Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«КУРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР»
(ФГБНУ «Курский ФАНЦ»)

Гуреев И.И., Нитченко Л.Б., Прущик И.А.

**УГЛУБЛЕННАЯ АДАПТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА
ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В ЦЕНТРАЛЬНО-ЧЕРНОЗЁМНОМ РЕГИОНЕ**

Курск 2021

УДК 631.58

DOI 10.18411/978-5-907407-39-8-238

ББК 41.40

Гуреев И.И. Углубленная адаптация технологий производства зерновых культур в Центрально-Чернозёмном регионе / И.И. Гуреев, Л.Б. Нитченко, И.А. Прущик (Под редакцией И.И. Гуреева). – Курск: ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», 2021. – 238 с.

Рецензенты:

Пигорев И.Я., профессор кафедры растениеводства, селекции и семеноводства, доктор с.-х. наук ФГБОУ ВО «Курская ГСХА им. профессора И.И. Иванова»;

Жердев М.Н., директор ФГБУ «Центрально-Чернозёмная машиноиспытательная станция», канд. с.-х. наук.

Печатается по решению Учёного совета ФГБНУ «Курский ФАНЦ», протокол № 5 от 10 июня 2021 г.

ISBN – 978-5-907407-39-8

© ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», 2021 г.

Резюме. В монографии изложены основы производства зерновых культур с углубленной адаптацией технологий к условиям произрастания растений, сужающимся от объёмной агроэкологической провинции до конкретного поля внутри неё. Показаны направления реализации углубленной адаптации через элементы агротехнологий (севооборот, обработку почвы, удобрение и др.) в соответствии с принципами экономико-экологической эффективности. Применительно к решению земледельческих задач описан математический способ неопределённых множителей Лагранжа, используемый для комплексной минимизации ресурсного обеспечения агротехнологий. Подробно представлены метод и прибор листовой функциональной диагностики потребности растений в элементах питания, используемые для адаптивной системы удобрения культур. Посредством инновации впервые получают диагностические данные с учётом взаимодействия между питательными веществами в растениях. Особое внимание уделено вопросам предотвращения техногенной деградации почвы, актуальность чего возросла вследствие масштабного применения в земледелии высокопроизводительной энергонасыщенной, но тяжёлой техники. Приведены новые конструкции почвообрабатывающих и посевных машин с элементами защиты почвы от эрозии и минимизации механического воздействия на неё. Описаны возможности зарегистрированной компьютерной программы для автоматизированного проектирования механизированных технологий производства зерновых культур углубленной адаптации.

Монография предназначена для научных работников и специалистов научно-исследовательских учреждений, занимающихся вопросами совершенствования механизированных технологий производства зерновых культур, а также для преподавателей, аспирантов и студентов сельскохозяйственных ВУЗов и колледжей. Будет полезна специалистам сельского хозяйства, ориентированным на практическое земледелие.

Подготовлено сотрудниками лаборатории адаптивных агротехнологий и средств их механизации ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (Гуреев И.И., введение, главы 1-9, заключение; Нитченко Л.Б., Прущик И.А., глава 2) под редакций доктора технических наук, профессора, Заслуженного изобретателя РФ Гуреева И.И.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Принципы повышения экономико-экологической эффективности производства зерновых культур на основе углубленной адаптации технологий	11
2 Методологический подход оптимизации ресурсного обеспечения адаптивных технологий	37
2.1 Взаимодействие основных элементов технологий и ресурсосбережение	37
2.2 Комплексная минимизация ресурсного обеспечения производства зерновых культур	42
3 Формирование вариантов технологий углубленной адаптации	50
3.1 Обработка почвы – основа углубленной адаптации технологий ...	50
3.2 Предпосылки минимизации обработки почвы	57
3.3 Алгоритм компоновки адаптивных вариантов технологий	63
4 Актуальность микроудобрений в технологиях углубленной адаптации	73
4.1 Виды микроудобрений	73
4.2 Особенности механизации подкормок зерновых культур	80
5 Диагностика потребности растений в элементах питания	90
5.1 Способы диагностики	90
5.2 Теоретические основы оптимизации питания растений	94
5.3 Приборное обеспечение диагностики	101
6 Новые машины для комплексной механизации технологий углубленной адаптации	108
6.1 Роторный щелеватель для щелевания посевов зерновых культур ...	113
6.2 Культиватор-плоскорез для безотвальной обработки почвы	117
6.3 Сеялка прямого посева зерновых культур	124
6.4 Рабочие органы для полосовой обработки почвы <i>STRIP-TILL</i>	133
7 Экологические проблемы технического обеспечения технологий	145
7.1 Экологическая оценка эффективности использования техники ...	145

7.2 Пути минимизации техногенной деградации почвы	157
7.3 Совершенствование экономико-экологических показателей использования техники	173
8 Автоматизация проектирования механизированных технологий углубленной адаптации	181
9 Государственные испытания адаптивных вариантов технологий производства зерновых культур	187
9.1 Оптимизация питания ячменя	187
9.2 Оптимизация питания озимой пшеницы	193
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	204
ЛИТЕРАТУРА	208
ПРИЛОЖЕНИЯ	222

ВВЕДЕНИЕ

Зерновая отрасль определяет продовольственную безопасность страны. Эффективность производства зерна зависит от комплекса природно-климатических, научно-технических, технологических и организационно-экономических факторов с применяемыми системами земледелия [1]. Мировой опыт показывает, что за последние десятилетия в сельском хозяйстве произошли качественные изменения содержания интенсивных технологий производства зерна, позволяющих снизить до 40% себестоимость его производства при росте урожайности до 50% [2].

Благоприятными почвенно-климатическими условиями для получения высоких урожаев качественного зерна обладает Центрально-Чернозёмный регион (ЦЧР), расположенный в центре европейской части России. Площадь его территории 167,8 тыс. км², население – 7,3 млн. чел. В состав региона входят Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая и Тамбовская области.

Климат региона умеренно континентальный, в западной зоне достаточно увлажненный, а в юго-восточной – более сухой, нередко засухи. Годовая сумма осадков изменяется от 575 мм на северо-западе до 420 мм на юго-востоке, т.е. разница величиной 155 мм достаточно существенная [3]. Средняя температура июля колеблется от +19 до +20°C, января от –9 до –11°C. Продолжительность вегетационного периода 175-185 дней. Рельеф выражен Среднерусской возвышенностью и Окско-Донской низменностью.

Более 80% территории ЦЧР составляют сельскохозяйственные угодья, из которых 89% принадлежит сельскохозяйственным предприятиям. В структуре сельхозугодий 82% занимает пашня, 3,9% сенокосы, 12,8% – пастбища. Рост сельскохозяйственного производства основывается не на расширении используемых земель, а на интенсификации имеющихся угодий.

Ценнейшее богатство региона – почвы. Только на западе Курской и на севере Тамбовской области распространены серые лесные и подзолистые почвы. На всей остальной территории (примерно 80%) – разного типа

черноземы с содержанием гумуса от 4-6 до 10-12% и мощностью горизонта в отдельных районах до 120-130 см. Черноземы здесь образовались на рыхлых песковидных суглинках и легко поддаются водной эрозии. Поэтому в некоторых районах эродировано до 60% земель и борьба с образованием оврагов является важнейшей задачей земледельцев.

Плодородные почвы, обеспеченное на значительной части региона увлажнение, тёплый длительный период года создают возможности для получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур.

Более половины посевной площади занято зерновыми культурами, техническими – примерно 5% и кормовыми свыше 25%. В зерновом клине преобладают озимая и яровая пшеница, ячмень. По средней многолетней урожайности зерновых ЦЧР несколько уступает Северному Кавказу, а по валовой продукции на 100 га сельскохозяйственных земель занимает первое место в Российской Федерации.

Основными зерновыми культурами в ЦЧР являются озимая пшеница и яровой ячмень. Производство их в регионе занимает разную, но значительную долю пашни – от 30 до 70%. Причиной этого являются следующие факторы [4]:

- множество направлений использования зерна (пищевое, фуражное, фармацевтическое, парфюмерное и др.) и широкие возможности его сбыта на рынке;
- приспособленность озимой пшеницы и ячменя к выращиванию в переменных почвенно-климатических условиях региона;
- на возделывании зерновых больше, чем на другие культуры, сказались достижения селекционного и технологического процессов;
- высокий генетический потенциал зерновых, позволяющий в настоящее время получать урожайность зерна до 10 т/га и более;
- выращивание всех видов зерновых с использованием единой системы машин;

- повышенная в сравнении с другими культурами производительность труда при возделывании зерновых.

Перспективным направлением повышения продуктивности зерновых культур являются технологии в адаптивно-ландшафтных системах земледелия, направленные на производство продукции экономически и экологически обусловленного качества. Сущность адаптивно-ландшафтного земледелия применительно к выращиванию зерновых культур заключается в эффективном использовании почвенно-климатических условий региона для получения высоких урожаев качественного зерна при соблюдении требований экологической безопасности.

Ключевые особенности адаптивно-ландшафтного земледелия показаны на рисунке [4]:

Рисунок – Особенности адаптивно-ландшафтного земледелия

Успеху земледелия сопутствуют современные достижения научно-технического прогресса в виде интенсивных сортов и гибридов сельскохозяйственных культур, широкого спектра принципиально новых минеральных и органоминеральных удобрений, стимуляторов роста и средств

защиты растений. На полях работает надёжная и высокопроизводительная техника, осуществляющая комплексную механизацию агротехнических приёмов.

Всё это стимулировало рост производительности труда и значительное повышение экономической эффективности производства за счёт более высокой урожайности и улучшения качества земледельческой продукции.

Однако новые положительные свойства используемых ресурсов явились причиной их удорожания. К тому же, вследствие интенсификации агротехнологий обострились экологические проблемы.

Так, в ЦЧР в широких масштабах применяют физиологически кислые формы минеральных удобрений, вследствие чего формируется кислая среда почвенного раствора, негативно сказывающаяся на урожайности и качестве последующих культур севооборота. Несовершенна диагностика потребности растений в удобрениях. Микроудобрения применяют по рекомендациям производителей без оглядки на их содержание в конкретных полях, что способствует накоплению в почве тяжёлых металлов.

Борьбу с вредными организмами в посевах культур осуществляют применением пестицидов, одновременно негативно влияющих на окружающую среду. Остаточные количества их в продукции растениеводства увеличивают риски для жизни и здоровья граждан, растительности и животного мира.

Ходовые системы многократно используемой энергонасыщенной и в то же время тяжёлой техники переуплотняют почву, снижая плодородие и усиливая вероятность эрозионных процессов.

Перечисленные проблемы усугубляются решением Всемирной торговой организации (ВТО) об устранении прямых субсидий на производство сельскохозяйственной продукции и ориентации аграрных цен на цены мирового рынка [4].

Всё это вместе свидетельствует о необходимости перехода на новый уровень минимизации использования ресурсов и повышения экологической

безопасности в производстве продовольственного зерна для обеспечения его конкурентоспособности на мировом рынке и защиты окружающей среды.

Предшествующие разработки в адаптивно-ландшафтном земледелии ориентированы на подзоны с почвенно-климатическими условиями на уровне агроэкологической провинции. Но основной объект земледелия – почвенный покров внутри выделенных подзон отличается высокой территориальной пестротой по физическим свойствам, что не учитывается при разработке агротехнологий и понижает уровень их адаптивности. С развитием цифровых технологий возможности дальнейшей адаптации земледельческой отрасли существенно расширились и гарантией успеха совершенствования земледелия являются принципы углубленной адаптации технологий производства зерновых культур к исходному состоянию почвы конкретного поля.

Для получения надлежащего экономико-экологического эффекта от использования в земледелии нового направления потребовалось решить исследовательские задачи по обоснованию методологического подхода углубленной адаптации через элементы агротехнологий (севообороты, обработку почвы и т.п.), сформировать варианты технологий углубленной адаптации, обосновать пути их экологически безопасной комплексной механизации и др.

1 Принципы повышения экономико-экологической эффективности производства зерновых культур на основе углубленной адаптации технологий

Хронология развития систем земледелия свидетельствует о нарастающем с течением времени уровня их адаптации к природно-ресурсному потенциалу. Каждый последующий этап адаптации характеризовался ростом продуктивности и экологической безопасности ведения земледельческой отрасли (рисунок 1.1).

Рисунок 1.1 – Хронология адаптации систем земледелия к ландшафту

Так, довоенному и послевоенному периоду советской истории XX века свойственно господство единой системы земледелия, периодически трансформируемой в паровую, травопольную, пропашную и др. Такое толкование проблемы вело к неизбежному кризису, вследствие очевидности ошибок от использования единой системы земледелия на огромной территории.

В 60-х годах прошлого века сначала Т.С. Мальцевым, а затем коллективом ВНИИ зернового хозяйства под руководством А.И. Бараева, осуществлён прорыв из патриархального и заведомо ущербного для почвы уклада и разработана почвозащитная система земледелия. Впервые из единой, распространившейся на всю страну системы земледелия, выделено экологически ориентированное направление защиты почвы от эрозии, за короткий срок доказавшее своё преимущество на многих миллионах гектаров пашни Советского Союза.

В 80-е годы элементы почвозащитной системы интегрированы в зональные системы земледелия, где они получили более узкую территориальную дифференциацию. В каждой области, крае и автономной республике были изданы рекомендации с такими названиями.

К 90-м годам относится начало развития систем земледелия адаптированных к группам земель в пределах агроэкологической провинции, под которой понимается зона с особенностями почвенного покрова связанного с микроклиматом. Эти системы названы адаптивно-ландшафтными.

Современные достижения научно-технического прогресса позволяют оперативно принимать решения по управлению продукционным процессом сельскохозяйственных культур с учётом обширной информации о вариабельности среды обитания растений внутри агроэкологической провинции. Из этого следует, что наиболее кардинальным путём совершенствования систем земледелия является углубленная адаптация

агротехнологий к условиям произрастания, сужающаяся от объёмной агроэкологической провинции до конкретного поля внутри неё.

Таким образом, методологической основой получения продовольственного зерна высокого качества при минимизации использования ресурсов и соблюдении требований экологической безопасности является эффективный инновационный подход – углубленная адаптации агротехнологий возделывания зерновых культур к конкретным условиям внутри агроэкологической провинции.

Предметом углубленной адаптации является множество сочетаний показателей исходного состояния почвы, к которому дифференцированно применяют варианты агротехнологий адаптированные к конкретным условиям. Понятие адаптивности технологий интегральное, так как включает в себя составляющие элементы, основными из которых являются севооборот, обработка почвы, удобрения, средства защиты растений и механизации. Углубленная адаптация реализуется через элементы технологий в соответствии с принципами экономико-экологической эффективности [5] (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Принципы экономико-экологической эффективности углубленной адаптации элементов технологий

Элемент технологии	Содержание принципа
Севооборот	Проектирование в неразрывной связи с системой защиты сельскохозяйственных культур от сорняков
Обработка почвы	Минимизация интенсивности в соответствии с исходным состоянием обрабатываемой почвы
Удобрение	Применение согласно диагностики потребности растений в макро- и микроэлементах питания на планируемую урожайность
Защита растений	Использование зональных моделей фитосанитарного состояния посевов по данным обследования на заражённость вредными организмами
Средства механизации	Осуществление технологических процессов с минимальными затратами энергии, выполнение агротехнических совместимых приёмов комбинированными машинами за один проход

Севооборот – определяющий элемент технологий.

В качестве одной из мер устойчивости экосистемы является биоразнообразие. Чем разнообразнее экосистема по свойствам сообщества, тем она устойчивее относительно колебаний внешней среды.

Существует противоречие между продуктивностью агроландшафта, выражающейся урожайностью и качеством сельскохозяйственных культур, и устойчивостью экосистемы. В монокультуре биоразнообразие равно нулю и она абсолютно неустойчива. Устойчивой её делает внешнее управление (обработка почвы, защита растений и др.), на что расходуются значительные материальные и финансовые ресурсы, т.е. агротехника высокоурожайных культур ориентирована на стабилизацию неустойчивой популяции монокультуры.

Разумный компромисс между противоположными ситуациями состоит в севообороте. По меркам природы севооборот – малое подобие биоразнообразия, но, тем не менее, эффект от него колоссальный. Это самый дешёвый и самый эффективный приём в земледелии. Правильно спроектированный севооборот – главное условие культурного земледелия, при котором природные факторы способствуют максимальной реализации продуктивности выращиваемых культур.

По сравнению с монокультурой севооборот обеспечивает не только рациональное использование пашни, но и повышение плодородия почвы. Наибольший эффект факторов интенсификации земледелия (сорт, обработка почвы, удобрения, орошение и др.) достигается только в условиях севооборота. По мере развития производительных сил в земледелии роль чередования культур лишь возрастает [6].

Даже в условиях специализации и интенсификации севооборот остается ключевым звеном современных систем земледелия, обеспечивающим стабильное повышение урожайности культур и производство высококачественной сельскохозяйственной продукции. Он позволяет эффективно использовать минеральные и органические удобрения, а также

успешно решать задачи по защите почвы от эрозии, биологизации и экологизации земледелия в современных условиях [7].

Биологизация севооборотов за счет заделки в почву сидеральных культур и побочной продукции способствует увеличению содержания в почве азота и органического вещества, сокращает использование удобрений и пестицидов, что является одним из условий ресурсосбережения [8]. В условиях севооборота оздоравливается фитосанитарная обстановка и потенциальная засорённость культур в 3-5 раз ниже, чем при беспорядочном или бессменном их выращивании [9].

Классическое определение севооборота включает в себя научно обоснованное чередование сельскохозяйственных культур (и пара) по полям и во времени [10]. Общая закономерность функционирования севооборота заключается в том, что положительные его свойства возрастают с усилением различий чередующихся культур по биологии и технологии выращивания.

Однако сложившаяся в настоящее время ситуация с засорённостью посевов не может быть радикально разрешена лишь севооборотом и другими агротехническими приёмами. Поэтому в дополнение к приёмам агротехники используют химические средства защиты растений (гербициды), которые облегчают борьбу с сорняками и позволяют сохранить урожаи сельскохозяйственных культур.

Избирательность всех гербицидов обусловлена биохимическими факторами. Являясь биологически активными веществами, гербициды имеют различные периоды распада и некоторые из них обладают продолжительным последствием.

Значительный прогресс в химической защите культур от сорняков достигнут с появлением новых видов гербицидов, в частности, производных сульфонилмочевины. Применяют их как в зерновом производстве, так и при возделывании других культур. Они обладают многими положительными свойствами:

- низкой нормой расхода – от 1-2 до нескольких десятков граммов на гектар;
- хорошей селективностью;
- невысокой стоимостью;
- не оказывают сильного токсичного воздействия на обрабатываемые культуры и животных;
- широким диапазоном сроков применения;
- отсутствием агрессивности в баковых смесях с другими препаратами;
- относительно незначительными экологическими последствиями.

Однако у ряда препаратов на основе сульфонилмочевины явно выраженное последствие. Практические опыты подтверждают, что остатки таких гербицидов способны сохраняться в почве достаточно долгий период и затем влиять на последующие культуры в севообороте. Из них наиболее стойкие хлорсульфурон и метсульфуронметил, которые могут сохраняться в почве несколько лет, ограничивая возможность возделывания чувствительных культур в севообороте [11].

Основополагающее свойство гербицидов состоит в том, что их эффективность тем выше, чем больше биологические различия между защищаемой культурой и сорняками. При наличии продолжительного и значимого последствия гербициды вступают в противоречие с севооборотом, так как в силу закономерности его функционирования последующая культура по биологическим свойствам, как правило, подпадает под действие гербицидов. Противоречия усугубляются с ростом продолжительности последствия.

Факт последствия остаточных количеств некоторых гербицидов и их метаболитов на последующую культуру известен давно. Однако для полевых севооборотов это не имело практического значения до тех пор, пока доля таких гербицидов в производстве была невелика.

Анализ современного состояния обеспеченности гербицидами земледелия Российской Федерации показал, что общее количество препаратов

разрешённых к применению на территории РФ превышает 1800 [12]. Из гербицидов, применяемых на озимой пшенице и ячмене, соответственно, 54 и 27% имеют ограничения по воздействию на чередующиеся культуры севооборотов (рисунок 1.2).

Рисунок 1.2 – Защита основных сельскохозяйственных культур гербицидами с последствием

Из практики сельскохозяйственного производства эти последствия могут выражаться как значительным угнетением культур, так и полным их уничтожением, что существенно сказывается на величине и качестве урожая. Объёмы применения гербицидов с продолжительным последствием и приносимый тем самым ущерб свидетельствует о необходимости учёта данного негативного явления при проектировании адаптивных севооборотов. Поэтому классическое определение севооборота подлежит корректировке в следующей редакции – **научно обоснованное чередование сельскохозяйственных культур (и пара) по полям и во времени, обеспеченных химическими средствами защиты растений от сорняков** [13].

Руководствуясь данным определением, проектировать адаптивные севообороты следует в неразрывной связи с системой защиты сельскохозяйственных культур от сорняков. Прежде всего, необходимо стремиться использовать те гербициды, которые обладают минимальным последствием на последующую культуру в севообороте. Кроме того, для максимального сохранения позитивных свойств севооборота необходимы меры, способствующие ускорению детоксикации гербицидов в почве.

На скорость распада препаратов влияет много факторов: агротехнические мероприятия, тип и структура почвы, её влажность и кислотность, температурный режим и др.

Так, сокращают срок последствия препаратов повышенные влажность и кислотность почвы. Дефицит влаги, щелочная реакция почвенного раствора и низкие температуры во время вегетации растений наоборот – увеличивают продолжительность последствия. Опасность последствия возрастает при использовании в течение нескольких лет препаратов с одним действующим веществом, которое медленно разлагается.

Для управляемого понижения рисков последствия следует чётко соблюдать регламент и технологию применения гербицидов, в рамках которых использовать минимальные их дозировки, а также баковые смеси с другими действующими веществами для получения дополнительных преимуществ. Применением смесей удаётся не только уменьшить дозы действующих веществ, но и замедлить приспособляемость и возникновение устойчивых форм сорной флоры.

Необходимо ужесточить регламент правильной эксплуатации опрыскивающей техники и своевременно производить замену узлов и деталей, выработавших ресурс. Следует исключать перекрытия между рабочей шириной захвата техники. Повышенные дозы препаратов на перекрываемых участках, а также неравномерное нанесение рабочего раствора изношенными форсунками увеличивает риск последствия гербицидов.

Эффективным инструментом понижения продолжительности последствий гербицидов является вспашка, проводимая в качестве основной обработки почвы [11].

Обработка почвы – следующий по значимости элемент технологий.

Это многофункциональный агротехнический приём (рисунок 1.3).

Рисунок 1.3 – Многофункциональность обработки почвы

Применение обработки позволяет рыхлить переуплотнённую почву, подавлять вредные организмы, а также создавать аэробные условия, способствующие за счёт минерализации органического вещества почвы восполнять недостающие элементы питания растений.

Значимость обработки усиливается тем, что в технологиях она первая в исполнении и по содержанию собственных свойств оказывает влияние на последующие приёмы и насыщенность технологий ресурсами. От выбора способа обработки во многом зависит состав технологий и, соответственно, затраты ресурсов на их исполнение.

Однако у любой обработки почвы, наряду с полезными свойствами, присутствуют и отрицательные последствия. Как правило, это переуплотнение почвы движителями тракторов и разрушение её структуры рабочими органами при чрезмерной интенсивности механического воздействия. Следовательно, при решении вопроса о применении конкретного способа обработки следует

проводить углубленный анализ потребностей в её функциях в текущих агроландшафтных условиях.

Важным условием ресурсосбережения, сохранения и улучшения плодородия почвы является научно обоснованный отказ от преобладания энергоёмкой глубокой вспашки и замена её минимальными обработками. Минимизация обработок, выполненная в подходящих условиях, обладает многими положительными свойствами. Она способствует снижению минерализации и потерь гумуса, локализации питательных веществ в верхнем слое почвы, увеличению накопления и сохранения влаги в почве в засушливых условиях и др. [14], [15].

Учитывая положительные свойства минимальных обработок, при адаптации технологий к особенностям ландшафта интенсивность обработки целесообразно минимизировать, но в допустимых пределах и, тем самым, предотвратить затратное технологически не обусловленное излишнее расходование всех видов ресурсов, создавая предпосылки для предотвращения техногенной деградации почвы [16].

Одним из критериев возможной минимизации обработки может служить сравнение оптимальной плотности почвы для возделываемой культуры с равновесной. Если оптимальная для культуры плотность соответствует равновесной, то с учётом фитосанитарной ситуации механическая обработка почвы может быть сокращена или отменена [17].

В то же время следует помнить, что минимизация обработки сопряжена с необходимостью компенсации усиливающегося дефицита минерального азота и применения гербицидов из-за усиления засорённости, а также фунгицидов вследствие усиления развития болезней [14].

Научной основой для минимизации обработки служит установленная закономерность – почва с содержанием гумуса 3,5% и выше не нуждается в интенсивных обработках для регулирования агрофизических свойств. Она способна под влиянием естественных факторов поддерживать равновесную плотность оптимального значения для большинства культурных растений.

К такой почве относится большинство чернозёмов. Для озимых и яровых зерновых оптимальная плотность почвы на обыкновенных чернозёмах составляет 1,0-1,2 г/см³, на южных чернозёмах и тёмно-каштановых почвах – 1,2-1,3 г/см³. В этих же пределах находятся показатели равновесной плотности большого количества чернозёмов, что свидетельствует о перспективе применения на них энерго- и ресурсосберегающих приёмов обработки почвы [18], [19].

Пределом минимизации обработок является прямой посев (нулевая обработка «*no-till*»), предполагающий в период от уборки предшествующей до посева следующей культуры исключение любого механического воздействия на почву, кроме нарезки борозд для заделки семян. Обязательным условием прямого посева является использование против сорняков высокоэффективных гербицидов, сохранение стерни и равномерно разбросанной измельчённой соломы предшественника на поверхности поля [8].

Вероятность эффективного применения минимальных обработок возрастает в условиях равнинного рельефа, на почвах лёгкого и среднего гранулометрического состава со средним или высоким уровнем плодородия почвы, при низкой засорённости многолетними сорняками, дефиците водного режима и хорошей водопроницаемости почв. Минимальные обработки, вплоть до прямого посева, предпочтительны в засушливых условиях. С ростом влагообеспеченности территории интенсивность обработки почвы должна возрастать [14], [20]-[22].

Значительное влияние на формирование урожая и качества зерновых культур оказывают погодные условия.

Так, содержание белка, количество и качество клейковины в зерне озимой пшеницы находится в тесной зависимости от температурного режима и влагообеспеченности в период её вегетации. При повышенной влажности почвы замедляется поступление азота в растения, в результате чего в зерне уменьшается количество белка и увеличивается содержание крахмала.

Избыточное выпадение осадков и пониженный температурный режим (менее $+10^{\circ}\text{C}$ в период налива и созревания зерна) ухудшают нормальное передвижение пластических веществ из стебля и листьев в зерно, что способствует снижению качества зерна за счет пониженного содержания клейковины. В годы благоприятные для налива и получения зерна с высоким абсолютным весом отмечается понижение содержания белковых веществ. В годы с засушливым вегетационным периодом ускоряется рост и развитие растений, накопление белков и углеводов в зерне.

Распространенным показателем оценки атмосферного увлажнения является гидротермический коэффициент (ГТК) Г.Т. Селянинова. В зависимости от среднегодовых значений гидротермического режима, территорию ЦЧР можно разделить на три подзоны, протянувшиеся с юго-запада на северо-восток [23] (рисунок 1.4):

- подзона достаточного увлажнения 1 занимает 4,8% площади (0,81 млн. га) – северо-западная часть ЦЧР (ГТК 1,2-1,3);
- слабо засушливая подзона 2 занимает 66,7% площади (11,19 млн. га) – центральная, юго-западная и северо-восточная части ЦЧР (ГТК 1,0-1,1);
- засушливая подзона 3 занимает 28,5% площади (4,78 млн. га) – юго-восточная часть ЦЧР (ГТК 0,8-0,9).

Рисунок 1.4 – Картосхема подзон ЦЧР с различным режимом увлажнения

Поэтому технологии углубленной адаптации по своему содержанию должны быть дополнительно дифференцированы относительно имеющихся подзона по величине ГТК.

Удобрения.

Урожай культур является, прежде всего, результатом продуктивности фитоценоза, который является не только биологической категорией, но и агрономической. Примерно 95% массы сухого органического вещества урожая создаётся фотосинтезом. Элементы же минерального питания составляют лишь около 5% сухой массы. Но они являются средством формирования фотосинтетического аппарата, а также его адаптации к переменному радиационному режиму и, в конечном счёте, повышают КПД фотосинтетической активной радиации (ФАР).

Удобрения – наиболее значимый ресурс регулирования питания и жизнедеятельности растений. Получение высоких и качественных урожаев сельскохозяйственных культур невозможно без полной обеспеченности растений элементами питания в течение всей вегетации. Научно обоснованные дозы минеральных удобрений повышают качество зерна по всем изучаемым способам основной обработки почвы [24].

Удобрения вносят заметный вклад в глобальное обеспечение человечества продовольствием [25]. Но они являются дорогостоящим и экологически небезопасным ресурсом, загрязняющим почву при избыточном внесении. Дефицит удобрений, также как и избыток, негативно сказывается на урожайности и качестве растениеводческой продукции.

Экономические предпосылки оптимизации питания культур весьма существенные, так как примерно треть от всех затрат на производство продукции земледелия приходится на минеральные удобрения. С экологической точки зрения нерациональное использование удобрений ведёт к снижению активности почвенной биоты, засолению и закислению почв, отрицательно сказывающихся на их плодородии.

Современные уровни урожайности сельскохозяйственных культур достаточно высокие и затраты на ресурсы для дальнейшего повышения продуктивности растений будут неуклонно расти. В адаптивном земледелии ограничить динамику роста этих затрат при одновременном повышении урожайности и качества продукции можно, если учитывать, что обеспеченность растений удобрениями зависит не только от количества вносимых питательных элементов, но и от соотношения между ними, а также складывающихся почвенно-климатических условий.

Взаимосвязь факторов функционирования удобрений в растениях и использования из них жизненно необходимых элементов достаточно сложная. Зачастую увеличение количества какого-то элемента, находящегося в дефиците, способствует потреблению растениями других элементов, в то же время избыток его препятствует поступлению другого элемента. Поэтому оптимизировать питание следует в соответствии с диагностическими данными, максимально приближенными к фактической потребности растений в элементах питания во времени.

Диагностика подразделяется на почвенную и листовую.

Широко распространена практика почвенной диагностики балансовым способом по макроэлементам питания (азот, фосфор, калий), которая предполагает стратегическое планирование урожайности сельскохозяйственных культур внесением основного удобрения (*NPK*), рассчитанного на вынос элементов с урожаем (рисунок 1.5).

Рисунок 1.5 – Схема применения минеральных удобрений

Но оптимизировать лишь по данным почвенной диагностики процесс питания растений невозможно:

- во-первых, потребность растений в питании, как показано выше, не ограничивается только макроэлементами *NPK*;
- во-вторых, балансовый способ ориентирован на обособленный вынос планируемой урожайностью культур каждого из элементов питания без учёта взаимодействия между ними;
- в-третьих, усвоение подвижных форм элементов питания зависит от ряда не учитываемых и нерегулируемых факторов, таких как содержание в растениях и почве других питательных веществ, температура внешней среды и т.д. [26].

Однако макроэлементы растения потребляют в больших количествах и в основном корневой системой. Для обеспечения достаточного промежутка времени по переходу питательных веществ в почвенно-поглощающий комплекс, макроудобрения вносят заблаговременно до посева культур. Поэтому, несмотря на обозначенное несовершенство, почвенная диагностика актуальна и необходима.

Характерная для полей сельскохозяйственного назначения неоднородность элементарных участков по обеспеченности *NPK* является причиной большой вариабельности в питании и росте растений (рисунок 1.6).

Рисунок 1.6 – Пример карты обеспеченности почвы подвижным фосфором

Поэтому свое дальнейшее развитие адаптивная система удобрения получила в реализации задач дифференциации внесения удобрения в зависимости от насыщенности им элементарного участка и потребности в нём культуры.

Техническим прогрессом создано мощное средство углубленной адаптации удобрения в виде системы точного земледелия, которая позволяет повысить точность исполнения агротехнических приёмов и дополнительно высвободить значительные удобрительные ресурсы путём их дифференциации на элементарные участки поля в соответствии с индивидуальными характеристиками. Точное земледелие – это стратегия управления сельскохозяйственным производством, рассматривающее поле в виде множества неоднородных элементарных участков, каждый из которых обладает индивидуальными характеристиками.

Необходимый элемент точного земледелия состоит в использовании спутникового навигационного оборудования – *Global Positioning System (GPS)*. Для распределения удобрений предварительно проводят агрохимическое обследование полей и создают карты обеспеченности почвы

подвижными формами элементов минерального питания, на которых пространственно зафиксированы характерные для полей неоднородности распределения питательных веществ. Процесс отбора почвенных проб с привязкой к координатам местности автоматизирован (рисунок 1.7).

Рисунок 1.7 – Автоматический отборник почвенных проб

При создании карт применяют соответствующие лицензионные программные продукты. Информацию с карт в автоматическом режиме считывают при определении доз удобрения на планируемую урожайность культуры дифференцированно для каждого элементарного участка. В результате получают электронную версию карты-задания внесения удобрения, где содержатся привязанные с *GPS* дозы удобрения по каждому элементарному участку поля.

Посредством носителя информации карту-задание загружают в бортовой компьютер удобрительного агрегата, оснащённого *GPS*-приёмником. Агрегат, перемещаясь по полю, с помощью *GPS* определяет своё место нахождения, для которого компьютер с карты-задания считывает дозу удобрения и посылает соответствующий сигнал на дозатор удобрительной машины. Дозатор в соответствии с поступившим сигналом корректирует дозу удобрения.

Сократить количество почвенных проб при агрохимическом обследовании полей позволяет картирование урожайности предшественника с

помощью уборочного комбайна, оснащённого *GPS*-приёмником и бортовым компьютером. В процессе работы такой комбайн непрерывно фиксирует урожайность убираемой культуры, привязанную к координатам его положения на поле. Величина урожайности изменяется эквивалентно обеспеченности элементарных участков поля питательными веществами. Это позволяет, благодаря взаимообусловленным передаточным функциям, преобразовать карту урожайности в карту обеспеченности почвы подвижными элементами питания и впоследствии использовать её в качестве карты-задания дифференцированного внесения удобрения под планируемую к посеву культуру.

Используют также способ определения дозы азотного удобрения непосредственно во время выполнения приёма корневой подкормки культуры азотным удобрением. Для этого расположенный на удобрительном агрегате оптический датчик оценивает биомассу растений, а также содержание в них хлорофилла по окраске листьев в инфракрасном и красном диапазонах света. Полученную информацию датчик передаёт в бортовой компьютер агрегата, который корректирует её в соответствии с сортом и фенологической фазой развития культуры, и вырабатывает сигнал управления дозатором удобрительной машины. В данном случае система *GPS* исполняет функции навигатора.

После того, как по данным почвенной диагностики в почву внесены макроэлементы, последующую корректировку и оптимизацию питания растений следует производить с учётом листовой диагностики. Дефицит каких-то элементов по её результатам должен устраняться корневыми и листовыми подкормками в вегетационный период. Лишь по реакции растений можно оценить истинную потребность в элементах питания, так как для формирования урожая зерна высокого качества, по данным многих ученых эффективны листовые подкормки [27]–[29].

Внесение удобрения, исходя из потребности в нём растений, позволяет экономно расходовать дорогостоящий ресурс и в то же время избежать

негативного влияния на окружающую среду возможных избыточных его количеств.

Адаптивные подходы в защите растений.

В России ежегодные потери урожая зерна от сорняков, вредителей и болезней составляют 101,6 млн. тонн зерновых единиц [30].

В настоящее время, в угоду роста продуктивности, селекцией существенно снижена генетическая способность культур противостояния вредным организмам. Технологические возможности обработки почвы оказались не всегда достаточными для удовлетворения возросшим требованиям, вследствие чего приём приходится дополнять химическими средствами защиты растений – пестицидами.

При обосновании целесообразности использования пестицидов в технологиях приоритет принадлежит обработке почвы и другим агротехническим приёмам, что оправдано как с экономических, так и с экологических позиций. Пестициды применяют от безысходности – в случае необходимости дополнения агротехнических приёмов.

Сорняки, как известно, уничтожают гербицидами. Их действующие вещества могут проникать в растения через почву и корни (почвенные гербициды) или через листья (послевсходовые гербициды). Известны также препараты, проникающие в растения через почву, корни и листья.

Почвенные гербициды, как правило, применяют перед посевом культуры, тщательно смешивая их с почвой. Они блокируют первые волны сорняков, освобождая культуру от конкурентов в начальной фазе развития. Достаточно длительный период действия почвенных гербицидов создаёт предпосылки обработки посевов в требуемые агротехнические сроки при ограниченной мощности опрыскивающей техники.

Однако использование почвенных гербицидов сопряжено с целым рядом ограничений и негативных последствий [31]:

- подавление биологической активности почвы, угнетение проростков культуры на лёгких почвах при сильных осадках;

- повышенная потребность в почвенной влаге для растворения действующего вещества гербицидов и поглощения их корнями сорняков;
- снижение действия гербицидов на сорняки с корневой системой, располагающейся в менее влажном поверхностном слое почвы;
- значительное увеличение доз внесения гербицидов на почвах с содержанием гумуса свыше 3%, так как органическое вещество почвы обладает способностью адсорбировать действующее вещество препаратов;
- необходимость равномерного смешивания гербицидов с почвой, что ведёт к разрушению плотного семенного ложа с капиллярной системой и ухудшению условий обеспечения влагой прорастающих семян;
- при ливневых осадках возрастают риски смыва препаратов и загрязнения ими водоёмов.

Послевсходовым применением гербицидов исключается заранее не определяемое влияние на их эффективность неконтролируемых факторов, таких как: структура и влажность почвы, содержание гумуса, *pH*-реакция почвенного раствора и др. Это позволяет также уменьшить вероятность возникновения возможных негативных экологических последствий. Немаловажно и то, что послевсходовые гербициды не угнетают культуру в наиболее чувствительный период – фазе прорастания.

При использовании гербицидов часто проявляется их фито токсичность по отношению к защищаемым культурам. Для уменьшения отрицательного влияния гербицидов на зерновые культуры целесообразно применять их совместно с антистрессовыми препаратами, регуляторами роста растений и минеральными удобрениями.

Низко затратным и эффективным средством является использование гербицидов с гуминовыми препаратами, физиологически активные вещества которых ускоряют синтез белка и нуклеиновых кислот, ускоряя тем самым восстановительные процессы в растениях [32].

Комбинированный способ защиты культур почвенными и послевсходовыми гербицидами применяют как вынужденную меру в случае высокой прогнозируемой засорённости посевов и недостаточной обеспеченности опрыскивателями.

Таким образом, среди пестицидов адаптивными свойствами обладают послевсходовые гербициды, а также инсектициды. Регламент применения данных препаратов можно корректировать в зависимости от сложившихся погодных условий, состояния посевов культур, видового состава сорняков и вредителей. Применение фунгицидов против болезней объективно правильно носит профилактический характер.

Величину потерь можно существенно минимизировать применением интегрированной системы защиты сельскохозяйственных культур, которая позволяет численность вредных организмов в агрофитоценозах свести до безопасного уровня, как для урожая, так и для окружающей среды. Основой интегрированной системы являются зональные модели углубленной оценки фитосанитарного состояния посевов по результатам их обследования на заражённость вредными организмами [33] (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Влияние элементов технологий на фитосанитарное состояние посевов

Элемент системы земледелия	Состояние фитосанитарного потенциала	Индекс изменчивости, %
<i>Севооборот</i>		
Научно обоснованное чередование культур	Фитосанитарный потенциал стабилизируется по сравнению с бессменным выращиванием	+200...+300
Нарушение чередования культур	Количество вредителей увеличивается, сильное развитие специализированных вредных организмов	–200...–300
Освоение специализированных севооборотов	Фитосанитарный потенциал ухудшается, численность вредных организмов увеличивается	–130...–150
Введение в севообороты промежуточных культур	Численность вредных организмов снижается	+25...+40
<i>Обработка почвы</i>		
Боронование, культивация, лущение	Численность сорняков уменьшается	+60...+80

Углубление пахотного слоя на 5-10 см		+30...+80
Минимизация обработки почвы	Численность сорняков, развитие болезней, вредителей увеличивается	-150...-300
Замена отвальных обработок почвы на безотвальные	Численность сорняков, развитие болезней, вредителей увеличивается. Потенциальная засорённость верхнего слоя почвы возрастает	-70...-90
Глубокое рыхление	Численность сорняков и развитие болезней снижается	+25...+40
<i>Удобрения</i>		
Минеральные	Повышение конкурентоспособности культур сплошного сева, снижение численности сорняков	+25...+30
	В пропашных севооборотах возможно увеличение количества сорняков	-35...-50
	Развитие болезней может увеличиться	-50...-70
Органические	Возрастает обилие сорняков и болезней	-60...-80
	Возрастает засорённость	-24...-40
Сидераты	Уменьшается обилие сорняков, болезней, вредителей	+25...+40
<i>Химические средства защиты растений</i>		
Однократное применение	Повышает фитосанитарный потенциал	+50...+90
Системное применение	Повышает эффект последствия	+90...+95
Мелиорация (орошение)	Снижение фитосанитарного потенциала	-150...-300

Примечание: «-» – увеличение поражённости, «+» – уменьшение поражённости.

Применением зональных моделей устанавливают влияние основных элементов систем земледелия на уровень фитосанитарного потенциала и вырабатывают нормативы по оценке этого влияния в конкретных условиях.

В оценочной шкале наибольшей фитосанитарной эффективностью обладает правильное севооборотное чередование культур на основе принципа плодосмена. Фитосанитарная оценка эффективности отдельных технологий позволяет создавать их адаптивные комбинации, которые способны в переменных условиях управлять современными агрофитоценозами. Используя многообразие методов борьбы и возможность их сочетания, можно численность вредных организмов свести к минимуму.

Адаптивная интегрированная защита, как комплекс мероприятий по снижению поражения посевов вредными организмами, позволяет максимально использовать регулирующие факторы элементов технологий и

создаёт предпосылки восстановления оптимального фитосанитарного состояния посевов и почв при минимизации нагрузки пестицидами на агроландшафт. В результате формируются предпосылки для устойчивого экологического равновесия в агроландшафтах, обеспечивающие предотвращение возможных негативных последствий от воздействия средств защиты растений на окружающую среду и качество получаемой сельскохозяйственной продукции [1].

Средства механизации.

В трудах отечественных и зарубежных учёных для адаптивно-ландшафтного земледелия обозначены принципы формирования исходных требований на сельскохозяйственную технику. Это уменьшение глубины и площади обрабатываемой поверхности поля, снижение техногенного разрушения почвы и совмещение агроприёмов [34].

Данные принципы могут быть реализованы при создании комплексов машин включающих в себя одно операционные орудия, функционирующие при малом заглублении в почву и на прямом посеве, а также комбинированные орудия для выполнения агротехнических совместимых приёмов за один проход. В ЦЧР, где широко распространена водная эрозия, обязательным компонентом системы обработок являются противоэрозионные приёмы. Параметры технических средств должны быть оптимизированы из условий выполнения требований агротехники с наименьшими затратами энергии.

Адаптивно-ландшафтное земледелие предопределяет необходимость применения комплексов почвообрабатывающей и посевной техники, обеспечивающей качественное и высокопроизводительное выполнение приёмов при многовариантной обработке почвы. Биологические особенности зерновых культур позволяют не в ущерб урожайности большое количество вариантов минимальных обработок почвы и, соответственно, необходимое разнообразие техники.

Последние достижения научно-технического прогресса служат непосредственному исполнению функций точного земледелия. Так,

выполнение полевых работ в тёмное время суток, применение безотвальных обработок почвы затрудняет визуальное отслеживание механизатором границы между обработанными и необработанными участками поля и свидетельствует о необходимости автоматизации управления сельскохозяйственной техникой.

Для параллельного вождения агрегатов используется спутниковое навигационное оборудование *GPS*. При первом проходе агрегата по полю в системе фиксируется базовая траектория. С периодом, равным ширине захвата сельскохозяйственной машины, система автоматически обеспечивает траектории соседних проходов, параллельные базовой. Поставляются системы, способные управлять параллельным перемещением агрегатов не только по прямолинейным, но и по криволинейным траекториям.

