

УДК 631.1:338.28:007.52

**ПРОБЛЕМЫ РОБОТИЗАЦИИ МЕЖДУРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ
ПОСЕВОВ ПРОПАШНЫХ КУЛЬТУР.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
РАБОЧИХ ОРГАНОВ**

Хамуков Ю.Х., Канокова М.А.

ФГБУН «Федеральный научный центр

*«Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»,
Нальчик, e-mail: yukhab47@gmail.com, kanokova.madina@yandex.ru*

В работе рассмотрены условия перемещения по междуурядью агрегата для обработки посевов пропашных культур. Актуальность работы обусловлена обостряющимся противоречием между ростом количества обработок междуурядий посевов и деградацией почв из-за их машинной и химической деградации. Развитие технологий междуурядной обработки посевов происходит главным образом в виде совершенствования конструкции рабочих органов/эффекторов агрегатов и усложнения выполняемых ими кинематических и динамических действий региональными и локальными перемещениями в междуурядном пространстве. При этом региональные и локальные перемещения рабочих органов/эффекторов выполняются только после высокоточного выполнения глобальных перемещений транспортной платформы агрегата с минимальным деструктивным воздействием на почву, без нанесения вреда посевам и с высокой энергоэффективностью. Для этого агрегат должен обладать специфическими свойствами в виде особенностей геометрических параметров конструкции транспортной платформы, типа и габаритов движителей, соответствовать жестким массогабаритным ограничениям и обладать высокой управляемостью. Потребность в высокой маневренности транспортной платформы агрегата в условиях движения в междуурядье по мало связному и одновременно липкому грунту с твердотельными препятствиями обуславливает высокие требования управляемости и наблюдаемости управления. Выполнение всех указанных требований к техническим характеристикам транспортной платформы робототехнического агрегата для междуурядной обработки посевов представляет собой самостоятельную сложную задачу, неразрешимую традиционными инженерно-конструкторскими приемами.

Ключевые слова: междуурядная обработка, роботизация, глобальные перемещения, транспортная платформа, подвижность, энергоэффективность, управляемость

**PROBLEMS OF ROBOTIZATION OF INTER-ROW
TREATMENT OF CROPS OF ROWED CROPS.
PROVISION OF GLOBAL MOVEMENTS OF WORKING BODIES**

Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A.

*Federal Scientific Center “Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”,
Nalchik, e-mail: yukhab47@gmail.com, kanokova.madina@yandex.ru*

The paper considers the conditions for moving along the row spacing of the unit for processing plantings of tilled crops. The relevance of the work is due to the growing contradiction between the increase in the number of treatments between rows of plantings and soil degradation due to their mechanical and chemical degradation. The development of technologies for inter-row processing of plantings occurs mainly in the form of improving the design of the working bodies / effectors of the units and complicating the kinematic and dynamic actions performed by them by regional and local movements in the inter-row space. At the same time, regional and local movements of the working bodies / effectors are feasible only after high-precision global movements of the transport platform of the unit with a minimum destructive effect on the soil, without harming plantings and with high energy efficiency. To do this, the unit must have specific properties in the form of features of the geometric parameters of the design of the transport platform, the type and dimensions of the propellers, comply with strict weight and size restrictions and have high controllability. The need for high maneuverability of the transport platform of the unit in the conditions of movement in the aisle on loosely connected and, at the same time, sticky soil with solid obstacles determines the high requirements for controllability and observability of control. Fulfillment of all the specified requirements for the technical characteristics of the transport platform of the robotic unit for inter-row processing of landings is an independent complex task that cannot be solved by traditional engineering and design techniques.

