участке верхний горизонт представляет собой бывшую пашню, сформированный в прежнее время в результате распашки естественного гумусового слоя и верхней части подзолистого горизонта. На другом участке верхний горизонт представляет сложившийся дерновый горизонт с небольшим гумусовым подслоем, подстилаемый подзолистым грунтом естественного сложения.



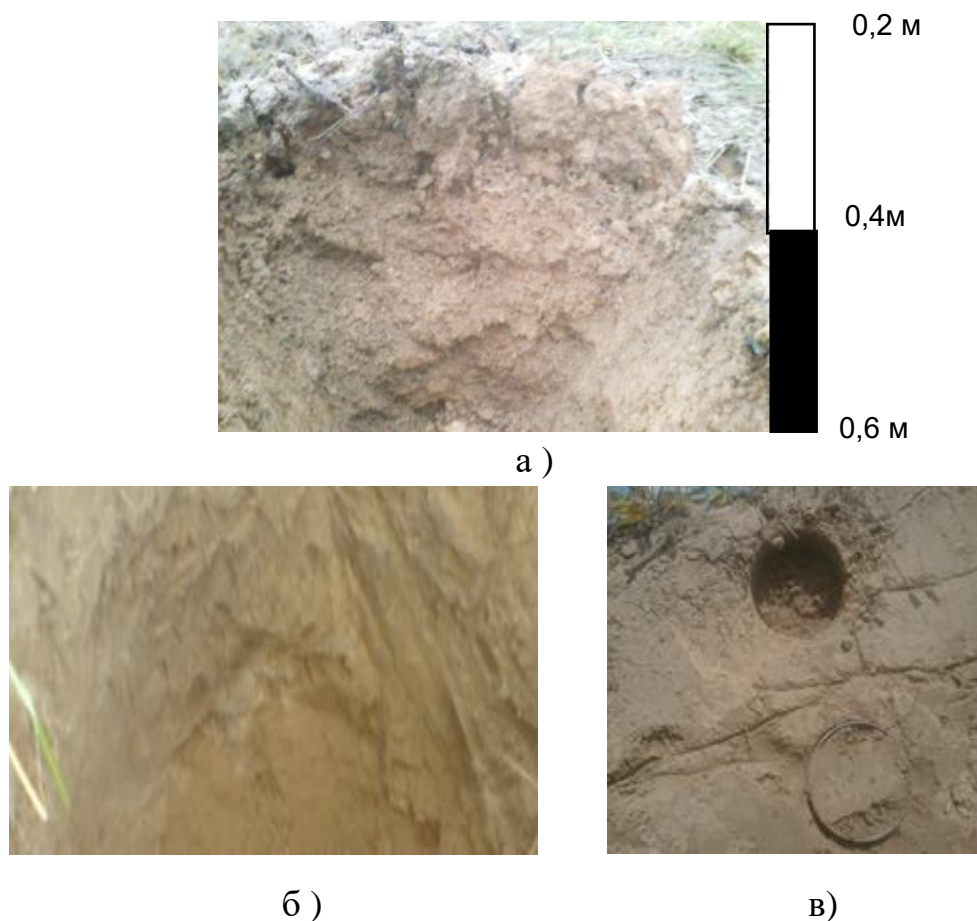


Рисунок 1.2 – Почвенные разрезы на участках полевых обследований Московской и Тверской областей (профили до глубины 0,6 – 0,8 м:

а) после рыхления; б), в) до рыхления

По морфологическим признакам дерново-подзолистые почвы относятся к скрыто - оглеенным, так как в них от верхнего слоя до определенной глубины не проявляется синяя или голубоватая окраска, характерная для глеевых почв [77].

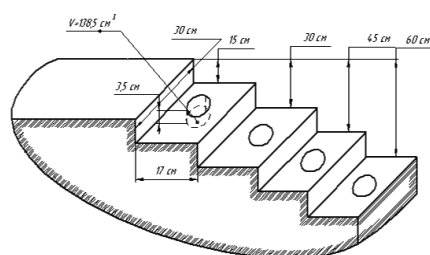
### 1.3 Оценка состояния полей, выбывших из сельскохозяйственного оборота

В ходе полевых исследований были детально изучены водно-физические характеристики почв, а также их физико - механические свойства.

Для этого определялась плотность грунта и его структура от поверхности до глубины 0,8 метра.

В процессе исследований участки полей разбивались по квадратам 5х5 метров, в которых отрывались ступенчатые шурфы на глубину до 0,80 м с шагом

15 сантиметров, где определялись плотность и свойства грунта (рис. 1.3).



а)



б)

Рисунок 1.3 – Последовательность взятия проб грунта на разных глубинах:  
а) схема шурфа; б) виды грунта на разной глубине

Плотность слоёв на глубине от 0,2...0,35 метров составляла  $1,54 \text{ г/см}^3$ . Грунт серый по цвету можно отнести к лёгким суглинкам с растительными включениями, то есть корнеобитаемый гумусный слой. На глубине 0,35...0,5 метров суглинок имел большую плотность порядка  $1,78 \text{ г/см}^3$  без растительных включений. Начиная с глубины 0,5 метра плотность грунта увеличивалась более интенсивно и на глубине 0,65 метра составляла  $1,8 \text{ г/см}^3$ . Кроме этого, появлялись каменистые включения размером от 35 до 50 мм, цвет грунта постепенно от светлого перешел в темно - коричневый. На горизонтах 0,65...0,8 метров плотность грунта, являющегося тяжёлой глиной, достигала величины  $1,96 \text{ г/см}^3$ . Зависимость среднего значения плотности грунта от глубины залегания до поверхности показано на рисунке 1.4.

Анализируя график полученной зависимости, можно отметить три характерные зоны: верхний слой почвы с наличием растительных включений до 0,25 метров и средним значением плотности  $1,57 \text{ г/см}^3$  характеризуется

интенсивным увеличением плотности. Средняя переходная зона от гумусового к суглинистому слою характерна менее интенсивным увеличением плотности от 1,57 до 1,69 г/см<sup>3</sup>. Нижняя зона характеризуется более интенсивным увеличением плотности до 1,96 г/см<sup>3</sup>. Верхний слой, являющийся бывшей пашней или луговой дерниной более рыхлый, средний слой можно считать плужной подошвой, нижний водоупорным слоем.

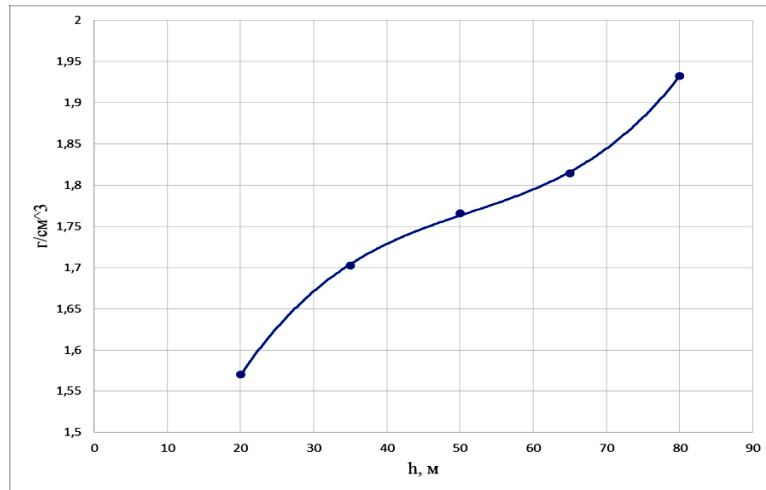


Рисунок 1.4 – Зависимость средних значений плотности грунта от глубины  
По полученным результатам была найдена эмпирическая зависимость:

$$y = 3E-06x^3 - 0,0005x^2 + 0,03x + 1,1539 \quad (1.6)$$

Для упрощённых расчётов можно использовать линейную зависимость:

$$\rho = 0,01h + 1,3 \quad (1.7)$$

Очевидно, что различные физико - механические свойства почвы в пределах поля могут привести к нарушению устойчивости хода почвообрабатывающего агрегата, двигателя, что в итоге сказывается на качестве работ. Водно-физические свойства почв опытных участков представлены в таблице 1.9. Порозность колеблется в зависимости от глубины почвенного слоя в широких пределах и составляет от 9,1 до 49,8 % от объема. Полная влагоемкость (ПВ) изменяется по глубине от 33% до 42% в долях от объема. Наименьшая влагоемкость (НВ)

Таблица 1.9 - Водно-физические свойства почвы на опытных участках

Толщина слоя	Средняя плотность почвы, г/см <sup>3</sup>			Средняя плотность твёрдой фазы, г/см <sup>3</sup>			Средняя пористость, в % от объёма			Полная влагоем- кость, в % от объёма			Наименьшая влагоемкость, в % от объёма			Максималь- ная гигроскопи- чность в% от объёма
	Моск .	Тверск. .	сред. .	Моск. .	Тверск. .	сред. .	Моск. .	Тверск. .	сред. .	Моск. .	Тверс к. .	сред. .	Моск. .	Тверск .	сред. .	
0-10	1,35	1,5	1,43	2,69	2,72	2,7	49,8	44,9	47,4	42	0,41	41,5	29,1	38,8	33,9	11,3
11-20	1,39	1,57	1,48	2,7	2,75	2,73	48,5	42,9	45,7	40	41	40,5	29,4	38	33,7	11,0
21-30	1,43	1,66	1,55	2,72	2,83	2,78	47,4	41,3	44,4	38	40	39	28,7	35,3	33,7	13,2
31-40	1,59	1,73	1,66	2,75	2,85	2,8	42,2	41,7	42,0	37	39	38	26,3	32,1	29,2	9,4
41-50	1,71	1,76	1,74	1,98	2,7	2,34	13,6	34,8	24,3	36	37	36,5	24,4	28,8	26,6	9,4
51-60	1,74	1,81	1,78	1,98	2,74	2,36	12,1	45,4	28,8	44	37	40	22,3	26,5	24,4	9,2
61-70	1,79	1,85	1,82	1,96	2,73	2,35	8,7	32,2	20,5	33	36	35	20,1	24,1	22,1	10,1
71-80	1,82	1,94	1,87	1,97	2,74	2,36	9,1	29,2	19,2	33	36	34	19,4	22,8	21,1	10,0

изменяется от 19,4 до 38,8 % от объема.

Данные, характеризующие гранулометрический состав почв, указаны в соответствии с процентным содержанием почвенных частиц и сведены в таблицу 1.10.

Таблица 1.10 – Гранулометрический состав дерново-подзолистой глеевой почвы полевых участков

Варианты опытных участков		Московская обл.		Тверская обл.	
		Участок 1	Участок 2	Участок 3	Участок 4
Размер частиц (мм) и их содержание (%)	< 0,001	12,8	8,4	9,1	10,6
	0,001 - 0,005	4,8	7,9	8,3	5,6
	0,005 - 0,01	6,3	9,8	6,4	6,6
	0,01 - 0,05	19,6	18,6	21,4	22,6
	0,05 - 0,25	38,1	41,1	38,7	37,4
	0,25 - 1,00	18,4	19,9	16,1	17,2
	Сумма частиц > 0,01	76,1	79,6	76,2	77,2
	Сумма частиц < 0,01	23,9	26,1	23,8	22,8

За последние 25...30 лет значительное количество сельскохозяйственных угодий выбыло из производства, данные площади в настоящее время находятся в заброшенном состоянии. Они зарастают сорной древесно-кустарниковой растительностью, происходят процессы одернения, изменения свойств и деформации рельефа поверхности.

С целью получения реального состояния полей, выбывших из сельскохозяйственного оборота, было проведено обследование полей в Тверской и Московской областях [77]. На основании результатов обследования сделан вывод о необходимости проведения комплекса культуртехнических мероприятий по рекультивированию неиспользуемых полей таких как свodka кустарника и мелколесья, выкорчевывание пней, капитальная планировка, плантажная вспашка, глубокое мелиоративное рыхление, кротование с внесением химмелиорантов в почвы с кислой реакцией. Несвоевременное выполнение данных мероприятий приводит к дальнейшему переуплотнению почвы, переувлажнённости, ухудшению

работы дренажных систем, падению эффективности использования земель и снижению урожайности на 30...40%.

Для исследований выбирались поля, выбывшие из сельскохозяйственного оборота, которые до момента обследования не использовались от 3...4 до 8...10 лет, поверхность которых заросла древесно-кустарниковой растительностью, начался процесс образования кочек, и значительно изменился рельеф поверхности (рис. 1.5).



а)



в)



б)



г)

Рисунок 1.5 – Неиспользуемые сельхоз угодья: а), б) Московской; в), г) Тверской областей

Кроме этого, выраженный бугристый рельеф требует предварительной планировки поля, так как без предварительного выравнивания происходят колебания базовой машины и рабочего оборудования, что сказывается на неравномерности глубины рыхления, загрузке двигателя, расходе топлива, а также приводит к изменению центра давления машины.

Как показали обследования полей в Тверской области, они не



использовались в сельскохозяйственном производстве в течение 3...4 лет. Поля заросли сорными травами, и в настоящее время они используются для выпаса скота (рис. 1.5 в, г). Поля, которые не обрабатывались в течение 6–7 лет, заросли берёзовой порослью в возрасте двух-трёх лет, ранее на этих полях возделывали овёс, лён, рожь. Поля, обследованные в Московской области, не обрабатывались в течение 5...6 лет, они также заросли сорной растительностью и деревьями в возрасте от 1 до 4 лет, ранее на них выращивались кормовые травы и кукуруза (рис 1.5 а, б).

В процессе обследования осуществлялась оценка деформации рельефа полей, для чего производилась геодезическая съёмка. На этих полях выбирались контрольные участки площадью в один гектар, геодезическая съёмка предусматривала предварительную разбивку каждого участка по квадратам 5 x 5 метров, в вершинах которых снимались высотные отметки. В процессе обследования полей в Московской и Тверской областях были выполнены геодезические съёмки 20 участков полей.

Представляя результаты съёмки в виде случайного массива чисел, были получены статистические характеристики рельефов полей. Для дальнейшей статистической обработки использовались такие параметры рельефа, как значения высотных отметок  $h$ , расстояния между неровностями  $L$ . В результате вычислений были получены статистические характеристики неровностей, такие как математическое ожидание  $m_x$ , дисперсия  $D_x$ , коэффициент вариации  $v$  (табл. 1.11).

Таблица 1.11 – Статистические характеристики неровностей поверхностей опытных участков полей [77]

Распределение неровностей по высоте		Распределение неровностей по длине	
$m_x=0,215 \text{ м}; D_x=0,0026 \text{ м}^2$ $v = 0,237$	$h_{\min}=0,08 \text{ м}$ $h_{\max} = 0,3 \text{ М}$	$m_x=20,4 \text{ м}; D_x=90,94 \text{ м}^2$ $v = 0,47$	$L_{\min}=4,3 \text{ м}$ $L_{\max} = 30,1 \text{ м}$
$m_x = 0,173 \text{ м}, D_x = 0,005 \text{ м}^2$ $v - 0,4$	$h_{\min} = 0,052 \text{ м}$ $h_{\max} = 0,33 \text{ М}$	$m_x=26,5 \text{ м}; D_x=19 \text{ м}^2$ $v = 0,164$	$L_{\min} = 2 \text{ м}$ $L_{\max}=77 \text{ м}$
$m_x = 0,12 \text{ м}$ $D_x = 0,005 \text{ м}^2 ; v=0,59$	$h_{\min} = 0,045 \text{ м}$ $h_{\max} = 0,163 \text{ М}$	$m_x=34,9 \text{ м}; D_x=73,5 \text{ м}^2$ $v = 0,245$	$L_{\min} = 2,6 \text{ м}$ $L_{\max} = 142,5 \text{ м}$

Анализ высотных отметок показал, что наиболее часто они составляли от 11 до 25 см. Распределение высотных отметок по контрольным участкам и их планы рельефов представлены на рисунке 1.6.

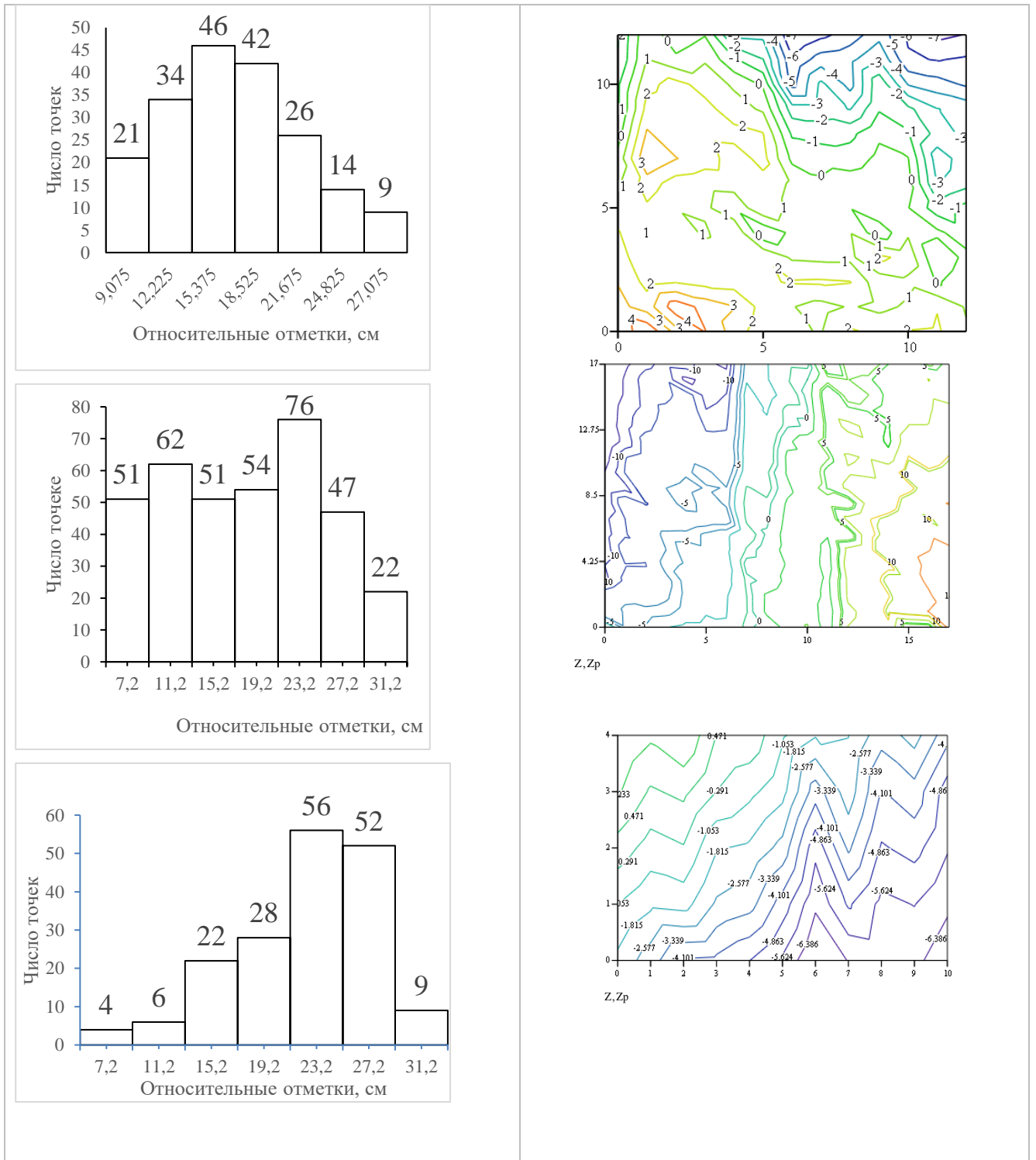


Рисунок 1.6 – Гистограммы распределения неровностей по высоте и рельефы полей



По массивам случайных чисел высотных отметок были получены корреляционные функции  $R(\tau)$  и спектральные плотности  $S(w)$  случайного процесса  $x(L)$  (рис. 1.7).

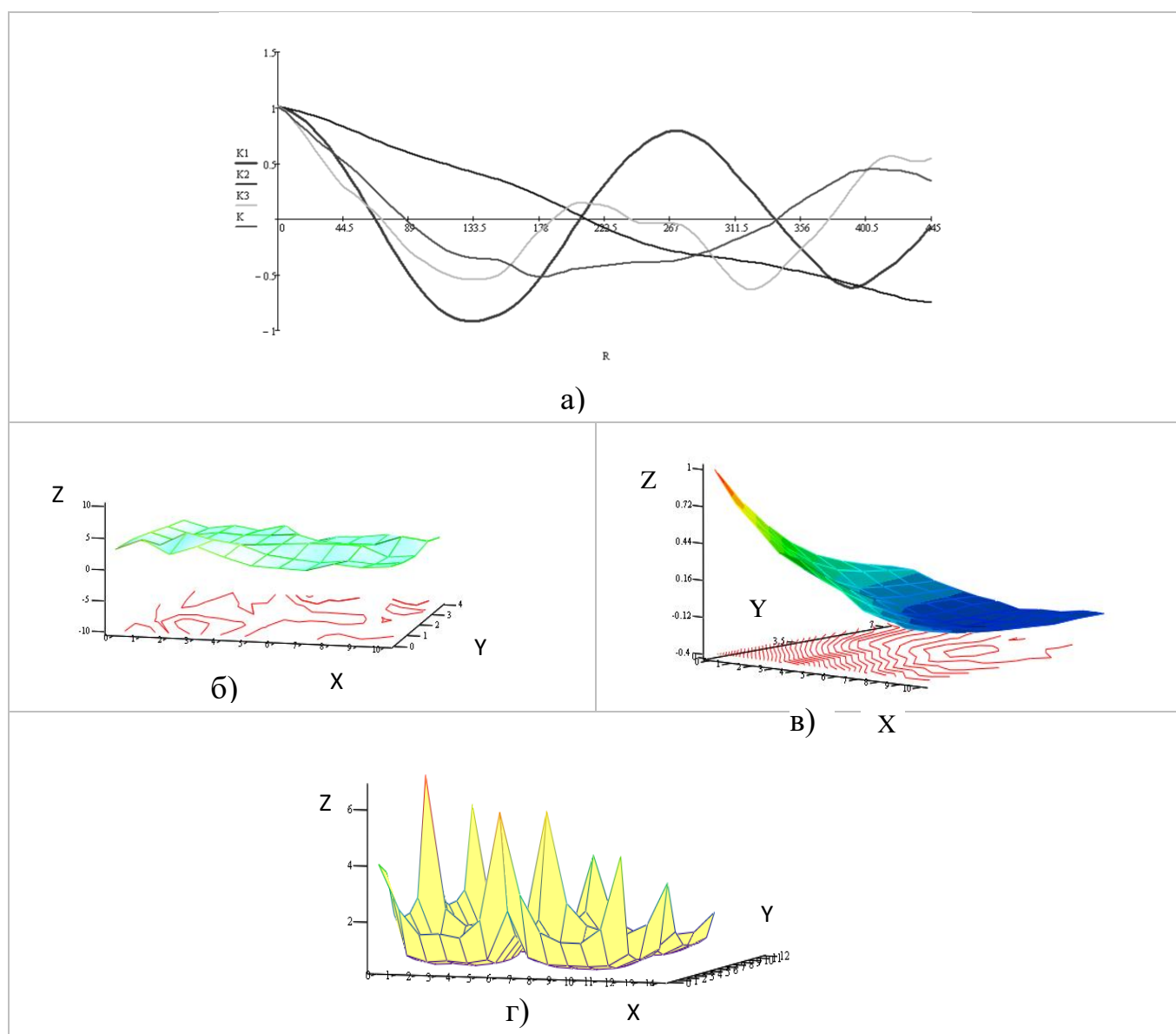


Рисунок 1.7 – Графическое изображение поверхности участка поля:

а) корреляционные функции профилей поверхности полей; б) поверхность участка поля в трёхмерном изображении, в плоскости  $X, Y$  отложены номера единичных квадратов ( $5 \times 5 \text{ м}^2$ ) из вершин которых по оси  $Z$  отложены микронеровности поверхности; в) график корреляционной поверхности этого участка в безразмерном виде; г) график спектральной плотности  $\text{см}^2/\text{м}^2$

Корреляционную функцию можно представить выражением:

$$R(\tau) = D e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta \tau \quad (1.3)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты характеризующие интенсивность затухания и частоту периодической составляющей;  $D$  – дисперсия.

Движение рыхлителя по неровной поверхности поля вызывает колебания базовой машины с установленным рабочим органом и как следствие неравномерности глубины рыхления. Кроме этого, на неравномерность глубины рыхления оказывает влияние неоднородность физико-механических свойств грунта [63].

При перемещении рыхлителя с гусеничным или пневмоколесным и навесным рабочим органом, расположенным за пределами опорной поверхности, он воспринимает колебания неровностей поверхности поля, эти колебания можно рассматривать как входное воздействие на агрегат, а колебания режущего элемента рабочего органа в этом случае можно представить как выходное воздействие на глубину рыхления. Это приводит к неравномерности глубины рыхления, а также влияет на рабочие параметры базовой машины. В конечном итоге все эти факторы оказывают влияние на урожайность посевных культур [41, 54]. Кроме того, при оценке мощностных и силовых затрат на процесс рыхления физико - механические свойства грунта в большинстве случаев принимаются одинаковыми по всей глубине, что является существенным упрощением.

Результаты обследования полей позволили оценить степень зарастания полей, определить изменение агрофизических свойств по глубине от 0,2 до 0,8 метров и получить характеристики поверхности полей. Что можно использовать для дальнейших практических расчётов.

#### **1.4 Роль глубокого мелиоративного рыхления в системе агротехнических работ и земледелия. Обзор конструкций мелиоративных рыхлителей**

В результате мелиоративных мероприятий создаются лучшие условия работы машин и орудий, они способствуют повышению производительности труда, восстановлению плодородия малопродуктивных земель и росту

урожайности сельскохозяйственных культур. Задача мелиорации, заключается в улучшении продуктивности и устойчивости земледелия, получении гарантированного производства сельскохозяйственной продукции на основе сохранения и повышения плодородия земель, а также создания необходимых условий для вовлечения в сельскохозяйственный оборот неиспользуемых и малопродуктивных земель и формирования рациональной структуры земельных угодий [103].

В силу особенностей природных условий Нечернозёмной зоны, мелиорация должна носить комплексный характер. Следует отметить наиболее важные мероприятия – сведение участков в крупные массивы, уборку камня, ликвидацию нежелательной лесокустарниковой растительности, глубокое рыхление и другие культуртехнические мероприятия, что должно обеспечить сбалансированный водно–тепловой режим почвы.

При увеличении глубины пахотного слоя улучшается водный режим почвы: продуктивная влага задерживается в почвенном слое, а избыток влаги просачивается в нижние слои, в то время как на почве с неглубоким пахотным слоем большая часть осадков стекает по поверхности почвы. Эта проблема наиболее актуальна на суглинистых и глинистых почвах тяжёлого механического состава.

С целью уменьшения и предотвращения переуплотнения почвы и убыстрения внутрипочвенного стока используют такие агромелиоративные мероприятия, как кротование, чизелевание и глубокое мелиоративное рыхление с внесением максимальных доз органических удобрений, мелиорантов. Одним из основных условий улучшения структуры и водно-воздушного режима тяжёлых почв является глубокое рыхление (до 0,8...1,2 м) [44, 50, 66, 115].

Проведение культуртехнических работ необходимо для улучшения состояния мелиорируемых земель, при увеличении естественного плодородия почвы в процессе интенсивного сельскохозяйственного их использования [34, 51, 90].

Земли, на которых выполняется рекультивация и проводятся культуртехнические работы, в зависимости от их состояния, могут быть

подразделены на три основные группы по набору агромелиоративных мероприятий и видам работ:

1. Заново разрабатываемые земли, засорённые камнями и покрывшиеся кустарниковой растительностью и деревьями;
2. Земли, вышедшие из сельскохозяйственного оборота, заросшие древесно-кустарниковой порослью с изменением ландшафта;
3. Земли, находящиеся в сельскохозяйственной использовании, но требующие выполнения определённых видов культуртехнических работ.

Интенсивность способов окультуривания данных групп угодий определяется в зависимости от плодородия почвы, а также от степени его сбережения после проведения мелиоративных работ.

Одним из эффективных способов уменьшения плотности грунта, повышения его воздухопроницаемости и улучшения фильтрационной способности является глубокое рыхление, входящее в комплекс культуртехнических работ. По данным многих исследований, применение глубокого мелиоративного рыхления раз в 2-3 года позволяет значительно повысить урожайность сельскохозяйственных культур [45, 193].

Глубокое рыхление, как мелиоративное мероприятие, улучшающее свойства почв, широко начало использоваться в начале XX века. Данный приём является наиболее важным агротехническим мероприятием, так как способствует не только стабильности и повышению урожая, но и определяет эффективность основных мероприятий агротехнического комплекса [183, 190, 203]. Глубокое рыхление почвы влияет на формирование дополнительных запасов энергии в более глубоких слоях почвы (рис. 1.8).

Переуплотнение почв сельскохозяйственной техникой является проблемой для многих стран Европы, Азии и США. В Германии рыхление переуплотнённых почв проводится на глубину 0,7... 0,8 м. Двукратное рыхление на глубине 0,3...0,8 м снижает твёрдость почвы с 6,0...7,0 МПа до 2,5...4,5 МПа, а также увеличивает массу корней в слое 0,45...0,65 м в 1,5 раза. В результате величина урожая увеличивается на 10...20%. Глубокому рыхлению во Франции подвергают вместо

вспашки сухие плотные почвы, это увеличивает урожайность на 20%. Для разуплотнения чернозёмов в Венгрии глубокое рыхление применяют раз в 2...3 года при выращивании озимой пшеницы, кормовой кукурузы и сахарной свёклы. В отдельных районах Румынии рыхление на глубину 0,6...0,8 м с расстановкой рыхлящих лап на расстоянии 0,8; 0,9 и 1,0 м выполняется на переувлажнённых почвах с целью разрушения водонепроницаемого слоя почвы, расположенного глубине 0,3...0,5м.



Рисунок 1.8 – Диаграмма применения глубокого мелиоративного рыхления

В поливной зоне США глубокое рыхление считается эффективным методом борьбы с засолением, способствующим повышению урожайности почвы до 10%. В Великобритании рыхление на глубину от 0,45 до 0,7 м широко распространено для борьбы с уплотнёнными прослойками и «плужной подошвой». Высокая эффективность глубокого рыхления подтверждается приведёнными источниками [75, 167, 175, 194, 195, 199, 207].

Рыхлители, созданные для улучшения физических параметров и гидрологических характеристик тяжёлых почв, также начали применять для решения разных задач в других регионах. В степной, лесостепной и сухостепной зонах глубокое рыхление применяют для перераспределения поверхностного стока во внутрипочвенный, а также для распада плотных солонцовых и подсолонцовых горизонтов, что способствует убыстрению процесса рассоления солончаковых почв и увеличению их фильтрации. Но наибольшее применение глубокое мелиоративное рыхление получило в Нечернозёмной зоне [39, 40].

Рабочий процесс разуплотнения пахотного слоя почвы и «плужной подошвы» чизельными плугами, культиваторами и другим сельскохозяйственным оборудованием на глубину до 0,4...0,45 м достаточным образом освещён в публикациях [4, 11, 132, 137, 150]. Оборудование и технология разрыхления более глубоких слоев грунта (от 0,5 до 1,2 м) еще недостаточно разработаны и апробированы.

Одним из основных условий улучшения водно-воздушного режима и оструктурирования тяжелых и вторично – уплотненных почв является механическое (силовое воздействие) на плотные слои почвы с целью разрушения (рыхления) их структуры пассивными и активными рабочими органами на глубину до 1, 2 м. Исследованиями ВНИИГиМ, ДальНИИГиМ, СевНИИГиМ, БелНИИМиВХ, УкрНИИГиМ, а также зарубежными исследованиями, проводимыми в Германии установлено, что проведение глубокого рыхления на глубину до 1,2 м хотя бы один раз в 2...3 года, улучшает показатели указанных выше свойств почвы, что приводит к увеличению урожайности сельскохозяйственных культур на 20...30 % [6, 50, 173, 210]. Также глубокое рыхление является агротехническим (агромелиоративным) приемом разуплотнения тяжелых и вторично уплотненных почв, входящим в состав культуртехнических работ, выполняемых на вновь осваиваемых землях; на землях, выбывших из сельскохозяйственного использования, заросших древесно - кустарниковой растительностью и засоренных камнями и кочками.

Исследования эффективности применения глубокого рыхления на осушаемых минеральных землях Нечерноземной зоны России, а так же в

Белоруссии, Венгрии, Румынии проводили Черненко В.Я. и Стариков Х.И., Казаков В.С., Турсунов Б.Н., Акимов А.И., Максименко В.П., Ахмед С.Д., Каифаш Ференц, Леонтьев Ю.П., Макаров А.А. и другие [39, 40, 43, 44, 45, 69, 88, 174, 187, 188, 202, 204, 205, 207].

Применение глубокого рыхления совместно с закрытым дренажом при осушении тяжёлых дерново-подзолистых глеевых почв, подстилаемых лессовидными глинами, повышает дренажный сток в 2 и более раз. Последствие рыхления сохраняется в течение первых двух - трёх лет. Последствия и эффективность глубокого рыхления на объёмы дренажного стока приведены на рисунке 1.9.

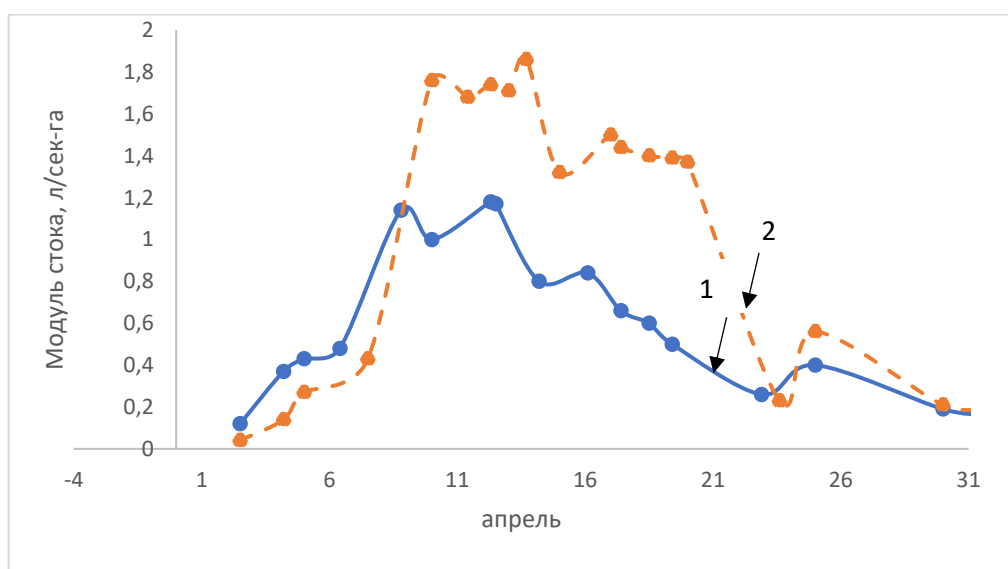


Рисунок 1.9 – Гидрограф дренажного стока на не рыхлённых (1) и рыхлённых (2) дерново-подзолистых глеевых почвах на лессовидных легких глинах в первый год эксплуатации (ОМП Дубна Московская область) [138].

Глубокое рыхление и крошение суглинистых и глинистых почв с коэффициентом фильтрации  $K_f$  менее 0,3 м/сут является обязательным агроулучшающим мероприятием. Изучение влияния рыхления по значениям коэффициента фильтрации ( $K_f$ ) позволяет получить более объективную информацию, чем по другим физическим параметрам (рис. 1.10).

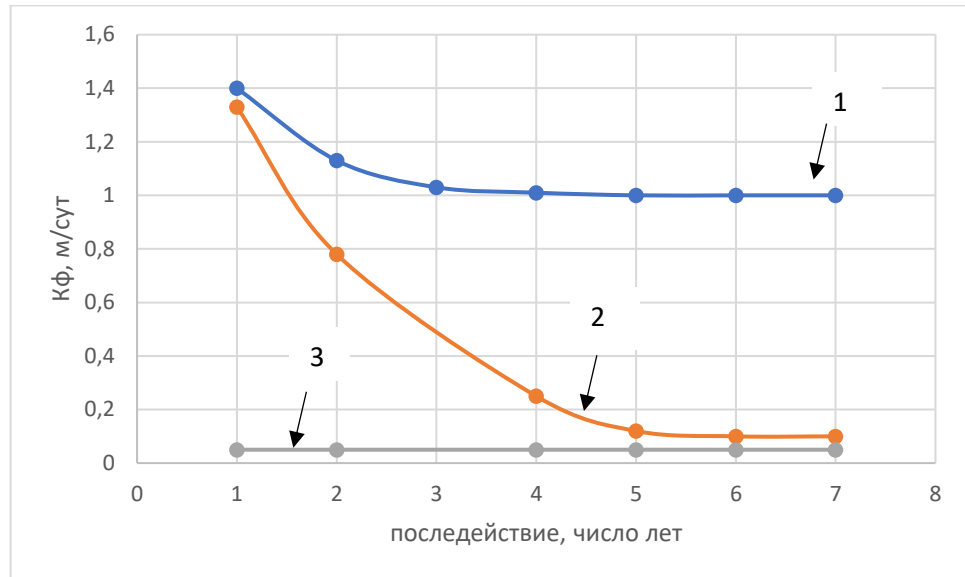


Рисунок 1.10 – Изменения коэффициентов фильтрации слоев почв:  
 1 — 40...70 см; 2 — 25...40 см, 3 — подпахотный слой до рыхления  
 (контроль) [45]

С течением времени эффект от рыхления снижается и абсолютные значения плотности почвы постепенно приближаются к равновесным. При этом в почве остаётся сформированная в результате глубокого рыхления сеть вторичных трещин, по которым активно мигрирует гравитационная вода (рис. 1.11).

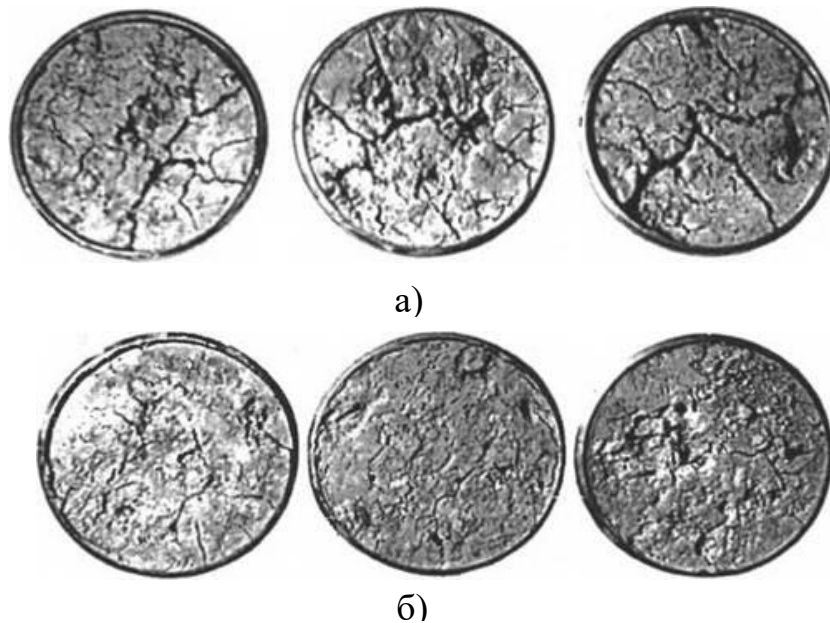


Рисунок 1.11 – Почвенная структура профилей глеевых почв:  
 а) дренаж + рыхление; б) дренаж (контроль) [39]



В почвах на тяжелых глинах с высоким содержанием ила (40 – 45 %), способных к значительному набуханию и скольжению по тонким неоднородным слоям, быстро (через 1 – 2 года) восстанавливаются исходные неблагоприятные физические свойства.

Следует отметить, что структура разрыхляемой почвы зависит от периодичности проведения рыхлительных работ, а также интенсивности использования её в сельхозпроизводстве. Вторичное уплотнение ранее разрыхленных горизонтов начинается с образования под плужной подошвы отдельных глеевых горизонтов, что требует проведения работ по глубокому рыхлению с периодичностью 3 – 4 года (рис. 1.12).

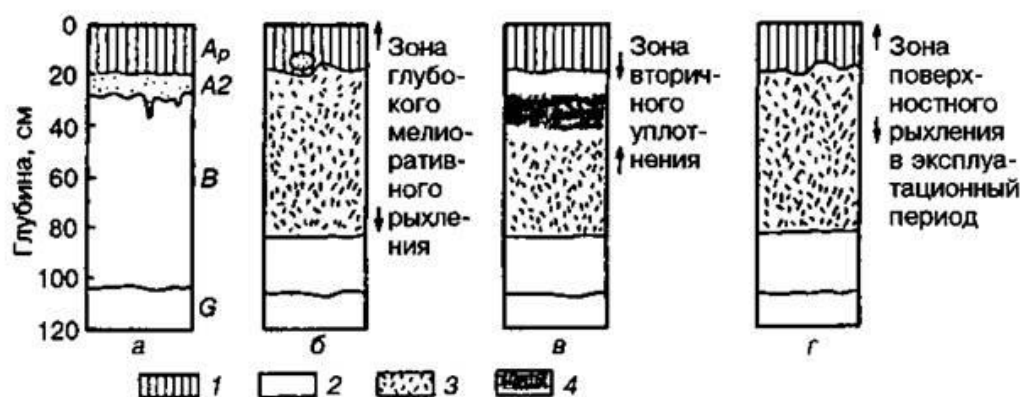


Рисунок – 1.12. Сложения тяжелых почв после глубокого рыхления на глубину 0,8-1,0 и эксплуатационного рыхления верхнего слоя мощностью 0,4-0,45 м: а) профиль до рыхления; б) после рыхления; в) после эксплуатации в течении 4-5 лет; г) после эксплуатационного рыхления; 1 — верхний пахотный слой; 2 — подпахотный уплотнённый слой; 3 — разрыхленный слой; 4 — вторичный уплотнённый слой (плужная подошва) [39]

Глубокая обработка почвы должна удовлетворять современным требованиям качества (табл. 1.12). Под качеством обработки подразумевается равномерность глубины рыхления, однородность агрегатов по глубине рыхления, степень разрыхления и полноты рыхления, гребнистость и другие показатели. Качество рыхления почвы зависит от её физико-механических свойств, конструкции рабочих органов, их способа агрегатирования и характеризуется рядом показателей,

основными из которых являются степень рыхления, крошения, уплотнения и размеры почвенных агрегатов, взаимное расположение которых образует оптимальную почвенную структуру и обеспечивает благоприятное соотношение объёмов твёрдой, жидкой и газообразной фаз.

Таблица 1.12 – Агромелиоративные требования к глубокому рыхлению

ПОКАЗАТЕЛЬ	ЗНАЧЕНИЕ
Глубина рыхления, м	0,6...0,8
Отклонение средней глубины обработки от заданной, %	±10
Степень крошения почвы (доля комков диаметром 5 см), %	70...80
Коэффициент разрыхления	1,25...1,45
Коэффициент полноты рыхления	0,7...0,95
Гребнистость, %	10
Подрезание сорняков	Полное
Перекрытие смежных проходов агрегата, см	10

Главные показатели глубокого рыхления – глубина, ширина захвата, интервалы, схема движения рыхлителя, значения показателей качества рыхления – определяются типом и физико-механическими свойствами почв, которые существенно различаются в разных областях Нечернозёмной зоны. Это привело к созданию различных типов рыхлителей, отличающихся назначением, конструкцией, и другими параметрами.

### 1.5 Обзор конструкций мелиоративных глубокорыхлителей

Наибольшее распространение для рыхления прочных грунтов до III категории включительно получили рыхлители пассивного действия. Для рыхления почвы на глубину до 0,45 м разработано и применяется оборудование

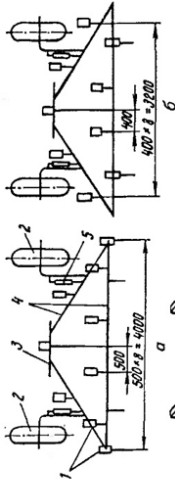
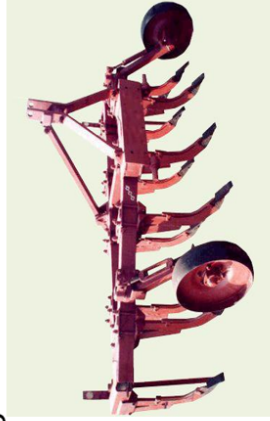
сельскохозяйственного назначения – чизельные плуги, культиваторы, рыхлители и плоскорезы, такие как ПЧ – 2,5...4, 5; ПРГ – 3,0Н, ПГН – 3...5; ПРПВ – 5 – 50, ПРПВ – 8 – 50; ГРН – 3 (ВИСХОМ), ЩРК 1,6 (ВНИИГиМ); ГК – 4,5; ПРБ – 4А; ГЧН – 4,5; БДМ-ПНЧ-3,2; ГР – 3,4; ПЧП – 6,0, зарубежные рыхлители “Paraplow”, “Terraplow”, “Bomford” (Германия) и другие., некоторые из которых показаны на рисунке 1.13 [46, 47, 70, 71, 199] стоек (рис. 1.13). Рыхлители имеют стойки, на концах которых установлены зубья или лемехи (долота). Вместо лемехов в нижней части стойки могут устанавливаться стрельчатые лапы для более интенсивного рыхления и подрезания сорных растений. Стойки рыхлителей крепятся к раме плуга. В зависимости от тягового класса базовой машины они могут оборудованы двумя, тремя или большим количеством.

Общим недостатком рабочих органов данного типа является сравнительно небольшая глубина рыхления – до 0,45...0,5 м. Многими исследованиями установлено, что на обрабатываемых землях с интенсивным использованием сельхозтехники, переуплотнение пахотного и подпахотного горизонтов достигает глубины до 1,5 метров, а распространение и произрастание корневой системы большинства сельскохозяйственных культур достигает глубины 1 м. Также глубокорыхлители неравномерно рыхлят пласт по глубине: верхняя его часть оказывается недопустимо глыбистой, а нижняя с разрушенной структурой почвы.

Для мелиоративного рыхления применяются рыхлители с рабочими органами пассивного, активного и комбинированного действия. Известны ранее разработанные и внедренные в мелиоративное производство отечественные рыхлители с пассивными рабочими органами - РУ.65.2,5; РС-0,6, РС- 0,8; РНТ-0,8; РН-1; РК -1,2 и другие [45, 50, 51, 166].

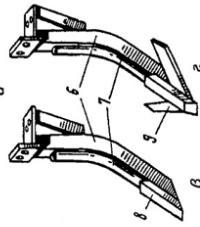
Большинство рыхлителей данного типа имеют рабочие органы стоечного типа. Лемех, закрепленный в нижней части стойки, действует на грунт по типу двухгранного клина: скалывает, разрушает и поднимает вверх слой почвы, а сама стойка рыхлителя раздвигает почву и разрыхляет ее.

Пассивные рыхлители  
 Чизельный плуг ПЧ-4,5

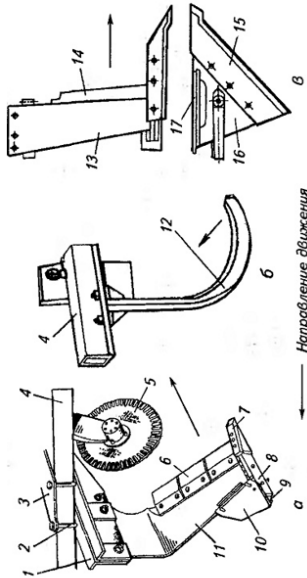


(размеры указаны в миллиметрах):

а, б — схемы размещения рабочих органов: 1 — рыхлители; 2 — опорные колеса; 3 — навеска; 4 — рама; 5 — регулятор глубины; в, г — разновидности рыхлителей: 6 — стойка; 7 — обтекатель; 8 — долото; 9 — стрельчатая лапа



Плуги-рыхлители ПБ-5 и ПБ-9



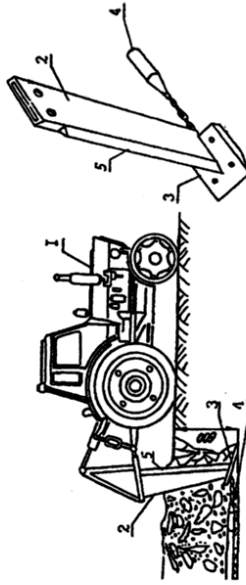
Рабочие органы плугов-рыхлителей:

а — рыхлительный корпус; б, в — рыхлительные стойки; 1 — кронштейн; 2 — болт; 3 — накладка; 4 — брус рамы; 5 — дисковый нож; 6, 15 — лемеха; 7 — долото; 8, 16 — башмаки; 9, 17 — полевые доски; 10 — рыхлительная пластина; 11, 12, 13 — стойки; 14 — накладка

Глубококорыхлитель «Дельта-Нью»



Щелерез — рыхлитель — кротователь ЩРК — 0,6



1- трактор; 2 - стойка; 3 - рыхлительный лемех; 4 - кротователь; 5 - щелерез

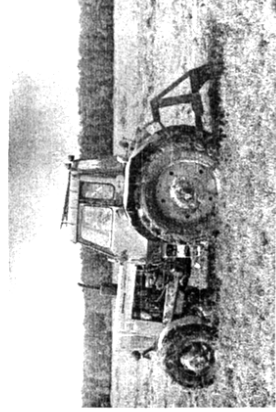
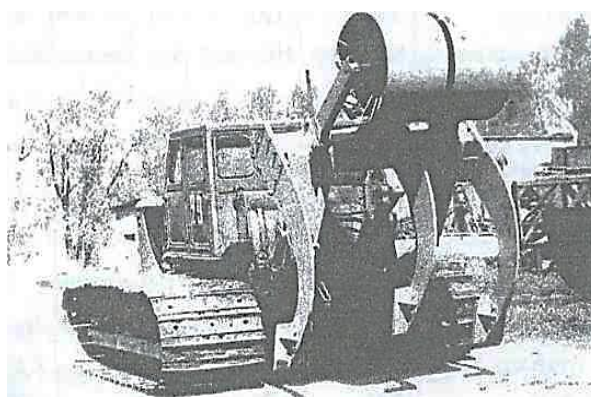
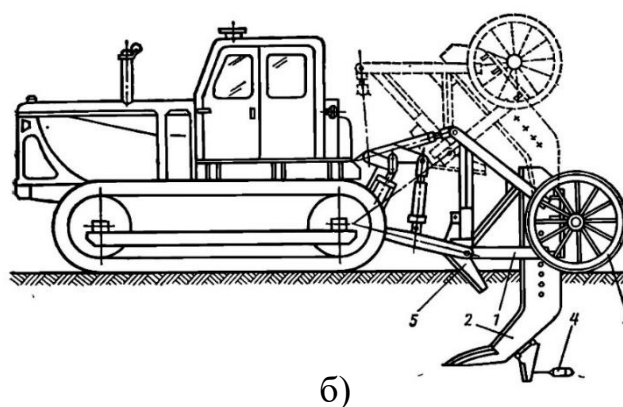
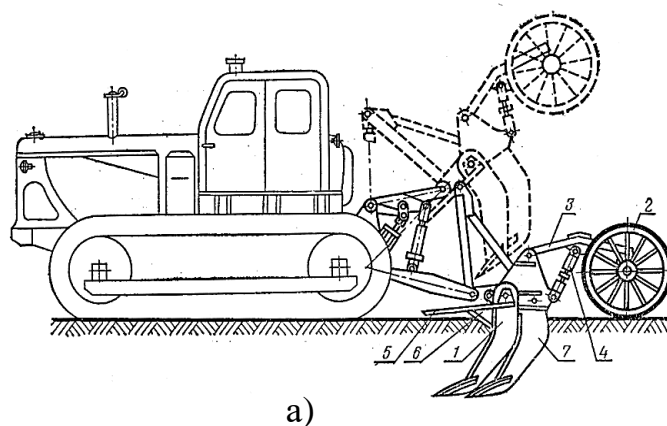


Рисунок 1.13 — Рыхлители сельскохозяйственного назначения

Стойки рыхлителя РУ 65.2,5 устанавливаются на раме, которая крепится к навесной системе базового трактора (рис. 1.14, а).



в)

Рисунок 1.14 – Мелиоративные глубокорыхлители:

а) Рыхлитель РУ.65.2,5; б) Рыхлитель РК- 1.2; в) Рыхлитель РС - 0.8

Глубина рыхления до 0,65 м устанавливается опорными колесами посредством винтовых стяжек. Рыхлитель РК-1,2 имеет одну стойку и производит рыхление на глубину до 1,2 м (рис.1.14, б). В нижней части имеется кротодренер, который прорезает кротовину ниже уровня рыхления. Стойки рыхлителя Р-С 0,8

криволинейного очертания обеспечивают скол грунта с последующим его подъемом на величину вертикальной проекции лемеха, в результате чего происходит сдвиг и рыхление верхних слоев (рис. 1.14, в). Благодаря значительному удалению от лемеха назад продвигаются уже в разрыхленном грунте, что обеспечивает снижение тягового сопротивления.

Исследования стоечных мелиоративных рыхлителей показали, что они обладают рядом недостатков, а именно недостаточной полнотой рыхления, особенно на большей глубине, неоднородностью разрыхления грунта по обрабатываемому слою, образованию на поверхности не разрыхлённых комьев почвы больших размеров, что вызывает необходимость дополнительного их измельчения, оставляют на дне полосы рыхления недопустимо большие зоны не разрыхлённого грунта.

Большее применение стоечные рыхлители получили для производства земляных работ в строительной отрасли с последующей разработкой грунта ковшами экскаваторов и землеройно-транспортными машинами.

Известны также рыхлители пассивного действия, имеющие рабочий орган V - образной формы. Были изготовлены и испытаны рыхлители конструкции ВНИИГиМ, такие как: РГ-1,2; РГ-0,5; РГ-0,8 (рис. 1.15). Корпус рыхлителя РГ - 0,8 состоит из двух наклонных рыхлящих стоек, соединённых между собой в нижней части общим лемехом (рис. 1.15 а). Процесс рыхления у таких рабочих органов происходит в основном за счёт сил сжатия грунта, поэтому их можно отнести к рыхлителям объёмного типа [51, 166].