Навигационное оборудование значительно облегчает полевые работы, способствует экономии рабочего времени и расходуемых ресурсов, что обеспечивает экономический эффект величиной 10-30 евро/га [35]. Помимо этого *GPS* позволяет:

- максимально реализовать ширину захвата агрегатов,
- исключать огрехи и свести к минимуму перекрытия при выполнении полевых работ,
- увеличить производительность и коэффициент загрузки техники вследствие выполнения полевых работ в тёмное время суток,
- в условиях плохой видимости (пыль, туман) не ухудшить качество выполнения приёмов,
- снижать утомляемость механизатора и повышать уровень его комфортности.

На российском рынке присутствуют три функционально отличающиеся системы параллельного вождения:

1) Ручные системы отображают на дисплее или информируют комбинацией светодиодов (иногда и звуковыми сигналами) лишь об

отклонении агрегата от базовой траектории, что является сигналом для действий механизатора по устранению этого отклонения.

С применением ручных систем точность копирования базовой траектории зависит, прежде всего, от субъективных причин (уровня квалификации, навыков работы и особенностей характера механизатора), а также от скорости перемещения агрегата. Точность считается удовлетворительной, если отклонение от базовой траектории не превышает $\pm 10-30$ см. Ручные системы хорошо работают при скорости агрегата до 6 км/ч. При высокой квалификации механизатора их можно использовать, повышая скорость до 12 км/ч.

Ввиду низкой точности, ручные системы применяют ограниченно. Как правило, это приёмы основной и предпосевной обработок почвы. В случае отсутствия технологической колеи, ручные системы используют на внесении удобрения и средств защиты растений.

2) Системы частичного автопилотирования предполагают ручной вывод агрегата механизатором на заданное направление движения с требуемым шагом от базовой траектории, а дальнейшее копирование базовой траектории производится автоматически. В процессе рабочего перемещения исключено влияние ошибок механизатора на качественные показатели работы агрегата. В то же время механизатор имеет возможность сконцентрировать своё внимание полностью на функционировании агрегируемых сельскохозяйственных машин.

Конструктивно система частичного автопилотирования выполнена в виде управляемых электро- или гидродвигателей, воздействующих на рулевую гидравлику трактора. Точность системы, равная $\pm 5-30$ см, также невелика, что позволяет рекомендовать данную систему на выполнение приёмов по аналогии с ручной системой.

3) Автоматические системы параллельного вождения непосредственно встраивают в рулевую гидравлику трактора. Поставляют эти системы в трёх

классах точности: $\pm 10-30$, $\pm 5-10$ и ± 2 см. Лучшие автоматические системы достигают точности $\pm 1-2$ см. С повышением точности техника удорожается.

Все автоматические системы можно использовать на приёмах по обработке почвы, внесению удобрения и средств защиты растений.

2 Методологический подход оптимизации ресурсного обеспечения адаптивных технологий

2.1 Взаимодействие основных элементов технологий и ресурсосбережение

При оптимизации ресурсного обеспечения технологий важно учитывать взаимодействие их элементов, если таковое имеет место быть.

Севообороты проектируют, исходя из структуры посевных площадей, установленной в соответствии с перспективным планом развития хозяйствующих субъектов и ориентированной на их специализацию, окультуренность пашни, размеры и конфигурацию полей. При этом учитывается мощность и механический состав гумусного слоя, рельеф, эродированность, *pH*-реакция почвенного раствора и др.

Соблюдение плодосмена в севооборотах оказывает определяющее влияние на подавление вредных организмов (сорняков, вредителей и болезней) и занимает первое место по уровню фитосанитарной эффективности. Плодосмен обеспечивает длительную стабилизацию фитосанитарного состояния агроэкосистем с механизмами саморегуляции и способствуют созданию благоприятных условий для формирования устойчивости растений к вредным организмам [7].

Позитивная роль севооборотов усиливается во взаимодействии со способами обработки почвы и зависимыми от неё другими элементами [36] (рисунок 2.1).

Рисунок 2.1 – Схема взаимодействия элементов агротехнологий

Обработка почвы является синергетическим дополнением севооборотов. Она способна существенно повышать их продуктивность за счёт оптимизации агрофизических свойств почвы и ухудшения условий выживания вредных организмов, особенно в зимний период.

Взаимосвязанное влияние элементов агротехнологий на урожайность и качество зерна возделываемых культур изучали по экспериментальным данным, полученным в 2016-2020 гг. в стационарном многофакторном опыте ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Почвенные условия многофакторного опыта (ЦЧР, Курская область, Медвенский район)

Водораздельное плато	Склон северной экспозиции
Почва – чернозём типичный тяжелосуглинистый с содержанием гумуса 5,3%. Солевая вытяжка $pH=6,5$. Содержание щёлочногидролизуемого азота – 19, подвижного фосфора – 16,8 и обменного калия – 11,7 мг на 100 г почвы. Крутизна склона 1 ⁰	Почва – чернозём типичный тяжелосуглинистый слабосмытый с содержанием гумуса 5,1%. Солевая вытяжка $pH=5,7$. Содержание щёлочногидролизуемого азота – 18, подвижного фосфора – 9,3 и обменного калия – 8,8 мг на 100 г почвы. Крутизна склона 3,12 ⁰ -6,40 ⁰

Влияние взаимодействия севооборотов с обработками почвы на урожайность зерна озимой пшеницы оценили на склоне северной экспозиции опыта. Исследования проводили без применения удобрений в зернопаропропашном, зернотравянопропашном и зернотравяном

севооборотах. Использовали отвальный и безотвальный способы обработки почвы на глубину 20-22 см, а также комбинированный способ, который включал в себя вспашку на глубину 20-22 см + поверхностную обработку на глубину 8-10 см (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Урожайность зерна озимой пшеницы в зависимости от севооборотов и способов обработки почвы

Севооборот	Обработка почвы	Урожайность, т/га
Зернопаропропашной	Отвальная	2,79
	Комбинированная	2,6
	Безотвальная	2,72
Зернотравянопропашной	Отвальная	2,65
	Комбинированная	2,25
	Безотвальная	2,2
Зернотравяной	Отвальная	2,38
	Комбинированная	2,17
	Безотвальная	2,13
НСР ₀₅		0,22

Опытные данные обработали по ортогональному композиционному плану методики оптимального планирования многофакторного эксперимента, что позволило формализовать исследуемый процесс более точной нелинейной моделью, поддающейся оптимизации [37]. Получили адекватное уравнение регрессии (2.1):

$$Y_{\text{п}} = 2,27 + 0,24X_1 - 0,13X_2 + 0,1X_1^2 + 0,14X_2^2, \frac{\text{т}}{\text{га}}; \quad (2.1)$$

где $Y_{\text{п}}$ – урожайность зерна озимой пшеницы, т/га;

X_1 – кодовое значение севооборота: зернопаропропашной ($X_1=+1$), зернотравянопропашной ($X_1=0$) и зернотравяной ($X_1=-1$);

X_2 – кодовое значение вида используемой обработки почвы: безотвальная ($X_2=+1$), комбинированная ($X_2=0$) и отвальная ($X_2=-1$).

Из уравнения (2.1) вытекает наличие взаимосвязанного влияния элементов агротехнологии (севооборота и обработки почвы) на основной показатель агротехнической эффективности производства культуры – урожайность.

Графическая версия данного уравнения представлена на рисунке 2.2.

Рисунок 2.2 – Влияние севооборотов и способов обработки почвы на урожайность зерна озимой пшеницы

Наиболее продуктивный по урожайности зерна оказался зернопаропропашной севооборот (2,62-2,88 т/га). Затем в порядке понижения урожайности следуют зернотравянопропашной (2,28-2,54 т/га) и зернотравяной (2,13-2,4 т/га) севообороты. Урожайность культуры на фоне отвальной вспашки для всех испытываемых севооборотов (2,62-2,88 т/га) в среднем на 0,27 т/га (10,3%) больше показателей полученных с применением комбинированной и безотвальной обработок.

Взаимосвязанное влияние севооборотов и удобрения изучали в многофакторном опыте на ячмене. Исследования проводили в 2014-2018 гг. на

водораздельном плато (таблица 2.1). Изучали влияние на урожайность зерна культуры дозы *NPK* в различных севооборотах. Исследования проводили на фоне отвальной вспашки глубиной 20-22 см (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Урожайность зерна ячменя в зависимости от севооборотов и дозы вносимого удобрения

Севооборот	Доза <i>NPK</i>	Урожайность, т/га
Зернопаропропашной	0	2,99
	<i>N</i> ₂₀ <i>P</i> ₄₀ <i>K</i> ₄₀	3,18
	<i>N</i> ₄₀ <i>P</i> ₈₀ <i>K</i> ₈₀	3,26
Зернотравянопропашной	0	3,22
	<i>N</i> ₂₀ <i>P</i> ₄₀ <i>K</i> ₄₀	3,34
	<i>N</i> ₄₀ <i>P</i> ₈₀ <i>K</i> ₈₀	3,44
Зернотравяной	0	2,44
	<i>N</i> ₂₀ <i>P</i> ₄₀ <i>K</i> ₄₀	2,47
	<i>N</i> ₄₀ <i>P</i> ₈₀ <i>K</i> ₈₀	2,92
НСР ₀₅		0,06

После обработки экспериментальных данных по ортогональному композиционному плану получили адекватное уравнение регрессии (2.2):

$$Y_{\text{я}} = 3,3 + 0,27X_1 + 0,16X_3 - 0,46X_1^2, \frac{\text{т}}{\text{га}}; \quad (2.2)$$

где $Y_{\text{я}}$ – урожайность зерна ячменя, т/га;

X_3 – кодовое значение дозы *NPK*: *N*₄₀*P*₈₀*K*₈₀ ($X_3=+1$), *N*₂₀*P*₄₀*K*₄₀ ($X_3=0$), без удобрения ($X_3=-1$).

Графический анализ уравнения (2.2) показал взаимосвязанное влияние элементов технологии на урожайность культуры, так как удобрение пропорционально дозе усиливает эффективность севооборотов (рисунок 2.3).

Рисунок 2.3 – Влияние севооборотов и дозы удобрения на урожайность зерна ячменя

Несмотря на различную продуктивность испытываемых севооборотов, скорость нарастания урожайности ячменя в зависимости от дозы удобрения одинаковая и составила $\frac{dY_{\text{я}}}{dX_3} = 0,16$ т/га на 0,1 т/га внесённого удобрения.

Экспериментально, используя данные опытов с озимой пшеницей (рисунок 2.2) и ячменём (рисунок 2.3), установлено взаимосвязанное влияние элементов технологий на урожайность, что свидетельствует о необходимости комплексной минимизации ресурсного обеспечения технологий.

2.2 Комплексная минимизация ресурсного обеспечения производства зерновых культур

Первым и наиболее значимым этапом минимизации ресурсов при возделывании сельскохозяйственных культур является использование

принципов углубленной адаптации элементов агротехнологий (таблица 1.1). В дальнейшем эффективность минимизации ресурсов в земледелии возрастает при решении оптимизационных задач.

Для каждого адаптированного элемента агротехнологии построение оптимизационной математической модели (физической, эмпирической) начинается, прежде всего, с формулировки параметров оптимизации – критериев, по которым оценивается эффективность. Содержание параметров оптимизации определяется решаемыми исследовательскими задачами. Приоритетные для земледелия параметры оптимизации агротехнологические (урожайность и качество выращиваемой продукции), технические (соответствие средств механизации агротребованиям на выполняемые приёмы, производительность, надёжность и долговечность), экономические (величина прибыли, себестоимость, рентабельность).

На практике редко встречаются задачи, где единственный критерий оценки однозначно диктуется целевой направленностью. Исследовательский процесс в сельском хозяйстве характеризуется, как правило, несколькими параметрами оптимизации, раскрывающими разные, часто противоположные его стороны [38]. Например, интенсификация производственных процессов, наряду с повышением урожайности сельскохозяйственных культур, одновременно сопряжена с необходимостью минимизации общих затрат. Но постановка задачи достижения максимального эффекта при минимальных затратах в научном плане нереальна. Поэтому многокритериальную задачу сводят к однокритериальной выделением главного параметра оптимизации, обратив его в максимум (минимум).

На все остальные параметры накладывают ограничения, требуя, чтобы они были не меньше (больше) заданных значений. Так, формулировка параметра оптимизации может содержать максимизацию урожайности при ограничении до определённого уровня затрат. Методика решения подобных задач хорошо формализована в области линейных взаимосвязей параметров оптимизации с факторами (линейное программирование), где ограничения,

налагаемые на элементы решения, имеют вид линейных равенств или неравенств относительно не взаимосвязанных между собой факторов [39].

Иногда используется другой менее точный подход построением функции желательности Харрингтона, характеризующей совокупность нескольких параметров оптимизации [40]. Однако функция желательности имеет недостаток. Шкала соотношений между ней и параметрами оптимизации строится на основе субъективной оценки исследователя к отдельным оптимизируемым компонентам, т.е. присутствует небезошибочный человеческий фактор.

Для повышения точности решения исследовательских задач в земледелии, на основании экспериментальных данных строят эмпирическую модель основного параметра оптимизации и по ней проводят оптимизационные действия. Остальные параметры оптимизации принимают за ограничения [41].

Предположим, исследуют влияние на энергоёмкость и качественные показатели отвальной вспашки факторов ширины захвата плуга и рабочей скорости агрегата. За основной параметр оптимизации принимают энергоёмкость приёма и по экспериментальным данным строят эмпирическую модель её зависимости от факторов. Остальные параметры оптимизации, определяющие качество вспашки (крошение обрабатываемого пласта, степень заделки в почву пожнивных остатков и др.) принимают за ограничения. Варьируя факторами, минимизируют энергоёмкость вспашки при соблюдении ограничений по параметрам качества.

Таким образом, одна из основных задач оптимизации производственных ресурсов в земледелии связана с определением экстремальных (максимальных или минимальных) значений алгебраических функций (2.3):

$$Y = Y(X_1, X_2, \dots, X_n); \quad (2.3)$$

где Y – параметр оптимизации;

$X_1, X_2, \dots, X_n$ – переменные факторы в количестве n , под которыми понимают величины, воздействующие на исследуемый процесс и принимающие в некоторый момент определённые дискретные значения.

Математическое условие для определения экстремальных значений параметра оптимизации (2.4):

$$\begin{aligned} \frac{dY}{dX_1} &= 0; \\ \frac{dY}{dX_2} &= 0; \\ &\dots \\ \frac{dY}{dX_n} &= 0. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Точки n , полученные в результате решения данной системы уравнений, называются стационарными точками функции Y и являются оптимальными значениями факторов. Однако особенностью земледелия является то, что во многих задачах по определению стационарных точек функции Y между переменными X_n существует взаимодействие, которое изложенной выше методикой не учитывается.

Предположим, исследуют влияние на урожайность озимой пшеницы и качественные показатели зерна (содержание белка, клейковины и др.) факторов в виде элементов минерального питания. Требуется определить значения факторов, соответствующие максимальной урожайности зерна требуемого качества.

Но в данном случае значимое влияние на урожайность зерна оказывает как количество вносимых элементов питания, так и соотношение между ними, т.е. элементы питания взаимосвязаны. Поэтому математически точно

оптимизация будет осуществлена, если стационарные значения функции $Y=Y(X_1, X_2, \dots, X_n)$ определять с учётом связи $\varphi=\varphi(X_1, X_2, \dots, X_n)=0$.

Решение таких задач упрощается использованием метода неопределённых множителей Лагранжа, согласно которому необходимое условие стационарности функции Y находят при условии [39]:

$$\begin{aligned}\frac{d\Phi}{dX_1} &= 0; \\ \frac{d\Phi}{dX_2} &= 0; \\ &\dots \\ \frac{d\Phi}{dX_n} &= 0;\end{aligned}\tag{2.5}$$

где: $\Phi(X_1, X_2, \dots, X_n) = Y(X_1, X_2, \dots, X_n) + \lambda \varphi(X_1, X_2, \dots, X_n)$;

λ – множитель Лагранжа. В алгебраических задачах он постоянен и не несёт информационной ценности, но определение его значительно проще, чем исключение неизвестной через уравнение связи.

Если возвратиться к приведенному выше примеру, то при оптимизации питания озимой пшеницы количество уравнений связи должно соответствовать количеству m оцениваемых качественных показателей зерна культуры. Тогда:

$$\Phi(X_1, X_2, \dots, X_n) = Y(X_1, X_2, \dots, X_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \varphi_i(X_1, X_2, \dots, X_n);\tag{2.6}$$

где $i=0, \dots, m, n>m$.

Оптимизируемые факторы X_n и множители λ_i находят решением системы $n+m$ уравнений (2.5) и (2.6).

Методология комплексной минимизации ресурсного обеспечения технологий апробирована на данных многофакторного опыта при возделывании в 2016-2020 гг. озимой пшеницы на склоне северной экспозиции

(таблица 2.1). Изучали влияние севооборотов и удобрения на урожайность и качество зерна культуры. Исследования проводили на фоне вспашки (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Показатели производства зерна озимой пшеницы в условиях многофакторного полевого опыта

Показатели	Севооборот									НСР ₀₅
	Зернопаропропашно й			Зернотравяно- пропашной			Зернотравяной			
Удобрение	0	N ₂₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₄₀ P ₈₀ K ₈₀	0	N ₂₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₄₀ P ₈₀ K ₈₀	0	N ₂₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₄₀ P ₈₀ K ₈₀	
Урожайность, т/га	2,79	4,17	4,63	2,65	3,64	4,16	2,38	3,46	3,82	0,28
Содержание белка в зерне, %	12,0	12,9	13,1	11,1	11,6	12,1	10,8	11,1	11,2	0,49
Прибыль производства зерна, тыс.руб./т	3,97	4,86	4,41	4,21	4,52	4,13	3,54	4,24	3,61	

Основополагающим экономическим показателем эффективности производства культуры, имеющим хозяйственную значимость, является прибыль. Поставлена задача – определить севооборот и дозу *NPK* под озимую пшеницу, обеспечивающие максимальную прибыль производства зерна культуры 3-его класса. По ГОСТ 9353-2016, у пшеницы 3-его класса массовая доля белка в пересчёте на сухое вещество должна быть не менее $B=12\%$. В сезон 2020 года рыночная закупочная цена на зерно 3-его класса составила 10 тыс.руб./т.

После обработки экспериментальных данных по ортогональному композиционному плану получили адекватные нелинейные уравнения регрессии (2.7) урожайности зерна, содержания белка в нём и прибыли в зависимости от севооборотов и дозы удобрений:

$$\begin{aligned}
Y_{\text{п}} &= 3,72 + 0,32X_1 + 0,8X_3 - 0,35X_3^2, \frac{\text{т}}{\text{га}}; \\
Б &= 11,7 + 0,81X_1 + 0,42X_3 + 0,25X_1^2, \%; \\
\Pi &= 4,66 + 0,31X_1 - 0,18X_1^2 - 0,56X_3^2, \frac{\text{тыс. руб.}}{\text{т}};
\end{aligned}
\tag{2.7}$$

где Б – содержание белка в зерне озимой пшеницы, %;

Π – прибыль производства зерна, тыс.руб./т.

За параметр оптимизации приняли прибыль Π, а уравнение содержания белка в зерне *Б* использовали в качестве связи φ :

$$\varphi = Б - 11,7 - 0,81X_1 - 0,42X_3 - 0,25X_1^2 = 0, \%; \tag{2.8}$$

Условию стационарности функции прибыли, согласно (2.5) и (2.6), соответствует система трёх уравнений (2.9):

$$\begin{aligned}
Б - 11,7 - 0,81X_1 - 0,42X_3 - 0,25X_1^2 &= 0; \\
0,31 - 0,36X_1 - \lambda(0,81 + 0,5X_1) &= 0; \\
1,12X_3 + \lambda \cdot 0,42 &= 0.
\end{aligned}
\tag{2.9}$$

Решение системы уравнений (2.9) имеет вид: $X_1=0,365$; $X_3=-0,068$; $\lambda=-0,181$. Перевод кодовых значений оптимизируемых факторов в натуральные показывает предпочтение зернотравянопропашного севооборота и удобрение в количестве $N_{20}P_{40}K_{40}$. Подставляя полученные значения факторов в уравнения прибыли и урожайности культуры, получили максимальное значение прибыли $\Pi=4,66$ тыс.руб./т при урожайности 3,72 т/га и содержании белка в зерне 3-его класса 12%.

Из графического анализа уравнений регрессии вытекает следующее (рисунок 2.4).

Рисунок 2.4 – Оптимизация производства озимой пшеницы в зернотравянопропашном севообороте

С повышением дозы удобрения урожайность зерна и содержание в нём белка возрастает на всём исследуемом диапазоне. Рост урожайности происходит по нелинейной зависимости с понижением скорости нарастания равной $\frac{dY_{\text{п}}}{dX_3} = 0,8 - 0,7X_2$. Одновременно линейно повышается содержание белка в зерне. Прибыль на участке изменения дозы удобрения от 0 до $N_{20}P_{40}K_{40}$ увеличивается. Но затраты на дальнейшее повышение дозы удобрения не окупаются стоимостью уменьшающейся прибавки урожайности. Поэтому на участке от $N_{20}P_{40}K_{40}$ до $N_{40}P_{80}K_{80}$ прибыль плавно понижается.

Таким образом, обозначенные величины урожайности зерна озимой пшеницы 3-го класса и прибыли являются оптимальными при использовании под культуру в зернотравянопропашном севообороте дозы минерального удобрения $N_{20}P_{40}K_{40}$.

3 Формирование вариантов технологий углубленной адаптации

3.1 Обработка почвы – основа углубленной адаптации технологий

Важнейшим агрофизическим свойством почвы, без которого не может реализоваться её плодородие, является пористость. С увеличением плотности почвы содержание влаго- и воздухопроводящих пор снижается. Уже при плотности $1,35 \text{ г/см}^3$ (верхний предел оптимума для вегетации растений) их количество снижается почти вдвое. По следам же тяжёлой техники часто наблюдается плотность $1,5-1,6 \text{ г/см}^3$, когда поры отсутствуют вообще.

Помимо ухудшения агрофизических свойств, переуплотнение почвы является определяющей предпосылкой к развитию водной эрозии, так как скорость впитывания влаги тесно связана с плотностью почвы. Не впитываемая влага осадков устремляется вниз по склону, увлекая за собой частицы плодородного верхнего слоя и питательные вещества, загрязняя ими водоёмы. Средняя величина талого стока в ЦЧР (то есть, безвозвратных потерь потенциально продуктивной влаги) достигает $300-650 \text{ м}^3$ с каждого гектара пашни.

Утраченная вследствие переуплотнения пористость восстанавливается дорогостоящей системой обработки почвы. Применение её, помимо разуплотнения корнеобитаемого слоя, позволяет заделывать в почву стерню предшественника, поддерживать в пахотном слое благоприятное фитосанитарное состояние и равномерно распределять в нём минеральное и органическое удобрения, регулировать режим питания растений.

Велико значение обработки почвы в накоплении продуктивной влаги, которая нередко является фактором, ограничивающим урожайность культур. На обработанных полях влага осадков активнее поглощается почвой и к началу снеготаяния создаются условия, исключаящие переувлажнение пахотного слоя.

В то же время функционирование наиболее распространённых лемешных почвообрабатывающих машин (отвальных плугов, культиваторов-плоскорезов, глубоких лемешных-плоскорезов и др.) вступает в противоречие с состоянием подпахотного слоя. На границе раздела между пахотным и подпахотным слоями аккумулируются уплотнения. Физическая сущность данного явления объясняется характером износа лезвий лемехов. В процессе работы с их тыльной стороны формируется затылочная фаска, образующая с дном борозды отрицательный угол S величиной до 20° (рисунок 3.1).

Рисунок 3.1. Профиль лезвия лемеха

Перемещаясь в направлении V , лемех затылочной фаской, как лыжей, сминает и уплотняет слой почвы h_n . При систематическом выполнении обработок уплотнение аккумулируется и на дне борозды образуется переуплотнённый почвенный слой толщиной 3-5 см, непроницаемый для корней и влаги, получивший название «плужная подошва» (рисунок 3.2).

Рисунок 3.2. Нарушение влагообмена между пахотным и подпахотным слоями почвы при наличии плужной подошвы

Состояние подпахотного слоя (ниже плужной подошвы) более инертно, вследствие изоляции его от дневной поверхности достаточно мощным пахотным слоем. Происходящие в подпахотном слое разуплотнения вследствие знакопеременных (положительных и отрицательных) летних и зимних температур, проникновения корней растений и микрофлоры менее действенны, нежели мероприятия по рыхлению почвы. Поэтому даже при хорошем состоянии пахотного слоя культурные растения не могут полностью реализовать свои биологические возможности из-за трудностей развития корневой системы в подпахотном слое. Единственный способ оперативного приведения плотности подпахотного слоя в нормальное состояние – его глубокое рыхление, которое применяют на зяби в предзимний период (рисунок 3.3).

Рисунок 3.3 – Разрушение плужной подошвы глубоким рыхлением почвы

Обнаружить плужную подошву можно измерением плотности почвы по глубине пахотного и подпахотного горизонтов. Учитывая, что плотность почвы состоит в прямой пропорциональной связи с её твёрдостью, т.е. способностью почвы оказывать сопротивление проникновению в неё какого-либо тела, экспресс анализ поля на наличие плужной подошвы удобно провести применением специального простого и надёжного прибора – твердомера.

В практике сельскохозяйственного производства получил распространение прибор с принудительным перемещением плунжера – твердомер Ревякина (рисунок 3.4).

Рисунок 3.4 – Общий вид твердомера

Конструктивно прибор содержит рукоятку, шток, измерительную пружину. Деформация пружины через систему рычагов преобразуется в поперечное перемещение пружинной скобы с карандашом и фиксируется на бумажной ленте. Запорным винтом подвижную часть прибора фиксируют при его транспортировке. Рабочей частью твердомера служит плунжер, ввернутый резьбой в нижний конец штока (рисунок 3.5).

Рисунок 3.5 – Выдвинутый плунжер твердомера

Пишущее устройство твердомера позволяет фиксировать изменение сопротивления проникновению плунжера в почву по глубине его погружения.

Для приведения плотномера в рабочее положение необходимо отвернуть запорный винт, в пишущее устройство заложить бумажную ленту (желательно миллиметровую) и, укрепив в пружинной скобе карандаш, прочертить на ней вхолостую нулевую линию.

Затем прибор упорной плитой устанавливают на поверхность поля в строго вертикальном положении и посредством рукоятки через измерительную пружину плавно вдавливают плунжер в исследуемую почву (рисунок 3.6).

Рисунок 3.6 – Определение твёрдости почвы

Сила нажима на рукоятку равна силе сопротивления почвы F проникновению в неё плунжера. Пропорционально величине F деформируется измерительная пружина:

$$F=q \cdot h, \text{ Н};$$

где h – деформация измерительной пружины, мм;

q – жёсткость пружины, Н/мм.

Величина h фиксируется пишущим устройством на бумажной ленте в функции глубины погружения плунжера в почву Z . Таким образом, твердомер записывает диаграмму, устанавливающую взаимосвязь деформации пружины в зависимости от глубины погружения в почву плунжера. Абсциссой диаграммы является Z , а ординатой – величина деформации пружины h пропорциональная силе F , т.е. $h=h(Z)$ (рисунок 3.7).

Рисунок 3.7 – Образец диаграммы, полученной твердомером

При снятии каждой диаграммы следует проверять качество её записи (чёткость) и исправность работы записывающего устройства. В ненагруженном положении острие карандаша должно совпадать с нулевой линией. Допускается отклонение не более ± 1 мм.

Каждой точке диаграммы $h=h(Z)$ соответствует твёрдость почвы:

$$P = \frac{F}{10^6 S} = \frac{hg}{10^6 S}, \text{ МПа};$$

где S – площадь сечения плунжера, м^2 .

Твердомер укомплектован измерительной пружиной жёсткостью $q=13,5$ Н/мм и двумя плунжерами. Один плунжер ($\varnothing 0,016$ м; $S=2 \cdot 10^{-4}$ м^2) предназначен для измерения твёрдости необработанных старопахотных почв. Назначение второго плунжера ($\varnothing 0,0113$ м; $S=10^{-4}$ м^2) для измерения твёрдости плотных и залежных почв.

Учитывая, что целью оценок твёрдости почвы является выявление наличия в пахотном горизонте переуплотнённых слоёв, в частности, плужной подошвы, обработка записанной диаграммы сводится к установлению максимального значения её ординаты h_{max} на отрезке $Z=0-30$ см (рисунок 3.7) с последующим определением максимальной твёрдости почвы в пахотном горизонте P_{max} по формулам:

- в случае использования плунжера $S=2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ – $P_{max} = 0,0675 \cdot h_{max}$, МПа;
- в случае использования плунжера $S=10^{-4} \text{ м}^2$ – $P_{max} = 0,135 \cdot h_{max}$, МПа.

Требуемая достоверность может быть получена при количестве измерений в пределах рабочего участка поля не менее 5.

Сравнивая осреднённые результаты измерений с данными таблицы 3.1, устанавливают класс испытываемой почвы и назначают мероприятия по разуплотнению почвы и приведению её в агротехническое благоприятное состояние.

Таблица 3.1 – Классификация почв по твёрдости

Значение максимальной твёрдости почвы в слое 0-30 см, МПа	Класс почвы	Рекомендация по с.-х. использованию почвы
менее 1	рыхлая	–
1-2	рыхловатая	–
2-3	плотноватая	–
3-5	плотная	рыхление на глубину 35-45 см
5-10	весьма плотная	
Более 10	слитная	

Разуплотняющими приёмами в агротехнологиях являются безотвальные рыхления почвы чизелями, глубокорыхлителями и др. на глубину 35-45 см.

3.2 Предпосылки минимизации обработки почвы

Распространена основная обработка почвы с оборотом пласта отвальным плугом (вспашка), которая позволяет качественно заделывать в почву пожнивные остатки, уничтожать сорняки, снижать потенциал поражения растений вредными организмами. Однако вспашка не безукоризненна. Она относится к самым энергоёмким и затратным приёмам обработки почвы. После заделки отвалом растительных остатков понижается стойкость почвы против эрозии.

Поэтому в настоящее время отрабатываются альтернативные (безотвальные) системы минимизации обработки почвы, исключая применение отвального плуга.

Безотвальные обработки, прежде всего в силу меньшей энергоёмкости, считаются одним из перспективных направлений развития земледелия, и на это имеются все основания, поскольку на обработку почвы расходуется до 20% энергии, используемой в сельском хозяйстве вообще. Как экологические, так и экономические предпосылки мобилизовали учёных и практиков на решение проблемы минимизации обработок, вплоть до полного их исключения (*no-till*).

В то же время минимизации обработок часто приписываются мнимые положительные качества, а доводы в их пользу не всегда чётко аргументированы. Такой тенденциозный подход способен дискредитировать весьма эффективный прием в земледелии.

Само по себе направление минимизации обработок почвы не ново. Начало научного осмысления его относится ещё к концу XIX века. Тогда идеи замечательного российского агронома И.Е. Овсинского не были поняты современниками. Более того, в условиях сталинских репрессий данное сугубо земледельческое направление было политизировано. В результате невинно пострадал последователь И.Е. Овсинского – талантливый учёный-агроном Н.М. Тулайков.

Но многочисленные исторические факты свидетельствуют о том, что очень часто осознание даже самых гениальных достижений человечества происходит в своё время. Что касается минимизации обработки почвы, то это время не просто пришло, а нагрянуло в середине прошлого столетия, когда по огромным территориям США и Канады прокатились волны катастрофических явлений дефляции почв. Примерно то же самое произошло в начале 50-х годов прошлого века на территории бывшего СССР – в Казахстане и на юге Западной Сибири в связи с активным распахиванием целинных земель.

Возобладал здравый смысл, побудивший человечество, вопреки беспардонной политизации, критически взглянуть на самый энергоёмкий и разрушительный для почвы компонент её обработки – отвальную вспашку, авторитет которой до того времени в мировом земледелии считался незыблемым.

Альтернатива вспашке в виде вариантов безотвальной обработки, адаптированных к конкретным условиям, предложена патриархом отечественного земледелия Т.С. Мальцевым. Последующие работы Терентия Семеновича укладываются в выдвинутую им концепцию, в соответствии с которой функционирование земледелия лишь тогда будет продуктивным и экологически безопасным, когда оно будет вестись в согласии с природой. По сути, новация Т.С. Мальцева явилась основой адаптивно-ландшафтных систем земледелия, над созданием которых в настоящее время усердно и с разной степенью успеха работают многочисленные научно-исследовательские институты земледельческого профиля.

После экологических катастроф мирового масштаба, в которых косвенно повинен отвальный плуг, казалось бы, что ещё нужно, чтобы навсегда отказаться от вспашки? Но не стоит торопиться! Вспашка ещё достаточно живуча.

Во-первых, как принято считать, она обладает высокой степенью универсальности и с большими или меньшими издержками применима практически для любого агроландшафта. К сожалению, развитию этого тезиса

способствует ограниченность мышления хозяйственников на местах, которые не всегда склонны давать должную научно обоснованную оценку экономическим последствиям в некоторых случаях недостаточной легитимности данного агротехнического приёма. Немного и людей, небезразличных к экологическим последствиям оборота почвенного пласта.

Во-вторых, отдельные культуры при упрощённом подходе к выращиванию лучше отзываются на вспашку. В определённых условиях для доведения эффективности минимальной обработки до уровня вспашки требуются дополнительные усилия, зачастую не столько финансового, сколько организационного характера.

В-третьих, отвальный плуг все же предпочтительнее в условиях отсутствия дефицита влаги, а также при, так называемом, экологическом выращивании культур по технологиям без пестицидов, где он достаточно эффективен для уничтожения сорняков.

Важными факторами ограниченного применения минимальных обработок почвы в России являются их многовариантность и необходимость профессионального подбора вариантов в зависимости от конкретных условий. Поэтому шаблонное решение данной проблемы может повлечь за собой весьма негативные последствия.

Предельный случай минимизации обработок почвы – нулевая обработка. Надлежащая эффективность её применения возможна лишь при высочайшем агротехническом искусстве исполнения. В современной же научно-технической литературе иногда слишком легковесно трактуется упрощенный подход к нулевой обработке почвы. Как правило, при её оценке определяющим фактором декларируется лишь урожайность культур, что не всегда оправданно. В отдельных случаях даже при относительно низкой культуре земледелия сравнительно высокую урожайность достигают за счёт применения завышенных доз минерального удобрения и интенсивного использования химических средств защиты растений. Вследствие этого производство культуры может оказаться нерентабельным или произведенный продукт будет

низкого качества. Поэтому нулевую обработку необходимо рассматривать, исходя, прежде всего, из экономической целесообразности – её применение должно дать максимальный экономический эффект.

Совершенно очевидно, что нулевая обработка не универсальна. Законное место её там, где потребность в обработках почвы очень низкая. Остановить свой выбор на этом приеме – очень непросто. Прежде всего, необходимо обратиться к функциям обработок почвы вообще. В их иерархии существуют достаточно сложные причинно-следственные связи, в том числе и биологического характера. Однако не следует забывать, что в своей первооснове обработка почвы есть не что иное, как механическое разрушение почвенного монолита с перемещением в пространстве образующихся элементов. Обусловленные обработкой биологические процессы в почве пойдут лишь после её рыхления. Поэтому основой данной связи является чисто механическая суть обработок.

Механистический подход позволяет из многочисленных функций обработок почвы выделить всего четыре – обеспечение оптимального сложения почвы, регулирование фитосанитарного состояния, регулирование пищевого режима растений (рисунок 1.3) + заделка в почву семян и удобрений. Насколько необходимы приведенные функции обработок почвы, зависит от свойств конкретного агроландшафта.

Если каждой выше обозначенной функции обработок будет соответствовать логическая переменная, принимающая значения «нужна», «не нужна», а число таких переменных обозначить, как Φ , то теоретически возможное число сочетаний значений переменных составит 2^Φ . С учётом того, что переменная, соответствующая потребности в функции заделки семян и удобрений, присутствует во всех сочетаниях с одним и тем же значением («нужна»), число различных сочетаний значений переменных, а, следовательно, и почвенных условий, равно $2^3=8$. Построенный алгоритм позволяет дифференцировать интенсивность механического воздействия на

почву в зависимости от свойств агроландшафта, обусловленных потребностью в тех или иных функциях обработок (рисунок 3.8).

Рисунок 3.8 – Алгоритм дискретизации состояния почвы

Каждому из восьми сочетаний почвенных условий отвечает свой комплекс обработок почвы и посева, необходимый для трансформации реальных параметров почвы в оптимальные для развития культур. Это многократно увеличивает количество вариантов использования традиционной техники и стимулирует разработку принципиально новых рабочих органов и технических средств. Состояние почвы определяет необходимый уровень интенсивности её обработки.

Согласно алгоритму (рисунок 3.8), наиболее благоприятное сочетание почвенных условий представлено под № 1 (почва в достатке обеспечена минеральным питанием, слабо поражена вредными организмами, имеет оптимальную плотность). Для такого состояния отсутствует потребность во всех функциях обработок, а значит и в обработках почвы вообще! Это как раз тот случай, когда может быть рекомендована нулевая обработка, и не более.

Безоглядное культивирование *no-till* в других, нарастающих по сложности, условиях (№№ 2-8) сопряжено с негативными последствиями, проявляющимися в виде усиления заражённости посевов вредными организмами, увеличения дефицита элементов минерального питания растений, повышения степени уплотнения почвы, а также возрастании поверхностного стока, являющегося причиной недостатка продуктивной влаги и эрозии почвы.

Создание почвенных условий № 1 – достаточно хлопотная, не сиюминутная и затратная задача. Для решения её должен быть предусмотрен комплекс мероприятий. Отчего разумные объёмы применения в агроландшафтах привлекательной чистой нулевой обработки вряд ли могут быть значительными. Если механическому уничтожению вредных организмов и минерализации органического вещества почвы (в ограниченных условиях) есть альтернатива (зачастую оспариваемая из экономических и экологических соображений), то разуплотнению почвы механическим рыхлением таковой пока нет. Необходимость же в рыхлении пашни, имеющей разрушенную структуру и систематически переуплотняемой тяжёлой техникой, присутствует в большинстве агроландшафтов.

Некоторые хозяйства, следуя безосновательным посулам навязчивой рекламы, отказались от вспашки и перешли на энергосберегающие обработки без оборота пласта. На практике энергосбережение оказалось фиктивным, так как многократно возросли объёмы работ и затраты по борьбе с вредными организмами. Поэтому пришлось спешно возвращаться к классической системе обработки почвы.

Применение минимальных обработок должно быть тщательно дифференцировано, прежде всего, к биологическим особенностям возделываемых культур и состоянию почвы.

3.3 Алгоритм компоновки адаптивных вариантов технологий

Используя кибернетический подход, представим поле внутри агроэкологической провинции в виде объекта управления, продуктивность которого формируется исполнением системы управленческих решений [42] (рисунок 3.9).

Рисунок 3.9 – Схема принятия управленческих решений

В соответствии с законом необходимого разнообразия Эшби, эффективное управление возможно при разнообразии управляющей системы не меньшим разнообразия объекта управления, представленного в виде поля, характеризуемого исходным состоянием почвы. Под разнообразием объекта управления понимается количественная мера числа состояний, в которых почва конкретного поля может находиться под воздействием внешней среды или внутренних причин. Разнообразие управляющей системы – количественная мера имеющихся её вариантов воздействия на почву.

В реальности количество состояний управляемого объекта образует непрерывное виртуальное пространство. Но способы и технические средства для обработок почвы и посева имеют конкретную конфигурацию и не могут это пространство полностью закрыть. Поэтому предпринята дискретизация состояния почвы для того, чтобы агротехнические способы в сочетании со средствами механизации поставить в соответствие определённому, поддающемуся формализации, состоянию почвы. Из обширного массива

возможных вариантов после предшественников различной степени благоприятности сгруппировано разнообразие в виде четырёх основных состояний почвы, выраженных с учётом взаимосвязи функций обработки почвы при её исполнении [43] (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Исходные состояния почвы для адаптивных вариантов технологий производства зерновых культур в ЦЧР

Культуры	Варианты исходного состояния почвы	Подзоны ЦЧР	Исходное состояние почвы		
			Потенциальная заражённость вредными организмами	плотность	обеспеченность питательными веществами на планируемую урожайность
1. Озимая пшеница	1.1	3	Слабая	$\leq 1,3 \text{ г/см}^3$	Достаточная
	1.2	2-3		Независимо от исходного состояния	Недостаточная
	1.3	1-3	Сильная	$> 1,3 \text{ г/см}^3$	Достаточная
	1.4	1-3			Недостаточная
2. Яровой ячмень	2.1	1-3	Независимо от исходного состояния	Независимо от исходного состояния	Недостаточная
	2.2	1-3			Достаточная

Закон необходимого разнообразия определяет управленческие решения необходимые по изменению технологии производства культур для достижения поставленной цели. В соответствии с обозначенными вариантами объекта управления сформировано разнообразие управленческих решений в виде адаптивных вариантов технологий производства зерновых культур (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Алгоритм компоновки адаптивных вариантов технологий производства озимой пшеницы и ячменя в ЦЧР

Культуры	Варианты технологий	Подзоны региона	Применяемые приёмы				уход за посевами	уборка урожая
			обработка почвы	внесение основного удобрения	предпосевная обработка почвы	посев		
1. Озимая пшеница	1.1	3	Прямой посев (<i>no-till</i>)				Корневые подкормки. Листовые подкормки, совмещённые с применением средств защиты растений	Скашивание и обмолот зерновых
	1.2	2-3	Совмещение с посевом полосной обработки почвы (<i>strip-till</i>) и локального внесения удобрения					
	1.3	1-3	Лущение стерни предшественника. Послойная обработка почвы. Щелевание посевов	–	Совмещение с посевом предпосевной обработки почвы			
	1.4	1-3	Совмещение с посевом предпосевной обработки почвы и локального внесения удобрения					
2. Яровой ячмень	2.1	1-3	Лущение стерни предшественника. Безотвальная обработка почвы. Глубокое рыхление зяби	–	Ранневесеннее боронование зяби	Совмещение с посевом предпосевной обработки почвы и локального внесения удобрения		
	2.2	1-3		–		Совмещение с посевом предпосевной обработки почвы		

Сущность управления заключается в таком преобразовании состояний управляемого объекта, в результате которого вероятности его нежелательных состояний уменьшаются, а вероятности желательных увеличиваются, что и обеспечивает полезный эффект.

По варианту 1 управления исходная плотность почвы не более $1,3 \text{ г/см}^3$, её обеспеченность основными элементами питания достаточная на планируемую урожайность. Заражение вредными организмами не превышает порог вредоносности. Требуется лишь качественная заделка семян, что с минимальными издержками осуществляется сеялкой прямого посева (технология *no-till*).

Полезный эффект варианта прямого посева состоит в его наименьшей энергоёмкости. Кроме того, применение прямого посева позволяет снизить эрозионные процессы [44], а также повысить плодородия почвы вследствие увеличения в ней органического вещества и улучшения структурности [45], [46].

Для прямого посева предпочтительны условия с дефицитом продуктивной влаги [21], [47]. Поэтому производство озимых зерновых по варианту 1.1 рекомендуется в засушливой подзоне 3 региона (рисунок 1.4). Предшествовать приёму должно окультуривание полей (выравнивание, очищение от сорняков, ликвидация плужной подошвы) и другие мелиоративные мероприятия [14].

Требованиям прямого посева на характерных ЦЧР средних и тяжёлых по механическому составу почвах в наибольшей степени отвечают сеялки с рабочими органами в виде разрезающих дисков и установленных по их следу двухдисковых сошников. Разрезающие диски формируют в почве посевные бороздки, на дно которых сошники укладывают семена [48].

Однако необходимое заглубление разрезающих дисков в необработанную почву достигают повышенным вертикальным давлением на них, из-за чего сеялки приходится догружать балластными грузами. Более того, разрезающие диски, перекатываясь без скольжения по полю, не перерезают стебли

пожнивных остатков, а затягивают их на дно бороздок. Поэтому конструкция рабочих органов сеялок нуждается в совершенствовании.

Вариант 1.2 отличается от предыдущего лишь дефицитом удобрения для получения планируемой урожайности культуры. Приоритетное потребление удобрения культурой, а не более расторопными сорняками, достигается способом его локального внесения ниже уровня семян в ленты фиксировано ориентированные относительно рядков растений. Реализуют способ комбинированным орудием, совмещающим внесение удобрения с полосной обработкой почвы и посевом культуры (*strip-till*). При этом почва обрабатывается полосами независимо от её исходного состояния по плотности.

