

На правах рукописи

Макаров Александр Алексеевич

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

Специальность: 4.1.5 - Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ Института мелиорации, водного хозяйства и строительства Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Балабанов Виктор Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева).

Официальные оппоненты: **Максименко Владимир Пантелеевич**, доктор сельскохозяйственных наук, научный консультант Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова» (ФГБНУ ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова)

Голубев Вячеслав Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологических и транспортных машин и комплексов Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Тверская ГСХА)

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова»** (ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ)

Защита состоится «12» декабря 2023 г. в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета, 35.2.030.07 созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, учебный корпус №28, аудитория 201, тел./факс: +7(499)976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета <http://www.timacad.ru>.

Автореферат разослан « »

2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 35.2.030.07,
кандидат технических наук, доцент

Мартынова Наталья Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 агрономическим 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 агрономических 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: Дубенок Н.Н., 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., 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 Голубева В.В., Токушева Ж.Е., Татарникова В.О., Путрина С.А., Ветохина В.И. 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., Максименко В.П., Турсуновым Б.Н., Акимовым Н.В., Каифаш Ференцом и др. Установлено, что обоснованный выбор технологии и периодичности глубокого рыхления, увязка его с другими элементами агромелиоративного комплекса даёт увеличение урожаев сельскохозяйственных культур до 30 %.

Цель исследований – улучшение агрофизических свойств почв 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.

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 работы. 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 энергоемкости 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 др.);
- 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, (формулы 1,2);

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 др.

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, в Московском государственном университете природообустройства, во Всероссийском НИИ гидротехники и мелиорации имени

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» Российского государственного аграрного университета – 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 в Российском государственном аграрном университете – 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследования» рассмотрены и проанализированы причины ухудшения агрофизических свойств неиспользуемых или заброшенных сельхозугодий, проблемы переуплотнения почвенного профиля тяжелых и бесструктурных земель Нечернозёмной зоны России, обоснованы возможности исследования водного режима переуплотнённых почв, применения водно-балансовых расчетов с целью возможности регулирования водного режима в расчётные периоды за счёт изменения объёмов внутрпочвенных влагозапасов. Приведены результаты исследований по оценке состояния поверхности полей, выбывших из сельхозоборота, и агрофизических свойств почвы от поверхности до глубины 0,8 м. Почвы участков дерново-подзолистые оглеенные с маломощным гумусовым слоем, подстилаемые суглинками и глинами с наличием уплотнённой плужной подошвы. Плотность по глубине увеличивается от 1,56 до 1,96 г/см³, пористость понижается от 47,4 до 19,2 %, полная влагоёмкость от 41,5 до 34 %. Низкая пористость тяжелых подзолистых почв служит причиной того, что значения водопроницаемости колеблется в среднем от 0,08 до 0,12 м/сут в пахотном горизонте и от 0,05 до 0,005 м/сут в иллювиальном. Близкие между собой

значения были зафиксированы также и при определении боковой фильтрации этих почв в слое 0,4 - 0,8 м методом восстановления уровня воды в скважине (0,05 – 0,08 м/сут).

Применение мелиоративного глубокого рыхления глинистых и суглинистых почв осушаемых земель хозяйств Талдомского района Московской области привело к увеличению коэффициента фильтрации до 1,0 – 1,5 м/сут, что позволяет повысить запасы продуктивной влаги до 4 – 11 мм, снизить плотность почвы в слое 0,2 – 0,6 м на 13 – 28,8 %, порозность увеличивается до 43,4 %, наблюдается повышение инфильтрации пахотного горизонта. Дано обоснование необходимости проведения комплекса агромелиоративных работ, включая глубокое рыхление.

Приведены результаты обзора существующих конструкций мелиоративных рыхлителей и теорий по глубокому блокированному резанию переуплотненных почвогрунтов. Установлено, что выбор рациональной технологии и периодичности глубокого рыхления объёмным рыхлителем, совместно с другими мероприятиями агромелиоративного комплекса, приводит к получению устойчивых и высоких урожаев сельскохозяйственных культур.

Результаты литературно-патентного анализа позволили выявить влияние глубокого рыхления на положительные изменения агрофизических свойств переуплотненных почв, направления дальнейших исследований по поиску рациональных конструкций рыхлителей с пониженной энергоёмкостью процесса рыхления, на основании чего сформулировать цель и задачи исследования.

В главе 2 «Теоретическое обоснование процесса глубокого рыхления рабочими органами объёмного типа» выполнены теоретические и экспериментальные исследования с целью выбора и обоснования типа и конструкции объёмного рыхлителя, поиска новых технических решений при минимизации энергетических затрат при достаточных полноте и качестве разрыхления грунта, отвечающих агротехническим требованиям, проведён анализ факторов, формирующих потребительские свойства рыхлителя и оказывающих влияние на положительную динамику агрофизических свойств разрыхляемых почв.

Зная параметры движения элементарных почвенных объёмов относительно рабочих поверхностей рыхлительного органа, можно повлиять на силы сопротивления рыхлению, и в конечном итоге на суммарную реакцию грунта. При анализе процесса рыхления предлагается использовать в общем виде математическую модель, отображающую движение элементарных частиц грунта.