Грунт в процессе рыхления подвергается сжатию между режущими кромками лемеха и боковых стоек за счет определённых значений углов резания, а также других воздействий. При работе рыхлители опираются на колеса, кромками лемеха и боковых стоек за счет определённых значений углов резания, а также других воздействий. При работе рыхлители опираются на колеса, при помощи которых устанавливается глубина рыхления. При навеске на трактор всех трёх рабочих органов, используется переходная рама, причём расположение их в плане шахматное – два спереди и один сзади. Переходная рама выполнена из прокатной



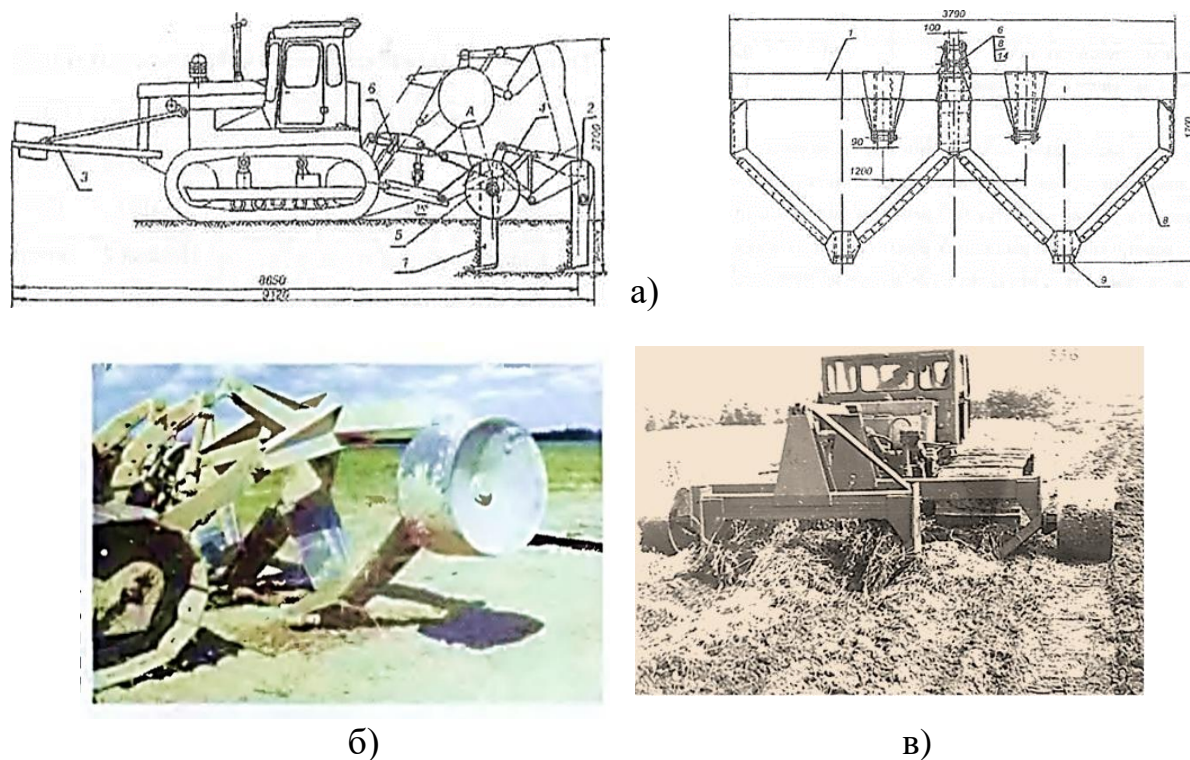


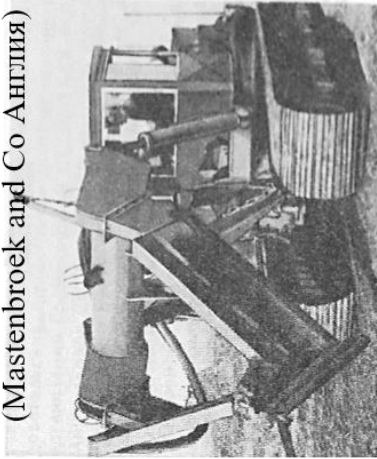
Рисунок 1.15 – V-образный рыхлитель РГ- 0,8:

а) общий вид машины; б) вид рыхлителя в двухкорпусном исполнении в транспортном положении; в) вид рыхлителя в трёхкорпусном исполнении в рабочем положении

стали сварной металлоконструкцией и служит для соединения передней и задней рам в один агрегат. Боковые ножи имеют съёмные лезвия, которые изготавливают из износостойчивой стали. Конструкции рыхлителей РГ-0,5, РГ 1,2 аналогичны РГ - 0,8, но с различной глубиной рыхления (рис.1.16). Полевые испытания рыхлителей РГ-0,8 и других модификаций при агрегатировании с тракторами К-701 и на базе трактора Т-130, проводимые в Московской области на грунтах II категории показали достаточно высокую производительность до 3,0 га/ч, хорошее разрыхление, при этом грунт на поверхности равномерно приподнимался на 0,20...0,25 м. Однако на поверхности наблюдалась неоднородность размеров разрыхленных комьев, встречались отдельные комья размером 0,2 м и более. Глубокое мелиоративное рыхление в некоторых случаях заменяло отвальную вспашку, которую проводили на этих землях [44, 45]. Высокая эффективность

работы дренажных систем наблюдалась при применении рыхлителей РГ- 0,5; РГ- 0,8 на мелиоративных системах.

Бестраншейный дренажкладчик 25/20V (Mastenbroek and Co Англия)



Бестраншейный дренажкладчик V-образный 1,8 м Нидерланды

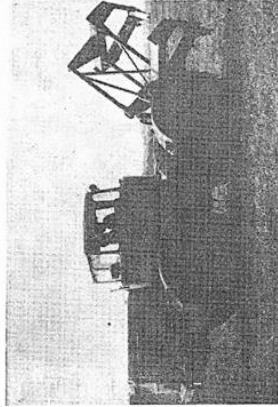


Объемные мелиоративные рыхлители пассивного действия V-образные РГ-0,5, РГ 0,8, РГ-1,2 конструкции разработанные В. С. Казаковым 1977-1982 г. ВНИИГиМ имени А. Н. Костякова



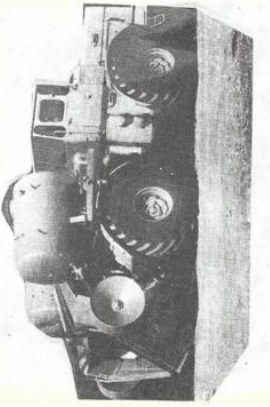
Объемный рыхлитель РГ-0,5, глубина хода 0,4...0,5 м

Производительность га/час – 0,25;  
Количество стоек шт - 1-3;  
Глубина рыхления, м –0,4...0,6;  
Ширина захвата, м -2,5;  
Масса навесного оборудования, т – 1,8  
Кэффициент разрыхления – 1,17  
Кэффициент полноты рыхления – 0,55  
Размер фракций (мм), % :  
Свыше 200 мм – 14,4  
200...100 – 18,7  
100...50- 25,6  
Менее 50- 41,3



Объемный рыхлитель РГ-0,8, глубина хода 0,6...0,8 м

Производительность га/час – 0,55;  
Количество стоек шт - 1-3;  
Глубина рыхления, м –0,6.. 0,8;  
Ширина захвата, м -2,5;  
Масса навесного оборудования, т – 2,3  
Кэффициент разрыхления – 1,18...1,22  
Кэффициент полноты рыхления – 0,65  
Размер фракций (мм), % :  
Свыше 200 мм – 15,8  
200...100 – 27,3  
100...50- 21,7



Объемный рыхлитель РГ-1,2, глубина хода 1...1,2 м

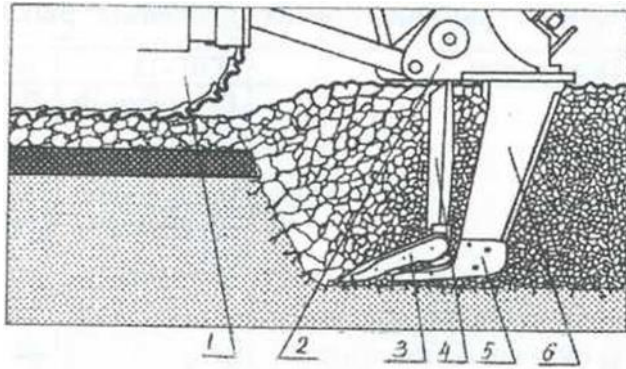
Тип машины Навесной  
Базовый трактор Т-130, К-701  
Тип стоек V-образный  
Количество стоек 1  
Глубина рыхления, м 0,8...1,2  
Ширина рыхления, м 1,8  
Рабочая скорость, км/ч 2,6...6,3  
Производительность, га/ч 0,4  
Габаритные размеры, мм:  
Длина 6200  
Ширина 2580  
— 42  
Ю

Рисунок 1.16– Объемные рыхлители с V – образными стойками

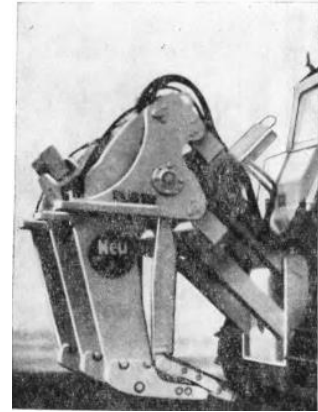


Известны так же V – образные рабочие органы используемые в дренаукладчиках с целью увеличения притока воды в дрена – Mastenbroek and Co (Англия), Van Damme Drainadge (Нидерланды) и другие.

Наряду с рыхлителями пассивного действия применяются стоечные рыхлители, имеющие элемент активного действия, создающий колебательные движения лемеха. Разрушению грунта при этом способствуют дополнительные колебания лемеха. В процессе разрыхления рабочий орган действует на пласт почвы ритмичными импульсами, в вертикальной плоскости. Привод лемехов осуществляется вертикальными штангами, соединёнными с эксцентриками. Схема разрушения грунта виброрыхлителем приведена на рисунке 1.17, а.



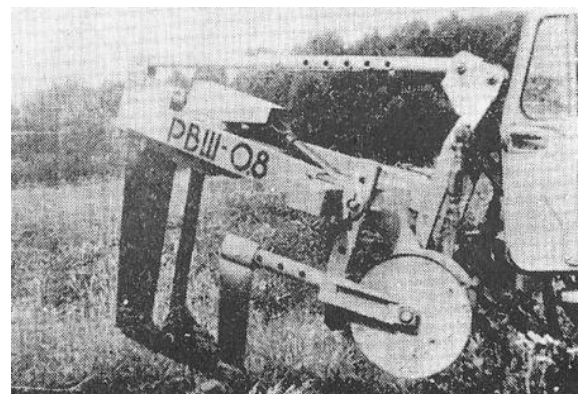
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.17 – Комбинированные рыхлители (пассивно-активные):  
 а) схема работы; б) рыхлитель ТЛГ - 12; в) виброрыхлитель ВР-80; г)  
 виброрыхлитель РВ-0,8

При рабочем перемещении агрегата лемехи рыхлителя совершают колебательные движения в вертикальной плоскости, приподнимая и разрыхляя пласт грунта, в результате тяговое усилие снижается. К такому типу относится рыхлитель ТЛГ-12 и ТЛГ-360 фирмы «Кебле-Гмайндер» (Германия), который состоит из трёхстоечного вибрационного рыхлителя и фрезы для обработки верхнего слоя почвы, рисунок 1.17, б [61, 139].

Известен также рыхлитель РВ-0,8 вибрационного действия на базе трактора Т-130БГ-1, разработанный во ВНИИГиМе, рисунок 1.17, в [51, 166]. Рабочий орган рыхлителя РВ-0,8 состоит из трёх активных и пассивных стоек. Активные стойки, с помощью эксцентриков совершают колебательные движения. Привод рабочего органа - гидромеханический. от дизельной насосной станции, навешиваемой на бульдозерное оборудование. Активные стойки в нижней части имеют лемех, совершающий сложные возвратно-колебательные движения в двух направлениях вверх-вниз и вперёд-назад. Рабочие органы рыхлителя РВШ - 0.8 выполнены в виде вертикальных стоек, задних активных лопаток, расположенных непосредственно за передними подрезающими пассивными лопатками, которые присоединены к нижней вертикальной стойке (рис.1.17, г).

Грунт, предварительно разрушенный передней пассивной лопаткой и вертикальной стойкой, попадает на активную лопатку, которая встряхивает весь подрезанный слой, разрыхляя его на мелкие фракции. Активные лопатки приводятся от вала отбора мощности трактора через карданный вал, цилиндрический многоступенчатый редуктор, предохранительную муфту, эксцентрик, рычажные механизмы и рычаги.

Анализ работы этих рыхлителей показал, что несмотря на лучшее качество работы по сравнению с рыхлителями пассивного действия их удельная энергоёмкость увеличивается в 3 раза, металлоёмкость в 2 раза, также они имеют меньшую производительность и более сложную конструкцию.

## 1.6 Обзор и анализ патентов и технических предложений по конструкции рабочих органов рыхлителей объёмного типа

Известно большое количество рыхлителей различных типов, существующих в виде опытных моделей и конструктивных разработок. В результате обзора и анализа авторских свидетельств и патентов был выявлен ряд патентов разнообразных конструкций мелиоративных рыхлителей [78, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130]. Рыхлители имеют общие элементы - лемех, боковые стойки, рама. Отличия состоят в геометрических параметрах этих элементов. На рисунке 1.18 а, б, в, г, д, е, ж, з, представлены рыхлители с различной конфигурацией боковых стоек, соединённых друг с другом на концах лемехом, образуя пространственную (объёмную конструкцию). Несмотря на то, что рыхлители объёмного типа имеют простую конструкцию и невысокую стоимость изготовления, большая часть данных технических решений не реализована в виде промышленных образцов. Из литературных источников известно, что рабочий орган V – образной формы боковыми стойками (рис. 1.18, а) был произведен в различных вариантах и опробован в полевых условиях [44]. Корпус V – образного рыхлителя имеет небольшую ширину захвата, при установке двух или трёх корпусов увеличивается масса и повышается энергоёмкость машины.

Рабочий орган с боковыми стойками U образной формы, связанными с помощью сварки в нижней части лемехом, (рис. 1.18, б) имеет также несложную конструкцию, но, как показали экспериментальные исследования, достаточно высокую энергоёмкость процесса разрыхления. При его работе происходит уплотнение грунта в средней части [81].

Известно также авторское свидетельство на рабочий орган рыхлителя также имеющего две V – образные наклонные относительно друг друга ножевые прямолинейные стойки, отличие данного рабочего органа заключается в том, что стойки соединяются в нижней части лемехом V – образной формы с вершиной,

направленной вверх, кроме того, лемех жёстко связан вертикальным ножом с верхней поперечной рамой, предназначенной для навески на трактор (рис. 1.18, в).

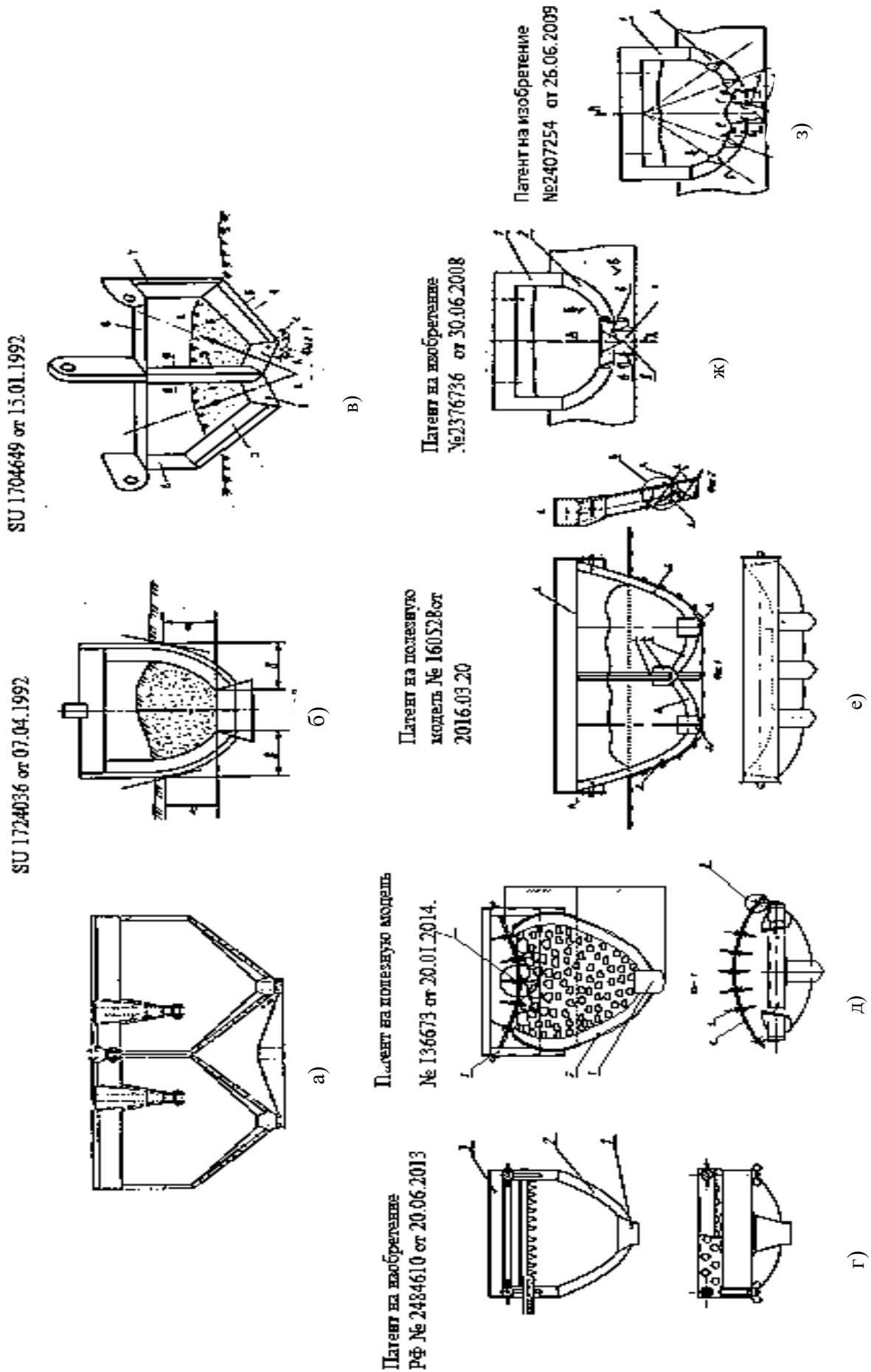


Рисунок 1.18 – Схемы рабочих органов объёмных рыхлителей объёмного типа

Конструкция позволяет улучшить качество разрыхления, а также снизить энергозатраты за счёт V – образного расположения элементов лемеха под углом 20...30°, а вертикальный нож придаёт лучшую жёсткость конструкции.

Мелиоративный рыхлитель (рис.1.18 – е) двухкорпусного рабочего органа позволяет увеличить ширину захвата, полноту и однородность рыхления. Рабочие органы объёмного рыхлителя с криволинейными параболическими стойками и дополнительным рабочим оборудованием позволяют улучшить качество рыхления. Стойки рыхлителя (рис. 1.18 г, д, е), по ширине выполнены выпуклыми, имеющими по высоте переменный радиус кривизны, равный 2/3 расчётной глубины рыхления (рис 1.18 ж, з).

Отличительной особенностью конструктивных решений (рис 1.18 г, д) является то, что они имеют дополнительное рабочее оборудование или конструктивные элементы, устанавливаемые и прикрепляемые на корпус основного рабочего органа. На раме, соединяющей в верхней части боковые стойки, установлен дополнительный горизонтальный брус с зубьями, упругая пластина или гибкий вал со свободно вращающимися дисками. На практике нашло применение в реальных конструкциях незначительное число этих идей. На кафедре организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ института мелиорации, водного хозяйства и строительства им. А.Н. Костякова, автором так же был запатентован ряд конструкций объёмных рыхлителей. Рабочие органы некоторых типов были изготовлены в виде моделей и испытаны с целью оценки качества работы и энергетических затрат. Экспериментальные исследования которых в лабораторных и полевых условиях дали положительные результаты (рис. 1.18 г, д, е, ж, з) [25, 27, 44, 45].

По сравнению со стоечными рыхлителями объёмные рыхлители с V – образным рабочим органом обладают большей производительностью в 2...5 раз, лучшей полнотой рыхления за счёт уменьшения не разрыхленных зон на дне борозды, а также повышенным (в 1,5 раза) коэффициентом разрыхления. К недостаткам рабочих органов V – образных рыхлителей следует отнести образование в верхнем слое 16...20 % комьев размером более 200 мм, которые

необходимо измельчать. Следует отметить, что исследований технологических (качество рыхления) и энергетических показателей, для совершенствования рыхлителей такого типа в настоящее время недостаточно. Кроме этого нет достаточно достоверных рекомендаций по выбору конструкции рабочих органов объёмного типа и их параметров. На основании этого были проведены теоретические и экспериментальные исследования рабочих органов рыхлителей.

### **1.7 Обзор и анализ исследований в области физических основ рыхления почвы**

Основы гипотез о предельном состоянии материалов были предложены Галилеем Г., Мариоттом, Сен-Венаном и др. Комплексные исследования прочности и процесса разрушения грунта рабочими органами пассивного действия проводятся с начала XX века. Это связано с интенсивным развитием средств механизации в строительстве и сельском хозяйстве. Горячкин В.П., являющийся основоположником отечественного сельскохозяйственного машиностроения, используя гипотезы о предельном состоянии, при котором напряжения в нагружаемой среде, и линейная деформация приводят к разрушению, предложил рациональную формулу для определения силы тяги плуга:

$$F = G \cdot f + k \cdot a \cdot b + \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2 \quad (1.5)$$

где  $F$  – сила тяги плуга;  $G$  – вес плуга;  $f$  – коэффициент трения;  $k$  – удельное сопротивление грунта резанию;  $a$  – глубина пахоты;  $b$  – ширина пласта;  $\varepsilon$  – удельное сопротивление грунта отбрасыванию пласта;  $v$  – скорость резания;  $\varepsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2$  – общее сопротивление грунта отбрасыванию.

Экспериментальные и теоретические исследования Горячкина В.П. легли в основу создания плугов рациональной формы. Было дано теоретическое обоснование работы лемеха и предложено математическое решение для определения оптимальной формы отвалов [24].

Исследования процесса рыхления почвы с/х культиваторами, чизельными плугами и другим оборудованием проводились в основном с глубиной обработки примерно до 0,5 м, результаты которых представлены в работах Токушева Ж.Е. [168], Татарникова В.О., Путрина С.А., Ветохина В.И. [18], Панова И.М. [116, 117], Синеокова Г.Н. [157, 158, 159], Мацепуро М.Е. [96], Желиговского В.А., Лурье А.Б. [73] и других.

Исследования, посвящённые изучению взаимодействия рабочих органов с грунтом строительных машин с ковшовыми, отвальными, ножевыми рабочими органами представлены в трудах Домбровского Н.Г., Зеленина А.Н. [41, 42], Ветрова Ю.А. [20], Томина Е.Д., Уродова В.И. [173] и других. Исследовалось влияние заострения зубьев ковша и заднего угла резания на сопротивление копанью, образование призмы волочения при резании грунта, влияние толщины стружки на усилие резанию и копанью. Результаты экспериментов Домбровского Н.Г. показали, что удельное сопротивление копанью зависит от соотношения периметра режущей кромки рабочего органа и площади сечения стружки. При увеличении толщины режущей кромки и уменьшении толщины стружки, удельное сопротивление слабо увеличивается. Сопротивление копанью незначительно уменьшается при уменьшении углов заострения зубьев ковша и заднего угла резания. Методы расчёта усилий резания и копания грунтов, предложенные на основании этих исследований, успешно применяются при проектировании землеройных машин. Следует отметить, что ковшовые и отвальные рабочие органы разрабатывают грунт за одну операцию сравнительно небольшим слоем, копанье и резание по физическим процессам существенным образом отличаются от глубокого рыхления.

Экспериментальные исследования резания грунта рабочими органами черенкового типа начали проводиться Динглингером Е. с 1927 года, которые позволили определить сопротивления при резании песка вертикальными листами. Им было предложено определять общее усилие как сумму сопротивлений резанию на лобовой поверхности и сил трения на боковых поверхностях листа. Также Динглингер установил, что грунт отделяемый от массива разрезающим ножом

разрыхляется до некоторой глубины, названной критической. В 1930 году работа Динглингера Е. была продолжена Ратье И. Опыты Ратье И. показали, что сопротивление грунта резанию неодинаково при изменении скорости от 0,03 до 0,3 м/сек.

В более широком плане опыты по резанию грунта ножевыми рабочими органами и периметрами проводились Зелениным А.Н. [42], с целью уточнения результатов Динглингера Е. и Ратье И. в естественных условиях на различных грунтах. Глубина резания изменялась от 0,05 до 0,25 м для плотных грунтов и от 0,12 до 0,35 м для песка при разной влажности. Установлено, что при влажностях, близких к пределу пластичности, сопротивляемость всех грунтов мало зависит от категории грунта, так как грунт разжижен; при влажности меньшей максимальной молекулярной, нарастание усилий происходит медленно.

На основании многолетних экспериментов Зеленин А.Н. получил обобщённую формулу по определению усилий резания  $F$  для элементарных профилей при резании талого грунта:

$$F = 10 \cdot C \cdot h^{1.35} \cdot (1 + 0,1 \cdot S) \cdot \left(1 - \frac{90^\circ - \alpha_p}{180^\circ}\right) \cdot \beta_0 \quad (1.6)$$

где  $C$  – число ударов ударника ДорНИИ;  $h$  – глубина резания;  $S$  – толщина режущего элемента;  $\alpha_p$  – угол резания;  $\beta_0$  – коэффициент, характеризующий влияние угла заострения ножа на усилие резания.

Эксперименты по резанию грунтов элементарными профилями проводил Ветров Ю.А. [20]. При исследовании зависимости усилий резания от степени износа ножей и других факторов им установлено, что оптимальным углом резания является угол 30...37°. На основании исследований Ветров Ю.А. предложил определять величину силы заблокированного резания как сумму трёх составляющих: лобовых сопротивлений, разрушения грунта в боковых расширениях и силы бокового среза. Касательная сила заблокированного резания простым ножом с площадкой износа:

$$P = P_{св} + P_{бок} + P_{бок.ср.} + P_{пл.изн.} = \varphi_{св} m_{св} + 2m_{бок} h^2 + \\ + 2m_{бок.ср.} h + m_{св} b h \eta_{пл.изн.} \quad (1.7)$$



где  $P_{св}$  – сила преодоления лобовых сопротивлений ножом, пропорциональная площади лобовой части среза, зависящая от угла резания и прочности грунта;  $P_{бок}$  – удельная сила разрушения грунта в боковых расширениях прорези;  $P_{бок.ср.}$  – удельная сила бокового среза;  $\varphi_{св}$  – коэффициент, учитывающий влияние угла резания;  $m_{св}$  – удельное сопротивление грунта резанию в лобовой части прорези при угле резания  $\alpha = 45^\circ$ ;  $b, h$  – ширина и глубина резания;  $m_{бок}$  – коэффициент характеризующий удельную силу разрушения грунта в боковых частях прорези;  $m_{бок.ср.}$  – коэффициент, характеризующий удельную силу бокового среза грунта одним из боковых рёбер ножа;  $\eta_{пл.изн.}$  – коэффициент, учитывающий износ рабочего органа.

Нормальная сила резания:

$$N = (P_{св} + P_{бок} + P_{бок.ср.}) \cdot ctg(\delta + \mu) - P_{пл.изн.} \cdot ctg(\delta_1 + \mu) \quad (1.8)$$

где  $\delta$  – угол резания;  $\delta_1$  – угол наклона площадки износа;  $\mu$  – угол трения грунта о нож.

В Белоруссии проводились исследования по глубокому резанию торфяных почво-грунтов проводились Турецким Р.Л. и Масюком С.К. [171]. Целью эксперимента являлось выяснение зависимости сопротивлений резания торфяного грунта ножами от глубины резания (0,1...0,8 м), толщины рабочего органа (6,5...100 мм), длины боковой грани, угла заострения ( $15^\circ$ ... $180^\circ$ ), угла резания и скорости движения агрегата. Длина боковой грани бралась 45, 100 и 200 мм. Скорость резания менялась в пределах 0,55...2,51 м/сек. Исследователями были получены формулы для определения сопротивлений резания торфяного грунта в зависимости от этих факторов и скорости резания.

В этот же период Цехановичем П.В. проводились опыты по выяснению влияния глубины дренирования на тяговые усилия, влияния диаметра и угла заострения дрёнёра на сопротивления его перемещению в грунте. В результате этих исследований получены основные данные для обоснования формы дрёнёра и его основных геометрических параметров, устойчивости полости кротовой дрены,

влияния внешней нагрузки на глубину распространения деформаций в торфяном грунте.

Кострицын А.К. [61], анализируя работы Зеленина А.Н. и других авторов, проводил опыты на суглинистом избыточно увлажнённом грунте, супеси и песке. Рабочие органы изготавливались в виде пятигранных ножей и конусов. Глубина резания изменялась от 0,2 до 0,8 м через интервал в 0,2 м. Толщина ножей составляла 9; 16,5; 26,5 мм. Угол заострения менялся от 20 до 180°. Скорость резания не изменялась и составляла 0,7 м/сек. Кострицын А.К. обнаружил, что формулы Зеленина А.Н. не являются универсальными для различных грунтов, различных рабочих органов и условий работы. Кострицын А.К. подтвердил результаты опытов Динглингера Е. и Ратье И. о наличии двух зон по глубине щели.

Экспериментальными исследованиями по резанию глубоких щелей в грунте занимался Рынкевич В.С. [148]. Опыты проводились в полевых условиях с навесными рабочими органами пассивного действия при глубине резания от 0,10 до 0,14 м, при сравнительно малой толщине ножа – от 0,05 до 0,15 м и угле резания от 20 до 170°. Характер изменений сопротивлений резанию минеральных грунтов в опытах Рынкевича В.С. подтвердил основные выводы Кострицына А.К. и Уродова В.И. о наличии двух зон по глубине при резании глубоких щелей в грунте, а также и то, что в первой зоне сопротивления резанию и глубина связаны параболической зависимостью, а во второй – прямолинейной. Это явление Рынкевич В.С. объясняет неодинаковостью деформаций грунта в двух зонах.

Экспериментальные и теоретические исследования резания глубоких щелей в грунте рабочими органами пассивного действия проводились в Белорусской сельскохозяйственной академии и в Витебском технологическом институте. В качестве экспериментальных установок, используемых при резании грунтов, применялись бестраншейный прицепной дреноукладчик и прицепной рыхлитель Р-80, резание грунта дреноукладчиком производилось на глубину до 2 м, рыхлителем на глубину до 1,2 м. Экспериментальные исследования резания проводились рабочими органами пассивного действия в полевых условиях на трёх грунтовых массивах: суглинистом, супесчаном и торфяном. Рабочие органы, имели

трёхгранную форму поперечного сечения, угол заострения составлял  $45^\circ$ , угол резания  $90^\circ$ , толщина рабочего органа менялась в пределах от 0,03 до 0,15 м.

Как показали результаты исследования, приводимые Уродовым В.И. [174], по влиянию угла заострения рабочего органа пассивного действия, при угле в  $45^\circ$  сопротивления суглинка и супесчаного грунта являются минимальными. На малых и больших глубинах сопротивления резанию минерального и торфяного грунта имеют одинаковую функциональную зависимость от угла заострения рабочего органа. Эксперименты Уродова В.И. подтвердили выводы Пигулевского М.Х., Ратье, Зеленина А.Н. и Кострицина А.К.

При исследовании ножевых стоечных рыхлителей и бестраншейных дреноукладчиков Томиным Е.Д. и Казаковым В.С., Максименко В.П. [45], в основном, изучались энергетические показатели и качественные характеристики разрыхлённого грунта. При резании грунта на глубину 2 м и более Томин Е.Д. отметил наличие трёх характерных зон деформации грунта: верхняя с разрыхлённым грунтом, средняя переходная, где частично наблюдались пластические деформации и нижняя зона, где грунт уплотнялся и вдавливался в стенки прорези. Авторами отмечено, что на энергетические показатели процесса рыхления в большей степени влияют форма и параметры рабочего оборудования. Сопротивление грунта рыхлению зависит от конструкции рабочего органа, от типа и влажности грунта и может быть рассчитано по формуле:

$$P = f \cdot G + k \cdot F + K_F \cdot gradF_f + \varepsilon \cdot Fv^2 \quad (1.9)$$

где  $f$  – коэффициент перекачивания;  $G$  – масса рыхлителя;  $k$  – удельное тяговое сопротивление;  $F$  – площадь сечения разрыхленной почвы;  $K_F$  – удельное сопротивление почвы рыхлению при проходе между наклонными стойками рыхлителя;  $gradF_f$  – увеличение сопротивления на боковых стойках рыхлителя;  $\varepsilon$  – коэффициент, учитывающий затраты усилий на отбрасывание вырезанной призмы грунта;  $v$  – рабочая скорость рыхлителя

Патентный поиск конструкций рыхлителей объёмного типа позволил выявить более 10 разновидностей, однако известно, что только один тип рабочего

органа был реализован в виде опытного образца (РГ-0,8). Исследования этого рабочего органа в нескольких вариантах с режущими элементами в виде V-образного периметра и глубиной рыхления 0,8...1,2 м проводились Казаковым В.С., Максименко В. П., Турсуновым Б.Н., Акимовым Н.В. и другими [46].

Установлено, что правильный выбор технологии и периодичности глубокого рыхления, увязка его с другими элементами агрономелиоративного комплекса даёт увеличение устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур до 20...30%.

Большая часть экспериментальных исследований объёмных рыхлителей была выполнена с целью изучения энергетических и технологических показателей.

В этих исследованиях основное внимание было уделено определению тяговых сопротивлений и ряда технологических факторов: крупности фракций грунта на поверхности и других. Исследований по влиянию формы, размеров и углов резания рабочих органов на сопротивление рыхлению и качество рыхления (однородность фракций, наличие мелких и средних фракций) в этих работах практически не представлено. Кроме того, методика расчёта сопротивления рыхлению с учётом физических явлений процесса разрушения грунта для практического расчёта в настоящее время требует научного обоснования и разработки.

Рассматривая процесс взаимодействия рабочего органа объёмного типа с грунтом, нужно отметить, что условия работы рыхлителей существенным образом отличаются от копания и резания землеройными машинами. Основными отличиями являются блокированное резание, переменная плотность грунта с увеличением глубины, кроме этого, к мелиоративным рыхлителям предъявляются особые требования качества рыхления. В процессе сравнительных экспериментальных исследований получено подтверждение этих особенностей. Эти результаты также не противоречат выводам ранее выполненных исследований о наличии нескольких зон деформации почвы по обрабатываемому профилю от поверхности до глубины рыхления. В зоне, прилежащей к дневной поверхности рыхлитель взаимодействует с грунтом нарушенной структуры, где происходит

рыхление, сдвиг и подъём вверх грунта. В средней зоне с переходным увеличением плотности грунт испытывает сжатие и разрушение.

### **1.8 Цель и задачи исследований**

**Цель исследований** – улучшение агрофизических свойств почв с применением объёмного рыхлителя усовершенствованной конструкции.

**Задачами исследований являются:**

– изучить и проанализировать основные агрофизические свойства почв полей, выбывших из сельскохозяйственного оборота и факторы, влияющие на восстановление и повышение плодородия бесструктурных тяжёлых почв, включая агромелиоративные мероприятия.

– получить реальную картину физических процессов при глубоком рыхлении почв тяжёлого механического состава, сформировав математическую модель процесса и апробировав её на основании результатов экспериментальных исследований;

– оценить влияние неровностей рельефа поля и параметров машины на неравномерность глубины рыхления;

– провести экспериментальные исследования с использованием физических моделей рыхлителей и опытной установки для полевых условий;

– оценить качество рыхления методом фрактального анализа, а также трансформацию основных агрофизических свойств почв в результате их рыхления объёмным рыхлителем;

– выработать рекомендации по совершенствованию методов практического расчёта сил сопротивления рыхлению;

– разработать рекомендации производству и дать экономическую оценку эффективности технологии с применением рыхлителя предлагаемой конструкции.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Изучение состояние вопроса позволило оценить необходимость рыхления почв тяжёлого состава для повышения плодородия и улучшения эффективности работы мелиоративных систем путём улучшения агрофизических свойств почвы при рекультивации неиспользуемых или освоении новых сельскохозяйственных территорий. Для этого необходимо проведение агромелиоративных мероприятий и комплекса культуртехнических работ, включая глубокое мелиоративное рыхления почв тяжёлого механического состава.
2. Обследование полей, выбывших из сельскохозяйственного оборота, позволило оценить современное состояние неиспользуемых полей в течение от 4 до 8 лет. На полях производилась геодезическая съёмка с целью оценки характеристик рельефа поверхности полей, также проведено определение изменения физических свойств почвы от поверхности до глубины 0,8 метров. Установлено, что при увеличении глубины до 0,8 метров плотность увеличивается от 1,54 до 1,96 г/см<sup>3</sup>.
3. Полученная оценка характеристик рельефа поверхности поля по высотным отметкам и длине могут быть использованы для оценки неравномерности глубины рыхления.
4. Обзор конструкций рабочих органов рыхлителей показал, что при наличии большого количества рыхлителей, наиболее рациональными являются рабочие органы объёмного типа, обеспечивающие наилучшее качество рыхления.
5. Установлено, что разуплотнение глубоких слоёв почвы в настоящее время проблематично из-за отсутствия необходимого рабочего оборудования. При испытаниях рыхлителей объёмного типа РГ-0,8 больше внимания уделялось исследованиям по оценке влияния энергетических затрат в зависимости от режимов работы. Исследования по обоснованию выбора параметров и конструкции рыхлителей и влиянию этих параметров на однородность рыхления практически не выполнялись.

**Объект исследования.** Конструкции и параметры рабочих органов мелиоративных рыхлителей, агрофизические свойства почв.

**Предмет исследования.** Трансформация основных агрофизических свойств почв, качественные и энергетические показатели их рыхления усовершенствованным объёмным мелиоративным рыхлителем.

## **ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЫХЛЕНИЯ**

### **2.1. Анализ формирования потребительских свойств мелиоративных глубокорыхлителей**

Под потребительскими свойствами машин подразумевают свойства, определяющие их способность выполнять необходимые технологические функции в процессе работы в соответствии с заданными требованиями.

Потребительские свойства вырабатываются в процессе развития науки и техники, возникновения новых технологий при этом улучшаются технико-эксплуатационные характеристики машин и условий работы, а также повышается качество производимых работ. Их оценивают по агротехническим, энергетическим и эргономическим показателям.

При оценке рыхлителей с эксплуатационной точки зрения особое значение имеют энергетический и динамический анализы процессов их функционирования в зависимости от способа агрегатирования машины, её конструктивных параметров, рациональности построения технологических схем [102].

В процессе разработки документации по выбору и проверке новых технических решений, обеспечивающих достижение основных потребительских свойств продукции необходимо руководствоваться ГОСТ 20915-75 [25, 26, 27, 28].

Для обоснования выбора наиболее рационального типа рабочего оборудования мелиоративного рыхлителя (рыхление на глубину до 0,8...1,2 метров) произведён анализ факторов, формирующих потребительские свойства рыхлителей (рис. 2.1). Факторы формируются определёнными показателями и выполнением ряда необходимых требований. К основным факторам следует отнести агромелиоративные, энергетические, конструкционные, экономические и эксплуатационные.



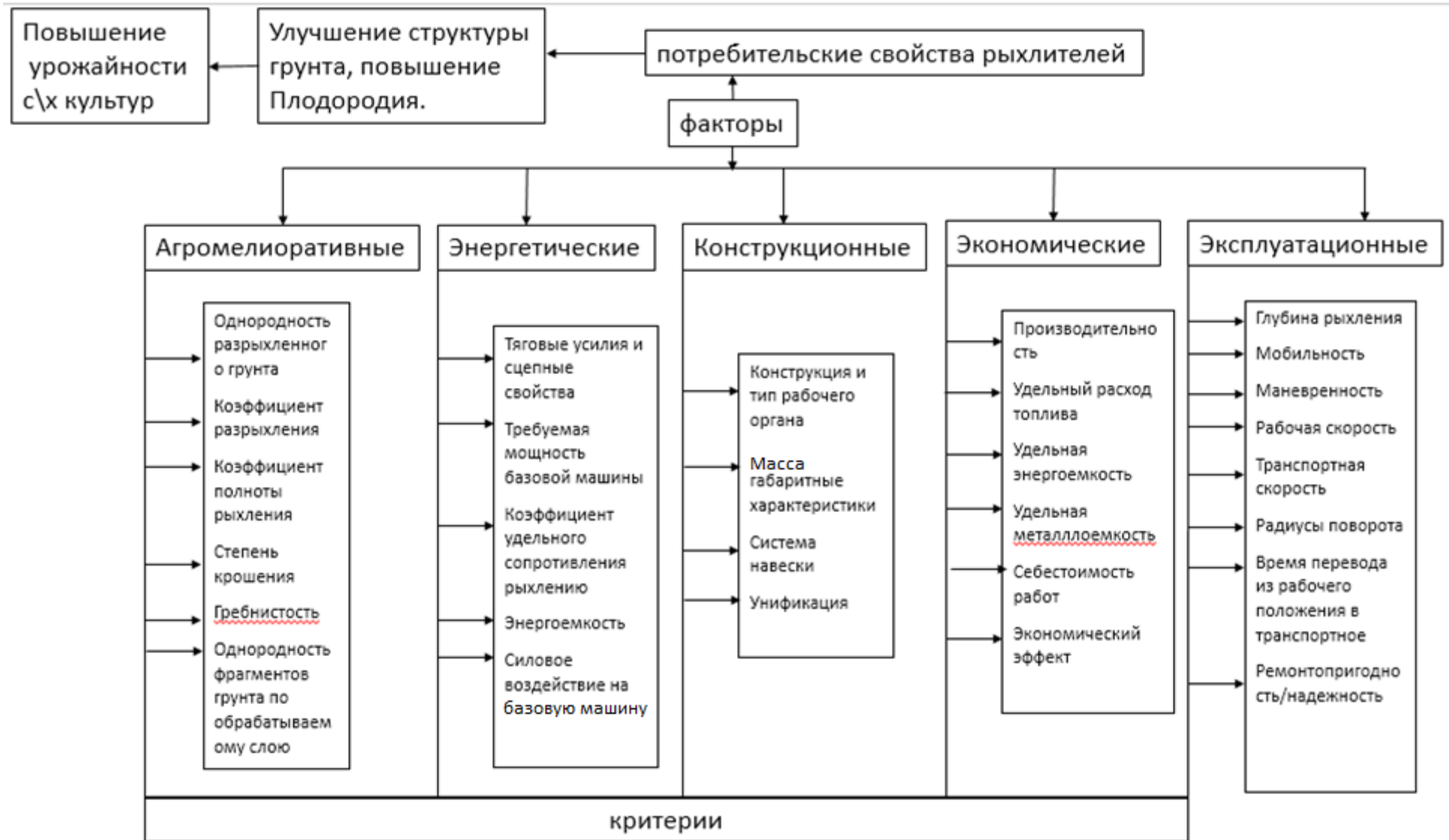


Рисунок 2.1 – Факторы, формирующие потребительские свойства мелиоративных рыхлителей

Основные факторы формируются совокупностью различных показателей: энергетический – мощностью двигателя, затратами энергии, тяговыми, сцепными и силовыми характеристиками машины, учитывают тип базовой машины; конструктивный – обеспечивает прочность, простоту, надёжность рабочего оборудования и соответствие техническим требованиям; экономический – определяет стоимость машины, срок окупаемости и себестоимость производства работ; эксплуатационный – учитывает производительность, надёжность и т.д. Конструкционные факторы тесно связаны с энергетическими и агрономелиоративными показателями. К конструкционным факторам, формирующим потребительские свойства относятся конструкция и тип рабочего органа, простота и металлоёмкость конструкции, систему навески. К показателям, определяющим энергетические факторы можно отнести тип грунта и его агрофизические свойства и физико-механические свойства грунта, тяговые усилия и сцепные свойства базовой машины.

Для выработки практических рекомендаций по выбору типа и конструкции рабочего органа рыхлителя мелиоративного назначения с потребительскими свойствами, наиболее полно удовлетворяющими основным требованиям, необходимо определить факторы, имеющие существенные приоритеты.

Все факторы, формирующие потребительские свойства связаны между собой и оказывают влияние влияют друг на друга (рис. 2.3).

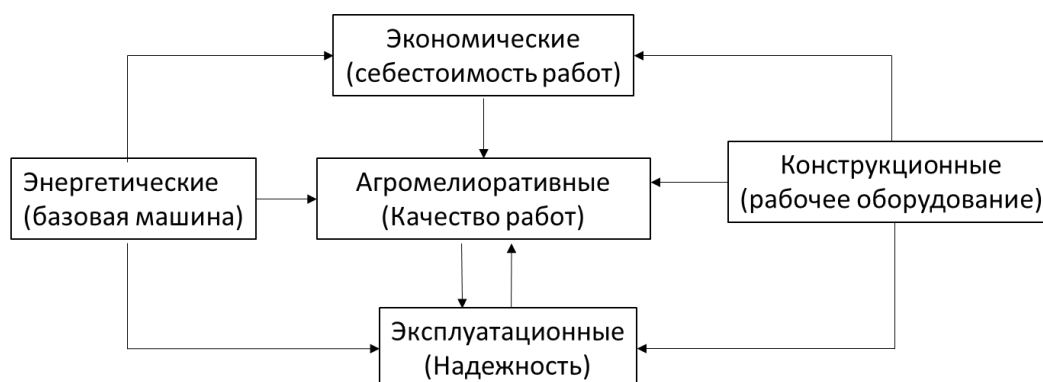


Рисунок 2.3 – Блок-схема взаимосвязей факторов, определяющих потребительские свойства

Агрономелиоративные требования учитывают качество работы, выполняемой

машинами в соответствии с нормативными показателями и зависят от технологии работ. Агромелиоративные требования к технологическому процессу – это совокупность правил воздействия мелиоративной машиной на обрабатываемую среду. Показатели качества работ формируются от совокупности следующих основных условий: требования к состоянию среды (коэффициенты разрыхления, полноты рыхления, однородности разрыхления по обрабатываемому профилю и на поверхности, неравномерность глубины разрыхления); срок и продолжительность работ; показатели режимов работы машины. Несоблюдение требований качества одного из приёмов производственного процесса отрицательно сказывается на всех последующих. Главная агротехническая задача обработки почвы – создание условий, обеспечивающих сохранение, восстановление и повышение её плодородия на всей глубине размещения корневой системы растений, что способствует получению возможно больших урожаев сельскохозяйственных культур.

Как показали исследования В.С. Казакова и других авторов, а также эксперименты, выполненные автором, в большей степени удовлетворяют основным потребительским свойствам рыхлители пассивного действия с рабочими органами объёмного типа [44, 45, 50, 166].

Конструкция V – образного рыхлителя довольно простая, надёжная, небольшой стоимости, практически не требующая технического обслуживания. Применение энергонасыщенных тракторов позволяет реализовать тяговые усилия, необходимые для работы рабочих органов данного типа. Более мощные машины обеспечивают увеличение производительности при нормальных условиях сцепления движителя с грунтом.

Анализ факторов показал, что рыхлители объёмного типа по сравнению с другими в большей степени соответствуют агромелиоративным требованиям при рыхлении на глубину до 0,8...1,2 метров, обеспечивая необходимое качество работ.

Как показали исследования опытных образцов V- образного рыхлителя, на поверхности образуется до 42 % крупных комьев, свыше 100 мм, [51]. Это требует

дополнительной предпосевной обработки почвы. Одним из недостатков рыхлителей является большое сопротивление рыхлению, что вызывает необходимость поиска решений снижения усилия за счёт более совершенной конструкции рабочего органа, или применения базовых машин, тракторов, повышенной мощности с достаточным для работы тяговым усилием.

Для получения более однородной структуры почвы, повышения полноты рыхления, снижения тягового сопротивления, необходимо проведение дополнительных исследований с целью выбора конструкции и оптимизации параметров рабочего оборудования рыхлителя. Предложения по модернизации конструкции рабочего органа заключаются в определении рациональных параметров и конструкции рабочего оборудования для более полного удовлетворения потребительских свойств мелиоративными рыхлителями.

## **2.2 Оценка влияния неровностей поверхности поля на неравномерность глубины рыхления**

Для оценки неравномерности глубины рыхления как одного из показателей качества рыхления выполнено исследование математической модели «машина – обрабатываемая среда». Функционирование рыхлителя можно рассматривать как реакцию на входные возмущения и управляющие воздействия, при этом расчетной схемой является схема «вход - выход». В такой схеме расчёт и конструирование машины осуществляется на основе связей между входными и выходными переменными, а также динамики прохождения и преобразования входных переменных, т. е. модель работы рыхлителя можно представить в виде динамической системы, осуществляющей преобразование входных возмущений и управляющих воздействий в выходные. В качестве входных переменных принимаются все внешние возмущения (условия работы) и управляющие воздействия (со стороны машиниста или автоматической системы управления), которые представляют собой конкретные физические величины (силы, моменты

сил, перемещения линейные и угловые и др.). В качестве выходных - совокупность переменных реакций, которые определяют качество работы машины, энергетические и технико - экономические ее показатели, показатели прочности и надежности и др.

В процессе работы мелиоративный рыхлитель можно представить как динамическую систему с несколькими входными и выходными переменными (рис. 2.4) [86, 143].



Рисунок 2.4 – Динамическая модель навесного мелиоративного рыхлителя

На входах которой действуют вектор-функции условий работы (внешних воздействий)  $X = z(t), F(t), \lambda(t)$ . Входными параметрами были приняты высотные характеристики поверхности поля  $z(t)$ , сопротивление рыхлению  $F(t)$ , управляющие воздействия  $\lambda(t)$ . Выходные переменные также представляют собой вектор  $Y = h(t), N(t), \Delta x(t)$  который показывает, как ведет себя машина в реальных условиях функционирования. В качестве выходных нами выбраны глубина рыхления  $h(t)$ , расход топлива  $N(t)$  и смещение центра давления  $\Delta x(t)$ , являющиеся функциями времени. Процессы  $x_i(t)$  и  $y_i(t)$  имеют случайный характер в вероятностно-статистическом смысле.

При построении математической модели мелиоративного рыхлителя в основу положена схема (рис. 2.4). Выходной вектор  $Y$  зависит от входных векторов  $X$  и свойств рыхлителя как динамической системы. Эти свойства могут быть выражены оператором  $W$ , который определяет как машина преобразует входные воздействия:

$$Y = W[X] \quad (2.1)$$

Построение математической модели машины и её технологического процесса заключается в установлении вида и структуры операторов  $W$ . В качестве

операторов  $W$  могут быть приняты дифференциальные уравнения, передаточная функция и другие характеристики [143].

С целью упрощения процесса исследования осуществлялось с использованием одномерной динамической модели. В результате обследования полей установлено, что вертикальные отметки поверхности поля можно представить массивами случайных чисел. При перемещении рыхлитель с гусеничным или пневмоколесным движителем и навесным рабочим органом, расположенным за пределами опорной поверхности, воспринимает колебания неровностей поверхности поля. Эти колебания можно рассматривать как входные воздействия на агрегат, а колебания режущего элемента рабочего органа в этом случае можно представить как выходное воздействие на глубину рыхления. Изменение величины глубины рыхления влияет на качество рыхления, а также на режимы работы базовой машины, такие как неравномерность нагрузки на рабочем органе и двигателе, смещение центра давления, проходимость, расход топлива и рабочую скорость. Неравномерность глубины рыхления оказывает влияние на урожайность посевных культур, так, по наблюдениям Казакова В.С. было замечено уменьшение высоты стеблей кукурузы в местах незначительного выглубления рабочего органа, что отмечалось в уменьшении зелёной массы [73].

С целью оценки численных значений диапазона колебаний рабочего органа рыхлителя поверхность трассы, была представлена в виде массива данных. Поверхность участка поля и трасса движения машины представляется как «случайная поверхность» [60, 77, 122].

Анализируя структурную схему рыхлителя с базовой машиной и навесным рабочим оборудованием, а также взаимодействие элементов машины друг с другом было получено выражение передаточной функции и амплитудно-частотной характеристики мелиоративного рыхлителя. В общем виде передаточную функцию  $W(s)$  можно представить как отношение выходного параметра  $y(s)$  и входного воздействия  $x(s)$  [74, 122].

Спектральная плотность функции  $S_y(w)$  выходного воздействия связана со спектральной плотностью  $S_x(w)$  входного сигнала соотношением:

$$S_y(w) = S_x(w) \cdot |\Pi \cdot (s)|^2, \quad (2.2)$$

На основании графической интерпретации расчётных схем были составлены передаточные функции рыхлителя с базовым трактором гусеничным Т-130 и пневмоколесным К-700 [86]. (рис. 2.6).