Совмещение локального внесения удобрений с обработкой почвы и посевом позволяет экономить ресурсы и является средством предотвращения избыточного уплотнения почвы. Повышение коэффициента использования питательных элементов при локальном внесении позволяет снизить по сравнению с разбросным способом дозы удобрений на 25-30%. Нередко внесение половинной дозы удобрений локальным способом обеспечивает такой же урожай, как и при полной дозе вразброс.

Вариант 1.2 технологии по признакам целесообразности использования функций обработки почвы рекомендуется в засушливой и слабо засушливой подзонах 2 и 3 ЦЧР (рисунок 1.4).

На удобренном, но заражённом вредными организмами фоне с повышенной плотностью почвы (вариант 1.3) востребованы функции обработки по уничтожению вредных организмов и рыхлению почвы. Лушение стерни после уборки непаровых предшественников направлено на предотвращение иссушения почвы и провоцирование прорастания семян сорняков [49].

Через 10-15 дней после лушения стерни используют комбинированные машины послойной обработки, положительно зарекомендовавшие себя в условиях тяжёлых почв. Через следующие 10-15 дней, после появления

всходов очередной волны сорняков, высевают культуру сеялками-культиваторами с лаповыми сошниками, которые совмещают с посевом предпосевную культивацию поля.

Наиболее сложный и затратный в практической реализации вариант 1.4, характеризующийся взаимосвязью факторов повышенной заражённости вредными организмами и плотности почвы, а также дефицита питания на планируемую урожайность культуры. Функции обработок почвы по данному варианту наиболее востребованы и их целесообразно реализовать последовательным выполнением нескольких приёмов. Это лущение стерни, послойная обработка почвы и совмещённое с посевом локальное внесение удобрения.

Варианты технологии 1.3-1.4 могут быть использованы во всех подзонах ЦЧР.

На всех вариантах адаптивной технологии возделывания яровых зерновых, а также в технологиях 1.3 и 1.4 озимых зерновых культур для накопления продуктивной влаги и предотвращения эрозии от талого и ливневого стока актуально предзимнее щелевание посевов. Щели должны быть узкими (шириной 8-10 см) и с ненарушенными стенками. Выполняют их инновационной конструкцией роторного щелевателя [31].

Приёмы ухода за посевами озимых включают в себя корневые и листовые подкормки, а также применение химических средств защиты растений.

Корневые подкормки проводят, как правило, азотным удобрением (КАС, аммиачная селитра, карбамид) в твёрдом виде или жидкими формами. Подкормку твёрдыми удобрениями выполняют разбрасывателями. Жидкими формами удобрений растения подкармливают с помощью полевых опрыскивателей.

На первой ранневесенней корневой подкормке озимой пшеницы высокую эффективность показал роторный подкормщик Ликвилайзер. Конструкция осуществляет проколы почвы иглами на глубину до 8 см и внутрив почвенную инъекцию через них растворов удобрений (рисунок 3.10).

Рисунок 3.10 – Рабочие органы подкормщика Ликвилайзер

При этом иглы одновременно рыхлят верхний слой почвы без повреждения корневой системы растений, что сказывается благоприятно на их развитии, особенно на заплывающих суглинистых почвах.

Инъекция жидких минеральных удобрений в почву способствует повышению их эффективности, особенно в засушливых условиях. Жидкая форма удобрений позволяет готовить баковые смеси с недостающими элементами питания в зависимости от потребности растений. Экономия на удобрениях может достигать 50-60% по сравнению с поверхностным внесением [50].

Для листовых подкормок применяют водорастворимые смеси элементов питания, содержащие ряд микроэлементов в форме хелатов. Готовят смеси по данным листовой диагностики потребности растений в количестве сбалансированных элементов питания [51]. Проводят листовые подкормки полевыми опрыскивателями автономно или в баковой смеси с пестицидами, совмещая оперативную коррекцию питания культуры и снятие с растений стрессовой нагрузки пестицидами.

Убирают озимые современными зерноуборочными комбайнами с измельчителями соломы.

Адаптивная к агроэкологической провинции безальтернативная региональная технология производства озимой пшеницы 1.4 ориентирована на использование всех функций обработки почвы, независимо от складывающейся целесообразности в конкретных условиях (рисунок 3.11).

Рисунок 3.11 – Производство озимой пшеницы в адаптивно-ландшафтном земледелии

Технология же углубленной адаптации 1.1-1.3 гибкая. В ней используются лишь необходимые функции обработки, обусловленные исходным состоянием почвы. Например, зачем расходовать энергию на рыхление, если плотность почвы не превышает приемлемую для вегетации растений величину $1,3 \text{ г/см}^3$. Или какой смысл в уничтожении вредных организмов энергоёмким оборотом пласта, если заражённость ими не превышает порога вредоносности. В этом заключается ресурсосберегающая сущность углубленной адаптации технологии.

Таким образом, углубленная адаптация обеспечивает экономию энергетических ресурсов за счёт предотвращения нецелевого их расходования на обработку почвы. Попутно обеспечивается и экологический эффект в виде сокращения излишнего разрушения обработкой структуры почвы и снижения уплотняющего воздействия на неё ходовых систем сельскохозяйственной техники.

Учитывая априори, что величина затрат и экологических последствий от исполнения технологии пропорциональна интенсивности механического воздействия на почву и расходу моторного топлива [43], сравним адаптивные варианты по данным показателям (рисунок 3.12).

Рисунок 3.12 – Экономико-экологические показатели адаптивных вариантов производства озимой пшеницы

Расчёты выполнены при комплексной механизации технологии с использованием техники, производимой странами таможенного содружества.

Так, адресованный для варианта 1.1 исходного состояния почвы прямой посев культуры существенно привлекательнее насыщенных приёмами вариантов 1.2-1.4: по интенсивности воздействия на почву в 1,3-1,7 раза и по расходу моторного топлива – в 1,2-1,5 раза. Но в то же время прямой посев абсолютно не приемлем для исходного состояния почвы вариантов 1.2 и, тем более, 1.3 и 1.4. Для них приведение почвы в состояние, соответствующее требованиям культуры, сопряжено с повышением интенсивности воздействия на почву и расхода моторного топлива, последствия чего носят существенный как экономический, так и экологический характер. Поэтому налицо

необходимость дифференцированного углубленного подхода к выбору адаптивных технологий для различных исходных состояний почвы, способного обеспечить значительный экономико-экологический эффект.

Таким образом, актуально решение задачи эмпирического определения выгодного соотношения между исходным состоянием почвы, способом её основной обработки и соответствующим вариантом адаптивной технологии, обеспечивающей максимальную экономико-экологическую эффективность производства растениеводческой продукции, в частности зерна озимой пшеницы.

Агротехника возделывания яровых зерновых предусматривает осенние мероприятия по рыхлению почвы и уничтожению вредных организмов в виде системы зяблевой обработки. Эффективной альтернативы зяблевым обработкам под яровые культуры в ЦЧР не существует.

После лущения стерни предшественника зябь обрабатывают безотвальными орудиями. В предзимний период на зябь накладывают рыхление почвы чизелями на глубину 40-45 см, цель которого состоит в разрушении плужной подошвы и предотвращении эрозии от талого стока. Периодичность глубокого рыхления зяби – 1 раз в 3-4 года. На раннем весеннем закрытии влаги используют бороны. Далее варианты технологии производства яровых зерновых формируют с учётом лишь фактора обеспеченности почвы питательными веществами.

При дефиците питательных веществ (вариант 2.1) посев культур проводят комбинированными орудиями, совмещая предпосевную культивацию и локальное внесение удобрения. Если питательных веществ в почве достаточно (вариант 2.2), культуру высевают сеялками-культиваторами с лаповыми сошниками.

Реализация вариантов 2.1-2.2 возможна во всех подзонах ЦЧР, дифференцируемых по увлажнению.

Средства механизации ухода за посевами и уборки яровых зерновых аналогичны рассмотренным выше вариантам возделывания озимых культур.

4 Актуальность микроудобрений в технологиях углубленной адаптации

Растения в процессе вегетации используют широкую номенклатуру элементов питания, которые по величине потребления подразделяют на макро- (азот, фосфор, калий), мезо- (кальций, магний, сера) и микроэлементы (бор, марганец, железо, медь, цинк, молибден и др.). В отличие от макроэлементов потребность растений в микроэлементах удовлетворяется количеством в десятки и сотни тысяч раз меньшим. Но согласно закону минимума, продуктивность растений снижает элемент, находящийся в минимуме, независимо от того, в каком количестве он им требуется.

В современных условиях применение в земледелии только макроудобрений, содержащих *NPK*, не в полной мере решает вопросы повышения урожайности с.-х. культур и качества получаемой растениеводческой продукции [3].

Важную роль в биохимических процессах вегетирующих растений играют удобрения с микроэлементами. Содержание их в почве сказывается на росте, развитии и урожайности сельскохозяйственных культур, качестве получаемых из них пищевых продуктов и, как следствие, на здоровье людей, потребляющих эти продукты. Низкое содержание многих микроэлементов в почве, а также возросший их вынос сортами культур интенсивного типа, явились лимитирующим фактором эффективности систем удобрения. Сбалансированное внесение макро- и микроэлементов увеличивает урожайность культур и повышает эффективность использования *NPK* [52].

4.1 Виды микроудобрений

Микроудобрения в зависимости от способа доставки растениям подразделяются на три вида: для предпосевного внесения в почву, для нанесения на семена культуры и для листовых подкормок растений. Все три

вида микроудобрений производит флагман отечественной химической промышленности для земледелия Буйский химический завод (Костромская область).

Традиционный способ внесения в почву микроудобрений в виде сухой массы неорганических сульфатных, оксидных и др. солей малопригоден, так как в почвенной среде возможен переход микроэлементов в недоступные формы и накопление тяжёлых металлов, а также сопутствующее ухудшение усвоения растениями *NPK*. При корневой подкормке солями микроудобрений их потери могут достигать 20-80% [25].

Новым стартовым продуктом для предпосевного внесения в почву под культуры является комплексное органоминеральное удобрение (ОМУ) на основе низинного торфа. ОМУ содержит в своём составе *NPK*, гуминовые соединения и микроэлементы (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Действующее вещество органоминерального удобрения (ОМУ), %

Марка	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	S	C _{гум}	Cu	Zn	Fe	Mn	B
Универсал	7	7	8	1,5	3,67	11,0	0,01	0,01	0,02	0,05	0,02
Пшеничное	7	7	8	1,7	4,03	9,7	0,1	0,4	0,06	0,08	0,1

В технологическом процессе получения ОМУ элементы питания образуют с гуминовыми соединениями органоминеральные комплексы, позволяющие закреплять азот и калий в обменной форме и уменьшать их подвижность, а фосфор переводить в форму легко усвояемую растениями. За счёт этого удобрение действует пролонгировано и коэффициент использования элементов питания из него в 1,5 раза выше в сравнении с минеральными удобрениями (рисунок 4.1).

Рисунок 4.1 – Слева корни растений в опыте предпочитают использовать для питания гранулы ОМУ. Гранулы минерального удобрения в опыте показаны справа

Для увеличения продуктивности культур и восстановления плодородия почвы ОМУ модифицировано микробиологическими препаратами на основе ризосферных бактерий, которые мобилизуют и переводят в доступную форму почвенные запасы *NPK* из прикорневой зоны. Оптимальное соотношение элементов питания в ОМУ предохраняет от избыточного накопления нитратов в продуктах и улучшает их питательную ценность. Полезная микрофлора в процессе своей жизнедеятельности синтезирует вещества, которые блокируют развитие патогенных микроорганизмов (бурой ржавчины, мучнистой росы, снежной плесени, фузариоза и др.).

Наибольший эффект от применения ОМУ достигается при локальном внесении в рядки при посеве культур. При разбросном внесении эффективность удобрения под высеваемую культуру несколько снижается, но усиливается позитивное последствие на следующей культуре в севообороте. Рекомендуемая доза под зерновые в зависимости от исходного состояния почвы колеблется от 50 до 200 кг/га.

Жизнеспособность растений усиливает обработка микроудобрением семян [25] (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Высококонцентрированное комплексное минеральное удобрение Аквамикс СТ для обработки семян

Марка	Содержание действующего вещества, %									
	<i>Fe</i> (ДТПА)	<i>Fe</i> (ЭДТА)	<i>Mn</i> (ДТПА)	<i>Zn</i> (ДТПА)	<i>Cu</i> (ДТПА)	<i>Ca</i> (ДТПА)	<i>Mg</i> (ЭДТА)	<i>Co</i> (ЭДТА)	<i>B</i>	<i>Mo</i>
Аквамикс СТ	1,74	2,1	2,57	0,53	0,53	2,57	–	–	0,52	0,13

Металлы в микроудобрении в качестве элементов питания растения потребляют предпочтительно в форме хелатов, где их атомы связаны с двумя и более атомами органических соединений (хелатирующих агентов). Наиболее известные хелатирующие агенты – химически синтезированные соли органических кислот ДТПА (диэтиленetriаминпентауксусная кислота) и ЭДТА (этилендиаминтераацетатная кислота).

В отличие от неорганических соединений, хелаты, растворяясь в воде, не распадаются на агрессивные ионы, а потому не конкурируют между собой в растворе. Они не разрушают органические структуры действующего вещества пестицидов, что делает возможными листовые подкормки баковыми смесями удобрений с пестицидами. Доза применения препарата Аквамикс СТ – 100 г на 1 тонну семян зерновых культур. Расход рабочего раствора – 10 л/т.

Оптимизация питания растений производится листовыми подкормками микроудобрением. Растворённые в воде малые дозы препаратов хорошо поглощают листья, вследствие чего эффективность микроудобрений достигает 90%. Для листовых подкормок культур производится линейка одноэлементных хелатных и комплексных водорастворимых микроудобрений, применяют которые опрыскиванием посевов полевыми опрыскивателями. Дозировки определяют по данным почвенной и листовой диагностики. Опрыскивание возможно рабочим раствором обособленно с микроудобрениями или совмещённым в баковой смеси с пестицидами. Для большинства агротехнических приёмов расход рабочего раствора вписывается в диапазон 200-300 л/га.

Для компенсации дефицита элементов питания применяют хелатные формы микроудобрений (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Микроэлементы в хелатной форме

Марка	Хелатирующий агент	Содержание	Доза применения, кг/га	Концентрация рабочего раствора, %	Расход рабочего раствора, л/га
Хелатэм Fe 6	ЕДДА	6	0,4-1,0	0,05-0,15	200-300
Хелатэм Fe 11	ДТПА	11	0,5-1,5	0,1	200-300
Хелатэм Fe 13	ЭДТА	13	0,2-1,0	0,2-0,3	200-300
Хелатэм Mg 6	ЭДТА	6	1,0-1,5	0,1	200-300
Хелатэм Co 13	ЭДТА	13	0,03-0,05	0,02-0,05	300-600
Хелатэм Zn 15	ЭДТА	15	1,0-2,0	0,1	200-300
Хелатэм Cu 15	ЭДТА	15	0,5-1,0	0,1	200-300
Хелатэм Mn 13	ЭДТА	13	1,0-2,0	0,1	200-300

Комплексные водорастворимые микроудобрения для листовых подкормок представлены в виде шестнадцати наименований марки Акварин, содержащих элементы питания в хелатной и неорганической форме (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Комплексные микроудобрения

Марка	Содержание действующего вещества ^{*)} , %							
	N в виде			N суммарное	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	S
	NO ₃	NH ₄	NH ₂					
Акварин-1	7,0	–	–	7,0	11,0	30,0	4,0	3,0
Акварин-2	6,3	–	7,7	14,0	10,0	28,0	2,5	1,5
Акварин-3	3,0	–	–	3,0	11,0	35,0	4,0	9,0
Акварин-4	4,5	1,5	–	6,0	12,0	33,0	3,0	7,0
Акварин-5	3,9	2,1	12,0	18,0	18,0	18,0	2,0	1,5
Акварин-6	11,3	3,7	–	15,0	5,0	30,0	1,7	1,3
Акварин-7	7,0	6,0	–	13,0	5,0	25,0	2,0	8,0
Акварин-8	11,9	7,1	–	19,0	6,0	20,0	1,5	1,4
Акварин-9	6,8	13,2	–	20,0	8,0	8,0	1,5	9,0
Акварин-10	7,9	12,1	–	20,0	5,0	10,0	1,5	8,4
Акварин-11	10,0	8,0	–	18,0	18,0	18,0	–	–
Акварин-12	10,0	2,0	–	12,0	12,0	35,0	1,0	0,7
Акварин-13	4,4	8,6	–	13,0	41,0	13,0	–	–
Акварин-14	8,0	9,0	–	17,0	6,0	18,0	1,5	7,0
Акварин-15	3,0	–	–	3,0	11,0	38,0	3,0	9,0
Акварин-16	6,0	–	–	6,0	12,0	36,0	2,0	7,6

^{*)} Содержание микроэлементов во всех марках, %: Fe (ДТПА)=0,054;

Zn (ЭДТА)=0,014; Cu (ЭДТА)=0,01; Mn (ЭДТА)=0,042; Mo=0,004; B=0,02

Удобрения Акварин предназначены для корректирующих листовых подкормок, а также в качестве антистрессантов при обработках посевов пестицидами и неблагоприятных погодных условий. Не содержат хлора и других, вредных для растений соединений, полностью растворимы в воде. Для зерновых культур рекомендуется две листовые подкормки комплексными удобрениями Акварин – в фазу кущения и выхода в трубку.

Листовые подкормки при резком дефиците микроэлементов проводят высококонцентрированными водорастворимыми комплексными минеральными удобрениями (таблица 4.5)

Таблица 4.5 – Высококонцентрированные удобрения для листовых подкормок

Марка	Содержание действующего вещества, %									
	<i>Fe</i> (ДТНА)	<i>Fe</i> (ЭДТА)	<i>Mn</i> (ДТНА)	<i>Zn</i> (ДТНА)	<i>Cu</i> (ДТНА)	<i>Ca</i> (ДТНА)	<i>Mg</i> (ЭДТА)	<i>Co</i> (ЭДТА)	<i>B</i>	<i>Mo</i>
Аквамикс Л	4,1	–	3,0	0,63	0,63	–	0,9	0,06	0,6	0,17
Аквамикс Л жидкий	1,64	–	1,2	0,25	0,25	–	0,36	0,04	0,24	0,06

Освоено производство водорастворимых минеральных удобрений, которые могут быть использованы как для листовых подкормок, так и для внесения в почву (таблицы 4.6 и 4.7).

Таблица 4.6 – Минеральные удобрения с макроэлементами в неорганической форме

Марка	Содержание элементов питания, %						
	<i>N</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>K₂O</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>S</i>	<i>B</i>
Нитрат кальция, марка А (2-водный)	14,9	–	–	–	27,0	–	–
Нитрат кальция, марка Б (2-водный)	14,5	–	–	–	26,3	–	0,3
Нитрат кальция, марка Г (4-водный)	12,0	–	–	–	23,8	–	–
Нитрат кальция, марка Д (жидкий)	8,5	–	–	–	17,0	–	–
Нитрат кальция, марка Е (жидкий)	7,1	–	–	–	14,0	–	–
Нитрат магния (гранулированный)	11,1	–	–	15,5	–	–	–
Нитрат магния (водный раствор)	7,0	–	–	10,0	–	–	–
Сульфат магния гранулированный, марка А	–	–	–	29,8	–	23,5	–
Сульфат магния кристаллический, марка В	–	–	–	16,9	–	13,5	–
Нитрат калия	13,6	–	46,0	–	–	–	–
Сульфат калия, рН 6-7	–	–	53,0	–	–	18,0	–
Сульфат калия, рН 3-3,5	–	–	52,5	–	–	17,8	–
Монокалийфосфат	–	52,0	34,0	–	–	–	–
Калий метаборат	–	–	44,0	–	–	–	10,0

Таблица 4.7 – Комплексные минеральные удобрения с макро- и микроэлементами в неорганической форме

Марка	Содержание элементов питания, %				
	<i>N</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>K₂O</i>	<i>MgO</i>	Микроэлементы
Растворин А	10,0	5,0	20,0	5,0	<i>Zn</i> =0,01; <i>Cu</i> =0,01; <i>Mn</i> =0,1; <i>B</i> =0,01
Растворин А1	8,0	6,0	28,0	3,0	
Растворин Б	18,0	6,0	18,0	–	
Растворин Б1	17,0	17,0	17,0	–	
Растворин В	13,0	10,0	23,0	1,3	
Растворин Д	6,0	10,0	30,0	3,0	
Растворин Е	20,0	16,0	10,0	–	

4.2 Особенности механизации подкормок зерновых культур

Корневые подкормки зерновых культур выполняют твёрдыми удобрениями, используя разбрасыватели, и растворами удобрений, применяя полевые опрыскиватели. Листовые подкормки культур осуществляют исключительно полевыми опрыскивателями.

На корневых подкормках растворами удобрений используют специальные распылители. Их монтируют на штанге опрыскивателей с подвесными шлангами, которые предотвращают контакт с удобрением листового аппарата растений (рисунок 4.2).

Рисунок 4.2 – Корневая подкормка посевов полевым опрыскивателем

При листовых подкормках, выполняемых полевыми опрыскивателями, распространены баковые смеси удобрений с пестицидами (рисунок 4.3).

Рисунок 4.3 – Листовая подкормка посевов опрыскивателем совмещённая с внесением пестицидов

Для того, чтобы агротехнический приём принёс ожидаемый результат, к его выполнению надо заблаговременно и хорошо подготовиться. Любой препарат принесет отдачу только при качественном нанесении его на растения, а для этого необходимо тщательно настроить опрыскиватель с учетом свойств обрабатываемых объектов и погодных условий.

Задача опрыскивания состоит в точном дозировании количества вносимых препаратов, равномерном распределении их по обрабатываемой поверхности и обеспечении высокой степени осаждения капель. Для снижения затрат на выполнение приёма и повышения уровня экологической безопасности эффект опрыскивания посевов должен быть достигнут при минимизации испарения и сноса препаратов ветром.

Парадокс практического использования опрыскивающей техники состоит в том, что применяя дорогостоящие, в том числе самоходные машины, зачастую не уделяют должного внимания адаптации режимов их работы к складывающимся условиям. К примеру, очень редко при переходе на работу по другой культуре или с изменением погодных условий производят смену типа и/или калибра распылителей. А ведь это основополагающий фактор, от которого напрямую зависит качество нанесения препаратов на растения.

Для предотвращения упрощенческого, экономически и экологически дезориентированного подхода при настройке опрыскивателей режимы их работы необходимо оптимизировать во взаимной связи, учитывая при этом, что качество исполнения приёмов, помимо режимов опрыскивания, в значительной степени зависит и от погоды.

Начинают настройку опрыскивателей с определения расхода рабочего раствора. Листовые подкормки, как правило, совмещают с нанесением на листья растений пестицидов. Поэтому ориентируются на их регламенты доз рабочего раствора. Чаще всего это 200-300 л/га для гербицидов и 300-400 л/га для фунгицидов. Конкретное значение этого параметра уточняют по погоде во время обработки. Нижние границы рекомендуемых диапазонов приемлемы для благоприятных погодных условий, верхние – в сухую погоду.

Затем подбирают тип и калибр распылителей. Наиболее широко используют плоскофакельные щелевые, которые образуют капли размером от 40 до 600 мкм (рисунок 4.4).

Рисунок 4.4 – Щелевые распылители

Капли в этом диапазоне могут нести экологическую опасность вследствие повышенного испарения и сноса ветром (при диаметре менее 200 мкм), а также скатывания на почву (более 300 мкм), минуя листовую поверхность растений. Более однородный размер капель у модифицированных щелевых распылителей «Анти Дрейф», удовлетворительно работающих при пороговых значениях ветра и влажности воздуха.

Повышенная адаптация к вариабельности погодных условий у инжекторных распылителей, формирующих жидкостно-воздушные капли (рисунок 4.5).

Рисунок 4.5 – Схема инжекторного распылителя

Их применение позволяет в сравнении со щелевыми до 90% снизить снос капель при скорости ветра до 5 м/с.

Инжекторные распылители подразделяются на полноформатные и компактные. Полноформатные распылители функционируют при давлении рабочего раствора 2-8 атм. Их применение эффективно на мощном густом стеблестое, а также в условиях повышенной температуры воздуха и скорости ветра. Компактные распылители меньшего размера, они работают при давлении рабочего раствора 1-8 атм. с несколько пониженной скоростью капель и способностью их проникновения внутрь стеблестоя. Качество работы этих распылителей существенно зависит от скорости опрыскивателя.

При работе на повышенных скоростях улучшить равномерность распределения рабочего раствора на листовой поверхности позволяют конструкции двухфакельных распылителей, которые содержат по два сопла, ориентированных на подачу жидкости вперед и назад по ходу перемещения опрыскивателей. Это распылители марок *TFA*, *TFLD*, *TFS* (Италия), а также более совершенные асимметричные *TurboDrop*[®] (ФРГ) (рисунок 4.6).

Рисунок 4.6 – Опрыскиватель с асимметричными распылителями *TurboDrop*[®] в работе

Аналогом такого распылителя является сдвоенная головка *AirMix*[®] *ADF* (ФРГ) с двумя посадочными местами под однофакельные распылители. У нее расход рабочего раствора равен сумме расходов двух распылителей и может достигать 400-800 л/га, что характерно для совмещения внесения с микроудобрениями фунгицидов (рисунок 4.7).

Рисунок 4.7 – Сдвоенная головка *AirMix[®] ADF*

При меньших дозировках на головку монтируют распылители низшего калибра, дающие в совокупности требуемый объемный расход. Сдвоенная головка позволяет использовать одновременно распылители различного калибра. К примеру, при опрыскивании с повышенным расходом рабочего раствора в жаркую погоду более крупный калибр устанавливают по направлению движения для противодействия набегающему потоку воздуха, а меньший калибр – в обратном направлении.

Двухфакельные распылители предпочтительны для нанесения препаратов на растения с мощной листовой поверхностью, образующей труднодоступные теневые зоны (сахарная свекла после смыкания листьев в междурядьях, картофель и др.).

В каждом хозяйстве желательно иметь несколько комплектов распылителей разных типов и калибров.

Калибр распылителя означает расход жидкости при определенном давлении. Эти параметры принято измерять соответственно в галлонах США (1 галлон = 3,785 л) и единицах *psi* (1 *psi* = 0,0703 атм.). Идентифицируют кодирование при давлении рабочего раствора 40 *psi*. Величину калибра дублируют цветом распылителя. Так, калибр 03 (синий цвет) означает расход через распылитель 0,3 галлона жидкости в минуту (1,135 л/мин) при давлении в 40 *psi* (2,81 атм.).

На полевых опрыскивателях, работающих со скоростью 6-12 км/ч, используют следующие калибры распылителей:

025 (фиолетовый) с расходом рабочего раствора 90-210 л/га применяют при благоприятной погоде (температура воздуха 10-20 °С, влажность воздуха 65-90 %, скорость ветра менее 2 м/с);

03 (синий) – соответственно 120-240 л/га, погода, близкая к благоприятной (температура воздуха 20-25⁰С, влажность более 60%, скорость ветра менее 3 м/с);

04 (красный) – 150-350 л/га, сухая, жаркая или ветреная погода (опрыскивание при пониженном давлении рабочего раствора увеличенным размером капель);

05 (коричневый) – 200-400 л/га, для фунгицидов, инсектицидов на овощных и технических культурах.

Равномерность нанесения рабочего раствора и величина сноса капель ветром зависит от правильного выбора высоты штанги h над обрабатываемым объектом (рисунок 4.8).

Рисунок 4.8 – Нанесение на листья рабочего раствора полевым опрыскивателем

Определяют h в зависимости шага расстановки распылителей на штанге и угла факела распыла, указанного на маркировке распылителя. Так, при угле факела распыла 80-90⁰ и шаге расстановки 500 мм оптимальная высота штанги составит 0,6-0,9 м; 110⁰ – 0,4-0,6 м; 120⁰ – 0,4-0,7 м.

Важно правильно отсчитывать значение h в зависимости от условий опрыскивания. При опрыскивании зерновых штангу выставляют от уровня середины колосьев. Для более насыщенного покрытия препаратами не только колосьев, но и флагового листа, штангу несколько понижают.

Ситуация усугубляется при работе на повышенных скоростях. Понижением штанги можно уменьшить снос капель ветром. Однако опускать штангу очень низко нельзя. В данном случае лучше применить распылители с большей величиной угла распыла. Увеличение его с 80-90 до 110-120° позволяет понизить штангу примерно на 25 см. Если при этом не удаётся предотвратить запредельный снос капель, переходят на инжекторные распылители или их увеличенный калибр, а также уменьшают давление рабочего раствора и, соответственно, скорость опрыскивателя, наконец, приостанавливают работы по опрыскиванию посевов.

Расход рабочей жидкости через распылители и размер образуемых капель зависит от давления рабочего раствора, с ростом которого расход увеличивается, а размер капель уменьшается и улучшается равномерность покрытия ими растений. Но в то же время возрастают потери препаратов из-за испарения и сноса ветром. Поэтому наиболее полно реализовать эффект от мелких капель можно только в благоприятных погодных условиях.

Для каждого типа распылителей определен допустимый интервал давления рабочего раствора, однако всегда лучше ориентироваться на его оптимальную величину. Она составляет 2,5 атм. для щелевых обычных распылителей, 3 атм. – для щелевых «Анти-Дрейф» и двухфакельных, а также для инжекторных компактных и двухфакельных и 4 атм. – для инжекторных полноформатных.

Для определения оптимальной скорости движения опрыскивателей предлагается использовать номограмму, которая выполнена в рекомендуемом диапазоне давления рабочего раствора (1,5-8 атм.) используемых в полеводстве калибров распылителей 025-05 (рисунок 4.9).

Рисунок 4.9 – Номограмма для определения скорости опрыскивателя

С помощью номограммы по установленным значениям калибра распылителей, давления p и расхода рабочего раствора Q определяют скорость опрыскивателя V , не выполняя расчетов. Последовательность действий при пользовании номограммой устанавливается ее ключом: $p \rightarrow \text{Калибр} \rightarrow Q \rightarrow V$.

Покажем на примере применение рекомендаций на практике.

Допустим, возникла необходимость листовой подкормки посевов ярового ячменя и внесения гербицидов для уничтожения сорняков. Экономически целесообразно данные приёмы совместить за один проход опрыскивателя. Рельеф поля пересеченный. Днем температура воздуха достигает $+26^{\circ}\text{C}$, скорость ветра – 5-6 м/с.

По прогнозу, в 21:00 температура воздуха снизится до $+18^{\circ}\text{C}$. Относительная влажность воздуха составит 50%, скорость ветра – 1,5 м/с. С учетом листовой диагностики потребности растений в элементах питания и видовой засоренности посевов наметили применить микроудобрение Акварин 15 в дозе 2 кг/га совместно с гербицидом Балерина в дозе 0,3 л/га. Требуется настроить полевой штанговый опрыскиватель на эту обработку.

Прежде всего, обозначим время выполнения приема. В связи с высокой дневной температурой воздуха и скоростью ветра принимаем решение опрыскивать посевы ярового ячменя в тёмное время суток после 21:00, завершив работу не позднее 6:00, до наступления жары следующего дня.

Расход рабочего раствора. Производитель гербицида нормирует этот параметр в диапазоне 200-300 л/га. На момент выполнения обработки температура воздуха и скорость ветра благоприятны для опрыскивания посевов, а влажность воздуха пониженная. Поэтому приемлемо среднее значение расхода рабочего раствора, то есть $Q=250$ л/га.

Тип распылителей. Состояние развития культуры не требует высокой энергии капель. Согласно погодным условиям вполне применимы распылители щелевого типа.

Калибр распылителей. Установленная доза расхода рабочего раствора (250 л/га) соответствует калибру распылителей 04 (красный).

Давление рабочего раствора. Допустимый интервал рабочего давления щелевого распылителя – 1,5-5 атм. При пересеченном рельефе, чтобы обезопасить себя от выхода режима давления за пределы рекомендуемого интервала, назначаем среднюю величину параметра – 3,2 атм.

Определение скорости опрыскивателя. Используем номограмму (рисунок 4.9), на числовую ось p которой в точке $p=3,2$ атм. восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с кривой (калибр 04). Из точки 1 проводим горизонталь до пересечения с лучом $Q=250$ л/га (точка 2) и опускаем перпендикуляр на числовую ось V , где фиксируем оптимальную скорость опрыскивателя, $V = 7,8$ км/ч.

Высота штанги над обрабатываемым объектом. Скорость ветра (1,5 м/с) не накладывает ограничений на высоту штанги. Выбираем среднее значение угла факела распыла 90^0 , при котором высота штанги – 0,6-0,9 м. Растения находятся на ранних фазах развития, поэтому положение штанги измеряем от поверхности поля, поместив ее на средней высоте 0,7 м.

5 Диагностика потребности растений в элементах питания

5.1 Способы диагностики

Оптимизировать питание растений следует в соответствии с диагностическими данными потребности всех питательных веществ независимо от величины потребления. Почвенную диагностику, выполняемую лишь для *NPK*, дополняют листовой, позволяющей оперативно корректировать питание вегетирующих растений в складывающихся условиях. Дефицит каких-то элементов по результатам листовой диагностики устраняют корневыми и листовыми подкормками в вегетационный период.

Листовую диагностику подразделяют на визуальную, химическую и функциональную.

Листовая визуальная диагностика может оказаться полезной при отсутствии возможности выполнения инструментальных диагностических действий, когда потребность растений в питательных веществах определяют по листу при первом появлении симптомов нарушения питания. Коррекция питания вегетирующих растений в складывающихся переменных условиях осуществляется без специальной аппаратуры и химических реагентов.

Методология визуальной диагностики содержит следующие этапы.

Вначале осматривают растения на всём поле и проверяют возможность появления признаков заболевания вследствие иных, не связанных с питанием, факторов – укусов насекомых, механических повреждений, переувлажнения почвы, засухи, высокой или низкой температуры воздуха. Признаки заболевания, обусловленные нарушением обеспеченности растений питательными веществами, как правило, проявляются по полю хаотично отдельными пятнами. Равномерно на всём поле эти признаки присутствуют лишь при длительном нарушении режима питания.

Затем растения обследуют на предмет установления их частей с

проявлением аномалий, которые классифицируют на группы (рисунок 5.1).

Рисунок 5.1 – Классификация симптомов дефицита элементов питания

В первую группу относят симптомы на старых листьях характерные для недостатка азота, фосфора, магния калия и цинка. Эти элементы в случае дефицита перемещаются в растениях из более старых частей в молодые растущие части, на которых признаки голодания не развиваются. Симптомы данной группы подразделяются на две подгруппы:

- поражение листьев целиком (недостаток азота, фосфора);
- симптомы локального характера (недостаток магния, калия, цинка).

Вторая группа симптомов обусловлена недостатком элементов ограниченно мигрирующих по телу растений – кальция, бора, железа, серы, марганца и меди. Дефицит данных элементов сказывается прежде всего на молодых листьях, которые не получают необходимого питания и заболевают. Подразделяются симптомы данной группы на подгруппы:

- появление у молодых листьев хлороза или потеря ими зелёной окраски (недостаток железа, серы, марганца, кальция, бора);
- увядание молодых листьев (недостаток меди).

Затем уточняют правильность визуальной диагностики привлечением дополнительных данных. Прежде всего, это растения-индикаторы, которые могут находиться за пределами посевов культуры, но в примерно идентичных условиях, и заблаговременно упреждающе реагируют на дефицитный элемент.

Однако недостаток элемента питания может быть обусловлен не только его дефицитом в почве. Возможны и другие факторы, понижающие его подвижность и усвояемость растениями – *pH*-реакция почвенного раствора, климатические условия, антагонизм ионов в почве, избыток макроудобрения и др. [53].

Достоинство метода листовой визуальной диагностики в его простоте. Но имеется и серьёзный недостаток. Симптомы проявляются для групп элементов, в которых сложно идентифицировать дефицитный, а также объективные данные при пользовании методом может получить лишь опытный исследователь.

Кроме того, внешние визуальные признаки нарушения питания отражают происшедшие, уже необратимые и не поддающиеся корректировке процессы в растениях, ведущие к снижению урожайности и качества сельскохозяйственной продукции. Поэтому по возможности необходимо использовать более точные упреждающие методы диагностики, не зависящие от индивидуальных особенностей испытателя.

При химической диагностике лабораторным анализом оценивают состав тканей, но не учитывают изменяющуюся реакцию растений на переменные почвенно-погодные условия. Кроме того, в определённые фазы вегетации требуется различное количество элементов питания. Это обуславливает необходимость управляемого поступления их в течение всего периода жизнедеятельности растительного организма. Таким образом, факт наличия элементов питания в тканях не отражает текущую потребность в них растений.

Принципиально новым является метод функциональной листовой диагностики, предложенный Плешковым А.С. и Ягодиным Б.А., который по

реакции живых растений позволяет оценить их истинную потребность в элементах питания [54]. При пользовании методом оценивают не содержание элементов питания, а потребность растений в них, так как доказано, что растения обладают всеми свойствами организованного живого существа [55].

Базируется метод на фундаментальных свойствах существования жизни на Земле – взаимосвязи фотохимической активности хлоропластов живых растений с их потребностью в элементах питания.

Хлоропласты являются уникальной фабрикой синтеза органического вещества. Фотохимическая активность их суспензии при добавлении какого-то элемента питания изменяется пропорционально обеспеченности растений данным элементом. Недостаток элемента устанавливают по увеличению, а избыток – по уменьшению фотохимической активности в сравнении с контрольной суспензией. Степень изменения фотохимической активности от присутствия в питательной среде испытываемого элемента позволяет судить о величине его потребности или избытка.

Но методу Плешкова А.С. и Ягодина Б.А. присущи серьёзные недостатки. Диагностирование каждого из элементов питания проводят обособленно от других компонентов питательной среды, отчего невозможно оценить их взаимное влияние и, соответственно, оптимальное соотношение, соблюдение которого оказывает определяющее действие на продуктивность растений и качество урожая.

По данным того же Ягодина Б.А. и др., при питании растений из почвенного раствора соотношение элементов играет даже более существенную роль, нежели их концентрация [56]. Вследствие этого дефицит или избыток каких-то элементов может нарушить усвоение растениями других элементов. Это не только разбалансирует систему питания растений, но и порождает неопределённость – если дефицит элементов питания можно восполнить подкормками, то на их избыток известным способом влиять невозможно.

5.2 Теоретические основы оптимизации питания растений

Для учёта взаимодействия в растениях между элементами питания при диагностировании их потребности предложено, прежде всего, формализовать модель взаимоувязанного факторного пространства по влиянию элементов питания на фотохимическую активность хлоропластов. Наличие модели позволяет математическими методами оценить долю влияния каждого из элементов и отсеять второстепенные [57].

На начальном этапе оптимизации питания конкретной культуры априори выделяют элементы, значимо влияющие на фотохимическую активность хлоропластов (рисунок 5.2).

Рисунок 5.2 – Алгоритм оптимизации питания сельскохозяйственных культур

Затем способом математического планирования эксперимента испытывают неповторяющиеся смеси выделенных элементов питания и формализуют взаимоувязанное факторное пространство [37].

В основу плана эксперимента положена кибернетическая модель с входными управляемыми факторами (элементами питания) и выходным критерием оптимизации в виде относительного показателя фотохимической активности хлоропластов Y :

$$Y = 100 \frac{F - F_6}{F_6}, \% \quad (5.1)$$

где F – фотохимическая активность хлоропластов в присутствии смесей диагностируемых элементов питания;

F_0 – базовая величина фотохимической активности без использования элементов питания (контроль).

Положительная величина Y свидетельствует о дефиците, отрицательная – об избытке элемента питания.

Используя способ математического планирования эксперимента, диагностические действия проводят в соответствие с матрицей питательных смесей. Проектируют её для выбранных значимых элементов питания, которые присутствуют на двух уровнях: отсутствие (0), наличие (+) в определённой концентрации.

Перечень элементов зависит от биологических особенностей исследуемых культур и достаточно широк. Количество их, как правило, превышает 10. Полный факторный эксперимент даже с десятью элементами питания содержит $2^{10}=1024$ неповторяющихся смесей, реализовать которые в обозначенном объёме совершенно нереально вследствие непомерных затрат средств и времени. Поэтому целесообразна дробная реплика, спроектированная таким образом, чтобы без существенной потери информативности сократить трудоёмкость эксперимента [37].

Особенность дробной реплики состоит в обоснованных уступках. В математической модели линейные эффекты некоторых элементов питания приходится смешивать с эффектами их взаимодействий. Поэтому при определении дробности реплики важно учитывать значимость элементов, выбранных для испытаний. Матрицу дробной реплики строят таким образом, чтобы линейные эффекты наиболее значимых элементов выделить в чистом виде без «примеси» эффектов взаимодействий. Эффекты других менее значимых элементов по убывающей предпочтительности смешивают с

эффектами взаимодействия, начиная с наименее значимого взаимодействия самого высокого порядка [57].

После реализации матрицы дробной реплики с помощью диаграмм рассеяния выделяют значимые дефицитные и избыточные элементы питания. Негативное влияние на растения находящихся в почве избыточных элементов питания сводят до нуля коррекцией дозировки дефицитных элементов.

Содержание инновационного метода рассмотрим на примере диагностики потребности ячменя в питательных веществах.

Допустим, что в конкретных условиях наиболее значимыми для культуры являются 11 элементов питания, которые по убывающей предпочтительности располагают в последовательности: $N, P, K, S, Mg, Zn, Fe, B, Mn, Cu, Mo$.

Априори приоритетно важны первые четыре элемента представленного ряда (N, P, K, S). Их линейные эффекты выделяют в чистом виде, ограничиваясь репликой $2^{11-7}=2^4$, в матрице которой всего $n=2^4=16$ неповторяющихся смесей элементов питания.

Из оставшихся семи элементов более предпочтителен магний. Его линейный эффект смешивают с эффектом наименее значимого единственного взаимодействия самого высокого – четвертого порядка, $Mg \rightarrow N \cdot P \cdot K \cdot S$. Линейные эффекты очередных по убывающей предпочтительности элементов (цинка, железа, бора и марганца) смешивают с эффектами четырёх оставшихся взаимодействий третьего порядка: $Zn \rightarrow N \cdot P \cdot K$, $Fe \rightarrow N \cdot P \cdot S$, $B \rightarrow N \cdot K \cdot S$, $Mn \rightarrow P \cdot K \cdot S$. Линейные эффекты менее предпочтительных элементов из приведенного ряда (меди и молибдена) представляют совместно с эффектами взаимодействий второго порядка. Таких взаимодействий шесть, из которых выбирают два менее значимые: $Cu \rightarrow N \cdot S$, $Mo \rightarrow P \cdot K$.

Матрицу питательных смесей наполняют содержанием (таблица 5.1) и проводят диагностические действия.

Таблица 5.1 – Матрица питательных смесей

Варианты	Уровни варьирования диагностируемых элементов питания														Значения критерия оптимизации, %		
	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>S</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>	<i>B</i>	<i>Mn</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>Y_{1j}</i>	<i>Y_{2j}</i>	средние			
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	32	22	27			
2	+	+	+	0	0	+	0	0	0	0	+	38	32	35			
3	+	+	0	+	0	0	+	0	0	0	0	-31	-39	-35			
4	+	+	0	0	+	0	0	+	+	+	0	6	8	7			
5	+	0	+	+	0	0	0	+	0	+	0	24	32	28			
6	+	0	+	0	+	0	+	0	+	0	0	-6	-4	-5			
7	+	0	0	+	+	+	0	0	+	0	+	-10	-14	-12			
8	+	0	0	0	0	+	+	+	0	+	+	2	10	6			
9	0	+	+	+	0	0	0	0	+	+	+	13	9	11			
10	0	+	+	0	+	0	+	+	0	0	+	-2	-4	-3			
11	0	+	0	+	+	+	0	+	0	0	0	-77	-65	-71			
12	0	+	0	0	0	+	+	0	+	+	0	30	22	26			
13	0	0	+	+	+	+	+	0	0	+	0	13	17	15			
14	0	0	+	0	0	+	0	+	+	0	0	-2	2	0			
15	0	0	0	+	0	0	+	+	+	0	+	-52	-42	-47			
16	0	0	0	0	+	0	0	0	0	+	+	0	-4	-2			
															$\sum_{j=1}^{16} S^2\{Y_j\} = 364$		

Определяют фотохимическую активность суспензии F_6 без добавления элементов питания (контроль). Затем определяют фотохимическую активность хлоропластов F при последовательном добавлении в их суспензию неповторяющихся смесей элементов питания по вариантам 1-16.

Первое значение F является фотохимической активностью хлоропластов после добавления в их суспензию смеси с набором элементов питания согласно первой строке таблицы 5.1. Для этой строки по формуле (5.1) определяют величину критерия оптимизации Y_{11} . Проводят параллельные замеры с повторностью m , позволяющие оценить дисперсию воспроизводимости. При $m = 2$ для первой строки среднее значение критерия оптимизации $Y_1 = (Y_{11} + Y_{21})/2$.