Траектория движения частиц почвы m может быть описана в естественной системе координат в виде вектор – функции $\vec{r}(s)$ с параметром s :

$$\vec{r}(s) = x(s) \cdot \vec{i} + y(s) \cdot \vec{j} + z(s) \cdot \vec{k}, \quad (1)$$

где $s = f_s(t)$ – дуговая координата отрезка пути частицы грунта по некоторой траектории; $x(s)$, $y(s)$, $z(s)$ – координаты точек исследуемой траектории как функции от пути частицы s .

Дифференцируя по параметру s эту зависимость, представляющую закономерность движения частиц, и учитывая, что $s = f_s(t)$, получаем зависимость скорости движения частицы грунта от времени t .

Совместив частицу с началом естественных координат, представим движение частицы обрабатываемого пласта (рисунки 1, 2). Векторы $\bar{\tau}$, \bar{n} , \bar{b} – являются единственными векторами этой системы координат, это позволяет использовать при кинематическом анализе перемещения частиц грунта. С помощью векторов $\bar{\tau}$, \bar{n} , \bar{b} можно определить положение частиц в

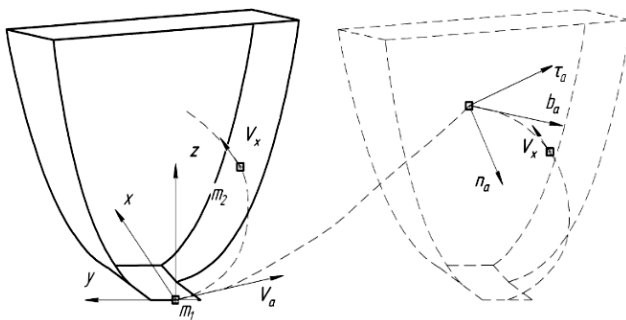


Рисунок 1 – Схема траектории движения частицы почвы в процессе рыхления: $\bar{\tau}$, \bar{n} , \bar{b} – векторы данной системы координат; траектория $m_1 - m_2$ движения частицы m ; V_a – переносная скорость движения рабочего органа; V_x – скорость движения частицы грунта в направлении оси Ox .

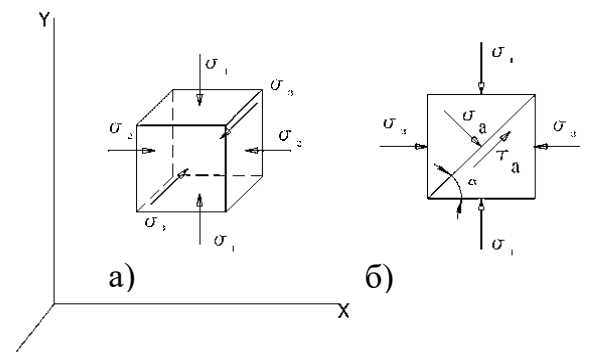


Рисунок 2 – Схема действующих напряжений: а) трёхосное сжатие; б) напряжения, возникающие на наклонной плоскости

пространстве и относительно друг друга. Длину пути s , пройденного частицей грунта m по криволинейной траектории, определим, решая интегральное уравнение, связывающее длину, форму траектории и конкретное положение частицы в пространстве. При перемещении элемента частица испытывает дополнительные динамические нагрузки, обусловленные силами инерции и ускорением частиц грунта. Наряду с этим действуют силы сжатия и трения. Вес объёма грунта, проходящего через рабочий орган:

$$G = h \cdot b \cdot \gamma \int_t L_0 dt, \quad (2)$$

где b – ширина пласта, γ – объёмный вес почвы, h – глубина рыхления, L_0 – длина пути частицы грунта.

Значение силы инерции объёма грунта:

$$F_a = h \cdot b \cdot \gamma \cdot a_i \int_t L_0 dt, \quad (3)$$

где a_i – текущее значение абсолютного ускорения частицы.

Особенностью грунтов при силовом воздействии является то, что характер и величина деформации зависят не только от типа и параметров рабочих органов, но и от физико-механических свойств обрабатываемой среды. Сжатие грунта при заблокированном резании происходит в условиях невозможности бокового расширения, и грунт оказывает давление на боковые стенки массива.

В реальных условиях при работе рыхлителя, имеющего несколько режущих элементов, установленных с разными углами резания, происходит более сложный процесс разрушения и перемещения грунта. Кроме этого, определение параметров массива грунта: a , b , h , L_0 , в формулах 2, 3, затруднительно без экспериментальных исследований для рыхлителей объёмного типа.

Учитывая реальные условия, силу сопротивления рыхлению можно представить, как сумму основных составляющих. Наибольшую величину составляет усилие резания F_p , другие сопротивления также имеют значение, это: силы трения грунта по стали F_{mp1} , внутреннего трения грунта F_{mp2} , сопротивление по преодолению веса грунта F_n , на перемещение грунта в горизонтальном направлении F_{zp} , преодоление сил инерции массы грунта $F_{ин}$:

$$F_T = F_p + F_{mp1} + F_{mp2} + F_n + F_{zp} + F_{ин} \quad ..(4)$$

Сила резания F_p складывается из сил резания лемеха F_{pl} и боковых стоек $F_{рст}$:

$$F_p = F_{pl} + 2F_{рст} \quad (5)$$

Для определения других составляющих сил сопротивления рыхлению необходимо знать объём и массу перемещаемого грунта вверх и вперёд по направлению движения рабочего органа. Достоверные данные по этим величинам необходимо определить экспериментально.