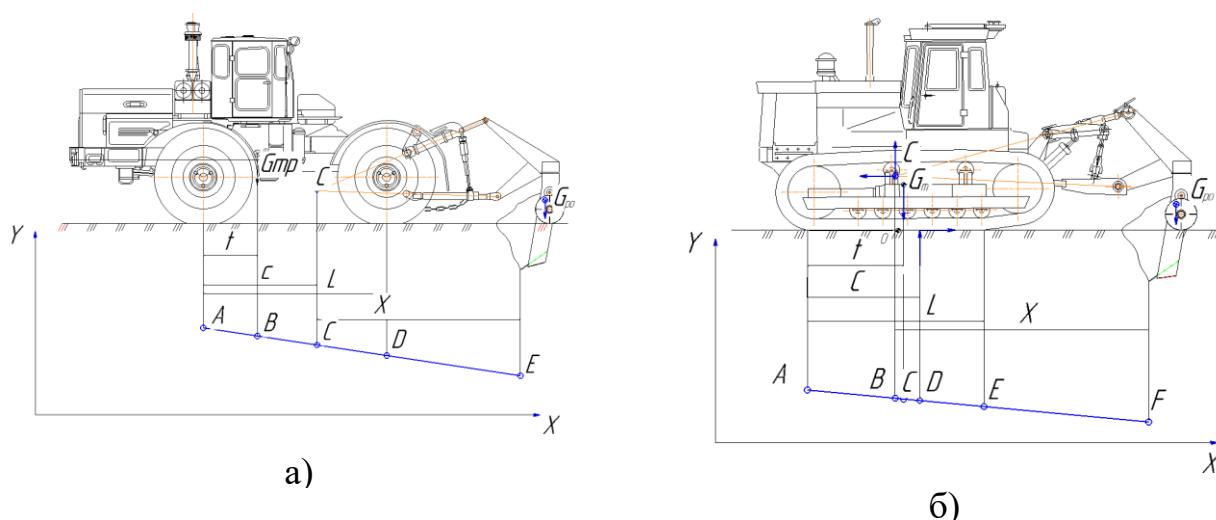


Рисунок 2.6 – Схема к определению передаточной функции рыхлителя:  
 а) на базе пневмоколесного трактора; б) на базе гусеничного;  $A, D$  и  $A, E$  – начальная и конечная точки контакта гусеничного и пневмоколесного хода с поверхностью,  $B, D$  – проекции центра тяжести трактора и центра давления рыхлителя,  $C$  – проекция мгновенного центра поворота рабочего органа;  $E, F$  – проекции режущей кромки рабочего органа на глубине рыхления.

В первом приближении передаточную функцию рыхлителя при жёсткой навеске рабочего органа на трактор с гусеничным ходовым оборудованием можно представить выражением:

$$\Pi(s) = \frac{X}{X + K \cdot (L - t) \cdot s + (X - c)s^2}, \quad (2.3)$$

где  $L, t, c, X$  – геометрические параметры;  $K$  – коэффициент пропорциональности,  $s$  – комплексная переменная преобразования.

Математическое выражение передаточной функции рыхлителя с пневмоколесным трактором можно представить выражением:

$$\Pi(s) = \frac{\alpha \cdot e^{-s(L+X)} - e^{-sX}}{\alpha - 1}, \quad (2.4)$$

где  $\alpha = X/(L+X)$ .

Амплитудно-частотная характеристика рыхлителя определяется как модуль передаточной функции:

$$A(\omega) = |\Pi(s)| \quad (2.5)$$

Графики амплитудно-частотных характеристик рыхлителя приведены на рисунке 2.7.

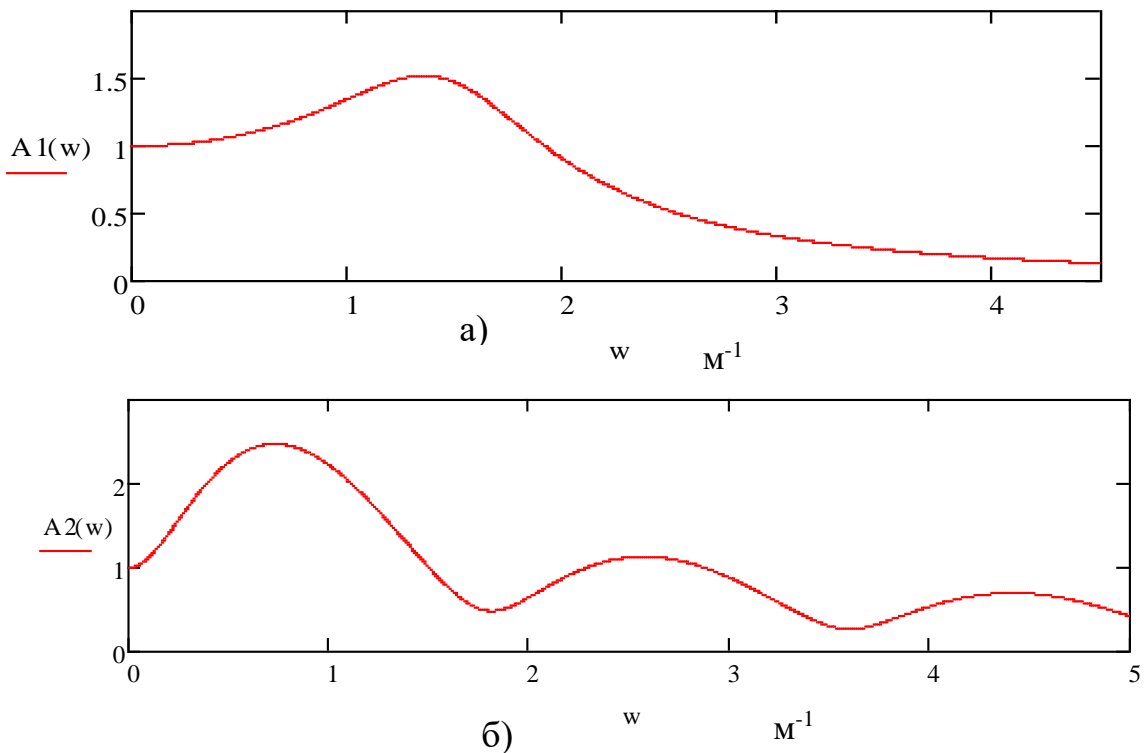


Рисунок 2.7 – Амплитудно-частотные характеристики рыхлителя:

а) при агрегатировании с гусеничным трактором, б) на базе пневмоколесного;

$\omega$  - волновая частота,  $A(\omega)$  - коэффициент усиления

Корреляционные функции высотных отметок поля по трассе движения рыхлителя были аппроксимированы выражением:

$$R(\tau) = De^{-\alpha|\tau|} \cos \beta, \quad (2.6)$$

Производя косинус преобразования Фурье корреляционных функций были получены спектральные плотности:



$$S_x(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\tau} R_x(\tau) \cdot \cos \omega \tau d\tau, \quad (2.7)$$

Спектральные плотности можно определить по выражению:

$$S_x(\omega) = \frac{2D\alpha}{\pi} \cdot \frac{\omega^2}{\omega^4 + 2a^2\omega^2 + b^2}, \quad (2.8)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты зависящие от коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ :  $\alpha$  – характеризует интенсивность затухания функции,  $\beta$  – частоту периодической составляющей,  $D$  – дисперсия;  $\omega$  – частотный параметр.

Используя формулу А.Б. Лурье для почвообрабатывающих агрегатов были определены коэффициенты  $a$  и  $b$ :

$$b^2 = \alpha^2 + \beta^2; \quad a^2 = \alpha^2 - \beta^2, \quad (2.9)$$

Спектральная плотность траектории лемеха определялась по зависимости:

$$S_y(\omega) = S_x(\omega) \cdot A^2(\omega), \quad (2.10)$$

где  $S_x(\omega)$  – спектральная плотность поверхности поля по которой движется базовая машина;  $S_y(\omega)$  – спектральная плотность поверхности, образуемой кромкой лемеха;  $A(\omega)$  – амплитудно-частотная характеристика рыхлителя.

Значение дисперсии колебания глубины рыхления:

$$D_h = \int_0^{\infty} \omega^2 S_y(\omega) d\omega, \quad (2.11)$$

Среднее значение колебаний глубины  $a_{cp}$  было определено по выражению:

$$a_{cp} \approx \sqrt{2D_h} \quad (2.12)$$

В результате расчётов установлено, что неравномерность глубины рыхления зависит не только неровностей поверхности поля, но и от типа ходового устройства и способа агрегатирования рыхлителя [10, 12]. Сравнение результатов расчетов показало, что колебания режущей кромки рыхлителя с пневмоколесным трактором составило 8...15 сантиметров, а для рыхлителя на базе гусеничного трактора 6...12 сантиметров при средних значениях неровностей рельефа 5...10 сантиметров. Таким образом амплитуда колебаний неравномерности глубины

рыхления у рыхлителя на базе пневмоколесного трактора больше в 1,3...1,5 раза по сравнению с неровностями поверхности поля, а на базе гусеничного трактора в 1,3...1,5 раза. Средние значения дисперсии неровностей поверхности образуемой кромкой лемеха в 1,1...1,5 раза больше, чем дисперсия неровностей на поверхности.

## **2.3 Формирование физико-математической модели процесса рыхления**

### **2.3.1 Кинематика элемента почвы. Действующие силы и напряжения при объёмном мелиоративном рыхлении**

В процессе глубокого рыхления почвы основными факторами следует учитывать неоднородность почвы по глубине рыхления и влияние разных факторов на её механические свойства. В ряде научных исследований разрушения почв используется модель сплошной среды, согласно которой выделяя и изучая свойства элементарного объёма, предполагается что весь массив имеет идентичные физико - механические свойства [15, 19, 21, 110, 169].

При рыхлении рабочим органом разрушение и перемещение всего массива можно представить как совокупность элементарных частиц грунта. Режущие элементы рыхлителя объёмного типа также можно рассматривать как элементы клиновидной формы. В процессе рыхления поступательно движущийся рабочий орган режущими элементами отделяет определённый объём грунта от массива, который испытывает объёмное трёхмерное нагружение и подвергается различным видам деформаций. Основным воздействием на грунт можно считать объёмное сжатие, которое приводит к разрушению и разрыхлению почвы. Процесс сжатия происходит под действием сил, перемещающих грунт рабочим органом и неразрушенным лобовым массивом, а также за счёт подъёма грунта, возникающего от сил трения грунта по режущим элементам и выпирания вверх и вперёд по ходу движения рабочего органа. Силы сжатия приводят к появлению в разрыхленном массиве напряжений сжатия, сдвига и разрушения грунта. При

этом процесс рыхления должен происходить при минимальных энергетических затратах и обеспечивать необходимое качество разрыхления грунта. Достичь поставленной цели можно в результате поиска рациональной конструкции рабочего органа и оптимизации его параметров. На основании ряда исследований нами был выбран рабочий орган объёмного типа представляющий из себя пространственные боковые стойки, соединённые внизу лемехом. Дальнейшие исследования направлены на поиск рациональной конструкции объёмного рыхлителя и углов установки режущих элементов (рис.2.8).

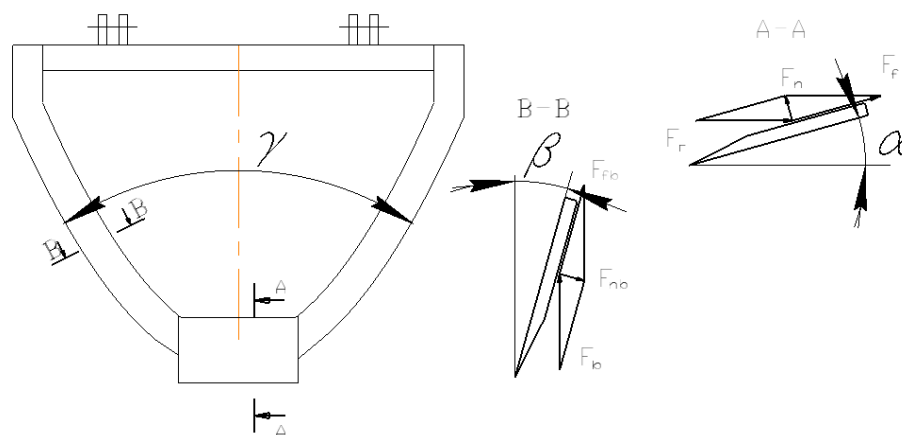


Рисунок 2.8 – Схема рабочего органа объёмного рыхлителя

Процесс рыхления осуществляется под действием сил сжатия, возникающих на поверхности лемеха и боковых стоек при этом происходит отделение объёма грунта от массива лемехом, установленным под углом резания  $\alpha$ , затем боковые стойки, имеющие углы резания  $\beta$  и установки между собой  $\gamma$ , вступая в процесс рыхления за лемехом отделяют некоторый объём грунта по всей глубине рыхления. Равномерное сопротивление рыхлению по глубине осуществляется за счёт криволинейной формы боковых стоек [79].

Смещение почвенного пласта можно представить в виде перемещения элементарных объёмов, каждый из которых перемещается по собственным траекториям, отличающимися друг от друга протяжённостью. Затраты энергии при рыхлении зависят от величины перемещения всего массива. Характер и параметры перемещения структурных элементов влияет на значение и

направление всей системы сил [3, 95, 117, 118]. Установлено, что с учётом физических свойств почвы можно обеспечить образование новой почвенной структуры с минимальными энергетическими затратами, что может быть достигнуто в результате правильной (рациональной) траектории перемещения почвенных частиц в процессе разрыхления [8, 48, 57, 169]. Математическую модель можно представить описанием траектории движения и силовыми воздействиями, возникающими в процессе рыхления. Условия наименьшей энергоёмкости и достижения необходимого качества рыхления достигаются за счёт рациональной конструкции и параметров рабочего органа с учётом физико – механических свойств грунта .

Энергетические показатели процесса рыхления во многом зависят от величины перемещения массива грунта в пространстве. Рассматривая движение элементарной частицы грунта в процессе рыхления в общем виде, перемещение частицы можно описать вектор-функцией:

$$\vec{r}(s) = x(s) \cdot \vec{i} + y(s) \cdot \vec{j} + z(s) \cdot \vec{k}, \quad (2.13)$$

где  $s = f_s(t)$  – дуговая координата отрезка пути;  $x(s)$ ,  $y(s)$ ,  $z(s)$  – координаты точек траектории как функции от пройденного частицей пути  $S$ .

Данная зависимость характеризует математическую модель учитывающую особенности движения частицы грунта при рыхлении [132, 133, 169].

Скорость перемещения частицы грунта можно получить дифференцируя эту функцию по параметру  $s$ :

$$\dot{\vec{r}} = \dot{x} \cdot \vec{i} + \dot{y} \cdot \vec{j} + \dot{z} \cdot \vec{k} \quad , \quad (2.14)$$

Изменение ускорений получается как вторая производная по  $t$  (и по  $s$ ):

$$\ddot{\vec{r}} = \ddot{x} \cdot \vec{i} + \ddot{y} \cdot \vec{j} + \ddot{z} \cdot \vec{k} \quad (2.15)$$

Для рыхлителя объёмного типа перемещение частицы грунта можно представить можно представить, от начала естественных координат (рис.2.7). Где  $\vec{t}$ ,  $\vec{n}$ ,  $\vec{b}$ - векторы данной системы координат.

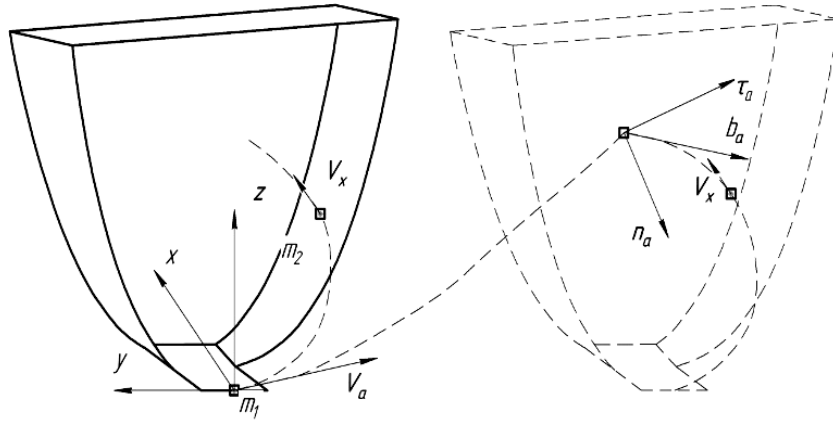


Рисунок 2.7 – Схема траектории движения частицы почвы в процессе рыхления

Далее длину пути частицы  $m$  по траектории  $m_1 - m_2$  можно представить интегральным уравнением:

$$S = \int_0^{x_m} \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2} \cdot dx_m, \quad (2.16)$$

Длина пути  $S_e$ , пройденная элементом грунта до образования плоскости сдвига:

$$S_e = v_e \cdot t \cdot k_{yc}, \quad (2.17)$$

где  $v_e$  – переносная скорость движения рабочего органа;  $k_{yc}$  – коэффициент усадки объёма почвы.

Представляя подынтегральную функцию с параметром  $x_m$  в неподвижной системе координат с последующим решением:

$$\vec{r}(x_m) = X(x_m) \cdot \vec{i} + Y(x_m) + Z(x_m) \cdot \vec{k} \quad (2.18)$$

Перемещение частиц грунта можно представить со скоростью  $v_e$  в направлении оси координатных осей и в противоположном направлении со скоростью  $v_m$ . Таким образом путь частицы  $m$  перемещающейся в абсолютном направлении:

$$x_m = v_{e_x} \cdot t - v_{m_x} \cdot t = (v_{e_x} - v_{m_x}) \cdot t, \quad (2.19)$$

$$y_m = v_{e_y} \cdot t - v_{m_y} \cdot t = (v_{e_y} - v_{m_y}) \cdot t, \quad (2.20)$$

$$z_m = v_{e_z} \cdot t - v_{m_z} \cdot t = (v_{e_z} - v_{m_z}) \cdot t \quad (2.21)$$

где  $v_{e_x}, v_{e_y}, v_{e_z}$  – проекции скорости движения рабочего органа на координатные

оси;  $v_{m_x}, v_{m_y}, v_{m_z}$  – скорость движения частицы грунта в направлении оси  $OX$ .

При перемещении рабочего органа частицы почвы из состояния покоя начинают движение с определённым ускорением, испытывая при этом дополнительные динамические нагрузки от действия сил инерции.

Составляющие ускорения абсолютного движения частицы грунта  $m$  в системе координат  $OX$  и  $OZ$ :

$$a_{mxa} = \frac{dv_{mx}}{dx}, \quad a_{mya} = \frac{dv_{my}}{dy}, \quad a_{mza} = \frac{dv_{mz}}{dz}, \quad (2.22)$$

Полное ускорение:

$$a_{ma} = \sqrt{a_{mxa}^2 + a_{mya}^2 + a_{mza}^2} \quad (2.23)$$

Траекторию движения частиц можно разделить на равные участки и заменить их на условные плоскости, расположенные под определёнными углами относительно друг друга. При этом поверхность рабочего органа можно представить как совокупность элементарных клиньев и определить угол крошения последующего клина относительно предыдущего [75, 103, 108].

Пласт грунта, отделяемый от массива, проходя по поверхности лемеха и боковых стоек способствует действию сил трения  $F_{тр}$ , а также за счет вертикальной составляющей перемещает пласт вверх и к центру контура рыхлителя. При этом перед рабочим органом в зоне рыхления действуют силы сжатия –  $F_{сж}$ , сдвига –  $R_{с;}$ , липкости –  $F_{л;}$ , подпора массива, силы тяжести –  $G_2$  перемещаемой вверх и вперёд почвы [12, 109]. Реакция частицы почвы при взаимодействии с рабочей поверхностью лемеха включает в себя не только нормальную составляющую и силу трения, но и составляющие, зависящие от закона и режима движения самой частицы. Величина их зависит от направления силы сжатия.

Сила сжатия определяется по формуле:

$$F_{сж} = b \cdot \rho_{сж} \iint_t L_0 \cdot L_a dt, \quad (2.24)$$

где  $b$  – ширина пласта;  $\rho_{сж}$  – удельное усилие сжатия;  $L_0$  – длина пути частицы грунта;  $L_a$  – длина траектории абсолютного движения частицы.

Массу грунта разрыхляемого рабочим органом можно определить по

выражению:

$$G = \int_t L_0 dt \cdot h \cdot b \cdot \gamma, \quad (2.25)$$

где  $\gamma$  – объёмный вес почвы,  $h$  – глубина рыхления.

Силу инерции в процессе перемещения пласта почвы по рабочей поверхности лемеха и стоек можно определить выражением:

$$F_a = a_i \cdot \int_t L_0 dt \cdot h \cdot b \cdot \gamma, \quad (2.26)$$

где  $a_i$  – значение абсолютного ускорения частицы в данный момент времени.

Особенностью глубокого рыхления при объёмном сжатии является то, что на характер и степень деформации влияют физико-механические свойства почвы, конструкция и параметры рабочего органа, а также силы сжатия способствующие разрушению грунта. При этом коэффициент бокового давления  $\chi$  можно определить отношением приращения давления  $dp$  к приращению усилия сжатия  $dF$ ,  $\chi = dp/dF$ .

Коэффициенты бокового давления  $\chi$  и Пуассона  $\mu$  связаны соотношением:

$$\mu = \frac{\chi}{1+\chi}, \quad (2.27)$$

где  $\chi = \mu(1 - \mu)$ .

Объёмную деформацию элемента грунта можно определить с использованием коэффициента Пуассона:

$$\Delta V = \frac{V_1 - V}{V} = \chi(1 - 2\mu), \quad (2.28)$$

где  $V_1$  и  $V$  – конечный и начальный объёмы.

Значения коэффициентов  $\chi$  и  $\mu$  для рассматриваемых типов почв находятся в диапазоне:  $\chi=0,60\dots0,70$ ,  $\mu=0,35\dots0,42$  [9].

При объёмном рыхлении происходит пространственное сжатие элементов почвы под действием трёх напряжений –  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  (рис. 2.8). В сечениях, соответствующих главным напряжениям, касательные равны 0 [110, 133, 134].

Объёмные деформации по направлению действия главных напряжений Деформации по направлению действия главных напряжений определяются по уравнениям:

$$\varepsilon_1 = E^{-1}[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)], \varepsilon_2 = E^{-1}[\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)],$$

$$\varepsilon_3 = E^{-1}[\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (2.29)$$

Относительная объёмная деформация определяется как сумма главных линейных деформаций:

$$\Delta V = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = E^{-1}(1 - 2\mu)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.30)$$

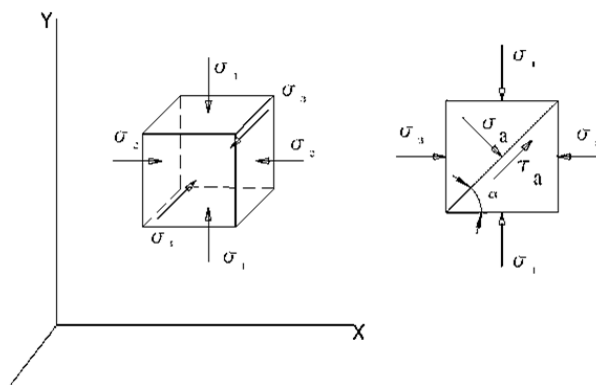


Рисунок 2.8 – Схема действующих напряжений: трёхосное сжатие и напряжения, возникающие на наклонной плоскости

При объёмном сжатии элемента грунта в сечениях возникают напряжения нормальные  $\sigma_a$  и касательные  $\tau_a$ . Величины которых определяются по формулам:

$$\sigma_a = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha, \quad (2.31)$$

$$\tau_a = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha \quad (2.32)$$

Касательные напряжения достигают максимальных значений при  $\alpha=45^\circ$ , т.е.  $\tau(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ . Нормальные напряжения на этой плоскости при  $\alpha=45^\circ$  равны  $\sigma_a = 0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$ .

В процессе рыхления под действием режущих элементов происходит отрыв объёма грунта от массива далее происходит появление лидирующих трещин и происходит объёмное сжатие массива грунта.

### 2.3.2 Расчёт силы сопротивления грунта рыхлению на основе известных теорий разрушения

Предельные величины напряжений ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_e$ ), способствующие разрушению грунта и по существу являющиеся оценками прочности грунта при сложном



напряжённом состоянии, возможно определить, используя одну из теорий прочности [3, 106, 108, 110, 169, 172]. Согласно гипотезе Мора, напряжения сдвига достигаются под действием предельных нормальных напряжений:

$$\tau = f(\sigma), \quad (2.33)$$

где  $f(\sigma)$  – экспериментально определяемая функция.

Подставляя выражения для  $\tau$  и  $\sigma$  это можно представить так:

$$0,5(\sigma_1 - \sigma_3) = f[0,5(\sigma_1 + \sigma_3)]. \quad (2.34)$$

Касательные предельные описываются уравнением Кулона-Мора:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi, \quad (2.35)$$

где  $c$  – сцепление (от 0,7...1,5 МПа),  $\phi$  – угол внутреннего трения.

Рассматривая действие сил на элементарный клин рабочего органа в момент рыхления грунта, следует отметить основные составляющие: это нормальная сила  $N$  и сила трения  $N \operatorname{tg} \phi$ , направленная вдоль вектора относительной скорости. Предположим, что пласт грунта начинает разрушаться за счёт его сдвига вдоль плоскости  $AB$ , расположенной под углом  $\psi$  к горизонту (рисунок 2.9).

Сила резания  $N'$ , нормальная к плоскости  $AB'$ , раскладывается на две составляющие: силу  $F_k$ , действующую в плоскости  $AB$ , и силу  $F_N$ , перпендикулярную к плоскости  $AB$ :

$$F_k = \frac{N}{\cos \phi} \sin(\alpha + \phi + \psi), \quad F_N = \frac{N}{\cos \phi} \cos(\alpha + \phi + \psi) \quad (2.36)$$

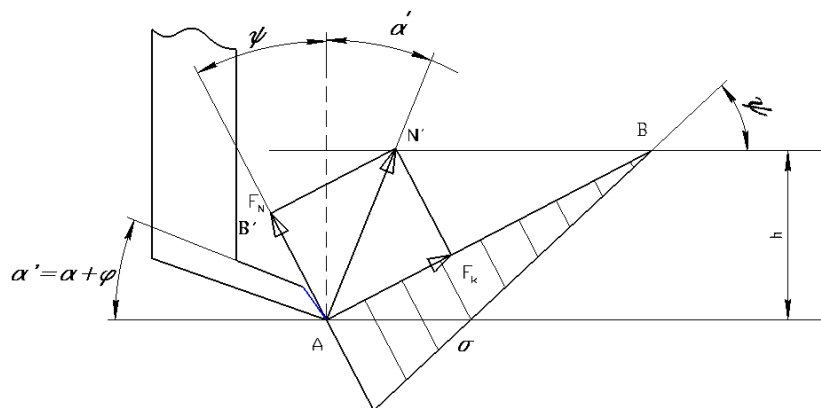


Рисунок 2.9 – Схема сил, действующих на грунт в момент разрушения

Эти усилия вызывают соответствующие напряжения: касательные  $\tau$  и нормальные  $\sigma$ :

$$\tau = \frac{F_k \sin \psi}{bh}, \quad \sigma = \frac{F_N \sin \psi}{bh}, \quad (2.37)$$

где  $b$  и  $h$  – ширина и толщина пласта грунта.

В соответствии с теорией Кулона-Мора, разрушение происходит при условии  $\tau \pm \sigma f_\phi = \tau_{cd}$ ,

где  $f_\phi = \tan \phi_\phi$  коэффициент внутреннего трения,  $\tau_{cd}$  напряжение чистого сдвига.

После подстановки выражений  $\sigma$  и  $\tau$  получается:

$$\tau_{cd} = \frac{N \sin \psi \sin(\alpha + \phi + \phi_\phi + \psi)}{bh \cos \phi \cos \phi_\phi}, \quad (2.38)$$

Максимальное значение  $\tau_{cd}$  достигнет при:

$$\psi = 0,5\pi - 0,5(\alpha + \phi + \phi_\phi), \quad (2.39)$$

Нормальное давление на рабочей поверхности без учёта силы тяжести и инерции пласта:

$$N = \frac{\tau_{cd} bh \cos \phi \cos \phi_\phi}{\cos^2[0,5(\alpha + \phi + \phi_\phi)]}, \quad (2.40)$$

Горизонтальную составляющую тягового сопротивления клина можно определить:

$$F_2 = \frac{\tau_{cd} bh \cos \phi_\phi \sin(\alpha + \phi)}{\cos^2[0,5(\alpha + \phi + \phi_\phi)]}, \quad (2.41)$$

Использование выражений (2.23, 2.25, 2.26) для практических расчётов конкретных рабочих органов рыхлителей несколько затруднительно, т.к. величины, входящие в эти формулы  $a_i$ ,  $b$ ,  $h$  и другие при определении представляют некоторую неопределённость. Выбор предельных нормальных напряжений для естественных грунтовых условий, приводящих к разрушению частиц и массива почвы затруднителен при выполнении практических расчётов. В реальных условиях необходимо учитывать более сложные процессы рыхления грунта.

Равнодействующую усилия можно представить, как сумму составляющих [85]. Как показали теоретические и экспериментальные исследования

наибольшую величину составляет сила резания  $F_p$ . Другие составляющие к которым относятся силы трения грунта по металлу  $F_{mp1}$ , внутреннего трения  $F_{mp2}$ , сопротивление от веса грунта  $F_n$ , перемещения грунта  $F_{gp}$ , силы инерции массы грунта  $F_{ин}$  составляют меньшие величины:

$$F_T = F_p + F_{mp1} + F_{mp2} + F_n + F_{gp} + F_{ин} \quad (2.42)$$

Сила резания  $F_p$  рабочего органа объёмного рыхлителя складывается из сил резания лемеха  $F_{рл}$  и боковых стоек  $F_{рст}$ :

$$F_p = F_{рл} + 2F_{рст}, \quad (2.43)$$

На поверхности режущих элементов сила резания раскладывается на нормальную составляющую  $F_n$  и касательную. Касательная сила является силой трения  $F_{тр}$ , и определяется по формуле:

$$F_{тр} = Nf, \quad (2.44)$$

где  $f$  – коэффициент трения грунта по стали (0,65...0,2, уменьшается с увеличением нормальных контактных давлений от 0,1 до 0,8 МПа).

Нормальные силы  $N$  воздействуя на объём грунта способствуют сжатию, подъёму и перемещению грунта по ходу движения рыхлителя. При этом объём разрыхляемого пласта почвы в верхней части имеет большую ширину, а в нижней – меньшую, поэтому масса и объём перемещаемого и разрыхляемого грунта по глубине рыхления отличаются (рис. 2.10).

Силу резания лемеха  $F_{рл}$  можно представить как сумму горизонтальных составляющих от равнодействующей контактных давлений  $N_l$  и силы трения  $F_{трл}$ :

$$F_{рл} = N_l \sin \alpha + F_{трл} \cos \alpha, \quad (2.45)$$

где  $N_l$  – равнодействующая нормальных контактных давлений, действующих в зоне наибольшей плотности грунта:

$$N_l = \sigma_2 \frac{A}{2}, \quad (2.46)$$

где  $\sigma_2$  – нормальные контактные давления,  $A$  площадь рабочей поверхности лемеха.

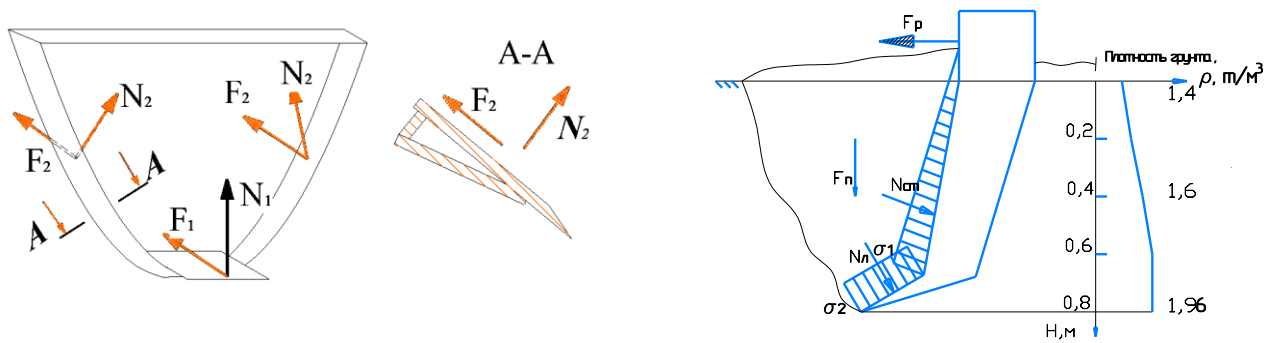


Рисунок 2.10 – Схема действия сил на рабочий орган объёмного рыхлителя

Сила резания боковой стойкой находится из выражения:

$$F_{рст} = N_{см} \sin \beta + F_{тр} \cos \beta, \quad (2.47)$$

Равнодействующая контактных давлений в этом случае определяется как:

$$N_{см} = \sigma_{1ср} A_{см}, \quad (2.48)$$

где  $\sigma_{1ср}$  – среднее нормальное давления на поверхность стойки,  $A_{см}$  – площадь рабочей поверхности стойки.

Нормальные предельные напряжения можно определить по формуле Н.Н. Маслова:

$$\sigma = \left[ \frac{h_i \rho}{tg^4(45-0,5\phi)} + \rho b \frac{1-tg^4(45-0,5\phi)}{tg^2(45-0,5\phi)} + 2c_0 \frac{1-tg^2(45-0,5\phi)}{tg^3(45-0,5\phi)} \right] g, \quad (2.49)$$

где  $h_i$  – вертикальная координата центра тяжести деформируемого слоя грунта;  $\rho$  – средняя плотность грунта;  $\phi$  – угол внутреннего трения грунта;  $c_0$  – общее сцепление грунта;  $b$  – ширина рабочей поверхности ножа;  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ .

Усилие от подъёма грунта  $F_n$ , Н:

$$F_n = V_2 \gamma_2 g, \quad (2.50)$$

где  $V_2$  – объём грунта,  $\text{м}^3$ ;  $\gamma_2$  – объёмный вес,  $\text{т/м}^3$ .

Усилие перемещению грунта  $F_{зр}$ , Н:

$$F_{зр} = V_2 \gamma_2 g \mu, \quad (2.51)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения грунта по грунту,  $\mu=0,3 \dots 0,5$ .

Усилие внутреннего трения грунта  $F_{тр2}$ , Н:

$$F_{тр2} = x V_2 g \gamma_2, \quad (2.52)$$

где  $x = \frac{\sin \varphi_r}{2}$ ;  $\varphi_r$  – угол трения грунта, для глины  $\varphi_r = 14 \dots 19^\circ$ ,  $x = 0,24 \dots 0,31$ , для суглинка  $\varphi_r = 24 \dots 30^\circ$ ,  $x = 0,37 \dots 0,44$ .

Сопротивление от сил инерции  $F_{ин}$ , Н:

$$F_{ин} = ma = V_2 \rho a, \quad (2.53)$$

где  $m$  – масса перемещаемого грунта;  $\rho$  – плотность грунта, т/м<sup>3</sup>;  $a$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Для вычисления этих составляющих необходимо знать объём и массу деформируемого грунта рабочим органам, которые возможно определить экспериментально (раздел 4). Экспериментальные исследования рабочих органов в процессе рыхления грунта дали возможность определить объём деформируемого и перемещаемого грунта перед рабочим органом. Деформация распространяющаяся от лемеха по ходу движения рыхлителя, формирует объём грунта  $V_2$  в виде эллиптического параболоида, верхняя часть которого расположена над дневной поверхностью, а другая, начиная от глубины рыхления, распространяется до смыкания с верхним объёмом.

Вычислить этот объём грунта можно по полученной нами эмпирической зависимости, используя только один параметр – глубину рыхления (раздел 5).

Наблюдения и измерения параметров деформации грунта установили при повторях опытов примерно одинаковую зависимость, которая позволила получить эмпирическое выражение для объёма  $V_2$  используя глубину рыхления  $h$ .

## 2.4 Оценка качества рыхления методом фрактального анализа

В процессе разрыхления изменяется строение обрабатываемого пласта почвы в результате трансформации основных физико-механических свойств. Интенсивность этого процесса в основном определяется геометрией рабочего органа. На эти процессы влияет также влажность, гранулометрический состав и твёрдость почвы. Положительно на образование структуры влияет обработка

грунтов в состоянии их физической спелости. Недостаток влаги приводит к чрезмерному распылению, а избыток влаги образует глыбистую поверхность, что ухудшает структуру почвы [68] Регулирование факторов, влияющих на изменение структуры, позволяет поддерживать грунт в состоянии, необходимом для дальнейшего использования в соответствии с агрономическими требованиями к качеству обработки.

Исследования различных грунтов на основе фрактального строения стали появляться достаточно давно. О фрактальном строении полостей и трещин структуре полостей и трещин в неоднородных средах известно большое количество работ [68, 195, 196, 198, 200, 201, 206].

Понятие фрактал было предложено Бенуа Мандельбротом в 1975 году [92].

Различные структуры обладают одним свойством геометрической регулярности, таким как инвариантность или “самоподобие”. Рассматривая эти объекты в различном масштабе, можно обнаружить общие фундаментальные элементы. Это определяет дробную, или фрактальную, размерность структуры.

Изменение взаимного положения частиц почвы при увеличении её объёма, пористости, создание более однородного обрабатываемого слоя; уменьшение и разделение объёма обрабатываемой почвы на подструктуры в виде небольших комков, структурных агрегатов, а также величина, направление и координаты точки приложения результирующей суммарных реакций грунта на рабочий орган зависят от большого количества факторов.

Однако обобщённых моделей образования почвенной структуры для всех разновидностей типов почв и взаимодействующих с ними рабочих поверхностей рыхлителей, пока нет для оценки экологической устойчивости слоя почвы, подвергающегося механической обработке. В качестве одного из показателей качества служит показатель степени крошения почвы, предложенный П.У. Бахтиным [11].

Система обработки грунта – один из примеров диссипативной системы, когда затрачиваемая энергия направлена не только на перемещение грунта, но и на разрушение, при этом его структура, соответственно, усложняется.

Диссипативные свойства проявляются в процессе структурного изменения характера разрыхляемого грунта в зависимости от различных факторов в процессе рыхления. Для количественного выражения степени изменения используются его самоподобные, фрактальные характеристики.

Фрактальная размерность характеризует степень развитости фрактальной структуры и служит универсальной характеристикой для оценки и сравнения структуры разнородных систем. Методика определения фрактальной размерности клеточным методом заключается в наложении на объект серии сеток с шагом от  $\delta_{max}$  (0,10...0,05 размера всего объекта) до  $\delta_{min}$  (соответствует минимальным компонентам объекта) и последующем подсчёте количества ячеек сетки, в которые попадает каждый элемент объекта (рис. 2.12).

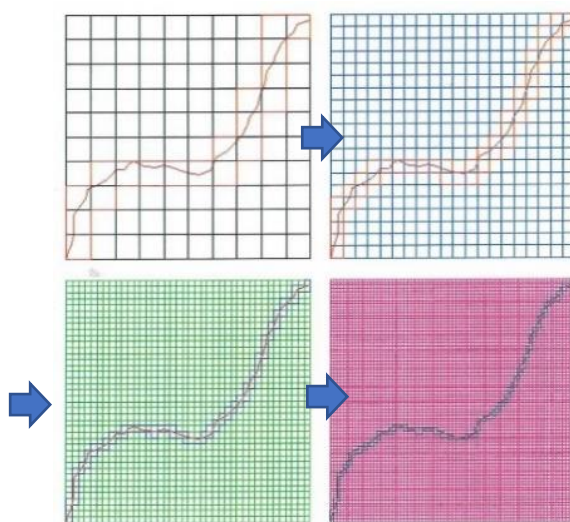


Рисунок 2.12 – Подсчёт элементов фрактальной структуры, попавших в ячейки набора сеток с шагом от  $\delta_{max}$  до  $\delta_{min}$

Размер клеток влияет на точность результатов, при уменьшении размера клеток достигается достаточно достоверная точность измерения.

Фрактальная размерность определяется как тангенс наклона линии зависимости количества элементов структуры, входящих в ячейку сетки от шага сетки, выраженного в логарифмических координатах (рис. 2.13).

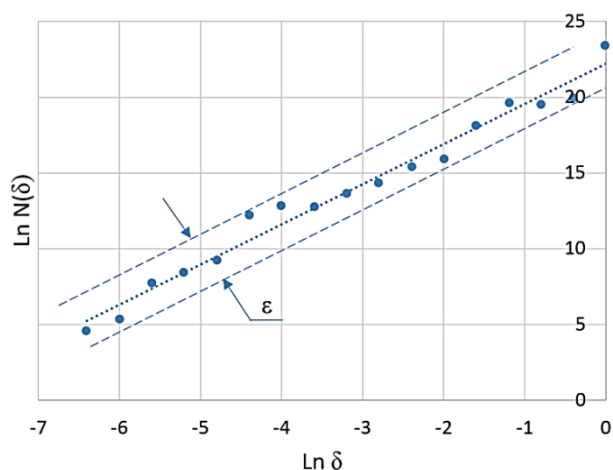


Рисунок 2.13 – График определения фрактальной размерности клеточным способом

Единицы измерения осей – произвольные. Ширина коридора  $\varepsilon$  характеризует точность фрактальной модели. То, насколько линейной является зависимость числа элементов от масштаба в логарифмических координатах показывает, насколько самоподобной является изучаемая структура:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln \left( \frac{1}{\delta} \right)}, \quad (2.62)$$

где  $D$  – фрактальная размерность,  $N$  – число элементов структуры, попавших в элементы сетки,  $\delta$  – шаг сетки.

Фрактальная размерность грунта характеризует плотность и равномерность заполнения его элементами евклидового пространства.

В процессе разрыхления регулируется строение обрабатываемого слоя путем изменения основных агрофизических свойств почв, таких как плотность (объёмная масса), пористость строение и структурное состояние.

Изменение взаимного расположения почвенных отдельностей с целью увеличения объёма почвы, её пористости для создания более однородного обрабатываемого слоя; уменьшение и разделение всей массы обрабатываемого слоя на отдельности в виде небольших глыб, комков, структурных агрегатов, зависит от большого количества факторов, поэтому обобщенных моделей образования почвенной структуры для всех разновидностей типов почв и



взаимодействующих с ними рабочих поверхностей рыхлителей, пока нет. В качестве одного из показателей качества служит показатель степени крошения почвы, предложенный Бахтиным П.У. Определение экологической устойчивости разрыхленного слоя по степени крошения и распылению почвы недостаточно. Это связано с тем, что степень крошения почвы зависит от множества случайных факторов: типа почвы, ее механического состава, влажности, предшествующих обработок и выращиваемых культур, типа рабочих органов и скоростных режимов работы. Существующие методы определения крошения почвы не учитывают вероятностный характер распределения фракций почвенных комков в обрабатываемом слое. Так, если принять нормальный закон распределения степени крошения почвы, то 70%-ная степень крошения составит лишь 20...23% от всей площади пашни, обработанной, например, отвальным плугом. Другим показателем качества механической обработки почвы может служить её плотность (объёмная масса), т.к. плотность почвы является комплексным показателем, зависящим от её микро и макроструктуры, механического состава, содержания гумуса, структурности, соотношения составляющих её фаз и других показателей.

Идея фрактального строения грунтов различного типа используется в различных практических целях достаточно давно. Если рассматривать грунт в целом, то можно видеть, что он состоит из мельчайших агрегатов, которые объединены в агрегаты большего размера, которые объединяются в ещё большие агрегаты. О фрактальной структуре полостей и трещин в неоднородных телах написано достаточное большое количество работ. Фрактальные модели активно используются, в частности, при моделировании фильтрации различных жидкостей через грунт.

Система обработки грунта является одним из примеров диссипативной системы. Здесь энергия, затрачиваемая на обработку грунта, направлена не только на перемещение грунта, но и на его деформацию, разрушение, при этом структура его, соответственно, усложняется. Диссипативные свойства грунтов выражаются в уплотнении грунта при достаточно сильной вибрации, сопротивлении водно-коллоидных плёнок при фильтрации жидкости через грунт и поглощении энергии

в процессе разрыхления грунта. Грунт неоднороден, самоподобен (его геометрические и физические параметры связаны степенной зависимостью), его фрактальная размерность меньше размерности заполняемого пространства, поэтому к нему возможно применить фрактальные методы.

Структура грунта до и после обработки зависит от режима работы объёмного рыхлителя и особенности конструкции его рабочих органов. Соответственно, чем больше энергии, затрачивается на обработку однородных участков грунта, тем большие изменения претерпевает структура грунта. При проведении экспериментов для оценки однородности распределения грунта по всей глубине рыхления в зависимости от конструкции и параметров рабочих органов, а также от влажности грунта нами применялись методы фрактального анализа (глава 4). Для количественного выражения структурного изменения характера обрабатываемого грунта использовались его фрактальные характеристики. На основе динамики фрактальных характеристик определялась наиболее оптимальная конструкция рабочего органа объёмного рыхлителя.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Анализ потребительских свойств выявил основные факторы для мелиоративных рыхлителей качество работы, равномерность глубины рыхления, простота конструкции, надёжность долговечность и минимальные энергозатраты.
2. Используя теорию статистической динамики получена оценка неравномерности колебания глубины рыхления в зависимости от неровностей ландшафта поля. При навески на гусеничный трактор амплитуда колебаний режущей кромки рыхлителя составила– 6...12 см, а с пневмоколесным движителем составила 8...15 см.
3. Используя теорию сплошной среды дано описание перемещения частиц при рыхлении и основных силовых зависимостей. Для разрушения грунтов наиболее подходящей теорией для рыхлителей можно считать

теорию прочности Кулона-Мора, согласно которой разрушение начинается, когда напряжение сдвига на данном участке достигает предельного значения, являющегося функцией нормального напряжения  $\sigma$  на этом участке.

4. Для практических расчётов предложен метод определения составляющих как сумму отдельных сил, действующих на грунт при объёмном сжатии.
5. Анализ расчетных данных и результатов полевых опытов показывает, что бывшие сельхозугодья с дерново – подзолистыми глеевыми почвами требуют проведения агромелиоративных мероприятий по улучшению агрофизических свойств методом глубокого объёмного рыхления

## **ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **3.1 Методика проведения экспериментов в лабораторных условиях**

Общей методикой предусматривалось проведение лабораторных исследований моделей рабочих органов на грунтовом канале и полевых испытаний опытной установки на грунтах ненарушенной структуры. При проведении экспериментов определялось тяговое сопротивление тензометрическим способом с записью данных в память компьютера. Структура разрыхлённого грунта оценивалась методом фрактального анализа и инструментальным способом. Опытные данные обрабатывались в среде Mathcad, EXCEL, WORD, AUTOCAD и других прикладных программ [2, 3, 98, 176, 204, 205, 207].

Конструкция базовой модели рабочего органа рыхлителя объёмного типа была выбрана по результатам анализа потребительских свойств рыхлителей, а также обзора и анализа конструкций отечественных и зарубежных типов рыхлителей, исследований в области глубокого рыхления и патентной информации. В качестве прототипа была выбрана конструкция объёмного V - образного рабочего органа РГ-0,8. На основе теории физического моделирования, был выбран масштаб физических моделей рабочих органов [13, 189].

Для достижения поставленной цели применялся метод последовательного поиска оптимальной конструкции и параметров рабочего органа рыхлителя по принципу от известного к рациональному.

#### **3.1.1 Лабораторная установка и измерительные приборы**

Исследования моделей рыхлителей проводились в лаборатории кафедры организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ на специально оборудованном грунтовом канале. Грунтовый канал (рис. 3.1) представляет собой металлическую ёмкость 6 прямоугольного сечения заполненную грунтом. По верхнему поясу грунтового канала установлена рама из

углового прокатного профиля 1. Продольные балки этой рамы являются прямолинейными горизонтальными направляющими, по которым перемещалась тележка 3.

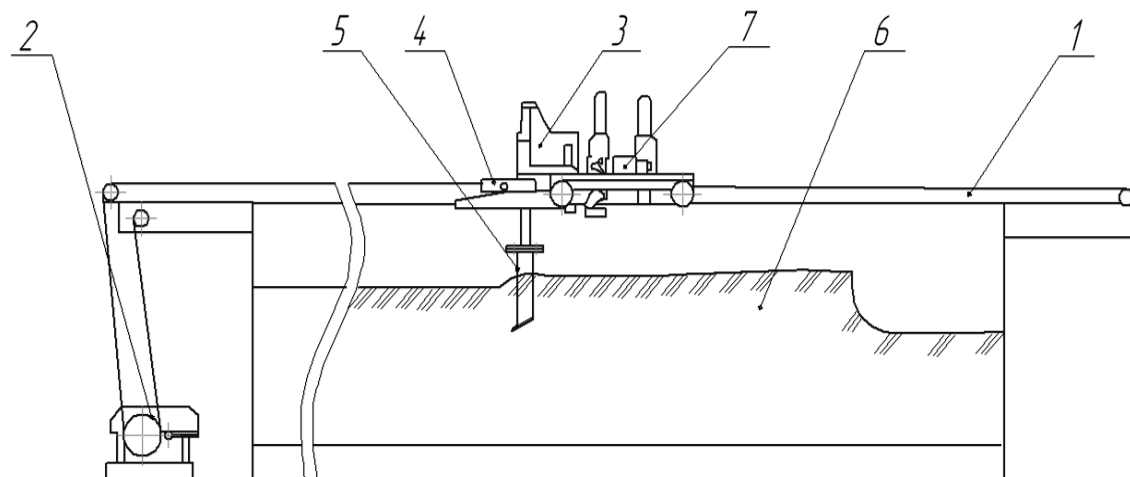


Рисунок 3.1 – Схема грунтового канала: 1 - направляющие, 2 - привод, 3 - тележка, 4 - датчик, 5 - модель рыхлителя, 6 - ёмкость канала с грунтом, 7 - усилительный терминал

На тележке смонтирована вертикальная стойка, оканчивающаяся пластиной, к которой крепится модель рабочего органа 5. Стойка может фиксироваться в направляющей. Изменение глубины обработки грунта осуществлялось за счёт подъёма рабочего органа при одном и том же его уровне в канале. Передвижение тележки осуществлялось при помощи лебёдки с канатоведущим барабаном 2. Движение возможно вперёд и назад при управлении пуском и остановкой электродвигателя магнитным пускателем. Выравнивание поверхности грунта в грунтовом канале выполнялось с помощью отвальных рабочих органов грейдерного типа.

Лабораторная установка оборудована усилительным терминалом 7, состоящим из датчиков, преобразующих механические усилия в сигналы (рис. 3.2). Аналоговые сигналы поступают на усилитель - преобразователь, затем поступают на ЭВМ, где информация обрабатывается и результаты выводятся на монитор в

виде таблиц и графиков, усилительные терминалы и датчики приведены на рисунке 3.3.

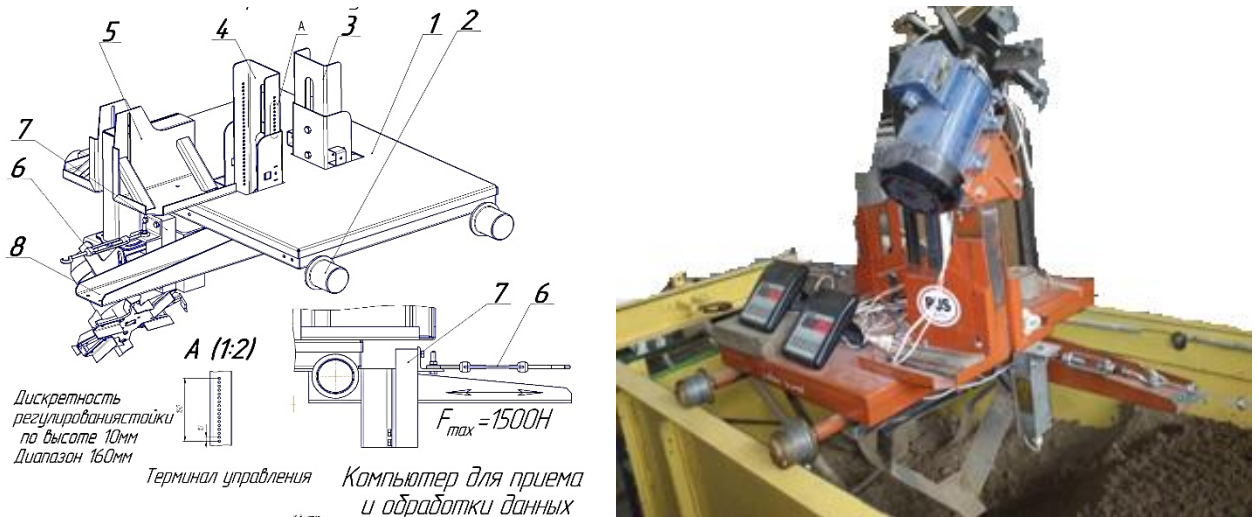


Рисунок 3.2 – Лабораторная тензометрическая установка: 1 - тележка; 2 - опорные ролики; 3 - стойка; 4 - стойка с вертикальным датчиком; 5 - стойка для крепления модели; 6 - натяжное устройство; 7 - датчик горизонтальный; 8 - стойка для прицепных моделей



Рисунок 3.3 – Составляющие компоненты электронной аппаратуры - усилительный терминал и датчик

Размеры моделей рабочих органов рыхлителей были выбраны на основании теории физического моделирования на основании вычисленного масштабного коэффициента.

Пределы масштабного коэффициента вычислялись по формуле Баловнева В.И.:

$$\frac{l_n}{k_d} \geq m \leq \left( \frac{F_H \cdot \varepsilon \cdot 100}{F_{np.max} \cdot k_{ТП}} \right)^{\frac{1}{m+0.5n_r}} \quad (3.1)$$

где  $l_n = h_p = 0,8$  м – глубина рыхления;  $k_d$  – коэффициент учитывающий рабочий процесс, в данном случае для рыхления грунта  $k_d = 5$ ;  $d = 1,5$  мм – размер максимальной фракции грунта;  $F_H \approx 50$  кН тяговое усилие при рыхлении натурального образца раб. органа;  $F_{np.max} \cdot k_{mn}$  – предел измерения прибора,  $F_{max} = 1500$  Н;  $k_{ТП} = 3\%$  – класс точности прибора;  $n_r$  учитывает свойства структуры грунта, для талых грунтов  $n = 2$ .

При подстановке значений был определён масштаб моделей:

$$\frac{0,8}{5 \cdot 0,0015} \geq m \leq \left( \frac{50 \cdot 3 \cdot 100}{3 \cdot 3} \right)^{\frac{1}{2+0.5 \cdot 2}}$$

$$107 \geq m \leq 6,3$$

На основании этого и с учётом условий проведения эксперимента масштабный коэффициент был принят  $m=4$ .

В дальнейшем, при обработке результатов опытов, полученные данные пересчитывались на натуральные величины, используя теорию подобия [10].