Аналогично, второе значение F является фотохимической активностью хлоропластов после добавления в их суспензию смеси с набором элементов питания согласно второй строке таблицы 5.1. По формуле (5.1) определяют значения критерия оптимизации Y_j для каждой j -ой строки ($j = 1, 2, 3, \dots, 16$). При $m = 2$ для j -ой строки среднее значение критерия оптимизации $Y_j = (Y_{1j} + Y_{2j})/2$ и т.д.

Затем переходят к процедуре построения диаграммы рассеяния. Для этого строки таблицы 5.1 располагают в последовательности ранжирования значений Y_j в порядке убывания величин сверху-вниз (таблица 5.2).

Для каждого i -го диагностируемого элемента ($i = 1, 2, 3, \dots, 11$) выделяют по два столбца. Знаками (0) и (+) в левом и правом столбцах выделенных пар отмечают значения Y_j , которые соответствуют положению конкретного элемента, соответственно, на уровнях (0) и (+). Отдельно в левом и правом столбцах пар определяют частные медианы. При четном количестве замеров Y_j медиана лежит на равном удалении между двумя средними значениями Y_j . Если же количество замеров Y_j нечетное, медианой считают среднее значение Y_j . Разность Q_i между медианами справа и слева, но не наоборот, есть отклик, характеризующий потребность растений в i -ом элементе (в нижней строке таблицы 5.2).

Таблица 5.2 – Диаграмма рассеяния

<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>S</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>	<i>B</i>	<i>Mn</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>Y_j</i> , %
	+		+	0		0		0		+	35
	+	0		+		0		+	0		28
	+		+	+		+		+		+	27
0		+	0		0		+	+	0		26
0		0		+		+		+	0		15
0		+		+		0		0		+	11
	+		+	0		0		+		+	7
	+	0		0		0		+	0		6
0		0		+	0			+		0	0
0		0		0		+	0		0		-2
0			+	+	0		+	0		0	-3
	+	0		+	0		+	0		0	-5
	+	0		0		+		+	0		-12
	+		+	0		0		0		0	-35
0		0		0		+		+		0	-47
0			+	0		+		0		0	-71
7,5	10	20	-3,5	-11	13	-2	-1,5	1,5	21,5	-1,5	Потребность в элементе, <i>Q_i</i> , %

Потребность с отрицательным знаком превращается в свою противоположность – избыток. В приведенном примере положительная величина отклика в столбцах с элементами *Cu*, *K*, *Zn* и др. свидетельствует об их дефиците, а отрицательная с *Mg*, *S*, *B* и др. – об избытке. Сложившееся соотношение между дефицитными и избыточными элементами действительно для конкретных условий диагностирования.

Критерием, ограничивающим выделение *i*-ых значимых дефицитных и избыточных элементов питания, является значение отклика $|Q_i|$ равное или меньшее критической величины Q_{ik} :

$$Q_{ik} = \frac{2t_{кр}}{m} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^n S^2\{Y_j\}} = 3,57\% ;$$

где $S^2\{Y_j\}$ – дисперсия в *j*-ой строке плана дробной реплики;

$t_{кр}$ – критерий Стьюдента. На уровне 95-процентной

доверительной вероятности и числе степеней свободы $16(m-1)=16$ величина $t_{кр}$ равна 2,119.

Таким образом, для значимых дефицитных и избыточных элементов питания $Q_{ik} > 3,57\%$.

В порядке убывания величины отклика элементы питания располагают в ряд с учётом ограничения по Q_{ik} : $Q_{Cu}=21,5\%$; $Q_K=20\%$; $Q_{Zn}=12,5\%$; $Q_{Mg}=-11\%$; $Q_P=10\%$; $Q_N=7,5\%$.

Важное преимущество инновационного метода состоит в возможности оптимизации питательных смесей при наличии в почвенном растворе избыточных элементов питания. Достигается это коррекцией в диаграммах рассеяния величины дефицитных элементов, последовательно стабилизируя избыточные элементы на нулевом уровне.

По величине значимого избытка выделяется магний ($Q_{Mg}=-11$), $|Q_{Mg}| > Q_{Mgk}$ (таблица 5.2). В таблице 5.1 значение $Q_{Mg}=-11$ вычитают со своим знаком из величины Y_i в строках, где магний представлен на уровне (+), и получают откорректированные значения Y_i по вариантам эксперимента Y_{jk} (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Коррекция значений критерия оптимизации нейтрализацией избыточного элемента питания

Варианты	Уровни варьирования диагностируемых элементов питания											Значения критерия оптимизации, %		
												Средние	Откорректированные	
	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Cu</i>	<i>Y_j</i>	<i>Y_{jk}</i>						
1		+		+		+		+		+	27	38		
2		+		+		0			+	0	35	35		
3		+		+	0		0		0		−35	−35		
4		+		+	0			+	0		+	7	18	
5		+	0			+	0		0		+	28	28	
6		+	0			+		+	0		0	−5	6	
7		+	0		0			+		+	0	−12	−1	
8		+	0		0		0			+		+	6	6
9	0			+		+	0		0			+	11	11
10	0			+		+		+	0		0		−3	8
11	0			+	0			+		+	0		−71	−60
12	0			+	0		0			+		+	26	26
13	0		0			+		+		+		+	15	26
14	0		0			+	0			+	0		0	0
15	0		0		0		0		0		0		−47	−47
16	0		0		0			+	0			+	−2	9

По аналогии с таблицей 5.2 формируют откорректированную матрицу, представленную в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Значения критерия оптимизации после нейтрализации избыточного элемента питания

<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Cu</i>	<i>Y_b</i> , %
+	+	+	+	+	+	38
+	+	+	0	+	0	35
+	0	+	0	0	+	28
0	+	0	0	+	+	26
0	0	+	+	+	+	26
+	+	0	+	0	+	18
0	+	+	0	0	+	11
0	0	0	+	0	+	9
0	+	+	+	0	0	8
+	0	+	+	0	0	6
+	0	0	0	+	+	6
0	0	+	0	+	0	0
+	0	0	+	+	0	–1
+	+	0	0	0	0	–35
0	0	0	0	0	0	–47
0	+	0	+	+	0	–60
3,5	8,5	16	0	7,5	22,5	Потребность в элементе, <i>Q_i</i> , %

После корректировки дефицитные элементы питания располагают в ряд в порядке убывания величины отклика: $Q_{Cu}=22,5\%$; $Q_K=16\%$; $Q_P=8,5\%$; $Q_{Zn}=7,5\%$. Таким образом, условию $|Q_i| > Q_{ik}$ удовлетворяют элементы питания *Cu*, *K*, *P* и *Zn*, которые должны быть компонентами питательной смеси с уровнем дефицита, соответственно, 22,5; 16,0; 8,5 и 7,5%.

5.3 Приборное обеспечение диагностики

Для реализации инновационного метода функциональной листовой диагностики растений созданы алгоритм и компьютеризованный прибор Аквадонис (Буйский химический завод), обеспечивающие инструментальный диалог человека с растением, как с живым существом, ориентированным на саморегуляцию [58] (рисунок 5.3).

Рисунок 5.3 – Прибор функциональной диагностики Аквадонис

Прибор способен оценивать фотохимическую активность суспензии хлоропластов растений при воздействии на них элементами питания. Основой его является фотометр. В качестве источника светового излучения фотометра используют светодиоды со сплошным спектром цветовой температуры 6000°K, что максимально приближает засветку пробы к реальным условиям солнечного излучения с длиной волны 620 нм.

Объём встроенной памяти прибора на 99 измерений. Предусмотрена возможность варьирования временем засветки в широком интервале. Имеется *USB*-портал для обмена данными с компьютером. Возможности прибора позволяют в автоматическом режиме оптимизировать обеспеченность растений элементами питания и наглядно демонстрировать уровень потребности по каждому из них.

Прибор компактен, оснащён автономным источником питания. Он прошёл производственную проверку на полевых культурах Центрально-Чернозёмной машиноиспытательной станцией, а также в 10 регионах России, в Украине, Белоруссии и Казахстане.

Диагностические действия содержат последовательно выполняемые этапы (рисунок 5.4).

Рисунок 5.4 – Последовательность выполнения диагностики

Для одного анализа требуется примерно 1 л дистиллированной воды, химически чистая соль хлористого натрия в пакетах по 2 г, бинт и ёмкость для отходов.

При подготовке к анализу формируют среднюю пробу листьев испытываемой культуры, отбирая в неё третий-четвёртый лист от вершины растений. Из пробы листьев диагностируемых растений готовят суспензию хлоропластов. Листья вручную измельчают и помещают в ступку. На кончике шпателя добавляют в неё порошок $CaCO_3$, предназначенный для стабилизации клеточного сока.

Образцы суспензии хлоропластов засвечивают на фотометре прибора. Во время проведения анализа активность хлоропластов постепенно снижается. Поэтому в меню фотометра предусмотрено 8 контрольных точек, относительно которых автоматически корректируются данные по ходу анализа.

Активность хлоропластов должна быть положительной и не меньшей 0,015. В противном случае хлоропласты малоактивны и проведение анализа не имеет смысла. Наиболее вероятной причиной тому недостаточный фотосинтез, обусловленный низкой или чрезмерно высокой температурой воздуха, пасмурной погодой или гибелью хлоропластов.

Полученные данные обрабатывают на компьютере, применяя специальную оптимизационную программу, которая позволяет по данным функциональной листовой диагностики в автоматическом режиме оптимизировать питание растений с учётом синергии взаимодействия между элементами питания. Открывается программа окном, позволяющим ввести в память компьютера исходную информацию о количестве и повторности опыта, величине критерия Стьюдента для установленного уровня доверительной вероятности, а также полученные в испытаниях значения критерия оптимизации (рисунок 5.5).

Диагностика потребности растений в элементах питания
(Вариант статичной МСБ)

Значения общих данных, содержащихся в БД

Количество опытов: 16 Повторяемость опытов: 2 Критерий Стьюдента: 2.119

Введите значения откликов по повторам № 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
66	23	14	35	26	25	36	43	39	36	25	34	35	26	39	26

При заполнении строки нажмите кнопку "Ввод". Ошибки при вводе не допустимы !!!

Ввод

Корректировка откликов Чтение данных из БД Формирование таблицы рассеяния Расчет компонентов питательной среды Close

Рисунок 5.5 – Окно программы для ввода диагностических данных

После нажатия кнопки «Расчёт компонентов питательной среды» в правой нижней части окна по величине откликов Q_n считывают потребность растений в элементах питания, в % (рисунок 5.6).

C_{100} – максимально возможная доза элемента питания при одноразовой листовой подкормке, г/га (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Стандартные удобрения, обеспечивающие максимально возможные дозы элементов питания C_{100} одноразовой листовой подкормки

Элемент питания	Удобрение	Содержание действующего вещества (C_v), %	Доза (C_{100}), г/га
Азот	Мочевина	N=46,2	900
	Аммиачная селитра	N=34,4	350
Азот, фосфор	Аммофос	P=52, N=12	6000
Фосфор, калий	Монокалийфосфат	P=52, K=34	
Калий, сера	Калий серноокислый	K=53, S=18	2500
Калий	Калий хлористый	K=60	1500
Калий, бор	Метаборат калия	K=44, B=10,1	6000
Азот, сера	Сульфат аммония	N=21, S=24	1500
Магний	Хелат магния	Mg=6	9900
Марганец	Хелат марганца	Mn=13	345
Цинк	Хелат цинка	Zn=15	220
Железо	Хелат железа	Fe=6	300
		Fe=11	
		Fe=13	
Медь	Хелат меди	Cu=15	130
Кальций	Хелат кальция	Ca=10	800
Кобальт	Хелат кобальта	Co=13	30
Бор	Борная кислота	B=17,5	300
Молибден	Молибденовоокислый аммоний	Mo=78	40
Йод	Йодистый калий	I=76,4	20

К примеру, для оптимизации питания ячменя листовыми подкормками по формуле (5.2) устанавливают компоненты смеси удобрений $Q_{Cu}=22,5\%$; $Q_K=16\%$; $Q_P=8,5\%$; $Q_{Zn}=7,5\%$.

Дефицит меди покрывают микроудобрением Хелатэм *Cu 15* (таблица 4.3), потребность в котором составляет:

$$П_{Cu} = \frac{130 \cdot 22,5}{15} = 195 \text{ г/га.}$$

Потребность в калии и фосфоре может быть удовлетворена одним видом удобрения – монокалийфосфатом (таблица 4.6). Его количество необходимое для покрытия дефицита калия:

$$П_K = \frac{1500 \cdot 16}{34} = 706 \text{ г/га},$$

а для покрытия дефицита фосфора:

$$П_P = \frac{6000 \cdot 8,5}{26} = 980 \text{ г/га}.$$

Из двух значений монокалийфосфата для листовых подкормок принимают большее, $П_{KP} = 980 \text{ г/га}$. Дефицит цинка покрывают микроудобрением Хелатэм *Zn 15* (таблица 4.3):

$$П_{Zn} = \frac{220 \cdot 7,5}{15} = 110 \text{ г/га}.$$

6 Новые машины для комплексной механизации технологий углубленной адаптации

По многочисленным данным научно-исследовательских учреждений для многовариантного адаптивно-ландшафтного земледелия обозначены принципы формирования исходных требований на сельскохозяйственную технику. Это минимизация механического воздействия на почву за счёт уменьшения глубины и площади обрабатываемой поверхности поля, снижения техногенного разрушения почвы и совмещения агроприёмов. Необходимым компонентом минимальных обработок являются противоэрозионные приёмы [59]-[63].

Данные принципы реализованы при создании комплексов, включающих в себя одно операционные машины, функционирующие при малом заглублении в почву и на прямом посеве, а также комбинированные машины для выполнения агротехнических совместимых приёмов за один проход. В ЦЧР, где широко распространена водная эрозия, обязательным компонентом системы обработок почвы является глубокое рыхление зяби или предзимнее нарезание противоэрозионных щелей [64]. При этом параметры технических средств должны быть оптимизированы из условий выполнения требований агротехники с наименьшими затратами энергии.

При проектировании технологических процессов производства зерновых культур по каждому варианту почвенных условий (таблица 3.3) обосновали нормативы исходных требований на комплексы машин (таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Исходные требования на средства механизации приёмов производства зерновых культур

№ пп	Приёмы производства зерновых культур	Параметры исполнения приёмов
1	Лущение стерни	Исполняют орудиями с дисковыми рабочими органами вслед за уборкой культуры на глубину 5-10 см. Отклонение средней фактической глубины обработки почвы от заданной не более $\pm 1,5$ см.

		<p>Подрезание сорняков – 100%.</p> <p>Высота гребней после обработки не более 4 см.</p> <p>Перекрытие смежных проходов агрегатов 15-20 см.</p>
2	Предпосевная культивация	<p>Отклонение средней глубины культивации от заданной не более ± 1 см.</p> <p>Высота гребней на поверхности поля – не более 4 см.</p> <p>Подрезание сорняков – 100%.</p> <p>В обработанном слое почвенных частиц размером 0,1-2,5 см не менее 60%.</p> <p>Наличие на поверхности поля комков диаметром более 5 см не допускается.</p>
3	Посев в обработанную почву	<p>Норма высева семян в зависимости от биологических особенностей сортов.</p> <p>Глубина заделки семян в почву: 3-5 см – при достаточном увлажнении, 5-6 см – при иссушении верхнего слоя почвы.</p> <p>Отклонение средней фактической глубины заделки семян от заданной не более $\pm 15\%$.</p> <p>Неравномерность высева отдельными высевающими аппаратами не более 3%.</p> <p>Отклонение от нормативной ширины колеи и стыковых междурядий, соответственно, не более ± 4 и ± 5 см.</p>
4	Прямой посев	<p>Посев может осуществляться по стерне зерновых колосовых культур, а также по фону с пожнивными остатками пропашных культур.</p> <p>Твёрдость почвы до 3,5 МПа, влажность до 27%.</p> <p>Норма высева семян в зависимости от биологических особенностей сортов.</p> <p>Глубина заделки семян в почву: 3-5 см – при достаточном увлажнении, 5-6 см – при иссушении верхнего слоя почвы.</p> <p>Отклонение фактической глубины заделки семян от заданной не более $\pm 15\%$.</p> <p>Неравномерность высева отдельными высевающими аппаратами не более 3%.</p> <p>Отклонение от нормативной ширины колеи и стыковых междурядий, соответственно, не более ± 4 и ± 5 см.</p>
5	Щелевание посевов	<p>Глубина щели 70-100 см, форма щели ступенчатая: верхняя ступень открытая (с выемкой почвы), нижняя – заполненная разрыхленной массой.</p> <p>Верхнюю ступень формирует фрезой с приводом от ВОМ трактора, нижнюю – пассивный щелерез.</p> <p>Отклонение глубины щели от заданной не более $\pm 10\%$.</p> <p>Ширина верхней ступени щели 8-10, глубина 35-40 см, разрушение стенок верхней ступени не допускается.</p> <p>Ширина нижней ступени щели 2,5-3 см.</p>

		Извлечённая из верхней ступени щели почва разбрасывается в стороны от щели слоем толщиной не более 1 см.
6	Совмещение с посевом предпосевной культивации и локального внесения удобрения	<p>Норма высева семян в зависимости от биологических особенностей сортов.</p> <p>Отклонение фактической нормы высева семян от заданной не более $\pm 5\%$.</p> <p>Отклонение фактической дозы внесения удобрения от заданной не более $\pm 10\%$.</p> <p>Неравномерность высева отдельными высевающими аппаратами, %: семян – 3, гранулированных удобрений – 10.</p> <p>Глубина заделки в почву, см: семян – 3-5 при достаточном увлажнении, 5-6 – при иссушении верхнего слоя почвы; удобрений 8-10 – при достаточном увлажнении, 9-11 – при иссушении верхнего слоя почвы.</p> <p>Отклонение фактической глубины заделки семян и удобрений от заданной не более $\pm 15\%$.</p> <p>Отклонение от нормативной ширины колеи и стыковых междурядий, соответственно, не более ± 4 и ± 5 см.</p>
7	Послойная обработка почвы	<p>Почву на глубину 6-8 см обрабатывают дисковые рабочие органы, углубление обрабатываемого пласта до 14 см осуществляют плоскорезные лапы.</p> <p>Отклонение средней фактической глубины обработки почвы от заданной не более $\pm 1,5$ см.</p> <p>Подрезание сорняков – 100%.</p> <p>Наличие комков диаметром до 4 см – не менее 80%.</p> <p>Высота гребней после обработки не более 4 см.</p> <p>Перекрытие смежных проходов агрегатов 15-20 см.</p>
8	Совмещение с посевом предпосевной культивации	<p>Твёрдость и влажность почвы не должны превышать, соответственно, 1,5 МПа и 26%.</p> <p>В обработанном слое почвенных частиц размером 0,1-2,5 см должно быть не менее 60%.</p> <p>Наличие на поверхности поля комков диаметром более 5 см не допускается.</p> <p>В зоне размещения семян плотность почвы должна составлять 0,08-0,1 МПа.</p> <p>Норма высева семян в зависимости от биологических особенностей сортов.</p> <p>Глубина заделки семян в почву: 3-5 см – при достаточном увлажнении, 5-6 см – при иссушении верхнего слоя почвы.</p> <p>Отклонение фактической глубины заделки семян от заданной не более $\pm 15\%$.</p> <p>Неравномерность высева отдельными высевающими аппаратами не более 3%.</p> <p>Отклонение от нормативной ширины колеи и стыковых междурядий, соответственно не более ± 4 и ± 5 см.</p>

9	Безотвальная зяблевая обработка почвы	Отклонение фактической глубины обработки от заданной: при рыхлении до 16 см – не более ± 1 см, при рыхлении до 30 см – не более ± 2 см. Количество стерни, оставляемой после прохода орудия, не менее 80%. При оптимальной влажности почвы фракции размером 3...5 см должны составлять не менее 80%. На полях с уклоном более 3° почву следует обрабатывать поперёк направления склона.
10	Глубокое рыхление зяби	Глубина рыхления 35-45 см, отклонение средней глубины от заданной не более ± 2 см. Расстояние между стойками глубокорыхлителей 45-50 см. На полях с уклоном более 3° почву следует обрабатывать поперёк направления склона.
11	Ранневесеннее боронование зяби	Глубина боронования 2-3 см, отклонение средней глубины от заданной не более ± 1 см. При оптимальной влажности почвы размер комков не более 3 см. Последующие проходы агрегатов должны перекрывать предыдущие на 10-15 см. Бороновальные агрегаты перемещаются под углом 5-6° к направлению предыдущей обработки почвы.
12	Внесение основного минерального удобрения разбросным способом	Отклонение фактической дозы вносимого удобрения от заданной не более 10%. Неравномерность внесения удобрения по поверхности поля не более $\pm 25\%$.
13	Вспашка зяби	Отклонение глубины обработки от заданной не более ± 1 см на выровненном, и ± 2 см – на не выровненном поле. Высота гребней не более 5 см. Заделка в почву не менее 95% растительных остатков.
14	Культивация зяби	Отклонение средней фактической глубины культивации от заданной не более ± 1 см. Высота гребней на поверхности поля не более 4 см. Подрезание сорняков – 100%.
15	Внесение азотного удобрения разбросным способом	Отклонение фактической дозы вносимого удобрения от заданной не более 10%. Неравномерность внесения удобрения по поверхности поля не более $\pm 25\%$.
16	Корневая подкормка культур разбросным способом	Отклонение фактической дозы вносимого удобрения от заданной не более 10%. Неравномерность внесения удобрения по поверхности поля не более $\pm 25\%$.
17	Применение химических средств защиты растений, листовая подкормка культур опрыскиванием	При опрыскивании посевов каждый распылитель должен создавать равномерный факел распыла. Распылители должны иметь цветовое кодирование типоразмера и маркировку с указанием типа, размера и угла распыла.

		Отклонение расхода рабочей жидкости отдельного распылителя не более $\pm 10\%$ – от табличного и не более $\pm 5\%$ – от среднего значения. Коэффициент вариации распределения жидкости по ширине захвата штанги не более 7% – при стендовых испытаниях и не более 9% – при испытаниях на опрыскивателе. Размер капель в факеле распыла без использования дополнительных средств их осаждения не менее 115 мкм для показателя VD ₁₀ .
18	Скашивание и обмолот зерновых культур	Потери зерна за хедером при уборке хлебостоя со степенью полеглости до 20% не более 0,5%. При уборке полеглых хлебов потери за хедером не более 1,5%. Потери за подборщиком не более 0,5%. Потери за молотилкой при работе на полях с уклоном до 3° не более 1%. Содержание сорной примеси в бункерном зерновом ворохе не более 3% при влажности зерна 10-18%. Дробление зерна не более 2%. Высота среза растений 5-20 см.
19	Измельчение соломы	Солому измельчают длиной резки 3-10 см. Неравномерность распределения соломы по полю не более $\pm 30\%$.

Приведенные исходные требования являются информационным ресурсом для проектирования перспективных механизированных технологий возделывания зерновых культур с углубленной адаптацией к состоянию почвы. В соответствии с почвенно-климатическими особенностями ЦЧР, они не могут быть с надлежащей экономико-экологической эффективностью исполнены применением лишь освоенных производством отечественных технических средств. Поэтому в дополнение к существующим машинам, разработаны новые конструкции адаптивной почвообрабатывающей и посевной техники. В основу разработки недостающих машин комплекса положен принцип рациональной экономии, согласно которому технические средства создаются для механизации агротехнических целесообразных приёмов в конкретных условиях.

6.1 Роторный щелеватель для щелевания посевов зерновых культур

Особенностью почвозащитных минимальных обработок является понижение водопоглощающей способности почвы, рост стока талых и ливневых вод и потеря продуктивной влаги. Во избежание этого на минимальные обработки приходится накладывать глубокое безотвальное рыхление или щелевание почвы. Наиболее актуально предпринимать щелевание полей озимых зерновых культур и многолетних трав, возделываемых по минимальным обработкам, на которых наблюдается наибольший сток талых вод.

Щелевание посевов освоенными производством пассивными щелерезами сопровождается вспучиванием почвы и уничтожением культуры в зоне щели, а также по обе стороны от неё. Поэтому щели должны выполняться с ненарушенными стенками и глубиной ниже глубины промерзания почвы в климатической зоне, составляющей для ЦЧР 0,7-0,9 м.

Для механизации поделки щелей ФГБНУ «Курский ФАНЦ» – ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии разработан роторный щелеватель (рисунок 6.1).

Рисунок 6.1 – Схема роторного щелевателя

На его раме размещены узкая фреза с приводом от вала отбора мощности (ВОМ) трактора, зачистная пластина с отражателем почвы и щелерез. Фреза

формирует верхнюю часть щели на глубину h , отделяя мелкие почвенные стружки. Она не нарушает стенок щели и не вспучивает почву. Отбрасываемые фрезой почвенные комки отражателем равномерно распределяются по полю. Пассивный щелерез углубляет щель ниже уровня фрезерования до глубины H .

Нарезание глубоких щелей сопряжено с высокими затратами энергии. Поэтому с целью минимизации энергоёмкости технологического процесса поставлена задача оптимизировать рабочую скорость агрегата V и глубину фрезерования почвы h при общей глубине щели H .

В качестве параметра оптимизации приняли функцию, характеризующую удельную энергоёмкость нарезания 1 погонного метра щели:

$$Y = Y(X_1, X_2); \quad (6.1)$$

где $X_1 = V$, $X_2 = h$.

Уравнение связи $\varphi(X_1, X_2) = 0$ включает в себя сумму мощностей, расходуемых на привод фрезы от ВОМ трактора и на протаскивание щелереза, ограниченной мощностью двигателя трактора. Формализация технологического процесса щелевания в зависимости от оптимизируемых параметров проведена путём синтеза теоретических решений и эксперимента.

Расчёты выполнили для стерневого фона после уборки озимой пшеницы. В слое 0-30 см влажность почвы составляла 21,3%, твёрдость 2,4 МПа. Содержание стерни на поле 0,41 кг/га. Щелеватель агрегатировали трактором Т-150К весом 73,8 кН и мощностью двигателя 121,5 кВт. Коэффициент перекачивания движителей трактора по стерне 0,055, КПД трансмиссии движителей 0,88. Окружная скорость ножей фрезы 6,5 м/с.

Преобразования функции Y и уравнения связи φ выполнили по формулам (2.5) и (2.6). После исключения множителя Лагранжа стационарность функции обеспечилась решением системы уравнений (6.2):

$$\frac{1}{X_2} \left[\frac{39,4(H - X_2)^{1,16} + 4,06}{0,88 - 0,12(H - X_2)^{1,16}} - \frac{109,4}{X_1} \right] + 142X_2 - 30,9X_1 + 101 = 0;$$

$$(142X_2 + 30,9X_1)[0,88 - 0,12(H - X_2)^{1,16}] - 45,7(H - X_2)^{0,16} \quad (6.2)$$

$$- \frac{[39,4(H - X_2)^{1,16} + 4,06]}{10^3} \left[\frac{(H - X_2)^{0,16}}{6,18 - 0,86(H - X_2)^{1,16}} + \frac{1}{X_2} \right] = 0.$$

При нарезании в ЦЧР щелей глубиной $H=0,8$ м, решение данной системы уравнений имеет вид: $X_1=1,72$ м/с; $X_2=0,38$ м.

Полученные данные позволили не только минимизировать энергоёмкость выполнения технологического процесса, но и выполнить подробный анализ взаимосвязи оптимизированных параметров с общей глубиной щели H и установить следующее (рисунок 6.2).

Рисунок 6.2 – Зависимость оптимизируемых параметров щелевателя от глубины нарезаемой щели

С увеличением H от 0,7 до 0,9 м энергоёмкость формирования щели повышается, вследствие чего по вогнутой кривой понижается рабочая скорость агрегата, а по выпуклой — возрастает соотношение $\frac{h}{H}$ — доля фрезерованной щели в общем заглублении рабочих органов машины. Это

свидетельствует об опережающем нарастании энергозатрат на протаскивание щелереза в сравнении с энергозатратами на привод фрезы.

Разработанный опытный образец конструкции ЩР-1 способен нарезать щели шириной 8-10 и глубиной 80-100 см. Агрегатируется ЩР-1 с энергонасыщенными тракторами класса 30 кН, рабочая скорость 5-6 км/ч. Производственную оценку орудия выполняли на склоне северной экспозиции крутизной 3-5°.

Почва – чернозём обыкновенный мощностью 35-40 см. На сравниваемых вариантах выполнили зяблевую обработку почвы тяжёлой дисковой бороной БДТ-3 на глубину 8-10 см, затем проросшие сорняки уничтожили паровым культиватором КПС-4. Наибольшая эффективность щелевания достигается, когда глубина щели в 1,1-1,3 раза превышает среднюю глубину промерзания почвы.

Щели глубиной 80-85 см нарезали новым орудием в предзимний период поперёк склона на расстоянии 30 м друг от друга. Одновременно базовым орудием ЩН-2-140, оснащённым пассивными щелерезами, нарезали щели глубиной 40-42 см с расстоянием между проходами 3 м. Осреднённые данные испытаний показали, что по водопоглощающей способности щель, нарезанная ЩР-1, в 6,7 раза превышает две щели базового орудия ЩН-2-140 (таблица 6.2).

Таблица 6.2 – Поглощение воды почвой в зависимости от способов щелевания

Варианты опыта	Запасы воды в снеге, м³/га	Сток, м³/га	Поглощено воды почвой, м³/га:		Водопоглощение 1 погонного метра длины щели, м³
			всего	в т.ч. за счёт щелевания	
Без щелевания (контроль)	660	476	185	–	–
Щелевание ЩН-2-140 через 3 м	650	346	304	119	0,036
Щелевание ЩР-1 через 30 м	642	376	266	81	0,243

Полное зарегулирование талого стока достигается при расстоянии 5,3 м между проходами ЩР-1. Эквивалентные результаты по базовому орудью могут быть получены при расстоянии между его проходами равными 0,8 м, отчего в 2,3 раза повышается интенсивность механического воздействия на почву, в 2,6 раза – энергетические и в 1,8 раза – приведенные затраты на выполнение приёма (таблица 6.3).

Таблица 6.3 – Сравнительные показатели эффективности щелевателей

№ пп	Агрегат для щелевания почвы	Интенсивность механического воздействия на почву, МДж/га	Затраты на 1 га:			
			энерге- тические, МДж	труда, чел.-ч	топ- лива, кг	приве- денные, руб.
1.	Т-150 + ЩР-1	41	220	0,12	3,7	77
2.	ДТ-75М + ЩН-2-140	95	561	0,56	9,3	138

При этом экономия топлива от применения нового орудия составила 5,6 кг/га.

6.2 Культиватор-плоскорез для безотвальной обработки почвы

При выполнении минимальных обработок почвы в ЦЧР используют безотвальные почвообрабатывающие машины, в частности, культиваторы-плоскорезы.

Современные высокопроизводительные культиваторы-плоскорезы широкозахватные. Их производят в виде шарнирно сочленённых секций с целью копирования рабочими органами рельефа поля и уменьшения габаритов в транспортном положении. Распространены конструкции, содержащие среднюю секцию и боковые, каждая из которых опирается о поверхность поля регулируемые по высоте колёсами. Боковые секции посредством шарниров присоединены к средней секции и обладают дополнительной степенью свободы в поперечно-вертикальной плоскости. Оси шарниров продольно расположены в горизонтальной плоскости. На секциях закреплены рабочие

органы. В транспортное положение боковые секции переводят гидроцилиндрами подъёма [65].

При выполнении агротехнического приёма рабочие органы машин заглубляются в почву под действием собственного веса и вертикальной составляющей вектора силы сопротивления почвы, приложенной к ним. Но со стороны затылков лемехов на рабочие органы действует и реактивная сила сопротивления, стремящаяся вытолкнуть их из почвы [66]. Из-за этого на минимальных обработках почвы, когда заглубление рабочих органов невелико, они неустойчиво выдерживают заданную глубину, что является нарушением агротехнических требований по качеству выполнения приёма [67].

Средняя секция более массивная. Она является консолидирующей конструкцией и принимает на себя вес сцепного устройства с гидроцилиндрами подъёма. Кроме того, заглубляющее усилие на её рабочие органы можно устанавливать изменением положения в продольно-вертикальной плоскости мгновенного центра вращения машины относительно трактора. Поэтому нарушение стабильности хода по глубине наблюдается, прежде всего, рабочих органов боковых секций машины.

Известен механизм управления заглубляющим усилием боковой секции, не содержащей опорного колеса, сопряжённый с гидроцилиндром её подъёма в транспортное положение. Шток гидроцилиндра состоит в кинематической связи с подпружиненным поперечным ползуном, закреплённым на боковой секции. В рабочем положении шток выдвигается до упора, а копирование рельефа рабочими органами боковой секции достигается за счёт деформации пружины ползуна [68].

Однако известный механизм, во-первых, усложняет конструкцию машины. Во-вторых, глубина хода рабочих органов боковой секции без опорного колеса определяется жёсткостью пружины и сопротивлением почвы обработке. Учитывая, что сопротивление почвы переменное с высоким уровнем вариабельности, рабочие органы не выдерживают заданную глубину обработки почвы.

Наиболее просто проблема заглубления рабочих органов боковой секции решается оснащением её опорным колесом и догрузкой балластным грузом. Но при этом утяжеляется масса и снижается манёвренность всей машины, возникает необходимость повышения её прочности и, соответственно, стоимости, следствием чего являются повышенные затраты энергии и средств при выполнении агроприёма.

Упрощение конструкции достигается конструктивным решением, обеспечивающим использование силы сопротивления почвы обработке для повышения заглубляющей способности боковой секции почвообрабатывающей машины. У известных конструкций эта сила параллельна продольной оси шарниров боковой секции и не создаёт относительно неё заглубляющего момента. Соответствующим наклоном оси шарниров к продольно-вертикальной плоскости данная параллельность нарушается. И тогда вектор силы сопротивления почвы проектируется на плоскость перпендикулярную оси шарниров, создавая дополнительный заглубляющий момент, являющийся техническим результатом.

Инновационная почвообрабатывающая машина содержит среднюю 5 и боковые секции 6, опирающиеся в рабочем положении на регулируемые по высоте колёса 7 (рисунок 6.3).

Рисунок 6.3 – Конструктивная схема широкозахватной секционной почвообрабатывающей машины

На секциях закреплены почвообрабатывающие рабочие органы 9. Секции 6 сопряжены с секцией 5 посредством соосных переднего 0 и заднего 1 шарниров, образующих оси вращения 8, которые расположены в

горизонтальной плоскости и наклонены к продольно-вертикальной плоскости под углом φ . Перевод секций 6 в транспортное положение осуществляется гидроцилиндрами подъёма 10.

Свяжем с боковой секцией две системы прямоугольных координат XYZ и $\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ с началами в переднем шарнире 0 (рисунок 6.4).

Рисунок 6.4 – Силы, действующие на боковую секцию почвообрабатывающей машины

Система XYZ неподвижно зафиксирована на машине. Ось X направлена противоположно рабочему перемещению машины V , а ось Z – вертикально вверх. Система $\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ имеет возможность поворота вокруг оси Z в горизонтальной плоскости. Ось $\bar{X}$ системы $\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ совмещена с осью 8 шарниров боковой секции. Положение системы $\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ относительно XYZ определяется углом φ . Координаты точек приложения сил в системе $\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ оцениваются формулами:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= y \sin\varphi + x \cos\varphi, \text{ м;} \\ \bar{y} &= x \cos\varphi - y \sin\varphi, \text{ м;} \\ \bar{z} &= z.\end{aligned}\tag{6.3}$$

При выполнении агротехнического приёма на боковую секцию действует сила сопротивления почвы обработке R и вес секции G . Сила R приложена к центру 3 сопротивления секции и располагается в продольно-вертикальной плоскости. Она включает в себя горизонтальную $R_x = R \cos\psi$ и вертикальную

$R_z = R \sin \psi$ составляющие, где ψ – угол наклона вектора R к горизонтальной плоскости.

Вес G приложен в центре масс 2 секции и направлен вертикально вниз. В точке 4 контакта опорного колеса с почвой действует вертикальная реакция F_z и продольная $F_x = f \cdot F_z$, где f – коэффициент сопротивления перекатыванию колеса по почве.

Силы, действующие на боковую секцию относительно оси 8, создают момент $M_{0\bar{x}}$:

$$M_{0\bar{x}} = -G\bar{y}_2 - R_z\bar{y}_3 + F_z\bar{y}_4 - R_{\bar{y}}z_3 = 0, \text{ кН/м}; \quad (6.4)$$

где $R_{\bar{y}}$ – проекция на плоскость перпендикулярную оси $\bar{X}$ вектора R , м;

z_3 – расстояние точки приложения силы R до горизонтальной плоскости, проходящей через передний шарнир;

$\bar{y}_2, \bar{y}_3, \bar{y}_4$ – проекции на плоскость перпендикулярную оси Z плеч приложения сил G, R_z , и F_z , м.

Значение $R_{\bar{y}}$ вытекает из рисунка 6.5:

$$R_{\bar{y}} = R_x \sin \varphi = R \sin \varphi \cos \psi, \text{ кН}. \quad (6.5)$$

Рисунок 6.5 – К определению заглубляющего момента от силы сопротивления почвы обработке

Очевидно, что устойчивому заглублению в почву рабочих органов боковой секции сопутствует стабильный контакт опорного колеса с

поверхностью поля, т.е. $F_z \bar{y}_4 \geq 0$. Учитывая это, подставим (6.3) и (6.5) в формулу (6.4). После преобразований получим выражение для угла φ :

$$\varphi \geq \arctg \left[\frac{R y_3 \sin \psi + G y_2}{R (x_3 \sin \psi - z_3 \cos \psi) + G x_2} \right]. \quad (6.6)$$

где x_2, x_3 – соответственно, расстояние точек приложения сил R и G до поперечно-вертикальной плоскости, проходящей через передний шарнир;

y_2, y_3 – соответственно, расстояние точек приложения сил R и G до продольно-вертикальной плоскости, проходящей через передний шарнир;

Значение φ по формуле (6.6) соответствует стабильной работе на заданной глубине рабочих органов боковой секции при различных значениях угла ψ .

Формулу (6.6) использовали для управления заглубляющей способностью рабочих органов широкозахватного культиватора-плоскореза КПШ-9. Общий вес его составляет 23 кН, вес боковой секции 7 кН. Ширина захвата общая – 9 м, боковой секции – 3 м. Координаты точек приложения усилий к боковой секции: точка 2 ($x_2=1,54$ м, $y_2=1,59$ м, $z_2=-0,09$ м); точка 3 ($x_3=1,56$ м, $y_3=1,65$ м, $z_3=-0,45$ м); точка 4 ($x_4=0,91$ м, $y_4=2,56$ м, $z_4=-0,41$ м).

Для КПШ-9 зависимость (6.6) представлена графически на рисунке 6.6.

Рисунок 6.6 – Условие заглубления боковой секции при отрицательном угле наклона вектора сопротивления почвы

Анализ её показывает, что при угле $\psi \geq -23,4^0$ рабочие органы боковой секции машины выдерживают заданную глубину обработки почвы за счёт собственного веса при $\varphi=0$. С уменьшением угла ψ ниже данного предела собственного веса для заглубления рабочих органов недостаточно и возникает необходимость наклона её оси шарниров. При $\varphi=17,6^0$ рабочие органы боковой секции выдержат необходимую глубину обработки, даже если $\psi=-30^0$.

С учётом результатов теоретических исследований модернизировали культиватор-плоскорез КПШ-9. Сущность модернизации состояла в наклоне оси шарниров боковой секции на угол $\varphi=12^0$. Модернизированную машину сравнивали с серийным образцом, у которого $\varphi=0$. Испытывали машины в агрегате с трактором К-701 на поле после уборки озимой пшеницы. В слое 10–20 см влажность почвы составляла 14%, твёрдость 2,5 МПа. Сравнение проводили, изменяя рабочую скорость в диапазоне 1,39–3,33 м/с. В процессе испытаний тензометрированием записывали тяговые сопротивления машин и вертикальные реакции от воздействия на почву опорных колёс боковых секций. Оценивали также качественные показатели обработки почвы.

Сопоставление машин по величине вертикальных реакций на опорных колёсах при обработке почвы на глубину 11 см показало, что при $\varphi=12^0$ заглубляемость боковой секции повысилась в 1,18 раза. Положительное влияние наклона оси шарниров усилилось при увеличении глубины обработки почвы до 17 см.

При скорости большей 3,1 м/с глубина обработки снизилась с 11 до 9-10 см. На минимально допустимой по технической характеристике машин установочной глубине рыхления 7-8 см у серийной машины наблюдали полное выглубление рабочих органов боковых секций. Средняя секция при этом удовлетворительно осуществляла технологический процесс.

В тех же условиях модернизированный образец показал приемлемое качество обработки почвы по глубине. Тяговое сопротивление его составило 51 кН, что незначительно (на 2,2%) больше, чем у серийного образца. Причина повышения тягового сопротивления состояла в стабилизации глубины

обработки, увеличивающей объём обрабатываемой почвы, а также росте усилия на перекачивание опорных колёс из-за возникновения у них дополнительной вертикальной нагрузки.

Стабилизация глубины хода рабочих органов модернизированного культиватора-плоскореза увеличила надёжность технологического процесса. На некоторых участках поля отпала необходимость в повторных проходах агрегата для доведения глубины обработки до требуемой агротехникой величины. Вследствие этого на 11-14% возросла производительность обработки почвы и снизилась интенсивность уплотняющей нагрузки на неё.

Качество крошения почвы модернизированной машиной – 74%, сохранность стерни – 79%. Базовый культиватор-плоскорез показал худшее на 6,5% крошение и снижение на 12% сохранности стерни.

С использованием культиваторов-плоскорезов КПШ-5 и КПШ-9 созданы модернизированные конструкции (условные марки КПШ-5М и КПШ-9М), отличающиеся от серийных наклоном в горизонтальной плоскости осей шарниров, соответственно, на 10 и 12°. Опыт применения модернизированных конструкций в производстве подтверждены результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Таким образом, результатам исследований установлено, что наклон к продольно-вертикальной плоскости осей шарниров боковой секции широкозахватной почвообрабатывающей машины позволяет регулировать заглубляющую способность размещённых на этой секции рабочих органов. Усовершенствованные почвообрабатывающие машины отличают лучшие агротехнические показатели работы и повышение производительности выполнения агротехнического приёма.

6.3 Сеялка прямого посева зерновых культур

Энергоёмкость и качество прямого посева в значительной степени определяет способность рабочих органов сеялок формировать в

необработанной почве посевные бороздки с требуемыми параметрами. Исходя из многообразия почвенно-климатических условий возделывания зерновых культур, рабочие органы для их посева должны быть адаптивными и с высоким качеством выполнять технологический процесс не только на интенсивно подготовленных фонах. При реализации прямого посева они должны хорошо заглубляться в необработанную почву и перерезать пожнивные растительные остатки, не затягивая их на дно посевных бороздок. В противном случае свежее минерализующееся органическое вещество выделяет токсины, которые негативно сказываются на всхожести семян [69].

Высокую эффективность при прямом посеве показали рабочие органы в виде посевных секций, содержащих разрезающие диски 1 с лезвием по периметру и размещённые по их следу сошники 2 [70] (рисунок 6.7).

Рисунок 6.7 – Посевная секция зерновой сеялки

Диски 1 нарезают посевные бороздки, на дно которых сошники 2 укладывают семена. Для облегчения условий резания почвы и стеблей растительности, а также повышения заглубляющей способности, диски 1 посредством кинематической связи 3 подтормаживаются опорными колёсами 4 сеялки. Вследствие этого отношение окружной скорости периметра дисков V_1 к поступательной скорости сеялки V_2 (кинематический режим λ) меньше

единицы. Лезвия подторможенных дисков 1 проскальзывают относительно перерезаемого материала, осуществляя облегчённое скользящее резание почвы и стеблей растительности.

При нарезке посевных бороздок глубиной h лезвия дисков контактирует с почвой по дуге $EC=R(\pi/2-\alpha_1)$, где α_1 – угол входа в почву диска радиусом R (рисунок 6.8).

Рисунок 6.8 – Взаимодействие разрезающего диска с почвой

В точке B дуги приложена равнодействующая F сил сопротивления почвы проникновению диска, слагаемая из нормальной F_n и тангенциальной F_τ составляющих:

$$F_n = qR \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right), \text{ кН};$$

$$F_\tau = F_n \operatorname{tg} \tau, \text{ кН};$$

где q – среднее удельное на единицу длины дуги EC давление лезвия диска на почву, кН/м;

τ – угол между нормалью F_n и вектором V_b абсолютной скорости точки B (угол скольжения).