Keywords: inter-row processing, robotization, global movements, transport platform, mobility, energy efficiency, controllability

Последствия интенсивного земледелия, ставшего с 1960-х гг. ведущим и основным способом обеспечения человечества продуктами питания, становятся угрозой устойчивого существования экосистем и земной биосфера в целом. По мере осознания угроз возрастают усилия по поиску

альтернатив интенсивному применению химических удобрений, пестицидов и тяжелой техники в агроценозах [1, 2]. Выраженным глобальным трендом в эволюционировании современного растениеводства становится замещение сплошной неизбирательной обработки растений и почвы

на адресные точные воздействия бесхимическими и не разрушающими структуру почвы агротехнологическими приемами. Такой переход сопровождается кратным ростом количества двигательных действий воздействующих на почву и растения рабочих органов и, соответственно, таким же кратным – точнее, многократным – ростом требований к кинематическим и динамическим характеристикам этих действий. Традиционные подходы механизации производственных процессов в агропроизводстве не располагают приемами и способами решения алгоритмических и кинематических задач точного земледелия. Прежде всего, требуется интеллектуализация выполнения производственных операций. Но здесь определяющими становятся ограничения человека в способности управления выполнением многочисленных производственных процессов в динамической среде. Выходом из эволюционного тупика становится роботизация – полное замещение человека в производственных процессах. Поскольку наибольшее количество воздействий на почву и растения осуществляется при возделывании посевов пропашных, особенно зерновых, культур [3], наибольший экономический и экологический смысл видится в роботизации именно этого вида агротехнических работ.

Цель данного исследования сформировалась в ходе проводившихся с участием авторов статьи разработок сельскохозяйственной робототехники в Кабардино-Балкарском научном центре РАН. На протяжении полутора десятилетий сотрудниками центра формировались концептуальные подходы к роботизации растениеводческой деятельности, создавались и патентовались новые конструкции робототехнических агрегатов сельскохозяйственного назначения. Опыт этой инновационной деятельности позволил сформулировать цели исследования – определение задач, стоящих перед разработчиками мобильной автономной полеводческой робототехники. Первочередной такой задачей является создание специализированной транспортной платформы для агрегатирования агротехнического оборудования и соответствующее предварительное определение технических требований к ней.

В оценке перспектив разработки робототехнических агрегатов для междурядной обработки почвы и растений мы исходим из аксиоматического, на наш взгляд, поло-

жения о решающем значении экономической эффективности применения робототехники. Соответственно, для определения степени своевременности и целесообразности осуществления таких разработок следует начать с анализа механизмов возникновения экономической эффективности применения подобных роботов. Исходными параметрами для предварительного анализа мы выбрали относительную и абсолютную энергоемкость производственных операций по возделыванию пропашных культур [4–6] исходя из коэффициента полезного действия энергетических машин, движителей шасси полевой агротехники и коэффициента полезного действия культиваторов [7–9]. Отдельного внимания заслуживает задача определения глобальных ограничивающих факторов, связанных с воздействием агротехнологий на экосистемные процессы [10–12] и действующих на протяжении десятилетий и столетий [13–15]. Также интерес представляет течение «альтернативное земледелие», заключающееся в попытке полной «биологизации» земледелия с отказом от синтетических удобрений, пестицидов, регуляторов роста и кормовых добавок [16, 17].

Анализ сведений из указанных источников приводит, во-первых, к выводу о том, что экономически оправданная роботизация земледелия требует создания и внедрения принципиально новых, энтропийно консервативных агротехнологий с безлюдным выполнением производственных операций автономными робототехническими системами.

Другой принципиальный вывод заключается в том, что экономически оправданная роботизация земледелия возможна только при создании неантропоморфичной агротехнологии, так как антропоморфичность рабочих органов и производственных операций неизбежно обуславливает интенсивное производство энтропии и, соответственно, деградацию агроэкосистемы и прогрессирующий рост расходов на поддержание плодородия земельных угодий. Реализация этих выводов потребует разработки новых способов воздействия на почву и растения с использованием иных физических и химических явлений взамен или в добавление к тем, которые используются сейчас. Слабо выраженный тренд на развитие этого направления наблюдается, например, в тематике конкурсов Российского научного фонда на проведение фундаментальных и прикладных разработок. К насто-

ящему времени отставание отечественных разработок принципиально новых методов и способов возделывания сельхозкультур в условиях открытого и защищенного земледелия не преодолено. Вследствие этого российские аграрии вынуждены внедрять заимствованные агротехнологии. Прежде всего, это современные системы точного земледелия и растениеводства защищенного грунта, а также многофункциональные высокопроизводительные широкозахватные агрегаты для высокоточной обработки посевов. Такая техника позволяет обрабатывать посевы на больших площадях в заданные агротехнические сроки. Применение новой агротехники актуализировало потребность в методах и в технических средствах дистанционного мониторинга и диагностики состояния посевов, почв, приземного слоя атмосферного воздуха, режима азотного питания растений и т.п. агротехнических факторов.