Испытания проводились при соблюдении утверждённой инструкции по работе на грунтовом канале с измерительной аппаратурой.

### 3.1.2 Последовательность проведения экспериментов

В процессе экспериментов исследовалось влияние параметров и конструкции рабочих органов объёмного рыхлителя на энергетические, качественные показатели процесса рыхления и на изменение агрофизических свойств почвы. Для оценки энергетических и кинематических характеристик процесса рыхления определялось тяговое усилие тензометрическим методом, кинематические

параметры оценивались величиной перемещения слоёв грунта вверх и вперёд по ходу движения рабочего органа, а также методом послойной маркировки слоёв цветным мелом. Исследования моделей рабочих органов проводились на суглинистом грунте, который перед каждым опытом уплотнялся до 4 ударов плотномера ДОРНИИ что соответствовало плотности  $1,75 \text{ [г/см]}^3$ , относительная влажность грунта в различных сериях опытов составляла от 9...22%, глубина обработки была принята 18 сантиметров, что в пересчёте на натуру составило 0,72 м. Повторность каждого опыта при исследованиях была не менее 4...5.

При подготовке экспериментов грунт доводился до однородного состояния, рыхлением, необходимым увлажнением, разравниванием и уплотнением. Определение влажности грунта производилось взвешиванием образца грунта до и после высушивания [29, 111, 113]. Затем грунт разравнивался и уплотнялся. После подготовки грунта на тележку устанавливалась модель рабочего органа в нужном положении, и далее производились опыты.

Были сконструированы и изготовлены физические модели рабочих органов объёмных рыхлителей с различными параметрами, некоторые из них приведены на рисунке 3.4 б.

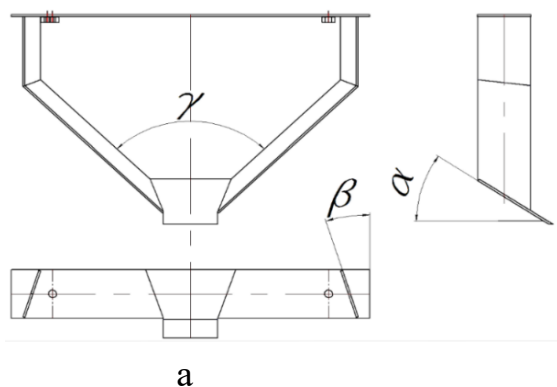


Рисунок 3.4 – Рабочий орган объёмного рыхлителя:

а - угловые параметры рыхлителя; б - модели рабочего органа



Экспериментальные исследования проводились в несколько этапов. На первом этапе были проведены лабораторные эксперименты моделей рабочих органов с различной установкой углов режущих элементов. Модели были изготовлены с различными углами резания лемеха –  $\alpha$  и боковых стоек –  $\beta$ , а также углами между стойками стоек –  $\gamma$  (рис. 3.4 а). С целью определения влияния основных углов на качество и сопротивление рыхлению был выполнен 3-х факторный эксперимент с регрессионным анализом результатов.

При подготовке к 3-х факторному эксперименту были выбраны изменяемые факторы и определены пределы их варьирования, минимальные и максимальные значения углов составляли –  $\alpha$  от  $10^\circ$  до  $45^\circ$ ,  $\beta$  – от  $13^\circ$  до  $24^\circ$ ,  $\gamma$  – от  $70^\circ$  до  $110^\circ$ . Такие параметры как влажность, плотность почвы и глубина рыхления поддерживались постоянными.

В соответствии с теорией планирования эксперимента, было составлено уравнение регрессии, связывающее исследуемый параметр со всеми влияющими на него факторами. Кроме этого, дана оценка значимости каждого фактора, и менее значимый в дальнейших исследованиях исключался. В качестве параметра оптимизации было выбрано тяговое усилие рабочего органа [13, 98, 178, 179].

В общем виде математическое описание процесса можно представить зависимостью:

$$Y=f(X_1, X_2, X_3), \quad (3.2)$$

где  $Y$  – зависимая переменная или функция отклика, т.е. усилие  $F$ ,  $X_1, X_2, X_3$  – независимые переменные, влияющие на  $Y$ , т.е.  $\alpha, \beta, \gamma$  соответственно.

Для каждого фактора устанавливается верхний ( $X_{imax}$ ) и нижний ( $X_{imin}$ ) уровни. Среднее значение фактора, базовый уровень ( $X_{0i}$ ), при этом интервал варьирования  $\Delta X_i = X_{imax} - X_{0i}$ .

При планировании эксперимента произведено преобразование размерных независимых факторов  $X_i$  в безразмерные  $Z_i$ , нормированные:

$$Z_i = \frac{(x_i - x_{0i})}{\Delta x_i}, \quad (3.3)$$

В этом случае получаем  $X_{imax} = +1$  и  $X_{imin} = -1$  (табл. 3.2)

Таблица 3.2 – Основные характеристики факторов эксперимента  $2^3=8$ 

Уровень фактора	Факторы		
	$X_1$ ( $\alpha$ , град)	$X_2$ ( $\beta$ , град)	$X_3$ ( $\gamma$ , град)
Верхний (+)	45°	24°	110°
Основной	37,5°	17°	90°
Нижний (-)	30°	10°	70°
Интервал варьирования	7,5°	7°	20°

Количество опытов  $L$ , в которых реализуются все возможные, различные комбинации уровней всех факторов определялся по формуле:

$$L=K^m, \quad (3.4)$$

где  $m$  – количество факторов,  $K$  – уровней.

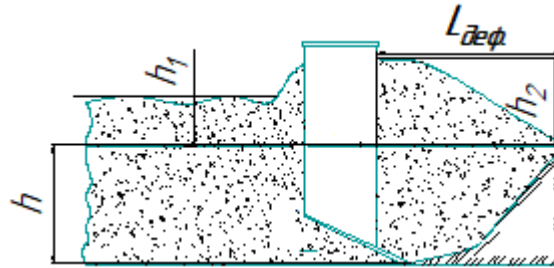
Результаты эксперимента предварительно могут быть представлены линейным уравнением регрессии типа [17]:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3, \quad (3.5)$$

где  $Y$  – оценка значений функции отклика,  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – оценки коэффициентов уравнения регрессии.

Для сравнительной оценки и уточнения зависимости, исследуемых силовых и технологических параметров проведены однофакторные эксперименты моделей рабочих органов с углами резания от 10° до 45°.

В процессе экспериментов изучался характер деформации и разрушения грунта, измерялись параметры разрыхленного грунта – подъём призмы грунта рабочим органом между боковыми стойками –  $h_1$ , высота подъёма разрыхленного грунта над исходной поверхностью –  $h_2$ , длина распространения деформации почвы перед рабочим органом –  $L_{\text{деф}}$ , перемещение верхнего слоя почвы по ходу движения –  $L_{\text{перем}}$ , плотность почвы на разной глубине рыхления  $h$ , оценивались размеры почвенных агрегатов на поверхности и по всей глубине рыхления (рис. 3.5).



Е, Н		
К уд, кН/м <sup>2</sup>		
Размер комьев, см		
h подъема, см		
Характер деформации, Нподъема, Lраспр. Деф		
Перемещение верхнего слоя грунта, см		

Рисунок 3.5 – Измерение параметров разрыхлённого грунта

На втором этапе для сравнительной оценки энергетических и технологических значений параметров рыхлителей, имеющих различную форму боковых стоек были проведены 2-х факторные эксперименты трёх моделей различной конструкции – с углами установки элементов, принятыми по результатам опытов первого этапа, но с различной конструкцией боковых стоек - прямолинейные, криволинейной параболической стойками (в виде элементов параболы) и с вертикальными стойками, переходящими в нижней части в полуокружность и лемехом (рис. 3.6).

В качестве базового рабочего органа, был выбран рыхлитель с прямолинейными V - образными стойками (Модель № 1). Модель № 2, имеет

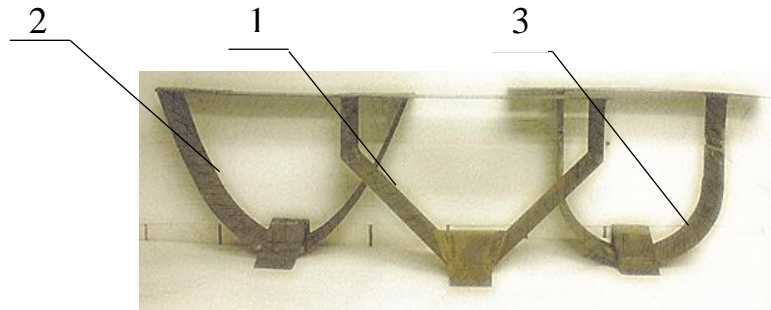


Рисунок 3.6 – Модели рабочего рыхлителя с разной формой рыхлящих стоек: с прямыми - тип 1; с криволинейными - тип 2; с вертикальными стойками и нижней полукруглой кромкой - тип 3

криволинейную параболическую конфигурацию рыхлящих стоек. Модель № 3 выполнена U образной формы с режущими стойки в нижней части в виде полуокружности постоянного радиуса плавно переходящими в вертикальные боковые стойки – в верхней. По ширине рыхления в верхней части между боковыми стойками модели 1 и 2 были выполнены с одинаковым расстоянием. Углы расположения элементов у трёх типов рабочих органов были одинаковыми, установленными при проведении опытов первого этапа [80]. В процессе экспериментов изучался характер деформации и разрушения грунта и измерялись перемещения и параметры разрыхлённого грунта. При планировании экспериментов изменяемыми факторами являлись глубина рыхления и относительная влажность грунта (табл. 3.3).

В общем виде математическое описание процесса можно представить зависимостью:

$$Y=f(X_1, X_2, \dots), \quad (3.6)$$

где  $Y$  – зависимая переменная или функция отклика, т.е. тяговое усилие  $F$ ,  $X_1, X_2$  – независимые переменные, влияющие на  $Y$ , т.е.,  $h, w$  соответственно.

Таблица 3.3 – Основные характеристики 2-х факторного эксперимента  $2^2=4$ 

Уровень фактора	Факторы	
	$X_1$ (h м,)	$X_2$ (w, влажность%)
Верхний (+)	0,68	18
Нижний (-)	0,4	8
Базовый $X_{0i}$	0,54	13

Результаты эксперимента могут быть представлены уравнением регрессии типа:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2, \quad (3.6)$$

где  $Y$  – оценка значений функции отклика,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – оценки коэффициентов уравнения регрессии.

Были проведены эксперименты по определению и сравнению удельного сопротивления рыхлению.

На следующем этапе были проведены однофакторные эксперименты по определению зависимостей удельного сопротивления рыхлению от глубины обработки и влиянию влажности почвы на качество рыхления и тяговое усилие для трёх типов рабочих органов. Диапазон влажности составил от 7 до 22 % с шагом увеличения 3...5 %.

Для определения траектории и направления перемещения слоёв грунта в процессе деформации проводились эксперименты с маркировкой цветным мелом слоёв пласта грунта по всей глубине рыхления. Перед началом эксперимента на определённом участке грунтового канала размером 30 x50x14 см на всей глубине грунта, предназначенного для рыхления, каждые 3 см отмечалась слоями цветного мела толщиной 2...3 мм (рис. 3.7). Затем после засыпки верхнего слоя выполнялось уплотнение грунта до 4 ударов ударника ДОРНИИ. При проведении опытов делались поперечные срезы маркированной зоны на входе в процессе деформации

пласта и на выходе из неё после прохода рабочего органа, фиксировалось изменение положения слоёв относительно исходного в поперечной и продольной плоскостях.

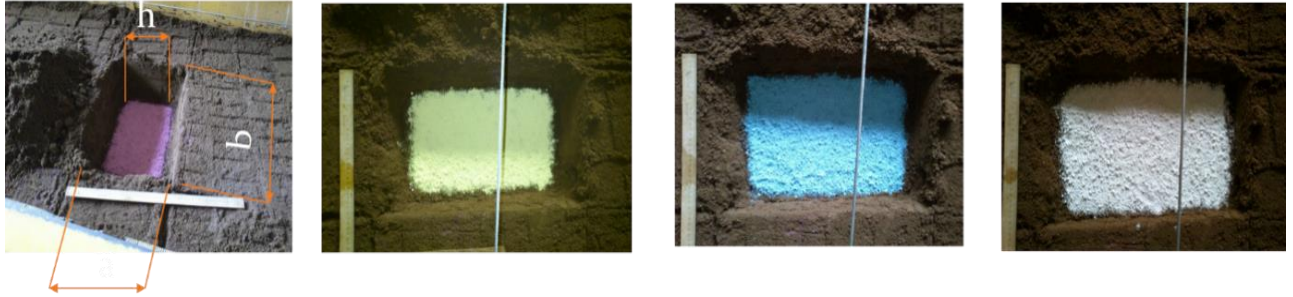


Рисунок 3.7 – Подготовка эксперимента с маркировкой цветным мелом

С целью исследования влияния конструкции рабочего органа и дополнительного оборудования на потребительские свойства, получаемые в результате рыхления, а также их улучшения нами был проведён комплекс экспериментальных исследований объёмного рыхлителя более рациональной конструкции с различными видами рабочего оборудования. Для повышения качества рыхления, а именно достижения лучшей равномерности фракций грунта по всему профилю воздействия рабочего органа, и большей однородности фрагментов грунта в верхнем слое, было использовано дополнительное оборудование разной конструкции, запатентованное нами (рис. 3.8).

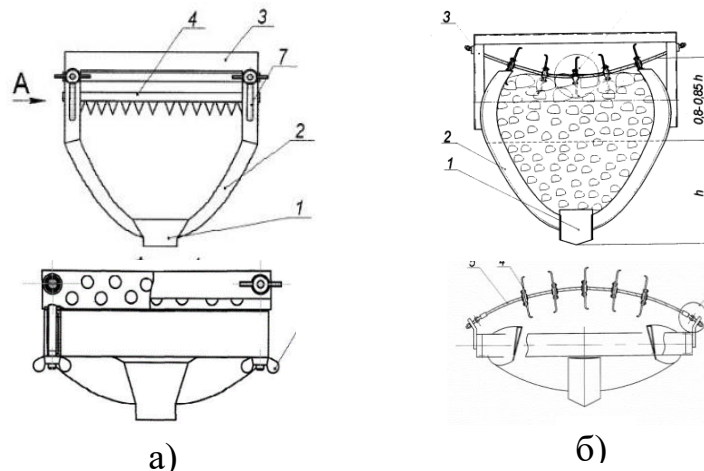


Рисунок 3.8 – Рабочие органы объёмных мелиоративных рыхлителей с дополнительным оборудованием:

а) рыхлитель в виде рыхлящих зубьев; б) рыхлитель в виде рыхлящих дисков

Кроме этого, были проведены эксперименты со сменным рабочим оборудованием к рабочему органу рыхлителя (тип 2), выбранного в качестве базовой модели, как наиболее рациональной по результатам анализа данных сравнительных экспериментальных исследований второго этапа.

Целью данного исследования было апробирование сменного дополнительного оборудования для повышения однородности разрыхлённого грунта в верхнем пахотном слое почвы.

Для этого было изготовлено два вида моделей дополнительных устройств, измельчающих крупные комья грунта в верхнем слое. Одна из них выполнена в виде выравнивающего поперечного бруса с зубьями, другая с рыхлящими дисками, свободно вращающимися на оси (рис. 3.9 а, б).



а)



б)

Рисунок 3.9 – Модели дополнительного рабочего оборудования к объёмному рыхлителю:

а) планка с рыхлящими зубьями, б) рыхлящие диски

Рабочее оборудование в виде бруса с зубьями, устанавливаемое между боковыми стойками, позволяет разравнивать и дополнительно разрыхлять почвенные агрегаты больших размеров, сформировавшиеся в процессе разрыхления базовым рабочим органом (рис. 3.9, а). Другая модель выполнена в виде набора рыхлящих дисков, свободно вращающиеся на оси, расположенной между боковыми стойками сзади (рис. 3.9, б) над полосой разрыхлённого грунта.



Также были проведены экспериментальные исследования по влиянию формы лемеха на технологический процесс с моделью рыхлителя № 2 (с параболическими стойками).

Для исследований были изготовлены модели экспериментальных лемехов рыхлителей. При испытаниях один из лемехов имел плоскую рабочую поверхность, рабочая поверхность второго лемеха была выполнена вогнутой с постоянным радиусом кривизны, третьего лемеха была выполнена выпуклой, рабочая поверхность четвёртого лемеха выполнена вогнуто-выпуклой (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Форма рабочих поверхностей моделей лемеха

Рабочие поверхности лемехов были выполнены с одинаковыми радиусами кривизны, равными  $2/3$  толщины разрабатываемого почвогрунтового пласта.

### **3.2 Методика проведения полевых исследований на грунтах естественного сложения.**

Четвертым этапом было предусмотрено проведение полевых испытаний опытной установки с рабочим органом, имеющим параболические стойки, с целью проверки результатов лабораторных опытов. Для исследований была спроектирована и изготовлена прицепная установка на пневматических колёсах. Установка представляла собой прицепной агрегат к трактору МТЗ-1523, оборудована измерительной аппаратурой: тяговое звено с тензометрическими датчиками и ноутбуком для регистрации сигнала (рис. 3.11).



Для регулирования установки необходимой глубины рыхления применялась ручная лебёдка. На раме установлен сварной ящик 4 для противовеса. По краям рамы приварены кронштейны для крепления подшипниковых узлов с осями, на которых установлены свободно вращающиеся пневматические колеса. Глубина рыхления возможна на величину до 0,6 м (Приложение Ж).



Рисунок 3.11 – Установка для проведения полевых опытов:

- 1 - рама; 2 - рабочий орган; 3- стойки крепления рабочего органа; 4 - дышло для сцепки с трактором; 5 - ящик для балласта

В процессе испытаний тяговое усилие измерялось тензометрическим методом с использованием тензорезистивного датчика силы ES-1-3t, сигнал от которого поступал на предварительный усилитель ZET 410 и аналого-цифровой преобразователь ZET 210 Sigma USB с сохранением данных во внутренней памяти сигнального процессора и дальнейшей их передаче контроллеру USB на компьютер или записи на флэш-диск. Измерительные приборы и устанавливались в специально предусмотренных местах на прицепном устройстве. (рис. 3.12).

Было выполнено опытное рыхления участков необрабатываемого поля по полосам в ОМП «Дубна», а также в Тверской области. Для этого выбирались участки на опытном поле, размерами 1,5х10 метров, с которых снимался верхний дерновый слой толщиной 0,15...0,2 метра (рис. 3.13 а).

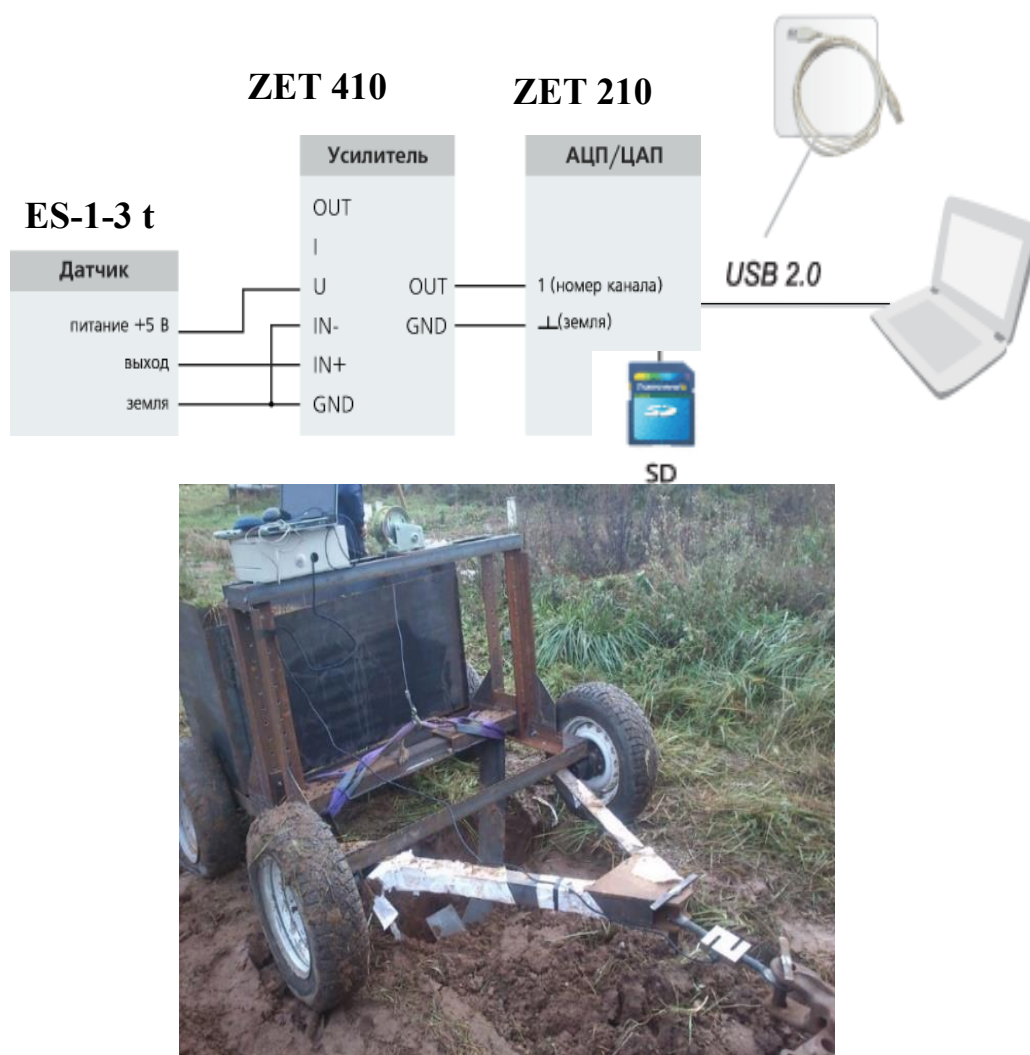


Рисунок 3.12 – Схема подключения датчика при проведении экспериментов

Затем делался приямок, в который устанавливался рабочий орган рыхлителя, и производилось рыхление опытного участка. В процессе экспериментов производился забор проб грунта на разной глубине с шагом в 10 см до и после рыхления. Для этого делались поперечные разрезы на протяжении полосы рыхления в трёх местах (рис. 3.13 б).

Конструкция опытной установки для полевых исследований была разработана и изготовлена с учётом данных ранее выполненных лабораторных исследований.



а)



б)

Рисунок 3.13 – Этапы проведения полевых опытов:

а) последовательность проведения; б) отбор проб грунта по глубине до и после рыхления

Грунт естественного сложения – минеральный грунт, суглинок, переходящий на глубине 0,45...0,8 метров в глинистый, влажностью от 10% до 22 % при проведении разных серий опытов.

### 3.3 Методика определения фрактальной размерности среза грунта

Оценка качества рыхления проводилась методом фрактального анализа и численным методом. После каждого эксперимента делались срезы обработанного грунта. До и после обработки грунта производилось фотографирование срезов грунта в высоком разрешении в формате bmp. На компьютере осуществлялась сортировка, предварительная подготовка и анализ снимка. Снимки были конвертированы в черно-белый формат. По полученным фотографиям было проведено измерение фрактальной размерности клеточным способом при помощи модульной программы анализа данных Gwyddion, имеющей функцию определения



фрактальной размерности Fractal Dimension как инструмент статистической обработки изображений [183, 184].

Для этого нами был произведён срез подготовленного необработанного грунта и произведено его фотографирование в разных масштабах. Масштабирование производилось приближением или удалением фотоаппарата. Снимки среза грунта приведены на рисунке 3.14.



Рисунок 3.14 – Срезы грунта в различных масштабах фотосъёмки

Следующей задачей является выделение структуры среза грунта. Для этого требуется стандартизированная процедура, которую необходимо разработать.

С этой целью использовалось приложение обработки изображений Shade Data (Шейдинг данных), при помощи которого на снимках выделялись однородные графические образования и производилось более точное отображение структуры снимка (рис. 3.15).

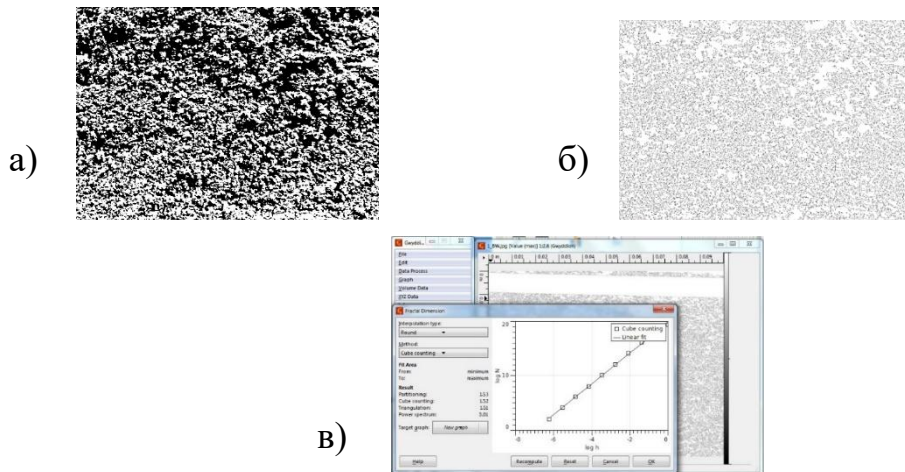


Рисунок 3.15 – Шейдерное представление изображения среза грунта:

а) структура поверхности среза грунта до шейдерной обработки; б) после; в) окно инструмента Fractal Dimension программы Gwyddion с шейдерным отображением снимка среза грунта

Зависимость числа элементов, попавших в ячейки сетки от шага этой сетки в логарифмических координатах имеет линейный характер, что говорит о самоподобном, фрактальном характере элементов среза грунта.

Было замечено, что фрактальная размерность распределялась неравномерно по высоте среза грунта, и в верхних слоях почти во всех случаях наблюдалось незначительное её увеличение.

Данное явление было обусловлено большей степенью усадки нижних слоев под давлением верхних (рис. 3.16).

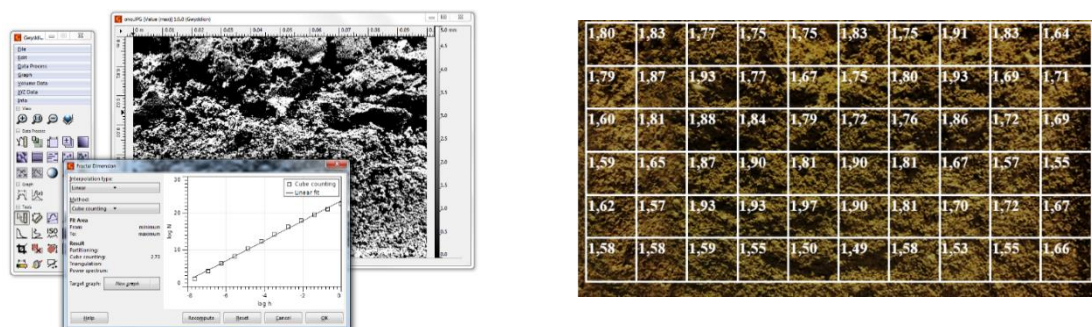


Рисунок 3.16 – Распределение фрактальной размерности среза грунта, обработанного параболическим рыхлителем

Коридор значений фрактальной размерности по срезам необработанного грунта составил не более 5 – 7% для различных участков среза и 5 – 10% для участков разных срезов. Для получения срезов полосы рыхления было спроектировано и изготовлено специальное устройство (рис. 3.17), состоящее из неподвижного основания и подвижного лезвия, перемещающегося по направляющим основания под углом в  $75^\circ$ , при котором происходит наименьшее осыпание нормально увлажнённого грунта [67].



Рисунок 3.17 – Приспособление для получения срезов грунта

Приспособление помещалось на грунт, производилось предварительное откапывание перед предполагаемым срезом грунта. Затем делался срез грунта при помощи подвижной части устройства.

### **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3**

1. При экспериментальных исследованиях использовался метод последовательного поиска оптимальной конструкции и параметров рабочего органа рыхлителя по принципу от известного к рациональному. Исследования проводились в лабораторных и полевых условиях на грунтах естественного сложения.
2. При обработке данных применялись методы планирования экспериментов и регрессионного анализа, статистические характеристики вычислялись в таких системах как MATHCAD, EXCEL, для оценки качества применялись методы фрактального анализа.
3. Измерения усилий проводились тензометрическим методом при лабораторных работах и в полевых условиях с записью результатов на ЭВМ с использованием тензодатчиков аналого-цифровых преобразователей, усилителей сигнала и специального программного обеспечения.

## ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1 Влияние конструкции рабочих органов и их параметров на процесс рыхления

#### 4.1.1 Обоснование выбора углов резания и установки боковых стоек

В работе для обоснования выбора параметров и конструкции объёмного рыхлителя выполнялось условие сочетания двух факторов: возможно меньшее тяговое усилие при достаточной однородности фракций грунта определённого размера по всей глубине рыхления. С этой целью был проведен комплекс последовательных экспериментальных исследований в несколько этапов.

Для обоснования выбора углов резания и наклона боковых стоек был проведён 3-х факторный эксперимент моделей рабочих органов с прямыми боковыми стойками. По результатам экспериментов была получена функциональная зависимость тягового усилия при изменяемых параметрах углов резания лемеха  $\alpha$ , боковых стоек  $\beta$ , и углов их наклона  $\gamma$  в натуральном выражении факторов:

$$F = -22,8 - 0,33\alpha + 4,4\beta - 0,7\gamma - 0,067\alpha\beta + 0,033\alpha\gamma \quad (4.1)$$

Анализ уравнения показал, что наибольшее влияние на величину тягового усилия оказывают углы резания рабочего органа рыхлителя. Угол наклона стоек  $\gamma$  на усилие влияет в меньшей степени (Приложения А, Б).

При рыхлении перед рабочим органом происходит подъём и разрушение грунта, образуется объём в виде выпуклой раковины, нижняя плоскость которой ограничена кривой по форме близкой к параболе (рис. 4.1). Длина распространения деформации  $L_{\text{деф}}$  в виде призмы, имеющей форму «раковины» перед рабочим органом составляла  $0,9 \dots 1,1$  от глубины рыхления,  $h$  [80]. Высота подъёма грунта  $h_2$  между боковыми стойками составляла  $0,75h$ , после прохода рабочего органа он опускался на поверхность, образуя полосу разрыхлённого (вспученного) грунта высотой  $h_1$ , составляющую  $(0,2 \dots 0,3)h$ .

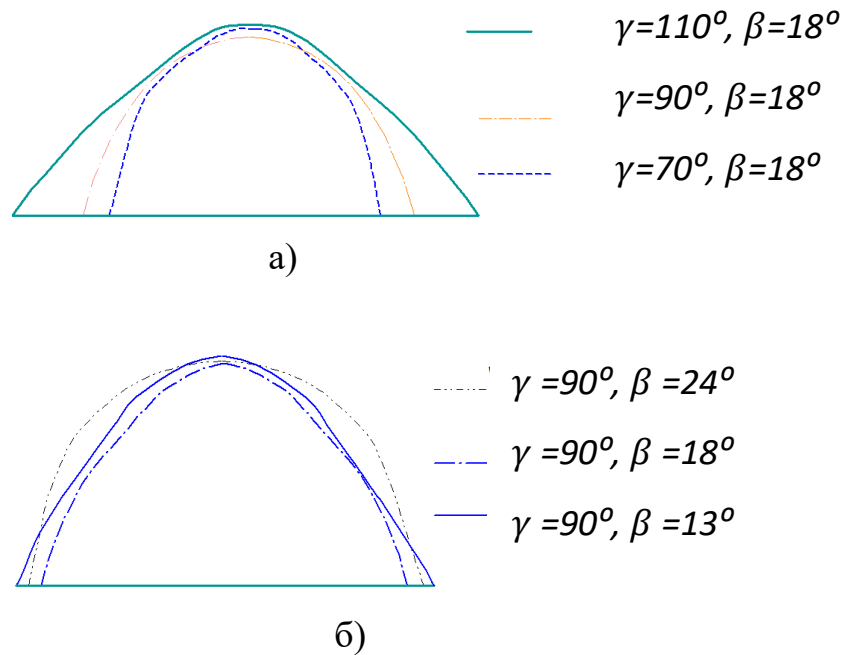


Рисунок 4.1 – Форма деформации грунта перед рабочим органом объёмного рыхлителя:

а) кривые, ограничивающие зону деформации грунта для рыхлителей с разными углами  $\gamma$ , при угле  $\beta = 18^\circ$ ; б) характер деформации перед рыхлителями, с разными углами  $\beta$  при угле  $\gamma = 90^\circ$

Продольные разрезы зоны рыхления показали, что разрушение массива в процессе деформации возникает от режущей кромки лемеха, затем распространяется вперёд и вверх с более интенсивным подъёмом по криволинейной траектории вверх к поверхности грунта, соединяясь, с параболической кривой, ограничивающей сегмент призмы грунта над исходной поверхностью. Средние значения технологических и энергетических показателей приведены в таблице 4.1.

Анализ результатов исследований показал, что значения наименьших тяговых усилий 0,71 кН имеет модель рыхлителя с углами  $\beta = 13^\circ$  и  $\gamma = 90^\circ$ . Для моделей рыхлителей с углом  $\gamma = 70^\circ$  увеличение тягового усилия составляло от 0,83 до 0,88 кН при изменении угла резания, что связано с более интенсивным сжатием и подъёмом грунта между боковыми стойками.



Таблица 4.1 – Результаты экспериментальных исследований и статистической обработки данных

Угловые параметры		Средние значения измеряемых параметров						
		$h_2$ , см	$L_{\text{деф.}}$ , см	$h_1$ , см	$L_{\text{пер.}}$ , см	$F_{\text{тяг.}}$ усилие, кН	$E_{\text{энергоёмкость}}$ , кВт/м <sup>2</sup>	$K_{\text{уд}}$ , Н/м <sup>2</sup>
$\gamma$	$\beta$							
70,	13	15	21	4	25	0,83	3,96	18
70,	18	16	23	5,2	28	0,84	4,01	23,4
70,	24	18	23	5,6	32	0,88	4,2	24,45
90,	13	13	18	4,4	13	0,71	2,65	15,43
90,	18	15	19	5,3	14	0,75	2,8	16,3
90,	24	15	19,5	5,4	18	0,77	2,88	16,74
110,	13	16	20	2,9	25	1,05	3,06	17,8
110,	18	16,5	22,2	3,4	30	1,2	3,5	20,4
110,	24	17,3	23	3,8	35	1,32	3,85	22,4

Для моделей с углом  $\gamma = 110^\circ$  были получены наибольшие значения тягового усилия от 1,05 кН до 1,32 кН, что связано с увеличением ширины захвата рабочего органа и объёма разрыхляемого грунта.

Наибольшая высота вспученного грунта  $h_2$  наблюдалась для модели рыхлителя с углами  $\beta = 24^\circ$ ,  $\gamma = 90^\circ$ , при этом распространение деформации перед рабочим органом и величина перемещения верхнего слоя почвы по ходу движения были меньше, чем для моделей с углами  $\gamma = 70^\circ$  и  $110^\circ$  в 1,1...1,9 раза. Высота вспученного грунта для модели рабочего органа с углом  $\gamma = 110^\circ$  была меньше в 1,5 раза, чем для модели с углом  $\gamma = 90^\circ$  при этом в середине полосы разрыхлённой почвы образовывалась ложбина, равная половине высоты  $h_2$ , (рис. 4.2). Это можно объяснить тем, что боковые стойки находились на значительном удалении друг от друга и воздействовали на обрабатываемый пласт без взаимного влияния.

На основании данных по значениям тяговых усилий были получены удельные сопротивления рыхлению  $K_{уд} = F_T/A$ ,  $\text{кН/м}^2$ . Наименьшее значение  $K_{уд} = 15,43 \text{ кН/м}^2$  было получено для модели рыхлителя с углами  $\gamma = 90^\circ$  и  $\beta = 13^\circ$ . С увеличением угла резания стоек  $\beta$  наблюдалось незначительное увеличение удельного сопротивления рыхлению. Удельная энергоёмкость для этой модели была наименьшей, и составляла  $2,65...2,88 \text{ кВт/м}^2$ . Удельное сопротивление рыхления  $K_{уд}$  для моделей с углом  $\gamma=70^\circ$  по средним значениям получилось больше в 1,36 раза, чем для моделей с  $\gamma=90^\circ$ , удельная энергоёмкость больше в 1,46 раза. Для моделей рыхлителя с углами  $\gamma=110^\circ$  удельное сопротивление рыхлению при различных углах резания боковых стоек составляло промежуточные значения и изменялось от  $17,8 \text{ кН/м}^2$  до  $22,4 \text{ кН/м}^2$ .

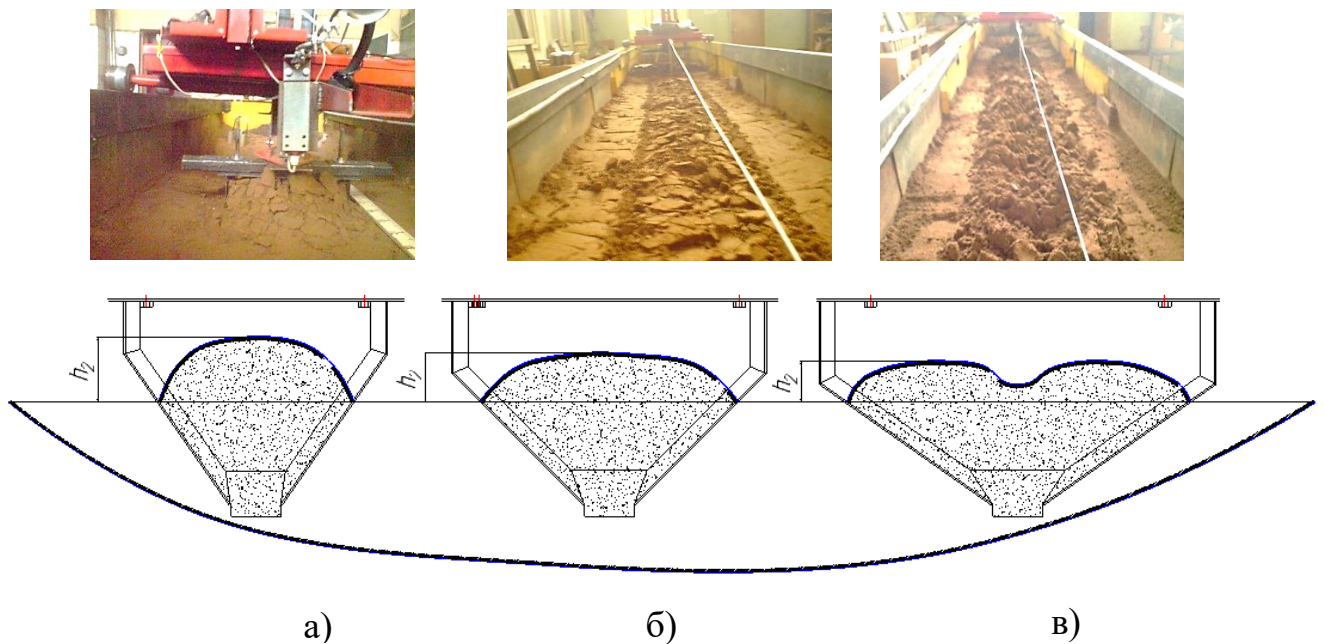


Рисунок 4.2 – Подъём обработанного грунта над исходной поверхностью:  
а) модели рабочего органа рыхлителя с углами  $\gamma = 70^\circ$ ; б)  $\gamma = 90^\circ$ ; в)  $\gamma = 110^\circ$

Для оценки степени крошения измерялись средние размеры почвенных агрегатов разрыхлённого грунта на полосе рыхления длиной в 1 м. Гистограммы распределения размеров агрегатов почвы показали, что наиболее однородное

распределение с преобладанием агрегатов меньших размеров было при работе модели с углами  $\gamma = 90^\circ$  и  $\beta = 13... 16^\circ$  (табл.4.2).

Таблица 4.2 – Характеристики размеров агрегатов грунта после обработки моделями рабочих органов рыхлителей

Угловые параметры	Статистические показатели		
	$m_x$ , см	$D_x$ , см <sup>2</sup>	$v$
$\gamma = 70^\circ \beta = 18^\circ$	4,4	3,52	0,43
$\gamma = 90^\circ \beta = 18^\circ$	3,2	3,9	0,61
$\gamma = 110^\circ \beta = 18^\circ$	4,0	5,54	0,59

Результаты экспериментальных исследований позволили также установить зависимость тягового усилия от глубины рыхления при различных значениях угла резания лемеха. Также проводился анализ распределения фрактальной размерности грунта до и после рыхления. Чем больше значение фрактальной размерности, тем более структура развита, а, следовательно, сильнее разрыхлена. С помощью такого анализа обоснован выбор угла резания лемеха (рис 4.3). Фрактальная размерность возрастает при углах резания лемеха от  $25^\circ$  до  $35^\circ$ , это означает, что на данном промежутке происходит наибольшее разрыхление грунта. В центре зоны разрыхления значения больше, чем по краям это означает, что грунт неоднороден, и тем большая площадь покрыта трещинами и пустотами.

При дальнейшем увеличении углов резания лемеха от  $40^\circ$  до  $50^\circ$ , наблюдается её понижение, из чего следует, что грунт недостаточно однородно разрыхлён.

Зависимость дисперсии фрактальной размерности от угла резания лемеха имеет ярко выраженный степенной характер с регрессионным уравнением:

$$D = 2 \cdot 10^{-5} \alpha^2 - 0,001 \alpha + 0,0327 \quad (4.2)$$

Зависимость тягового сопротивления от угла резания лемеха можно представить уравнением:

$$F = 0,0242 \alpha^2 - 1,3505 \alpha + 41,441 \quad (4.3)$$

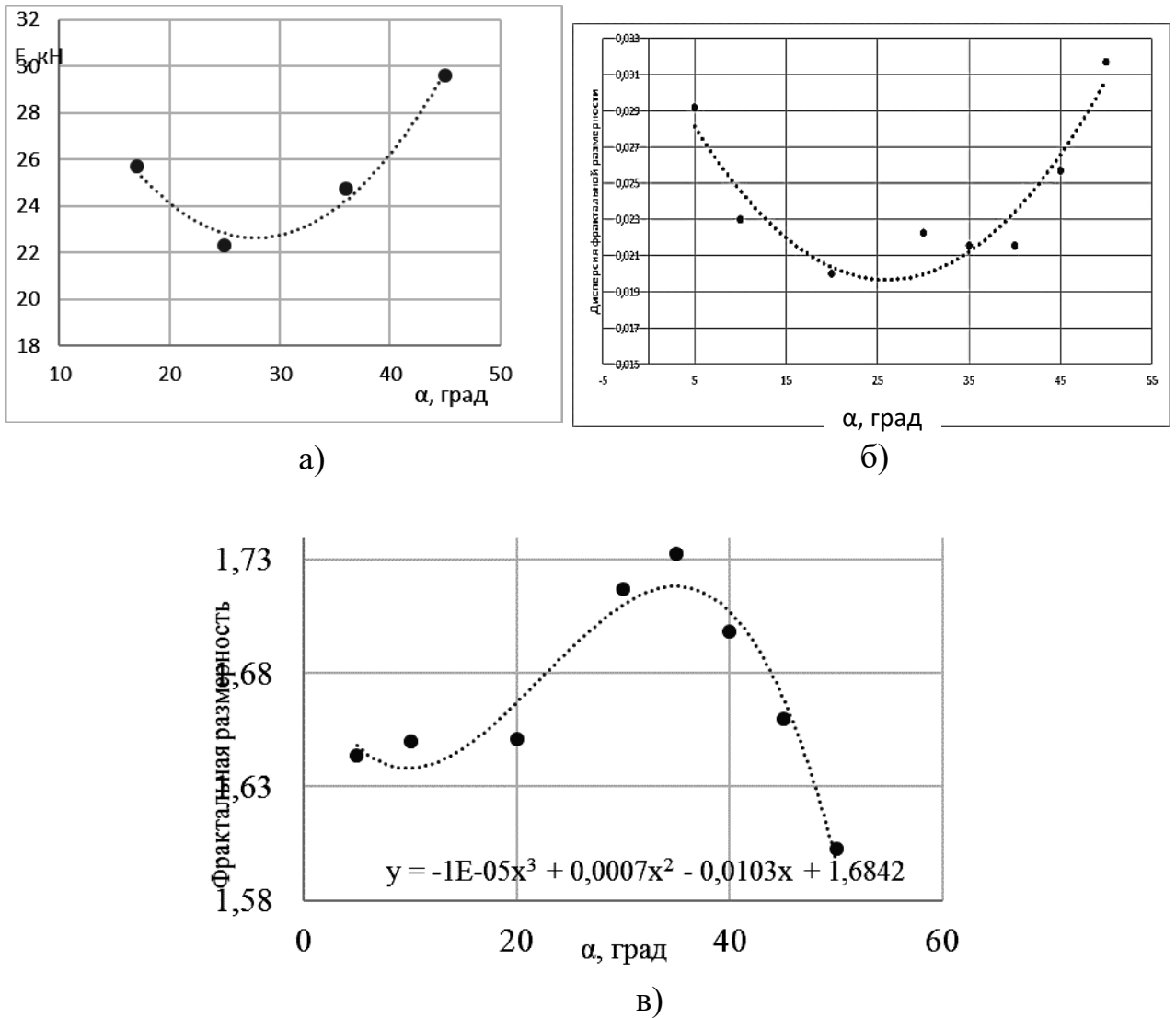


Рисунок 4.3 – Зависимости угла резания лемеха от:

- а) от тягового усилия; б) от дисперсии фрактальной размерности; в) фрактальной размерности от угла резания

Результаты фрактального анализа подтверждают результаты ранее выполненных исследований по выбору наиболее рациональных углов.

Экспериментальные исследования с лемехами различной формы показали, что наименьшие энергетические показатели были получены у рабочего органа с выпукло-вогнутой формой рабочей поверхности по сравнению с прямолинейной формой рабочих поверхностей – тяговое усилие снизилось на 17,7 %, а удельная энергоёмкость на 15,6 %, а коэффициент разрыхления  $K_p = 1,3$ . Однако наибольший коэффициент разрыхления был получен при испытании рабочего органа с

выпуклой формой рабочей поверхности –  $K_p = 1,34$ . У всех моделей лемехов с различной формой поверхности значение усилий отличалось незначительно (не более 5...7%), а также преобладают средние значения фракций размерами от 5 до 10 см (наиболее рекомендованные требованиями), причём при вогнутой и выпукло-вогнутой форме рабочей поверхности лемеха – распределение размеров более равномерное и наибольшее количество мелких фракций. Величина подъёма разрыхлённого грунта над исходной плоскостью при испытании лемехов с криволинейными поверхностями имели большую высоту по сравнению с прямым клином. Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что лемеха с криволинейными поверхностями способствуют большей степени рыхления.

На основании анализа результатов исследований наиболее рациональные значения углов так же можно рекомендовать  $\alpha = 30^\circ \dots 34^\circ$ ;  $\beta = 13^\circ \dots 16^\circ$ ;  $\gamma = 90^\circ$ , меньшие значения – для более плотных грунтов. Тем не менее, анализ равномерности рыхления показал, что в некоторых опытах наблюдались отдельные фракции размером до 100 мм в количестве примерно 5...10%, что требует дополнительного измельчения. Дальнейшие исследования были проведены с целью выбора более рациональной конструкции рыхлителя, обеспечивающего более качественное измельчение.

#### **4.1.2 Обоснование выбора конструкции рабочего органа объёмного типа**

На втором этапе экспериментальных исследований были проведены сравнительные испытания трёх видов рабочих органов. Значения углов резания  $\alpha$  и  $\beta$ , для моделей были приняты, полученные в результате опытов первого этапа, выходным параметром являлось тяговое усилие  $F$ . С каждой моделью был проведён двухфакторный эксперимент. В качестве основных факторов были выбраны глубина рыхления  $h$  и относительная влажность грунта  $w$  (Приложение

В). В результате экспериментов были получены уравнения регрессии в натуральных единицах:

Для рабочего органа рыхлителя с прямыми стойками (№ 1):

$$F = 3,74 + 23,3h - 0,17w + 1,3hw, \quad (4.4)$$

Для рабочего органа рыхлителя с параболическими стойками (№2):

$$F = -5,56 + 37,86h - 0,77w + 0,86hw, \quad (4.5)$$

Для рабочего органа рыхлителя с полукруглой нижней кромкой (№ 3):

$$F = -31,4 + 104,93h - 0,07w + hw, \quad (4.6)$$

Результаты исследования показали, что наиболее значимым фактором является глубина рыхления, а также форма боковых стоек. На малой глубине рыхления величина тягового усилия для моделей отличается незначительно. При глубине 0,68 м наименьшее значение наблюдалось для рабочих органов 1 и 2, причём для рабочего органа № 2 меньше на 3,7 % (при  $w=8$  %) и на 5,2 % (при  $w=18$  %). Усилие для модели № 3 было существенно больше, чем у модели 2, а именно – на 86 % (при  $w=8$  %) и на 57 % (при  $w=18$  %) (рис. 4.4).

По качеству разрыхления, однородности разрыхлённого грунта, наличию наиболее мелких фракций наиболее рациональным можно считать рабочий орган с параболическими стойками. Наличие крупных фракций грунта (80...100 мм) составляло всего от 3 % до 5 %. Анализ экспериментов показал, что наиболее рациональным по силовым зависимостям и качеству разрыхления является рабочий орган № 2 (с параболическими режущими стойками).

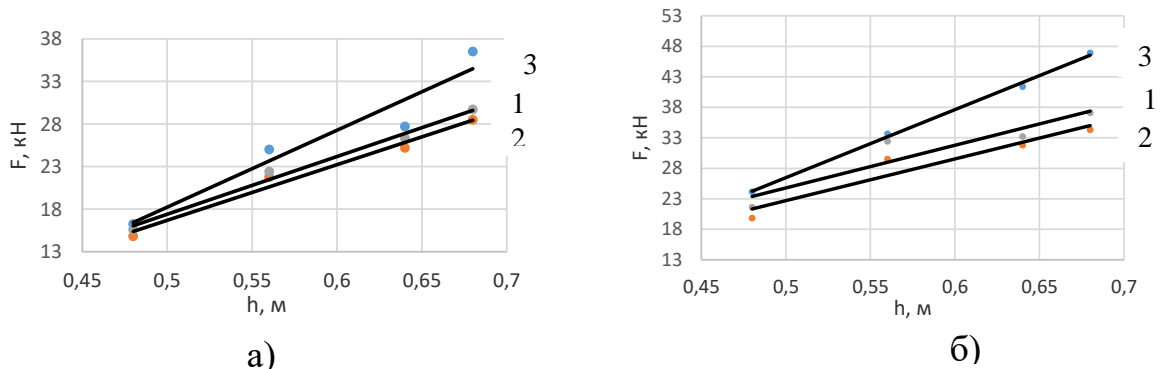


Рисунок 4.4 – Зависимости тягового усилия от глубины рыхления при влажности почвы: а) 8%, б) 18 %

Кривая, ограничивающая зону деформации перед рабочим органом, имеет форму параболы с разной крутизной (рис. 4.5). Технологические параметры от глубины рыхления составляли: величина распространения деформации перед рабочим органом –  $L_{\text{деф}}$  ( $0,8 \dots 0,9$ ) $h$ , высота подъема грунта,  $h_1$  между боковыми стойками ( $0,76 \dots 1,0$ ) $h$  от глубины рыхления, высота разрыхленного грунта после рыхления над исходной поверхностью  $h_2$  – ( $0,3 \dots 0,4$ )  $h$ .

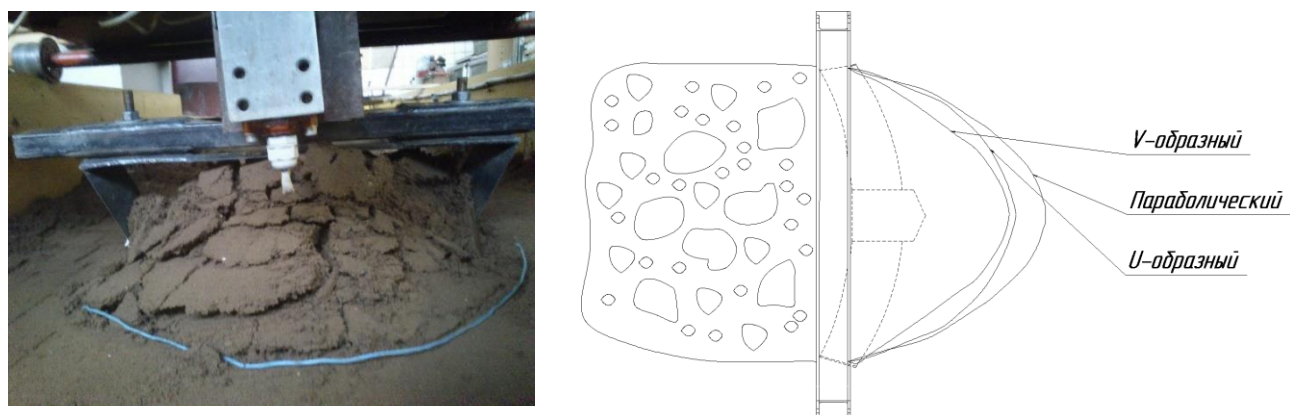


Рисунок 4.5 – Характер кривых, ограничивающих зону деформации грунта в плане для моделей рабочих органов

Сравнительный анализ технологических параметров, характеризующих процесс деформации пласта при рыхлении моделями рабочих органов с различной конфигурацией боковых стоек, позволил сформировать оценку степени их воздействия на почву (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Параметры, характеризующие процесс рыхления почвы

Тип р. о.	$h_1$ , см	$h_2$ , см	$K_p = V_p/V_n$	$L_{\text{деф}}$ , см	$L_{\text{перем}}$ , см
V образный	13	4,3	1,38	18	21,5
U образный	17	4,8	1,42	18,5	28,5
С парабол. стойками	15	4,6	1,4	22	23

Наибольшая величина подъема грунта между боковыми стойками соизмеримая с глубиной рыхления наблюдалась была у U – образного рыхля, у

параболического рабочего органа в 1,16 раза выше чем у V – образного, но в 1,13 раза меньше чем у U образного [81]. Длина распространения деформации перед рабочим органом  $L_{\text{деф}}$  для рыхлителя с параболической формой боковых стоек больше в 1,22 раза чем для рыхлителей с U образной и V образной формой стоек. Перемещение верхнего слоя почвы по ходу движения  $L_{\text{перем}}$  у U – образного рабочего органа,  $L_{\text{перем.}}=28,5$  см, у V – образного,  $L_{\text{перем.}}=21,5$  см, со стойками параболической формы,  $L_{\text{перем.}}=23$  см.