Горизонтальная F_x и вертикальная F_y составляющие силы F удовлетворяют системе уравнений:

$$\begin{aligned} F_x &= F_n \cos \alpha_b + F_\tau \sin \alpha_b, \text{ кН}; \\ F_y &= F_n \sin \alpha_b - F_\tau \cos \alpha_b, \text{ кН}; \end{aligned} \quad (6.7)$$

где α_b – положение радиуса R диска в точке B .

Очевидно,

$$\begin{aligned} q &= \frac{1}{(\frac{\pi}{2} - \alpha_1)} \int_{\alpha_1}^{\frac{\pi}{2}} q_\alpha d\alpha, \text{ кН}; \\ \alpha_b &= \frac{\int_{\alpha_1}^{\frac{\pi}{2}} \alpha q_\alpha d\alpha}{\int_{\alpha_1}^{\frac{\pi}{2}} q_\alpha d\alpha}; \end{aligned} \quad (6.8)$$

где q_α – удельное давление диска на почву при текущем значении угла α , кН/м.

По экспериментальным данным [71], с увеличением угла скольжения τ необходимое для резания стеблей растительности значение q_α уменьшается. Формализуется эта взаимосвязь зависимостью [72]:

$$q_\alpha = q_0 a^{\tau(\alpha)}, \text{ кН/м}; \quad (6.9)$$

где q_0 – значение q при $\tau=0$, кН/м; a – постоянный коэффициент, $a < 1$; $\tau(\alpha)$ – взаимосвязь углов τ и α .

По теореме синусов из векторного треугольника $V_l B V_b$ следует (рисунок 6.9):

$$\tau = \arctg \left| \frac{\lambda - \sin \alpha}{\cos \alpha} \right|. \quad (6.10)$$

Рисунок 6.9 – Вектор абсолютной скорости точки B на периметре разрезающего диска

Известно, что лучшим агротехническим показателям работы разрезающих дисков соответствует кинематический режим $\lambda=0,24$ [70], при котором взаимосвязь (6.10) аппроксимируется линейной функцией с достоверностью 100 %:

$$\tau = b\alpha + c; \quad (6.11)$$

где $b=68,3$ и $c=-20,1$.

Тогда выражения (6.8) с учётом (6.9) и (6.11) преобразуются к виду:

$$q = \frac{q_0}{(\frac{\pi}{2}-\alpha_1)} \int_{\alpha_1}^{\frac{\pi}{2}} a^{b\alpha+c} d\alpha = \frac{q_0 a^c}{k(\frac{\pi}{2}-\alpha_1)} (e^{k\frac{\pi}{2}} - e^{k\alpha_1}), \text{ кН/м};$$

$$\alpha_b = \frac{e^{k\frac{\pi}{2}}(k\frac{\pi}{2}-1) - e^{k\alpha_1}(k\alpha_1-1)}{k(e^{k\frac{\pi}{2}} - e^{k\alpha_1})};$$

где $a=0,989$;

$$k=b\ln a=-0,754.$$

Для свободно перекатывающихся разрезающих дисков ($\lambda=1$) коэффициенты уравнения (6.11) имеют следующие значения с достоверностью аппроксимации 100%: $b=-28,7$ и $c=45,0$.

Сила сопротивления почвы проскальзывающим разрезающим дискам создаёт относительно их оси O крутящий момент M , который через кинематическую связь передаётся на вал опорных колёс сеялки (рисунок 6.7). Под действием момента M в точке контакта опорных колёс с поверхностью поля возникает реактивная подталкивающая сила ΔF_x :

$$\Delta F_x = \lambda \frac{F_t R}{r}, \text{ кН};$$

где r – радиус опорного колеса сеялки, $r=0,6225$ м.

Суммарное тяговое сопротивление сеялки ΣF_x уменьшается на величину ΔF_x и составляет:

$$\Sigma F_x = F_x - \Delta F_x, \text{ кН}.$$

Оценку влияния кинематического режима разрезающих дисков λ и глубины бороздок h на величину тягового сопротивления сеялки ΣF_x и вертикальную составляющую силы сопротивления почвы проникновению дисков F_y , проводили на стерне после уборки озимой пшеницы на зелёный корм. Почва экспериментального участка характеризовалась твёрдостью 1,71 МПа и влажностью в слое 0-5 см – 19,7%. Высота стерни была равна 19,3 см, а её масса – 0,21 кг/м². Среднеквадратическое отклонение гребнистости поля – 1,6 см. Условия испытаний соответствовали $q_0=4,6$ кН/м.

Эффективность разработанной конструкции оценили в сравнительных испытаниях экспериментальных образцов сеялок, проведенных на посеве озимой пшеницы по необработанной стерне после уборки овса. По результатам эксперимента было построено линейное уравнение регрессии,

которое адекватно описывает процесс с 95-процентной доверительной вероятностью по критерию Фишера:

$$F_y = 0,03 + 0,14\lambda + 0,0422h, \text{ кН.} \quad (6.12)$$

Сопоставление теоретической (6.7) и экспериментальной (6.12) моделей (рисунок 6.10) показало их удовлетворительную сходимость.

Рисунок 6.10 – Зависимость вертикальной составляющей силы сопротивления почвы проникновению разрезающего диска от его кинематического режима и глубины нарезаемой бороздки

Приведенные данные свидетельствуют о преимуществе использования принципа скользящего резания для разрезающих дисков ($\lambda=0,24$) по их способности нарезать посевные бороздки необходимой глубины для заделки семян культуры. Одинаковая глубина бороздок при $\lambda=0,24$ достигается

меньшей на 34-72% вертикальной нагрузкой на разрезающие диски, в сравнении с $\lambda=1$.

При глубине бороздок до $h=3,7$ см наблюдалось более высокое тяговое сопротивление посевной секции с проскальзывающим разрезающим диском (рисунок 6.11).

Рисунок 6.11 – Зависимость тягового сопротивления посевной секции от кинематического режима разрезающего диска и глубины нарезаемой бороздки

Объясняется это облегчёнными условиями формирования бороздок на небольшую глубину, вследствие чего у проскальзывающих дисков эффект от подталкивающей силы ΔF_x невелик. Поэтому свободно перекатывающиеся разрезающие диски формируют бороздки с меньшим тяговым усилием.

Однако практическое значение при посеве зерновых культур имеет глубина бороздок $h>3,7$ см. В этом случае обозначаются преимущества проскальзывающих разрезающих дисков. Сопротивление внедрению дисков в почву нарастает пропорционально глубине бороздок и, соответственно, в большей степени проявляется эффект реактивного подталкивающего усилия от использования принципа скользящего резания. Благодаря этому эффекту

при глубине бороздок 5 см тяговое сопротивление посевной секции с проскальзывающим диском составило 0,33 кН, а у конструкции со свободно перекатывающимся диском – 0,41 кН, или на 24% выше. При дальнейшем увеличении глубины бороздок разница тягового сопротивления в пользу проскальзывающего разрезающего диска возрастает. Пропорционально снижению тягового сопротивления посевных секций уменьшается энергоёмкость прямого посева зерновых культур.

По результатам выполненных исследований создана сеялка прямого посева зерновых культур (таблица 6.4).

Таблица 6.4 – Техническая характеристика сеялки СЗПП-3,6

Ширина захвата, м	3,6
Класс трактора для агрегатирования, кН	14-20
Масса, кг	2400
Рабочая скорость, км/ч	до 9
Ширина междурядий, см	15
Сменная производительность, га/ч	2,0

Государственные испытания СЗПП-3,6 выполнены на посеве озимой пшеницы по необработанному стерневому фону после уборки овса. Влажность почвы в слое 0-5 см – 23,5, в слое 5-10 см – 24,3%. Твёрдость почвы в слое 0-5 см – 0,91, в слое 5-10 см – 1,14 МПа. Масса пожнивных и растительных остатков на поверхности поля – 175,3 г/м². Базой для сравнения принята отечественная серийная сеялка СЗПП-4 в агрегате с трактором Т-150К.

В процессе испытаний на варианте применения новой сеялки установлено повышение на 10,7% полевой всхожести семян и в 2,9 раза больше сохранённой стерни. Одинаковое заглубление сошников при равных рабочих скоростях достигнуто новой сеялкой с удельной массой в 1,5 раза меньшей, чем у базовой. Удельные на 1 м ширины захвата тяговое сопротивление СЗПП-3,6 в 1,89, а энергозатраты в 1,63 раза меньше, чем у СЗПП-4. Экономия топлива с применением новой сеялки составила 28,9%. По

металло- и энергоёмкости сеялка СЗПП-3,6 находится на уровне мировых образцов.

В результате исследований установлено, что использование принципа скользящего резания для разрезающих дисков зерновой сеялки позволяет снизить энергоёмкость прямого посева культур благодаря облегчению условий резания почвы и стеблей растительности разрезающими дисками, а также повышению их заглубляющей способности в необработанную почву. На опорных колёсах сеялки проявляется эффект реактивного подталкивающего усилия от проскальзывающих дисков, который снижает тяговое сопротивление сеялки.

6.4 Рабочие органы для полосовой обработки почвы *STRIP-TILL*

При прямом посеве не используется ряд функций обработки почвы, благоприятно сказывающихся на снижении общих затрат по возделыванию культур и свойствах почвы [73]. К числу таких функций можно отнести механическое уничтожение сорняков. Ее ограниченное использование при минимизации обработки приводит к повышению засорённости посевов [74]. Замена механического уничтожения сорняков гербицидами обходится значительно дороже [75]. Кроме того, гербициды оказывают негативное воздействие на окружающую среду [76]. Поэтому пренебрегать этой функцией обработки почвы возможно лишь при засорённости посевов, не превышающей экономического порога вредоносности.

Компромиссный вариант минимизации механического воздействия на почву заключается в ограничении площади поля, подвергающейся рыхлению, путем полосовой обработки лишь в зоне рядков сельскохозяйственных культур (технология *Strip-Till*).

Учитывая, что в разрыхленную полосу высевают семена возделываемых культур, качество рыхления должно соответствовать требованиям, предъявляемым к предпосевной обработке почвы. Структура её должна быть

мелкокомковатой, что не всегда возможно при использовании пассивных почвообрабатывающих рыхлителей, особенно в условиях глинистых и суглинистых почв.

Требуемые показатели рыхления могут обеспечить почвообрабатывающие фрезы с приводом от вала отбора мощности (ВОМ) трактора, использование которых к тому же сокращает потери энергии на буксование движителей и снижает разрушающее их воздействие на почву. Уникальность почвообрабатывающих фрез состоит в возможности за один проход устанавливать необходимое качество рыхления в зависимости от складывающихся почвенных условий. Изменением поступательной скорости перемещения агрегата и угловой скорости вращения фрез регулируется подача на их ножи и, соответственно, степень измельчения почвы с тем, чтобы пласт с должным качеством обрабатывался за один проход независимо от его исходного состояния.

Высокая экономико-экологическая эффективность отмечена при посеве зерновых культур по технологии *Strip-Till* комбинированной машиной, разработанной ФГБНУ «Курский ФАНЦ». Ее использование открывает возможности для совмещения фрезерной полосовой обработки почвы на глубину 10-12 см, посева и локального внесения ниже уровня семян минеральных удобрений в дозе, достаточной для формирования планируемой урожайности. Почва под каждый рядок культуры на глубину заделки удобрений обрабатывается полосами узкими почвообрабатывающими фрезами 1, объединёнными в блоки по две фрезы (рисунок 6.12).

Рисунок 6.12 – Схема посева зерновых культур комбинированной машиной по технологии *Strip-Till*

Фрезы приводятся во вращение от ВОМ трактора через редуктор 2. Поперечное сечение каждой из фрезеруемых полос имеет форму прямоугольного треугольника. На её дно долотообразный туковый сошник 3 размещает основную дозу минеральных удобрений, одновременно подрезая почву со стороны вертикальной стенки полосы. Вдоль полосы, как по направляющей, перемещается узкорядный двухдисковый сошник 4. Внешними плоскостями правого и левого дисков он упирается в необработанные стенки, раздвигает их, формирует выше удобрений два уплотнённых ложа и укладывает на них семена. Каток 5 уплотняет почву в зоне высеянных семян.

Повышенная энергоёмкость фрезы, используемой в комбинированной машине, обусловлена особенностью её конструкции. Ножи на дисках фрезы выполнены одинаковой длины и размещены поочерёдно на равном угловом удалении один от другого. При перемещении их сверху-вниз толщина фрезеруемых стружек уменьшается ко дну борозды, то есть нижняя часть обрабатываемого почвенного пласта измельчается фрезой с возрастающей интенсивностью, что противоречит желаемому.

В повышенной интенсивности измельчения нуждается не нижняя, а верхняя часть пласта, пронизанная корнями растений предшественника и более связная. Испытания фрезы с Г-образными ножами на сплошной обработке почвы показали, что для достижения требуемого измельчения верхней части пласта приходится его нижнюю часть вынужденно излишне измельчать и распылять до эрозионных опасных частиц, на что к тому же непроизводительно расходуется энергия [41].

Стереотип равноудалённого поочерёдного размещения ножей на дисках базовой фрезы подкупает симметрией, которая воспринимается однозначно оптимальной и не побуждает исследователей совершенствовать конструкцию.

Разрушить такой стереотип может фреза с неравномерным размещением на диске 1 ножей 2, 3 и 4, выполненных с разновеликими стойками [41] (рисунок 6.13).

Рисунок 6.13 – Размещение разновеликих ножей на диске фрезы для полосовой обработки почвы

Эффективность такого инновационного рабочего органа возможна, если разновеликие ножи устанавливать на диске в последовательности, при которой измеренный в одном направлении угол между ножами 4 и 2 превышает угол между ножами 3 и 4. Радиусы R_1 и R_2 разновеликих ножей обеспечивают одинаковую толщину стружки, отделяемой ими и, соответственно, одинаковую степень измельчения верхней части обрабатываемого пласта, если параметры монтажа ножей на диске удовлетворяют уравнению (6.13):

$$\alpha = \frac{2\pi}{z} - \varphi + \arcsin\left(\frac{\sin\varphi}{U}\right) + \lambda \left(\sqrt{U^2 - \sin^2\varphi} - \cos\varphi\right); \quad (6.13)$$

где α – угловое смещение по диску между ножами 3 и 4;

z – количество ножей на диске, в данном случае $z=3$;

φ – угол входа ножей в почву;

λ – кинематический режим фрезерования почвы, $\lambda = \frac{\omega R_1}{V}$;

V – поступательная скорость фрезы, $\frac{м}{с}$;

U – соотношение между разновеликими ножами, $U = \frac{R_2}{R_1}$.

Нож 3 активно работает в верхней части пласта, но его укороченный радиус R_2 недостаточен для рыхления нижней части, вследствие чего степень измельчения последней уменьшается, что служит предпосылкой не только экономии энергии, но и улучшения качества обработки почвы вследствие минимизации количества мелких эрозионных опасных частиц.

В сравнительных экспериментальных исследованиях по оценке эффективности инновационной фрезы с разновеликими ножами использовали лабораторную установку с фрезерным диском, приводимым во вращение ВОМ трактора. Ось вращения диска горизонтальная и перпендикулярная рабочему перемещению установки.

Исследования выполняли на прямом фрезеровании, когда направление вращения фрезы и движителей трактора совпадает и фреза подталкивает трактор. Энергоёмкость фрезерования Q оценивали интегральным показателем удельных затрат энергии на единицу объёма измельчаемой почвы (6.14):

$$Q = \frac{M\omega_1\eta - PV}{10^3 FV}, \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}; \quad (6.14)$$

где M – крутящий момент ВОМ, кН·м;

ω_1 – угловая скорость ВОМ, с^{-1}

η – к.п.д. передачи мощности от ВОМ к фрезе, $\eta=0,85$;

P – подталкивающее усилие фрезы, кН;

F – площадь сечения фрезеруемой полосы, м^2 .

Лабораторную установку навешивали на трактор Т-150К. Привод фрезы осуществляли через тензометрический карданный вал, посредством которого на осциллограмму записывали величину крутящего момента M . Параллельно на осциллограмму записывали поступательную скорость фрезы. Угловая скорость ВОМ $\omega_1 = 56,5 \text{ с}^{-1}$. Контролировали её индукционным отметчиком

числа оборотов в единицу времени. При этом вал фрезы с приводом через редуктор вращался с угловой скоростью $\omega = 45,6 \text{ с}^{-1}$.

В режиме «запись» коробку перемены передач трактора Т-150К включали в положение «нейтрал». Для сообщения поступательной скорости трактор Т-150К буксировали трактором МТЗ-82 через тензометрическое звено, которое фиксировало тяговое сопротивление P_1 , определяемое по формуле (6.15):

$$P_1 = P_2 + P, \text{ кН}; \quad (6.15)$$

где P_2 – сопротивление перекачиванию трактора Т-150К, кН.

Силу P_2 определяли в отдельном эксперименте буксированием трактора Т-150К при незаглубленной фрезе, когда $P=0$. При известных величинах P_1 , и P_2 подталкивающее усилие фрезы $P = P_1 - P_2$.

Глубину обработки почвы регулировали вертикальным перемещением опорных лыж относительно рамы установки. После рабочего прохода установки глубиномером контролировали фактическую глубину фрезерования почвы.

На полосовой обработке почвы выполняли сравнительные испытания фрез, оснащённых ножами с прямыми стойками, наклонёнными к плоскости вращения под углом $\beta = 17^\circ$ (рисунок 6.13). На дисках базового варианта через 120° размещали три ножа с параметрами $2R_1=420$ и $2R_3=180$ мм. Отличие экспериментальных рабочих органов состояло в размещении на диске разновеликих ножей с параметрами $2R_1=420$ мм, $2R_2=375$ мм и $U=0,89$. Для обоих вариантов $2R_3=180$ мм.

Сравнительные испытания проводили на почве влажностью 21%, твёрдостью 1,6 МПа при изменении двух факторов – глубины обработки в диапазоне $h=8-12$ см и поступательной скорости V от 0,61 до 1,09 м/с.

Результаты сравнительных испытаний представляли в виде математических моделей взаимосвязи варьируемых факторов с энергоёмкостью фрезерования почвы инновационной Q_1 и базовой Q_2

конструкциями, используя методику оптимального планирования многофакторного эксперимента на базе центрального ортогонального композиционного плана.

Для построения стандартной матрицы эксперимента факторы кодировали, то есть переводили натуральные значения их уровней в кодовые безразмерные величины (таблица 6.5).

Таблица 6.5 – Уровни варьируемых факторов

Фактор	Обозначение		Уровни варьирования: кодовые		
	кодовое	натуральное	-1	0	1
			натуральные		
Глубина обработки почвы	X_1	h	8 см	10 см	12 см
Поступательная скорость перемещения фрезы	X_2	V	0,61 м/с	0,85 м/с	1,09 м/с

После кодирования факторов применительно к каждой из испытываемых конструкций составляли матрицу планирования эксперимента. При двух факторах она содержит ядро в количестве $2^2 = 4$ опытов (№ 1-4), четыре звёздные точки (№ 5-8) и 1 центральный опыт (№ 9). Итого 9 опытов (таблица 6.6).

Таблица 6.6 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Уровни варьирования факторов		Энергоёмкость фрезерования почвы, Мдж/м ³ :									
			инновационной фрезой					базовой фрезой				
	X_1	X_2	повторения			среднее Q_1	повторения			среднее Q_2		
1	1	1	1,75	1,48	1,66	1,63	2,18	1,75	1,98	1,97		
2	1	-1	2,43	2,86	2,81	2,7	2,95	3,29	3,12	3,12		
3	-1	1	2,51	2,12	2,36	2,33	3,0	2,56	2,78	2,78		
4	-1	-1	4,67	3,9	5,05	4,54	4,53	5,67	4,86	5,02		
5	1	0	1,51	2,0	2,16	1,89	2,15	2,48	2,09	2,24		
6	-1	0	3,1	2,72	2,82	2,88	3,53	3,11	3,26	3,3		
7	0	1	1,63	2,1	1,79	1,84	2,48	2,23	2,4	2,37		
8	0	-1	3,5	3,11	3,2	3,27	4,01	3,72	3,85	3,86		
9	0	0	2,55	2,1	1,95	2,2	2,55	2,98	2,63	2,72		

Характер изменения выходной величины в каждом опыте случайный. Поэтому для исключения систематических ошибок их проводили в случайном порядке и повторяли трижды. По результатам экспериментальной реализации матрицы были рассчитаны средние значения параллельных опытов по энергоёмкости фрезерования почвы инновационной Q_1 и базовой Q_2 конструкциями.

Статистическую обработку данных эксперимента выполняли в соответствии с известной методикой [37]. Определяли коэффициенты уравнений регрессии и их дисперсии. Статистическую значимость коэффициентов оценивали по t -критерию Стьюдента. Воспроизводимость эксперимента устанавливали по критерию Кохрена. Адекватность описания объекта полиномом второй степени производили с использованием F -критерия Фишера. После исключения незначимых коэффициентов были получены уравнения (6.16), адекватно описывающие исследуемый процесс в заданных интервалах изменения факторов:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 2,17 - 0,588X_1 - 0,785X_2 + 0,285X_1X_2 + 0,395X_2^2, \text{ Мдж/м}^3; \\ Q_2 &= 2,69 - 0,628X_1 - 0,813X_2 + 0,272X_1X_2 + 0,433X_2^2, \text{ Мдж/м}^3; \end{aligned} \quad (6.16)$$

где $X_1 = 0,5h - 5$;
 $X_2 = 5V - 4,45$.

Из анализа полученных данных вытекает снижение энергоёмкости фрезерования почвы инновационной и базовой конструкциями с увеличением поступательной скорости фрез и увеличением глубины обработки (рисунок 6.14).

Рисунок 6.14 – Влияние глубины обработки почвы и поступательной скорости фрезы на энергоёмкость полосового фрезерования почвы

Теоретические предпосылки эффективности инновационной фрезы подтверждены экспериментально. Её энергоёмкость при глубине обработки почвы ($h=8$ см) и поступательной скорости ($V=0,69$ м/с) снизилась в сравнении с базовой конструкцией на 10,6%. С ростом глубины обработки до 12 см и поступательной скорости до 1,09 м/с энергетическая эффективность инновационной фрезы повысилась до 20,8%.

В среднем в указанном диапазоне изменения факторов снижение энергоёмкости фрезерования с использованием инновационной конструкции составило 15,8%. При этом качество рыхления почвы сравниваемыми вариантами фрез было примерно одинаковым.

Испытывали КО-3,6 с усовершенствованными рабочими органами на чернозёме типичном среднемощном среднегумусном.

Плотность почвы – 1,05-1,18 г/см³. Горизонт 0-16 см характеризовался влажностью 17-20 % и твёрдостью 3,5-4,1 МПа. Посев озимой пшеницы сорта

«Московская-39» проводили по стерне после уборки однолетних трав на сено. На поверхности поля содержались растительные остатки в количестве 430 г/м². Норма высева семян – 4,5 млн. штук на гектар.

Одновременно с посевом ниже уровня семян вносили аммиачную селитру в дозе 100 кг/га в физическом весе. Показатели глубины заделки в почву семян и удобрения орудием КО-3,6, полученные в результате полевых испытаний, приведены в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Глубина заделки семян и удобрений рабочими органами комбинированного орудия

№ рядков	Высеваемый материал	Показатели глубины заделки в почву			Средняя толщина почвенной прослойки между семенами и удобрением, см	Перекрытие (+), удаление (–) зон разброса семян и удобрения, см
		Средняя, см	Средне-квадратическое отклонение, см	Коэффициент вариации, %		
4	Озимая пшеница	6,1	0,9	14,8	5,2	+2,3
	Аммиачная селитра	11,3	1,6	14,2		
12	Озимая пшеница	5,5	0,6	11,0	6,5	–1,4
	Аммиачная селитра	12,0	1,1	9,2		
20	Озимая пшеница	6,0	0,8	13,3	6,5	–1,1
	Аммиачная селитра	12,5	1,0	8,0		

Анализ их показывает, что при заделке семян на глубину 5,5-6,1 см, а удобрения на 11,3-12,5 см, между ними образуется почвенная прослойка средней толщиной 5,2-6,5 см. Возможно частичное смешение семян с удобрением в слое толщиной 2,3 см с вероятностью 0,14. Густота всходов озимой пшеницы составила 351-418 штук/м², т.е. при посеве 4,5 млн. штук семян на гектар получена полевая всхожесть посевного материала 78-93%.

Орудие КО-3,6 устойчиво агрегируется с энергонасыщенными тракторами класса 30 кН. При выполнении совмещённых приёмов агрегат Т-

150К+КО-3,6 потребляет 15,1 л/га топлива. Среднее количество топлива на переезды и повороты – 2,0 л/га. Использование КО-3,6 на посеве озимых и яровых зерновых культур позволило снизить общие затраты энергии на 1,7-23,1, топлива на 3,7-32,2%. Прибавка урожайности зерновых культур в результате применения комбинированного орудия составила 0,36-0,53 т/га. Экологический эффект от его применения состоит в снижении интенсивности механического воздействия на почву на 30,2% при выращивании озимых и на 1,4% – при выращивании яровых зерновых культур, что способствует повышению противозерозионной стойкости почвы [77].

Для полосовой обработки почвы при возделывании сельскохозяйственных культур по технологии *Strip-Till* создана инновационная фреза с разновеликими рабочими органами, позволяющая снизить интенсивность измельчения нижней части фрезеруемого пласта. Базовой конструкцией фрезы эта часть пласта излишне измельчается до эрозионных опасных частиц, на что непроизводительно расходуется энергия. Сравнительными испытаниями установлено снижение энергоёмкости полосового фрезерования почвы с использованием инновационных рабочих органов в среднем на 15,8% при одинаковом качестве рыхления почвы. Это позволяет рекомендовать их включение в состав комплекса почвообрабатывающих и посевных машин для возделывания культур по технологии *Strip-Till*.

По выделенным признакам технолого-технический комплекс для возделывания зерновых культур легко адаптируется к многовариантным почвенно-климатическим особенностям регионов России и обеспечен отечественными ресурсами. Данные научных исследований и производственных испытаний показали его высокую экономическую и экологическую эффективность.

7 Экологические проблемы технического обеспечения технологий

7.1 Экологическая оценка эффективности использования техники

Эффективность использования техники носит многокритериальный характер и включает в себя показатели совокупных и прямых эксплуатационных затрат денежных средств, затрат труда и др. [78]. В перечне экономических показателей присутствует экологический фактор эффективности, ориентированный на учёт выбросов вредных веществ в атмосферу от двигателей тракторов и самоходных машин. Указанный фактор выражается единым стоимостным нормативом в расчёте на 1 кг израсходованного топлива при выполнении агротехнических приёмов.

Затраты на охрану окружающей среды от загрязнения выхлопными газами нормированы ГОСТ Р 53056 в зависимости от расходующего моторного топлива [79]. На текущий момент с учётом вариабельности курса рубля они могут быть приняты равными 0,3 руб. на каждый 1 кг использованного топлива.

Но экологические проблемы технического характера не ограничиваются лишь выбросами вредных веществ в атмосферу. Значимой особенностью интенсивных технологий является техногенная деградация почвы её переуплотнением вследствие увеличения количества агроприёмов и, соответственно, проходов агрегатов по полю в процессе производства сельскохозяйственных культур (рисунок 7.1).

Рисунок 7.1 – Критерии экологической эффективности сельскохозяйственной техники

Уплотняющее воздействие на почву сельскохозяйственных агрегатов с мощными тракторами нового поколения приводит к снижению не только её эффективного, но и потенциального плодородия. Под воздействием ходовых систем и рабочих органов техники изменяются физико-механические свойства почвы, приводящие к её деградации. Наиболее значимым является водно-воздушный режим, благодаря которому происходит питание растений, обеспечение жизнедеятельности бактерий и окислительные процессы. Полного восстановления утраченного плодородия почвы вследствие техногенной деградации не удаётся достичь известными методами её механической обработки [80]-[83].

Проблема переуплотнения почвы усугубляется нарастающим распространением в сельскохозяйственном производстве колёсных тракторов, оказывающих повышенное уплотняющее воздействие. Ежегодно в России от переуплотнения почвы недобор урожая достигает до 20-30 млн. тонн (в пересчёте на зерно) и перерасход топлива до 2,5-3,0 млн. тонн [84].

Несмотря на значимые экономико-экологические потери, денежное выражение затрат на ликвидацию техногенной деградации почвы отсутствует, что является причиной обезличивания ресурсов, необходимых для проведения

почвоохранных мероприятий, а также неадекватных показателей эффективности используемой техники.

Актуальность снижения техногенной нагрузки на почву наглядно подтверждается следующим примером. Если раньше в Швеции пестроту урожайности ячменя преимущественно рассматривали как следствие неравномерности распределения элементов питания в почве, то в настоящее время значимый разброс урожайных данных от 4 до 11,5 т/га (почти в 3 раза!) объясняют вариабельностью плотности почвы. При этом высокие показатели урожайности культуры отмечают на элементарных участках с меньшей плотностью [85].

Ограничение механической нагрузки на почву определено нормами ГОСТ 26955, согласно которому оценивают давление на неё движителей единичных агрегатов в статическом состоянии [86]. Однако для предотвращения техногенной деградации почвы использование норм стандарта необходимо и в то же время недостаточно по следующим причинам.

Во-первых, ГОСТ абсолютно не учитывает уровень покрытия ходовыми системами площади поля. Техногенная деградация является следствием прохода по полю не единичного агрегата, а комплекса технических средств, используемых в производстве культур в течение цикла сельскохозяйственных работ от обработки почвы до получения урожая.

Во-вторых, при рабочем перемещении техники, в отличие от её статического состояния, возникает не учитываемая ГОСТом силовая взаимосвязь между трактором и агрегатируемой им машиной, которая сказывается на уплотняющих свойствах движителей.

В-третьих, затруднена практическая реализация положений ГОСТ сложной и небезупречной методикой его применения, сопряжённой с экспериментальной оценкой неравномерного распределения давления движителей на почву по площади пятна контакта.

Для разрешения перечисленных противоречий предлагается техногенную нагрузку на почву за цикл приёмов по производству культуры оценивать

интенсивностью механического воздействия. Формализуют данный показатель отношением к площади обработанного поля F (га) суммы работы энергетических средств агрегатов (МДж), затраченной на выполнение n приёмов по производству культуры [87]:

$$\sum_{i=1}^n I_i = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n A_i, \frac{\text{МДж}}{\text{га}}; \quad (7.1)$$

где A_i – работа i -го агрегата, МДж.

Величина A_i прямо пропорциональна используемой мощности агрегата N_i и времени t_i воздействия его на почву:

$$A_i = 3,6 N_i t_i, \text{МДж}; \quad (7.2)$$

Время t_i определяют по выражению:

$$t_i = \frac{F}{W_i}, \text{ч}; \quad (7.3)$$

где W_i – основная производительность выполнения i -го агротехнического приёма, га/ч.

Подставляя значения (7.2) и (7.3) в (7.1), получим:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 3,6 \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{W_i}, \frac{\text{МДж}}{\text{га}}. \quad (7.4)$$

Мощность механической нагрузки агрегата на почву может быть представлена разностью:

$$N_i = \varepsilon N_{oi} - \Delta N_i - N_{mi}, \text{кВт};$$

где: ε – коэффициент загрузки двигателя агрегата, $\varepsilon \approx 0,9$ [88];

$N_{\delta i}$ – мощность двигателя агрегата, кВт;

ΔN_i – потери мощности в механических передачах – вспомогательные затраты мощности, кВт;

N_{mi} – мощность привода механизмов не сопряжённых с воздействием на почву (высевающих аппаратов сеялок, устройств разбрасывающих удобрение, насосов опрыскивателей, срезающих и молотильно-сепарирующих устройств комбайнов и др.), кВт.

Значение ΔN_i складывается из мощностей на преодоление механических потерь в трансмиссии агрегата ΔN_{mi} и в передачах почвообрабатывающей фрезы $\Delta N_{\phi i}$, если таковая входит в состав агрегата:

$$\Delta N_i = \Delta N_{mi} + \Delta N_{\phi i}, \text{ кВт};$$

$$\Delta N_{mi} = (N_{\kappa i} + N_{ni} + N_{\delta i})(1 - \eta_{mi}), \text{ кВт};$$

$$\Delta N_{\phi i} = N_{\phi i}(1 - \eta_{\phi i}), \text{ кВт};$$

где $N_{\kappa i}$ – тяговая мощность, кВт;

N_{ni} , $N_{\delta i}$ – мощность на передвижение и буксование движителей, кВт;

$N_{\phi i}$ – мощность привода фрезерных почвообрабатывающих рабочих органов – передаётся через вал отбора мощности, кВт;

η_{mi} – к.п.д. трансмиссии движителей, $\eta_{mi} \approx 0,88$ [88];

$\eta_{\phi i}$ – к.п.д. механической передачи к фрезе от двигателя агрегата, $\eta_{\phi i} \approx 0,894$ [89].

Баланс мощности агрегата содержит составляющие:

$$\varepsilon N_{\delta i} = N_{\kappa i} + N_{\phi i} + N_{mi} + \Delta N_{mi} + \Delta N_{\phi i} + N_{ni} + N_{\delta i}, \text{ кВт}.$$

Распределение потоков мощности агрегата при выполнении агроприёмов показано на рисунке 7.2.

Рисунок 7.2 – Распределение потоков мощности агрегатов при выполнении агроприёмов

В приведенном балансе компоненты N_{ki} , $N_{\phi i}$ и N_{mi} полезные, так как направлены на исполнение элементов агроприёмов, обусловленных технологией.

Мощность N_{ki} расходуется на преодоление тягового сопротивления сельскохозяйственной машины P_i :

$$N_{ki} = P_i V_i, \text{ кВт};$$

где V_i – рабочая скорость агрегата, м/с.

Мощность $N_{\phi i}$ определяется произведением:

$$N_{\phi i} = M_i \omega_i, \text{ кВт};$$

где M_i – крутящий момент на вале отбора мощности привода почвообрабатывающей фрезы, кН·м;

ω_i – угловая скорость вала отбора мощности, с⁻¹.

Мощности ΔN_{mi} и $\Delta N_{\phi i}$ вспомогательные, способствующие реализации полезных функций агрегата.

А вот мощности N_{ni} и $N_{\delta i}$ вредные, они используются на деформацию смятием и переуплотнение почвы при перемещении агрегата по полю:

$$N_{ni} = (f_{1i} G_{1i} + f_{2i} G_{2i}) V_i, \text{ кВт};$$

где f_{1i} – коэффициент качения движителей (таблица 7.1);

G_{1i} – вес энергетического средства (трактора) или самоходной машины, кН;

f_{2i} – коэффициент сопротивления сельскохозяйственной машины протаскиванию, $f_{2i} \approx 0,25$ [66];

G_{2i} – вес сельскохозяйственной машины, кН.

Таблица 7.1 – Коэффициенты качения движителей [90]

Фон	Колёсный движитель	Гусеничный движитель
Стерня влажная	0,1	0,08
Слежавшаяся пахота	0,12	0,08
Свежевспаханное поле	0,18	0,10-0,12

Затраты мощности на буксование зависят в основном от мощности на преодоление тяговой нагрузки:

$$N_{\delta i} = N_{\kappa i} \delta_i, \text{ кВт};$$

где δ_i – коэффициент буксования движителей.

Пробуксовывающие движители в сторону вращения сдвигают с различной скоростью слои почвы в горизонтальном направлении. Максимальная скорость смещения поверхностных слоёв, затухающая у слоёв расположенных глубже. Следствием относительного смещения слоёв является экологический ущерб, заключающийся в истирании и разрушении структуры почвы.

Буксование движителей один из показателей нерационального использования техники. При буксовании 20% расход топлива на 30% выше, чем при эксплуатации техники с буксованием примерно 10% [91]. По данным испытаний в различных почвенно-климатических условиях РФ буксование движителей при нормативной нагрузке составляет в среднем $\delta_i \approx 0,096$ [92].

Содержание конкретного приёма по выращиванию культур реализуют подбором сельскохозяйственной машины соответствующего назначения. Производитель машины заявляет для неё ширину захвата, рабочую скорость и требуемую мощность энергетического средства.

Подставляя в формулу (7.4) значения составляющих, после преобразований получим выражение для общей интенсивности механического воздействия комплекса машинотракторных агрегатов на почву при выполнении приёмов по возделыванию и уборке культуры:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 3,6 \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon N_{di} - V_i(1 - \eta_{Ti})[P_i(1 + \delta_i) + f_{1i}G_{1i} + f_{2i}G_{2i}] - M_i \omega_i(1 - \eta_{\Phi i}) - N_{mi}}{W_i}, \quad (7.5)$$

МДж/га.

Общая интенсивность механического воздействия на почву включает в себя полезную $\sum_{i=1}^n I_{ni}$ и вредную $\sum_{i=1}^n I_{vi}$ составляющие, т.е.

$$\sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n I_{ni} + \sum_{i=1}^n I_{vi}, \text{ МДж/га.} \quad (7.6)$$

Технологически полезное воздействие направлено на рыхление почвы и выполнения других видов работ:

$$\sum_{i=1}^n I_{\text{пи}} = 3,6 \sum_{i=1}^n [V_i (P_i - f_{2i} G_{2i}) + M_i \omega_i \eta_{\phi i}] / W_i, \text{ МДж/га.} \quad (7.7)$$

Экологическую оценку сельскохозяйственной техники можно получить с учётом доли вредной работы в общем потоке расходуемой энергии. Чем меньше эта доля, тем экологическая состоятельность оцениваемой техники предпочтительнее. Вредное воздействие непременно сопутствует полезному. Обусловлено оно в основном уплотнением и истиранием почвы движителями энергетических средств и опорными элементами сельхозмашин:

$$\sum_{i=1}^n I_{\text{ви}} = \sum_{i=1}^n I_i - \sum_{i=1}^n I_{\text{пи}}, \text{ МДж/га.} \quad (7.8)$$

Составляющие разности (7.8) представлены формулами (7.6) и (7.7).

С другой стороны вредную составляющую можно формализовать по экспериментальным данным в соответствии с выражением:

$$\sum_{i=1}^n I_{\text{эви}} = 3,6 \sum_{i=1}^n \frac{(T_{ci} + f_{2i} G_{2i} + P_i \delta_i) V_i}{W_i}, \text{ МДж/га;} \quad (7.9)$$

где T_{ci} – горизонтальное сопротивление почвы элементам конструкции, уплотняющим почву (кН) определяется по известной формуле [71]:

$$T_{ci} = f_{3i} d_i q_i h_i^2, \text{ кН;} \quad (7.10)$$

где – суммарная ширина правого и левого движителей трактора и

d_i – опорных элементов сельхозмашин, $d_i = 2b_i$, м;

q_i – коэффициент объёмного смятия почвы, кН/м³;

h_i – глубина проседания почвы под движителями трактора и опорными элементами сельхозмашин, м;

f_{3i} – коэффициент сопротивления перемещению пневматических шин:
для свежевспаханного поля 0,75-0,79, для стерни 0,65-0,68, для луга 0,58-0,62, для укатанной грунтовой дороги 0,60-0,65.

Значение коэффициента q_i в выше приведенной формуле вытекает из соотношения:

$$q_i = \frac{R_i}{Q_i}, \text{ кН/м}^3;$$

где R_i – максимальное значение силы сопротивления почвы смятию при вертикальной деформации её на глубину h_i , кН;

Q_i – объём смятой (вытесненной) почвы, м³.

Усилие R_i измеряют твердомером Ревякина (рисунок 3.4), который на миллиметровой бумаге фиксирует диаграмму $Z_i = Z_i(h_i)$. На оси абсцисс диаграммы в точке h_i определяют ординату Z_i (м) и далее рассчитывают величину R_i по формуле:

$$R_i = Z_i k, \text{ кН};$$

где k – жёсткость пружины твердомера, Н/м.

Выражение для объёма смятой почвы имеет вид:

$$Q_i = h_i S, \text{ м}^3;$$

где S – площадь плунжера твердомера, м².

В случае использования пружины жёсткостью $k=13,5$ кН/м и плунжера площадью $S=2 \cdot 10^{-4}$ м²:

$$T_{ci} = 7,5 \cdot 10^4 b_i f_{zi} h_i^2 \operatorname{tg} \alpha, \text{ кН}; \quad (7.11)$$

где α – угол наклона к оси абсцисс линейной части диаграммы твердомера.

Фиксировать глубину проседания следует для левого и правого движителей энергетического средства. Вычисляют среднее значение h_i на длине гона в промежутке между разворотами агрегата, как показано на рисунке 7.3.

Рисунок 7.3 – Проседание в почву движителя энергетического средства

Для почвообрабатывающих и посевных агрегатов замеры h_i проводят также на участке по длине гона. Но после того, как перемещающийся на рабочей скорости агрегат останавливается. Замеры проводят в пространстве между энергетическим средством и сельскохозяйственной машиной в непосредственной близости от почвообрабатывающих и иных рабочих органов.

Ошибку Δ теоретической модели определяют статистическим сравнением расчётных данных по формуле (7.8) с величиной интенсивности механического воздействия на почву, полученной экспериментально по формуле (7.9):

$$\Delta = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{I_{\text{в}i} - I_{\text{эв}i}}{I_{\text{эв}i}} \right|, \%,$$

Для экспериментальной оценки интенсивности механического воздействия агрегатов на почву проведены сравнительные испытания двенадцати различных модификаций почвообрабатывающих и посевных агрегатов, представленных в таблицах 7.2 и 7.3.

Таблица 7.2 – Исходные данные для экспериментальной оценки интенсивности механического воздействия агрегатов на почву

Состав сельскохозяйственного агрегата		Глубина проседания в почву движителей трактора (h_i), м	Абсцисса диаграммы твердомера на глубине проседания в почву движителей трактора (Z_i), м	Коэффициент сопротивления перемещению пневматических шин (f_{zi})
Трактор	Сельхозмашина			
MT3-82	Опрыскиватель ОП-2000	0,021	0,063	0,66
	Зерновая сеялка «Ритм»	0,033	0,07	0,75
	Экспериментальный дискатор шириной захвата 2,0 м	0,042	0,095	0,68
	Зерновая сеялка СЗ-3,6 (посев озимых зерновых)	0,032	0,005	0,75
	Каток 7КВГ-2,0	0,026	0,008	0,75
	Зерновая сеялка СЗ-3,6 (посев яровых зерновых)	0,026	0,003	0,75
MT3-1221	Плуг ПО-3-45 (залежь)	0,05	0,053	0,75
	Плуг ПО-3-45 (почвенный канал)	0,057	0,006	0,62
	Культиватор КПС-4	0,012	0,017	0,65
	Зерновая сеялка СЗ-5,4 (посев озимых зерновых)	0,058	0,004	0,75
T-150K	Культиватор 2КПС-4	0,047	0,005	0,65
K-701	Глубокорыхлитель ГЩ-4М	0,064	0,005	0,68

Таблица 7.3 – Теоретические и экспериментальные значения интенсивности механического воздействия агрегатов на почву

Состав сельскохозяйственного агрегата		Вредная составляющая интенсивности механического воздействия на почву, МДж/га		Ошибка теоретической модели (Δ), %
Трактор	Сельхозмашина	по теоретической модели (I_{ei})	по экспериментальным данным ($I_{эvi}$)	
MT3-82	Опрыскиватель	7,3	6,7	9,0

	ОП-2000			
	Зерновая сеялка «Ритм»	19,5	21,4	8,9
	Экспериментальный дискатор шириной захвата 2,0 м	29,3	32,3	9,3
	Зерновая сеялка СЗ-3,6 (посев озимых зерновых)	26,0	25,3	3,0
	Каток 7КВГ-2,0	17,5	19,3	8,9
	Зерновая сеялка СЗ-3,6 (посев яровых зерновых)	26,0	29,6	12,3
МТЗ-1221	Плуг ПО-3-45 (залежь)	105,6	98,9	6,7
	Плуг ПО-3-45 (почвенный канал)	108,4	110,3	1,7
	Культиватор КПС-4	28,0	26,9	3,9
	Зерновая сеялка СЗ-5,4 (посев озимых зерновых)	26,8	27,6	3,1
Т-150К	Культиватор 2КПС-4	20,9	19,7	6,3
К-701	Глубококорытитель ГЦ-4М	66,1	68,2	3,1

Установлено, что, несмотря на значительную вариабельность физико-механических свойств почв, в условиях которых проводились испытания, ошибка теоретической модели находится в диапазоне $\Delta=1,7-12,3\%$. Это свидетельствует о возможности использования модели для сравнительного анализа экологических последствий применения в земледелии различных агрегатов.