Для теоретической оценки неравномерности глубины рыхления как одного из факторов качества работы был использован метод статистической динамики. Зная параметры рыхлителя, передаточная функция была представлена выражением:

$$P(s) = \frac{x}{x + K(L-t)s + (x-c)s^2}, \quad (6)$$

где L , t , c , x – линейные параметры системы рабочего органа и базовой машины; K – коэффициент пропорциональности; s – комплексная переменная, $s = \pm iw$.

По результатам обследования и профилирования полей были получены случайные функции неровностей по пути $x(L)$, являющиеся одним из главных входных возмущений. По ряду профилей были вычислены корреляционные функции $R(l)$ и спектральные плотности $S(w)$ случайного процесса $x(L)$. Корреляционные функции и спектральные плотности были аппроксимированы выражениями, включающими коэффициенты, характеризующие свойства

функций, интенсивность затухания функции, частоту периодической составляющей и дисперсию. Спектральная плотность на выходе определялась по формуле:

$$S_y(\omega) = [A(\omega)]^2 \cdot S_x(\omega), \quad (7)$$

где $A(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика машины.

На основании дисперсии колебания глубины рыхления D_h , среднее значение колебаний глубины определялось в первом приближении: $a_{cp} \approx \sqrt{2D_h}$. В результате расчёта величина a_{cp} составила 8...12 см. По агротехническим требованиям допускается колебание обработки почвы не более 10 % от глубины, таким образом, при глубине рыхления 0,8 м допустимые отклонения составляют 8 см, расчётные значения амплитуды на выходе незначительно превышают эти колебания. Результаты теоретического анализа позволили наметить пути совершенствования рабочего органа рыхлителя и разработать новую конструкцию рыхлительного оборудования.

В главе 3 «Методика экспериментальных исследований» описываются методы и последовательность проведения опытов, оборудование, приборы, технологическая оснастка и методы обработки экспериментальных данных. Общей методикой предусматривалось проведение лабораторных исследований моделей рабочих органов на грунтовом канале и полевых испытаний опытной установки на грунтах ненарушенной структуры. Были спроектированы и изготовлены модели рабочих органов рыхлителей с различными параметрами (рисунок 3).

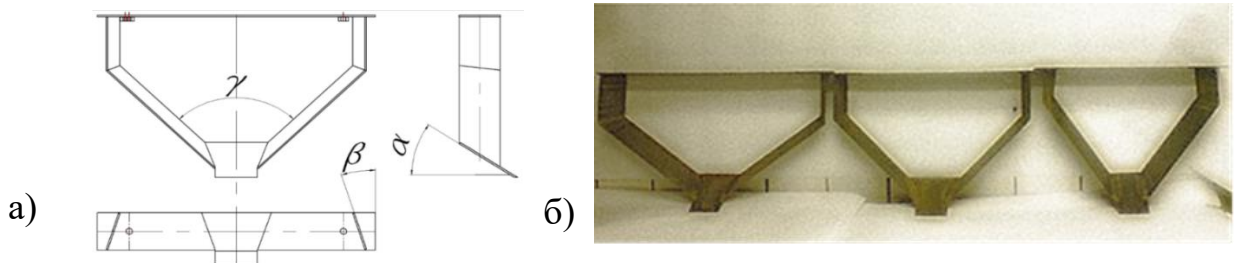


Рисунок 3 – Рабочий орган объёмного рыхлителя с различными углами:

а) угловые параметры рыхлителя; б) модели рабочего органа

В процессе экспериментов измерялось тяговое усилие тензометрическим методом с записью данных при помощи специального программного обеспечения «Тензо-М», «Тензодатчик». Структура разрыхлённого грунта оценивалась методом фрактального анализа и инструментальным ситовым способом.

Опытные данные обрабатывались в среде Mathcad и других прикладных программах. Лабораторные испытания проводились на суглинистом грунте, плотностью 4 удара плотномера ДОРНИИ; полевые на минеральном грунте – суглинке, переходящим на глубине 0,45...0,8 метров в плотную глину, плотностью от 1,4 до 1,94 г/см³. Диапазон влажности составил от 7 до 22 %. Основным измеряемым фактором было тяговое усилие. Для достижения поставленной

цели применялся метод последовательного поиска оптимальной конструкции и основных параметров рабочего органа рыхлителя по принципу «от известного к рациональному».

С целью изучения влияния конструкторско-геометрических параметров рабочего оборудования рыхлителя на энергетические и технологические показатели был выполнен комплекс однофакторных, 2-х факторных и 3-х факторных лабораторных экспериментов с регрессионным анализом результатов, что позволило обосновать выбор более рационального типа рабочего органа (тип 2), (рисунок 4).