Значения коэффициентов разрыхления составляли:  $K_p = 1,42$  для U образного рыхлителя,  $K_p=1,4$  для рыхлителя с параболическими стойками и  $K_p=1,38$  для V – образного.

Наибольшее тяговое сопротивление было получено для U – образного рыхлителя,  $F_m=36,7$  кН, что объясняется интенсивным сжатием обрабатываемого пласта грунта со стороны полукруглой части стоек. Тяговое усилие у рабочего органа с параболическими стойками было в 0,87 раза меньше по сравнению с V – образным и составляло 22,9 кН.

Величина удельного сопротивления рыхлению для трёх типов рабочих органов составляла 37,9, 25,8, 24,3 кН/м<sup>2</sup> соответственно (Приложение Г).

У объёмных рыхлителей на удельное сопротивление рыхлению оказывают влияние параметры и конструкция рабочего органа. Наименьшее значение удельного сопротивления рыхлению наблюдалось для модели с параболическими боковыми стойками, которое составило  $K_{y0} = 52$  кН/м<sup>2</sup> при рыхлении на глубину 0,68 м (табл. 4.4).

При малой глубине наблюдалось наибольшее значение удельного сопротивления рыхлению с увеличением глубины рыхления это значение уменьшалось (рис. 4.6) [84]. Результаты опытов по определению удельного сопротивления рыхлению на разной глубине в целом не противоречат данным исследований по резанию грунтов, проводимых В.Д. Абезгаузом, Н.Г. Домбровским, А.Н. Зелениным и другими.

Анализ гистограмм распределения агрегатов по размерам показал, что наиболее неоднородная структура, с коэффициентом неоднородности  $b = 8,7$



( $b=a_{max}/a_{min}$ ), при средних значениях размеров агрегатов  $a_{cp} = 5,5$  см, образовывалась у U – образного рабочего органа.

Таблица 4.4 – Средние значения результатов исследования моделей рыхлителей

Глубина h, м	Тип рабочего органа					
	Прямолинейный		U-образный		Параболический	
	F, кН	$K_{уд}$	F, кН	$K_{уд}$	F, кН	$K_{уд}$
0,32	15,6	100,6	18,2	91	14,3	89,4
0,44	21,4	78,7	22	64,7	21,3	73
0,56	26,9	64,7	34,5	72	22	51
0,68	32,5	55,65	48	75	33,2	52

При рыхлении U – образным рабочим органом происходило интенсивное воздействие полукруглой частью боковых стоек на пласт грунта, в результате чего грунт распадался на мелкие фракции, а в верхнем слое вертикальные стойки создавали дополнительное сжатие и уплотнение этих фракций в сплошные глыбы, на что затрачивалось большое количество дополнительной энергии. Наиболее однородная структура разрыхленного пласта с коэффициентом  $b = 4,9$  и наименьшим значением средних размеров агрегатов  $a_{cp} = 5,1$  см образовывалась при рыхлении рабочим органом, имеющим криволинейные боковые рыхлящие стойки в форме параболы.

Наибольшие значения параметров, характеризующих процесс разрыхления ( $h_2, L_{деф}, L_{перем}, K_p$ ), а следовательно, и большие затраты энергии были получены для U – образного рыхлителя, имеющего полукруглую форму боковых стоек, наименьшие значения для V – образного рыхлителя с прямыми боковыми стойками. Промежуточные средние значения данных величин были зафиксированы для рыхлителя с параболическими боковыми стойками. Сравнительный анализ результатов исследований по влиянию влажности на энергетические и технологические показатели процесса рыхления показал, что

увеличение влажности почвы в пределах от 8 до 18% приводит к увеличению тягового усилия на 18...25% для рыхлителя с параболическими стойками и на 20...30% для U – образного.

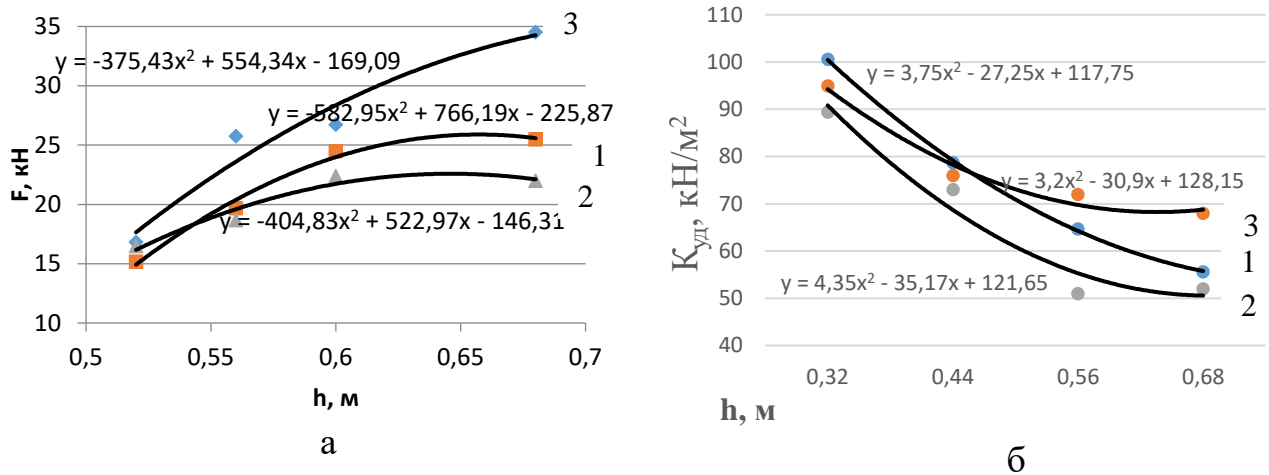


Рисунок 4.6 Зависимости:

- а) тягового усилия от глубины рыхления, б) удельного сопротивления рыхлению от глубины; для рыхлителей: 1- с прямыми стойками; 2- с криволинейными стойками; 3 - с U –образными (полукруглыми) вертикальными стойками

Это можно объяснить увеличением сопротивления грунта при прохождении всей его массы между боковыми стойками, сопротивления перемещения слоёв, а также большой степенью слипания почвенных агрегатов. Сравнение тягового усилия при рыхлении рабочими органами разных типов на глубину 0,68 м показало, что у U – образного рыхлителя тяговое усилие было на 28...33 % больше, чем у рыхлителя с параболическими стойками и V – образного, причём различие возрастает с увеличением влажности.

Опыты с применением методов фрактального анализа практически совпадают с результатами инструментальных измерений. Кроме этого, эти опыты позволили получить графическую картину результатов рыхления (рис. 4.7).

Карта фрактальных размерностей хорошо повторяет контуры рабочего органа областями повышенной фрактальной размерности, что позволяет оценить степень его разрыхления.

С увеличением скорости перемещения для обоих рабочих органов увеличиваются общая фрактальная размерность и усилие сопротивления. Для параболического рабочего органа наблюдались лучшие результаты по рыхлению грунта.

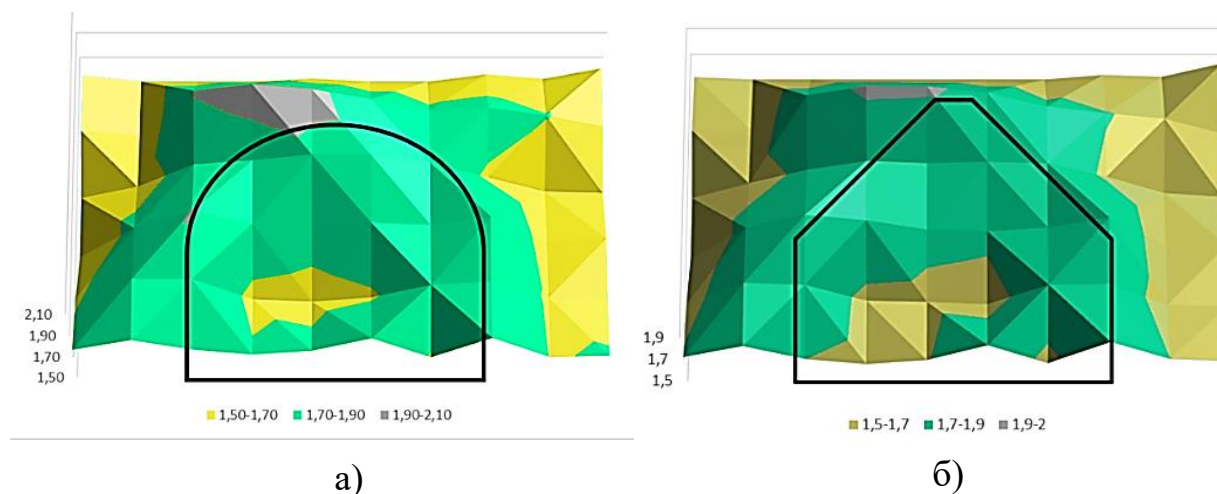


Рисунок 4.7 Карты распределения фрактальной размерности по срезу для рабочих органов объёмных рыхлителей:

а) с параболическими стойками; б) V образного

Анализируя результаты второго этапа экспериментов, в целом установлено, что наиболее полно удовлетворяет потребительским свойствам рабочий орган № 2 (с параболическими стойками)

Исследования в полевых условиях рабочего органа рыхлителя объёмного типа с параболическими стойками подтвердили результаты экспериментальных лабораторных исследований. Удельное сопротивление рыхлению грунтов ненарушенной структуры плотностью  $1,7...1,8 \text{ г/см}^3$  на глубину 0,5 метра составило  $56 \text{ кН/м}^2$ , что соответствует результатам лабораторных экспериментов.

### 4.1.3 Результаты исследований влияния влажности грунта на процесс рыхления

Третьим этапом были продолжены экспериментальные исследования рабочего органа № 2. Исследования процесса рыхления рабочим органом по влиянию влажности на величину тягового усилия и качества рыхления показали,

что тяговое усилие  $F$  с увеличением влажности  $w$  от 7 до 14 % увеличивается практически линейно, далее при увеличении влажности до 16% линейность зависимости  $F$  изменяется, а затем при влажности от 18 до 22 % начинает уменьшаться (рис. 4.8).

С целью изучения влияния влажности на качественные и энергетические характеристики процесса рыхления были проведены экспериментальные исследования модели рыхлителя с параболическими стойками при глубине рыхления 0,68 м (в пересчёте на натуру). Анализ результатов исследований показал, что при увеличении влажности от 8...18% тяговое сопротивление увеличивается от 24 кН до 32 кН, при дальнейшем увеличении влажности усилие начинает снижаться, при влажности 22% усилие достигло величины 28 кН (рис. 4.8, в).

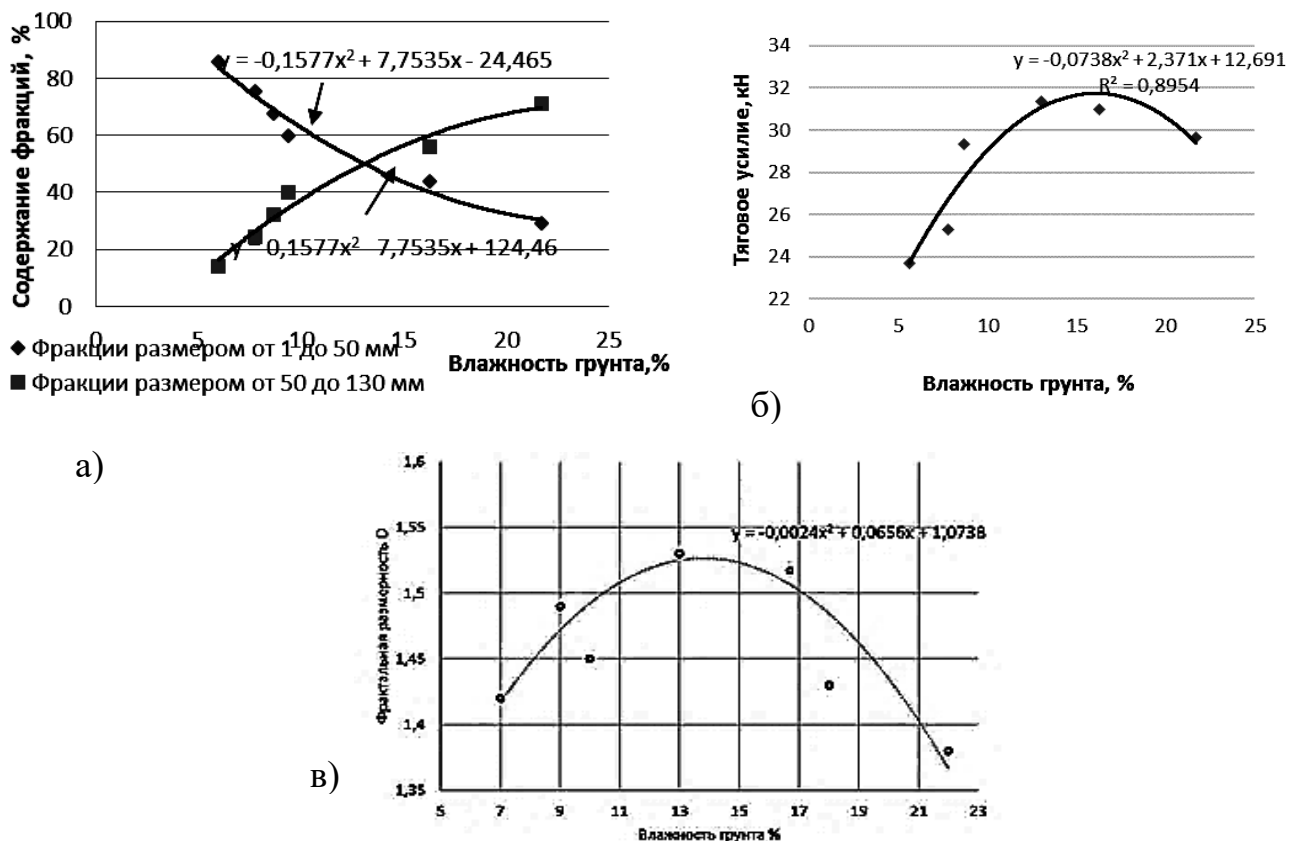


Рисунок 4.8 – Зависимости:

- а) размеров фракций разрыхлённого грунта; б) тягового усилия от влажности;  
в) дисперсии фрактальных размерностей от влажности

Характерной особенностью являлось то, что при увеличении влажности способность грунта к крошению заметно уменьшалась. При влажности более 18% наблюдалось слипание почвенных агрегатов в крупные глыбы. Данное явление также наблюдалось и при полевых испытаниях (при влажности почвы около 18...22 %) (рис. 4.9).

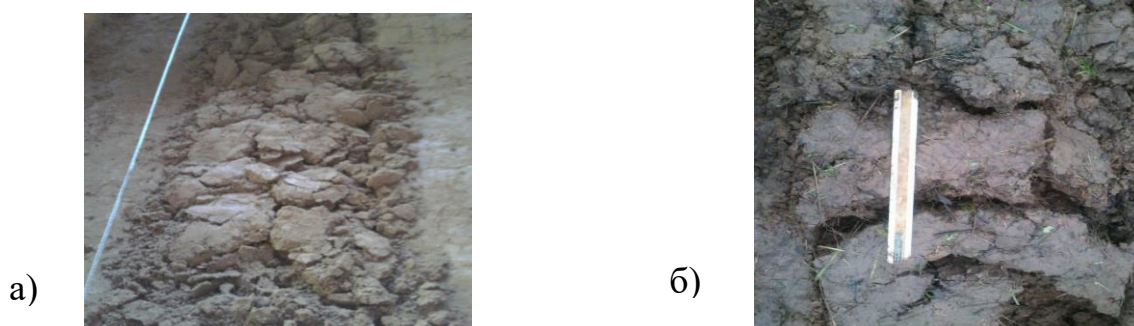


Рисунок 4.9 – Полоса разрыхлённого влажного грунта:

а) в грунтовом канале лаборатории; б) в полевых условиях

В результате рыхления плотность грунта уменьшается на 20...25% при влажности 8...12%. При увеличении влажности происходило изменение структурного состава, а именно увеличилось число более крупных фрагментов, что привело к снижению качества разрыхления (рис. 4.9, а). При повышенной влажности (более 18%) вода гомогенизирует грунт. На основании результатов опытов можно рекомендовать наиболее оптимальный диапазон влажности грунта при рыхлении в пределах 10%...14% (табл. 4.5).

Таблица 4.5 – Результаты опытов с различной влажностью грунта

№ эксперимента	Тяговое усилие, кН	Влажность, %	Соотношение фракций грунта, %	
			1-50 мм	50-150 мм
1	23,7	6	85,8	14,2
2	25,3	7,8	75,6	24,4
3	29,3	8,7	67,7	32,3
4	31,4	9,4	60	40
5	31	16,3	44	56
6	29,4	21,7	29	71

Что может объясняться положительным влиянием воды на организацию самоподобных структур в грунте, тогда как при повышенной влажности (более

18%) вода гомогенизирует грунт. Осреднённые значения результатов проведения экспериментов с различной влажностью приведены на рисунке 4.10.

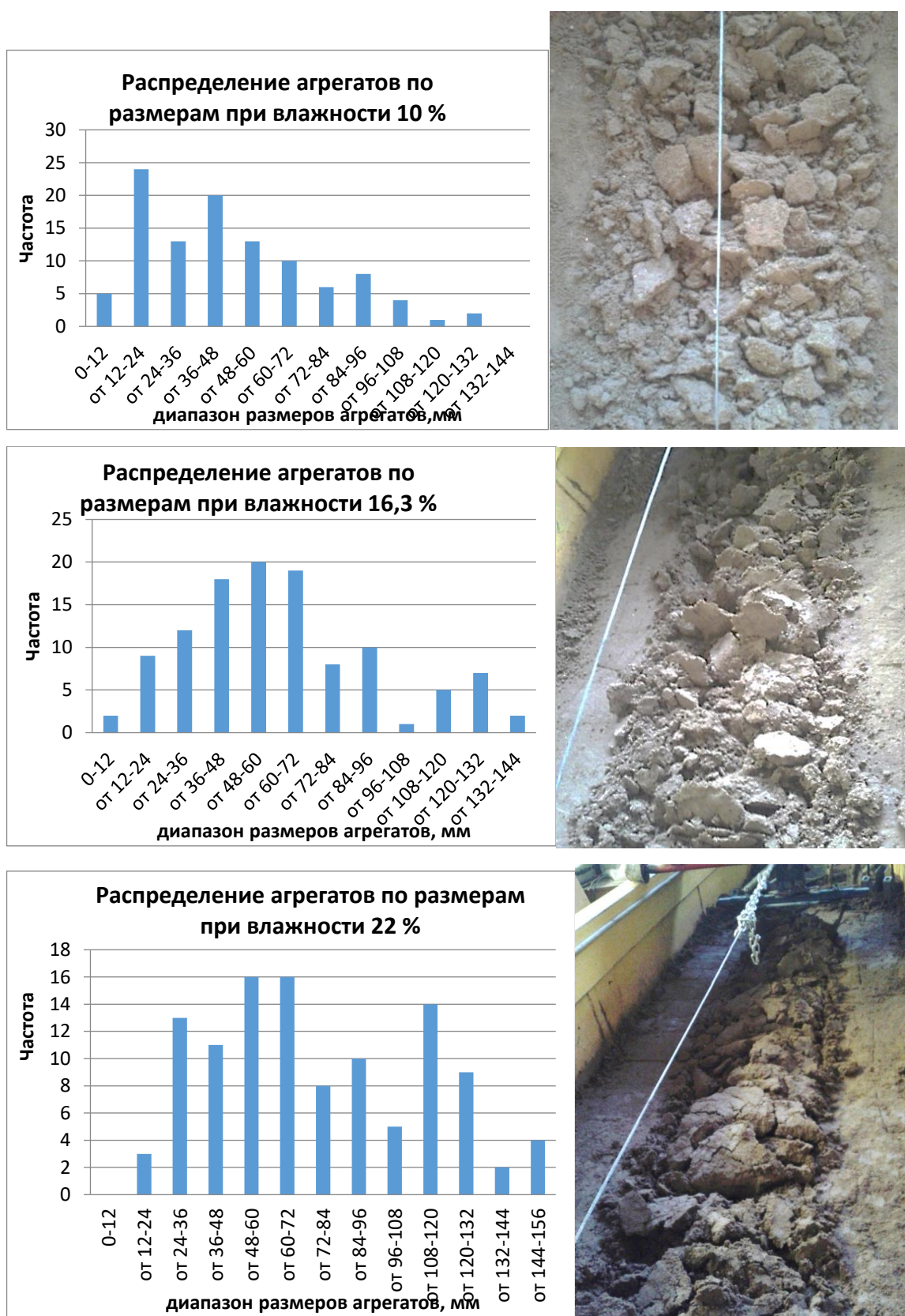


Рисунок 4.10 – Гистограммы распределения агрегатов разрыхлённого грунта по размерам в зависимости от влажности



Результаты исследований по изучению влияния влажности грунта на его размерность показали, что, начиная с относительно малых величин влажности 5...7 % фрактальная размерность практически линейно растёт до средних значений влажности – 13...15 %.

#### **4.1.4 Исследование процесса деформации и перемещения слоёв грунта рабочим органом рыхлителя при маркировке слоёв цветным мелом**

В процессе рыхления перед профилем рабочего органа образовывалась призма грунта, перемещающаяся впереди. Геометрический характер призмы в плане напоминает объём в форме раковины, описанный ранее Зелениным А.Н., проводившим эксперименты на песке с элементарными профилями [28]. Однако наблюдаемая призма существенно отличалась по объёму и форме. Было замечено, что происходит интенсивный подъём грунта относительно исходной поверхности,  $h_1$ , и перемещение пласта обработанного грунта вперёд  $L_{\text{пер}}$ , на расстояние равное примерно 1,5...2 от глубины рыхления. После прохода грунта через контур рабочего органа, оставалась полоса разрыхлённого грунта выше исходной поверхности на величину  $h_2$ . Для изучения характера деформации слоёв грунта на разной глубине, производились поперечные и продольные разрезы полосы рыхления.

Вертикальные срезы делались в зоне с цветными слоями перпендикулярно направлению движения. Результаты экспериментов с послойной маркировкой цветным мелом позволили установить характер перемещения объёмов грунта в разных слоях. На рисунке 4.11 показаны поперечный и продольный срезы грунта. Было замечено, что нижние слои смещены по направлению движения относительно друг друга на 0,12...0,16 м, а верхние слои на 0,64...0,8 м, что соизмеримо с глубиной рыхления.

В нижней части около лемеха в начале зоны с цветными слоями наблюдалась интенсивная деформация слоя, слой был разорван посередине, постепенно по мере

отдаления от начала зоны он проявлялся все более отчётливо. Значительную деформацию и разрушение нижнего слоя можно объяснить сильным воздействием лемеха и нижней части стоек, которое снижается с уменьшением глубины рыхления и по мере отдаления от лемеха.

Наблюдалось увеличение снизу вверх расстояний между начальным положением слоя и деформированным после рыхления.

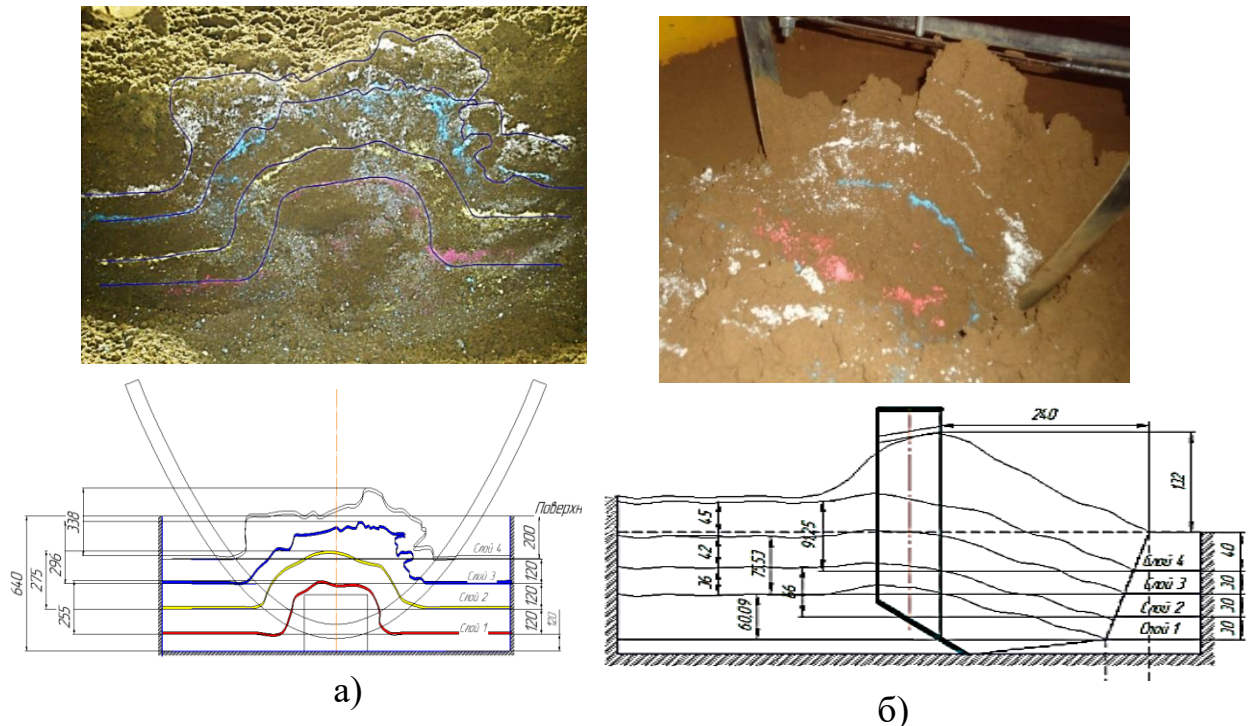


Рисунок 4.11 – Деформация слоёв грунта:

а) в поперечной плоскости; б) в продольной плоскости

Причём, максимальным было смещение верхнего слоя. Было замечено, что длина распространения деформации  $L_{\text{деф}}$  и высота подъёма призмы грунта между боковыми стойками –  $h_2$  соизмеримы с глубиной обработки  $h$  и были равны  $L_{\text{деф}} =$  от 0,14 до 0,24 м,  $h_2 =$  от 0,14 до 0,18 м (табл. 4.6).

Замеры расстояний между слоями грунта в момент взаимодействия рабочего органа с грунтом и другие замеры позволили геометрически построить вертикальный срез вдоль движения профиля по осевой линии.

В процессе рыхления, в некоторых опытах были зафиксированы частичные соединения (смешивания) слоёв между собой. Более интенсивно происходило



смешивание двух верхних слоёв, а частицы мела нижнего слоя поднимались в некоторых опытах даже на уровень дневной поверхности.

Качество рыхления оценивалось однородностью поперечных размеров агрегатов, преобладанием фракций меньших размеров, равномерностью рыхления по глубине и образованию меньшей гребнистости полосы разрыхлённого грунта.

Средние значения величин измеряемых параметров представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Средние значения результатов исследования рыхлителя

Тип рабочего органа	Средние значения измеряемых параметров					
	$h_1$ , см	$L_{\text{деф.}}$ , см		$h_2$ , см	$L_{\text{пер}}$ , см	$F_{\text{тяг. усилие}}$ , кН
		В верхнем слое	В нижнем слое			
Модель рыхлителя	14	21	18	4,4	30	22,65

#### 4.1.5 Результаты исследования процесса рыхления с дополнительным рабочим оборудованием

С целью повышения однородности размеров фракций в верхнем пахотном слое были проведены опыты с тремя видами дополнительного рабочего оборудования: в виде планки с зубьями, установленной в верхней части за боковыми стойками на высоте, позволяющей воздействовать на объём обработанного грунта; пятью свободно вращающимися на оси рыхлящими дисками, расположенными за рабочим органом над полосой разрыхлённого грунта [82] и поперечной ограничивающей планки, установленной в верхней части между боковыми стойками, которая дополнительно воздействует на обрабатываемый массив грунта. Анализ полученных результатов экспериментов данного этапа экспериментальных исследований позволил получить оценку увеличения тягового усилия при использовании дополнительного оборудования по сравнению с базовой

моделью (рис. 4.12). Наибольшую дисперсию нагрузки имели модели с дополнительным оборудованием, она превышала дисперсию для базовой модели в 1,5 раза.

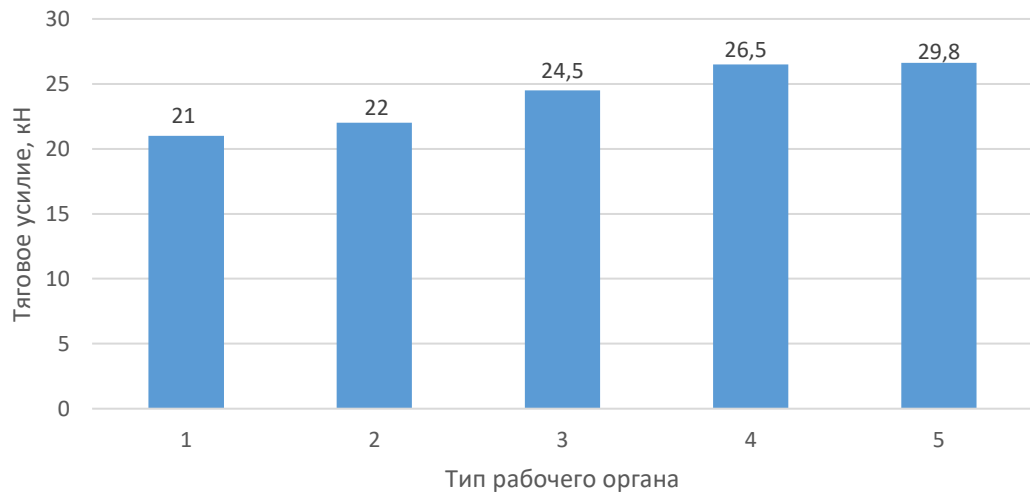


Рисунок 4.12 – Гистограмма распределения тягового сопротивления:

1 - для рабочего органа с прямыми стойками V –образного; 2 - для рабочего органа со стойками в форме параболы; 3 - для рабочего органа со стойками в форме параболы и дополнительным оборудованием в виде рыхлящих дисков; 4 - для рабочего органа со стойками в форме параболы и дополнительным оборудованием в виде рыхлящей планки с зубьями; 5 - для рабочего органа со стойками в форме параболы и дополнительным оборудованием в виде планки без зубьев

Анализ гистограмм распределения агрегатов разрыхлённого грунта по размерам показал, что наиболее однородные и меньшие по размеру агрегаты образуются при рыхлении рабочим органом с параболической формой боковых стоек (рис. 4.13).

Сравнительный анализ данных экспериментальных исследований моделей рыхлителей показал, что применение планки с зубьями увеличивает тяговое сопротивление на 15...17 %, рыхлящих дисков на 7...9 % по сравнению с базовой моделью применение дополнительного оборудования в виде поперечной ограничивающей планки на 18...20 %.

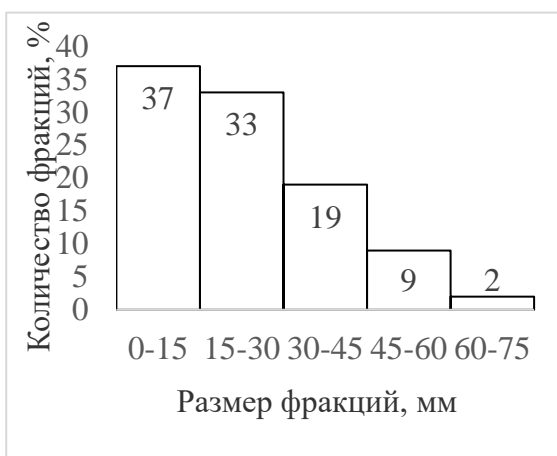
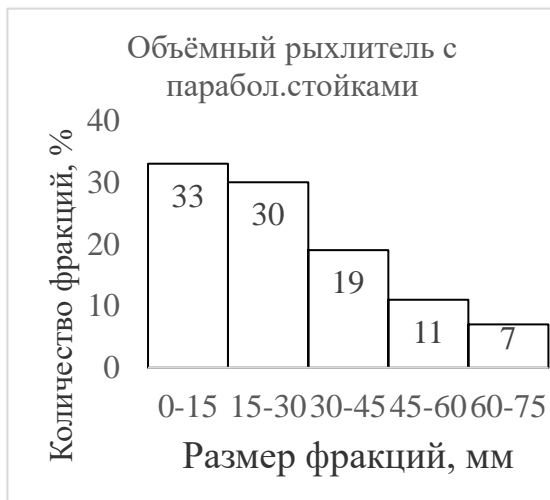
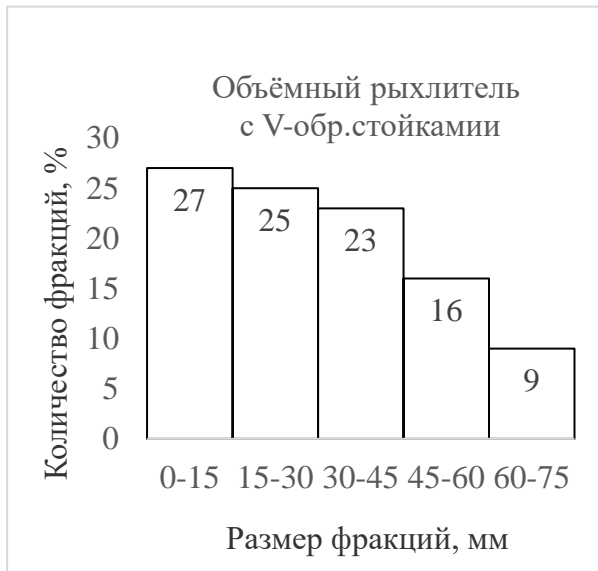


Рисунок 4.13 – Распределение агрегатов грунта для рабочего органа с параболическими стойками с различным дополнительным оборудованием

## Продолжение рисунка 4.13

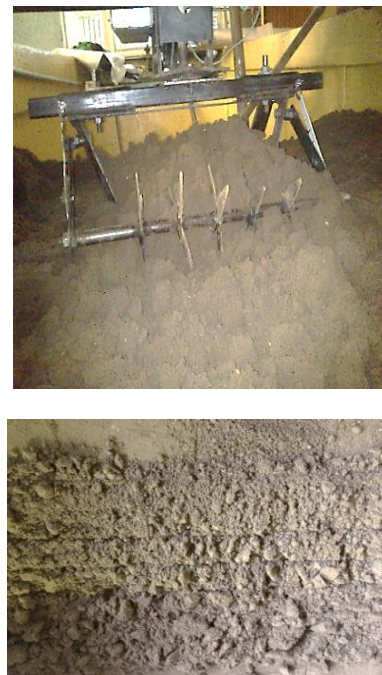
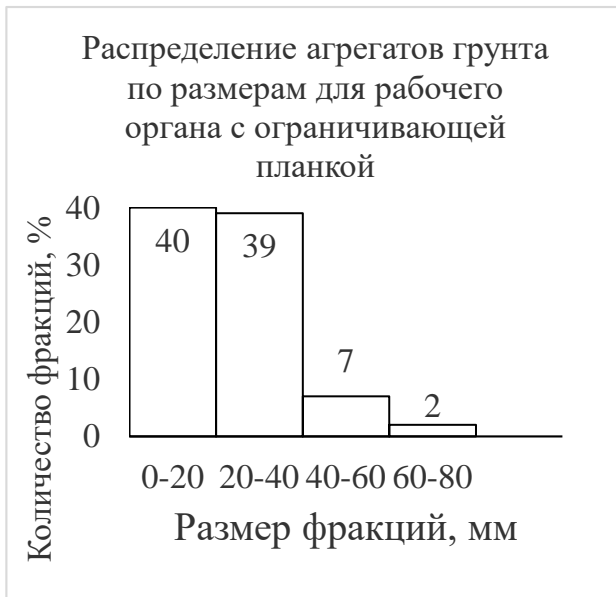
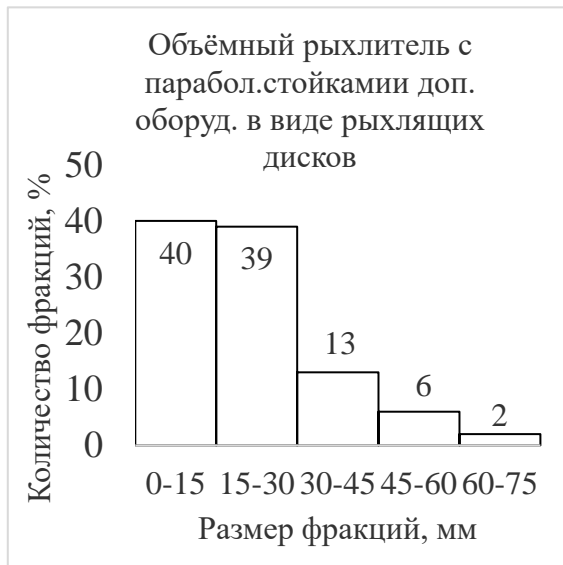


Рисунок 4.13 – Распределение агрегатов грунта для рабочего органа с параболическими стойками с различным дополнительным оборудованием

Распределение агрегатов разрыхленного грунта по размерам показало, что рыхлитель с параболическими боковыми стойками и с рыхлящими дисками позволяет обеспечить получение 85...90 % фракций грунта размером не более 50 мм, а наличие агрегатов до 60 мм составляло всего 2 %, что наиболее полно



удовлетворяет агромелиоративным требованиям к глубокому рыхлению перед проведением посевных работ.

#### 4.1.6 Определение объёма и массы перемещаемого и деформируемого грунта рыхлителями

Для вычисления таких составляющих сопротивления рыхлению, как силы подъёма и перемещения грунта, сил трения грунта по грунту, инерции, необходимо знать объём и массу разрыхлённого грунта перед рабочим органом. Как показали наши исследования, параметры характера разрыхлённого грунта во многом зависят от конструкции и углов установки режущих элементов рабочих органов. Выбрав наиболее рациональные для практического применения рабочие органы №1 и №2 (с прямыми и криволинейными боковыми стойками), были проведены эксперименты по определению объёмов и масс разрыхлённого и перемещаемого в процессе рыхления грунта. Рыхление осуществлялось на одинаковой глубине и с грунтом, имеющим определённую влажность и плотность. При прохождении рабочим органом полосы рыхления длиной 1,5...2 м, тележка с рыхлителем останавливалась. Производились измерения величины и формы разрыхлённого грунта перед рабочим органом. Контур грунта измерялся шаблоном из проволоки, ширина и длина линейкой (рис. 4.14).



а)

б)

в)

Рисунок 4.14 – Схемы определения объёма разрыхлённого грунта:

а) измерение границы зоны распространения деформации с помощью проволочного шаблона; б) вид верхней части призмы грунта; в) вид нижней части призмы по границам разрыхлённой зоны

Форма разрыхлённого грунта над дневной поверхностью напоминала раковину, что было отмечено А. Н. Зелениным при испытании режущих профилей [42]. Далее стальным листом срезался этот объём грунта на уровне дневной поверхности, и определялся его объём  $V_1$  и масса  $m_1$ . Выемка разрыхлённого грунта ниже дневной поверхности производилась по границам ненарушенного массива, в дальнейшем определялись его объём  $V_2$  и масса  $m_2$ .

Общий объём разрыхлённого грунта и масса определялись как сумма  $V_1 + V_2$ . Следует отметить, что по результатам опытов объёмы  $V_1$  и  $V_2$  по величине различались незначительно. Для рабочего органа №1 объём  $V_2$  был несколько больше чем  $V_1$ , для рыхлителя № 2  $V_1 > V_2$ .

Разрыхлённый грунт выше и ниже дневной поверхности по форме можно представить, как два сегмента эллиптического параболоида, объём которого можно определить по формуле:

$$V = 0,5\pi abH, \quad (4.4)$$

где  $a$  и  $b$  – полуоси параболоида;  $H$  – высота параболоида.

Для использования в расчётах высоту  $H$  и полуоси следует выразить через параметры рыхления  $h$ ,  $L_{\text{деф}}$ ,  $h_2$ , таким образом, была получена эмпирическая зависимость объёма  $V$  от глубины рыхления  $h$  (раздел 5).

## **4.2 Исследование процесса разрыхления грунта рабочим органом объёмного типа в полевых условиях**

В результате четвёртого этапа, (полевых испытаний) были получены данные по энергетическим и технологическим показателям процесса при рыхлении грунта естественного сложения на глубину 0,5 метра [70, 83, 137, 138], (Приложения Д, Е, Ж, И).

Было замечено, что граница зоны деформации очерчена кривой близкой по форме к параболе, длина распространения деформации в процессе рыхления  $L_{\text{расп.}}$ , достигала величины 55 см, что соизмеримо с глубиной обработки (рис. 4.15),

высота подъёма пласта перед рабочим органом  $h_2$ , высота подъёма полосы разрыхлённого грунта  $h_1$  получены аналогичными результатам, лабораторных опытов. Тяговое сопротивление составляло при влажности грунта 10% 11,5 кН, при влажности 18...20% 14 кН, и удельное сопротивление грунта рыхлению 64...68 кН/м<sup>2</sup>.



Рисунок 4.15 – Измерение параметров, характеризующих процесс рыхления в полевых условиях

Определение плотности грунта в разных слоях по глубине рыхления проводились через определённый шаг по длине полосы обработанного участка [126, 128, 130, 161]. Измерения плотности проводились до и после рыхления, средние значения плотности приведены в таблице 4.7.

Плотность пахотного слоя опытных участков необработанных полей была больше допустимых значений рекомендуемых для произрастания сельскохозяйственных культур в 1,3...1,4 раза. Было замечено, что по мере увеличения глубины плотность увеличивалась, достигая на глубине 0,6 м величины 1,93 г/см<sup>3</sup>. Плотность грунта после разрыхления оставалась равномерной по всей

Таблица 4.7 – Плотность грунта до и после рыхления рабочим органом объёмного типа

Глубинна h, м	Плотность, г/см <sup>3</sup>															
	Полоса 1		Полоса 2		Полоса 3		Полоса 4		Полоса 5		Полоса 6		Полоса 7		Среднее значение	
	До рыхления								После рыхления							
0,1	1,45		1,35		1,34		1,37		1,25		1,24		1,28		1,32	
0,2	1,4	1,28	1,32	1,36	1,36	1,34	1,5	1,37	1,38	1,26	1,4	1,24	1,28	1,19	1,37	1,29
0,3	1,34	1,3	1,54	1,39	1,42	1,39	1,27	1,22	1,58	1,53	1,54	1,49	1,62	1,26	1,47	1,36
0,4	1,57	1,31	1,73	1,26	1,62	1,44	1,54	1,6	1,48	1,47	1,58	1,4	1,5	1,13	1,57	1,37
0,5	1,73	1,24	1,82	1,31	1,72	1,39	1,66	1,36	1,63	1,42	1,53	1,34	1,74	1,31	1,69	1,33

глубине рыхления составляла от 1,32 до 1,35. г/см<sup>3</sup> (рис. 4.16), что вполне соответствует требованиям для посевных работ.

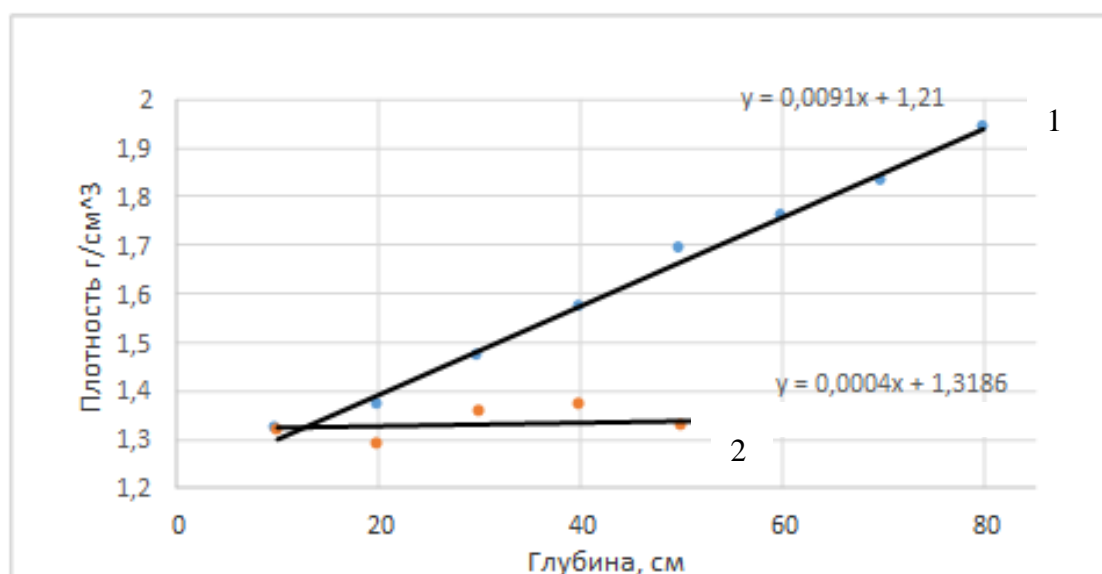


Рисунок 4.16 –Зависимости плотности грунта от глубины:  
1 – до рыхления и 2 -после

При проведении опытов на влажном грунте (22 %) было замечено, что после рыхления на поверхности остаются пласты грунта, пронизанные сетью трещин имеющие дугообразную форму, повторяющую контур рабочего органа (рис. 4.17 а, б).



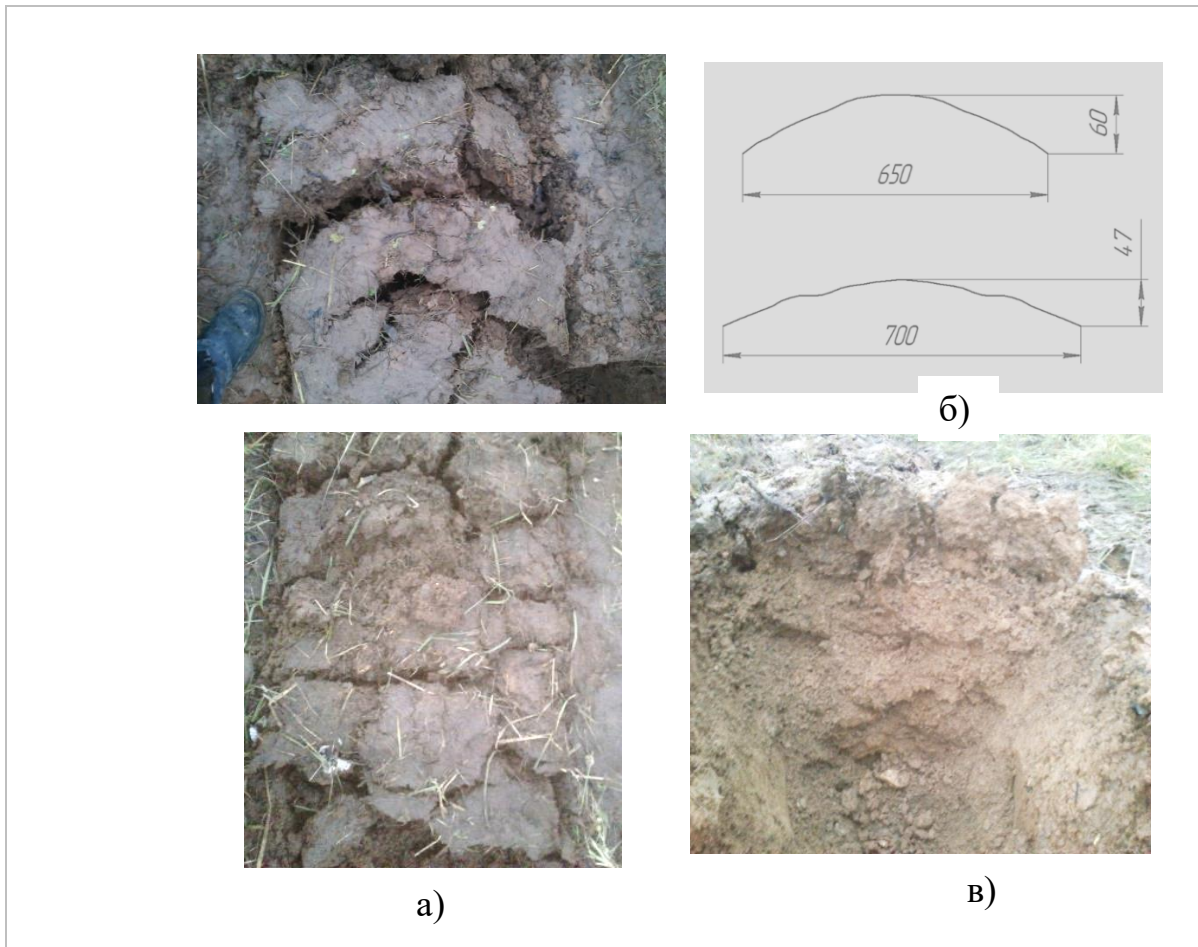


Рисунок 4.17 – Характер разрыхления грунта повышенной влажности:  
 а), б) графическое представление поверхности разрыхлённого грунта;  
 в) вертикальный поперечный разрез зоны рыхления

Также было замечено, что длина распространения деформации в процессе рыхления была соизмерима с глубиной рыхления, а высота подъёма пласта между стойками несколько меньше. Максимальные возникающие усилия доходили при этом до 14,7 кН (рис. 4.18), (Приложение И).



Рисунок 4.18 – Запись тягового усилия. На графике отложено: по оси ординат -  
 усилие в Н; по оси абсцисс - время в секундах

Запись тягового сопротивления при рыхлении позволила определить удельное сопротивление рыхлению  $K_{уд} = 67 \text{ кН/м}^2$ , который может быть использован для оценки тягового сопротивления рыхлителей в практических расчётах.

Необходимо отметить, что значения удельных сопротивлений рыхлению для лабораторных и полевых условий соизмеримы.

В результате были получены данные по энергетическим и технологическим показателям процесса (табл. 4.8).

Таблица 4.8 – Усреднённые параметры процесса рыхления на грунтах естественного сложения

Параметры деформированного грунта				Энергетические параметры	
$h_1$ , см	$L_{\text{расп. деф.}}$ , см	$h_2$ , см	$K_p$	$F_{\text{тяг}}$ , кН	$K_{уд}$ , кН/м <sup>2</sup>
30...32	39...40	20...24	1,38...1,45	12...15	64...68

Результаты испытаний в полной мере подтвердили лабораторные исследования, а также позволили установить ряд характерных особенностей работы рыхлителя на грунтах естественного сложения. В следующем сезоне на грядах, где проводилось рыхление, был посажен картофель. Прибавка урожая на этих грядах составила до 25% по сравнению с контрольными грядами.

Однородность размеров почвенных агрегатов по глубине рыхления и на поверхности составляла  $b_{ср} = 4,67 \text{ см}$ , а коэффициент разрыхления  $K_p = 1,4$ , что можно считать достаточно приемлемым результатом, соответствующим агротехническим требованиям. Распределение агрегатов грунта по фракциям показало, что агрегаты от 1 до 15 см составляют большую часть – 80%, что является неплохим результатом.

### 4.3 Изменение водно-физических свойств переуплотненных почв в результате их крошения мелиоративным объемным рыхлителем

В процессе полевых исследований определялись такие агрофизические свойства почвы как: гранулометрический состав, пористость, плотность и влажность почвы по разрыхляемому профилю до и после обработки переуплотненного слоя экспериментальным объемным глубокорыхлителем. Результаты показали, что использование объемного рыхлителя с криволинейными боковыми стойками улучшает агрегатный состав и структуру почвы в разрыхляемом слое. При влажности почвы от 8 до 13 % средние значение количества агрегатов до 48 мм составляет 62 %, массовой доли почвы по агрегатам от 48 мм до 132 мм – 37 %, с увеличением влажности почвы от 13 до 18 % массовая доля агрегатов до 48 мм уменьшается до 41 %, а доля агрегатов размеров от 48 до 132 увеличивается до 62,3 % (табл. 4.9). При дальнейшем увеличении влажности от 18 до 22% возрастает количество крупных агрегатов (от 48 до 132 мм), которое

Таблица 4.9 – Характеристика структурного состояния разрыхленной дерново-подзолистой оглеенной почвы на участке ОМП «Дубна» (тип почвы – тяжелый суглинок)

Влажность почвы, % от объёма	Массовая доля почвы по фракциям, %											
	Фракция, мм											
	от 1 до 12	от 12 до 24	от 24 до 36	от 36 до 48	от 48 до 60	от 60 до 72	от 72 до 84	от 84 до 96	от 96 до 108	от 108 до 120	от 120 до 132	более 132
8	10,3	31,1	23,5	12,6	11,8	6,8	2,8	1,1	-	-	-	-
10	3,1	23,8	18,4	18,8	17,4	9,8	2,3	3,5	2,7	-	-	0,5
13	1,9	14,7	19,8	10,8	16,9	17,1	5,7	2,9	4,1	4,8	1,2	0,1
16	2,4	9,1	11,8	17,3	19,5	18,4	8,8	9,9	1,5	4,9	6,9	1,3
18	2,4	8,2	10,6	15,8	18,8	17,6	7,6	9,8	1,1	5,0	1	2,1
22	0,3	2,9	12,7	9,7	14,3	14,5	7,9	9,6	4,6	13,3	7,8	2,4

составляет 68,7%, а количество агрегатов размером до 48 мм уменьшается до 31,3 % увеличивается на 8,4 % и от 0 до 10 мм на 6,1 % соответственно. Полученный однородный по слоям агрегатный состав образует оптимальную структуру почвы.