7.2 Пути минимизации техногенной деградации почвы

Критерий вредной интенсивности механического воздействия на почву целесообразен для сравнительного анализа уровня техногенной деградации различными агрегатами, не проводя при этом трудоёмких и затратных натурных испытаний. Однако нормы, ограничивающие величину данного

критерия для оцениваемых агрегатов, отсутствуют. Поэтому возникла необходимость выражения его через давление движителей на почву, нормируемое ГОСТ [86].

Для упрощения контроля соблюдения стандартной нормы при механизированном выполнении полевых работ целесообразно найти соотношение между давлением движителей на почву и более доступным в практическом использовании показателем экологически вредной интенсивности механического воздействия на неё.

Определение фактического давления движителей укладывается в регламент, представленный на рисунке 7.4.

Рисунок 7.4 – Регламент определения фактического давления движителей на почву

Движитель воздействует на почву распределённым удельным давлением p_0 по поверхности, площадь которой равна произведению длины хорды $AB=D \cdot \sin \beta$ на ширину b [66] (рисунок 7.5):

$$p_0 = \frac{2G_1^1}{b D \sin 2\beta}, \text{ кН/м}^2; \quad (7.12)$$

где G_1^1 – вес энергетического средства, приходящийся на единичный движитель $G_1^1 = mG_1$, кН;

m – коэффициент распределения веса G_1 на движители;

D – диаметр движителей, м;

β – угол наклона к вертикали равнодействующей сил T_d и G_1^1 .

Рисунок 7.5 – Проседание в почву движителя

Из формулы (7.12) вытекает:

$$\sin 2\beta = \frac{2mG_1}{p_0 b D}. \quad (7.13)$$

Усилие T_{di} на преодоление движителями горизонтального сопротивления почвы T_{ci} :

$$T_{di} = 2f_3 p_0 b D \sin^2 \beta, \text{ кН}. \quad (7.14)$$

Уравнение (7.9) с учётом $T_{di}=T_{ci}$ и выражений (7.13) и (7.14) после преобразований приняло вид:

$$p_0 = \frac{1}{2bDf_3} \left[\frac{(2mG_1)^2}{\frac{I_B W}{3,6V} - f_2 G_2 - P\delta} + \frac{I_B W}{3,6V} - f_2 G_2 - P\delta \right], \text{ кПа}; \quad (7.15)$$

Величина I_6 для конкретного машинотракторного агрегата содержится в справочных данных или рассчитывается по методике, изложенной в [43].

Почвенный покров Центрально-Чернозёмного региона РФ на 95% характеризуется суглинистыми и глинистыми почвами [93]. Удельное давление движителей на такую почву должно укладываться в нормы [86], приведенные в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Допускаемое давление движителей на суглинистую и глинистую почву $[p_0]$, кПа. Для супесчаных почв нормы увеличивают на 20%

Влажность почвы (Вл) в слое 0-30 см	Весенний период	Летне-осенний период
Вл>0,9НВ	80	100
0,7НВ<Вл≤0,9НВ	100	120
0,6НВ<Вл≤0,7НВ	120	140
0,5НВ<Вл≤0,6НВ	150	180
Вл≤0,5НВ	180	210

Использование сельскохозяйственного агрегата возможно, если давление движителей p_0 не превышает $[p_0]$. Значение p_0 , полученное по формуле (7.15), сопоставляют с $[p_0]$ в таблице 7.4 применительно к периоду использования агрегата и фактической влажности почвы в слое 0-30 см. Выбранная величина $[p_0]$ является максимальной для допуска к эксплуатации оцениваемой техники в обозначенных условиях.

Следствием формулы (7.15) является допустимая глубина колеи по следу движителей $[h]$. Её можно использовать в качестве легко контролируемого ограничительного критерия уплотняющего воздействия на почву. Определяют $[h]$ при $p_0 = [p_0]$.

Приравнивая (7.10) и (7.14), и после преобразований получили:

$$[h] = \sqrt{\frac{[p_0]D \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2mG_1}{[p_0]bD} \right)^2} \right]}{q}}, \text{ м.} \quad (7.16)$$

Или с учётом значений $q = \frac{Zk}{XS}$:

$$[h] = \sqrt{\frac{XS[p_0]D \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2mG_1}{[p_0]bD} \right)^2} \right]}{Zk}}, \text{ м.}$$

Если фактическая глубина колеи h после прохода агрегата не превышает величины $[h]$, рассчитанной по формуле (7.16), эксплуатация его возможна.

Для проверки объективности инновационного подхода провели эксперимент. Целью его явилось подтверждение соответствия величины $[h]$ по выражению (7.16) верхнему пределу оптимальной для развития растений плотности почвы $[\rho]$, измеренной по следу движителей сельскохозяйственного агрегата.

Сущность эксперимента состояла в следующем. Агрегат многократно перемещался по одному следу. После каждого прохода определяли плотность почвы ρ по следу движителей и глубину колеи h . Данные эксперимента аппроксимировали уравнением $\rho = \rho(h)$, которое решали относительно h при $\rho = [\rho]$. Требовалось доказать, что значение h , полученное по аппроксимирующему уравнению, с ошибкой не более 5% соответствует величине $[h]$ по формуле (7.16).

Эксперимент провели 30 мая 2017 г. на поле чёрного пара в опытном хозяйстве ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (Медвенский район, Курская область). Почва – чернозём типичный, тяжелосуглинистый, характеризующийся наименьшей влагоёмкостью НВ=27%. Верхний предел оптимального значения плотности такой почвы равен $[\rho]=1,3 \text{ г/см}^3$ [80]. Его и приняли при выполнении экспериментальных исследований.

Испытывали агрегат в составе трактора МТЗ 1221 и культиватора КПС-4 при сплошной обработке почвы на глубину 8,5 см со скоростью 2,17 м/с.

Техническая характеристика агрегата: $N_d=96$ кВт; $f_1=0,18$; $G_I=53$ кН; $f_2=0,25$; $G_2=7,4$ кН; $B=4$ м; $b=0,46$ м; $D=1,75$ м; $W=3,12$ га/ч. Влажность почвы в момент испытаний составляла 15% и соответствовала $Вл=0,56НВ$. Коэффициент объёмного смятия почвы $q=9540$ кН/м³.

При проведении эксперимента с культиватора демонтировали рабочие органы, ориентированные по следу движителей трактора. Произвели четыре прохода агрегата по одному следу. Результаты эксперимента представлены в таблице 7.5.

Таблица 7.5 – Плотность почвы по следу движителей трактора МТЗ 1221 в зависимости от глубины колеи

Количество проходов агрегата по одному следу	Глубина колеи, м	Плотность почвы по следу движителей, г/см ³
1	0,035	1,18
2	0,043	1,42
3	0,049	1,43
4	0,052	1,45

Зависимость $\rho=\rho(h)$ аппроксимировали уравнением

$\rho=-1442,2h^2+140,43h-1,965$ г/см³ при $R^2=0,98$ (рисунок 7.6).

Рисунок 7.6 – Плотность почвы по следу движителей в зависимости от глубины колеи

При $\rho=1,3 \text{ г/см}^3$ решением данного уравнения является величина $h=0,038$ м. Расчётная по формуле (7.16) допускаемая глубина колеи по следу движителей $[h]=0,039$ м, т.е. ошибка расчётов 3,1% не превышает заданного уровня 5%.

Следовательно, экспериментально подтверждено соответствие критерия, ограничивающего глубину колеи по следу движителей агрегата, верхнему пределу оптимальной плотности почвы.

По тем же экспериментальным данным интересно состояние почвы после первого прохода агрегата.

Плотность почвы по следу движителей составила $\rho=1,18 \text{ г/см}^3$ (меньше $[\rho]=1,3 \text{ г/см}^3$), а глубина колеи $h=0,035$ м (меньше $[h]=0,039$ м), что дополнительно свидетельствует о возможности эксплуатации агрегата в обозначенных выше условиях. Аналогичный вывод получен и расчётами по формуле (7.15), согласно которым для испытываемого агрегата $p_0=140,2 \text{ кПа}$. Допускаемое давление движителей на почву $[p_0]=150 \text{ кПа}$ (таблица 7.4, $p_0 < [p_0]$), т.е. модель (7.15) и вытекающее из неё следствие (7.16) приемлемы для использования в качестве критериев, ограничивающих уплотняющее воздействие техники на почву.

Таким образом, для ограничения уплотняющего воздействия машинотракторных агрегатов на почву обосновано использование критерия, являющегося производной интенсивности экологически вредного механического воздействия на неё при выполнении полевых работ. Новый критерий базируется на нормах стандарта и адаптирован к практическим условиям эксплуатации техники. Помимо нормальной нагрузки на почву, он учитывает силовую взаимосвязь между энергетическим средством и агрегируемой им машиной, сказывающуюся на уплотняющих свойствах движителей, а потому более адекватно представляет исследуемый процесс.

Однако формула (7.15) не учитывает параметров точки приложения к трактору тягового усилия и влияние тяговой нагрузки на уплотняющих

свойствах движителей и коэффициент буксования, что снижает точность формализации исследуемого процесса.

Силовая нагрузка на почву ведущих (двигателей) и ведомых колёс трактора в точках 2 и 3 зависит от веса трактора G_1 , координат его центра масс (точка 1) и определяется через нормальные (Y_2 , Y_3) и продольные (X_2 , X_3) реакции почвы (рисунок 7.7).

Рисунок 7.7 – Силовая нагрузка на трактор при выполнении полевых работ

Величина этой нагрузки подразделяется на статическую и динамическую. Статическая нагрузка характерна для неподвижного агрегата на горизонтальной площадке. В таком положении тяговое усилие трактора на перемещение орудия отсутствует, $P=0$. Нормальная реакция почвы на движители Y_2 определяется, исходя из уравнения моментов относительно точки 3 [94]:

$$Y_2 = \frac{L-a}{L} G_1 = mG_1, \text{ кН};$$

где L , a – продольная база и координата центра масс трактора, м.

Особенность динамической нагрузки состоит в том, что она перераспределяется на оси. При равномерном установившемся рабочем перемещении агрегата со скоростью V тяговое сопротивление $P > 0$. Динамическая нагрузка на движители и, соответственно, реакция почвы на неё изменяется. Величина её прирастает на $P \frac{H}{L}$ и, в соответствии с тем же уравнением моментов относительно точки 3, выражается зависимостью:

$$Y_2 = mG_1 + P \frac{H}{L}, \text{ кН}; \quad (7.17)$$

где H — высота прицепа над поверхностью поля, м.

Учитывая соотношение (7.17), выражение (7.15) примет вид:

$$p_0 = \frac{1}{bDf_3} \left[\frac{(mG_1 + \frac{PH}{L})^2}{\frac{I_B W}{3,6V} - f_2 G_2 - P\delta} + \frac{I_B W}{3,6V} - f_2 G_2 - P\delta \right], \text{ кПа}; \quad (7.18)$$

где b — суммарная ширина правого и левого движителей, м.

Абсолютное большинство тракторов сельскохозяйственного назначения симметричные и давление на почву правого и левого движителей p_0 одинаковое. Поэтому для удобства расчётов целесообразно абстрагироваться от единичного движителя и в расчётах использовать их суммарную ширину b .

Прирост нагрузки на движители провоцирует усиление уплотнения почвы. Для подтверждения данного факта на Центрально-Чернозёмной машиноиспытательной станции (пос. Камыши Курской области) проведен эксперимент, где испытывали машинотракторный агрегат в составе трактора МТЗ 1221 и двухрядной прицепной бороны БДП-3,2 «Pallada» (рисунок 7.8).

Рисунок 7.8 – Машиноtractorный агрегат МТЗ 1221 + БДП-3,2 на испытаниях

Борону сницей сочленяли с трактором посредством тензометрического звена, представленного на рисунке 7.9, которое фиксировало величину тягового усилия трактора.

Рисунок 7.9 – Определение тягового усилия трактора

Высоту прицепа бороны H изменяли смещением по вертикали скобы прицепной вилки тягово-сцепного устройства трактора.

Эффективная мощность двигателя трактора $N_d=96$ кВт, вес трактора $G_I=53$ кН, коэффициент распределения веса по осям $m=0,65$. Продольная база

трактора $L=2,76$ м, ширина и диаметр движителей, соответственно, $b=2b_0=0,92$ и $D=1,75$ м. Ширина захвата дисковой бороны $B=3,2$ м, вес её $G_2=16,1$ кН.

В эксперименте использовали следующие значения высоты точки прицепа H : 0,45; 0,55; 0,65; 0,8 и 0,9 м. Для каждого значения H по следам движителей трактора определяли плотность почвы прибором Н.А. Качинского.

Условия испытаний: поле – стерня после уборки озимой пшеницы. Почва – чернозём выщелоченный среднесуглинистый. Влажность почвы по горизонтам: 0-5 см – 19,1%; 5-10 см – 17,6%; 10-15 см – 14,5%. Твёрдость почвы по горизонтам, соответственно, 1,4; 1,9 и 2,4 МПа.

Экспериментальные данные получали, выполняя сплошную дисковую обработку почвы на глубину $12,6 \pm 2,1$ см со скоростью $V=2,5$ м/с. Величина тягового усилия, необходимого для агрегатирования бороны трактором, варьировала в диапазоне $P=9,4 \pm 0,96$ кН.

Результаты эксперимента представлены на рисунке 7.10, где точками приведена плотность почвы по следам движителей в зависимости от высоты прицепа H .

Рисунок 7.10 – Давление движителей на почву и её плотность по следам движителей в зависимости от высоты прицепа

При влажности в условиях испытаний вид функции плотности почвы от давления на неё известен [95]. Эта функция линейная. Компьютерная аппроксимация функции плотности почвы показана штриховой линией. Разброс точек относительно линии связи обусловлен высокой вариабельностью исходных условий – глубины обработки почвы и тягового усилия.

По формуле (7.18) рассчитано давление движителей на почву и нанесено на график (рисунок 7.10, сплошная линия), которое также прямо пропорционально H .

Анализ полученных взаимосвязей показывает следующее. С ростом высоты прицепа в диапазоне 0,55-0,9 м увеличиваются давление движителей на почву от 126 до 144 кПа и её плотность ρ по следам движителей с 1,34 до 1,45-1,47 г/см³ (на 8,2-9,7%).

Таким образом, можно сделать единственный основополагающий вывод эксперимента – с увеличением высоты прицепа давление движителей на почву возрастает. Этот факт, не учитываемый существующим ГОСТ, является элементом новизны данного исследования.

Трактор при эффективной мощности двигателя N_δ способен развивать зависимое от скорости V тяговое усилие P [43]:

$$P = \frac{1}{1+\delta} \left[\frac{N}{V(2-\eta_T)} - f_1 G_1 - f_2 G_2 \right], \text{ кН}; \quad (7.19)$$

где N – мощность, реализуемая через движители, $N = \varepsilon N_\delta - N_\phi(2-\eta_\phi) - N_m$, кВт;

Буксование определяют по известной формуле [96]:

$$\delta = a_1 \frac{P}{G_1} + b_1 \left(\frac{P}{G_1} \right)^{c_1};$$

где a_1, b_1, c_1 – эмпирические коэффициенты.

Большинство исследователей условно принимают буксование без тяговой нагрузки равное нулю и линейную зависимость $\delta=\delta(P)$ на начальном участке кривой. На больших тяговых усилиях линейная зависимость переходит в нелинейную и кривая $\delta=\delta(P)$ загибается вверх [97], [98]. Наиболее распространёнными условиями работы тракторных агрегатов, при которых их мощность максимально используется через движители, является стерня нормальной влажности и плотности. В этих условиях номинальное тяговое усилие тракторов реализуется при $\delta \leq 0,15-0,18$, что укладывается в линейную часть функции $\delta=\delta(P)$ [83], [97]. Оптимизация составов технических средств производится в пределах номинального тягового усилия P_H . Поэтому исходили из соотношения $\delta = a_1 \frac{P}{G_1}$, определяя значение коэффициента a_1 при $\delta=0,18$ и $P=P_H$, т.е. $a_1 = 0,18 \frac{G_1}{P_H}$. Таким образом,

$$\delta = 0,18 \frac{P}{P_H}. \quad (7.20)$$

Подставляя (7.20) в (7.18) и (7.19), формализовали зависимости для:

– тягового усилия трактора,

$$P = \frac{P_H}{0,36} \left[\sqrt{1 + \frac{0,72}{P_H} \left[\frac{N}{V(2-\eta_T)} - f_1 G_1 - f_2 G_2 \right]} - 1 \right], \text{ кН}; \quad (7.21)$$

– давления движителей на почву,

$$p_0 = \frac{1}{bDf_3} \left[\frac{(mG_1 + \frac{PH}{L})^2}{0,1I_B B - f_2 G_2 - 0,18 \frac{P^2}{P_H}} + 0,1I_B B - f_2 G_2 - 0,18 \frac{P^2}{P_H} \right], \text{ кПа}. \quad (7.22)$$

По формуле (7.22) рассчитали значения давления движителей в зависимости от высоты прицепа орудия к трактору H для условий эксперимента, результаты которого приведены на рисунке 7.10. Сопоставление давления движителей на почву и её плотности по следу движителей

свидетельствует об одинаковом характере изменения данных параметров в зависимости от H .

Выражение вредной интенсивности механического воздействия на почву I_6 после преобразования с учётом значений составляющих:

$$I_6 = \frac{10}{B} \left[\frac{N}{V(2-\eta_T)} - P + f_2 G_2 \right], \text{ МДж/га; } \quad (7.23)$$

где B – ширина захвата агрегата, м.

Система уравнений (7.21)-(7.23) является математической моделью, предназначенной для оптимизации составов технических средств при проектировании комплексной механизации региональных технологий с учётом нормирования механической нагрузки на почву.

Методику применения модели рассмотрели на примере выбора экологически безопасного агрегата для дисковой обработки почвы. Поле представлено чернозёмом обыкновенным, суглинистым с наименьшей влагоёмкостью $HВ=27\%$. На момент обработки влажность почвы 15% соответствовала $0,56HВ$.

В качестве банка данных для выбора машинотракторного агрегата по данным результатов государственных испытаний сельскохозяйственной техники [92] создан регистр комплексов машин для механизации перспективных агротехнологий производства основных сельскохозяйственных культур в условиях ЦЧР. В приложении А представлены экономические, а в приложении Б – экологические показатели машин регионального регистра.

Используя данные регистра, представили возможные экономически целесообразные варианты исполнения агротехнического приёма примерно с одинаковым качеством агрегатами отечественного (№№ 1-5) и импортного (№№ 6-8) производства (таблица 7.6).

Таблица 7.6 – Характеристика агрегатов и условий их использования на дисковой обработке почвы ($f_1=0,1$; $f_2=0,25$)

№ пп	Трактор + сельхозмашина	N_d , кВт	G_1 , кН	G_2 , кН	W , га/ч	V , м/с	B , м	b , м	D , м	L , м	m	H , м
1	Беларус 3022+ Б-7Т	223	115	62	6,04	2,4	7,1	0,62	1,9	2,96	0,55	0,52
2	Беларус 3022+ БДТ-7	223	115	36	8,4	3,33	7	0,62	1,9	2,96	0,55	0,52
3	Беларус 3522+ БДМ-6х4ППШК	227	124	51,9	4,98	2,3	6,6	0,71	2,06	3,0	0,6	0,52
4	Т-150К+ БДП-4000	132	84	28	4,4	3,0	4	0,54	1,4	2,86	0,64	0,37
5	К-744Р1+ БДП-6000	220	149	38	6,3	2,9	6	0,75	1,7	3,75	0,54	0,45
6	John Deere 8295R+ КД-6	217	140	47,8	6,9	3,2	6	0,62	1,98	3,0	0,6	0,42
7	John Deere 8295R+ Rau DXG	217	140	49,1	7,56	3,3	6,3	0,62	1,98	3,0	0,6	0,42
8	John Deere 8295R+ Catros 6001-2	217	140	33	7,5	3,5	6	0,62	1,98	3,0	0,6	0,42

В соответствии с моделью (7.21)-(7.23) для каждого агрегата, выполняющего дисковую обработку, рассчитали техногенную нагрузку по показателям вредной интенсивности механического воздействия и давления движителей на почву (таблица 7.7).

Таблица 7.7 – Техногенная нагрузка агрегатов на почву

№ пп	Трактор + сельхозмашина	P , кН	p_0 , кПа	I_e , МДж/га	Нормы стандарта			
					Максимальная влажность глинистой и суглинистой почвы в слое 0-30 см, допускающая эксплуатацию агрегата		Максимальная влажность супесчаной почвы в слое 0-30 см, допускающая эксплуатацию агрегата	
					Весенний период	Летне- осенний период	Весенний период	Летне- осенний период
1	Беларус 3022+ Б-7Т	38,7	135	69,7	0,6НВ	0,7НВ	0,7НВ	0,9НВ

2	Беларус 3022+ БДТ-7	30,0	163	46,7	0,5НВ	0,6НВ	0,6НВ	0,7НВ
3	Беларус 3522+ БДМ-6х4ППШК	46,2	135	76,6	0,6НВ	0,7НВ	0,7НВ	0,9НВ
4	Т-150К+ БДП-4000	18,0	229	59,8	–	–	–	0,5НВ
5	К-744Р1+ БДП-6000	32,0	192	62,6	–	0,5НВ	0,5НВ	0,6НВ
6	John Deere 8295R+ КД-6	26,1	201	67,4	–	0,5НВ	0,5НВ	0,6НВ
7	John Deere 8295R+ Rau DXG	24,4	201	64,0	–	0,5НВ	0,5НВ	0,6НВ
8	John Deere 8295R+ Catros 6001-2	25,3	214	55,1	–	–	0,5НВ	0,6НВ

Сопоставление расчётных значений p_0 с нормами ГОСТ 26955 позволило выделить условия, соответствующие эксплуатации агрегатов без экологического ущерба для почвы [86]. Из рассматриваемого перечня техники максимальным давлением движителей на почву выделяется агрегат №4 (229 кПа), а минимальным – агрегаты №1 и №3 – по 135 кПа.

Максимальное значение вредной интенсивности механического воздействия на почву I_e у агрегата №3 – 76,6 МДж/га, минимальное – у агрегата №2 – 46,7 МДж/га.

В весенний период для обозначенных условий дисковой обработки суглинистой почвы требованиям стандарта по допустимому давлению движителей удовлетворяют агрегаты №1 и №3 отечественного производства. При этом предпочтителен агрегат №1, у которого $I_e=69,7$ МДж/га, т.е. меньше, чем у агрегата 3 ($I_e=76,6$ МДж/га).

На тех же суглинистых почвах в летне-осенний период ограничения стандарта по давлению движителей менее жёсткие и его требованиям удовлетворяет большее количество агрегатов. При обозначенной фактической влажности почвы 0,56НВ приемлемы агрегаты №№ 1, 2 и 3, из которых предпочтителен агрегат №2 с $I_e=46,7$ МДж/га.

Для сравнения выполнили анализ случая дисковой обработки супесчаной почвы, где нормы допустимого давления движителей в соответствии с ГОСТ 26955 увеличены на 20% и вследствие этого большинство представленных в таблице 2 агрегатов по нормам стандарта могут использоваться на данном виде работ. Ограничения имеет лишь агрегат №4 на выполнение приёма в весенний период. Для агрегатов №№ 1 и 3 до 0,9НВ увеличилась и максимальная влажность супесчаных почв, при которой возможна дисковая обработка представленным перечнем техники.

7.3 Совершенствование экономико-экологических показателей использования техники

Машины для механизации агротехнологий должны обладать приемлемой экономической эффективностью, а также отвечать требованиям экологической безопасности. Выше показано, что экологические проблемы от использования техники выражаются в загрязнении окружающей среды выхлопными газами энергетических средств (тракторов, самоходных машин) и техногенной деградации почвы переуплотнением и разрушением её структуры движителями и рабочими органами агрегатов [99].

Техногенная деградация почвы представлена новым критерием – в виде вредной интенсивности механического воздействия на неё (7.23), который в широком формате охватывает понятие техногенной деградации, обусловленное как переуплотнением почвы, так и истиранием её структуры пробуксовывающими движителями.

Обобщённая информация об экономико-экологических показателях технического обеспечения агротехнологий углубленной адаптации в условиях ЦЧР содержится в региональном регистре (приложения А и Б). Комплексы машин в регистре дифференцированы по вариантам агротехнологий сформированным с учётом исходного состояния почвы (таблицы 3.2 и 3.3). Для каждого варианта приведен перечень технических средств, производимых

странами ТС и импортных, который содержит основные характеристики по цене, производительности, нагрузки на почву и др. Это позволяет потребителю сделать экономически и экологически обоснованный выбор при покупке техники, максимально отвечающей задачам инновационного развития и обеспечивающей конкурентоспособность отечественной сельскохозяйственной продукции.

По ГОСТ Р 53056-2008 абсолютным экономическим показателем сельскохозяйственной техники являются прямые эксплуатационные затраты денежных средств на единицу наработки [78] (приложение А).

Формализация экологической составляющей затрат на производство продукции Z_3 имеет вид (7.24):

$$Z_3 = q_m H_3 C_m + k \cdot I_6, \text{ руб./га;} \quad (7.24)$$

где q_m – удельный расход моторного топлива на исполнение агротехнологии, кг/га;

H_3 – нормативный коэффициент затрат на охрану окружающей среды, $H_3=0,3$;

C_m – цена топлива, руб./кг;

I_6 – сумма вредной работы, трансформируемой агрегатами на переуплотнение почвы за цикл приёмов по производству с.-х. культуры, МДж/га;

k – норматив затрат на ликвидацию последствий техногенной деградации почвы, руб./МДж.

Затраты на охрану почвы можно будет вычислить по формуле (7.24) при наличии количественного значения норматива k . Это позволит существенно повысить достоверность экономических показателей в земледелии, а также целенаправленно формировать денежный фонд на проведение почвозащитных мероприятий. Наличие такого фонда позволит компенсировать экологические издержки из-за отсутствия в РФ Закона о защите почвы.

Для обоснования конкретной величины норматива k введём понятие критического значения техногенной деградации $I_{кв}$, которое соответствует уплотнению почвы по всей площади поля до верхнего предела приемлемой агротехникой плотности $[\rho]$. Для характерной ЦЧР суглинистой почвы $[\rho]=1,3$ г/см³ [93]. Негативные последствия переуплотнения суглинистой почвы, в сравнении с песчаной, существенно выше [100]. Для других регионов, где почва менее тяжёлая по механическому составу, величина $[\rho]$ имеет другие значения, что следует учитывать при определении затрат на ликвидацию последствий техногенной деградации почвы в конкретных условиях.

Стоимость ликвидации последствий деградации на уровне $I_{кв}$ эквивалентна затратам $З_k$ на выполнение приёма по сплошному разуплотнению почвы. Известно, что таким приёмом является безотвальное рыхление на глубину 40-45 см, выполняемое чизельными и другими рыхлящими рабочими органами [43], [101]. Затраты $З_k$ отнесённые к величине $I_{кв}$ – есть искомая величина k , т.е.

$$k = \frac{З_k}{I_{кв}}, \text{ руб./Мдж.} \quad (7.25)$$

Для определения величины $I_{кв}$ использовали формулу (7.10) силы сопротивления почвы, уплотняемой движителями при их перемещении по полю:

$$T_c = f_3 b q h^2, \text{ кН};$$

Сплошное покрытие 1 га площади поля следами движителей произойдёт после перемещения агрегата на расстояние $\frac{10^4}{b}$ м и на уплотнение почвы будет затрачена энергия:

$$I_B = 10^4 f_3 q h^2, \text{ МДж/га.} \quad (7.26)$$

Значение коэффициента q в выше приведенной формуле вытекает из соотношения [102]:

$$q = \frac{R}{Sh} = \frac{p_0}{h}, \text{ кН/м}^3; \quad (7.27)$$

где R — сила сопротивления почвы смятию при вертикальной деформации движителями на глубину h , кН;

S — площадь, по которой движители воздействуют на почву, м²;

p_0 — давление движителей на почву, кПа.

Подставляя (7.27) в (7.26), после преобразований получили:

$$I_{\text{в}} = 10^4 \frac{f_3 p_0^2}{q}, \text{ МДж/га.} \quad (7.28)$$

В формуле (7.28) заменили p_0 на величину допускаемого давления движителей на почву $[p_0]$, регламентируемого ГОСТ 26955:

$$I_{\text{кв}} = 10^4 \frac{f_3 [p_0]^2}{q}, \text{ МДж/га.}$$

Выражение (7.25) с учётом значений составляющих приняло вид:

$$k = \frac{3_k q}{10^4 f_3 [p_0]^2}, \text{ руб./МДж.} \quad (7.29)$$

Для ЦЧР в среднем сплошное глубокое рыхление почвы обходится 1017 руб./га [43]. Коэффициенты формулы (7.29) имеют значения $f_3 \approx 0,65$ и $q \approx 7500$ кН/м³ [71], [103], [104]. Тогда:

$$k = \frac{1173}{[p_0]^2}, \text{ руб./МДж.}$$

С учётом величины $[p_o]$, приведенной в ГОСТ 26955, норматив k дифференцировали к характерной ЦЧР суглинистой почве в зависимости от её влажности (Вл) и периода выполнения полевых работ [86] (таблица 7.8).

Таблица 7.8 – Норматив удельных на 1 га денежных затрат на ликвидацию последствий техногенной деградации почвы

Влажность почвы в слое 0-30 см	Весенний период		Летне-осенний период	
	$[p_o]$, кПа	k , руб./МДж	$[p_o]$, кПа	k , руб./МДж
Вл>0,9НВ	80	0,183	100	0,117
0,7НВ<Вл≤0,9НВ	100	0,117	120	0,081
0,6НВ<Вл≤0,7НВ	120	0,081	140	0,060
0,5НВ<Вл≤0,6НВ	150	0,052	180	0,036
Вл≤0,5НВ	180	0,036	210	0,027

Механизированные агротехнические приёмы проводят в период физической спелости суглинистой почвы, которая соответствует влажности $0,5НВ<Вл≤0,6НВ$ [105]. Согласно таблице 7.8, норматив денежных затрат имеет значение $k=0,052$ руб./МДж при работе весной и $k=0,036$ руб./МДж – при выполнении работ в летне-осенний период.

Используя массив банка данных для проектирования перспективных агротехнологий и машин (приложения А и Б), проведено сравнение комплексной механизации вариантов адаптивных технологий производства зерновых культур (таблица 7.9).

Таблица 7.9 – Экономико-экологические показатели комплексной механизации адаптивных технологий производства зерновых культур

Культуры	Варианты технологий	Техника стран ТС						Импортная техника					
		Расход моторного топлива, кг/га	Вредная интенсивность механического	Затраты, руб./га			Расход моторного топлива, кг/га	Вредная интенсивность механического	Затраты, руб./га				
				Прямые эксплуатационные	Экологическая составляющая				Прямые эксплуатационные	Экологическая составляющая			
					На защиту окружающей среды от загрязнения выхлопными газами	На ликвидацию последствий техногенной деградации почвы				Всего	На защиту окружающей среды от загрязнения выхлопными газами	На ликвидацию последствий техногенной деградации почвы	Всего
1 Озимые зерновые	1.1	28,4	169	3291	8,5	6,9	15,4	27,2	209	8585	8,2	8,6	16,8
	1.2	33,9	195	3784	10,2	8,2	18,4	28,9	201	8487	8,7	8,2	16,9
	1.3	39,9	239	5017	12,0	9,6	21,6	35,4	285	9807	10,6	11,7	22,3
	1.4	42,0	250	4213	12,6	10,2	22,8	35,8	255	8901	10,7	10,1	20,8
Среднее:		36,1	213	4076	10,8	8,7	19,6	31,8	237	8945	9,6	9,7	19,2
2 Яровые зерновые	2.1	58,1	342	5132	17,4	13,6	31,0	49,9	361	10488	15,0	29,1	29,1
	2.2	56,0	331	5936	16,8	13,0	29,8	49,5	391	11395	14,9	30,6	30,6
Среднее:		57,1	336	5534	17,1	13,3	30,4	49,7	376	10941	15,0	29,9	44,8

В качестве экономического показателя вариантов использовали прямые затраты денежных средств на эксплуатацию комплексов машин. Экологическую составляющую затрат определяли по формуле (7.24).

При выделении контроля в оценке экономико-экологической эффективности комплексной механизации производства зерна озимых культур учитывали, что в обычном безальтернативном варианте технологии отсутствует адаптация к исходному состоянию почвы, т.е. задействованы все функции её обработки. В то же время в адаптивной технологии взаимосвязаны функции обработки по регулированию пищевого режима растений и оптимизации плотности почвы её рыхлением. Сущность взаимосвязи заключается в том, что локальное внутрипочвенное внесение удобрения

невозможно без рыхления почвы, вследствие чего в вариантах 3 и 4 задействованы все функции обработки и в качестве контроля приняты средние значения экономико-экологических показателей по ним.

Учитывая, что разуплотняющее рыхление почвы актуально в зоне рядков культуры, локальным внесением удобрения по варианту 4 совмещено и локальное рыхление этой зоны. Это позволило получить синергетический эффект совмещения агроприёмов, сущность которого состоит в замене сплошного рыхления почвы по варианту 3 менее энергоёмким полосным по варианту 4. Поэтому, несмотря на повышенную сложность варианта 4, некоторые экономико-экологические показатели по нему оказались более предпочтительными в сравнении с вариантом 3.

Экономическая эффективность комплексной механизации адаптивной технологии производства озимой пшеницы возможна за счёт вариантов 1 и 2. С применением их технические ресурсы минимизируются на 831-1324 руб./га для технологии оснащённой техникой стран ТС и на 769-867 руб./га – при оснащении её импортной техникой.

Экологическая привлекательность адаптивных вариантов производства озимой пшеницы заключается в снижении расхода моторного топлива на 6,7-12,6 кг/га и вредной интенсивности механического воздействия на почву 49-75 МДж/га. Следствием этого является экономия затрат на защиту окружающей среды от загрязнения выхлопными газами и на ликвидацию последствий техногенной деградации почвы.

В суммарном исчислении величина экономии составляет 834,8-1330,8 руб./га при комплексной механизации технологии техникой стран ТС и 773,7-871,8 руб./га – при использовании импортной техники.

В целом же затраты на техническое оснащение адаптивной технологии производства озимых зерновых культур возрастают пропорционально сложности исходного состояния почвы. При использовании техники стран ТС в среднем они составляют 4076 руб./га и импортной техники 8945 руб./га, т.е. затраты на комплексную механизацию с использованием импортной техники

выше в 2,2 раза в сравнении с аналогами стран ТС. Обозначенное превышение обусловлено дороговизной импортной техникой и повышенными тарифами на её сервисное обслуживание.

В адаптивных вариантах 2.1 и 2.2 технологии производства зерна ярового ячменя, вследствие использования зяблевой обработки почвы, задействованы все её функции. Эффективность адаптивности данных вариантов проявляется по другим элементам системы земледелия – севообороту, использованию химических средств защиты растений и удобрений. Явной же экономико-экологической эффективности от адаптации техники в производстве зерна ячменя не прослеживается.

Сравнили техническое обеспечение вариантов адаптивных технологий техникой стран ТС и импортной. Установили, что средний расход моторного топлива в производстве озимой пшеницы и ярового ячменя на 11,7-12,8% ниже у вариантов с использованием импортной техники. Очевидные предпосылки данного эффекта состоят в более совершенных конструкциях рабочих органов и экономичных двигателях импортной техники. По интегральному экологическому показателю сопоставляемые комплексы машин примерно одинаковые.

Минимизация технических ресурсов должна базироваться на комплексной оценке экономико-экологической эффективности их использования, учитывающей, не только прямые эксплуатационные затраты, но и затраты на защиту окружающей среды от загрязнения выхлопными газами и на ликвидацию последствий техногенной деградации почвы. Углубленная адаптация к исходному состоянию почвы механизированной технологии производства зерна озимой пшеницы позволит минимизировать технические ресурсы на 773,7-1330,8 руб./га при соблюдении требований экологической безопасности.

8 Автоматизация проектирования механизированных технологий углубленной адаптации

На базе созданного алгоритма (таблицы 3.2 и 3.3) с использованием современной сельскохозяйственной техники (приложения А и Б) разработана компьютерная программа, предназначенная для автоматизации проектирования механизированных технологий производства зерновых культур с оценкой приведенных затрат на их исполнение (свид. о гос. регистрации № 2011611304) [106].

Функционирует программа следующим образом. При запуске её на мониторе компьютера появляется окно с перечнем культур. На начальном этапе работы программы компьютер предлагает обозначить параметры, характеризующие состояние почвы по показателям засорённости, плотности и обеспеченности питательными веществами на программируемую урожайность (рисунок 8.1).

Рисунок 8.1 – Окно для выбора параметров состояние поля

Здесь для каждого фактора следует ориентироваться на одно из двух значений логических переменных – засорённость меньше (равна) или превышает предел вредоносности сорняков, плотность почвы меньше (равна) или превышает 1,3 г/ см³, обеспеченность питательными веществами недостаточная (достаточная) для получения программируемой урожайности культуры.

Затем кнопкой «ОК» подтверждают оценку состояния почвы, после чего на мониторе возникает окно с перечнем приёмов для формирования технологии производства культуры (рисунок 8.2).

Рисунок 8.2 – Приёмы для формирования технологии производства культуры

Последующая процедура проектирования механизированной технологии идентична для других рассматриваемых сельскохозяйственных культур. Каждый очередной приём подтверждают нажатием кнопки «Подтвердите

выбор приёма» и в нижней части окна возникает его название с перечнем операций, необходимых для осуществления.

Затем предлагается выделить очередную операцию и нажать кнопку «Технические средства», вследствие чего монитор представляет окно с названием операции и перечнем возможных технических средств её механизации, как отечественного, так и импортного производства (рисунок 8.3).

Form5

Основная обработка почвы

Перечень технических средств для лущения стерни предшественника

Выберите в таблице марку требуемого технического средства

Названия техсредства	Марка	Ширина захвата, м	Глубина обработки почвы, см	Рабочая скорость км/ч	Производительность га/ч	Масса, кг	Треб. мощность трактора кВт(л.с.)	Страна производитель
Дисковая борона	Б - 7Т	7...7,2	5...6	7...10	7	6200	200(272)	Россия
Дисковая борона	БДТ - 7	7	5...6	До 12	6...7	3600	200(272)	Россия
Дисковая борона	КД - 6	6	5...6	8...15	4,8...9	4780	184(250)	Украина
Дисковая борона	RauDXG	6,3	5...6	До 12	6...7	4915	178(242)	Франция
Дисковая борона	Calros 6001-2	6	5...6	10...15	6...9	3300	130(180)	ФРГ

Подтвердите выбор технического средства марки - КД - 6

OK

Рисунок 8.3 – Перечень средств механизации агротехнического приёма

Каждое техническое средство характеризуется маркой, шириной захвата, рабочей скоростью, производительностью, массой, требуемой мощностью энергетического средства (трактора), страной-производителем.

Пользователь программы из предложенного перечня выбирает наиболее целесообразное техническое средство, исходя из его наличия в хозяйстве. В случае отсутствия такового или его аналога, пользователь озадачивается необходимостью приобретения недостающего компонента. Выбор технического средства (имеющегося в хозяйстве или планируемого к приобретению) следует подтвердить нажатием кнопки «ОК», после чего компьютер предлагает отметить очередную операцию в рамках обрабатываемого приёма.

Аналогично нажатием кнопки «Технические средства» на мониторе появляется окно с названием очередной операции и перечнем технических средств её механизации.

На завершающей стадии компьютер выводит на монитор надпись «Формирование агротехнологии завершено» и предлагает осуществить просмотр результатов проектирования. На мониторе появляется окно под названием «Результат формирования системы машин для комплексной механизации агротехнологии возделывания культуры». В верхней части окна представлена информация в виде перечня исполняемых приёмов, а ниже – таблица с параметрами машин (рисунок 8.4).

Результат формирования системы машин для комплексной механизации агротехнологий при возделывании с.-х.культуры - Озимые зерновые

Заданному состоянию почвы соответствует вариант = 1-2 (2)

Основная обработка почвы | Предпосевная обработка почвы | Посев | Уход за посевами | Уборка урожая

Основная обработка почвы
Перечень применяемых операций

Лущение стерни предшественника
Щелевание посевов

Параметры выбранных технических средств

Названия техсредства	Марка	Ширина захвата, м	Глубина обработки почвы, см	Рабочая скорость км/ч	Производительность га/ч	Масса, кг	Треб. мощность трактора кВт(л.с.)	Страна производитель
Дисковая борона	КД-6	6	5...6	8...15	4,8...9	4780	184(250)	Украина
Щелеватель роторный	ЩР-1	-	До 100	6...9	-	950	121(165)	Россия

Если просмотр завершен, нажмите кнопку Close

Close

Рисунок 8.4 – Окно системы машин для комплексной механизации технологии возделывания культуры

Техническое обеспечение каждого приёма и операции запрашивается нажатием соответствующих кнопок в верхней части таблицы.

Программа предусматривает определение приведенных затрат (Pr) по каждой позиции техники, используя нормативные данные [107]. При этом расчёт затрат осуществляется по формуле, регламентированной ГОСТ 23729-88 [108] (рисунок 8.5).

Form10

Экономическая оценка системы машин для комплексной механизации агротехнологий при возделывании с.-х. культуры – Озимые зерновые
Заданному состоянию почвы соответствует вариант = 1-4 (8)
Редактируйте при необходимости параметры таблицы, подтвердите ввод

С1, руб/ч	Цг, руб/кг	h1, кг/га	h2, кг/га	h3, кг/га	Ц1, руб/кг	Ц2, руб/кг	Ц3, руб/кг	Е
85	20	0	0	0	120	20	300	0.15

OK

Таблица затрат по технологическим операциям

Технологическая операция	Марка машины	Производительность, га/ч	Потребность, шт./1000 га	Цм, тыс.руб	Цт, тыс.руб	N кВт	Na кВт	Nвм кВт	Инт. МВП, МДж/га	Привед. затраты, руб/га
1. Основная обработка почвы										
Лущение стерни предшественника	БДТ - 7	6.5	0.64	610	4600	200	0	0	87.73	543.33
Послойная обработка почвы	АПК - 6	4.9	0.97	290	3900	184	0	0	107.07	576.85
Щелование посевов	ЩР-1	15	0.33	210	3060	121	45	0	23.17	176.37
2. Предпосевная обработка почвы										
Предпосевная обработка совмещена с посевом!	нет!	нет!	нет!	нет!						
3. Посев										
Совмещение с посевом предпосевной культивации и ЛВ!	КО-3,6	2.2	2.67	970	1850	110	60	15	119.59	1925.88
4. Уход за посевами										
Внесение основного удобрения, корневые подкормки	РЧ-06	11.8	0.19	110	630	60	0	20	25.19	187.47 (3)
Некорневые подкормки, применение химических СЗР	ОП-2000М	16	0.09	290	630	60	0	10	25.33	199.96 (3)
5. Уборка урожая										
Скашивание и обмолот зерновых	Acros 540	4.5	1.3	3980	-	194	0	107	37.32	2203.80
Автономное измельчение соломы	ИМС-2,8М	1.9	2.11	210	630	60	0	30	33.20	448.98
Сумма приведенных затрат = 6262.66 руб/га. Суммарная интенсивность МВП = 458.58 МДж/га.										

Печать Close

Рисунок 8.5 – Окно эколого-экономической оценки системы машин

Итоговый шаг программы сопровождается выводением на монитор (при необходимости, и на печать) перечня марок комплекса машин и суммарных приведенных затрат по нему, а также значений производительности, приведенных затрат и потребности (*П*) по каждому агроприёму и средству его механизации индивидуально.

В исходное положение программу выводят нажатием кнопки «*Close*». После этого компьютер готов к проектированию механизированной агротехнологии другой культуры.

Компьютерная программа апробирована на проекте механизированной технологии производства озимой пшеницы, возделываемой по непаровым предшественникам. Выполнены сравнительные проекты с насыщением отечественными и импортными средствами механизации и установлено, что компонента издержек на эксплуатацию и содержание техники в технологиях достаточно высока. Она составляет 6,1 тыс.руб./га по отечественной и 8,5

тыс.руб./га – по импортной технике. Механизация производства культуры отечественной техникой экономически более привлекательна, так как позволяет снизить приведенные затраты в среднем на 37,4%.

Приведенные затраты на техническое обеспечение производства озимой пшеницы оценены в пространстве вариации факторов цены моторного топлива и зарплаты персонала, эксплуатирующего и обслуживающего технику. Установлено, что подорожание топлива на 44% приводит к росту приведенных затрат на 3,3-5,9%. С увеличением в 2 раза ставки оплаты труда приведенные затраты возрастают всего лишь на 1,9-4,3%.