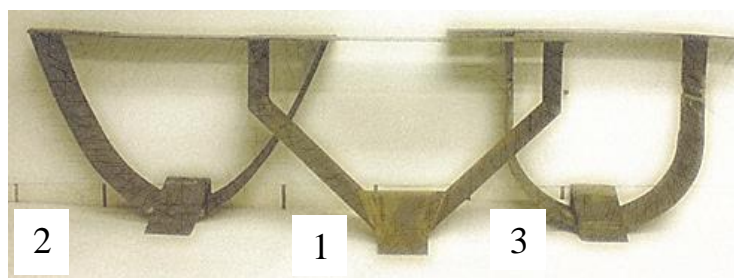


Рисунок 4 – Модели рабочих органов рыхлителя с различной формой рыхлящих стоек: тип 1 – с прямыми; тип 2 – с параболическими; тип 3 – с вертикальными стойками и нижней полукруглой кромкой

Для оценки степени разрыхления методом фрактального анализа после каждого эксперимента делались срезы обработанного грунта, и по фотографиям измерялась фрактальная размерность. Для определения траекторий и направления перемещения слоёв грунта проводились эксперименты с маркировкой цветным мелом слоёв грунта по всей глубине рыхления.

Кроме этого, были проведены исследования этих рабочих органов по определению удельного сопротивления рыхлению, эксперименты со сменным рабочим оборудованием к рабочему органу рыхлителя (тип 2).

Дополнительно, с целью проверки результатов лабораторных опытов, выполнены полевые испытания опытной установки с рабочим органом, имеющим параболические боковые стойки. Установка представляла собой прицепной агрегат к колесному трактору МТЗ-1523. Измерительная аппаратура: тяговое звено с тензометрическими датчиками и ЭВМ для регистрации сигнала.

В главе 4 «Результаты экспериментальных исследований» приведены результаты изменения агрофизических свойств почв с разрыхленной структурой, повышающих потенциальное плодородие и оказывающих влияние на водный баланс разрыхленного слоя. Наблюдается снижение средней плотности в пахотном слое на 12,2 %, увеличение наименьшей влагоёмкости на 12,5 %, водовместимости на 5,7 %. 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.

По результатам 3-х факторного эксперимента, проводимого в лабораторных и полевых условиях, была получена функциональная зависимость в натуральном выражении факторов тягового сопротивления - от углов резания лемеха α и боковых стоек β , углов развала стоек γ :

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

Анализ уравнения показал, что наибольшее влияние на величину тягового сопротивления оказывают углы резания лемеха α и боковых стоек β рабочего органа рыхлителя. Угол наклона стоек γ на усилие влияет в меньшей степени.

Качество рыхления оценивалось однородностью фракций разрыхлённого грунта с преобладанием размеров их от 10 до 40 мм. При больших значениях угла ($\gamma = 110^\circ$) в средней части (между стойками) наблюдается зона недостаточно разрыхлённого грунта в форме почвенных слитых глыб. При меньших значениях угла ($\gamma = 70^\circ$) между стойками образуется уплотнённое ядро, что можно объяснить большими силами сжатия и ограниченными возможностями перемещения грунта вверх от увеличения сил трения, это приводит к значительному повышению тягового сопротивления. С помощью анализа распределения фрактальной размерности грунта до и после рыхления выбран наиболее эффективный угол резания лемеха (рисунок 5).

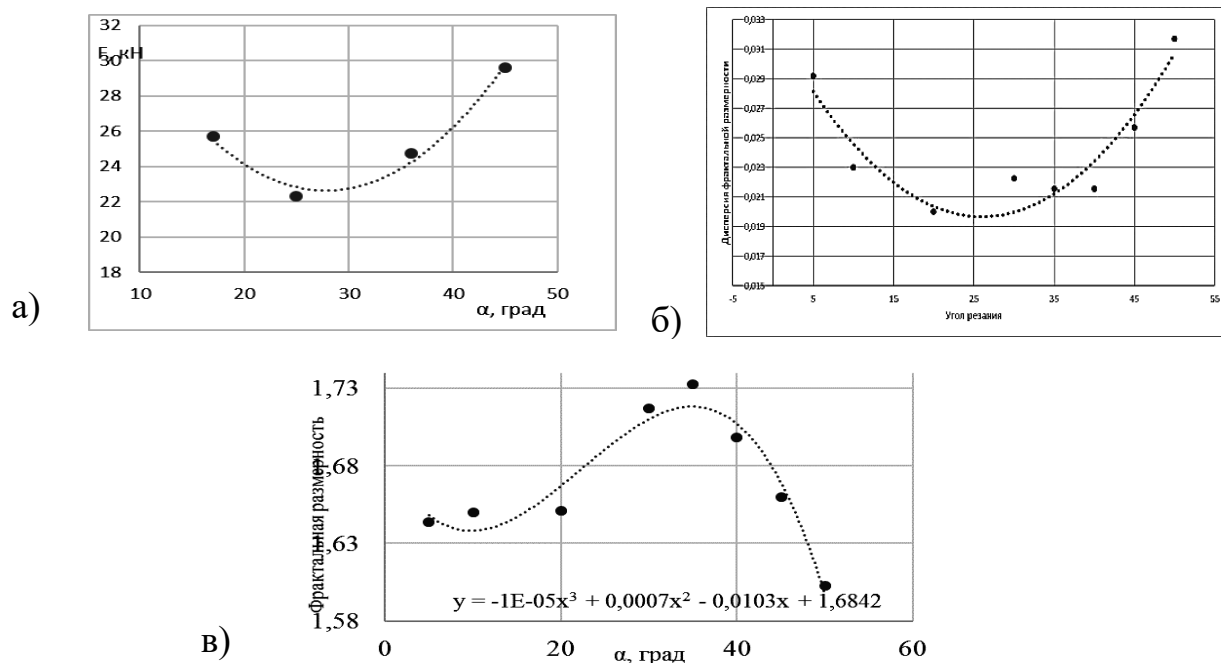


Рисунок 5 – Графики зависимостей угла резания лемеха: а) от тягового усилия; б) от дисперсии фрактальной размерности; в) фрактальной размерности