В процессе глубокого рыхления происходит увеличение порового пространства почвы за счет изменения межагрегатной пористости, внутриагрегатная пористость меняется незначительно, при этом происходит частичное смешивание верхнего гумусного слоя с нижними слоями. В результате, наблюдается значительное увеличение коэффициента фильтрации  $K_f$ , особенно в подпахотном горизонте 40 – 70 см.

Благодаря перераспределению внутрипочвенного стока в процессе глубокого рыхления за счёт изменения физических свойств почвы и повышения общей скважности происходит оптимизация влажности корнеобитаемого слоя (табл. 4.10).

Таблица 4.10 - Основные параметры состояния разрыхленной почвы после проведения рыхления (тип почвы - средний суглинок)

Слой почвы, см	Средняя Плотность,		Пористость,		Полная влагоёмкость ,		Наименьшая влагоёмкость	
	г/см <sup>3</sup>	% от ср. пл.	%	% увеличения от ср. порист	% от объёма	% от средней величины	% от объёма	% увеличения от средней величины
0 -10	1,32	5	51,1	7,8	47,4	14,2	34,5	1,6
11-20	1,29	6	52,7 4	14,7	42,0	4,0	34,3	1,7
21-30	1,36	7,4	50,5	13,8	43,3	11,0	34,3	1,8
31-40	1,37	12,7	51	21,4	43,0	12,5	29,9	2,4
41-50	1,33	21,3	50	43,6	39,5	8,2	27,2	2,3
51-60	1,36	23,6	50,1	42,3	44,0	10,0	24,7	1,3
61-70	1,32	27,5	51,6	60,1	38,0	8,5	22,2	1
71-80	1,38	28,8	49,6	69,8	29,0	1	21,1	1

Таким образом, производя рыхление почвы при оптимальной влажности, можно значительно повысить качество ее структуры за счёт лучшего крошения.

#### **4.4 Влияние технологических свойств разрыхляемых почв на сроки проведения полевых работ**

Технологические свойства минеральных почв такие как связность, пластичность, липкость и физическая спелость оказывают значительное влияние на рабочие параметры их механической обработке.

При проведении натурных опытов на полевых участках с различными типами почв внимание уделялось только влиянию отдельных физико- механических свойств исследуемых почв на сроки проведения операций по их рыхлению в общем графике выполнения полевых работ. Основным свойством почвы является влажность, от которой зависят вышеуказанные свойства.

Рыхление целесообразно проводить в периоды когда почва находится в состоянии физической спелости при котором почва лучше крошится и имеет наименьшее сопротивление механической обработке. Это позволяет осуществлять рыхление с наименьшей энергоёмкостью и лучшими показателями качества работы при меньших затратах.

Исследования показали, что интервал влажности физически спелых почв изменяется в диапазоне: 12 – 21% массы абсолютно сухой почвы для средне-суглинистых дерново-подзолистых почв, а наилучшее качество обработки этих почв при наименьших тяговых усилиях достигается при интервалах влажности почвы 15 – 18% [6,7]. Физическая спелость тяжелых оглеенных почвах находится в интервале влажности 50 - 65% ПВ, для суглинистых и супесчаных– 40 -70% ПВ. Меньший интервал оптимальной влажности для механической обработки имеют серые лесные и дерново-подзолистые почвы из-за низкого плодородия и бесструктурности [59, 93, 95]. Более точно физическую спелость можно

установить, исходя из физической сущности этого явления. Для этого используется несколько способов:

- по величине влажности (точнее ее диапазону). Обычно физическая спелость изменяется от 0,6 до 0,9 (в среднем коэффициент близок к 0,7) наименьшей влагоемкости в зависимости от гранулометрического состава. Известно, что физическая спелость это не постоянная величина, а она проявляется в определенном диапазоне значений влажности;

- по нижнему пределу пластичности. Спелость соответствует мягкопластичному пределу Аттерберга с некоторыми отклонениями в зависимости от количества в почве тонкодисперсных частиц;

- по максимальному сдвигу. Известно, что в этом состоянии сдвиг составляет всего лишь несколько единиц, в то время как при отклонении от него сопротивление сдвигу может увеличиваться в десятки, даже сотни раз. Следовательно, можно создать условия малоэнергоемкого разрыхления переуплотненной почвы в состоянии физической спелости.

При рыхлении почвы в состоянии физической спелости наблюдаются преимущественно щадящие расклинивающие деформации, фактически не происходит избыточного сдавливания, резания, скручивания пластов почвы при воздействии на разрыхляемый пласт деформаторов. Более того, в этом состоянии в почве находится некоторое количество рыхлосвязанной влаги, почва остается реологически активным телом и способна при рыхлении даже формировать агрегаты (табл. 4.11).

Таблица 4.11– Результаты опытов с различной влажностью грунта

№ эксперимента	Тяговое усилие, кН	Влажность, %	Соотношение фракций грунта, %	
			1-50 мм	50-150 мм
1	23,7	6	85,8	14,2
2	25,3	7,8	75,6	24,4
3	29,3	8,7	67,7	32,3
4	31,4	9,4	60	40
5	31	16,3	44	56

6	29,4	21,7	29	71
---	------	------	----	----

Установлено, что противоположный процесс агрегатирования происходит при состоянии увлажнения, названном влажностью оптимального структурообразования.

От оптимального диапазона влажности почвы также зависят технология и продолжительность её обработки, сроки проведения работ, эксплуатационные параметры рыхлителя, Почвы, имеющие повышенную влажность обрабатываются с большей скоростью.

#### **4.5 Расчет водопотребления картофеля при возделывании на бесструктурных землях**

В качестве основного метода расчёта суммарного водопотребления используем метод водного баланса, основанием которого является следующее уравнение, в котором для нашего случая не учитываются горизонтальные перетоки, поступление поверхностных и грунтовых вод с прилегающего водосбора и влагу, образующуюся в результате конденсации.

$$\Delta W = O_c + W - E \pm q \quad (4.5)$$

где  $\Delta W$  – требуемый запас влаги в расчётном слое почвы, м<sup>3</sup>/га;  $O_c$  - осадки за расчётный период, м<sup>3</sup>/га;  $W$  – влагозапасы в данный расчётный период м<sup>3</sup>/га;  $E$  – испарение и поглощение растениями влаги (эватранспирация), м<sup>3</sup>/га;  $q$  - водообмен между расчётным и подстилающими слоями (пропитывание).

Отдельные составляющие уравнения измерялись на опытных участках (осадки, температура воздуха и влажность почвы), другими, вследствие их незначительных значений можно пренебречь (например, конденсация влаги, поступление грунтовых и поверхностных вод с водосбора, послойные горизонтальные перемещения грунтовых вод). Количество влагозапасов в

расчётном слое почвы в начале вегетационного периода можно приравнять к наименьшей влагоёмкости (Приложение я).

Расчёты водопотребления картофеля выполнялись для средне влажного (2015) года с использованием данных [23] при проведении полевых опытов на лизиметрах ОМП «Дубна» с учётом фактических физико – механических свойств почвы, полученных в результате собственных замеров:

$$\Delta W = 252 + 24 - 284 - 19 = 27 \text{ мм}$$

Результаты показывают, что для средневлажного года нам необходимо восполнить водный баланс за счёт глубокого рыхления на 270 м<sup>3</sup>/га (один полив).

В итоге изменения водно-физических свойств бесструктурной почвы после рыхления наименьшая влагоёмкость корнеобитаемого слоя увеличилась до 27,2 мм, за счёт увеличения порозности (до 43,6%), водовместимость расчётного слоя повысилась на 22,4 мм.

$$0 = 252 + 27,2 - 284 - 17,6 + 22,4 = 0.$$

В дальнейших расчётах значение инфильтрации для средневлажного года принимаем согласно замеров на лизиметрах равным 19 мм [138].

Расчет водообмена между расчётными и подстилающими слоями почвы  $\pm q$  ( $+q$  – подпитывание расчётного слоя почвы;  $-q$  – инфильтрация влаги в подстилающие слои) достаточно трудная задача. Обычно эти величины получают с помощью регулярных лизиметрических или приборных наблюдений на исследуемом почвенном массиве.

При решении уравнения вертикального влагопереноса в зоне обитания корней используем уравнение А.И. Голованова и А.В. Гейна:

$$\pm q = -\Delta\tau K_{\phi} [0,5\bar{W} + 1]^n \left[ \bar{h}_i \left( \frac{1}{v} \ln \bar{W} \right)^{1/3} + 1 \right] \quad (4.6)$$

где  $\pm q$  – значение вертикального влагопереноса грунтовой влаги, мм;  $\Delta\tau$  – интервал времени, принимаем равный декаде;  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации, согласно замеров - 0,005 м/сут;  $\bar{W}$  - приведенная влажность почвы, определяемая по рекомендациям  $\bar{W} = \frac{W - W_0}{m - W_0} = \frac{40 - 27,5}{28,7 - 27,5} = 8,7$  мм, здесь  $W$  – средняя влажность



почвы, согласно принята равной 40 мм;  $W_0$  – максимальная молекулярная влагоёмкость, в соответствии с таблицей - 27,5мм;  $m$  – пористость, по результатам полевых замеров - 28,7 мм;  $n$  – показатель степени, при расчетах для дерново-подзолистых почв,  $n=3.5$ ;  $\bar{h}_i$  – приведенная мощность транзитной зоны;  $\bar{h}_i=h_i/H_k = 1,08/2,52=0,43$ ; здесь  $h_i$  мощность транзитной зоны, для расчетной декады  $h_i = 1,08$  м;  $H_k$  – высота капиллярного подъёма, для дерново-подзолистых глеевых почв участка по результатам замеров  $H_k = 2,52$  м;  $\nu$  – коэффициент, зависящий от гранулометрического состава почвы, согласно результатов опытов на лизиметрах [124]  $\nu=2,7$ .

В итоге:

$$\pm q = -10 \cdot 0,005 [0,5 \cdot 8,7 + 1]^{3,5} \cdot \left[ 0,43 \cdot \left( \frac{1}{2,7} \ln 8,7 \right)^{1/3} + 1 \right] = 24,8 \text{ мм}$$

$$19 < 24,8$$

При проведении расчётов введены отдельные ограничения: срок процесса влагопереноса ограничен декадой в середине вегетационного периода с учётом средних значений коэффициента фильтрации, глубины проникновения корней картофеля.

Величину инфильтрации воды можно определить как разность между среднемноголетним весенним стоком и стоком летней межени. Согласно СНиП 2.01.14 – 83 величина среднемноголетнего весеннего стока составляет 100 мм для данной зоны, а сток летней межени за период вегетации – 33 мм, то есть внутрипочвенный сток равен 67 мм. По данным Герасимова В.О. (ОМП «Дубна») для средних и засушливых лет, какими были 2013...2015 годы инфильтрация составила: в 2013 году – 63 мм; в 2014 – 76 и в 2015 -107 мм, что соответствует значению по ГОСТ [25].

#### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. В результате многофакторных экспериментов были получены эмпирические зависимости, позволяющие учитывать при определении

тягового усилия угловые параметры рабочего органа.

2. Комплекс однофакторных экспериментов позволил обосновать наиболее рациональные углы резания и установки боковых стоек и лемеха, при которых наблюдалось наиболее лучшая равномерность рыхления и наименьшие усилия.
3. Результаты сравнительных экспериментов по исследованию рыхлителей с различной конфигурацией рабочего органа, показали, что в большей степени удовлетворяет агрономическим и техническим требованиям рабочий орган объёмного рыхлителя боковые стойки которого выполнены криволинейной формы в виде элементов параболы, менее отвечает требованиям рыхлитель с V-образными стойками, а наихудшие результаты у рабочего органа U-образной конфигурации.
4. Исследования влияния влажности грунта с параболическими стойками на энергетические и технологические параметры показали, что увеличение влажности от 10% и до 18% приводит к возрастанию тягового сопротивления от 24 кН до 32 кН, при дальнейшем увеличении влажности усилие начинает уменьшаться. При увеличении влажности способность грунта к крошению заметно уменьшалась. При влажности более 18% происходило слипание почвенных агрегатов в крупные глыбы.
5. Исследования с использованием различных видов дополнительного оборудования для повышения однородности верхнего слоя показали, что наилучшие результаты даёт использование дополнительного рабочего оборудования с рыхлящими дисками, при этом размеры агрегатов не более 50 мм составляли до 90%, а фракции крупных размеров измельчались.
6. Эксперименты с послойной маркировкой грунта цветным мелом позволили определить траекторию перемещения слоёв разрыхлённого грунта.

7. Исследование кинематики частицы слоёв грунта нижние слои в процессе рыхления перемещались вверх и вперёд в направлении перемещения рыхлителя, а верхние приподнимались над дневной поверхностью. При измерении расстояний между слоями во всех экспериментах наблюдалось увеличение снизу-вверх расстояний между начальным положением слоя и деформированным после рыхления, максимальным было смещение верхнего слоя. Также были зафиксированы частичные соединения (смешивания) трёх верхних слоёв между собой, более отчётливо это проявлялось при экспериментах с ограничивающей пластиной.
8. Оценка степени разрыхления методами фрактального анализа дала возможность более точно оценить степень разрыхления и получить фрактальные характеристики разрыхлённого грунта для рабочих органов с различной конструкцией и параметрами при определённых условиях работы с целью выбора наиболее рациональных.
9. Эксперименты с определением формы и размеров призмы разрыхлённого. позволили уточнить объёмы и массу деформированного и перемещаемого грунта что необходимо для определения сил подъёма и перемещения грунта в процессе рыхления.
10. Полевые опыты показали в полной мере подтвердили лабораторные исследования, а также позволили установить ряд характерных особенностей работы рыхлителя на грунтах естественного сложения.
11. Исследование статей водного баланса при возделывании картофеля на дерново-подзолистых глеевых почвах приводит к выводу что при существующих почвенно-геологических условиях требуется пополнение влагозапасов практически во все вегетационные периоды (от 450 до 800 м<sup>3</sup>/га) исключая влажные годы.
12. Проведение глубокого объёмного рыхления переуплотнённых глеевых почв позволяет уменьшить плотность почвы до 28,8 %, повысить пористость до 43,4%, увеличить водовместимость на 8,3 -12,5 %. Изменение водно-

физических свойств почвы приводит к улучшению агрофизических свойств, в итоге к повышению урожайности картофеля до 25%.

13. Мелиоративное рыхление подпахотных горизонтов способствует перераспределению водных запасов, перехвату вертикальных перетоков грунтовой воды, которые составляют для почв естественного сложения ( $q = 190 \text{ м}^3/\text{га}$ ), а для разрыхленных почв (до  $250 \text{ м}^3/\text{га}$ ), что снижает нагрузку на дренажные системы или исключает необходимость пополнения при помощи дождевания.
14. Установлено, что наименьшие тяговые усилия достигаются для средне-суглинистых дерново-подзолистых глеевых почв при 15 – 18 % массы абсолютно сухой почвы, для тяжёлых глинистых глееватых почв - 17 – 18% и для серых лесных почв – 15 - 23%, что соответствует наименьшим энергозатратам, т. е. рыхление лучше проводить в условиях физической спелости почв от 15-18%. Результаты полевых опытов, проведённых на полях с различными почвами подтвердили, что при увеличении влажности почвы с 6 до 10 % наблюдается увеличение тяговых усилий на 24,5 %. С дальнейшим увеличением влажности усилие сопротивления снижается, ухудшается качество рыхления.

## ГЛАВА 5. ОСНОВЫ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА СОПРОТИВЛЕНИЯ РЫХЛЕНИЮ РАБОЧИМ ОРГАНОМ ОБЪЁМНОГО ТИПА

По результатам теоретических и экспериментальных исследований, изложенных выше, предлагаются основы методики расчёта сопротивления рыхлению рабочим органом объёмного типа с учётом физико-механических явлений разрушения грунта. Как было отмечено выше, условия работы исследуемого рабочего оборудования отличаются от сельскохозяйственных и общестроительных машин следующими признаками: большая глубина рыхления (до 1,2 метра), блокированное резание, неоднородность свойств грунта по глубине, разрушение грунта – за счёт объёмного сжатия, определённые требования к качеству разрыхлённого грунта (равномерность и однородность рыхления по всей глубине, преобладание до 80...85% агрегатов грунта размером не более 50 мм, равномерность глубины рыхления).

Вследствие недостаточной изученности процесса рыхления рабочими органами объёмного типа ранее не существовало научно обоснованной методики расчёта сил сопротивления.

Предлагается определять сопротивление рыхлению как сумму составляющих, действующих на рабочий орган с учётом свойств грунта, глубины рыхления и основных параметров рабочего органа. На основании сравнительных экспериментов рабочих органов рыхлителей предлагаемую методику следует использовать для двух типов рабочих органов №1 и №2 (с V – образными боковыми стойками и с параболическими), как наиболее оптимальными для практического использования.

Силу сопротивления рыхлению можно представить, как сумму отдельных составляющих:

$$F = F_p + F_{mp1} + F_{mp2} + F_n + F_{gp} + F_{ин}, \quad (5.1)$$

где  $F_p$  – составляющая усилия резания грунта;  $F_{mp1}$  – сила трения грунта по стали,  $F_{mp2}$  – сила трения перемещаемого грунта по грунту,  $F_n$  – сопротивление по преодолению массы разрыхляемого грунта, сопротивление на перемещение грунта –  $F_{zp}$ , преодоление сил инерции грунта –  $F_{ин}$ .

В предлагаемой методике определение этих составляющих представлено в общем виде. Сила резания определяется как сумма усилий, приложенная к лемеху и боковым стойкам (2.42). Предельные нормальные напряжения определяются по формуле Маслова (2.48). Сила резания раскладывается на нормальную силу  $F_n$  и силу трения грунта по поверхности лемеха и боковых стоек  $F_{mp1}$ .

В формулы для определения других составляющих сопротивления рыхлению входит объём деформируемого, поднимаемого и перемещаемого рыхлителем грунта. Для определения величины, составляющих сопротивления рыхлению  $F_{mp2}$ ,  $F_n$ ,  $F_{zp}$ ,  $F_{ин}$  необходимо знать массу и объём разрыхлённого и перемещаемого грунта.

Усилие от веса поднимаемого грунта  $F_n$ , Н:

$$F_n = V \gamma_z g, \quad (5.2)$$

где  $V$  – объём призмы грунта, м<sup>3</sup>;  $\gamma_z$  – объёмный вес, т/м<sup>3</sup>.

Усилие перемещению грунта по горизонтали  $F_{zp}$ , Н:

$$F_{zp} = V \gamma_z \mu, \quad (5.3)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения грунта по грунту,  $\mu=0,3\dots0,5$ .

Сила трения грунта по грунту  $F_{mp2}$ , Н:

$$F_{mp2} = x V \gamma_z, \quad (5.4)$$

где  $x = 0,5 \sin \varphi_r$ ,  $\varphi_r$  – угол трения грунта, для глины  $\varphi_r=14\dots19^\circ$ ,  $x=0,24\dots0,31$ , для суглинка  $\varphi_r=24\dots30^\circ$ ,  $x=0,37\dots0,44$ .

Сопротивление от сил инерции  $F_{ин}$ , Н:

$$F_{ин} = ma = V \gamma a, \quad (5.5)$$

где  $m$  – масса перемещаемого грунта;  $\gamma$  – плотность грунта, т/м<sup>3</sup>;  $a$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Экспериментальные исследования позволили определить объёмы и массу деформированного грунта. По результатам измерений призмы волочения можно считать, что высота  $h_2$  равна 0,8...0,85 от глубины рыхления  $h$ , длина призмы волочения  $L_{def}$  составляет примерно 1,1...1,2 от  $h$ , ширина основания между боковыми стойками призмы так же составляет 1,15...1,2 от  $h$  (рис 5.1) Эти зависимости для параболического и трапецеидального рыхлителей отличаются незначительно, что позволяет определить объём деформированного грунта в зависимости от одного параметра – глубины рыхления  $h$  [85].

Объём деформированного грунта можно определить с некоторой степенью точности аналитически, представив призму волочения и объём деформированного грунта в виде фрагмента эллиптического параболоида (рис. 5.1), имеющего полуоси эллипса  $a$ ,  $b$  и высоту  $H$ :

$$V = 0,5\pi abH \quad (5.6)$$

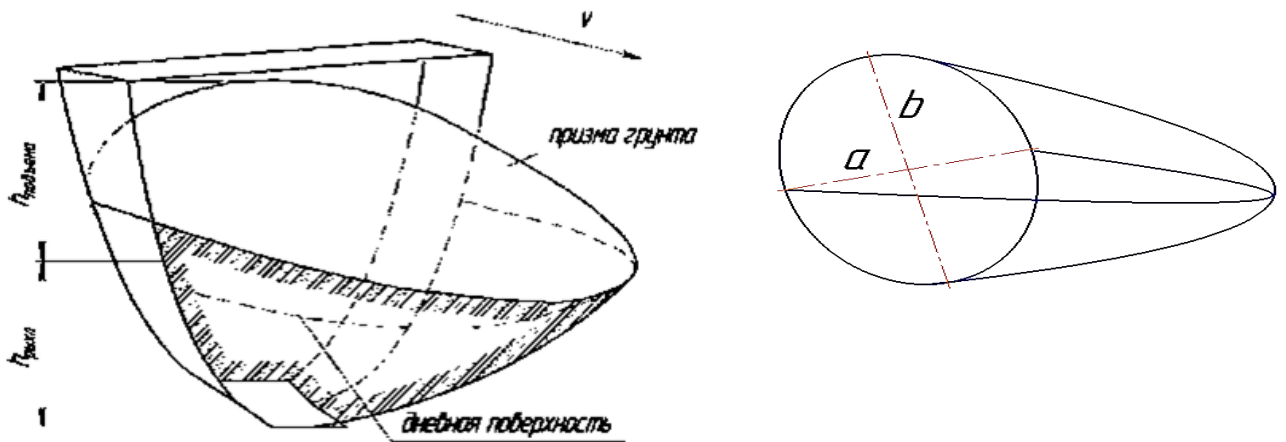


Рисунок 5. 1 – Характер призмы, образующейся в процессе деформации грунта рабочим органом объёмного рыхлителя

Заменяя размеры полуосей  $a$ ,  $b$  и  $H$  через параметры призмы волочения и глубину рыхления  $h$ , получим следующие эмпирические зависимости для рабочего органа с боковыми стойками в форме параболы:

$$a_1 = (0,8...0,9)h, b_1 = (1,1...1,3)h, H_1 = (1,1...1,2)h, \quad (5.7)$$

для V – образного рабочего органа:

$$a_2 = (0,76...0,9)h, b_2 = (0,9...1,2)h, H_2 = (1,06...1,12)h. \quad (5.8)$$

Подставляя выражения, полученные в результате экспериментальных исследований в формулу для определения объёма эллиптического параболоида, получена зависимость, по которой можно определить объём деформированного и перемещаемого грунта рабочим органом.

Для трапецеидального рабочего органа (№1), принимая средние значения коэффициентов получена эмпирическая зависимость для определения объёма:

$$V = \frac{1}{2}\pi \cdot 0,85h \cdot 1,1h \cdot 0,92h = 1,51h^3 \quad (5.9)$$

Аналогично получена формула для вычисления для рабочего органа с боковыми стойками в форме параболы (№2):

$$V = \frac{1}{2}\pi \cdot 0,63h \cdot 0,95h \cdot 1,15h = 1,08h^3 \quad (5.10)$$

Для сравнительной оценки вычисления объёма по предлагаемой эмпирической зависимости и по результатам эксперимента расхождение составляет в пределах 5 %.

Зная среднее значение тягового сопротивления, полученное экспериментально, определены доли в процентах всех составляющих, результаты расчётов приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Процентное соотношение составляющих сопротивления рыхлению

Тип рабочего органа	Процентное соотношение составляющих тягового сопротивления				
	F <sub>n</sub>	F <sub>гр</sub>	F <sub>тр2</sub>	F <sub>ин</sub>	F <sub>рез</sub> +F <sub>тр1</sub>
С параболическими боковыми стойками, № 2	17	7	7	0,3	68,7
V-образный, № 1	15	6	6	0,3	72,7

Из таблицы 5.1 видно, что распределение составляющих усилий для параболического и трапецеидального, имеют аналогичную тенденцию. Большую



величину составляет усилие резания и трения грунта о рабочий орган 68,7 и 72,7 %, существенную долю имеет составляющая от силы тяжести поднимаемого грунта, примерно 15...17 %. Остальные составляющие в сумме составляют 12,3 и 14,3%.

При оценке величины сопротивления рыхлению можно использовать коэффициент удельного сопротивления грунта рыхлению  $K_{уд}$ , полученный экспериментально и зная величину площади поперечного сечения рабочего органа  $A$ , в зависимости от глубины рыхления:

$$F = K_{уд}A \quad (5.11)$$

При лабораторных и полевых исследованиях на суглинистых грунтах влажностью от 10 до 16% получены значения коэффициента  $K_{уд} = 62 \text{ кН/м}^2$  для рабочего органа №1,  $K_{уд} = 52 \text{ кН/м}^2$  для рабочего органа №2.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Экспериментальные исследования позволили достаточно достоверно обосновать определение составляющих тягового сопротивления при рыхлении рабочим органом объёмного типа.
2. Предлагаемая методика определения сопротивления рыхлению позволила оценить численно и в процентах величину всех составляющих сил процесса рыхления.
3. Наибольшую величину, порядка 70%, составляют усилия резания и трения грунта, усилие подъёма грунта составляет 15...17%, остальные составляющие: перемещению грунта по горизонтали, сила трения грунта по грунту, сила инерции 13...15%.
4. Полученное экспериментально значение удельного сопротивления рыхлению для двух типов рабочих органов ( $K_{уд} = 62 \text{ кН/м}^2$  для рабочего органа №1,  $K_{уд} = 52 \text{ кН/м}^2$  для рабочего органа №2) позволяет оценить сопротивление рыхлению по площади поперечного сечения грунта при рыхлении.

5. Отличие результатов при определении сопротивления рыхлению по предложенной методике и полученных экспериментально не превышает пяти процентов.

## **ГЛАВА 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАВЕСНОГО ОБЪЁМНОГО МЕЛИОРАТИВНОГО РЫХЛИТЕЛЯ ДЛЯ РАЗУПЛОТНЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ ГОРИЗОНТОВ И ЕГО ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА**

### **6.1 Технологические приёмы проведения работ при рыхлении**

Основным критерием при расчёте экономической эффективности предлагаемой конструкции рыхлителя по сравнению с использованием рыхлителя РГ-0,8 с прямолинейными боковыми стойками является повышение качества разуплотнения, улучшение структуры обрабатываемого почвенного слоя [98, 100, 111].

Выявление указанных показателей проводилось на основе экспериментальных исследований, выполненных нами на опытных участках опорного мелиоративного пункта «Дубна» ИМВХС РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева в Московской области и на выбывших из сельскохозяйственного оборота полях бывшего совхоза «Осташковский» в Тверской области. Экономическая оценка проводилась на основании данных, полученных при эксплуатационно-технологической оценке, согласно ГОСТ 24055-88, ГОСТ 34393-2018 [25, 27].

По окончании экспериментов по рыхлению были произведены контрольные посадки картофеля. В ходе полевых экспериментов было выявлено увеличение урожайности картофеля на 18...20% без применения дополнительного рыхлящего оборудования и на 22...24% с использованием дополнительных рыхлящих элементов. Факт увеличения урожайности обуславливается повышением качества корнеобитаемого слоя почвы.

Глубокорыхлители с пассивными рабочими органами рекомендуется использовать при любой технологии земледелия: как традиционной, так и при рекультивации земель сельскохозяйственного назначения. При традиционной технологии глубокорыхлители рекомендуют применять не реже одного раза в три года [32, 40].

Предпочтительнее применять рыхлители с объёмными рабочими органами с параболической конфигурацией боковых стоек и рациональными параметрами, так как при рыхлении захватывается большая площадь и повышается коэффициент полноты рыхления, уменьшается гребнистость, достигается однородность агрегатов разрыхлённого грунта, что позволяет в ряде случаев исключить дополнительное выравнивание обработанного поля. Наиболее благоприятное время проведения глубокого рыхления – осень, после завершения полевых сельскохозяйственных работ [39,118].

Технологический процесс глубокого рыхления при оптимальном использовании техники необходимо осуществлять при правильном выборе маршрута рыхления, длины и ширины загонов.

Объёмы повторного эксплуатационного рыхления определяют с учётом размера земель, осушаемых закрытым дренажом, в том числе земель, где ранее было выполнено строительное или эксплуатационное рыхление с учётом их сельскохозяйственного назначения [142, 145].

Сплошное или полосовое рыхление почв применяют в зависимости от гидрогеологических, почвенных и ландшафтных условий. На участках с уклоном поверхности до 0,03 применяют сплошное рыхление, на участках с уклоном поверхности более 0,03 - полосовое.

При уклоне поверхности до 0,005 рыхление выполняют приблизительно под углом  $90^\circ$  к горизонтальным линиям, а при уклоне поверхности более 0,005 – под острым углом к горизонталям, чтобы не допустить размыв поверхности по следам рыхления (рис. 6.1).

В зависимости от размера участка и его конфигурации сплошное рыхление участка выполняют по челночной, загонной или загонной с перекрытием схемам движения рыхлителя.

На узких участках или участках неправильной формы, где трудно разбить загоны применяется челночная схема перемещения рыхлителя. Все рабочие

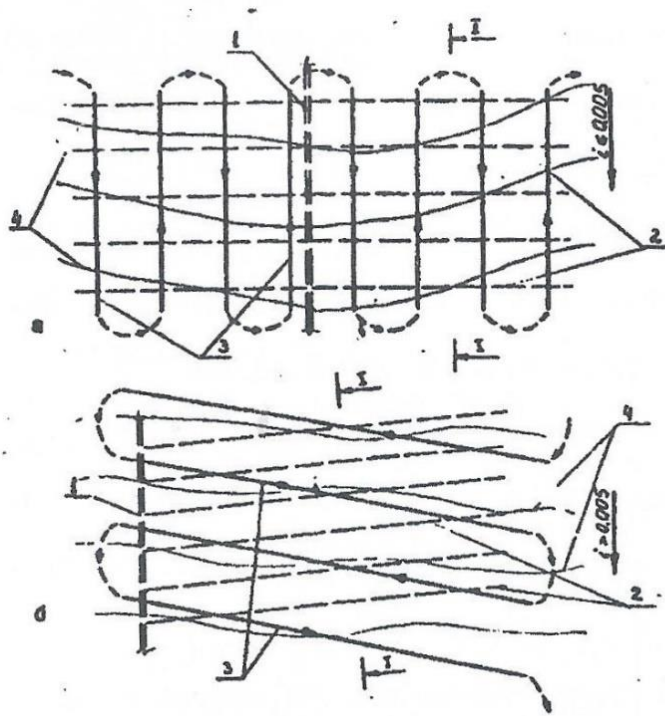


Рисунок 6.1 – Направление рыхления:

а) при уклоне поверхности до 0,005; б) при уклоне поверхности более 0,005 [50]

проходы рыхлителя выполняют рядом с предыдущим, с круговыми поворотами в конце прохода. Наиболее благоприятное время проведения глубокого рыхления – осень, после завершения полевых сельскохозяйственных работ [39,118].

Технологический процесс глубокого рыхления с оптимальным использованием техники должен осуществляться при правильном выборе маршрута рыхления, размеров загонов.

Площади земель, осушаемых закрытым дренажом, в том числе земель, где ранее было выполнено строительное или эксплуатационное рыхление в зависимости от сельскохозяйственных задач, учитывают при расчёте объёмов повторного эксплуатационного рыхления [142, 145].

Сплошное или полосовое рыхление почв используют в зависимости от гидрогеологических, почвенных и ландшафтных условий. На участках с уклоном поверхности до 0,03 применяют сплошное рыхление, на участках с уклоном поверхности более 0,03- полосовое.

Рыхление выполняют приблизительно под углом  $90^\circ$  к горизонтальным линиям при уклоне участка до 0,005, а при уклоне более 0,005 – под острым углом к горизонталям, чтобы не допустить размыва земель по следам рыхления (рис. 6.1).

В зависимости от размера участка и его конфигурации сплошное рыхление участка выполняют по челночной, загонной или загонной с перекрытием маршрутам перемещения рыхлителя.

На ограниченных участках или участках неправильной формы, где трудно разбить загоны применяется челночная схема перемещения рыхлителя. Все рабочие проходы рыхлителя выполняют с меньшим шагом, а также, с круговыми поворотами в конце прохода.

При полосовом рыхлении расстояние между отдельными полосами принимают: 2,0...2,5 м – на глинистых почвах; 3,0...4,0 м – на тяжёлых суглинках; 4,0...5,0 м – на лёгких суглинках.

Участки прямоугольной формы и близкие к квадрату необходимо разбивать на загоны. Ширину загонов назначают согласно техническим характеристикам тракторов-тягачей и соответственно кратной ширине захвата рыхлителей. Наиболее рациональна организация работ на загоне шириной в 4...8 проходов, что составляет для разработанного объёмного рыхлителя 10,5...21 м. Ширину загона на осушаемых участках иногда ограничивают открытые каналы осушительной сети. В таких случаях ширина загона равна расстоянию между каналами (рис. 6.2).

Трактор на задернелых почвах не должен подходить к каналам ближе, чем на 1 м, а на не задернелых почвах на 1,25 м. Целесообразно увязывать площадь загона со сменной выработкой рыхлителя, чтобы выделенный загон был равен сменной производительности рыхлителя. Оптимальная длина гона для рыхлителей составляет 150...300 м. Для заездов и поворотов рыхлителей на концах загонов поперёк поля выделяют поворотные полосы. Ширина поворотной полосы должна быть не менее полуторного радиуса поворота рыхлителя плюс длина всего рыхлителя.

Ширина поворотной полосы должна составлять: для объёмного мелиоративного рыхлителя – 12,5...13 м.

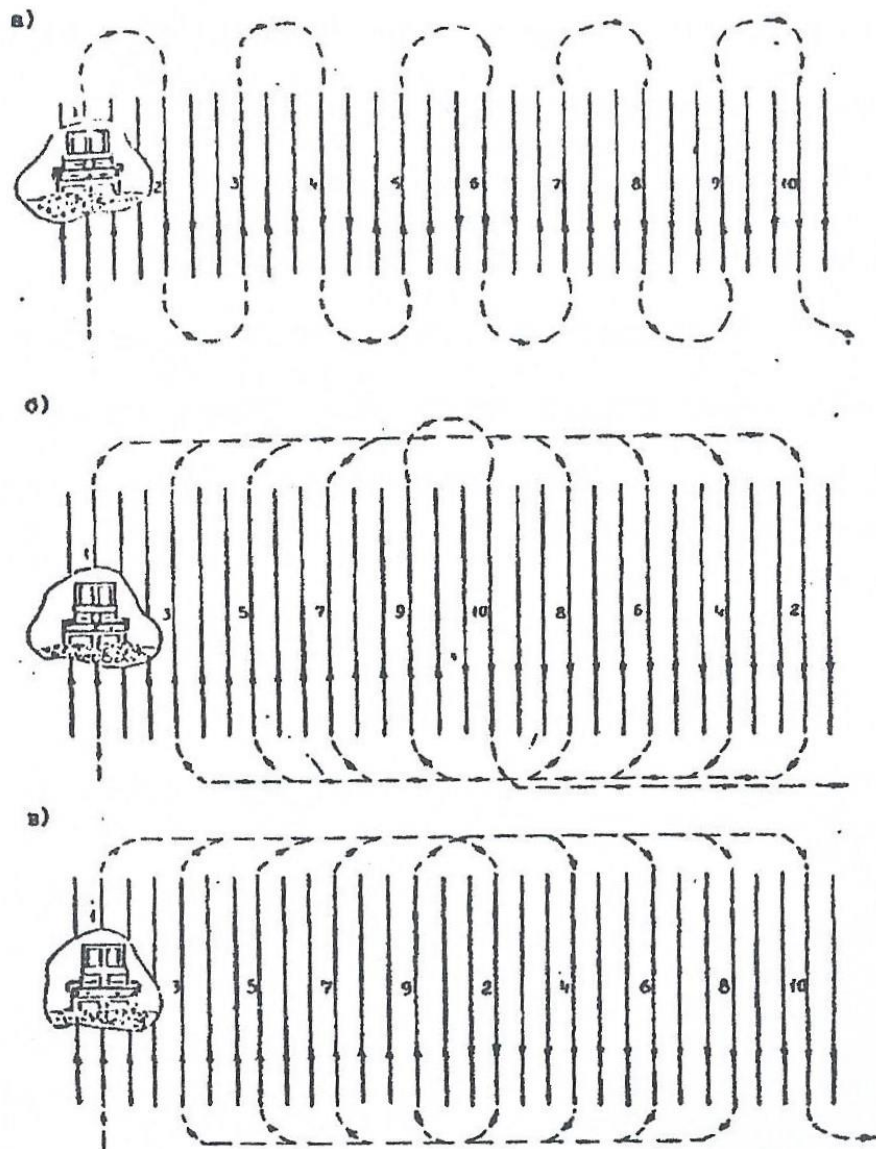


Рисунок 6.2 – Схемы движения рыхлителя:

а) челночная; б) загонная; в) загонная с перекрытием [52]

Для заездов и поворотов рыхлителей на концах загонов поперёк поля выделяют поворотные полосы. Ширина поворотной полосы должна быть не менее полуторного радиуса поворота рыхлителя плюс длина всего рыхлителя.

Ширина поворотной полосы должна составлять: для объёмного мелиоративного рыхлителя – 12,5...13 м.

Загонная схема движения с перекрытием применяется при невозможности разворота за границей участка. При этом все повороты рыхлителя беспетлевые (табл. 6.1).

Таблица 6.1 – Характеристика способов движения агрегата при глубоком рыхлении [46]

Способ движения	Преимущества	Недостатки
Челночный	Не требует разбивки участка. Все рабочие ходы следуют рядом, все повороты одинаковы.	Все повороты петлевые. Требуется широкая поворотная полоса.
Загонный	Почти все повороты беспетлевые (только один или два поворота в середине загона петлевые)	Требуется точная разбивка участка на загоны. В месте петлевых поворотов требуется широкая поворотная полоса. Увеличивается путь холостых переездов
Загонный с перекрытием	Все повороты беспетлевые. Требуется сравнительно узкая поворотная полоса	Требуется точная разбивка участка на загоны. Увеличивается путь холостых переездов.

В стеснённых условиях рекомендуется использовать задний ход для установки рыхлителя на проход.

При применении указанных технологий должны соблюдаться агротехнические требования, предъявляемые к глубокой обработке почвы.

Техническое предложение на внедрение в производство нового объёмного рыхлителя с использованием вышеуказанных технологий при проведении работ как на богарных, так и мелиорированных землях приведено в Приложениях К, Л, М.



## 6.2 Расчёт экономической эффективности применения объёмного рыхлителя с дополнительными рыхлящими элементами

Для оценки применения объёмного мелиоративного рыхлителя с дополнительными рыхлящими элементами выполнен сравнительный расчёт экономической эффективности [100, 101]. В качестве базового варианта был принят рыхлитель РГ-0,8 с прямолинейными боковыми стойками. Исходные данные и результаты расчётов отображены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Исходные данные для расчёта экономической эффективности использования рыхлителя с дополнительными рыхлящими элементами

Показатели	Единицы измерений	МТЗ-1523, одностоечный рыхлитель РГ- 0,8	МТЗ-1523, ОМГР с дополнительными элементами
Скорость движения машины	км/ч	1,94	2,38
Глубина рыхления	м	0,8	0,6
Ширина захвата	м	1,6	1,8
Коэффициент использования мощности двигателя	-	0,8	0,8
Коэффициент использования времени	-	0,77	0,77
Коэффициент рыхления	-	1,1	1,4

Часовую эксплуатационную производительность ( $P_q$ , га/ч) рыхлителей рассчитываем по формуле:

$$P_q = 0,36 \cdot B_p \cdot V_p \cdot K_n \quad (6.1)$$

$$P_q^b = 0,36 \cdot 1,6 \cdot 0,54 \cdot 0,8 = 0,25 \text{ га/час}$$

$$P_q^h = 0,36 \cdot 1,8 \cdot 0,66 \cdot 0,8 = 0,34 \text{ га/час}$$

где 0,36 – коэффициент пересчёта производительности м<sup>2</sup>/с в га/час;  $K_n$  – коэффициент трансформации от технической производительности агрегата к

эксплуатационной,  $K_{\text{п}} = 0,7 \dots 0,9$ ; примем  $0,8$ ;  $B_p$  – ширина захвата рабочего органа, м;  $\Pi_q^{\text{б}}$  – производительность базового варианта рыхлителя;  $\Pi_q^{\text{н}}$  – производительность нового рыхлителя с дополнительным оборудованием;  $V_p^{\text{б}}$  – скорость перемещения базового рыхлителя,  $V_p^{\text{б}} = 1,96$  км/ч;  $V_p^{\text{н}}$  – скорость перемещения нового рыхлителя,  $V_p^{\text{н}} = 2,38$  км/ч.

Определение затрат труда на единицу работы:

$$T_p = n / \Pi_q \quad (6.2)$$

$$T_p^{\text{б}} = \frac{1}{0,25} = 4 \text{ чел} \cdot \text{ч} / \text{га},$$

$$T_p^{\text{н}} = \frac{1}{0,34} = 2,94 \text{ чел} \cdot \text{ч} / \text{га},$$

где  $T_p$  – трудоёмкость работы, чел · ч/га;  $\Pi_q$  – часовая производительность рыхлителя, га/ч;  $n$  – количество рабочих, обслуживающих агрегат, чел.;

Аналогично, рассчитываем удельный расход дизельного топлива:

$$\mathcal{E}_p = N \cdot q_{\text{уд}} \cdot \kappa_{\text{д}} / \Pi_q, \quad (6.3)$$

$$\mathcal{E}_p^{\text{б}} = 59 \cdot 0,258 \cdot 0,85 / 0,25 = 51,8 \text{ кг} / \text{га},$$

$$\mathcal{E}_p^{\text{н}} = 59 \cdot 0,258 \cdot 0,85 / 0,34 = 38,1 \text{ кг} / \text{га},$$

где  $\mathcal{E}_p$  – потребность топлива на гектар, кг/га;  $\kappa_{\text{д}}$  – коэффициент, учитывающий степень эксплуатации двигателя по мощности и времени,  $\kappa_{\text{д}} = 0,85$ ;  $N$  – мощность двигателя, кВт;  $q_{\text{уд}}$  – удельное потребление топлива, кг/кВт·ч;

Определение себестоимости единицы труда:

$$C = C_a \cdot C_p \cdot C_3 \cdot C_2 \cdot C_n, \quad (6.4)$$

где  $C_a$  – амортизационные отчисления, руб/чел;

Определение амортизации отчислений:

$$C_a = \frac{B \cdot a}{100 \cdot T / \Pi_q}, \quad (6.5)$$

где  $B$  – капитальные вложения. Так как в качестве трактора – тягача используется трактор одинаковой марки, его стоимость в расчётах не используем;  $T$  – годовая загрузка машины, ч,  $22 \cdot 8 \cdot 3 = 500$ ч;  $a$  – норма амортизационных отчислений, %, для трактора  $a = 12,5\%$ , для рыхлителей  $a = 10\%$ .

$$C_a^{\bar{}} = \frac{226000 \cdot 10}{100 \cdot 500 \cdot 0,25} = 180,8 \text{ руб./га,}$$

$$C_a^{\#} = \frac{270000 \cdot 10}{100 \cdot 500 \cdot 0,34} = 158,8 \text{ руб./га}$$

Заработанная плата  $C_3$  обслуживающего сотрудника составляет:

$$C_3 = C_u \cdot \mathcal{C} \cdot K_3 / W_u \quad (6.6)$$

где  $C_u$  – часовой тариф, руб.;  $K_3$  – коэффициент расходов на доплаты и начисления;  
 $\mathcal{C}$  – количество человек, обслуживающих рыхлительные агрегаты, чел.

$$C_3 = 87,3 \cdot 1 \cdot 1,25 = 110 \text{ руб./га;}$$

Расходы на горюче-смазочные материалы:

$$C_2 = \mathcal{E}_3 \cdot \mathcal{C}_m \cdot K_c, \quad (6.7)$$

где  $\mathcal{E}_3$  – удельное потребление энергоресурсов, кг/га;  $K_c$  – коэффициент расходов на смазочные материалы,  $K_c = 1,22$ ;  $\mathcal{C}_m$  – стоимость 1 кг топлива,  $\mathcal{C}_m = 52$  руб.

$$C_2^{\bar{}} = 51,8 \cdot 52 \cdot 1,22 = 3286 \text{ руб./га}$$

$$C_2^{\#} = 38,1 \cdot 52 \cdot 1,22 = 2417 \text{ руб./га}$$

Расходы на один час работы на ремонт:

$$C_p = \frac{B \cdot a_p}{(100T)/W_u}, \quad (6.8)$$

где  $B$  – капитальные вложения, руб.;  $a_p$  – норма отчислений на рыхлитель,  $a_p = 12,5\%$ ;  $T$  – годовая загрузка машины, принимаем 3 мес. x 22 дн. x 8 час. ~ 500 час.

$$C_p^{\bar{}} = \frac{226000 \cdot 100,25}{100 \cdot 500} = 11,3 \text{ руб./га}$$

$$C_p^{\#} = \frac{270000 \cdot 100,34}{100 \cdot 500} = 18,4 \text{ руб./га}$$

Накладные расходы, руб./га:

$$C_n = 0,05 \cdot (C_a \cdot C_3 \cdot C_p \cdot C_2), \quad (6.9)$$

$$C_n^{\bar{}} = 0,05(180,8 + 110 + 11,3 + 3286) = 179,4 \text{ руб./га}$$

$$C_n^{\#} = 0,05(158,8 + 110 + 11,3 + 2417) = 135,2 \text{ руб./га}$$

Себестоимость единицы работы:

$$C^{\bar{}} = 180,8 + 110 + 3286 + 11,3 + 179,4 = 3767,5 \text{ руб./га}$$

$$C^{\#} = 158,8 + 110 + 2417 + 18,4 + 135,2 = 2839,4 \text{ руб./га}$$

Годовая экономия затрат, руб.:

$$\mathcal{E}_2 = (C_B + C_M) \cdot T_G \cdot Пч, \quad (6.10)$$

где  $C_B$ ,  $C_M$  – себестоимость работы соответственно для базового и нового рыхлителя, руб./га;  $T_G$  – загрузка рыхлительного агрегата в течение года, ч;

$$\mathcal{E}_2 = (3767,5 - 2839,4) \cdot 500 \cdot 0,34 = 157777 \text{ руб.}$$

Определяем срок окупаемости  $O_k$  и год окончания освоения капитальных вложений:

$$O_k = (B_B - B_M) \cdot \mathcal{E} \quad (6.11)$$

где  $B_B$ ,  $B_M$  – соответственно балансовая стоимость менее или более экономичного рыхлителя, руб.

$$O_k = (270 - 226) \cdot 157,8 = 3,5 \text{ мес.}$$

Результаты расчёта показателей экономической эффективности рыхлителя с дополнительными рыхлящими элементами приведены в таблице 6.3. Расчёты выполнены в ценах 2022 года.

Таблица 6.3 – Показатели экономической эффективности применения рыхлителя разработанной конструкции в сравнении с базовым

Показатели	Трактор – тягач МТЗ -1523	
	Базовый односекционный рыхлитель РГ-0,8	Новый рыхлитель с дополнительными элементами
Затраты труда, чел ч /га	4	2,94
Снижение затрат труда, %	-	26,5
Себестоимость работ руб./га	3767,5	2839,4
Снижение себестоимости, %	-	24,6
Годовая экономия затрат, руб.	-	157777
Срок окупаемости, лет	-	0,3

Себестоимость рыхления почвы новым рыхлителем на 24,6% ниже, чем базовым. Получению экономического эффекта способствовала разница в суммарных затратах средств.

Снижение затрат труда при работе объёмного мелиоративного рыхлителя с дополнительными рыхлящими элементами составляет 26,5%. Это достигается за счет увеличения эксплуатационной производительности при агрегатировании с трактором 3 класса, в результате снижения тяговых сопротивлений и энергоёмкости процесса рыхления тяжёлых почв.

Определим экономический эффект от прибавки урожая товарного картофеля на площадях, разрыхление на которых выполнено рыхлителем с дополнительными рыхлящими элементами:

$$\mathcal{E}_y = C \cdot (U_P - U_B) \quad (6.12)$$

где  $C$  – закупочная цена товарного картофеля за 1ц,  $C = 2500$ р/ц (цена на 2020 г.);  $U_B$  – урожайность картофеля, полученная на контрольном участке без рыхления, ц/га;  $U_P$  – урожайность картофеля на участке с разрыхлённым новым рыхлителем с дополнительными элементами, ц/га.

$$\mathcal{E}_y = 2500 \cdot (258 - 212) = 115000 \text{ руб.}$$

Общая экономическая эффективность при выполнении работ по рыхлению и прибавки урожая составила:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_T + \mathcal{E}_P \quad (6.13)$$

$$\mathcal{E} = 157777 + 115000 = 272777 \text{ руб.}$$

В результате расчётов установлено, что применение нового рыхлителя с дополнительными рыхлящими элементами даёт общую экономию от применения разработанного рыхлителя и прибавки урожая – 273 тыс. р/га (в ценах на 01.09.2023)

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6

1. При исследовании рабочего процесса разработанного нового рыхлителя агрегируемого с трактором МТЗ-1552 установлено, что затраты труда составляют 2,94 и 4,0 чел·ч/га соответственно для нового и базового вариантов. При рыхлении почвы на глубину 0,4...0,6 м получены меньшие затраты труда (на 26,5%), удельный расход топлива (на 26%) и совокупные затраты (на 24,6%) по сравнению с базовым вариантом.

2. В результате использования нового рыхлителя с дополнительными рыхлящими элементами при рыхлении почвы на землях ОП «Дубна» Московской области и бывшего совхоза «Путь Ленина» в Тверской области при контрольных посадках картофеля в 2014...2016 годах было выявлено повышение урожайности на 18...20% при рыхлении без дополнительных элементов и на 22...24% с дополнительными элементами по сравнению с контрольными посадками.

3. Применение нового рыхлителя с дополнительными рыхлящими элементами даёт общую экономию с учётом прибавки урожая – 273 тыс. р/га (в ценах на 01.09.2023)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ литературных исследований и результатов полевых опытов показывает, что выбывшие из оборота сельхозугодья с дерново - подзолистыми глеевыми почвами требуют проведения агромелиоративных мероприятий по улучшению агрофизических свойств, в том числе объёмного рыхления на глубину 0,8...1,2 м. Впервые получены обобщённые статистические характеристики микрорельефа опытных участков необрабатываемых полей Тверской и Московской областей, физико-механические характеристики грунта от поверхности до глубины 0,8 м, получена эмпирическая зависимость изменения плотности грунта по глубине.

2. Предложена математическая модель процесса рыхления грунта рабочим органом объёмного типа, позволяющая представить в аналитическом виде взаимосвязь параметров рыхлителя, физико-механические свойства грунта с сопротивлением рыхлению, а также показателями качества разрыхления (формула 5).

3. Оценка неравномерности глубины рыхления при движении машины по неровной поверхности поля с применением основ статистической динамики, показала, что вертикальные колебания рабочего органа возможны в пределах 8...12 см. По агротехническим требованиям допускается неравномерность обработки почвы не более 10 % (формулы 7, 8).

4. Получена реальная картина о кинематике почвенных частиц в потоке при объёмном сжатии грунта и движении рабочего органа, позволяющая установить взаимное положение и численные значения перемещения почвенных слоёв по направлению движения в зависимости от глубины рыхления ( $L=1,06...1,2$ ) $h$ , что соизмеримо с глубиной рыхления, обоснованы энергетические затраты на подъём и перемещение массы грунта. В результате 3-х факторного эксперимента было получено уравнение регрессии:  $F = -84,05 + 1,4\alpha + 1,9\beta + 0,48\gamma$ , которое позволило определить рациональные углы резания:  $\alpha=30^\circ...34^\circ$ ,  $\beta=15^\circ...18^\circ$ , меньшие

значения – для тяжёлых, а большие – для лёгких суглинков, а также  $\gamma = 90^\circ$  при наименьшем тяговом усилии  $F$ .

В результате двухфакторных экспериментов трёх типов рабочих органов, отличающихся формой боковых стоек получены уравнения регрессии, позволяющие оценить тяговое усилие от глубины рыхления и влажности грунта. Получены значения удельного сопротивления рыхлению для трёх типов рабочих органов при известной площади поперечного сечения (формула 19). Наименьшее значение получено для рабочего органа с параболическими стойками, конструкция которого защищена патентами РФ № № 2376736, 2407254, 2484610, 136673, 160528.

5. На основании анализа распределения фрактальной размерности почвы до и после рыхления установлено, что наиболее равномерное разрыхление почвы наблюдалось при углах резания лемеха  $\alpha=30\dots34^\circ$ ,  $\beta=15\dots18^\circ$ ;  $\gamma=90^\circ$ . Глубокое рыхление переуплотнённых глеевых почв позволяет уменьшить плотность почвы до 28,8 %, повысить пористость до 43,4%, увеличить водовместимость на 8,3...12,5%. Изменение водно-физических свойств почвы приводит к улучшению агрофизических состояния почв, что способствовало повышению урожайности картофеля до 25%. Рыхление подпахотных горизонтов способствует перераспределению водных запасов, перехвату вертикальных перетоков грунтовой воды, которые составляют для почв естественного сложения ( $q = 190 \text{ м}^3/\text{га}$ ), а для разрыхленных почв (до  $250 \text{ м}^3/\text{га}$ ). Исследование статей водного баланса при возделывании картофеля на дерново-подзолистых глеевых почвах показало, что требуется пополнение влагозапасов практически во все вегетационные периоды (от  $450$  до  $800 \text{ м}^3/\text{га}$ ), исключая влажные годы.

6. Установлено, что наименьшие энергозатраты наблюдались для средне-суглинистых дерново-подзолистых глеевых почв до влажности 15 %, для тяжёлых глинистых глееватых почв до 17 %, т. е. рыхление лучше проводить в условиях физической спелости почв. С дальнейшим увеличением влажности способность крошения почвы ухудшается за счёт слипания агрегатов. Экспериментально определён объём грунта и его масса, перемещаемый вертикально и по направлению



движения рабочего органа, получена эмпирическая зависимость объёма от глубины рыхления  $V_2=1,08h^3$ , что позволило определить составляющие силы сопротивления (формулы 16-19).