Наличие алгоритма и компьютерной программы позволяет в режиме *on-line* минимизировать приведенные затраты при эксплуатации проектируемой системы машин и за счёт этого на 10-18% снизить издержки производства сельскохозяйственных культур.

9 Государственные испытания адаптивных вариантов технологий производства зерновых культур

Принцип адаптивности применения удобрений (таблица 1.1) напрямую связан с необходимостью оценки истинной потребности выращиваемых культур, как в макро-, так и микроэлементах [14]. Макроэлементы питания вносят в почву по данным почвенной диагностики. Дозы наносимых на семена микроудобрений устанавливают по рекомендациям их производителей. Последующую корректировку и оптимизацию питания растений проводят в процессе инновационной листовой функциональной диагностики, в соответствии с которой питательные смеси для листовых подкормок формируют запатентованным методом, учитывающим синергию взаимодействия между элементами питания (патент 2541310) [57].

Изложенный принцип реализовали в вариантах технологий возделывания ярового ячменя [109]-[113] и озимой пшеницы [114]-[123], которые прошли трёхлетние Государственные испытания на полях ФГБУ «Центрально-Чернозёмная машиноиспытательная станция». Испытания проведены согласно СТО АИСТ 1.3-2007 «Машинные технологии производства продукции растениеводства. Программа и методы испытаний».

Цель испытаний предусматривала сравнительную оценку агротехнической и экономической эффективности инновации на фоне использования микроудобрений отечественного и импортного производства.

9.1 Оптимизация питания ячменя

Условия испытаний на ячмене представлены в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Условия испытаний*

Показатель	Годы испытаний		
	2012 г.	2013 г.	2014 г.
Сорт ячменя	Ксанаду	Ксанаду	Гонар
Предшественник в севообороте	Озимая пшеница	Горох	Горох

Содержание гумуса, %	4,8	4,8	5,0
Содержание основных элементов питания в почве, мг/100 г:			
азот	14,1	17,1	17,0
фосфор	13,3	8,6	6,0
калий	12,1	14,2	9,3
Кислотность почвы, pH	4,7	4,9	5,0
Твёрдость (МПа) / влажность (%) при посеве в слоях, см:			
0-5	0,5/13,5	0,6/7,7	1,0/21,3
5-10	0,7/16,2	0,8/11,6	1,1/22,5
10-15	1,0/17,6	0,9/11,9	1,3/23,5
Запас продуктивной влаги в метровом горизонте в момент посева, мм	158	155	201
Средняя глубина предпосевной культивации, см	6,4	6,4	5,1
Сумма осадков за вегетационный период, мм	315	230	196
Средняя температура воздуха за вегетационный период, °С	+19,4	+17,6	+15,5
Дата внесения диаммофоски (200 кг/га)	24-26 апреля	27 апреля	16 апреля
Дата посева	24 апреля	27 апреля	16 апреля
Масса 1000 семян, г	52,2	45,3	44,6
Всхожесть семян, %:			
новый вариант	93,3	92,8	92,7
базовый вариант	90,6	90,3	91,0
Норма высева семян, кг/га	186	200	195
Глубина заделки семян, см	5,6	6,1	4,4
Коэффициент вариации глубины заделки семян, %	14,8	15,9	25,3

*Почва в 2012 и 2014 г. – чернозем выщелоченный среднесуглинистый, в 2013 г. – чернозем слабовыщелоченный среднесуглинистый.

В испытаниях на ячмене использовали отечественные микроудобрения Аквамикс СТ и Акварин 15 (таблицы 4.2 и 4.4), а также импортный биостимулятор роста Базик итальянского производства. Он содержит по 4,5% общего и органического азота, 26,5% биогенного углерода, 28,8% аминокислот.

Схема опыта включала в себя 6 вариантов в шестикратной повторности (таблицы 9.2 и 9.3).

Таблица 9.2 – Агротехническая эффективность оптимизации питания ячменя

Вариант	Обработка семян	Листовая подкормка 2 раза	Полевая всхожесть семян, %				Урожайность зерна, т/га				Натура зерна, г/л				Масса 1000 зёрен, г			
			2012 г.	2013 г.	2014 г.	ср./неё	2012 г.	2013 г.	2014 г.	ср./неё	2012 г.	2013 г.	2014 г.	ср./неё	2012 г.	2013 г.	2014 г.	ср./неё
1 (контроль)	нет	нет	90,6	90,3	91,0	90,6	2,76	2,36	4,09	3,07	647	632	630	636	44,7	45,3	44,3	44,8
2	Акварикс СТ (100 г/т)	Акварин 15 (2 кг/га)	92,0	92,8	92,7	92,5	3,16	2,69	4,52	3,46	658	636	633	642	44,9	46,8	45,1	45,6
3	Акварикс СТ (100 г/т)	Базик (2 л/га)	92,0	92,8	92,7	92,5	3,12	2,65	4,5	3,42	660	635	633	643	44,9	46,7	44,9	45,5
4	Акварикс СТ (100 г/т)	Акварин 15 (1 кг/га) + Базик (1 л/га)	92,0	92,8	92,7	92,5	3,18	2,74	4,94	3,62	650	637	636	641	44,9	46,9	46,0	45,9
5	Акварикс СТ (100 г/т)	По данным функциональной листовой диагностики индивидуальным испытанием элементов питания	92,0	92,8	92,7	92,5	3,42	2,81	4,91	3,71	655	638	636	643	45,1	47,8	45,8	46,2
6	Акварикс СТ (100 г/т)	По данным функциональной листовой диагностики испытанием питательных смесей	92,0	92,8	92,7	92,5	3,34	2,87	5,0	3,74	656	638	638	644	45,0	47,8	46,0	46,3
НСР ₀₅			0,30				0,14				3,55				0,57			

Таблица 9.3 – Экономическая эффективность оптимизации питания ячменя

Вариант	Обработка семян	Листовая подкормка 2 раза	Себестоимость зерна, руб./т				Производительность труда механизатора, тыс. руб./чел.				Производственные затраты, руб./т				Годовая экономия совокупных затрат денежных средств, руб./га			
			2012 г.	2013 г.	2014 г.	среднее	2012 г.	2013 г.	2014 г.	среднее	2012 г.	2013 г.	2014 г.	среднее	2012 г.	2013 г.	2014 г.	среднее
1 (контроль)	нет	нет	4800	6207	3558	4855	902	716	954	857	2794	4003	2266	3021	–	–	–	
2	Аквамикс СТ (100 г/т)	Акварин 15	4450	5766	3313	4510	1621	816	1055	1164	2615	3745	2144	2835	1106	1186	1107	1133
3	Аквамикс СТ (100 г/т)	Базик	5149	6607	3624	5127	1019	804	1050	958	3293	4554	2450	3432	– 1090	– 1060	–298	–816
4	Аквамикс СТ (100 г/т)	Акварин 15 + Базик	4741	6041	3180	4654	1039	830	1153	1007	2921	4052	2110	3028	0190	457	1974	874
5	Аквамикс СТ (100 г/т)	По данным функциональной листовой диагностики индивидуальным испытанием элементов питания	4127	6089	3031	4416	1117	852	1146	1038	2435	4154	1938	2842	2303	334	2854	1830
6	Аквамикс СТ (100 г/т)	По данным функциональной листовой диагностики испытанием питательных смесей	4084	5416	2948	4149	1091	869	1167	1042	2351	3517	1891	2586	2395	2269	3050	2571

Семена ячменя перед посевом обрабатывали микроудобрением Аквамикс СТ, совмещая приём с протравливанием. Препараты Акварин 15 и Базик использовали на листовых подкормках путём опрыскивания посевов дважды – в фазах кущения растений ячменя и выхода в трубку. Препараты для листовых подкормок применяли в баковой смеси с химическими средствами защиты растений. В сравниваемых вариантах ориентировались на одинаковые сопутствующие фоновые пестициды. Площадь делянок составляла 0,35 га. Приёмы возделывания культуры в вариантах опыта соответствовали зональной агротехнологии.

Вариант 1 опыта контрольный, в нём микроудобрений и биостимуляторов роста не применяли. Во всех остальных вариантах семена ячменя обрабатывали Аквамиксом СТ с неизменной дозой. В варианте 2 проводили опрыскивание вегетирующих растений раствором Акварина 15, в варианте 3 – биостимулятором роста Базик, в варианте 4 – их смесью. Дозы препаратов в вариантах 2, 3 и 4 устанавливали согласно рекомендациям производителя без диагностики потребности растений в питательных веществах.

В вариантах 5 и 6 составы баковых смесей для листовых подкормок ячменя формировали по данным листовой функциональной диагностики, приняв номенклатуру диагностируемых элементов питания эквивалентной Акварину 15. Диагностические процедуры выполняли с помощью прибора Аквадонис.

Различия данных вариантов заключаются в следующем. Баковую смесь для варианта 5 готовили по отзывчивости растений на индивидуальное испытание каждого из элементов питания [54]. В варианте 6 – по инновационному методу испытаниями питательных смесей [57].

Оценку результатов испытаний проводили по показателям агротехнической и экономической эффективности (таблицы 9.2 и 9.3). Согласно ГОСТ Р 53056-2008 интегральным показателем экономической эффективности является годовая экономия совокупных затрат денежных

средств. При её определении принята сложившаяся осенью 2014 года цена на зерно ячменя величиной 5000 руб./т.

Анализ полученных данных показал следующее.

В целом, с применением микроудобрений и биостимуляторов роста на ячмене по вариантам опыта получена прибавка урожайности зерна до 22%, годовая экономия совокупных затрат достигла 2571 руб./га. Позитивное влияние препаратов сказалось и на качестве зерна. Возросли: натура зерна с 636 до 644 г/л, масса 1000 зёрен – с 44,8 до 46,3 г. Предпосевная обработка семян микроудобрениями позволила на 1,9% повысить их полевую всхожесть.

В частности в варианте 2 опыта прибавка урожайности зерна составила 12,7%, а годовая экономия совокупных затрат – 1133 руб./га (рисунок 9.1).

Рисунок 9.1 – Агротехническая и экономическая эффективность оптимизации питания ячменя

Применение на листовых подкормках импортного препарата Базик (вариант 3) оказалась убыточным вследствие высокой его цены. Совместное применение Базика с Акварином 15 обеспечило прибавку урожайности зерна

на уровне 17,9% при годовой экономии совокупных затрат 874 руб./га (вариант 4).

Дальнейшему росту эффективности производства ячменя способствовали листовые подкормки, выполненные с учетом данных листовой функциональной диагностики.

В варианте 5 вследствие только модификации состава листового микроудобрения прибавка урожайности зерна ячменя возросла с 12,7 до 21%.

Модификация состава микроудобрения с учетом взаимодействия между элементами питания (вариант 6) позволила в сравнении с вариантом 5 прибавку урожайности увеличить незначительно – до 22,0%. Но при этом произошёл резкий скачок годовой экономии совокупных затрат. Она оказалась на 40% выше, достигнув 2571 руб./га. Обусловлено это меньшими на 40% затратами на микроудобрения. Немаловажно и то, что вариант 6, в сравнении с другими в опыте, характеризовался минимальной себестоимостью произведенной продукции и максимальной производительностью труда механизатора (таблица 9.3).

9.2 Оптимизация питания озимой пшеницы

Испытания проводили в полевом опыте, где применяли микроудобрения Аквамикс СТ и Акварин 15, а также их комбинации с биостимулятором роста Базик итальянского производства и отечественным микроудобрением Лигногумат, содержащим, %: соли гуминовых веществ – 90; K – 10; Na – 2; S – 5; Mg – 0,1; Fe – 0,2; Cu – 0,04; Mn – 0,02; Mo – 0,01; Zn – 0,1; B – 0,1; Co – 0,1.

Опыт реализовали в шестикратной повторности на чернозёме выщелоченном среднесуглинистом. Предшественником озимой пшеницы был чистый пар (таблица 9.4).

Таблица 9.4 – Условия испытаний

Показатель	Годы испытаний		
	2013	2014	2015
Сорт озимой пшеницы	Скипетр	Скипетр	Льговская 8
Содержание гумуса в почве, %	4,7	5,1	5,1
Содержание основных элементов питания в почве, мг/100 г:			
азот	13,9	18,3	17,6
фосфор	13,1	6,7	6,4
калий	11,8	12,1	16,2
Кислотность почвы, pH	4,9	4,9	4,9
Твёрдость (МПа) / влажность (%) почвы при посеве в слоях, см:			
0-5	0,6/15,2	0,9/21,4	0,8/16,7
5-10	0,7/13,6	1,1/22,8	0,9/18,3
10-15	0,7/14,6	1,2/25,2	1,23/25,7
Запас продуктивной влаги в метровом горизонте в момент посева, мм	169	145	Нет данных
Средняя глубина предпосевной культивации, см	6,8	7,7	7,8
Сумма осадков за вегетационный период, мм	296	555	452
Средняя температура воздуха за вегетационный период, °С	12,9	11,4	6,4
Дата внесения диаммофоски 200 кг/га	10.09.2012 г.	13.09.2013 г.	29.09.2014 г.
Доза (кг/га) / дата подкормки аммиачной селитрой	130/Нет данных	130/12.04.2014 г.	150/25.03.2015 г.
Дата посева	11.09.2012 г.	19.09.2013 г.	29.09.2014 г.
Масса 1000 семян, г	42,7	42,7	46,8
Всхожесть семян, %	95	95	94
Норма высева семян, кг/га	179	220	200
Глубина заделки семян, см	4,9	5,1	5,1
Коэффициент вариации глубины заделки семян, %	14,5	18,9	12,3

Семена озимой пшеницы обрабатывали микроудобрением одновременно с протравливанием. Листовые подкормки проводили путем опрыскивания посевов баковой смесью микроудобрений и биостимулятора роста с химическими средствами защиты растений. Выполняли приём дважды – в фазах кущения культуры и выхода в трубку. Остальные агротехнические приёмы по ведению опыта соответствовали зональной агротехнологии.

Схема опыта (таблицы 9.5 и 9.6) включала в себя 12 вариантов, разбитых на два блока: первый блок – исследование различных схем обработки семян

микроудобрениями (варианты 2-6), второй блок – совместное использование микроудобрений и биостимулятора роста на обработке семян и листовых подкормках (варианты 7-12).

Таблица 9.5 – Агротехническая эффективность оптимизации питания озимой пшеницы

Вариант	Обработка семян	Листовая подкормка 2 раза	Полевая всхожесть семян, %				Урожайность зерна, т/га				Содержание клейковины в зерне, %				Натура зерна, г/л				Масса 1000 зёрен, г			
			2013г.	2014г.	2015г.	Среднее	2013г.	2014г.	2015г.	Среднее	2013г.	2014г.	2015г.	Среднее	2013г.	2014г.	2015г.	Среднее	2013г.	2014г.	2015г.	Среднее
1 (контроль)	Нет	Нет	91,6	90,2	90,7	90,8	3,99	5,18	3,03	4,07	25,4	22,8	26,6	24,9	736	746	730	737	42,8	44,7	37,8	41,8
2	Лигногумат (100 г/т)	Нет	93,7	91,3	91,3	92,1	4,16	5,43	3,2	4,26	27,2	32,2	27,4	28,9	746	748	733	742	43,0	45,1	38,0	42,0
3	Аквамикс СТ (100 г/т)	Нет	94,2	91,3	91,5	92,3	4,25	5,47	3,18	4,3	26,5	31,1	27,3	28,3	748	750	735	744	43,2	45,3	38,6	42,4
4	Базик (200 мл/т)	Нет	94,4	91,3	91,3	92,3	4,26	5,55	3,24	4,35	27,5	28,2	27,8	27,8	743	768	739	750	43,2	47,8	40,6	43,9
5	Лигногумат (100 г/т) + Базик (200 мл/т)	Нет	94,0	91,3	91,3	92,2	4,16	5,57	3,27	4,33	27,0	31,6	27,2	28,6	748	753	737	746	44,0	46,0	38,9	43,0
6	Аквамикс СТ (100 г/т) + Базик (200 мл/т)	Нет	93,3	91,3	91,6	92,1	4,25	5,63	3,26	4,38	27,3	30,3	27,5	28,4	742	758	737	746	43,2	46,5	38,9	42,9
7	Лигногумат (100 г/т)	Лигногумат (50 г/га)	–	91,3	91,3	91,3	–	5,66	3,34	4,5	–	34,2	27,6	30,9	–	760	740	750	–	46,8	39,5	43,2
8	Аквамикс СТ (100 г/т)	Акварин 15 (2 кг/га)	94,2	91,3	91,3	92,3	4,49	5,87	3,37	4,58	27,3	32,3	27,7	29,1	750	765	742	752	43,7	47,3	39,8	43,6
9	Аквамикс СТ (100 г/т)	Базик (2 л/га)	94,2	91,3	91,3	92,3	4,53	5,98	3,38	4,63	28,3	28,2	28,2	28,2	750	768	742	753	43,3	47,8	39,8	43,6

10	Аквариум СТ (100 г/т)	Акварин 15 (1 кг/га) + Базик (1 л/га)	94,2	91,3	91,3	92,3	4,55	6,02	3,4	4,66	31,6	29,2	27,9	29,6	745	770	743	753	43,9	48,3	40,0	44,1
11	Аквариум СТ (100 г/т)	По данным функциональной лиственной диагностики индивидуальным испытанием элементов питания	94,2	91,3	91,3	92,3	4,54	6,07	3,47	4,69	29,0	30,0	28,3	29,1	748	772	745	755	43,2	48,5	40,3	44,0
12	Аквариум СТ (100 г/т)	По данным функциональной лиственной диагностики испытанием питательных смесей	94,2	91,3	91,3	92,3	4,64	6,11	3,51	4,75	27,6	31,3	28,0	29,0	753	775	746	758	44,4	48,8	40,4	44,5
НСР ₀₅			0,41			0,15			2,9			7,7			1,1							

Таблица 9.6 – Экономическая эффективность оптимизации питания озимой пшеницы

Вариант	Обработка семян	Листовая подкормка 2 раза	Себестоимость зерна, руб./г				Производительность труда механизатора, тыс. руб./чел.				Производственные затраты, руб./г				Годовая экономия совокупных затрат денежных средств, руб./га			
			2013г.	2014г.	2015г.	Среднее	2013г.	2014г.	2015г.	Среднее	2013г.	2014г.	2015г.	Среднее	2013г.	2014г.	2015г.	Среднее
		Нет	4083	3282	6653	4673	1298	1740	1357	1465	2464	1999	4205	2889	–	–	–	–
2	Лигноумат (100 г/г)	Нет	3930	3132	6302	4455	1352	1824	1434	1537	2375	1908	3984	2756	641	492	1123	752
3	Аквамикс СТ (100 г/г)	Нет	3841	3285	6659	4595	1380	1740	1357	1492	2319	2002	4210	2843	617	–2	–17	200
4	Базик (200 мл/г)	Нет	3834	3067	6659	4520	1383	1865	1357	1535	2314	1870	4210	2798	1060	721	–17	588
5	Лигноумат (100 г/г) + Базик (200 мл/г)	Нет	3921	3056	6173	4383	1352	1871	1465	1563	2367	1863	3903	2711	675	748	1572	998
6	Аквамикс СТ (100 г/г) + Базик (200 мл/г)	Нет	3848	3026	6194	4356	1379	1892	1460	1577	2546	2015	4272	2944	998	1441	1497	1312
7	Лигноумат (100 г/г)	Лигноумат (50 г/га)	–	3012	6014	4513	–	1902	1505	1704	–	1836	3806	2821	–	922	2147	1535
8	Аквамикс СТ (100 г/г)	Акварин 15 (2 кг/га)	3709	2957	6123	4263	1459	1972	1510	1647	2269	1825	3922	2672	1681	1675	1786	1714
9	Аквамикс СТ (100 г/г)	Базик (2 л/га)	3975	3126	6467	4523	1471	2009	1514	1665	2324	1845	3918	2696	489	774	630	631
10	Аквамикс СТ (100 г/г)	Акварин 15 (1 кг/га) + Базик (1 л/га)	3806	2994	6232	4344	1480	2023	1523	1675	2386	1890	4050	2775	1264	1734	1431	1476

11	Аквамикс СТ (100 г/г)	По данным функциональной лиственной диагностики индивидуальным испытанием элементов питания	3723	2837	6004	4188	1474	2040	1554	1689	2296	1742	3066	2368	1633	2701	2252	2195
12	Аквамикс СТ (100 г/г)	По данным функциональной лиственной диагностики испытанием питательных смесей	3575	2809	5818	4067	1507	2053	1573	1711	2180	1721	3704	2535	2356	2890	2931	2726

Вариант 1 контрольный, в нём микроудобрения и биостимулятор роста не применяли.

Семена перед посевом обрабатывали: в варианте 2 – Лигногуматом, в варианте 3 – Аквамиксом СТ, в варианте 4 – Базиком, в варианте 5 – смесью Лигногумат+Базик и в варианте 6 – смесью Аквамикс СТ+Базик. Дозировки препаратов устанавливали по рекомендациям производителя.

В вариантах 7-12, наряду с обработкой микроудобрениями семян, использовали различные сочетания листовых подкормок озимой пшеницы. В варианте 7 обработку семян и листовую подкормку проводили удобрением Лигногумат. В вариантах 8-12 семена обрабатывали удобрением Аквамикс СТ. Листовые подкормки в вариантах 8-10 проводили, соответственно, Акварином 15, Базиком и смесью Акварин 15+Базик. В вариантах 11 и 12 составы баковых смесей для листовых подкормок формировали по данным прибора Аквадонис, исходя из номенклатуры диагностируемых элементов питания эквивалентных Акварину 15.

Дозировки микроудобрений устанавливали: в варианте 11 – при индивидуальном испытании каждого элемента питания [54], в варианте 12 – по инновационной методике, учитывающей взаимодействие между питательными веществами [57].

Результаты опыта оценивали по агротехническим и экономическим показателям. При определении годовой экономии совокупных затрат учитывали, что вариабельность содержания в зерне клейковины и сопутствующих показателей укладывается в диапазон, объединённый ГОСТ Р 52554-2006 третьим классом. Отчего всё зерно в опыте отнесли к этому классу.

Анализ полученных данных показал следующее.

В целом в опыте с озимой пшеницей применение микроудобрений позволило получить прибавку урожайности зерна до 16,7% и годовую экономию совокупных затрат величиной до 2726 руб./га. Содержание клейковины в зерне возросло на 2,9-6,0%. Улучшились и другие показатели

качества зерна: возросли натура с 737 до 742-758 г/л, масса 1000 зёрен – с 41,8 до 42,0-44,5 г., полевая всхожесть семян повысилась на 1,3-1,5%.

В частности, по блоку обработки микроудобрениями семян урожайность зерна в среднем повысилась на 6,2%, содержанию клейковины в зерне увеличилось с 24,9 до 28,4%. Средняя годовая экономия совокупных затрат от использования приёма составила 770 руб./га (таблица 9.7).

Таблица 9.7 – Эффективность микроудобрений на обработке семян и листовых подкормках озимой пшеницы

Блок вариантов	Средняя урожайность зерна, т/га	Клейковина, %	Средняя годовая экономия совокупных затрат, руб./га
Контроль	4,07	24,9	–
Обработка семян	4,32	28,4	770
Обработка семян + листовая подкормка	4,64	29,3	1713

Лучшим в этом блоке оказался вариант 6 (обработка семян Аквамикс+Базик) с годовой экономией совокупных затрат 1312 руб./га и прибавкой урожайности 7,6% при содержании клейковины в зерне 28,4%.

Оцениваемые показатели существенно улучшились с дополнением обработки семян листовыми подкормками микроудобрениями. В среднем прибавка урожайности к контролю составила 14,0%, клейковина зерна возросла до 29,3%, а годовая экономия совокупных затрат увеличилась в 2,2 раза – до 1713 руб./га.

Наиболее высокие показатели агротехнической и экономической эффективности наблюдали в вариантах 11 и 12, в которых семена обрабатывали микроудобрением Аквамикс СТ, а листовые подкормки проводили по результатам функциональной диагностики.

Вариант 12 превзошёл вариант 11 по годовой экономии совокупных затрат на 24,2%. Прибавка урожайности зерна по отношению к контролю составила 15,2% по варианту 11 и 16,7% – по варианту 12 (рисунок 9.2).

Рисунок 9.2 – Агротехническая и экономическая эффективность оптимизации питания озимой пшеницы

Привлекательные и другие экономические показатели варианта 12 – минимальная себестоимость зерна и максимальная производительность труда механизатора в опыте. Показатели качества зерна по данным вариантам примерно одинаковые. Содержание клейковины 29,0-29,1%, натура 755-758 г/л, масса 1000 зёрен 44,0-44,5 г.

Годовую экономию совокупных затрат при использовании микроудобрений на ячмене и озимой пшенице в соответствии с рекомендациями производителя примем за 100%. Из рисунка 9.3 видно, что инновационная методика диагностики позволила увеличить в 1,6-2,3 раза эффективность микроудобрений при той же номенклатуре.

Рисунок 9.3 – Экономическая эффективность методов функциональной диагностики

Таким образом, в результате испытаний подтверждена высокая экономико-экологическая эффективность принципа углубленной адаптации системы удобрения. Помимо снижения расхода микроудобрений и затрат на них, попутно получен экологический эффект в виде щадящего химического воздействия на окружающую среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объёмный перечень нарастающих проблем экономического и экологического характера свидетельствует о необходимости перехода на новый уровень минимизации использования ресурсов и повышения экологической безопасности в производстве продовольственного зерна для обеспечения его конкурентоспособности на мировом рынке и защиты окружающей среды. В данном направлении положительно зарекомендовали себя технологии производства зерновых культур адаптированные к группам земель в пределах агроэкологической провинции.

С развитием цифровых технологий наметились перспективы дальнейшей более углубленной адаптации земледельческой отрасли. Появилась возможность оперативно принимать решения по управлению продукционным процессом сельскохозяйственных культур с учётом обширной информации о вариабельности среды обитания растений внутри агроэкологической провинции. Поэтому в качестве методологической основы совершенствования систем земледелия принята углубленная адаптация агротехнологий к условиям произрастания, сужающаяся от объёмной агроэкологической провинции до конкретного поля внутри неё.

Понятие углубленной адаптации агротехнологий интегральное. Составляющими элементами её являются обработка почвы, севооборот, удобрения, а также средства защиты растений и механизации.

Обработка почвы – определяющий приём в реализации адаптивных подходов, так как она многофункциональная и её влияние, как начального приёма агротехнологий, распространяется на их содержание в целом. Интенсивность адаптивной обработки зависит от исходного состояния почвы, в зависимости от которого её целесообразно минимизировать в допустимых пределах и, тем самым, предотвратить затратное технологически не обусловленное расходование ресурсов, в то же время, создавая предпосылки для снижения экологической нагрузки на окружающую среду.

Содержание углубленной адаптации других элементов агротехнологий определяется следующими принципами:

- Проектирование севооборотов должно осуществляться в неразрывной связи с системой защиты сельскохозяйственных культур от сорняков, что позволит нейтрализовать возможные противоречия между плодосменом и применяемыми гербицидами, имеющими негативное продолжительное последствие.
- Удобрения должны использоваться в соответствии с диагностикой потребности растений не только в макро-, но и в микроэлементах питания, применением эффективного инновационного метода листовой функциональной диагностики. Это позволяет впервые получать объективные диагностические данные с учётом взаимодействия между питательными веществами в растениях.
- Мероприятия по защите растений следует проводить с опорой на зональные модели фитосанитарного состояния посевов по данным обследования на заражённость вредными организмами.
- Механизацию технологических процессов ориентировать на минимизацию затрат энергии, агротехнические совместимые приёмы выполнять комбинированными машинами за один проход.

Для комплексной оптимизации ресурсного обеспечения агротехнологий адаптирован математический способ неопределённых множителей Лагранжа, который позволяет определять стационарные точки функции параметра оптимизации, когда между факторами имеется взаимодействие, характерное для решения земледельческих задач.

Уровень техногенной деградации почвы, как следствие применения современной тяжёлой энергонасыщенной техники, объективно оценивать новым критерием вредной интенсивности механического воздействия на почву, сопутствующей выполнению полевых работ. Критерий в широком формате охватывает понятие техногенной деградации, обусловленное как

переуплотнением почвы, так и истиранием её структуры пробуксовывающими движителями. Новый критерий актуален, прежде всего, для оперативной оценки экологических последствий комплексной механизации агротехнологий, важной при планировании щадящей системы машин. Для предотвращения экологических проблем составы технических средств при проектировании комплексной механизации следует оптимизировать с учётом нормирования механической нагрузки на почву.

Экономико-экологическую эффективность сельскохозяйственной техники целесообразно оценивать с учётом затрат на приведение подверженной техногенной деградации почвы в исходное состояние после выполнения механизированных агроприёмов. Для этого обоснован норматив издержек, который характеризует удельные денежные затраты на ликвидацию последствий техногенного воздействия на почву. К тому же наличие норматива позволяет целенаправленно формировать денежный фонд на мероприятия по защите почв от техногенной деградации.

Технологии возделывания зерновых культур углубленной адаптации не могут быть исполнены с должными показателями эффективности применением лишь освоенных производством отечественных технических средств. Поэтому в дополнение к существующим машинам предложено использовать инновационные конструкции техники с элементами защиты почвы от эрозии и минимизации механического воздействия на неё. В основу их разработки положен принцип рациональной экономии, согласно которому технические средства создаются для механизации агротехнических целесообразных приёмов в конкретных условиях.

При формировании комплексов машин целесообразно использовать актуализированный регистр. В нём средства механизации дифференцированы по вариантам агротехнологий сформированным с учётом исходного состояния почвы, что ориентирует потребителя на экономически и экологически обоснованный выбор при приобретении техники, максимально отвечающей задачам инновационного развития.

Для автоматизированного проектирования механизированных агротехнологий разработан алгоритм и зарегистрирована компьютерная программы, способствующая минимизации приведенных затрат и снижению издержек производства сельскохозяйственных культур.

Целесообразность углубленной адаптации системы удобрения подтверждена Государственными испытаниями. Эффективность микроудобрений при неизменной номенклатуре возросла в 1,6-2,3 раза, что помимо сокращения расхода и затрат на них, попутно обеспечило и экологический эффект в виде щадящего химического воздействия на окружающую среду.

Литература

1. Алтухов А.И. Факторы эффективного функционирования зернового хозяйства и рынка зерна в России // Экономика сельского хозяйства России. – 2013. – № 6. – С. 016-029.
2. Звягина Н.Н., Ядрицева Т.С. Применение точных технологий в зерновом производстве и их влияние на эффективность производства и экологическую безопасность // Вестник Мичуринского ГАУ. – Мичуринск: Мичуринский ГАУ, 2016. – № 3. – С. 149-1534.
3. Bindraban P.S, van der Velde M., Ye L., et al., 2012. Assessing the impact of soil degradation on food production. Curr Opin Environ Sust 4:478–488.
4. Зерновые культуры (Выращивание, уборка, доработка и использование) / под общ. ред. Д. Шпаара. – М.: DLV АГРОДЕЛО, 2008. – 656 с.
5. Гуреев И.И. Принципы углубленной адаптации технологий возделывания сельскохозяйственных культур к исходному состоянию почвы // Вестник Курской гос. с.-х. академии. – 2019. – № 9. – С. 6-13.
6. Дудкин В.М. Интенсивные свекловичные севообороты в Центрально-Чернозёмной зоне. – М.: Агропромиздат, 1990. – 111 с.
7. Лошаков В.Г. Эффективность раздельного и совместного использования севооборота и удобрений // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – № 1. – Т. 30. – С. 9-13.
8. Теоретические основы эффективного применения современных ресурсосберегающих технологий возделывания зерновых культур / И.Г. Пыхтин [и др.] // Земледелие. – 2016. – № 6. – С. 16-19.
9. Спиридонов Ю.Я., Ларина Г.Е., Шестаков В.Г. Методическое руководство по изучению гербицидов, применяемых в растениеводстве. – М.: Печатный Город, 2009. – 252 с.
10. Толковый словарь (сборник электронных словарей). – URL: <http://slovo.ru/index.php?ID=57709&a=&pg=40&s=%D1> (дата обращения 25.08.2019).

11. Шуховцов О.Н. Некоторые итоги применения гербицидов группы сульфонилмочевин в Алтайском крае // Повышение устойчивости производства высококачественной сельскохозяйственной продукции на основе использования средств защиты растений и агрохимикатов: материалы науч.-практ. конф. – Барнаул: ИванЪ, 2003. – С. 55-59
12. «Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов», разрешённых к применению на территории Российской Федерации. Ч. 1. Пестициды. – М., 2020. – 853 с.
13. Гуреев И.И. Актуальное определение севооборотов // Сахарная свёкла. – 2017. – № 1. – С. 22-24.
14. Кирюшин В.И. Проблемы минимизации обработки почвы: перспективы развития и задачи исследований // Земледелие. – 2013. – № 7. – С. 3-6.
15. Романенко А.А., Васюков П.П., Кильдюшкин В.М. Эффективность различных систем основной обработки почвы под сельскохозяйственные культуры в зернопропашном севообороте // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 8. – С. 34-36.
16. Методика формирования системы машин для комплексной механизации агротехнологий. – Курск: ГНУ ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2008. – 23 с.
17. Дедов А.В. Земледелие Центрально-Черноземной зоны с основами почвоведения и агрохимии. – Воронеж: ВГАУ, 2008. – 358 с
18. Ресурсосберегающие технологии возделывания сельскохозяйственных культур (Практическое руководство). – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2001. – 96 с.
19. Кислов А.В., Бакиров Ф.Г., Федюкин С.А. Ресурсосберегающие технологии обработки почвы // Земледелие. – 2004. – № 4. – С. 24-25.
20. Слесарев В.Н., Абрамов Н.В. Значение оптимальной и равновесной плотности почвы в теории механической обработки почвы // Земледелие. – 1996. – № 1. – С. 10-11.

21. Брунотте Й., Клаус З., Гаттерманн Б. Архитектура современного растениеводства. – Amazonen-Werke, 2006. – 87 с.
22. Тугуз Р.К. Научное обоснование систем и способов обработки слитого чернозёма в различных звеньях севооборотов в Республике Адыгея. – Майкоп, 2011. – 272 с.
23. Черемисинов А.Ю., Черемисинов А.А., Краснов В.Д. Определение потребности в гидромелиорации на основе оценки атмосферного увлажнения // Вестник ВГУ, серия: География. Геоэкология. – 2012. – № 2. – С. 70-75
24. Черкасов Г.Н. Приемы повышения урожайности зерновых культур в засушливых условиях // Научно-агрономический журнал. – 2011. – № 2. – С. 5-7
25. Bindraban P.S., Dimkpa C., Nagarajan L. et al. Revisiting fertilizers and fertilization strategies for improved nutrient uptake by plants // Biology and Fertility of Soils. – 2015. – V. 51. – No 8. – Pp. 897-911.
26. Хорошкин А.Б. Способы повышения эффективности минерального питания сельскохозяйственных культур. – Ростов-на-Дону, 2011. – 67 с.
27. Беляев Н.Н., Дубинкина Е.А. Продуктивность сортов озимой пшеницы в зависимости от применения микроудобрения Аквадон-Микро // Земледелие. – 2013. – № 6. – С. 45-47.
28. Цыганков В.И. Влияние удобрения Акварин 5 на урожайность и качество озимой пшеницы // Земледелие. – 2007. – № 6. – С. 21.
29. Лазарев В.И., Золотарева И.А., Шершнева О.М. Способы применения микробиологических препаратов Гуапсин и Трихофит на озимой пшенице // Земледелие. – 2014. – № 2. – С. 23-24.
30. Захаренко В.А. Фитосанитарный мониторинг агроэкосистем и его научно-методическое обеспечение в России. Сб. Методическое обеспечение мониторинга земель сельскохозяйственного назначения. – М.: Почв. Ин-т им В.В. Докучаева, 2010. – С. 124-138.

31. Гуреев И.И. Современные технологии возделывания и уборки сахарной свёклы. Практическое руководство. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Печатный Город, 2011. – 256 с.
32. Немченко В.В., Филиппов А.С. Эффективность совместного использования гербицидов и Гумимакса на яровой пшенице // Защита и карантин растений. – 2016. – № 3. – С. 19-20.
33. Системы земледелия / А.Ф. Сафонов, А.М. Гатаулин, В.Г. Лошаков и др.; под ред. А.Ф. Сафонова. – М.: КолосС, 2006. – 448 с.
34. Исходные требования на создание комплекса машин для адаптивно-ландшафтного земледелия / под ред. И.И. Гуреева. – М.: Россельхозакадемия, 2005. – 76 с.
35. Патрик О.Н. До свидания, маркер! / О.Н. Патрик. – Новое сельское хозяйство. – 2006. – № 3. – С.82-86.
36. Сафонов А.Ф., Гатаулин А.М., Лошаков В.Г. и др. Системы земледелия / под. ред. Сафонова А.Ф. – М.: КолосС. – 2006. – 448 с.
37. Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум): Учеб. пособие / В.П. Бородюк, А.П. Вошинин, А.З. Иванов и др. М.: Высшая школа, 1983. – 216 с.
38. Лихацевич А.П. Анализ результатов агрономических опытов с использованием обобщённой математической модели // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2017. – № 2. – С. 68-81.
39. Ганичев А.В., Ганичева А.В. Математическое программирование: учеб. пособие. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2017. – 88 с.
40. Гуреев И.И. Результаты испытаний комбинированного орудия для посева зерновых культур // Инновационно-технологические основы развития земледелия: Сб. докладов Всерос. науч.-практ. конф. – Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2006. – С. 98-102.
41. Гуреев И.И. Перспективная машина для фрезерной обработки почвы // Адаптивно-ландшафтные системы земледелия – основа оптимизации

агроландшафтов: Сб. докл. Всерос. науч.-практ. конф. – Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2016. – С.84-88.

42. Система. Симметрия. Гармония / Под ред. В.С. Тюхтина, Ю.А. Урманцева. – М.: Мысль, 1988. – 318 с.

43. Гуреев, И.И. Региональный регистр комплексов машин для механизации перспективных агротехнологий / И.И. Гуреев, В.П. Дьяков, Г.К. Гребенщиков, С. Дурдыев. – Курск, ФГБНУ ВНИИЗиЗПЭ, 2015. – 59 с.

44. Palm C. Conservation agriculture and ecosystem services: an overview // C. Palm, L. Gatere, H. Blanco-Canqui, F. DeClerck, P. Grace / *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2014. – V. 187. – P. 87-105.

45. Büchi L. Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long term experiment in Switzerland // L. Büchi, M. Wendling, C. Amossé, B. Jeangros, S. Sinaj, R. Charles / *Soil & Tillage Research*. – 2017. – V. 174. – P. 120-129.

46. Dimassi B. Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years // B. Dimassi, B. Mary, J. Labreuche, D. Couture, F. Piraux, J.-P. Cohan, R. Wylleman / *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2014. – V.188. – P. 134-146.

47. Kühling I. Impact of tillage, seeding rate and seeding depth on soil moisture and dry land spring wheat yield in Western Siberia // I. Kühling, D. Trautz, G. Broll, D. Redozubov / *Soil & Tillage Research*. – 2017. – V. 170. – P. 43-52.

48. Сеялки для прямого посева. АгроИнфо. Техника. – URL: <http://agroinfo.kz/seyalki-dlya-priamogo-poseva/> (дата обращения 22.07.2019).

49. Spicher, J. Maßnahmen zum wassersparenden Zuckerrübenbau / J. Spicher, R. Haberland // *Zuckerrübe*. – 1997. – 46. – P. 254-256.

50. Внутрипочвенное удобрение – в корне верное решение. – URL: http://www.agristo.ru/Catalog/TechMain_Podkorm_Injector.html?yclid=6895529138496504144 (дата обращения 22.10.2019).

51. Гуреев И.И. Функциональная диагностика потребности растений в питательных веществах // *Земледелие*. – 2015. – № 4. – С. 26-29.

52. Ding W., Xu X., He P., et al., 2018. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: a meta-analysis. *Field Crops Research*, vol. 227, pp. 11-18.

53. Чумаков А.В. Определение недостатка питательных веществ у растений / А.В. Чумаков // Современные технологии минерального питания. – Краснодар, 2005. – С. 78-83.

54. А.с. 952168 СССР, М. Кл.³ A01G 31/02. Способ обеспечения растений минеральными элементами / А.С. Плешков, Б.А. Ягодин (СССР). № 2970658/30-15; заявл. 31.07.80; опубл. 23.08.82, Бюл. № 31.

55. Растительная революция: как работает сознание растений / <https://news.mail.ru/society/31812308/?frommail=10>.

56. Агрохимия / Б.А. Ягодин, П.М. Смирнов, А.В. Петербургский и др.; Под ред. Б.А. Ягодина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1989. – 639 с.

57. Пат. 2541310 Российской Федерации, МПК A01G 7/00. Способ диагностики потребности растений в минеральных элементах питания / Гуреев И.И.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт земледелия и защиты почв от эрозии». № 2013118542/13; заявл. 22.04.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4.

58. Гуреев И.И. Перспективы функциональной диагностики потребности растений в питательных веществах // АПК Юга России: состояние и перспективы: Сб. докл. Региональной науч.-практ. конф. Майкоп: Магарин О.Г., 2014. С. 44-47.

59. Кряжков В.М., Бурченко П.Н., Спирин А.П. Проблемы механизации в рамках повышения плодородия почв и обеспечения требований экологии // Земельная реформа и проблемы развития земледелия СССР. – Курск, 1992. – С. 168-178.

60. Макаров И.П. Теоретические и практические основы зональных систем обработки почвы // Минимализация обработки почвы. – М.: Колос, 1984. – С.3-13.

61. Медведев В.В. Преимущества бесплужной обработки не доказаны // Земледелие. – 1993. – № 3. – С.23-26.

62. Пупонин А.И., Хохлов Н.Ф. Минимализация основной обработки дерновоподзолистой почвы под зерновые культуры в Центральном районе Нечернозёмной зоны // Минимализация обработки почвы / Всесоюзн. акад. с.-х. наук им. В.И. Ленина. – М.: Колос, 1984. – С.20-30.

63. Спирин А.П. Теоретические основы минимальной энергосберегающей обработки почвы // Вестник с.-х. науки. – 1988. – № 7. – С.101-108.

64. Порядин В.А. Эффективность щелевания чернозёмов на склонах лесостепной зоны в целях повышения противоэрозионной устойчивости и продуктивности: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / Воронеж. с.-х. ин-т. – Воронеж: 1985. – 22 с.

65. Широкозахватный культиватор-плоскорез КПШ-9: Схема и регулировка. URL: <https://agromania.com.ua/shirokozaxvatnyj-kultivator-ploskorez-kpsh-9-skhema-i-regulirovka/> (дата обращения 16.10.2019).

66. Синеоков, Г.Н. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин / Г.Н. Синеоков, И.М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.

67. Конструкция культиватора-плоскореза для агрегатирования с трактором Т-250 на основной обработке почвы. URL: <http://www.ideasandmoney.ru/Ntrr/Details/115241> (дата обращения 16.10.2019).

68. Пат. 2409923 Российская Федерация, МПК А 01В 73. Механизм управления заглублением в почву рабочих органов боковых шарнирных секций копирующих почвообрабатывающих машин / Макаренко А.И., Ежов В.А.; заявители и патентообладатели Макаренко А.И., Ежов В.А. заявл. 15.10.09; опубл. 27.01.11.

69. Как ускорить процесс разложения растительных остатков. URL: <http://www.agrocounsel.ru/kak-uskorit-protsess-razlozheniya-rastitelnyh-ostatkov> (дата обращения: 11.11.2019).

70. Гуреев И.И. Повышение заглубляющей способности сошников сеялок прямого посева / И.И. Гуреев // Актуальные проблемы инженерно-технического обеспечения АПК (материалы Международной научно-практической конференции, 23-25 января 2013 г., г. Курск). – Курск: Изд-во Курск. гос. с.-х. ак., 2013. – С.8-9.

71. Клёнин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины: Элементы теории рабочих процессов, расчёт регулировочных параметров и режимов работы / Н.И. Клёнин, В.А. Сакун. – М., Колос, 1980. – 671 с

72. Гуреев И.И. Влияние изменения параметров ножей фрезы при обработке стерни / Доклады ВАСХНИЛ. – 1983. – №5. – С.42-44.

73. Approaches to model the impact of tillage implements on soil physical and nutrient properties in different agroecosystem models / G.R. Maharjan, F. Ewert, C.M. Mboh, et al. // Soil & tillage research. 2018. – V. 180. – P. 210-221.