Дисперсия фрактальной размерности от угла резания лемеха аппроксимирована уравнением:

$$D = 2 \cdot 10^{-5} \alpha^2 - 0,001 \alpha + 0,0327. \quad (9)$$

На втором этапе исследований были проведены сравнительные испытания трёх типов рабочих органов. С каждой моделью был проведён 2-х факторный эксперимент. В качестве основных факторов были выбраны глубина рыхления h и относительная влажность грунта w . В результате экспериментов были получены уравнения регрессии в натуральных единицах:

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

$$F = 3,74 + 23,3h - 0,17w + 1,3hw. \quad (10)$$

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

$$F = -5,56 + 37,86h - 0,77w + 0,86hw. \quad (11)$$

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

$$F = -31,4 + 104,93h - 0,07w + hw. \quad ..(12)$$

Анализ результатов исследования показал, что наиболее значимым фактором является глубина рыхления, менее 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 (рисунок 6).

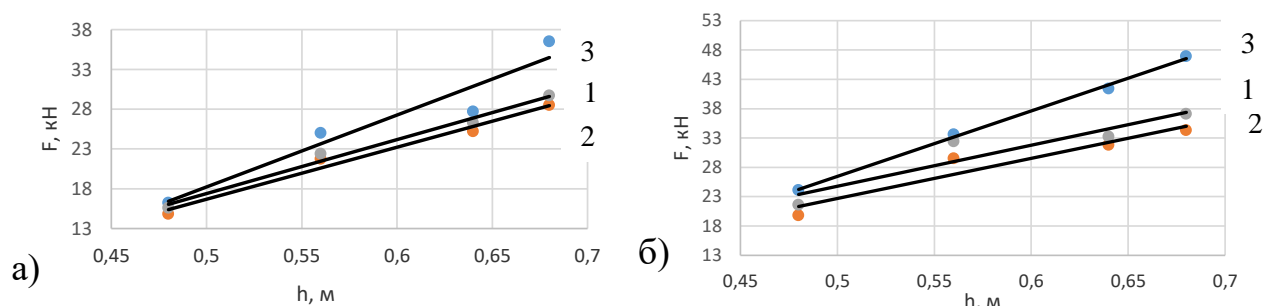


Рисунок 6 – Графики зависимости тягового усилия для моделей 1, 2, и 3 от глубины рыхления: а) при влажности грунта – 8 %; б) при влажности грунта – 18 %

По качеству разрыхления, однородности разрыхлённого грунта, наличию наиболее мелких фракций наиболее рациональным можно считать рабочий орган с параболическими стойками. Наличие крупных фракций грунта до 80 мм составляло 3...5 %.

Сравнительные эксперименты моделей позволили определить значения удельного сопротивления грунта рыхлению $K_{уд}$ и зависимость его от глубины рыхления (рисунок 7).

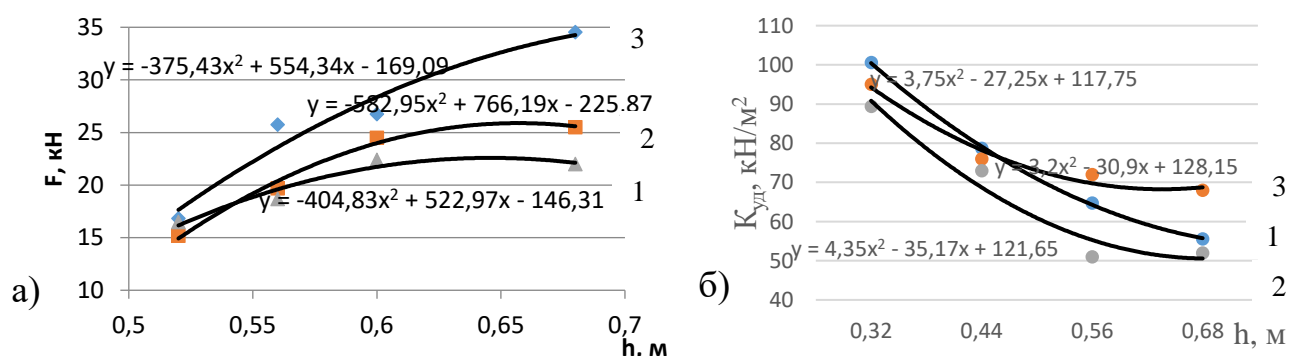


Рисунок 7– Графики зависимости для рыхлителей: а) тягового усилия от глубины; б) удельного сопротивления рыхлению от глубины; 1- с прямыми стойками; 2- с криволинейными стойками; 3 - с U- образными стойками

Установлено, что с увеличением глубины рыхления K_{y0} уменьшается для всех трёх моделей. При достижении глубины 0,68 метра для моделей № 1 и №2 величина K_{y0} стабилизировалась, достигнув значения 52...57 кН/м². Для модели № 3 наименьшее значение $K_{y0}=67$ кН/м² наблюдалось при глубине 0,5 м, а при дальнейшем углублении наметилось некоторое увеличение K_{y0} , что можно объяснить наиболее интенсивным сжатием между боковыми стойками. Анализируя результаты второго этапа экспериментов установлено, что наиболее полно удовлетворяет потребительским свойствам рабочий орган № 2 (с параболическими стойками).