7. Результаты диссертационного исследования прошли широкую апробацию и внедрены в ООО «Научно-производственное объединение ЭКАР», а также в учебный процесс РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева при курсовом проектировании и выполнении выпускных квалификационных работ. При исследовании рабочего процесса разработанного нового рыхлителя в агрегате с трактором МТЗ-1552 установлено, что затраты труда составляют соответственно 4,0 и 2,94 чел·ч/га. При рыхлении пахотных земель на глубину 0,4...0,6 м получены меньшие затраты труда (на 26,5%), удельный расход топлива (на 26%) и совокупные затраты (на 24,6%). Применение нового рыхлителя с дополнительными рыхлящими элементами даёт общую экономию с учётом прибавки урожая 273 тыс. р/га (в ценах на 01.09.2023 года).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов, С.Ф. Расчет водного режима мелиорируемых земель / С.Ф. Аверьянов, А.И. Голованов, Ю.Н. Никольский // Гидротехника и мелиорация. - 1974. - № 3. - С. 34- 41.
2. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: Программир. введение в планирование эксперимента / Ю.П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва: Наука, 1971. – 282 с.
3. Алдошин, Н.В. Исследования прочностных характеристик почвы / Н.В. Алдошин, А.С. Васильев, В.В. Голубев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2020. – № 3(47). – С. 68-73.
4. Алдошин, Н.В. Разработка комбинированного рабочего органа для ввода залежных земель в севооборот / Н.В. Алдошин, А.С. Васильев, А.В. Кудрявцев, В.В. Голубев // Агроинженерия. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 8-12.
5. Алексанкин, А.В. Мелиорация земель в Нечерноземной зоне РСФСР / А.В. Алексанкин, Н.И. Дружинин. - М.: Колос, 1980. - с. 152, 157.162.
6. Алексеева, Ю.С., Глубокая обработка почвы и урожай / Ю.С. Алексеева, А. В Снигирева.– Л.: Лениздат, 1984. – 70 с.
7. Алпатьев, А.М. Влагооборот культурных растений / А.М. Алпатьев. -Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 130 с.
8. Арутюнян, К.Г. К динамической теории клина, работающего в почвенной среде / К.Г. Арутюнян // Докл. МИИСП, Т. III: вып. 1. – М.: МИИСП, 1966. – С. 106-111.
9. Бабков, В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов/ В.Ф. Бабков, В.М., Безрук. – М.: Высшая школа, 1976. – 285 с.
10. Баловнев, В.И. Исследование и определение технических параметров землеройно-транспортных машин методами подобия и физического

- моделирования : диссертация ... доктора технических наук: 05.00.00/  
Баловнев Владлен Иванович. – М., 1967. – 417 с.
11. Бахтин, П.У. Физико-механические и технологические свойства почв / П.У. Бахтин. – М.: Знание, 1971. – 64 с.
  12. Бондарев, А.Г. Переуплотнение пахотных почв / А.Г. Бондарев, В.А. Русанов, В.В. Медведев // Науч. совет по пробл. почвоведения и мелиорации почв, Ин-т почвоведения и фотосинтеза. – М.: Наука, 1987. – С. 205-209.
  13. Бродский, В.З. Таблицы планов экспериментов / В.З. Бродский, Л.И. Бродский. – Москва: Металлургия, 1982. – 751с.
  14. Бурченко, П.Н. Механико-технологические основы почвообрабатывающих машин нового поколения / П.Н. Бурченко. – М.: ВИМ, 2002. – 211 с.
  15. Вагин, А.Т. К вопросу взаимодействия клина с почвой/ А.Т. Вагин// Вопросы сельскохозяйственной механики. Т. 15. – Минск: Урожай, 1965. – С. 4-122.
  16. Ванеян, С.С. Режим орошения, способы и техника полива овощных и бахчевых культур в различных зонах РФ. Руководство / С.С. Ванеян, А.М. Меньших. - М.: ГНУ Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства, 2010. - 82 с.
  17. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей/ Е.С. Вентцель. – М.: Физматгиз, 1962. – 576 с.
  18. Ветохин, В.И. Обоснование формы и параметров рыхлительных рабочих органов с целью снижения энергозатрат на обработку почвы: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / Ветохин Владимир Иванович. – М., 1992. – 24 с.
  19. Ветохин, В.И. Проектирование рыхлителей почвы на основе метода отображения рациональных деформаций пласта / В.И. Ветохин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1994. – № 1. – С. 21-24.
  20. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров. – М.: Машиностроение, 1971. – 359 с.

21. Винокуров, В.Н. Влияние почвенных условий на форму профиля однородного почворежущего лезвия / В.Н Винокуров, А.К. Малов // Тракторы и сельхозмашины. – 1980. – №7 – С. 13-16.
22. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 310 с.
23. Герасимов, В.О. Водобалансовые исследования и обоснование режима орошения картофеля на дерново-подзолистых почвах водораздельных площадей Московской области : диссертация ... кандидата технических наук : 06.01.02 / Герасимов Вячеслав Олегович – М., 2019. – 162 с.
24. Горячкин, В.П. Собрание сочинений: в 3 т. / Василий Прохорович Горячкин. – Изд. 2-е. – М.: Колос, 1968. – 3 т.
25. ГОСТ Р 70525-2022. Мелиорация земель. Культуртехнические работы : общие требования : издание официальное / Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации", Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 70525-2022. - Москва : Стандартинформ, 2022. - 13 с.
26. ГОСТ 24055-88, 244057-88 "Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки". – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1991 – 15с.
27. ГОСТ 20915-75 Сельскохозяйственная техника. Методы определения условий испытаний. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1991. – 39с.
28. ГОСТ 34393-2018 Сельскохозяйственная техника. Методы экономической оценки. – М.: Стандартинформ, 2018. – 13с.
29. ГОСТ 5180-15 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. - М.: Стандартинформ, 2005. - 17 с.
30. ГОСТ 24026-80 Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1991. – 19с.

31. Голченко, М.Г. Влагообеспеченность и орошение земель в Белоруссии / М.Г. Голченко. - Минск: Ураджай, 1976. - 190 с.
32. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1971. – 368 с.
33. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов. - М.: Агропромиздат, 1985. - 351 с.
34. Дубенок, Н.Н. Повышение почвенного плодородия склоновых земель сельскохозяйственного назначения Нечернозёмной зоны Российской Федерации / Н.Н. Дубенок, М.В. Климахина, Е.В. Мацыганова // Овощи России. – 2021. – № 4. – С. 124-129.
35. Дубенок, Н.Н. Агротехническая операция культивации в сочетании с щелеванием / Н.Н. Дубенок, А.В. Майер // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 2(62). – С. 306-313.
36. Дубенок, Н.Н. Разработка и обоснование конструкции мелиоративного глубокорыхлителя-удобрителя / Н.Н. Дубенок, С.Я. Семенов, В.Г. Абезин, А.С. Семенов // Российская сельскохозяйственная наука. – 2018. – № 3. – С. 53-57.
37. Ерхов, Н.С. Методика экспериментальных исследований безнапорного впитывания воды при поливе дождеванием / Н.С. Ерхов // Труды ВНИИГиМ. - 1972. - Том 51. - С. 79-90.
38. Завалин, А.А., Влияние водного режима и минеральных удобрений на водно-физические свойства почвы / А.А. Завалин, В.В. Пчелкин // Проблемы экологии и безопасности жизнедеятельности в 21 веке. Материалы научн. практ. конф. - МАЭБП. - Вып.3. - 2002. - С. 81-82.
39. Зайдельман, Ф.Р. Мелиорация заболоченных почв Нечерноземной зоны РСФСР: Справ. кн. / Ф.Р. Зайдельман. – М.: Колос, 1981. – 168 с.
40. Зайдельман, Ф.Р. Особенности режима и мелиорации заболоченных почв / Ф. Р. Зайдельман. – М.: Колос, 1969. – 223 с.

41. Зеленин, А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А.Н. Зеленин. – М.: Машиностроение, 1968. – 375 с.
42. Зеленин, А.Н. Машины для земляных работ / А.Н. Зеленин, В.И. Баловнев, И.П. Керов. – М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.
43. Зиновская, Т.С. Оптимизация водного режима почвы при возделывании картофеля на осушаемых землях / Т.С. Зиновская, Н.Г. Ковалев, В.И. Зиновский // Мелиорация и водное хозяйство. -2016. - №1. - С. 40-44.
44. Казаков, В.С. Глубокое рыхление тяжелых почв В кн.: «Осушение тяжелых почв» / В.С. Казаков. – М.: Колос, 1981. – 238 с.
45. Казаков, В.С. Технологические основы бестраншейного строительства закрытых осушительных систем и рыхления почвогрунтов при мелиорации земель: диссертация ... доктора технических наук: 06.01.02 / Казаков В.С. – Москва, 1983. – 497 с.
46. Карпенко, А.Н. Сельскохозяйственные машины / А.Н. Карпенко, В.М. Халанский. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1983. – 495 с.
47. Каталог, специальной мелиоративной техники: каталог / Госконцерн Водстрой, Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова. – Москва, 1991. – 216 с.
48. Кацыгин, В.В. Общие закономерности сопротивления почвогрунтов деформации / В.В. Кацыгин // В сборнике: Вопросы сельскохозяйственной механики. т. XIII. – Минск: Урожай. – 1984. – С. 31-44.
49. Качинский, Н.А. Структура почвы: итоги и перспективы изучения вопроса / Н. А. Качинский. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1963. – 100 с.
50. Кизяев, Б.М. Культуртехнические мелиорации: технологии и машины / Б.М. Кизяев, З.М. Маммаев. – М.: «Ассоциация ЭкоСт», 2003. – 399с.
51. Кизяев, Б.М. Агромелиоративные мероприятия на переувлажненных минеральных почвах / Б.М. Кизяев. – М.: ВНИИА, 2013. – 140 с.
52. Кизяев, Б.М. Развитие гидромелиорации для обеспечения воспроизводства почвенного плодородия в современных условиях / Б.М. Кизяев, С.Д. Исаева // Плодородие. – 2018. – № 1(100). – С. 27-31.

53. Кирейчева, Л.В. Оценка целесообразности введения в оборот неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения на примере Московской области проведение оценки целесообразности / Л.В. Кирейчева, Н.А. Васильева // International Agricultural Journal. – 2022. – Т. 65, № 6.
54. Кирейчева, Л.В. Эколого-экономическое обоснование введения в сельскохозяйственный оборот длительно неиспользуемых земель / Л.В. Кирейчева, В.А. Шевченко, И.Ф. Юрченко // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2021. – № 3. – С. 8-12.
55. Кирейчева, Л.В. Состояние пахотных земель Нечерноземной зоны Российской Федерации и основные направления повышения плодородия почв / Л.В. Кирейчева, В.А. Шевченко // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2020. – № 2. – С. 12-16.
56. Клочков, А.В. Современная сельскохозяйственная техника для растениеводства / А.В. Клочков, В.А. Попов. – Горки: Белорус. гос. с.-х. ак., 2009. – 172 с.
57. Кобяков, И.Д. Исследование процесса резания почвы /И.Д. Кобяков// Достижения науки и техники. – 2007. – №9. – С. 30-32.
58. Колганов, А.В. Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России / А.В. Колганов, Н.В. Сухой, В.Н. Шкура, В.Н. Щедрин; под общ. ред. В. Н. Щедрина. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. – 222 с.
59. Коломийцев, Н.В. Опыт создания базы данных "Технологии восстановления плодородия почв и рекультивации деградированных агроландшафтов" / Н.В. Коломийцев, А.В. Матвеев, Б.И. Корженевский // Мелиорация и водное хозяйство. – 2018. – № 6. – С. 6-8.
60. Короткевич, А.В. Зональная техника для интенсивных технологий / А.В. Короткевич // Сельское хозяйство Белоруссии. – 1987. – №5. – С. 18-19.
61. Кострицын, А.К. Теоретические и экспериментальные исследования процесса резания грунтов ножами: диссертация ... кандидата технических наук: 05.00.00 / А.К. Кострицын. – Москва, 1952. – 278 с.

62. Костяков, А.Н. Основы мелиорации / А.Н. Костяков // Сельхозгиз. -1960. - С. 54-66.
63. Кочетов, И.С. Энергосберегающая обработка почвы в Нечерноземье / И. С. Кочетов. – М.: Росагропромиздат, 1990. – 160 с.
64. Кузнецова, И.В., Виноградова, Г.Б. Влияние плотности иллювиального горизонта дерново-подзолистых почв на доступность воды растениям / И.В. Кузнецова, Г.Б. Виноградова // Почвоведение. – 1984. – №2. – С. 55-61.
65. Кушнарёв, А.С. Механико-технологические основы обработки почвы / А.С. Кушнарёв, В.И. Кочев. – Киев: Урожай, 1989. – 140 с.
66. Кушнарёв, А.С. Механико-технологические основы процесса воздействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий на почву: авто-реф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01/ Кушнарёв Артур Сергеевич. – Челябинск, 1981. – 50 с.
67. Ксенович, И.П. и др. Ходовая система почва - урожай. / И.П. Ксенович. – М.: Агропромиздат, 1985. – 129 с.
68. Крылов, С.С. Фракталы в геофизике: Учеб. Пособие / С.С. Крылов, Н.Ю. Бобров. – СПб: Издательство С.-Петербургского университета, 2004. – 138 с.
69. Лисин, В.С. Рыхлители для грунтов тяжелого механического состава / В.С. Лисин, Г.В. Жилин, С.М. Балашов // Гидротехника и мелиорация. – 1987. – №3. – С. 58-62.
70. Листопад, Г.Е. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Г.Е. Листопад, А.Н. Семёнов и др. – М.: Колос, 1976. – 752 с.
71. Лобачевский, Я.П. Современное состояние и тенденции развития почвообрабатывающих машин / Я.П. Лобачевский, Л.М. Колчина. – М.: Росинформагротех, 2005. – 116 с.
72. Луканин, Ю.В. Деформация почвы при ее обработке: дисс... канд. техн. наук. - 05.20.01 / Луканин Ю.В. – Волгоград, 1983. – 194 с.
73. Лурье, А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов/ А. Б. Лурье. – Л.: Колос, 1970. – 375 с.



74. Мазитов, Н.К. Ресурсосберегающие почвообрабатывающие машины / Н. К. Мазитов. – Казань: Полиграфическо-издат. Комбинат, 2003. – 456 с.
75. Макаров, И.П. Последствия переуплотнения пахотных почв / И.П. Макаров, А.С. Кушнарёв // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1989. – №8. – С. 50-55.
76. Макаров, И.П. Основные итоги и задачи исследований по обработке почвы / И. П. Макаров, А.В. Захаренко // Достижения науки и техники АПК. – 2004. – № 5. – С. 2-7.
77. Макаров, А.А. Оценка состояния поверхности и плотности грунта необрабатываемого поля / Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров // Природообустройство. – 2009. – № 4. – С. 89-95.
78. Макаров, А.А. Совершенствование конструкции объемного мелиоративного разуплотнителя почв / А.А. Макаров, Н.А. Палкин // Природообустройство. – 2010. – № 3. – С. 108-111.
79. Макаров, А.А. Физические основы рыхления грунта и расчет тягового усилия объемного рыхлителя / А.А. Макаров, Ю.П. Леонтьев // Природообустройство. – 2011. – № 5. – С. 87-92.
80. Макаров, А.А. Влияние параметров мелиоративного рыхлителя на рабочий процесс / А.А. Макаров, Ю.П. Леонтьев, // Природообустройство. – 2013. – № 2. – С. 97-101.
81. Макаров, А.А. Экспериментальные исследования моделей рабочих органов глубокорыхлителей с различной конструкцией боковых стоек / Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров // Природообустройство. – 2013. – № 3. – С. 81-85.
82. Макаров, А.А. Оценка сопротивления рыхлению и однородности фракций грунта для рыхлителя с дополнительным оборудованием / Ю. П. Леонтьев, А.А. Макаров // Природообустройство. – 2016. – № 2. – С. 82-86.
83. Макаров, А.А. Экспериментальные исследования рабочего органа мелиоративного рыхлителя на минеральных грунтах естественного сложения / А.А. Макаров, Ю. П. Леонтьев // Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы использования

- мелиорированных земель и повышения их плодородия». – Тверь: ГНУ ВНИИМЗ РОССЕЛЬХОЗАКАДЕМИИ, 2013. –С. 246-252.
84. Макаров, А.А. Определение удельного сопротивления рыхлению грунта объёмным рыхлителем / А.А. Макаров, Ю.П. Леонтьев //Материалы международной научной конференции. Том II. – М.: Изд. ВНИИА. – 2016. – С 26-29.
85. Макаров, А.А. Исследования объёмного рыхлителя с целью определения величины отдельных составляющих сопротивления рыхлению. Логистика, транспорт, экология / А.А. Макаров, Ю.П. Леонтьев// Материалы международной научно-практической конференции. – Ереван, 2016. – С. 153-162.
86. Макаров, А.А. Оценка неравномерности глубины рыхления мелиорируемых земель рабочим органом мелиоративного рыхлителя / А.А. Макаров, В.И Балабанов, Ю.П. Леонтьев // Агроинженерия: науч. журн. – 2021. – № 6. – С. 20-25.
- 87.Макарычева, Е.А. К обоснованию водопотребление сельскохозяйственных культур / Е.А. Макарычева // Мелиорация и водное хозяйство.- 2003. - № 1. - С. 24-26.
88. Максименко, В.П. Комплексная мелиорация уплотненных почв на орошаемых землях : диссертация ... доктора сельскохозяйственных наук : 06.01.02 / Максименко Владимир Пантелеевич – М., 2011. – 372 с.
89. Максименко, В.П. Глубокое рыхление как способ повышения эффективности ресурсосберегающего земледелия / В.П. Максименко, Т.Л. Волчкова, С.А. Меньшикова // Мелиорация и водное хозяйство. – 2018. – № 3. – С. 38-42.
90. Максименко, В.П. Направленное формирование плодородия почв в Нечерноземном регионе с учетом потенциальных возможностей возделываемых сельскохозяйственных культур / В.П. Максименко, Т.Л. Волчкова, С.А. Меньшикова // Мелиорация и водное хозяйство. – 2019. – № 5. – С. 48-52.

91. Максимов, И.И. Практикум по сельскохозяйственным машинам и орудиям / И.И. Максимов. – Чебоксары. Чуваш. гос. с.-х. ак., 2011. – 365 с.
92. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М.: Ин-т компьютерных исслед., 2002. – 856 с.
93. Марков, Е.С. Мелиорация пойм Нечерноземной зоны / Е.С. Марков. -М.: Колос, 1973. - с. 7, 45.48.
94. Маслов, Б.С. Исследования по увлажнению сельскохозяйственных культур на осушаемых землях в центральной Нечерноземной зоне / Б.С. Маслов // Увлажнение осушаемых земель. Тр. ВАСХНИЛ. - 1974. - С. 48-62.
95. Матвеев, А.В. Разработка информационно-аналитической веб-системы для восстановления плодородия почв и рекультивации деградированных агроландшафтов / А.В. Матвеев, Б.И. Корженевский // Мелиорация и водное хозяйство. – 2020. – № 1. – С. 5-9.
96. Мацепуро, М.Е. Вопросы земледельческой (сельскохозяйственной) механики / М.Е Мацепуро и др. – Минск. – 1967. – 328 с.
97. Мелиорация земель. Учебник / А.И. Голованов, И.П. Айдаров, М.С. Григоров, В.В. Пчелкин и др.; Под ред. А.И. Голованова. - М.: Колосс, 2011. -824 с.
98. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рощин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.
99. Методика определения экономической эффективности технологической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. – М.: Минсельхоз-прод РФ, 1997. – 217с.
100. Методика экономической оценки технологий и машин в сельском хозяйстве / Под ред. И.В. Дрогайцева, Н.М. Морозова. – М.: ВНИИЭСХ, 2010. – 148 с.
101. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов мелиорации сельскохозяйственных земель : РД-АПК 300.01.003-03 / Федеральное государственное унитарное предприятие

Специализированный научный центр «Госэкомелиовод» Минсельхоза России. – 2003. – 130 с.

102. Методические указания о порядке разработки, согласования и утверждения исходных требований на сельскохозяйственную технику. – М.: ВИМ, 1988. – 160 с.
103. Милюткин, В.А. Влияние параметров и скорости движения рабочего органа на процесс разрушения почвенного пласта / В.А. Милюткин // Труды ВИМ. – 1978. – т.82. – С. – 76-92.
104. Нианг Алиун. Особенности режима орошения картофеля на осушаемых минеральных почвах поймы реки Дубны: дис. ... канд. тех. наук: 06.01.02 / Нианг Алиун. - М.: МГУП, 1996. - 191 с.
105. Никитин, И.С. Режим орошения основных сельскохозяйственных культур в Нечерноземной зоне РСФСР / И.С. Никитин, Е.П. Панов, А.П. Соломина // Сборник науч. ст. - М.: ВНИИГиМ. - 1987. - С. 13 - 18.
106. Николаев, В.А. Влияние пор, камней и органических частиц на распространение напряжений в зоне сжатия почвы при резании / В.А. Николаев, М.М. Юрков // Техника в сельском хозяйстве. – 2009. – № 6. – С.23 – 27.
107. Никифоров, М.В. Определение критерия качества предпосевной обработки почвы при использовании различных почвообрабатывающих машин / М.В. Никифоров, В.В. Голубев // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2018. – № 6(88). – С. 11-16.
108. Новиков, Ю.Ф. Некоторые вопросы теории деформирования и разрушения пласта под воздействием двугранного клина / Ю.Ф. Новиков // Труды ЧИМЭСХ. – 1969. – вып. 46. – С. 20-34.
109. Новиков, Ю.Ф. О деформациях почвы под воздействием на нее клина / Ю.Ф. Новиков, А.И. Чебан // Сб. Исследование рабочих процессов с.-х. машин. – 1965. – С.15-25.

110. Орнатский, Н.В. Механика грунтов / Н.В. Орнатский. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1962. – 447 с.
111. ОСТ 10.4.1-2001. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и орудия для глубокой обработки почвы. Методы оценки функциональных показателей. – М.: Минсельхоз России, 2001. – 34 с.
112. ОСТ 10.2.18 – 2001. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы экономической оценки. – М.: Минсельхоз России, 2001. – 26 с.
113. ОСТ 10.2.2-2002 Испытания сельскохозяйственной техники. Методы энергетической оценки: ОСТ 10.2.2 – 2002. – Введ. 03.03.02. – МСХРФ. – М.: 2002. – 24 с.
114. Осушение тяжелых почв /Под ред. Б.С. Маслова. – Отделение гидротехники и мелиорации. – М.: Колос, 1981. – 238 с.
115. Панов, В.К. Мелиорация и интенсификация сельского хозяйства нечерноземной зоны РСФСР / В.К. Панов. – Л.: Лениздат, 1976. – 222 с.
116. Панов, И.М., Сучков, И.В., Ветохин, В.И. Вопросы теории взаимодействия рабочих органов глубокорыхлителей с почвой / И.М. Панов, И.В Сучков, В.И. Ветохин // Сб. научн. трудов ВИСХОМ. – 1988. – С. 43-61.
117. Панов, А.И. Нетрадиционные способы обработки почвы / А.И. Панов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1998. – №12. – С. 12-15.
118. Панов, И.М. Физические основы механики почв / И.М. Панов, В.И. Ветохин. – Киев: Феникс, 2008. – 266 с.
119. Патент № 2040869 Российская Федерация, МПК А01В 35/16. Рабочий орган для рыхления почвы: № 93010129/15: заявл. 26.02.1993: опубл. 09.08.1995 / А. М. Салдаев, заявитель Салдаев Александр Макарович.
120. Патент № 2484610 С1 Российская Федерация, МПК А01В 15/00, А01В 13/10. Объемный мелиоративный рыхлитель: № 2011152071/13 : заявл. 21.12.2011: опубл. 20.06.2013 / А. А. Макаров, Ю. П. Леонтьев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет природообустройства".

121. Патент на полезную модель № 136673 U1 Российская Федерация, МПК А01В 13/10. Объемный мелиоративный рыхлитель с дополнительным оборудованием : № 2013119859/13 : заявл. 23.08.2013 : опубл. 20.01.2014 / Ю.Г. Ревин, Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет природообустройства".
122. Патент на полезную модель № 160528 U1 Российская Федерация, МПК А01В 13/00. Мелиоративный рыхлитель для глубокой обработки почвы: № 2015149733/13 : заявл. 20.11.2015: опубл. 20.03.2016 / Ю. П. Леонтьев, А. А. Макаров, А. И. Новиченко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева" (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева).
123. Патент № 2376736 С1 Российская Федерация, МПК А01В 13/14. Орудие для глубокой обработки почвы : № 2008126185/12 : заявл. 30.06.2008 : опубл. 27.12.2009 / А. А. Макаров, Н. А. Палкин ; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет природообустройства".
124. Патент № 2407254 С1 Российская Федерация, МПК А01В 13/14. Рабочий орган почвообрабатывающего орудия : № 2009124288/21 : заявл. 26.06.2009: опубл. 27.12.2010 / Н. А. Палкин, А. А. Макаров ; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет природообустройства".
125. Патент № 2177680, Российская Федерация, МПК А01В 13/08, Орудие для глубокой обработки почвы; № 200011543/13 заявл. 15.06.2000: опубл. 10.01.2002 / Казаков В.С. [RU], Норкин Т.И. [RU], Бекишев Б.Т. [RU],

заявитель, "Московский государственный университет природообустройства".

126. Патент № 2150183, Российская Федерация, МПК А01В 13/08, А01В 13/16, Глубокорыхлитель; 99109066/13 заявл. 30.04.1999; опубл 10.06.2000/ Казаков В.С. [RU], Ревин Ю.Г. [RU], Теловов Н.К. [RU], заявитель "Московский государственный университет природообустройства".
127. Патент № 1142907, Российская Федерация, МПК А01В 13/08, А01В 13/16. Рабочий орган рыхлителя почвы; № 114854678/24 заявл. 30.11.1991; опубл 07.04.1992/ Казаков В.С. [RU], Умирзаков С.И. [RU], Лобунец Н.Е. [RU], Карловский В.Ф. [RU], Ворогушин Г.В. [RU], заявитель «Всесоюзный Научно-Исследовательский Институт Гидротехники и Мелиорации им. А.Н.Костякова».
128. Патент № 704488, Российская Федерация, МПК А01В 13/16, Рыхлитель почвы, 2628970 заявл. 16.06.1978; опубл 25.12.1979/ Казаков В.С. [RU], Дзюбенко Б.В. [RU], Дядченко Н.Е. [RU], Лисицын Е.С. [RU], Иванов А.И. [RU], Гумбург Г.В., Соколов Ю.А.; заявитель «Всесоюзный Научно-Исследовательский Институт Гидротехники и Мелиорации им. А.Н.Костякова».
129. Патент № 810102, Российская Федерация, МПК А01В 13/16, Рабочий орган для обработки почвы, 2929697, заявл. 07.03.1981; опубл 17.11.1981/ Казаков В.С. [RU]; заявитель «Всесоюзный Научно-Исследовательский Институт Гидротехники и Мелиорации им. А.Н.Костякова».
130. Патент № 94035313, Российская Федерация, МПК А01В 13/16, Рыхлитель почвы, заявл. 23.09.1994; опубл 27.09.1996 / Казаков В.С. [RU], Каиш Ференц [HU], Сабо Дердь [HU]; заявитель Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина.
131. Писарев, Б.А. Влияние плотности почвы на урожай картофеля. / Б.А. Писарев // Доклады ВАСХНИЛ. – 1965. – №4. – С. 13-16.
132. Плющев, Г.В. Исследование процесса глубокого рыхления почвы и выбор оптимальных параметров рабочего органа пропашного культиватора-

- рыхлителя для южной орошаемой зоны земледелия: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Плющев Г.В. – Алма-Ата, 1973. – 136 с.
133. Подскребко, М.Д. Выбор оптимальных углов постановки лемеха для вспашки связных почв / М.Д. Подскребко // Тракторы и сельхозмашины. – 1965. – № 9. – С 54-61.
134. Подскребко, М.Д. Влияние скорости деформации на сопротивление почвы растяжению / М.Д. Подскребко. – Тр. ЧИМЭСХ.– 1970. – вып. 56. – С. 24-38.
135. Погорелов, М.В. Агротехнические и технико-эксплуатационные параметры комбинированных агрегатов на возделывании зерновых / М.В. Погорелов // Рациональное применение технологий совмещенных операций и комбинированных машин в земледелии. Сб. науч. докл. – М.: ВИМ. – Т. 88. – 1980. – С.21 -27.
136. Пупонин, А.И. Обработка почвы в интенсивном земледелии Нечернозёмной зоны / А.И. Пупонин // Колос. – 1984. – С. 70-76.
137. Пупонин, А.И. и др. Деформация дерново-подзолистой почвы ходовыми системами тракторов и урожай / А.И. Пупонин // Земледелие. – 1981. – №6. – С. 22-24.
138. Пчелкин, В.В. Водопотребление картофеля на дерново-подзолистых почвах водоразделов Московской области / В.В. Пчелкин, В.О. Герасимов // Природообустройство. - 2015. - №4 - С. 15.18.
139. Пчелкин, В.В. Водный режим картофеля на дерново-подзолистых почвах водоразделов Московской области / В.В. Пчелкин, В.О. Герасимов // Мелиорация и водное хозяйство. - 2015. - №4. - С. 27.31.
140. Пчелкин, В.В. Связь испарения с водной поверхности с водопотреблением картофеля в условиях НЧЗ / В.В. Пчелкин, В.О. Герасимов // Научная жизнь. - 2016. - №3. - С. 35.41.
141. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – Наука, 1988. – 712 с.
142. РД 10.1.10-2000. Требования к техническим средствам производства, обеспечивающим соблюдение технологий возделывания и уборки



- сельскохозяйственной продукции / Введ. 15.03 2001. – М.: Минсельхоз России, 2001. – 43 с.
143. Ревин, Ю.Г. Основы совершенствования землеройно-мелиоративных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01 / Ревин Юрий Григорьевич – М., 2011. – 256с.
144. Ревут, И.Б. Плотность почвы и ее плодородие / И.Б Ревут и др. // Сб. трудов по агроном. физике. — М.: АФИ. – 1962. – вып. 10. – С. 154-165.
145. Ревякин, Е.Л. Технологические требования к новым техническим средствам в растениеводстве /Е.Л. Ревякин. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 60 с.
146. Рекомендации по оросительным нормам в Нечерноземной зоне РСФСР / М-во мелиорации и водного хозяйства РСФСР. - Л.: Гидрометеиздат, 1984. - с. 1.10.
147. Роде, А.А. Основы учения о почвенной влаге / А.А. Роде. -М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2008. - 664 с.
148. Рынкевич, В.С. Исследование характера деформации грунта при глубоком резании ножом в вертикальной плоскости / В.С. Рынкевич // Механизация и электрификация сельского хозяйства: сб. научных трудов. – Минск. – 1976. – С. 55-61.
149. Савиных, П.А. Разработка почвообрабатывающего агрегата и оценка эффективности его использования. / П.А. Савиных, С.Л. Дёмшин, Д.А. Черемисинов// Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Тр. 9-й Международ. науч.-техн. конф. Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике. – М.: ГНУ ВИЭСХ. – Ч.2. – 2012. – С. 10-15.
150. Сальников, В.К. Пути повышения мощности корнеобитаемой зоны / В.К. Сальников // Сельское хозяйство за рубежом. Растениеводство. – 1977. – №5. – С. 8-11.
151. Саранин, К.И. Методика полевых исследований свойств почвы при глубоком рыхлении / К.И. Саранин, В.Н. Шептухов // Вестник сельхознауки. – 1985. – №4. – С. 42-50.

152. Сборник агротехнических требований на сельскохозяйственные машины // Агротехнические требования на рыхлитель трехстоечный. т. 24, М.: ЦНИИТЭИ. – 1978. – С. 238-240.
153. Свечников, П.Г. Модернизация почвообрабатывающих рабочих органов на основе исследования процесса их взаимодействия с почвой: автор. дис. ... д-ра техн.наук: 05.20.01 / Свечников П. Г. – Челябинск, 2013. – 44 с.
154. Сельскохозяйственная техника ведущих зарубежных фирм / Каталог. – М.: ФГНУ «Росинформагротех». – 2008. – 60 с.
155. Сельскохозяйственные гидротехнические мелиорации / Под редакцией Е.С. Маркова. - М.: Колос, 1982. - с. 20.21, 27, 33.34, 230.234.
156. Семендяев, К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов/ К.А. Семендяев, И.Н. Бронштейн. – М.: Наука. – 1965. – 608 с.
157. Синеоков, Г.И. Деформации, возникающие в почве под воздействием клина/ Г.И. Синеоков // В сб. научн. трудов ВИСХОМ. – Машгиз. – 1962. – Вып. 33. – С. 3-27.
158. Синеоков, Г.Н. Проектирование почвообрабатывающих машин / Г.Н. Синеоков. – М.: Машиностроение, 1965. – 311 с.
159. Синеоков, Г.И. Теории и расчет почвообрабатывающих машин/ Г.И. Синеоков, И.М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
160. Сирота, С.М. Режимы орошения овощных культур в лесостепной зоне Приобья Алтайского края/ С.М. Сирота, М.А. Беляков // Мелиорация и водное хозяйство. - 2002. - № 4 - С. 27-28.
161. Соколовский, В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М.: Гостехтеоретиздат, 1954. – 315 с.
162. Сравнительные испытания сельскохозяйственной техники: научное издание / Под общ. ред. В.М. Пронина. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2013. – 416 с.
163. СТО АИСТ 4.6-2018. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины почвообрабатывающие. Показатели назначения и надёжности. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2018. – 28 с.

164. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России на период до 2020 года / Ю. Ф. Лачуга и др. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 80 с.
165. Струнников, Э.А. Обеспеченность влагой сельскохозяйственных культур на северо-западе СССР / Э.А. Струнников. - Л.: Гидрометеиздат, 1986. -с. 3.42, 70.77.
166. Технологии и технические средства повышения продуктивности сельскохозяйственных земель комплексными мелиорациями :  
/ Л. В. Кирейчева, И. Ф. Юрченко, Н. П. Карпенко [и др.]. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2022. – 218 с.
167. Тищенко, А.П. Применение метода нормированного размаха Херста в некоторых вопросах экологии. Труды международной конференции «Математические модели нелинейных возмущении, переноса, динамики, управления в конденсированных системах и других средах» /А.П. Тищенко, И.В. Цветков. – ТГТУ. Тверь, 1998 – с. 134.
168. Тома, Д. Методы и машины для глубокого рыхления почвы / Д. Тома // Доклад № 95. Европейская экономическая комиссия ООН.– Нью-Йорк. – 1978. – Т. 82.
169. Токушев, Ж.Е. Теория и расчет орудий для глубокого рыхления почв/ Ж.Е. Токушев. – М.: Инфра-М.,2003. – 300 с.
170. Токушев, Ж.Е. Аналитическое определение давления на почву клино-видного рабочего органа / Ж.Е. Токушев // Тракторы и сельхозмашины. – 2003. – №4. – С. 34 - 36.
171. Труфанов, В.В. Глубокое чизелевание почвы / В.В. Труфанов. – М.: Агропромиздат,1989. – 139 с.
172. Турецкий, Р.А. Глубокое рыхление и щелевание эродированных, уплотненных и временно переувлажненных почв / Р.А. Турецкий и др. – Минск. – 1988. – 18 с.

173. Указания по эксплуатации мелиоративного рыхлителя РГ-0,8А в Нечерноземной зоне РСФСР. – М.: Главнечерноземводстрой, ВНИИГиМ. – 1980. – 34 с.
174. Урозов, В.И. Физические основы глубокого резания грунтов /В.И. Урозов: под общ. ред. С.С. Овчинникова.– Минск: Наука и техника, 1972. – 230 с.
175. Ференц, К. Разработка технологии и технических средств для разуплотнения черноземных почв в Венгерской Республике. автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01/ Каифаш Ференц. – М., 1998. – 32 с.
176. Федоренко, В.Ф. Технологии, техника и оборудование для координатного (точного) земледелия. Учебник для высших учебных заведений; [под общей редакцией В.И. Балабанова и В.Ф. Федоренко]; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации / В.Ф. Федоренко, В.И. Балабанов и др. – М.: Росинформагротех, 2016. – 238 с.
177. Филин, А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела [Т. 1: Соппротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики] / А.П. Филин – М.: Наука, 1975. – 832 с.
178. Фирсов, М.М. Планирование эксперимента при создании сельскохозяйственной техники / М.М. Фирсов. – М.: Издательство МСХА, 1999 – 127с.
179. Халанский, В.М. Механизация растениеводства. Учебник. / В.М. Халанский, В.И. Балабанов, Е.В. Березовский и др. – М.: Из-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2014 – 517 с.
180. Хайлис, Г.А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г.А. Хайлис, М.М. Ковалев. – М.: Колос, 1994. – 169 с.
181. Харченко, С.И. Управление водным режимом на мелиорируемых землях в Нечерноземной зоне / С.И. Харченко. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - с. 206-208.
182. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1973. – 975 с.
183. Цветков, И.В. Исследование фрактальных характеристик обработанного грунта / И.В. Цветков и др.// Логистика, транспорт, экология – 2017.

- Материалы международной научно-практической конференции. Ереван, 2017. – С. 106-115.
184. Цветков, И.В. Оценка эффективности рыхления грунта методом фрактального анализа / И.В. Цветков, и др. // Материалы международной научной конференции. – М.: Изд. ВНИИА, 2017. – С. 379-384.
185. Цветков, И.В. Моделирование режимов работы объёмного рыхлителя методом фрактального анализа. – Доклады ТСХА: Сборник статей. Вып. 290 Часть II/ И.В. Цветков, и др. // М. Изд.-во РГАУ МСХА, 2018. – С. 154-156.
186. Цветков, И В. Применение метода нормированного размаха Херста в некоторых вопросах экологии. Труды международной конференции «Математические модели нелинейных возбудении, переноса, динамики, управления в конденсированных системах и других средах». / ИВ. Цветков, А.П. Тищенко А.П. – (ТГТУ. Тверь, 1998) – С. 134-136.
187. Циприс, Д.Б. Орошение в Нечерноземной зоне / Д.Б. Циприс. - М.: Колос, 1973. - с. 192.
188. Черепанов, Г.Г. Чудиновских, В.М. Уплотнение пахотных почв и пути его устранения / Г.Г. Черепанов, В.М. Чудиновских.– М.: ВНИИТЭИагропром, 1987. – 58 с.
189. Черненко, В.Я. Глубокое рыхление осушаемых тяжелых почв/ В.Я Черненко. – М.: Колос, 1983. – 63 с.
190. Чернёнок, В.Я. и др. Эффективность глубокого рыхления осушаемых почв в Нечерноземной зоне РСФСР / В.Я. Чернёнок. Тез. докл. Семинара. – Минск, 1978. – С 74 -86.
191. Шевченко, В.А. Вовлечение в оборот неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения / В.А. Шевченко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2021. – № 4. – С. 12-16.
192. Шевченко, В.А. Стратегии возобновления использования ранее выведенных из оборота мелиорированных земель / В.А. Шевченко, М.Н. Лытов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 4(64). – С. 283-296.

193. Шелудченко, Б.А. Обоснование рабочего процесса и параметров глубокорыхлящих рабочих органов объемного типа. автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01/ Шелудченко Б.А. – Глеваха, 1990. – 19 с.
194. Шептухов, В.Н. Влияние уплотняющего действия сельскохозяйственных машин на изменение физико-механических свойств и плодородие почвы. дис. ... канд. техн. наук: / Шептухов, В.Н. – М., 1980. – 20 с.
195. Эколого-гидрологические основы глубокого мелиоративного рыхления почв / Ф.Р. Зайдельман, В.А. Замыцкий, М.Е. Гинзбург и др.: Под ред. Ф.Р. Зайдельмана. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 196 с.
196. Andreev, V.L. Justification of constructive technological scheme of multifunctional unit / V.L. Andreev, S.A. Vasilyev, S.L. Demshin, V.V. Plichev, D.A. Cheremisinov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2019. – Vol. 560. – № 1. – Pp. 59 – 62.
197. Adriaan, V. How tine characteristics of subsoilers affect fuel consumption, penetration resistance and potato yield of a sandy loam soil / V Adriaan, C Simon, D'Hose Tommy, C. Wim // Soil and Tillage Research. – 2023. – Vol. 228. – Pp. 56 – 63.
198. Bartholomew, P.W. A comparison of methods of establishing perennial and Italian ryegrasses / P.W. Bartholomew, et al. // Grass and Forage Sc. – 1981. – Vol. 36. – Pp. 75-80.
199. Bădescu, M. Construction evolution of deep soil loosening equipment in romania in the country specific soil conditions / M Bădescu et al//Annals of the University of Craiova - Agriculture, Montanology, Cadastre. – 2014. –Vol. 44. – Pp. 25—31.
200. Douketis, C., Wang, Z., Haslett, T. L., Moskovits, M.: Fractal character of cold-deposited silver films determined by low-temperature scanning tunneling microscopy / C Douketis, Z Wang, T. L. Haslett, M. Moskovits // Physical Review B. Volume 51. Number 16. 15 April. 1995. – Pp. 106 – 113.
201. Heck, J.T. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland / J. T. Heck // Freeman. N.Y. – 1971. – 227 p.

202. Lukyanchuk, O.L. Energy intensity of structural grinding of the soil by deep loosening / O.L. Lukyanchuk, // Handbook of Research on Improving the Natural and Ecological Conditions of the Polesie Zone. – 2023. – Pp.15—21.
203. Lukyanchuk, O., Turcheniuk, V., Koptyuk R. Improvement deep loosening as an effective adaptive agromeliorative practice/ O Lukyanchuk, V Turcheniuk, R. Koptyuk // Handbook of Research on Improving the Natural and Ecological Conditions of the Polesie Zone. – 2023. – Pp.15—21.
204. Martinova, N. Machine for carrying works on deep loosening of soil with the simultaneous application of liquid organic fertilizers / N. Martinova et al // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science [this link is disabled](#). – 2020. – Vol. 614. – Pp.121—135.
205. Matache, M.G. Structural analysis of deep soil loosening machine MAS-65/ M.G. Matache et al // 8th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development (TE-RE-RD 2019). – 2019. – Vol. 112. – Pp.8—12.
206. Richardson, L. The problem of ContiguityZ / L. Richardson // General Systems Yearbook. – 1961. – N 6. – Pp. 139 – 187.
207. Soane, G.C., Godwin R.J., Spoor G. Influence of deep loosening techniques and subsequent wheel traffic on soil structure / G.C. Soane, R.J. Godwin, G. Spoor // Soil and Tillage Research. –1986. – N 9. – Pp. 231–237.
208. Turcotte, D.L. Fractals and chaos in geology and geophysics / D.L. Turcotte// Cambridge: Cambridge University Press. – 1997. – Pp. 132 – 182.
209. Xuezhen, W. Methods for reducing the tillage force of subsoiling tools: A review / W. Xuezhen et al // Soil and Tillage Research. – 2023. –Vol. 229. – Pp. 167—187.
210. Zakharov, A. M. Effect of deep loosening of inter-rows on physical properties of sod-podzolic soil and yield of organic potato / A.M. Zakharov et al // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series. – 2022. – vol. 60. – N 4. – Pp. 372–379.

211. Zahn, W., Zösch, A.: The dependance of fractal dimension on measuring conditions of scanning probe microscopy / W. Zahn, A. Zösch // Fresenius J Analen Chem 365. – 1999. – N9. – Pp. 168 – 172.
212. Zahn, W., Zösch, A. Characterization of thin film surfaces by fractal geometry / W. Zahn, A. Zösch, // Fresenius J Analen Chem 358. – 1997. – N5. – Pp. 119 – 121.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное)

### Результаты лабораторных опытов первого этапа

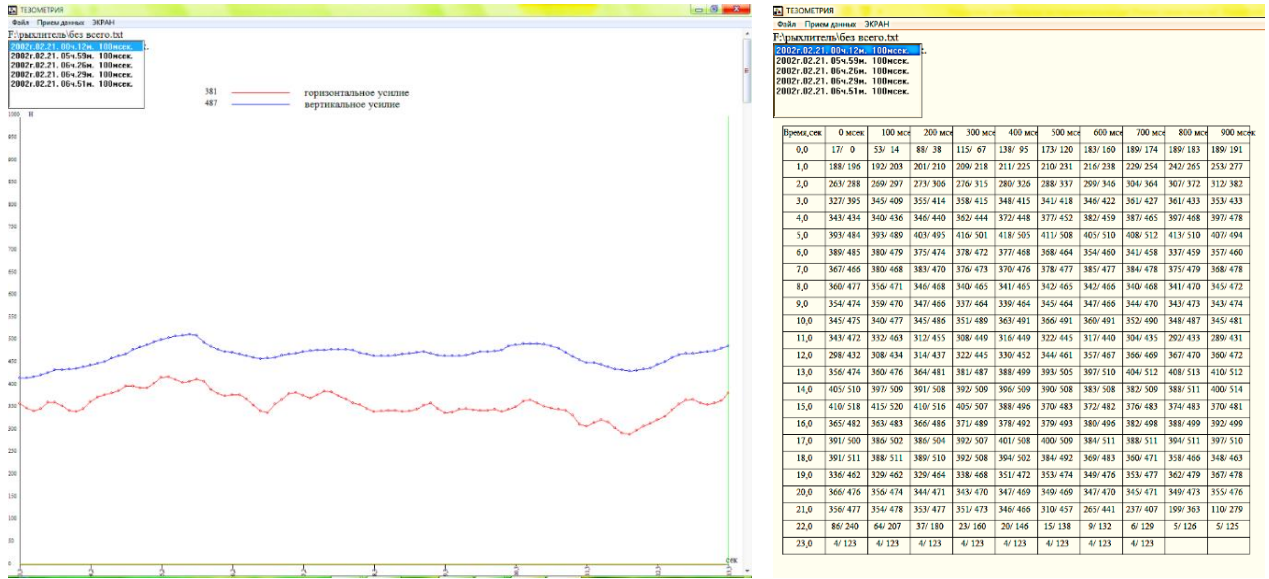


Рисунок А – Запись значений тягового сопротивления и обработка данных при испытании рабочих органов с различными угловыми параметрами.

Эксперимент объемного рыхлителя с ножами

$$N := 140 \quad i := 0..N - 1$$

X1 := (0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29)

X2 := (30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59)

X3 := (60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89)

X4 := (90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119)

X5 := (120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139)

$$X := \text{augment}(X1, X2, X3, X4, X5) \quad X := X \cdot 0.1 \quad X := X^T$$

Y1 := (400 412 426 453 462 468 471 472 476 481 479 475 467 475 478 473 466 464 464 467 465 466 465 477 482 474 455 438 432 437)

Y2 := (448 458 455 450 458 467 482 489 491 493 498 506 514 523 540 545 548 543 533 528 529 531 531 540 548 552 553 556 561 564)

Y3 := (552 550 548 551 544 525 507 500 501 503 506 509 512 520 522 523 524 527 529 533 536 538 538 541 549 556 559 559 560 563)

Y4 := (570 572 571 564 556 546 540 529 521 516 521 534 542 540 534 541 549 549 542 539 540 542 540 529 514 501 496 493 495 496)

Y5 := (507 522 530 536 533 528 522 502 494 490 485 480 474 474 476 484 488 488 446 452)

$Y := \text{augment}(Y1, Y2, Y3, Y4, Y5)$      $Y := Y \cdot 4^{2.85} \cdot 10^{-3}$      $R_{yy} := \text{mean}(Y)$      $R = 26.427$      $Y_{yy} := Y^T$   
 $a0 := \text{intercept}(X, Y)$      $a0 = 24.935$      $b0 := \text{slope}(X, Y)$      $b0 = 0.215$   
 $f(X) := a0 + b0 \cdot X$      $Y1 := Y - f(X)$      $D := \text{Var}(Y)$      $D = 3.923$      $v := \frac{\sqrt{D}}{R}$      $v = 0.075$   
 $m_x := 50$      $j := 0..m - 1$

$$k(j) := \frac{\sum_{i=0}^{(N-j-1)} (Y1_i \cdot Y1_{i+j})}{(N-j-1) \cdot D}$$

$R_{yy} := j \cdot 0.1$      $K_{yy} := k(j)$

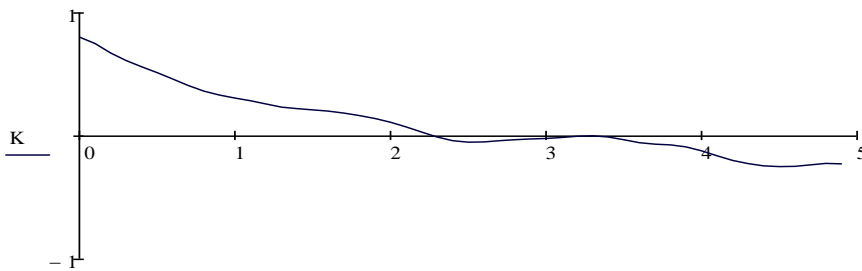
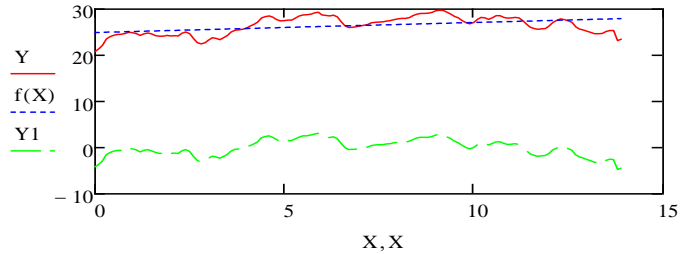


Таблица А – Усреднённые данных экспериментальных исследований рабочих органов рыхлителей с различными угловыми параметрами

Угол уст.,град	Ртяг. ср.,Н	L, см	Kp=A2/A1	Vвсп.,с м3	h2, см	E, кВт/м2	h1, см	Lраспр. деформ., см
70,7	270,38	37,8	1,37	38875,8 9	3,428208 99	4,9544207 49	14,5	20
70,12	226,17	33,1 2	1,3	22957,2 7	2,310514 29	5,0029925 17	15	20,16
70,17	245,92	29,8 9	1,42	18445,4 5	2,057036 91	4,8978443 8	15,1	19,6
90,7	340	36,2 5	1,3	40632,3	3,736303 45	4,7948634 06	14,6 7	12,17
90,12	293	37,6	1,23	30752,6 3	2,726296 99	4,6198524 76	16	18
90,17	300	35,9 7	1,25	33509,3 8	3,105308 13	5,4911136 11	15	18,17
110,7	370	43,4	1,24	41618,2 1	3,196483 1	3,8502218 28	11,6 7	17,84
110,12	350,71	45,5 6	1,17	29748,7 6	2,176526 19	4,0946725 82	16,3 4	18,67
110,17	324,75	46,7 5	1,28	47958	3,419465 24	3,1722038 82	11,6 7	16

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное)

### Обработка результатов 3-х факторного эксперимента

Таблица Б.1 – Основные характеристики 3-х факторного эксперимента  $2^3=8$

Уровень фактора	Факторы		
	$X_1$ ( $\alpha$ , град)	$X_2$ ( $\beta$ , град)	$X_3$ ( $\gamma$ , град)
Верхний (+)	45°	24°	110°
Нижний (-)	30°	10°	70°

Таблица Б.2 – План (матрица) 3-х факторного эксперимента  $2^3=8$

Номер опыта	$X_1$ ( $\alpha$ , град)	$X_2$ ( $\beta$ , град)	$X_3$ ( $\gamma$ , град)	$Y$ ( $F$ , кН)	$D_x$ , кН <sup>2</sup>	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$
1	-	-	-	82	32	+	+	+	-
2	+	-	-	197	19	-	-	+	+
3	-	+	-	105	17,3	-	+	-	+
4	+	+	-	288	63	+	-	-	-
5	-	-	+	173	28	+	-	-	+
6	+	-	+	202	93	-	+	-	-
7	-	+	+	230	52	-	-	-	-
8	+	+	+	351	97	+	+	+	+

Определение коэффициентов уравнения регрессии:

$$b_0 = \frac{1}{L} \sum x_0 y_i = \frac{11,9 + 29,7 + 44,9 + 49,5 + 20,5 + 59,3 + 54,7 + 77,7}{8} = 43,525$$

$$b_1 = \frac{1}{L} \sum x_{1i} y_i = \frac{-11,9 + 29,7 - 44,9 + 49,5 - 20,5 + 59,3 - 54,7 + 77,7}{8} = 10,525$$

$$b_2 = \frac{1}{L} \sum x_{2i} y_i = \frac{-11,9 - 29,7 + 44,9 + 49,5 - 20,5 - 59,3 + 54,7 + 77,7}{8} = 13,175$$

$$b_3 = \frac{1}{L} \sum x_{3i} y_i = \frac{-11,9 - 29,7 - 44,9 - 49,5 + 20,5 + 59,3 + 54,7 + 77,7}{8} = 9,525$$

Уравнение в относительных величинах имеет вид:

$$Y = 43,5 + 10,5X_1 + 13,2X_2 + 9,5X_3 \quad (1)$$

Таблица Б.3 – Результаты измерений тягового усилия

№ опыта	Значения усилия, $y_i$ ( $F$ ) (повторы опытов)	Среднее значение, $\bar{y}_i$ ,	Дисперсия, $D_y$
1	10,2; 14,4; 11,1	11,9	4,89
2	25,1; 32,8; 31,2	29,7	16,51
3	48,2; 46,3; 40,2	44,9	17,47
4	47,8; 46,7; 54	49,5	15,49
5	19; 17,2; 25,3	20,5	18,09
6	62,9; 57,2; 57,8	59,5	9,81
7	52,6; 58,5; 53	54,7	21,8
8	78,4; 80,1; 74,6	77,7	7,93
$\sum D(y)$			111,99

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрэна.