74. Bajwa A.A. Sustainable weed management in conservation agriculture // Crop Protection. 2014. – Т. 65. – P. 105-113.

75. Chauhan B.S., Singh R.G., Mahajan G. Ecology and management of weeds under conservation agriculture: a review // Crop Protection. 2012. – Т. 38. – P. 57-65.

76. The search for new natural herbicides – strategic approaches for discovering fungal phytotoxins / E.V.V. Varejão, A.J. Demuner, L. C.A. Barbosa, et al. // Crop Protection. – 2013. – Т. 48. – P. 41-50.

77. Гуреев И. И. Результаты испытаний комбинированного орудия для посева зерновых культур // Инновационно-технологические основы развития земледелия: Сб. докладов Всерос. науч.-практ. конф. Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2006. – С. 98-102.

78. ГОСТ Р 53056-2008. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – М.: Стандартинформ, 2009. – 19 с.

79. Гуреев И.И. О нормативе затрат на ликвидацию последствий техногенной деградации почвы // Достижения науки и техники АПК. – 2018. – Т. 32. – № 11. – С. 75-78.

80. Бондарев А.Г. Изменение физических свойств и плодородия почв при их уплотнении движителями сельскохозяйственной техники // Воздействие движителей на почву: сб. научных трудов. – М.: ВИМ, 1988. – Т. 118. – С. 46-57.

81. Лапик В.П. Экологические аспекты воздействия гусеничных движителей на почву // Вестник ФГОУ ВПО Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. – 2010. – № 2. – С. 86-88.

82. Тхазеплов Х.М. Повышение эффективности использования колёсных тракторов на склоновых землях за счёт применения шин со съёмным протектором: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Нальчик, 2010. – 150 с.

83. Ivantsova N.N., Zolotarevskaya D.I. Investigation and Calculation of the stressed-strained State and Compaction of viscoelastic disperse Media as a Result of relaxation Processes // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2005. – Vol. 78. – No. 5. – pp. 78-86

84. Савельев Ю.А., Климанов А.В., Мокрицкий С.Н. Следоразрыхлитель для тракторов класса 1,4 // Совершенствование конструкции и технологии использования сельскохозяйственной техники: сб. научных трудов. – Самара, 1999. – С. 81-83.

85. Bolenius E., Rogstrand G., Arvidsson I., Stenberg B., Thylen L. On-the-go measurements of soil penetration resistance of on a Swedish Enteric Cambior // International Soil Tillage Research Organization 17 the Triennial Conference. – Kiev - Germany, 2006. – P.867-870.

86. ГОСТ 26955-86, ГОСТ 26953-86, ГОСТ 26954-86. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву. Методы определения воздействия движителей на почву. Метод определения максимального нормального напряжения в почве. М., 1986. – 22 с.

87. Гуреев, И.И. Эколого-экономические показатели новых машин в комплексе перспективных агротехнологий производства

сельскохозяйственных культур. – Достижения науки и техники АПК. – 2014. – № 10. – С.61-64.

88. Лурье, А.Б. Широкозахватные почвообрабатывающие машины / А.Б. Лурье, А.И. Любимов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1981. – 270 с.

89. Матяшин, Ю.И. Расчёт и проектирование ротационных почвообрабатывающих машин / Ю.И. Матяшин, И.М. Гринчук, Г.М. Егоров. – М.: Агропромиздат, 1988. – 176 с.

90. Лызо, Г.П. Тракторы, автомобили, двигатели / Г.П. Лызо, А.П. Лызо, В.А. Ломовский. – М.: Высшая школа, 1968. – 500 с.

91. Фольк, Л. Резервы экономии топлива / Л. Фольк, Д. Штефан // Новое сельское хозяйство. – 2008. – № 3. – С.112-117.

92. Сравнительные испытания сельскохозяйственной техники: науч. Издание. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2013. – 416 с.

93. Димо, В.Н. Почвенно-гидрологические характеристики зон механизации Европейской территории СССР / В.Н. Димо, А.Н. Садовников // Сб. Воздействие движителей на почву. – Том 118. – М., ВИМ, 1988. – С.86-97.

94. Гуреев И.И. Минимизация уплотняющего воздействия на почву движителей сельскохозяйственной техники // Сахарная свёкла. – 2018. – № 1. – С.9-12.

95. Медведев В.В., Цыбулько В.Г., Слободюк П.И. Нормирование допустимых нагрузок ходовых систем МТА на почву / Воздействие движителей на почву. – Сб. научных трудов ВИМ. – М., 1988. – С.57-67.

96. Камбулов С.И. Механико-технологические основы повышения уровня функционирования сельскохозяйственных агрегатов // Ростов н/Д: Изд-во ООО «Терра Принт». – 2006. – 304 с.

97. Корсун Н.А. Агрегатирование тракторов Т-150 и Т-150К с сельскохозяйственными машинами. – М.: Машиностроение, 1975. – 276 с.

98. Амельченко П.А., Ксенович И.П., Гуськов В.В., Якубович А.И. Колёсные тракторы для работы на склонах. – М.: Машиностроение, 1978. – 248 с.

99. Гуреев И.И. Экологические последствия применения комплексов машин для механизации обработки почвы // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – № 8. – С. 77-79.

100. Tim Charman W.C., Moxey A.P., Towers W., Balana B., Hallett P.D. Mitigating arable soil compaction: Are view and analysis of available cost and Benefit data // Soil and Tillage Research. – 2015. – 146(PA). – pp. 10-25.

101. Алеев Б.А. Технологии и техника для глубокого рыхления переуплотнённых почв // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 2. – С.7-10.

102. Гуреев И.И. Формирование базы данных для проектирования комплексной механизации агротехнологий // Земледелие. – 2016. – № 2. – С.26-28.

103. Разработка схемы и определение основных параметров рабочих органов дисковой тяжёлой бороны. URL: <http://www.techlead.ru/tleas-455-4.html> (дата обращения: 08.12.2018).

104. Механический состав и структура почвы. URL: <http://poznayka.org/s87765t1.html> (дата обращения 29.10.2018).

105. Спелость почвы. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/135019> (дата обращения: 08.12.2018).

106. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611304 Российская Федерация, Программа автоматизированного проектирования системы машин в адаптивно-ландшафтном земледелии / Гуреев И.И., Руднев Н.И.; правообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт земледелия и защиты почв от эрозии. – № 2010617841; заявл. 13.12.2010; зарегистр. 09.02.2011.

107. Нормы и нормативы для планирования механизации и электрификации в отраслях АПК / Сост. М.В. Шахмаев, В.И. Юркин. – М.: Агропромиздат, 1988. – 591 с.

108. ГОСТ 23728-88 – ГОСТ 23730-88. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – М., 1988. – 25 с.

109. Совершенствование технологии возделывания ячменя в условиях Центрально-Черноземной зоны с применением микроудобрений Аквамикс для обработки семян и Акварин 15 для листовой подкормки: протокол № 14-45-2014 (1210012) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2014. – 43 с.

110. Совершенствование технологии возделывания ячменя в условиях Центрально-Черноземной зоны с применением микроудобрений Аквамикс для обработки семян и биостимулятора роста Базик для листовой подкормки: протокол № 14-47-2014 (1210022) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2014. – 43 с.

111. Совершенствование технологии возделывания ячменя в условиях Центрально-Черноземной зоны с применением микроудобрений Аквамикс для обработки семян, микроудобрения Акварин 15 и биостимулятора роста Базик для листовой подкормки: протокол № 14-43-2014 (1210052) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2014. – 45 с.

112. Совершенствование технологии возделывания ячменя в условиях Центрально-Черноземной зоны с применением микроудобрений Аквамикс для обработки семян и препаратов для листовой подкормки по методу Плешкова и Ягодина с использованием лаборатории Аквадонис: протокол № 14-04-2014 (1210042) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2014. – 43 с.

113. Совершенствование технологии возделывания ячменя в условиях Центрально-Черноземной зоны с применением микроудобрений Аквамикс для обработки семян и препаратов для листовой подкормки по методу дробной реплики с использованием лаборатории Аквадонис: протокол № 14-54-2014 (1210092) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2014. – 44 с.

114. Совершенствование технологии возделывания озимой пшеницы в условиях Центрально-Чернозёмной зоны с применением микроудобрения Лигногумат для обработки семян: протокол № 14-78-2015 (9140076) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2015. – 53 с.

115. Совершенствование технологии возделывания озимой пшеницы в условиях Центрально-Чернозёмной зоны с применением микроудобрения Аквамикс для обработки семян: протокол № 14-72-2015 (9140026) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2015. – 43 с.

116. Совершенствование технологии возделывания озимой пшеницы в условиях Центрально-Чернозёмной зоны с применением биостимулятора роста Базик для обработки семян: протокол № 14-73-2015 (9140036) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2015. – 43 с.

117. Совершенствование технологии возделывания озимой пшеницы в условиях Центрально-Чернозёмной зоны с применением микроудобрения Лигногумат и биостимулятора роста Базик для обработки семян: протокол № 14-80-2015 (9140106) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2015. – 46 с.

118. Совершенствование технологии возделывания озимой пшеницы в условиях Центрально-Чернозёмной зоны с применением микроудобрения Аквамикс и биостимулятора роста Базик для обработки семян: протокол № 14-76-2015 (9140056) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2015. – 43 с.

119. Совершенствование технологии возделывания озимой пшеницы в условиях Центрально-Чернозёмной зоны с применением микроудобрения Аквамикс для обработки семян и микроудобрения Акварин 15 для листовой подкормки: протокол № 14-85-2015 (9140126) / ФГБУ «Центрально-

Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2015. – 45 с.

120. Совершенствование технологии возделывания озимой пшеницы в условиях Центрально-Чернозёмной зоны с применением микроудобрения Аквамикс для обработки семян и биостимулятора роста Базик для листовой подкормки: протокол № 14-81-2015 (9140096) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2015. – 46 с.

121. Совершенствование технологии возделывания озимой пшеницы в условиях Центрально-Чернозёмной зоны с применением микроудобрения Аквамикс для обработки семян, микроудобрения Акварин 15 и биостимулятора роста Базик для листовой подкормки: протокол № 14-79-2015 (9140086) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2015. – 47 с.

122. Совершенствование технологии возделывания озимой пшеницы в условиях Центрально-Чернозёмной зоны с применением микроудобрения Аквамикс для обработки семян и препаратов для листовой подкормки по методу Плешкова и Ягодина с использованием лаборатории Аквадонис: протокол № 14-77-2015 (9140066) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2015. – 47 с.

123. Совершенствование технологии возделывания озимой пшеницы в условиях Центрально-Чернозёмной зоны с применением микроудобрения Аквамикс для обработки семян и препаратов для листовой подкормки по методу дробной реплики с использованием лаборатории Аквадонис: протокол № 14-75-2015 (9140046) / ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». пос. Камыши, 2015. – 48 с.

Приложение А

Региональный регистр комплексов машин для механизации технологий углубленной адаптации производства зерновых культур (экономические показатели)

№ пп	Наименование	Марка машины	Страна- производитель	Цена машины, тыс. руб.	Расход топлива, кг/ч	Марка трактора	Цена трактора, тыс. руб.	Расход топлива, кг/га	Прямые заграты, руб./га
1. Основная обработка почвы и внесение удобрений									
1.1. Лучение стерни предшественника									
1.1.1	Дисковая борона	VELES БДП-7М	Страны ТС	743	50,4	Беларус 3022	8160	8,35	467
1.1.2		БДМ-7х2	Страны ТС	684	50,4	Беларус 3022	8160	6,0	344
1.1.3		БДМ-6,6х4ПШК	Страны ТС	1144	56,1	Беларус 3522	9702	10,2	569
1.1.4		БДП-4000	Страны ТС	375	64,8	T-150K	2700	14,6	465
1.1.5		БДП-6000	Страны ТС	561	56,6	K-744P1	5451	8,84	418
1.1.6		КД-6	Украина	750	39,7	John Deere 8295R	14964	5,75	352
1.1.7		Rau DXG	Франция	1323	39,7	John Deere 8295R	14964	5,25	403
1.1.8		Catros 6001-2	ФРГ	2377	39,7	John Deere 8295R	14964	5,29	558
1.2. Послойная обработка почвы									
1.2.1	Комбинированный агрегат	AKM-6	Страны ТС	572	39,6	K-744P1	5451	9,17	466
1.2.2		АПК-3-01	Страны ТС	390	26,5	Беларус 1523	2680	10,4	521
1.2.3		АПК-6	Страны ТС	470	39,6	K-744P1	5451	7,76	380
1.2.4		ОПО-8,5	Страны ТС	756	44	K-744P1	5451	7,73	386

1.2.5	Стерневой культиватор	КСУ-6М	Страны ТС	1950	44	K-744P1	5451	5,36	395
1.2.6	Стерневой культиватор	Blue Bird 2GH 6000K	ФРГ	1340	35,2	John Deere 8295R	14964	5,87	371
1.2.7		Profi Bird 6000K	ФРГ	1400	55,1	New Holland T8.390	13682	9,18	503
1.2.8		Смарагд 9/600K	ФРГ	1470	39,7	John Deere 8295R	14964	6,62	414
1.2.9		TerraMix Hydro 600	Австрия	1285	35,2	John Deere 8295R	14964	5,87	368
1.3. Безотвальная обработка почвы									
1.3.1	Тяжёлый культиватор	КТП-9,4	Страны ТС	867	39,6	K-744P1	5451	4,01	225
1.3.2	Дискатор	БДМ- 6,6х4ПШК	Страны ТС	1144	56,1	Беларус 3522	9702	10,2	632
1.3.3	Комбинированный почвообрабатывающий агрегат	АМП-4	Страны ТС	620	44	K-744P1	5451	14,5	807
1.3.4	Дискатор	БДп-7М	Страны ТС	743	56,1	Беларус 3522	9702	6,68	361
1.3.5	Стерневой культиватор	КЧ-5,1М	Страны ТС	619	32,3	K- 4200ATM	6690	7,92	418
1.3.6		АЧУ-2,8	Страны ТС	320	32,3	K- 4200ATM	6690	14,4	682
1.3.7		Rau DXG	Франция	1323	35,2	John Deere 7930	11890	5,32	337
1.3.8	Стерневой культиватор	Multitiller M400 SC	Франция	1715	42,5	Deutz Fahr Agroton 265	11466	12,5	804
1.4. Отвальная вспашка									
1.4.1	Отвальный поворотный плуг	ПГУ-4-45	Страны ТС	402	29,1	K-3180M ATM	5800	19	899

1.4.2	Отвальный поворотный плуг	ППО-8	Страны ТС	716	56,1	Беларус 3522	9702	21	939	
1.4.3		Отвальный оборотный плуг	ППО-5-55	Страны ТС	1259	44	К-744Р1	5451	20	1031
1.4.4			ПО-4+1/40К	Страны ТС	668	32,3	К-32000АТМ	6690	19,5	966
1.4.5	Отвальный плуг	ПЛН-5-35	Страны ТС	112	26,5	Беларус 1523	2680	20,2	889	
1.4.6		ППШ-10-35	Страны ТС	815	56,1	Беларус 3522	9702	20	955	
1.4.7	Отвальный оборотный плуг	LS-95	Норвегия	1717	28,5	Deutz Fahr Agroton 165.7	10710	17,8	1166	
1.4.8		RW-100	Норвегия	2900	45,7	John Deere 8295R	14964	14,3	930	
1.5. Культивация зяби										
1.5.1	Культиватор прицепной	КШУ-8	Страны ТС	964	26,5	Беларус 1523	2680	3,64	232	
1.5.2		ККШ-11	Страны ТС	1210	56,1	Беларус 3522	9702	5,46	287	
1.5.3		КШУ-12Н	Страны ТС	655	56,1	Беларус 3522	9702	4,97	231	
1.5.4		Полярис-8,5S	Страны ТС	827	26,5	Беларус 1523	2680	3,15	191	
1.5.5	Культиватор навесной	КПН-8	Украина	769	28,5	Deutz Fahr Agroton 165.7	10697	3,96	229	
1.5.6	Стерневой культиватор	Polymag 2РМН-13	Франция	1310	42,5	Deutz Fahr Agroton 265	11466	6,75	396	
1.6. Осеннее щелевание посевов озимых										
1.6.1	Щелеватель роторный	ЩР-1	Страны ТС	350	26,5	Беларус 1523	2680	1,18	65	

1.7. Глубокое рыхление зяби									
1.7.1	Глубокорыхлитель	ПЧН-2,3	Страны ТС	399	26,5	Беларус 1523	2680	16,9	965
1.7.2		ГЩ-4М ЕВРО	Страны ТС	639	56,1	Беларус 3522	9702	18,7	951
1.7.3		Агромаш ГРН-6	Страны ТС	768	26,5	Беларус 1523	2680	14,3	1008
1.7.4		ГРН 3/4	Страны ТС	362	26,5	Беларус 1523	2680	11,2	623
1.7.5		ПЧ-6ПК	Страны ТС	397	44	К-744Р1	5451	13,2	650
1.7.6		Kverneland CLE 4,5	Норвегия	1740	29,6	John Deere 7830	11020	11	1118
1.7.7		Kverneland Delta PL 8	Норвегия	2831	29,6	John Deere 7830	11020	12,3	1665
1.7.8		Hatzenbichler Delta-Nev	Австрия	1214	29,6	John Deere 7830	11020	14,1	1154
1.8. Внесение основного удобрения									
1.8.1	Разбрасыватель минеральных удобрений	МВУ-5	Страны ТС	94	13,8	Беларус 80.1	990	0,66	154
1.8.2	Самоходный разбрасыватель минеральных удобрений	Туман-2	Страны ТС	4064	10,0	–	–	0,17	66
1.8.3	Разбрасыватель минеральных удобрений	МТТ-4У	Страны ТС	625	13,8	Беларус 80.1	990	0,75	50
1.8.4		RS-M	Голландия	537	12,2	John Deere 6095B	2784	0,42	49
1.8.5	Разбрасыватель минеральных удобрений	RS-XL	Голландия	602	12,2	John Deere 6095B	2784	0,42	30
1.8.6		ZA-M 1500	ФРГ	485	12,2	John Deere 6095B	2784	0,48	31
1.8.7		MDS-935	ФРГ	318	12,2	John Deere 6095B	2784	0,48	29

1.8.8	Штанговый разбрасыватель минеральных удобрений	Wing jet S 4012	Дания	4110	16,7	John Deere 6110B	3478	1,55	238
2. Предпосевная обработка почвы									
2.1. Ранневесеннее боронование зяби									
2.1.1	Борона пружинная VELES	БС-24М	Страны ТС	236	17,4	Беларус 1025.2	1603	0,91	53
2.1.2	Борона с пружинными зубьями	Hatzenbichler	Австрия	2140	16,7	John Deere 6110B	3478	0,84	183
2.2. Внесение азотного удобрения									
2.2.1	Разбрасыватель минеральных удобрений	МВУ-5	Страны таможенного союза	94	13,8	Беларус 80.1	990	0,66	154
2.2.2	Самоходный разбрасыватель минеральных удобрений	Туман-2	Страны ТС	4064	10,0	–	–	0,17	66
2.2.3	Разбрасыватель минеральных удобрений	МТТ-4У	Страны ТС	625	13,8	Беларус 80.1	990	0,75	50
2.2.4		RS-M	Голландия	537	12,2	John Deere 6095B	2784	0,42	49
2.2.5		RS-XL	Голландия	602	12,2	John Deere 6095B	2784	0,42	30
2.2.6		ZA-M 1500	ФРГ	485	12,2	John Deere 6095B	2784	0,48	31
2.2.7	Разбрасыватель минеральных удобрений	MDS-935	ФРГ	318	12,2	John Deere 6095B	2784	0,48	29
2.2.8	Штанговый разбрасыватель минеральных удобрений	Wing jet S 4012	Дания	4110	16,7	John Deere 6110B	3478	1,55	238
2.3. Предпосевная культивация									
2.3.1		ШККС-12	Страны ТС	756	32,3	К-4200АТМ	6690	2,69	147

2.3.2	Комбинированный культиватор	КППШ-6	Страны ТС	690	32,3	К-4200АТМ	6690	5,92	343
2.3.3		КПМ-8	Страны ТС	487	32,3	К-4200АТМ	6690	4,44	221
2.3.4		КППШ-9	Страны ТС	805	32,3	К-4200АТМ	6690	3,51	194
2.3.5		АК-3	Страны ТС	412	17,4	Беларус 1025.2	1603	4,83	281
2.3.6		АКШ-7,2	Страны ТС	858	26,5	Беларус 1523	2680	4,04	244
2.3.7		КПО-9	Страны ТС	690	29,6	John Deere 7830	11020	5,16	250
2.3.8		ИМТ 616.16	Сербия	769	42,5	Deutz Fahr Agroton 265	11466	4,43	224
2.3.9		Компактор К 600	ФРГ	4635	42,5	Deutz Fahr Agroton 265	11466	7,08	717
2.3.10		КНК-3	Украина	404	16,7	John Deere 6110В	3478	5,57	327
3. Посев									
3.1. Посев зерновых культур									
3.1.1. Прямой посев									
3.1.1.1	Механическая сеялка	СПС-4000-01	Страны ТС	684	17,4	Беларус 1025.2	1603	6,04	561
3.1.1.2		Ритм СЗ-6	Страны ТС	915	17,4	Беларус 1025.2	1603	2,5	372
3.1.1.3		СЗП-4,2	Страны ТС	505	17,4	Беларус 1025.2	1603	5,44	437
3.1.1.4	Сеялка зернотравяная	СПУ-6Д	Страны ТС	1152	17,4	Беларус 1025.2	1603	6,04	759
3.1.1.5	Механическая сеялка	Rapid RDA- 800С	Франция	7268	16,7	John Deere 9470R	24360	4,6	1330

3.1.1.6	Пневматическая сеялка прямого посева	Airseeder	ФРГ	4810	55,1	New Holland T8.390	10700	4,92	719
3.1.1.7		DMC-4500	ФРГ	4708	42,5	Deutz Fahr Agroton 265	11466	11,8	2071
3.1.1.8	Сеялка зерновая	G240-4R	Аргентина	1240	45,7	John Deere 8310R	15982	8,16	599
3.1.2. Совмещение с посевом предпосевной культивации									
3.1.2.1	Сеялка-культиватор	СРП-2	Страны ТС	480	17,4	Беларус 1025.2	1603	9,21	723
3.1.2.2		AGRATOR 5400M	Страны ТС	619	26,5	Беларус 1523	2680	7,36	521
3.1.2.3		АПШ-6	Страны ТС	14564	39,6	K-744P1	5451	8,68	4242
3.1.2.4		John Deere 1890	США	14500	79,1	New Holland T9.505	18900	7,22	1889
3.1.2.5		Flexi-Coil 9,8	Канада	10890	79,1	New Holland T9.505	18900	10,1	2088
3.1.3. Совмещение с посевом предпосевной культивации и локального внесения удобрений									
3.1.3.1	Комбинированное почвообрабатывающе- посевное орудие	КО-3,6	Страны ТС	2100	26,5	Беларус 1523	2680	10,5	1025
3.1.3.2		ATD 11.35	Украина	7250	79,1	New Holland T9.505	18900	9,4	640
3.1.3.3		Bourgault 8810-54	Канада	16297	79,1	New Holland T9.505	18900	8,8	1234
3.1.3.4		John Deere 1895	США	14877	55,1	New Holland T8.390	13104	9,1	1372

4. Уход за посевами									
4.1. Корневые подкормки									
4.1.1	Разбрасыватель минеральных удобрений	РУ-06	Страны ТС	94	13,8	Беларус 80.1	990	0,66	154
4.1.2	Самоходный разбрасыватель минеральных удобрений	Туман-2	Страны ТС	4064	10,0	–	–	0,17	66
4.1.3	Разбрасыватель минеральных удобрений	МТТ-4У	Страны ТС	625	13,8	Беларус 80.1	990	0,75	50
4.1.4		RS-M	Голландия	537	12,2	John Deere 6095B	2784	0,42	49
4.1.5		RS-XL	Голландия	602	12,2	John Deere 6095B	2784	0,42	30
4.1.6		ZA-M 1500	ФРГ	485	12,2	John Deere 6095B	2784	0,48	31
4.1.7		MDS-935	ФРГ	318	12,2	John Deere 6095B	2784	0,48	29
4.1.8	Штанговый разбрасыватель минеральных удобрений	Wing jet S 4012	Дания	4110	16,7	John Deere 6110B	3478	1,55	238
4.1.9	Инъекционный растениепитатель	Liquiliser	Голландия	8800	33,6	John Deere 7930	5425	2,8	430
4.2. Листовые подкормки, применение химических средств защиты растений									
4.2.1	Опрыскиватель прицепной	ОП-2500М-24 «Булгар»	Страны ТС	480	13,8	Беларус 80.1	990	0,72	51
4.2.2		ТИТАН 3000	Страны ТС	310	13,8	Беларус 80.1	990	0,96	61
4.2.3		БЛЮМИНГ 3000	Страны ТС	360	13,8	Беларус 80.1	990	0,64	81
4.2.4	Опрыскиватель навесной	Мекосан-650-12	Страны ТС	312	13,8	Беларус 80.1	990	1,44	91

4.2.5	Опрыскиватель прицепной	Rau Sprido- Train	Голландия	1670	16,7	John Deere 6110B	3478	0,7	76
4.2.6		John Deere 740	США	3276	16,7	John Deere 6110B	3478	0,7	116
4.2.7	Опрыскиватель навесной	Rau-Sprimat L22	Голландия	1407	12,2	John Deere 6095B	2784	1,27	154
4.2.8	Опрыскиватель самоходный	John Deere R4030	США	14500	49,2	–	–	1,04	134
5. Уборка урожая									
5.1. Скашивание и обмолот зерновых									
5.1.1	Зерноуборочный комбайн	PCM-181 “Torum 740”	Страны ТС	8530	63,2	–	–	9,7	1787
5.1.2		PCM-101 “Vektor 410”	Страны ТС	4150	33,1	–	–	8,8	1573
5.1.3		PCM-101 “Acros 580”	Страны ТС	6300	47	–	–	8,5	1373
5.1.4		K3C-1218 “Palesse”	Страны ТС	6100	52,2	–	–	7,1	2031
5.1.5		K3C-812 “Palesse GS 812”	Страны ТС	4700	33,1	–	–	6,82	2026
5.1.6		CX 8080 New Holland	США	19530	55,9	–	–	8,9	3949
5.1.7		John Deere 9670 STS	США	23780	48,2	–	–	7,2	6479
5.1.8		John Deere S660	США	19140	50,5	–	–	8,4	5076
5.1.9		Tusano 340	ФРГ	12852	44	–	–	7,3	6729
5.1.10		Tusano 450	ФРГ	16350	47,3	–	–	9,2	8516
5.1.11		Tusano 480	ФРГ	18648	56,1	–	–	9,1	7147

Приложение Б

Региональный регистр комплексов машин для механизации технологий углубленной адаптации
производства зерновых культур (экологические показатели)

№ пп	Наименование	Марка сельхозмашин	Мощность двигателя агрегата, кВт	Мощность привода вспомогательных механизмов, кВт	Вес трактора, кН	Вес сельскохозяйственной машины, кН	Рабочая скорость агрегата, км/ч	Ширина захвата агрегата, м	Марка трактора	Интенсивность механического воздействия на почву, МДж/га			
			общая	полезная	вредная								
1. Основная обработка почвы и внесение удобрений													
1.1. Лушение стерни предшественника													
1.1.1		ВЕLES БДП-7М	223	0	115	62	8,5	7,1	Беларус 3022	107	41	65,9	
1.1.2			БДМ 7х2	223	0	115	36	12	7	Беларус 3022	76,8	30,5	46,3
1.1.3			БДМ-6,6х4ППК	227	0	124	51,9	8,3	6,6	Беларус 3522	120	54,6	65,2
1.1.4			БДП-4000	132	0	84	28	11	4	Т-150К	87,1	26,9	60,2
1.1.5			БДП-6000	220	0	149	38	10,5	6	К-744Р1	101	39,2	61,8
1.1.6			КД-6	217	0	140	47,8	11,5	6	John Deere 8295R	93,9	26,3	67,6
1.1.7		Rau DXG	217	0	140	49,1	12	6,3	John Deere 8295R	85,7	20,7	65	

1.1.8	Дисковая борона	Catros 6001-2	217	0	140	33	12,5	6	John Deere 8295R	86,4	31,2	55,2
1.2. Послойная обработка почвы												
1.2.1	Комбинированный агрегат	АКМ-6	220	0	149	38	7,2	6	К-744Р1	123	60,4	62,8
1.2.2		АПК-3-01	110	0	60,6	18	8,5	3	Беларус 1523	125	66,7	58
1.2.3		АПК-6	220	0	149	30	8,5	6	К-744Р1	104	49,6	54,8
1.2.4		ОПО-8,5	220	0	149	41,5	6,7	8,5	К-744Р1	112	63,1	49,2
1.2.5		АПП-7,2-02	220	0	149	40,7	11,4	7,2	К-744Р1	77,9	25,2	52,7
1.2.6	Стерневой культиватор	Blue Bird 2GH 6000K	217	0	140	27,7	10	6	John Deere 8295R	82,4	31,9	50,6
1.2.7		Profi Bird 6000K	252	0	124	63,4	10	6	New Holland T8.390	122	41,5	80
1.2.8		Смарагд 9/600K	217	0	140	18,6	10	6	John Deere 8295R	93,1	48,8	44,3
1.2.9		TerraMix Hydro 600	217	0	140	17,3	10	6	John Deere 8295R	82,4	40,2	42,3
1.3. Безотвальная обработка почвы												
1.3.1	Тяжёлый культиватор	КТП-9,4	220	0	149	31	10,5	9,4	К-744Р1	53,9	19,6	34,4
1.3.2	Дискатор	БДМ-6,6x4ПШК	227	0	124	51,9	8,3	6,6	Беларус 3522	120	54,6	65,2
1.3.3	Комбинированный почвообрабатывающий агрегат	АМП-4	220	0	149	60	8	3,8	К-744Р1	210	80,6	130
1.3.4	Дискатор	БДМ 6x4	227	0	124	36	12	7	Беларус 3522	78,2	30,6	47,6
1.3.5	Стерневой культиватор	КЧ-5,1М	147	0	68	19,5	8	5,1	К-4200АТМ	104	64,7	39,6
1.3.6		АЧУ-2,8	147	0	68	12	8	2,8	К-4200АТМ	190	131	59,3
1.3.7		Rau DXG	167	0	140	49,1	10,5	6,3	John Deere 7930	74,8	10,7	64,1
1.3.8	Стерневой культиватор	Multitiller M400 SC	141	0	98,7	47	8,5	4	Deutz Fahr Agrotan 265	120	30,8	89,2
1.4. Отвальная вспашка												
1.4.1	Отвальный поворотный плуг	ПГУ-4-45	132	0	65	15	8,5	1,8	К-3180М АТМ	250	148	101
1.4.2		ППО-8	227	0	124	22,4	8,5	3,15	Беларус 3522	245	147	98,6

1.4.3	Отвальный оборотный плуг	ППО-5-55	220	0	149	30	8	2,75	K-744P1	291	154	137
1.4.4		ПО-4+1/40К	147	0	68	25,5	8,3	2	K-32000ATM	256	136	121
1.4.5		ПЛН-5-35	110	0	60,6	9,1	7,5	1,75	Беларус 1523	242	158	84
1.4.6		ППШ-10-35	227	0	124	30	8	3,5	Беларус 3522	235	134	100
1.4.7	Отвальный оборотный плуг	LS-95	113	0	74	14,1	8	2	Deutz Fahr Agroton 165.7	204	112	92,1
1.4.8		RW-100	217	0	130	60,4	8	4	John Deere 8295R	201	75,3	125
1.5. Культивация зяби												
1.5.1	Культиватор прицепной	КШУ-8	110	0	60,6	29,1	9,1	8	Беларус 1523	43,7	10,1	33,7
1.5.2		ККШ-11	227	0	124	32,1	11,3	9,1	Беларус 3522	63,9	19	44,8
1.5.3		КШУ-12Н	227	0	124	31,2	9,4	12	Беларус 3522	58,2	23,7	34,5
1.5.4		Полярис-8,5S	110	0	60,6	26,1	9,9	8,5	Беларус 1523	37,8	8,11	29,7
1.5.5	Культиватор навесной	КПН-8	113	0	74	22,5	9	8	Deutz Fahr Agroton 165.7	45,4	12,8	32,6
1.5.6	Стерневой культиватор	Polymag 2РМН-13	141	0	98,7	26	10,5	6	Deutz Fahr Agroton 265	64,7	11,3	53,4
1.6. Осеннее щелевание посевов озимых												
1.6.1	Щелеватель роторный	ЩР-1	118	0	60,6	9,5	7,5	30	Беларус 1523	15,2	10,1	5,05
1.7. Глубокое рыхление зяби												
1.7.1	Глубокорыхлитель	ПЧН-2,3	118	0	60,6	10,5	6,8	2,3	Беларус 1523	218	134,0	84,2
1.7.2		ГЩ-4М	227	0	124	23	7,5	4	Беларус 3522	219	121,32	97,6
1.7.3		Агромаш ГРН-6	118	0	60,6	16,2	6,2	3	Беларус 1523	183	108,5	75,1
1.7.4		ГРН 3/4	118	0	60,6	10,3	7,9	3	Беларус 1523	144	81,83	62,2
1.7.5		КГ 3,7	220	0	149	11	9	3,7	K-744P1	192	94,82	97,2
1.7.6		Kverneland CLE 4,5	151	0	115	12,5	6	4,5	John Deere 7830	154	85,52	68,8
1.7.7		Kverneland Delta PL 8	151	0	115	11,8	6	4	John Deere 7830	174	97,05	76,5

1.7.8		Hatzenbichler Delta-Nev	151	0	115	17,5	6	3,5	John Deere 7830	198	103,12	95,2
1.8. Внесение основного удобрения												
1.8.1	Разбрасыватель минеральных удобрений	МВУ-5	60	25	37,7	2,2	10,5	20	Беларус 80.1	2,39	0	2,39
1.8.2	Самоходный разбрасыватель минеральных удобрений	Туман-2	80,9	30	23,4	0	24	24	-	1,17	0	1,17
1.8.3	Разбрасыватель минеральных удобрений	МТТ-4У	60	25	37,7	2,9	10	18,5	Беларус 80.1	2,63	0	2,63
1.8.4	Разбрасыватель минеральных удобрений	RS-M	70	25	70	3,4	12	24	John Deere 6095B	3,67	0	3,67
1.8.5		RS-XL	70	25	70	5,5	14	42	John Deere 6095B	3,77	0	3,775
1.8.6		ZA-M 1500	70	25	70	4,6	10,6	24	John Deere 6095B	3,73	0	3,73
1.8.7		MDS-935	70	25	70	2,4	10,6	24	John Deere 6095B	3,62	0	3,62
1.8.8	Штанговый разбрасыватель минеральных удобрений	Wing jet S 4012	81	25	50	25	9	12	John Deere 6110B	10,7	0	10,7
2. Предпосевная обработка почвы												
2.1. Ранневесеннее боронование зяби												
2.1.1	Борона средняя пружинная	VELES BC-24M	79	0	44,8	1,5	12	16	Беларус 1025.2	11,9	5,81	6,09
2.1.2	Борона с пружинными зубьями	Hatzenbichler	81	0	82	3,0	11	18	John Deere 6110B	11,8	2,52	9,32
2.2. Внесение азотного удобрения												
2.2.1	Разбрасыватель минеральных удобрений	МВУ-5	60	25	37,7	2,2	10,5	20	Беларус 80.1	2,39	0	2,39
2.2.2	Самоходный разбрасыватель минеральных удобрений	Туман-2	80,9	30	23,4	0	24	24	-	1,17	0	1,17
2.2.3	Разбрасыватель минеральных удобрений	МТТ-4У	60	25	37,7	2,9	10	18,5	Беларус 80.1	2,63	0	2,63
2.2.4		RS-M	70	25	70	3,4	12	24	John Deere 6095B	3,67	0	3,67

2.2.5		RS-XL	70	25	70	5,5	14	42	John Deere 6095B	3,77	0	3,77
2.2.6		ZA-M 1500	70	25	70	4,6	10,6	24	John Deere 6095B	3,73	0	3,73
2.2.7		MDS-935	70	25	70	2,4	10,6	24	John Deere 6095B	3,62	0	3,62
2.2.8	Штанговый разбрасыватель минеральных удобрений	Wing jet S 4012	81	25	50	25	9	12	John Deere 6110B	10,7	0	10,7
2.3. Предпосевная культивация												
2.3.1	Комбинированный культиватор	ШККС-12	147	0	68	32,5	10	12	K-4200ATM	35,4	13,2	22,3
2.3.2		КППШ-6	147	0	68	36,5	9,1	6	K-4200ATM	77,9	29,6	48,3
2.3.3		КПМ-8	147	0	68	23,5	9,1	8	K-4200ATM	58,4	29,9	28,5
2.3.4		КППШ-9	147	0	68	29,8	9,8	9,4	K-4200ATM	46,2	19	27,1
2.3.5	Комбинированный культиватор	АК-3	79	0	44,8	7,5	10	3	Беларус 1025.2	63,5	34,3	29,1
2.3.6		АКШ-7,2	110	0	60,6	38,8	9,1	7,2	Беларус 1523	48,6	9,33	39,2
2.3.7		КПО-9	151	0	79	32	12	9,2	John Deere 7830	39,6	10,1	29,5
2.3.8		ИМТ 616.16	141	0	98,7	23,2	10	9,6	Deutz Fahr Agrotan 265	42,5	16	26,5
2.3.9		Компактор К 600	141	0	98,7	35,7	10	6	Deutz Fahr Agrotan 265	68	15,6	52,4
2.3.10		КНК-3	81	0	82	8,5	10	3	John Deere 6110B	78,1	27,8	50,3
3. Посев												
3.1. Посев зерновых культур												
3.1.1. Прямой посев												
3.1.1.1	Механическая сеялка	СПС4000-01	79	0	44,8	28	8	3,6	Беларус 1025.2	79,4	21,6	57,8
3.1.1.2		Ритм СЗ-6	79	0	44,8	17	12	6	Беларус 1025.2	31,8	7,3	24,5
3.1.1.3		СЗП-4,2	79	0	44,8	32,5	8	4	Беларус 1025.2	71,4	14,1	57,4
3.1.1.4	Сеялка зернотравяная	СПУ-6Д	79	0	44,8	30	8	3,6	Беларус 1025.2	79,4	18,9	60,4

3.1.1.5	Механическая сеялка	Rapid RDA-800C	346	0	192	87	14	8	John Deere 9470R	97,6	20,1	77,5
3.1.1.6	Пневматическая сеялка прямого посева	Airseeder	252	35	124	83	8	14	New Holland T8.390	66,1	23,1	43
3.1.1.7		DMC-4500	141	10	98,7	56	8	4,5	Deutz Fahr Agrotan 265	114	21,4	92,8
3.1.1.8	Сеялка зерновая	G240-4R	222	15	130	42	8	7	John Deere 8310R	116	57,1	58,5
3.1.2. Совмещение с посевом предпосевной культивации												
3.1.2.1	Сеялка-культиватор	СПП-2	79	8	44,8	14,3	9	2,1	Беларус 1025.2	122	56,8	65,5
3.1.2.2		AGRATOR 5400M	110	15	60,6	21	9	4	Беларус 1523	89,8	41,3	48,5
3.1.2.3		АПП-6	184	15	143	58,6	7,6	6	К-744P1	118	35,6	82,3
3.1.2.4		John Deere 1890	362	35	242	130	8	13,7	New Holland T9.505	96,6	24,3	72,3
3.1.2.5	Сеялка-культиватор	Flexi-Coil 9,8	362	28	242	141,4	8	9,8	New Holland T9.505	135	27,9	107
3.1.3. Совмещение с посевом предпосевной культивации и локального внесения удобрений												
3.1.3.1	Комбинированное почвообрабатывающе-посевное орудие	KO-3,6	110	0	60,6	35	7	3,6	Беларус 1523	126	50,3	76
3.1.3.2		ATD 11.35	362	30	242	150	7	18,2	New Holland T9.505	83	22,4	60,6
3.1.3.3		Bourgault 8810-54	362	28	242	96,1	7	16,7	New Holland T9.505	90,4	39,7	50,7
3.1.3.4		John Deere 1895	252	25	124	141	7	13,1	New Holland T8.390	80,4	12,2	68,2
4. Уход за посевами												
4.1. Корневые подкормки												
4.1.1	Разбрасыватель минеральных удобрений	РУ-06	60	25	37,7	2,2	10,5	20	Беларус 80.1	2,39	0	2,394

4.1.2	Самоходный разбрасыватель минеральных удобрений	Туман-2	80,9	30	23,4	0	24	24	-	1,17	0	1,17
4.1.3	Разбрасыватель минеральных удобрений	MTT-4У	60	25	37,7	2,9	10	18,5	Беларус 80.1	2,63	0	2,634
4.1.4		RS-M	70	25	70	3,4	12	24	John Deere 6095B	3,67	0	3,67
4.1.5		RS-XL	70	25	70	5,5	14	42	John Deere 6095B	3,77	0	3,775
4.1.6		ZA-M 1500	70	25	70	4,6	10,6	24	John Deere 6095B	3,73	0	3,73
4.1.7		MDS-935	70	25	70	2,4	10,6	24	John Deere 6095B	3,62	0	3,62
4.1.8	Штанговый разбрасыватель минеральных удобрений	Wing jet S 4012	81	25	50	25	9	12	John Deere 6110B	10,7	0	10,7
4.1.9	Инъекционный растениепитатель	Liquiliser	154	25	123	83	8	13	John Deere 7930	12,9	3,1	9,8
4.2. Листовые подкормки, применение химических средств защиты растений												
4.2.1	Опрыскиватель прицепной	ОП-2500М-24 «Булгар»	60	10	37,7	29,5	8	24	Беларус 80.1	3,36	0	3,36
4.2.2		ТИТАН 3000	60	10	37,7	13,5	8	18	Беларус 80.1	3,41	0	3,413
4.2.3		БЛЮМИНГ 3000	60	10	37,7	11,5	12	18	Беларус 80.1	3,28	0	3,28
4.2.4	Опрыскиватель навесной	Мекосан-650-12	60	10	37,7	2,3	8	12	Беларус 80.1	4	0	4
4.2.5	Опрыскиватель прицепной	Rau Sprido-Train	81	10	50	24	10	24	John Deere 6110B	5,3	0	5,3
4.2.6		John Deere 740	81	10	50	34	10	24	John Deere 6110B	5,8	0	5,8
4.2.7	Опрыскиватель навесной	Rau-Sprimat L22	70	10	46	1,37	8	12	John Deere 6095B	7,14	0	7,137
4.2.8	Опрыскиватель самоходный	John Deere R4030	239	30	110	0	13	36,5	-	3,62	0	3,616

5. Уборка урожая												
5.1. Скашивание и обмолот зерновых												
5.1.1	Зерноуборочный комбайн	PCM-181 "Torum 740"	294	240	230	0	7,2	7,0	–	46	0	46
5.1.2		PCM-101 "Vektor 410"	154	115	150	0	9,4	6	–	30	0	30
5.1.3		PCM-101 "Acros 580"	221	180	193	0	7,4	6,8	–	38,6	0	38,6
5.1.4		K3C-1218 "Palesse"	243	203	205	0	7,9	6,8	–	41	0	41
5.1.5		K3C-812 "Palesse GS 812"	154	120	147	0	7,8	5,8	–	29,4	0	29,4
5.1.6		CX 8080 New Holland	260	216	220	0	7,9	7,1	–	44	0	44
5.1.7		John Deere 9670 STS	278	230	213	0	7,5	7,45	–	42,6	0	42,6
5.1.8		John Deere S660	239	198	238	0	7,7	7,5	–	47,6	0	47,6
5.1.9		Tucano 340	205	168	175	0	4,23	7,5	–	35	0	35
5.1.10		Tucano 450	220	180	184	0	4,2	7,5	–	36,8	0	36,8
5.1.11		Tucano 480	261	220	199	0	4,9	9	–	39,8	0	39,8

Научное издание

Гуреев И.И. Углубленная адаптация технологий производства зерновых культур в Центрально-Чернозёмном регионе / И.И. Гуреев, Л.Б. Нитченко, И.А. Прущик (Под редакцией И.И. Гуреева). – Курск: ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», 2021. – 238 с.

Сдано в набор 2_.06.21 г. Подписано в печать 2_.06.20 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. __. Тираж 550 экз. Заказ № ____.

Отпечатано: «Деловая полиграфия»

ИП Бескровный Александр Васильевич

г. Курск, ул. К.Маркса, 61 Б.

E-mail: zakaz-zachetka@mail.ru