Третьим этапом были продолжены экспериментальные исследования рабочего органа № 2. Исследования влияния влажности на величину тягового усилия и качества рыхления показали, что тяговое усилие F с увеличением влажности w от 7 до 14 % увеличивается линейно увеличивается (рисунок 8).

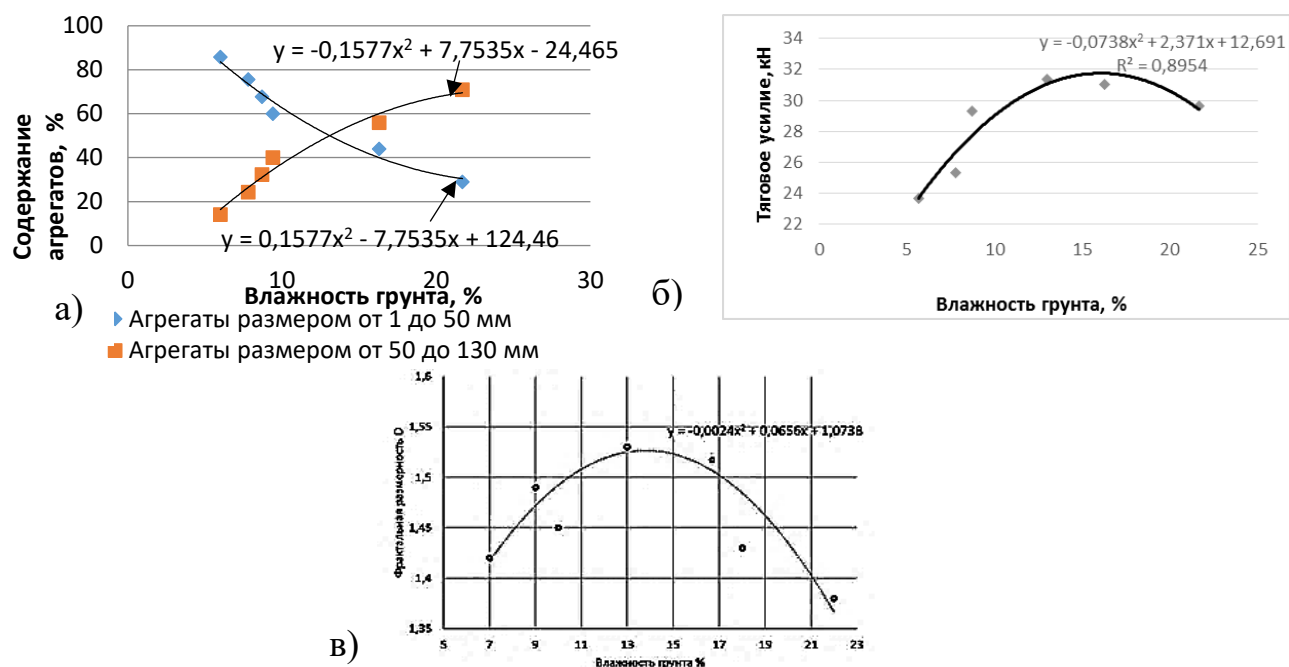


Рисунок 8 – Графики зависимостей: а) размеров агрегатов разрыхлённого грунта; б) тягового усилия от влажности; в) дисперсии фрактальных размерностей от влажности

Начиная с влажности 16...18 % наблюдалось слипание фракций грунта в более крупные агрегаты, способность грунта к разрыхлению заметно уменьшалась. Уменьшение способности к разрыхлению также было отмечено и при полевых испытаниях при влажности грунта около 18...20 %.

На основании результатов опытов можно рекомендовать наиболее оптимальный диапазон объёмной влажности грунта при рыхлении в пределах 10...14 %. Полевыми исследованиями также были подтверждены результаты лабораторных исследований влияния влажности на процесс рыхления и величину тягового усилия.

Опыты с применением методов фрактального анализа практически совпадают с результатами инструментальных измерений. Кроме этого, эти опыты позволили получить

В результате полевых испытаний были получены данные по энергетическим и технологическим показателям процесса при рыхлении. Соотношения полученных результатов параметров h_1 , h_2 , $L_{деф}$ и глубины рыхления h были 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/м².

По результатам измерений до проведения рыхления, по мере увеличения глубины до 0,6 м плотность грунта возрастала, достигая величины 1,93 г/см³ (рисунок 10).