Расчётное значение критерия Кохрэна:

$$G = \frac{D_{max}}{\sum_1^n D_y} = \frac{21,8}{111,99} = 0,195 \quad (2)$$

Табличное значение критерия для  $f_1=2$ ,  $f_2=8$  и при уровне значимости 5 % 3

Табличное значение критерия Стьюдента  $t_i = |b_i|/S(b_i)$ , где  $S(b_i)$  среднеквадратичное отклонение оценки коэффициента  $b_i$ , которое определяется  $S(b_i) = \sqrt{D(b_i)}$ , дисперсию оценки коэффициента  $D(b_i)$  вычисляют по формуле:

$$D(b_i) = \frac{D_{\text{воспр}}(y)}{Lz}, \quad (3)$$

Дисперсия воспроизводимости:

$$D_{\text{воспр}}(y) = \frac{\sum D_i(y)}{L} = \frac{111,99}{8} = 13,998 = 14$$

Дисперсия оценки коэффициента  $b$ , среднеквадратическое отклонение  $S(b)$ ,

$$D(b_i) = \frac{D_{\text{воспр}}(y)}{Lz} = \frac{14}{8 \cdot 3} = 0,59, \quad S(b_i) = \sqrt{D(b_i)} = \sqrt{0,58} = 0,76$$

Табличное значение критерия Стьюдента при уровне значимости  $p=5\%$ , для числа степеней свободы  $f=L(z-1) = 16$ :  $t_{1-p/2}=26,3$ .

Расчётные значения критерия:

$$t_1=10,5/0,76=13,8, t_2=13,2/0,76=17,3, t_3=9,5/0,76=12,5,$$

Сравнение этих критериев с табличным значением позволяет считать определённо значимыми коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$ , а критерий коэффициента  $b_3$  незначительно меньше табличного. Для уточнения влияния третьего фактора – влажности грунта следует увеличить повтор опытов или увеличить интервал варьирования. В нашем исследовании принято решение учитывать влияние фактора  $x_3$ , т.е. влажности грунта.

Проверка гипотезы об адекватности результатов эксперимента полученному уравнению регрессии осуществляется по критерию Фишера.

Расчётное значение критерия Фишера вычисляется по формуле:

$$F = \frac{D_{ад}}{D_{\text{воспр}}(y)}, \quad (4)$$

где  $D_{ад}$  – дисперсия адекватности,  $D_{\text{воспр}}(y)$  – дисперсия воспроизводимости.

Для вычисления дисперсии адекватности определяются значения  $\tilde{y}$  для каждого опыта по уравнению регрессии, т.е.

$$\tilde{y}_i = 43,5 + 10,5x_1 + 13,2x_2 + 9,5x_3 - 3,6x_1x_2 + 4,9x_1x_3 \quad (5)$$

Таблица Б.4 – Результаты трёхфакторного эксперимента

№	$\bar{y}_i$	$\tilde{y}_i$	$(\bar{y}_i - \tilde{y}_i)$	$(\bar{y}_i - \tilde{y}_i)^2$
1	11,9	10,3	1,6	2,56
2	29,7	31,3	1,6	2,56
3	44,9	31,3	-8,2	67,24
4	49,5	57,7	8,2	67,24
5	20,5	29,3	8,8	77,44
6	59,3	50,3	-9	81
7	54,7	55,7	1	1
8	77,7	76,7	-1	1

Дисперсия адекватности:

$$D_{ad} = \frac{z}{L-d} \sum (\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2, \quad (6)$$

где  $z$  – число повторов каждого опыта,  $d$  – количество членов уравнения регрессии:

$$D_{ad} = \frac{3}{8-4} 222,6 = 166,95.$$

$$\text{Расчётный критерий Фишера } F = \frac{166,95}{14} = 12$$

Табличное значение критерия при уровне значимости  $p=5\%$  для степеней свободы  $f_1=L-d=4$  и  $f_2=L(z-1)=16$  имеет меньшее значение.

В этом случае линейное уравнение регрессии не адекватно результатам опытов. Следует увеличить количество параллельных опытов, интервал варьирования или перейти на нелинейное уравнение типа:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1X_2 + b_5X_1X_3 + b_6X_2X_3 + b_7X_1X_2X_3 \quad (7)$$

$$b_4 = \frac{11,9 - 29,7 - 44,9 + 49,5 + 20,5 - 59,3 - 54,7 + 77,7}{8} = -\frac{29}{8} = -3,625$$

$$b_4 = \frac{1}{L} \sum X_1 \cdot X_2 \cdot Y_i$$

$$b_5 = \frac{1}{L} \sum X_1 \cdot X_3 \cdot Y_i = \frac{11,9 - 29,7 + 44,9 - 49,5 - 20,5 + 59,3 - 54,7 + 77,7}{8} = \frac{39,4}{8} = 4,925$$

$$b_6 = \frac{1}{L} \sum X_2 \cdot X_3 \cdot Y_i = \frac{11,9 + 29,7 - 44,9 - 49,5 - 20,5 - 59,3 + 54,7 + 77,7}{8} = -\frac{0,2}{8} = -0,025$$

$$b_7 = \frac{1}{L} \sum X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot Y_i = \frac{-11,9 + 29,7 + 44,9 - 49,5 + 20,5 - 59,3 - 54,7 + 77,7}{8} = \frac{2,6}{8} = 0,325$$

$$t_4 = \frac{3,6}{0,76} = 4,7; \quad t_5 = \frac{4,9}{0,76} = 6,45; \quad t_6 = \frac{0,025}{0,76} = 0,033; \quad t_7 = \frac{0,325}{0,76} = 0,43$$

где  $t_6$  и  $t_7$  – незначимые величины

Уравнение примет вид:

$$Y = 43,5 + 10,5X_1 + 13,2X_2 + 9,5X_3 - 3,6X_1X_2 + 4,9X_1X_3 - 0,025X_2X_3 - 0,33X_1X_2X_3 \quad (8)$$

Таблица Б.5 – Проверка об. адекватности результатов экспериментов  
полученному уравнению по критериям Фишера

№	$\bar{y}_i$	$\tilde{y}_i$	$(\bar{y}_i - \tilde{y}_i)$	$(\bar{y}_i - \tilde{y}_i)^2$
1	11,9	9	2,9	8,41
2	29,7	27,4	2,3	5,29
3	44,9	50,8	5,9	34,8
4	49,5	43,6	5,9	34,8
5	20,5	9,4	11,1	123
6	59,3	70,4	11,1	123
7	54,7	57,3	2,6	6,76
8	77,7	76,4	1,3	1,69

$$D_{ad} = \frac{z}{L-d} \sum (\bar{y}_i - \tilde{y}_i)^2 = \frac{1}{8-6} 337,75 = 168,87$$

$$F_p = \frac{168,87}{14} = 12$$

Таблица Б.6 – Результаты сравнительных расчётов

№					
1	10,3	-3,6	4,9	-2,6	9
2	31,3	3,6	-4,9	-2,6	27,4
3	44,9	3,6	4,9	-2,6	50,8
4	49,5	-3,6	-4,9	2,6	43,6
5	20,5	-3,6	-4,9	-2,6	9,4
6	59,3	3,6	4,9	2,6	70,4
7	54,7	3,6	-4,9	2,6	57,3
8	77,7	-3,6	4,9	-2,6	76,4

Таблица Б.7 – Определение  $\tilde{y}_i$  и  $D_{ad}$ :

№		$(\bar{y}_i - \tilde{y}_i)$	$(\bar{y}_i - \tilde{y}_i)^2$
1	$\tilde{y}_i = 43,5 - 10,5 - 13,2 - 9,5 - 3,6 + 4,9 = 11,6$	0,3	0,09
2	$\tilde{y}_i = 43,5 + 10,5 - 13,2 - 9,5 + 3,6 - 4,9 = 30$	0,3	0,09
3	$\tilde{y}_i = 43,5 - 10,5 + 13,2 - 9,5 + 3,6 + 4,9 = 40,3$	4,6	21
4	$\tilde{y}_i = 43,5 + 10,5 + 13,2 - 9,5 - 3,6 - 4,9 = 49,2$	0,3	0,09
5	$\tilde{y}_i = 43,5 - 10,5 - 13,2 + 9,5 - 3,6 - 4,9 = 20,8$	0,3	0,09
6	$\tilde{y}_i = 43,5 + 10,5 - 13,2 + 9,5 + 3,6 + 4,9 = 58,8$	0,5	0,25
7	$\tilde{y}_i = 43,5 - 10,5 + 13,2 + 9,5 + 3,6 - 4,9 = 54,4$	0,3	0,09
8	$\tilde{y}_i = 43,5 + 10,5 + 13,2 + 9,5 - 3,6 + 4,9 = 78$	0,3	0,09
			$\Sigma = 21,8$

$$D_{ad} = \frac{z}{L-d} \Sigma (\bar{y}_i - \tilde{y}_i)^2 = \frac{3}{8-6} 21,8 = 32,7 \quad (9)$$

$$F_p = \frac{D_{ad}}{D_{воспр}} = \frac{32,7}{14} = 2,34 \quad (10)$$

$F_{таб} = 5,3 > F_p$ , следовательно, уравнение адекватно:

$$Y = 43,5 + 10,5X_1 + 13,2X_2 + 9,5X_3 - 3,6X_1X_2 + 4,9X_1X_3 \quad (11)$$

Достижение адекватности полученного уравнения результатам опытов возможно при значительных затратах времени. Принято решение на первом этапе исследования ограничиться линейным уравнением регрессии.

Пересчёт уравнения регрессии на натуральные факторы.



Среднее значение первого фактора – угла резания лемеха:  $X_{01}=37,5$ , ( $\alpha$ ) и шаг изменения  $\Delta X_1=7,5$ , ( $\Delta \alpha$ ). Второго фактора, угол резания стоек:  $X_{02}=\frac{24+10}{2} = 17$  и шаг изменения  $\Delta X_2=7$ , ( $\Delta \beta$ ). Третьего фактора, угла наклона боковых стоек:  $X_{03}=\frac{110+70}{2} = 90$ , ( $\gamma$ ) и  $\Delta X_3=20$ , ( $\Delta \gamma$ ).

Замена нормированных факторов на натуральные:

$$\begin{aligned} X_i(\alpha) &= \frac{\alpha - \alpha_0}{\Delta \alpha} = \frac{\alpha - 37,5}{7,5}, \\ X_i(\beta) &= \frac{\beta - \beta_0}{\Delta \beta} = \frac{\beta - 17}{7}, \\ X_i(\gamma) &= \frac{\gamma - \gamma_0}{\Delta \gamma} = \frac{\gamma - 90}{20}, \end{aligned} \quad (11)$$

Подставив эти выражения в уравнение регрессии, получим:

$$\begin{aligned} F &= 43,5 + 10,5 \frac{\alpha - 37,5}{7,5} + 13,2 \frac{\beta - 17}{7} + 9,5 \frac{\gamma - 90}{20} - 3,6 \left( \frac{\alpha - 37,5}{7,5} \right) \left( \frac{\beta - 17}{7} \right) + 4,9 \left( \frac{\alpha - 37,5}{7,5} \right) \\ &\left( \frac{\gamma - 90}{20} \right) = 43,5 + 1,4\alpha - 52,4 + 1,9\beta - 32,3 + 0,5\gamma - 45 + 0,067\alpha\beta - 1,17\alpha + 2,5\beta - 43,7 + 0,033\alpha\gamma \\ &- 2,9\alpha - 1,2\gamma + 110 = -22,8 - 0,33\alpha + 4,4\beta - 0,7\gamma - 0,067\alpha\beta + 0,033\alpha\gamma \\ F &= -22,8 - 0,33\alpha + 4,4\beta - 0,7\gamma - 0,067\alpha\beta + 0,033\alpha\gamma \end{aligned} \quad (12)$$

**ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное)**

**Обработка результатов 2-х факторного эксперимента**

Таблица В.1 – Основные характеристики 3-х факторного эксперимента  $2^3=8$

Уровень фактора	Факторы	
	$X_1$ (h м,)	$X_2$ (w, отн. влажность%)
Верхний (+)	0,68	18
Нижний (-)	0,4	8
Базовый $X_{0i}$	0,54	13

Таблица В.2 – План (матрица) для параболического рабочего органа

№ оп.	$X_1$ (h)	$X_2$ (w)	$y_i$ (F)	$\bar{y}_i$	$D_{yi}$	$X_1 X_2$
1	-0,4 м	-8%	14,6; 15,1; 15,3	15,0	0,13	+
2	0,68 м	-8%	23,6; 24,5; 24,8	24,3	0,39	-
3	-0,4 м	18%	18,3; 18,6; 19,5	18,8	0,39	-
4	0,68 м	18%	29,8; 31,2; 30,8	30,6	0,53	+

Таблица В.3 – (матрица) для U-образного рабочего органа

№ оп.	$X_1$ (h)	$X_2$ (w)	$y_i$ (F)	$\bar{y}_i$	$D_{yi}$	$X_1 X_2$
1	-0,4 м	-8%	14,2; 15; 15,2	14,8	0,6132	+
2	0,68 м	-8%	44,7; 45,1; 46,1	45,3	6,7888	-
3	-0,4 м	18%	15,3; 16,4; 16,3	16,0	4,990	-
4	0,68 м	18%	47,6; 47,5; 48,6	47,9	47,0128	+

Результаты эксперимента могут быть представлены уравнением регрессии типа:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2, \quad (1)$$

где  $Y$  – оценка значений функции отклика,  $b_0, b_1, b_2$  – оценки коэффициентов уравнения регрессии.

Параболический рабочий орган:

$$b_0 = \frac{1}{L} \sum x_0 y_i = \frac{15 + 24,3 + 18,8 + 30,6}{4} = 22,2$$

$$b_1 = \frac{1}{L} \sum x_{1i} y_i = \frac{-15 + 24,3 - 18,8 + 30,6}{4} = 5,3$$

$$b_2 = \frac{1}{L} \sum x_{2i} y_i = \frac{-15 - 24,3 + 18,8 + 30,6}{4} = 2,5$$

$$Y = 22,2 + 5,3X_1 + 2,5X_2 \quad (2)$$

U-образный рабочий орган:

$$b_0 = \frac{14,8 + 45,3 + 16 + 47,9}{4} = 31$$

$$b_1 = \frac{-14,8 + 45,3 - 16 + 47,9}{4} = 15,6$$

$$b_2 = \frac{-14,8 - 45,3 + 16 + 47,9}{4} = 1$$

$$Y = 31 + 15,6X_1 + 1 \cdot X_2 \quad (3)$$

Проверка гипотезы об однородности дисперсий по критерию Кохрена.

Расчётное значение критерия Кохрена:

$$G_{max} = \frac{D_{y \max}}{\Sigma D_{yi}} \quad (4)$$

Параболический рабочий орган:  $D_{y \max}=0,53$ ;  $D_y=1,44$

$$G_{max} = \frac{0,53}{1,44} = 0,37$$

U-образный рабочий орган:  $D_{y \max}=0,52$ ;  $D_y=1,5$ .)4(см. таб.)

$$G_{max} = \frac{0,52}{1,54} = 0,34$$

Табличное значение критерия для степеней свободы

$\nu_1 = z_n - 1 = 2$ ;  $\nu_1 = L = 4$  при уровне значимости 5%.

Гипотеза об однородности дисперсий принимается.

Оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента:

Дисперсия воспроизводимости:

$$D_{\text{воспр}(y)} = \frac{\sum D_{yi}}{L} \quad (5)$$

Дисперсия оценки ошибки определения коэффициентов:

$$D_{(bi)} = \frac{D_{\text{воспр}(y)}}{Lz} \quad (6)$$

Расчётный критерий:  $t_i = \frac{b_i}{D_{bi}}$

Табличное значение критерия Стьюдента:

Для числа степеней свободы  $\nu_{\text{зн}} = L(z_n - 1) = 4 \cdot 2 = 8$

$$t_{\text{кр}} = 2,31$$

Для параболического рабочего органа:

$$D_{\text{воспр}(y)} = \frac{\sum D_{yi}}{L} = \frac{1,44}{4} = 0,36$$

$$D_{(bi)} = \frac{D_{\text{воспр}(y)}}{Lz} = \frac{0,36}{4 \cdot 3} = 0,03$$

$$t_1 = \frac{5,3}{0,03} = 176,6; t_2 = \frac{2,5}{0,03} = 83,3; t_1 \text{ и } t_2 > t_{\text{кр.табл}}$$

Для U-образного рабочего органа:

$$D_{\text{воспр}(y)} = \frac{1,54}{4} = 0,39; D_{(bi)} = \frac{0,39}{12} = 0,032$$

$$t_1 = \frac{15,6}{0,032} = 487,5; t_2 = \frac{1}{0,032} = 31,25; t_1 \text{ и } t_2 > t_{\text{кр.табл}}$$

Значения коэффициентов уравнений для двух рабочих органов значимы. Проверка гипотезы об адекватности результатов эксперимента полученному уравнениям регрессии по критерию Фишера.

Расчётное значение критерия Фишера вычисляется по формуле  $F = \frac{D_{ад}}{D_{воспр}(Y)}$ , табличное значение 5,3.

Для параболического рабочего органа:

$$Y = 22,2 + 5,3X_1 + 2,5X_2 \quad (7)$$

$$D_{ад} = \frac{z}{L-d} \Sigma (\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2, \quad (8)$$

$$\tilde{y}_1 = 22,2 - 5,3 - 2,5 = 14,4$$

$$\tilde{y}_2 = 22,2 + 5,3 - 2,5 = 25$$

$$\tilde{y}_3 = 22,2 - 5,3 + 2,5 = 19,4$$

$$\tilde{y}_4 = 22,2 + 5,3 + 2,5 = 30$$

Таблица В.4 – Результаты расчётов для рабочего органа с параболическими стойками

№	$\bar{y}_i$	$\tilde{y}_i$	$\tilde{y}_i - \bar{y}_i$	$(\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2$
1	15	14,4	0,6	0,36
2	24,3	25	0,7	0,49
3	18,8	19,4	0,6	0,36
4	30,6	30	0,6	0,36
				$\Sigma = 1,57$

$$D_{ад} = \frac{3 \cdot 1,57}{1} = 4,71$$

$$F = \frac{4,71}{0,36} = 13,1$$

Для U-образного рабочего органа:

$$Y = 31 + 15,6X_1 + 1 \cdot X_2 \quad (9)$$

$$\tilde{y}_1 = 31 - 15,6 - 1 = 14,4$$

$$\tilde{y}_2 = 31 + 15,6 - 1 = 45,6$$

$$\tilde{y}_3 = 31 - 15,6 + 1 = 16,4$$

$$\tilde{y}_4 = 31 + 15,6 + 1 = 47,6$$

Таблица В.5 – Результаты расчётов для U - образного рабочего органа

№	$\bar{y}_i$	$\tilde{y}_i$	$\tilde{y}_i - \bar{y}_i$	$(\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2$
1	14,8	14,4	0,4	0,16
2	45,3	45,6	0,3	0,09
3	16	16,4	0,4	0,16
4	47,9	47,6	0,3	0,09
				$\Sigma = 0,5$

$$D_{ад} = \frac{3 \cdot 0,5}{1} = 1,5$$

$$F = \frac{1,5}{0,39} = 3,85$$

Парабола  $F_{табл} = 5,3$ ;  $F_{расч} = 13,1 > F_{табл} = 5,3$

U-образная  $F_{табл} = 5,3$   $F_{расч} = 5,3 = F_{табл} = 5,3$

Оба уравнения не адекватно описывают результаты опытов.

В этом случае линейное уравнение регрессии не адекватно результатам опытов. Следует перейти на нелинейное уравнение типа:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_1X_2 \quad (10)$$

Для параболического рабочего органа:

$$b_3 = \frac{15 - 24,3 - 18,8 + 30,6}{4} = 0,6$$

$$Y = 22,2 + 5,3X_1 + 2,5X_2 + 0,6X_1 \cdot X_2$$

Для U-образного рабочего органа:

$$b_3 = \frac{14,8 - 45,3 - 16 + 47,9}{4} = 0,35$$

$$Y = 31 + 15,6X_1 + 1 \cdot X_2 + 0,35 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (11)$$

Проверка гипотезы об адекватности результатов эксперимента полученным уравнениям регрессии по критерию Фишера.

Для параболического рабочего органа:

$$\tilde{y}_1 = 22,2 - 5,3 - 2,5 + 0,6 = 15$$

$$\tilde{y}_2 = 22,2 + 5,3 - 2,5 - 0,6 = 24,5$$

$$\tilde{y}_3 = 22,2 - 5,3 + 2,5 - 0,6 = 18,8$$

$$\tilde{y}_4 = 22,2 + 5,3 + 2,5 + 0,6 = 30,6$$

Таблица В.6 – Результаты расчётов для рабочего органа с параболическими стойками

№	$\bar{y}_i$	$\tilde{y}_i$	$\tilde{y}_i - \bar{y}_i$	$(\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2$
1	15	15	-	-
2	24,3	24,5	0,2	0,04
3	18,8	18,8	-	-
4	30,6	30,6	-	-

$$D_{a\partial} = 0,4; D_{\text{воспр}(y)} = \frac{1,54}{4} = 0,38$$

$$F = \frac{3 \cdot 0,04}{0,38} = 0,32 \quad F_{\text{табл}} = 5,3 > F_{\text{расч}} = 0,38$$

Для U-образного рабочего органа:

$$\tilde{y}_1 = 31 - 15,6 - 1 + 0,35 = 14,75$$

$$\tilde{y}_2 = 31 + 15,6 - 1 - 0,35 = 45,25$$

$$\tilde{y}_3 = 31 - 15,6 + 1 - 0,35 = 16,05$$

$$\tilde{y}_4 = 31 + 15,6 + 1 + 0,35 = 47,95$$

Таблица В.7 – Результаты расчётов для U – образного рабочего органа

№	$\bar{y}_i$	$\tilde{y}_i$	$\tilde{y}_i - \bar{y}_i$	$(\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2$
1	14,8	14,75	0,05	0,0025
2	45,3	45,25	0,05	0,0025
3	16	16,05	0,05	0,0025
4	47,9	47,95	0,05	0,0025

$$D_{a\partial} = 0,01 \cdot 3 = 0,03; D_{\text{воспр}(y)} = \frac{1,44}{4} = 0,36$$

$$F = \frac{0,03}{0,36} = 0,08$$

$$F_{\text{табл}} = 5,3 > F_{\text{расч}} = 0,38$$

Оба уравнения значимы. В натуральных величинах:

$$X_1 = \frac{h-0,54}{0,14}; X_2 = \frac{w-13}{5}; X_1 \cdot X_2 = \left(\frac{h-0,54}{0,14}\right) \cdot \left(\frac{w-13}{5}\right) = 1,43hw - 18,56h - 0,77w + 10$$

Параболический рабочий орган:  $Y = 22,2 + 5,3X_1 + 2,5X_2 + 0,6X_1 \cdot X_2$

$$F = 22,2 + \frac{5,3(h-0,54)}{0,14} + \frac{2,5(w-13)}{5} + 0,6(1,43hw - 18,56h - 0,77w + 10) =$$



$$\begin{aligned}
&=22,2+37,9h-20,44+0,5w-6,5+0,8hw-11,14h-0,46w+6= \\
&=-5,56+37,8h-0,77w+0,86hw
\end{aligned} \tag{12}$$

U-образный рабочий орган:

$$Y = 31 + 15,6X_1 + 1 \cdot X_2 + 0,35 \cdot X_1 \cdot X_2$$

$$\begin{aligned}
F &= 31 + \frac{15,6(h-0,54)}{0,14} + \frac{2,5(w-13)}{5} + 0,35(1,43hw - 18,56h - 0,77w + 10) = \\
&= 31 + 111,43h - 60,17 + 0,2w - 0,26 + 0,5hw - 6,5h - 0,27w + 3,5 = \\
&= -31,4 + 105h - 0,07w + hw
\end{aligned} \tag{13}$$

Трапецеидальный рабочий орган:  $Y = 23,1 + 5,6X_1 + 2,6X_2 + 0,9 \cdot X_1 \cdot X_2$

$$\begin{aligned}
F &= 23,1 + \frac{5,6(h-0,54)}{0,14} + \frac{2,6(w-13)}{5} + 0,9(1,43hw - 18,56h - 0,77w + 10) = \\
&= 23,1 + 40h - 21,6 + 0,52w - 6,76 + 1,3hw - 0,69w - 16,7h + 9 = \\
&= 3,74 + 23,3h - 0,17w + 1,3hw
\end{aligned} \tag{14}$$

### ПРИЛОЖЕНИЕ Г (справочное)

#### Результаты лабораторных опытов второго этапа

Таблица Г – Результаты экспериментальных исследований и статистической обработки данных для трёх типов рабочих органов

Глубина Рыхления, см		Тип рабочего органа	Для физических моделей	Высота подъема разрыхлен ного пласта, h см	Длина распростра нения деформации, L см	Высота подъема пласта в процессе рыхления между стойками, см	$\rho, \text{г/см}^3$		F <sub>н</sub> кН	D <sub>хн</sub> , (кН) <sup>2</sup>	S <sub>н</sub> , м <sup>2</sup>	K=F <sub>н</sub> /S, кН/м <sup>2</sup>	K <sub>p</sub> = V <sub>p</sub> /V <sub>н</sub>
							До обр.	После обр.					
							Лабораторн.		В пересчете на натуру				
							Полев.						
Трапецеида льный	0,48			4	16	13	1,42	1,35	9,85	6,67	0,317	32	1,15
							1,38	1,27-					
	0,56			4,4	20,85	13,5	1,44	1,32	15,2	3,5	0,41	37	1,16
							1,39	1,28-					
	0,6			4,5	21,3	14,6	1,39	1,3	23,3	12,3	0,47	49,6	1,17
							-	-					
	0,68			4,7	22,5	14,6	1,53	1,39	31,9	14,4	0,584	54,6	1,17
							1,6	1,33					
С криволиней ными параболичес кими	0,48			4,3	12	13	1,32	0,83	15,18	1,75	0,34	44,6	1,16
							1,37	1,29					
	0,56			4,5	15	13,6	1,4	1,25	19,7	2,45	0,44	44,9	1,17
							1,44	1,36					

	0,6		4,8	18	15	1,5	1,32		24,5	2,74	0,49	50	1,18
						1,57	1,37						
	0,68		5,5	21	15,5	1,35	1,02		32,2	3,8	0,6	53,7	1,2
						1,69	1,33						
С постоянным радиусом (полукругл ый)	0,48		4	15	15	1,39	1,03		16,84	2,45	0,38	44,3	1,14
						-	-						
	0,56		4,6	18	14	-	-		25,76	2,88	0,48	50,4	1,11
						-	-						
	0,6		5,6	18,5	14,5	1,22	1,08		26,74	3,81	0,53	53,6	1,11
						-	-						
0,68		6,2	19	17	1,27	1,1		44,9	9,7	0,63	54,7	1,11	
					-	-							

Приложение Д (обязательное)

Лабораторная установка для полевых испытаний

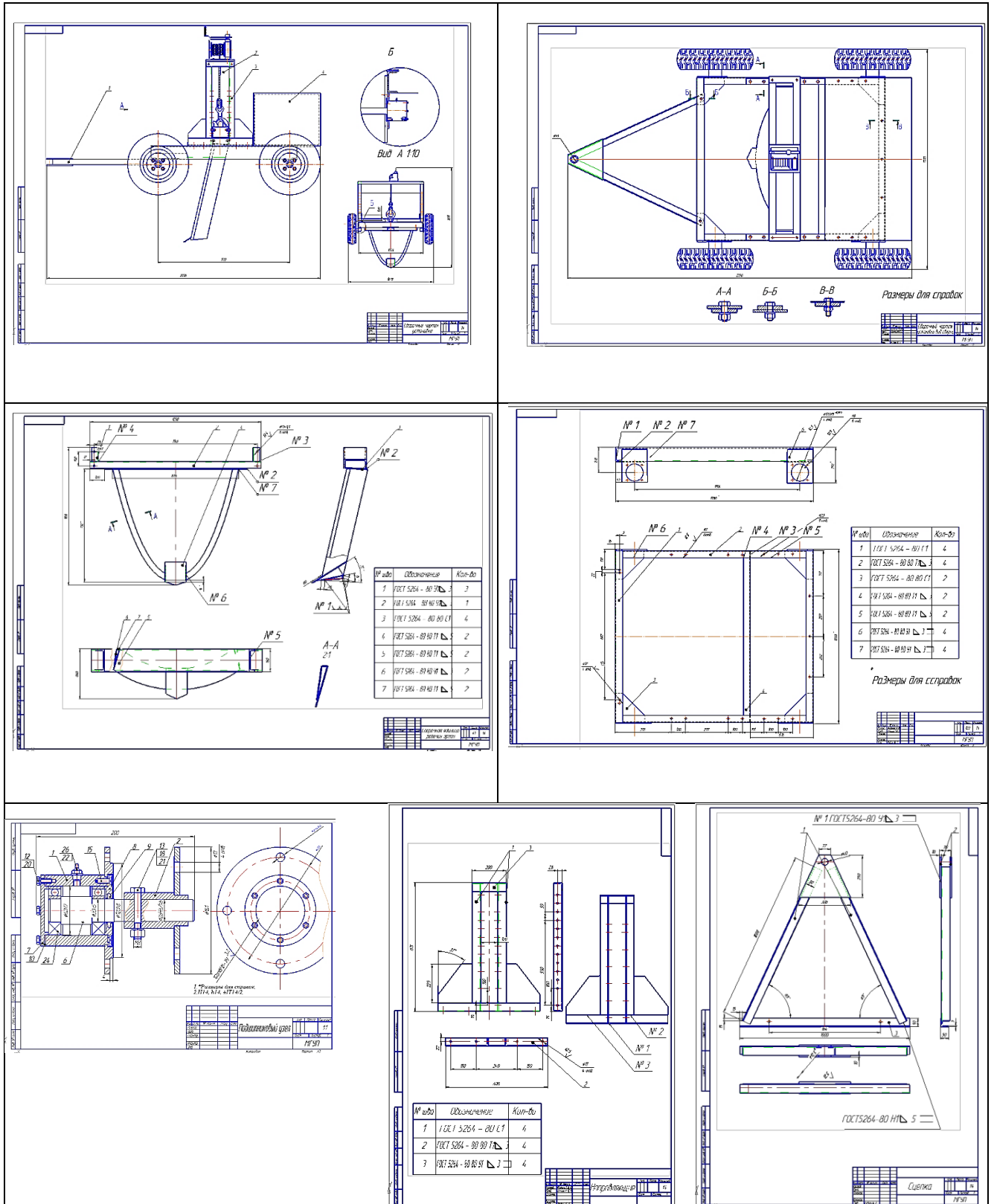


Рисунок Д – Конструкторская документация на изготовление установки для проведения полевых опытов (часть)

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(справочное)

### Технические характеристики оборудования



Рисунок Е – Лабораторная установка

Таблица Е. 1 – Технические характеристики установки

Показатели	
Базовый трактор	МТЗ-82
Способ агрегатирования	прицепная
Глубина рыхления, м	0,4-0,45
Ширина захвата, м	0,7
Ширина лемеха, см	15
Производительность, м <sup>3</sup> /час	437
Масса прицепного оборудования	
без пригружения, кг	175
с пригружением грунтом, кг	823

Таблица Е. 2– Технические характеристики датчика

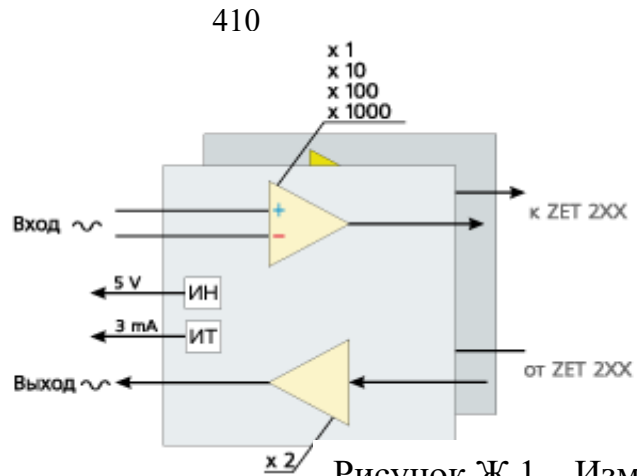
Номинальный выходной сигнал	mV/V	2
Нелинейность	%П.Ш.	<0.017
Гистерезис	%П.Ш.	<0.017
Повторяемость	%П.Ш.	<0.017
Баланс ноля	$\mu V/V$	<20
Ползучесть (от н.с., 30 мин.)	%П.Ш./30мин	<0.023
Темпер, дрейф баланса ноля	%П.Ш./10°C	<0.04
Темпер, коэфф. для выходного сигнала	%П.Ш./10°C	<0.012
Входное сопротивление	$\Omega$	385
Выходное сопротивление	$\Omega$	350
Допустимая перегрузка	%П.Ш.	150
Сопротивление изоляции	M $\Omega$	>5000
Температурный диапазон, компенсированный	°C	-10-+40
Напряжение питания	V	5-15

**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (справочное)**

**Схема подключения тензорезистивного датчика силы ES-1-3 t при проведении экспериментов**



Структурная схема усилителя ZET



Структурная схема модуля АЦП-ЦАП ZET 210 с цифровым портом

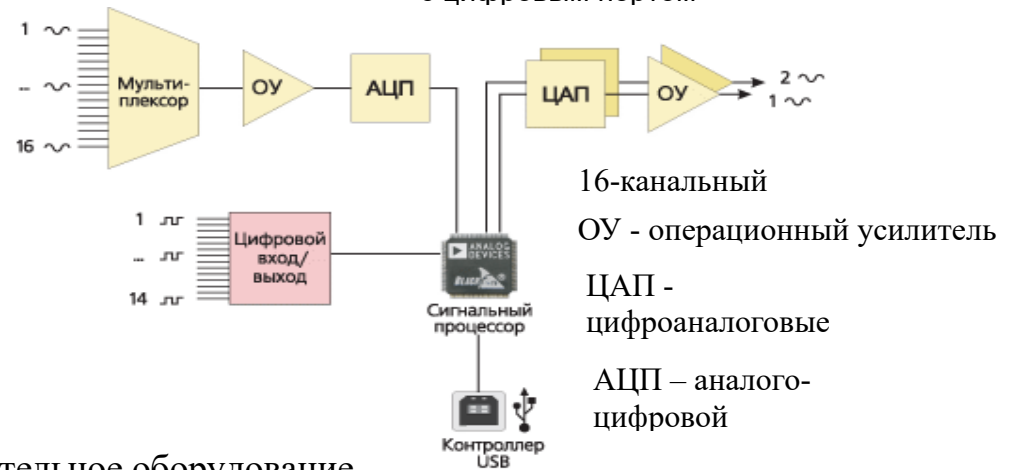


Рисунок Ж.1 – Измерительное оборудование





(+) ПИТАНИЕ КРАСНЫЙ

(+) СИГНАЛ ЖЁЛТЫЙ

(-) ПИТАНИЕ СИНИЙ

(-) СИГНАЛ ЗЕЛЁНЫЙ



Рисунок Ж. 2 – Установка и схема подключения датчика

## ПРИЛОЖЕНИЕ И (справочное)

### Запись усилия и обработка результатов при проведении полевых испытаний

Таблица И – Данные записи  
тягового сопротивления  
Датчик 1

Время: 15:25:06

Дата: 07-11-2016

Время Уровень

с кг

...

...

11.129375	1159.929593
11.130000	1161.285535
11.130625	1164.946576
11.131250	1173.285614
11.131875	1181.014479
11.132500	1184.336535
11.133125	1187.387403
11.133750	1189.895894
11.134375	1194.031514
11.135000	1198.031541
11.135625	1199.048497
11.136250	1194.777282
11.136875	1191.658617
11.137500	1189.217923
11.138125	1187.184011
11.138750	1181.963638
11.139375	1174.302570
11.140000	1169.421182
11.140625	1166.031329
11.141250	1164.404199
11.141875	1160.336376
11.142500	1155.861770
11.143125	1155.048205
11.143750	1159.793999
11.144375	1159.183826
11.145000	1159.861796
11.145625	1165.760140
11.146250	1174.709352
11.146875	1180.811088
11.147500	1187.726388
11.148125	1192.878964
11.148750	1198.980700
11.149375	1203.319712
11.150000	1207.251941
11.150625	1215.387588
11.151250	1219.591006
11.151875	1220.540165
11.152500	1217.963877
11.153125	1216.065559
11.153750	1212.133329
11.154375	1205.896000
11.155000	1201.624785

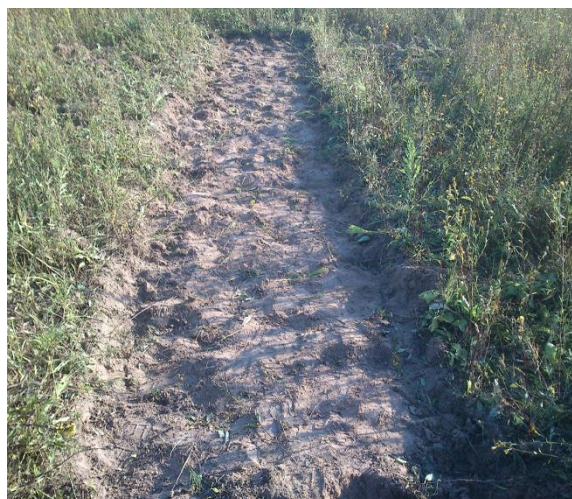


Рисунок И.1 – Методика проведения экспериментов



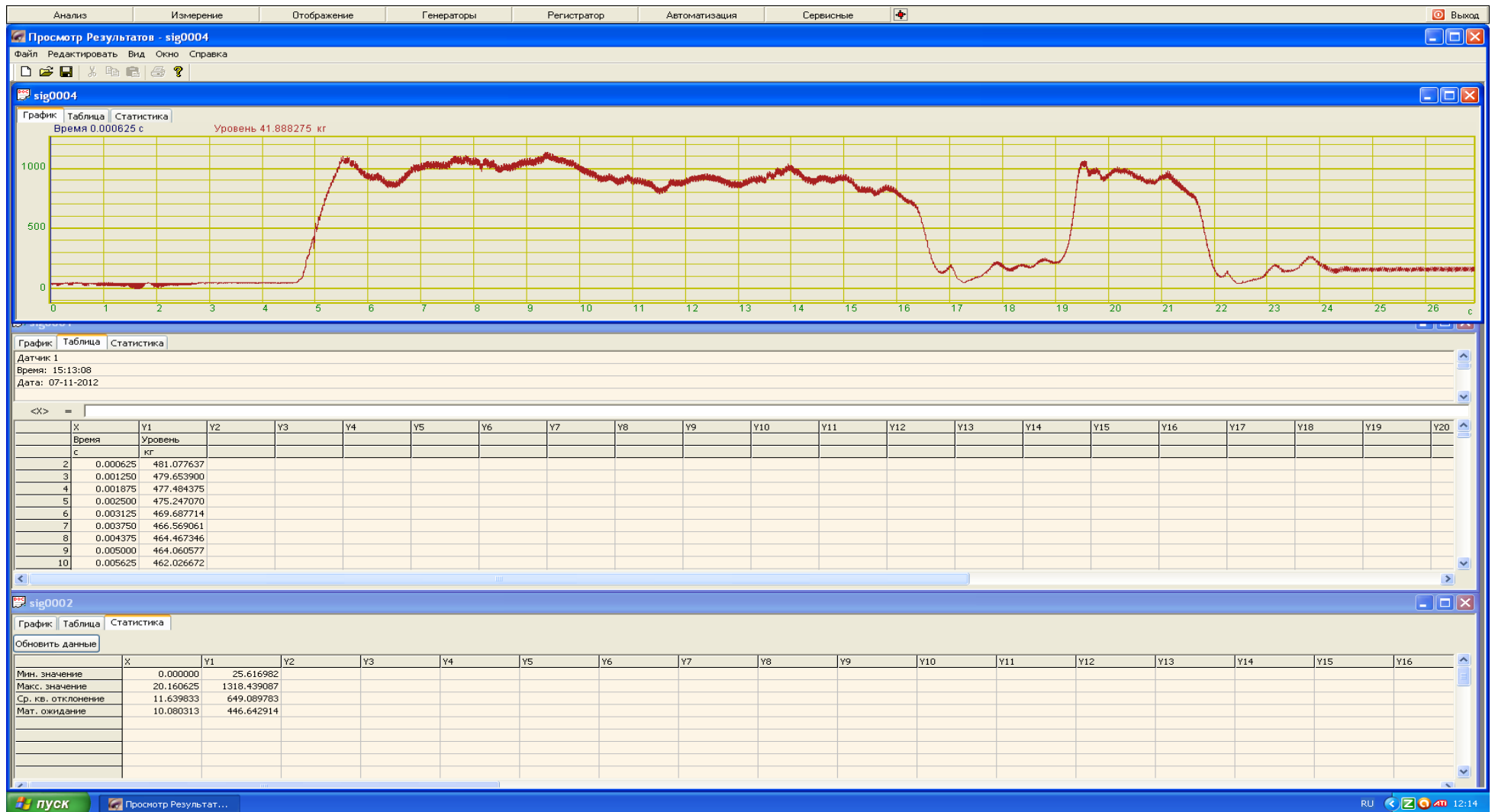


Рисунок И.2 – Обработка данных в приложении «Тензомер»

**ПРИЛОЖЕНИЕ К****(рекомендуемое)****Техническое предложение на внедрение в производство**

Предлагается к внедрению в производство устройство «Навесное пассивное рабочее оборудование объёмного типа для глубокого рыхления как мелиоративного средства для обработки тяжёлых почв».

Применение данного оборудования планируется для мелиоративного глубокого рыхления тяжёлых и переуплотнённых почв с целью улучшения структуры и восстановления продуктивности почв сельскохозяйственного назначения (улучшения почвенного плодородия за счёт создания равномерной однородной структуры почвы по глубине рыхления), борьбы с водной эрозией перераспределения объёмов поверхностного и внутрипочвенного стоков, повышения эффективности осушительного дренажа.

Разработаны чертежи рабочего оборудования, схемы агрегатирования с тягачами. Общий вид машины на базе тракторов класса 30...100 кН показан на рисунке К.1, основные технические характеристики приведены в таблице К.1.

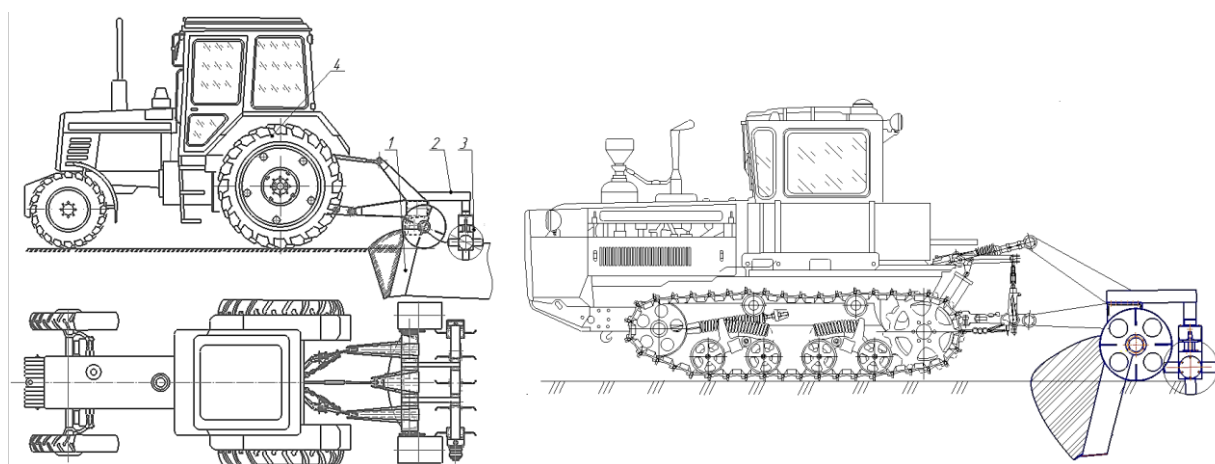


Рисунок К.1 – Рыхлитель объёмного типа с дополнительными рыхлящими элементами: 1 - основной рабочий орган; 2 - съёмная рама дополнительного оборудования; 3 - дополнительное оборудование в виде рыхлящих дисков;

базовый трактор

Таблица К.1 – Основные технические характеристики нового глубокорыхлителя объёмного типа

№ п/п	Наименование характеристик	Показатели
1	Мощность базового трактора, кВт.	75-150.
2	Глубина рыхления, м	0,5...0,8
3	Ширина захвата, м	0,8...3,2
4	Количество рыхлящих пространственных стоек	1...3
5	Количество рыхлящих дисков у дополнительного оборудования	3...5
4	Рабочие скорости, км/час	до 5
5	Транспортные скорости, км/час	До 30
6	Масса, кг	800...1000
7	Клиренс в транспортном положении, м	0,35
10	Способы агрегатирования: -навесной тип навески глубокорыхлителя на трактор -полуприцепной	трёхточечная
11	Степень крошения почвы (доля комков диаметром 5 см), %	70...80
12	Коэффициент разрыхления	1,25...1,3
13	Коэффициент полноты рыхления	0,7...0,85
14	Тип системы управления: глубиной рыхления (при необходимости)	Лазерный, GPS, ГЛОНАС

Рабочий орган рыхлителя представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из боковых стоек и лемеха, жёстко прикрепленных к несущей раме. Боковые рыхлящие стойки криволинейной параболической формы типа:  $Y = 0,001 * X^{2.2}$  соединены в нижней части между собой лемехом. Режущая кромка лемеха вынесена вперёд на расчётное расстояние относительно кромок боковых стоек. Боковые стойки рабочего органа сварной конструкции, состоят из трех деталей криволинейной формы сваренных между собой – полоса передней режущей части, полоса, образующая задний угол  $\xi = 7^\circ$ , плоская соединительная полоса. В верхней части боковые стойки соединены при помощи поперечной балки 4 представляющую прямоугольную трубу из гнутого профиля. Рабочее оборудование при необходимости опирается на колеса, посредством кривошипа, который позволяет изменять глубину рыхления. Колёса при работе могут использоваться как прикатывающие катки. Рабочее оборудование прикрепляется к штатной задней навеске трактора по двух - или трёхточечной схеме. С целью

разрушения фракций грунта больших размеров предусматриваем пассивно вращающуюся ось с закреплёнными на ней дисками фрезерного типа (рис. К.2)

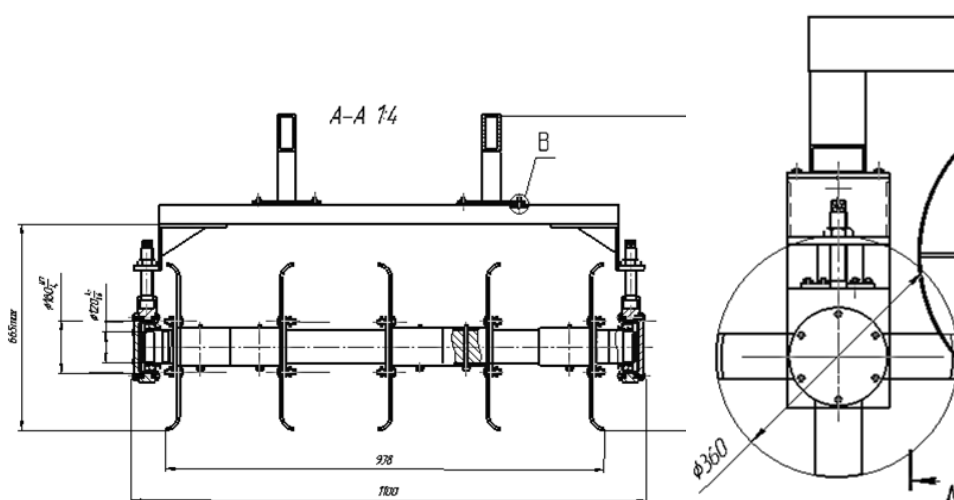


Рисунок К.2 – Дополнительное оборудование

Ось подвешена в опорах, которые при помощи кронштейнов подсоединяются к поперечной трубе. К раме рабочего органа ось с дисками подсоединяется посредством фланцев сцепного устройства, изготовленного из труб прямоугольного сечения. Новизна разработки подтверждается патентами на изобретения.

Предлагаемое рабочее оборудование объёмного рыхлителя разработано и сконструировано, предусматривает возможную дальнейшую модернизацию с целью улучшения потребительских и технологических свойств рыхлительного оборудования.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Л

(справочное)

Патенты на изобретения и справки о внедрении

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2376736

**ОРУДИЕ ДЛЯ ГЛУБОКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет природообустройства" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2008126185

Приоритет изобретения 30 июня 2008 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 декабря 2009 г.

Срок действия патента истекает 30 июня 2028 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2407254

РАБОЧИЙ ОРГАН ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО  
ОРУДИЯ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет природообустройства" (МГУП) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2009124288

Приоритет изобретения 26 июня 2009 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 декабря 2010 г.

Срок действия патента истекает 26 июня 2029 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2484610

**ОБЪЕМНЫЙ МЕЛНОРАТИВНЫЙ РЫХЛИТЕЛЬ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет природообустройства" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011152071

Приоритет изобретения 21 декабря 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 июня 2013 г.

Срок действия патента истекает 21 декабря 2031 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 136673

**ОБЪЕМНЫЙ МЕЛНОРАТИВНЫЙ РЫХЛИТЕЛЬ С  
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ**

Патентообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет природообустройства" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013119859

Приоритет полезной модели 23 августа 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 января 2014 г.

Срок действия патента истекает 23 августа 2023 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.И. Симонов





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 160528

**МЕЛНОРАТИВНЫЙ РЫХЛИТЕЛЬ ДЛЯ ГЛУБОКОЙ  
ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева" (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015149733

Приоритет полезной модели **20 ноября 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **25 февраля 2016 г.**

Срок действия патента истекает **20 ноября 2025 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивашев* Г.П. Ивашев



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор  
ООО «Научно-производственное  
объединение «ЭКАР»



А. В. Агеев

2023 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА  
им. К.А. Тимирязева  
Проректор по науке и  
инновационному развитию



В. В. Журавлев

2023 г.

### Акт

#### опытного внедрения рабочего органа мелиоративного рыхлителя объёмного типа

Комиссия в составе генерального директора ООО «Научно-производственное объединение «ЭКАР» Агеева А.В., директора обособленного подразделения Тарасова А. И., начальника производства Щелкова Е.С., руководителя проекта Котова Д. И., а также представителей ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в составе д.т.н., заведующего кафедрой Организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ Балабанова В.И., старшего преподавателя Макарова А. А., доцента к.т.н. Карнова М.В., доцента к.т.н. Жиздока А.А., составили настоящий акт по результатам экспериментальных исследований в лабораторных и полевых условиях рабочих органов мелиоративных рыхлителей объёмного типа для глубокого рыхления грунта, заключающихся в определении оптимальных параметров и конструкции рабочего органа, определяющих условия его применения при сочетании уменьшения тягового сопротивления и качества производства работ отвечающего агротехническим требованиям.

На основании лабораторных и полевых исследований моделей рабочих органов и опытного образца, выявлены и запатентованы конструкция и основные параметры рыхлителя, отвечающие задачам исследования. На основании проведенных эксплуатационных испытаний в полевых условиях в ООО «Научно-производственное объединение «ЭКАР» для дальнейшего опытного внедрения предоставлено в ООО «Научно-производственное объединение «ЭКАР» конструкторская документация и материалы по следующему перечню:

1. Комплект документов технологического процесса мелиоративного рыхления.




2. Комплект конструкторской документации для изготовления опытной партии рабочих органов рыхлителей.

Авторы разработанного рабочего органа мелиоративного рыхлителя и технологий глубокого мелиоративного рыхления обязуются оказать научную и технологическую помощь при производстве партии рабочих органов в объеме опытного внедрения.

По результатам внедрения объемного рыхлителя с дополнительными рыхлителями элементами производительность повысилась на 18%, удельный расход топлива снизился на 26%, совокупные затраты на 25%.

«Научно-производственное  
объединение ООО «ЭКАР»

Директор обособленного подразделения

 А.И. Тарасов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

«Научно-производственное  
объединение ООО «ЭКАР»

Почетный работник

 Е.С. Щелков  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

«Научно-производственное  
объединение ООО «ЭКАР»

Руководитель проекта

 Д.И. Котов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА

имени К.А. Тимирязева


Заведующий кафедрой Организации и  
технологий гидромелиоративных и  
строительных работ доктор технических наук,  
профессор

 В.И. Балабанов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Старший преподаватель кафедры  
Организации и технологий  
гидромелиоративных и строительных работ

 А.А. Маслов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Доцент кафедры Организации и технологий  
гидромелиоративных и строительных работ  
кандидат технических наук

 М.В. Карпов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Доцент кафедры Организации и технологий  
гидромелиоративных и строительных работ,  
кандидат технических наук

 А.А. Жиздюк А.А.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

**УТВЕРЖДАЮ:**  
 И.о. проректора по науке  
 ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА  
 имени К.А. Тимирязева  
 И.Ю. Свиярев  
 «    »    2022 г.



### СПРАВКА

об использовании результатов научно-исследовательской работы (внедрении)  
 в учебном процессе

Дана соискателю кафедры мелиоративных и строительных машин **Макарову Александру Алексеевичу** в том, что разработанная им методика расчёта сопротивления рыхлению с учётом физических процессов разрушения грунта при объёмном сжатии внедрена в учебный процесс и используется при курсовом и дипломном проектировании, выполнении ВКР студентами направлений, 23.03.02, направленности - Машины и оборудование для городского хозяйства, 23.05.01 направленности Технические средства природообустройства и защиты в чрезвычайных ситуациях, ранее 15.03.02 Технологические машины, а также магистрантами и аспирантами кафедры.

Опытную установку, разработанную Макаровым А.А. для изучения процессов рыхления грунтов ненарушенной структуры в полевых условиях предполагается использовать для дальнейших научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с целью совершенствования мелиоративных рыхлителей на кафедре «Мелиоративные и строительные машины» Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А. Н. Костякова ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

И.о. директора института мелиорации,  
 водного хозяйства и строительства  
 имени А.Н. Костякова, к.т.н., доцент

 Д.М. Бенин

Заведующий кафедрой  
 мелиоративных и строительных машин  
 д.т.н., профессор

 В.И. Балабанов