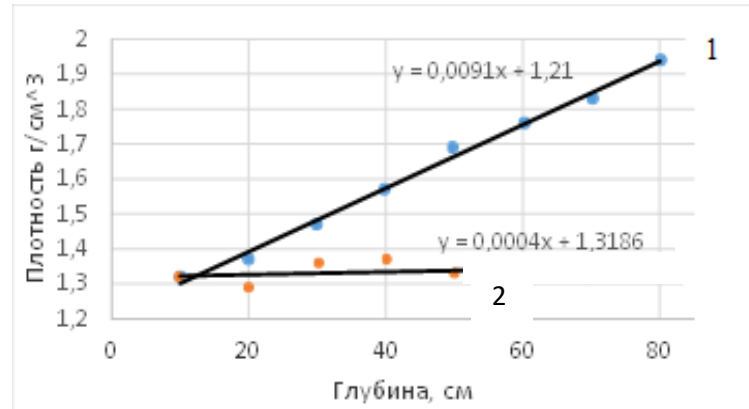


Рисунок 10 – Зависимости плотности грунта от глубины:

1 – до рыхления; 2 – после рыхления

После разрыхления плотность выравнивалась по всей глубине обработки и составляла 1,3...1,35 г/см³. Результаты полевых испытаний подтвердили лабораторные исследования, а также позволили установить ряд характерных особенностей работы рыхлителя на грунтах естественного сложения. В следующем сезоне на участках, где проводилось рыхление, был посажен картофель. Прибавка урожая на этих грядках составила до 25 % по сравнению с контрольными участками.

В главе 5 «Методика расчёта сопротивления рыхлению рабочим органом объёмного типа». Усилие рыхления следует определять, как сумму составляющих сопротивления рыхлению (8). Сила резания F_p складывается из сил резания лемеха $F_{рл}$ и боковых стоек $F_{рст}$ (9). Каждая из этих сил раскладывается на нормальную F_n и силу трения $F_{тр}$, а также другие составляющие (стр.9). В формулы по определению составляющих тягового сопротивления $F_{тр2}$, F_n , $F_{сп}$, $F_{ин}$ входит объём грунта деформируемого, поднимаемого и перемещаемого рыхлителем:

Сопротивление от силы тяжести поднимаемого грунта F_n , Н

$$F_n = V_z \gamma_z g, \quad (16)$$

где V_z – объём поднимаемого грунта, м³, γ_z – объёмный вес, т/м³.

Сопротивление перемещению грунта $F_{сп}$, Н

$$F_{zp} = V \gamma \mu, \quad (17)$$

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

Сопротивление трения грунта по грунту $F_{тр2}$, Н

$$F_{тр2} = xV \gamma, \quad (18)$$

где $x = 0,5 \sin \phi_{г}$, $\phi_{г}$ - угол трения грунта, для глины $\phi_{г}=14\dots19^{\circ}$, $x=0,24\dots0,31$, для суглинка $\phi_{г}=24\dots30^{\circ}$, $x=0,37\dots0,44$.

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

$$F_{ин} = ma = V \gamma a, \quad .. (19)$$

где m – масса перемещаемого грунта, γ – плотность грунта, t/m^3 , a – ускорение, m/c^2 .

Результаты экспериментов позволили оценить процентное соотношение составляющих сопротивления рыхлению, результаты расчётов показали, что большую величину составляет усилие резания и трения грунта о рабочий орган 68,7 % (тип 2) и 72,7 % (тип 1), 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 $K_{уд}$ – коэффициент удельного сопротивления грунта рыхлению, полученный экспериментально, зная площадь поперечного сечения рабочего органа A :

$$F = K_{уд} A. \quad (20)$$

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.

В главе 6 «Определение эффективности применения навесного объёмного мелиоративного рыхлителя для разуплотнения почвенных горизонтов и его экономическая оценка» представлены результаты внедрения и расчёта технико-экономической эффективности применения мелиоративного рыхления с учётом методических рекомендаций по оценке эффективности инвестиционных проектов мелиорации сельскохозяйственных земель РД-АПК 300.01.003-03. 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.

Использование объёмного рыхлителя позволяет сократить число операций технологических процессов при рекультивации, строительстве и эксплуатации мелиоративных систем, а также земель сельскохозяйственного назначения, повысить эффективность работы

дренажных систем, снизить затраты на подготовительные работы. При рыхлении пахотных земель на глубину 0,8 м получены затраты труда меньше на 26,5 %, удельный расход топлива на 26 % и совокупные затраты на 24,6 %. Применение рыхлителей с дополнительным оборудованием обеспечивает получение структуры обработанного слоя в соответствии с агрономическими требованиями, что приводит к повышению урожая пропашных культур до 25 %, а общая экономия от применения данной технологии и прибавки урожая составит 273 тыс. р./га (в ценах на 01.09.2023 года). Срок окупаемости капитальных вложений при выполнении работ новым рыхлителем по сравнению с базовым составит 0,3 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ литературных исследований и результатов полевых опытов показывает, что выбывшие из оборота сельхозугодья с дерново - подзолистыми глеевыми почвами требуют проведения агрономических 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 4).

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 6, 7).

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 20). 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 $\alpha=30\dots34^\circ$, $\beta=15^\circ\dots18^\circ$; $\gamma=90^\circ$. 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. Результаты исследований внедрены в учебный процесс при проектировании рабочих органов рыхлителей данного типа. 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).

Рекомендации производству. На основании результатов экспериментальных исследований, а также полученных патентов на предлагаемую конструкцию рабочего оборудования по разработанным чертежам рекомендуется производство опытной партии мелиоративной машины с разработанным рабочим органом.

Перспективы дальнейшего развития темы. На основании сформулированной гипотезы разрушения грунта при рыхлении от поверхности до глубины 1,2 метра с учётом многослойности строения грунта, различных физико-механических свойств слоёв, а также влажности, предполагается продолжить исследования рабочих органов для глубокого рыхления в направлении снижения энергоёмкости и повышения качества работ.

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.

***Основные положения диссертации опубликованы в изданиях,
рекомендуемых ВАК***

1. Леонтьев, Ю.П. Оценка состояния поверхности и плотности грунта необрабатываемого поля / Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров // Природообустройство. – 2009. – № 4. – С. 89-95.
2. Палкин, Н.А. Совершенствование конструкции объемного мелиоративного разуплотнителя почв / Н. А. Палкин, А.А. Макаров // Природообустройство. – 2010. – № 3. – С. 108-111.
3. Леонтьев, Ю.П. Физические основы рыхления грунта и расчёт тягового усилия объёмного рыхлителя / Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров // Природообустройство. – 2011. – № 5. – С. 87-92.
4. Леонтьев, Ю.П. Влияние параметров мелиоративного рыхлителя на рабочий процесс / Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров // Природообустройство. – 2013. – № 2. – С. 97-101.
5. Леонтьев, Ю.П. Экспериментальные исследования моделей рабочих органов глубокорыхлителей с различной конструкцией боковых стоек / Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров // Природообустройство. – 2013. – № 3. С.81-85.
6. Леонтьев, Ю.П. Оценка сопротивления рыхлению и однородности фракций грунта для рыхлителя с дополнительным оборудованием / Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров // Природообустройство. – 2016. – № 2. – С. 82-86.
7. Балабанов, В.И. Обоснование конструкции рабочего органа рыхлителя объёмного типа для
улучшения агрофизических свойств почвы / В. И. Балабанов, Ю. П. Леонтьев, А. А. Макаров [и др.] // Мелиорация и водное хозяйство. – 2023. – № 2. – С. 23-27.

Глава в коллективной монографии

8. Гидромелиорация земель и водное хозяйство / Х. А. Абдулмажидов, Н. А. Александров, М. С. Али, А.А. Макаров [и др.]. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2022. – 358 с.

Патенты на изобретения и полезные модели

9. 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.

10. 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.

11. Патент № 2484610 С1 Российская Федерация, МПК А01В 15/00, А01В 13/10. Объёмный мелиоративный рыхлитель: № 2011152071/13: заявл. 21.12.2011 : опубл. 20.06.2013 / А.А. Макаров, Ю.П. Леонтьев.

12. Патент на полезную модель № 136673 U1 Российская Федерация, МПК А01В 13/10. Объёмный мелиоративный рыхлитель с дополнительным оборудованием : № 2013119859/13 : заявл. 23.08.2013 : опубл. 20.01.2014 / Ю.Г. Ревин, Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров.

13. 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.

В других изданиях

14. Балабанов, В.И. Оценка неравномерности глубины рыхления мелиорируемых земель рабочим органом мелиоративного рыхлителя / В.И. Балабанов, Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров // Агроинженерия. – 2021. – № 6(106). – С. 20-25.

15. Леонтьев, Ю.П. Глубокое рыхление - важное мелиоративное мероприятие, улучшающее продуктивность почвы / Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров // Вопросы Мелиорации. – 2013. – № 1-2. – С. 36 – 43

16. Леонтьев, Ю.П. Результаты обследования полей, выбывших из сельскохозяйственного оборота / Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров // Инновационные технологии и экологическая безопасность в мелиорации: Сборник научных докладов VI – международной (10 всероссийской) конференции [Сост. С.Е. Герасимова]; ФГБНУ ВНИИ «Радуга». – Коломна: Инлайт. – 2013. – С. 192-196.

17. Леонтьев, Ю.П. Экспериментальные исследования рабочего органа мелиоративного рыхлителя на минеральных грунтах естественного сложения / Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров // «Современные проблемы использования мелиорированных земель и повышения их плодородия». ГНУ ВНИИМЗ РОССЕЛЬХОЗАКАДЕМИИ. – г. Тверь. – 2014. – С. 246-252.

18. Леонтьев, Ю.П. Определение удельного сопротивления рыхлению грунта объёмным рыхлителем / Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров // Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2016. – С. 26-29.

19. Леонтьев, Ю.П. Исследования объёмного рыхлителя с целью определения величины отдельных составляющих сопротивления рыхлению. – Логистика, транспорт, экология – 2016. Материалы международной научно-практической конференции/Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров //Ереван, 2016. – С. 153-162.

20. Цветков, И.В. Моделирование режимов работы объёмного рыхлителя методом фрактального анализа / И.В. Цветков, Ю.П. Леонтьев, А.А. Макаров [и др.] // Доклады ТСХА. – 2018. – С. 154-156.

21. Макаров, А.А. Оценка физико-механических свойств грунта по глубине обработки объёмным рыхлителем / А.А. Макаров, Ю.П. Леонтьев // Мелиорация земель - неотъемлемая часть восстановления и развития АПК Нечерноземной зоны Российской Федерации: Материалы международной научно-практической конференции, Москва, 24–25 октября 2018 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2019. – С. 225-229.

22. Леонтьев, Ю.П. Влияние физических свойств грунта на величину сопротивления рыхлению / Ю. П. Леонтьев, А.А. Макаров // Доклады ТСХА, Москва, 06–08 декабря 2018 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. – С. 118-121.