Следует отметить, что обеспечение своевременного оперативного контроля состояния посевов и определения актуальных агротехнических факторов также сопряжено с управляемым высокоточным перемещением диагностической и измерительной техники по посевам.

В-третьих, для обеспечения энергетически эффективных и экологически безопасных глобальных перемещений рабочих органов/эффекторов робота для междурядной обработки посевов необходимо создание специальной междурядной транспортной платформы.

Организация глобальных перемещений по междурядью

Ключевые свойства транспортной платформы для передвижения по междурядьям обуславливают особое внимание к условиям взаимодействия ее движителей с грунтом. Глобальные перемещения effекторов робототехнического агрегата осуществляются односторонним передвижением его транспортной платформы по слабосвязанным грунтам междурядья вдоль одной координаты – протяженности междурядья. Соответственно, приемлемое соотношение повреждаемости культурных растений и эффективности уничтожения сорняков, в особенности на первых стадиях прорастания культурных растений, достигается, во-первых, точностью перемещения агрегата относительно междурядья, правильным подбором рабочих органов и их сочетаний

и правильной их установкой. Это определяет требования общего характера к конструкции платформы, ее кинематическим и динамическим характеристикам и свойствам движителей. Также важным обстоятельством является то, что на транспортной платформе необходимо смонтировать десятки узлов и деталей рабочих органов различных видов [18].

Условия перемещения транспортной платформы по междурядьям посевов

1. Междурядная транспортная платформа отличается от прочих безрельсовых транспортных средств тем, что эксплуатируется в условиях жестких ограничений маневрирования. Междурядное пространство является для транспортной платформы связью, ограничивающей подвижность платформы одной степенью свободы – перемещением вдоль геометрической оси междурядья, и ограничивающей подвижности вращения (крана) в продольной и поперечной плоскостях. Способность управляемого перемещения платформы по междурядью определяется характером взаимодействия движителей платформы с грунтом, или, конкретнее – конструкцией движителя и состоянием почвы в междурядье – типом грунта, его структурой и влажностью.

2. Статические и динамические характеристики платформы определяются геометрическими параметрами ее конструкции, которые, в свою очередь, определяются шириной междурядья посевов и особенностями возделываемой культурой. Исходя из размеров ширины междурядья посевов 0,4–0,7 м и максимального уклона поля 8°, оценки условий остойчивого движения платформы можно провести для плоской местности с известной спектральной плотностью неровностей и известными вязкостью и липкостью грунта. Качественный вид спектра неровностей подготовленного к посевам поля по [19–21] может быть представлен экспоненциальной кривой вида

$$S_g(\Omega) = k_v \Omega^{-(n_v)}, \quad (1)$$

где k_v – параметр, выражющий дорожные неровности и изменяющийся в пределах 0,1–100, где 0,1 относится к гладким твердым поверхностям, а 100 – к очень грубым поверхностям; k_v и n_v – константы, а Ω – пространственная частота неровностей в циклах на единицу длины пути. В частности, для слежавшейся пахоты $k_v = 1 \times 10^{1.37}$, $n_v = 1.15$.

Для условий движения платформы по поворотным полосам и подъездным полевым дорогам к участкам посевов примем обобщенное выражение спектра неровностей [21] в форме

$$S_g(\Omega) = k_v \Omega^{-2.3}. \quad (2)$$

Размеры препятствий в межурядьях могут быть от 0,1 до 0,20 м.

Грунт в межурядьях на большей части площади пахотных земель чаще всего образован глубоким черноземом, или темно-серыми суглинками, или удобренной супесчаной почвой. В частности, кукуруза растет на всех почвах при pH не ниже 5,6. Исходя из этого, примем, что грунт в межурядье имеет механические характеристики с характерными $n = 1,1-1,25$.

Глубина увлажнения почвы в межурядьях на орошаемых посевах часто превышает глубину осадки движителя сельскохозяйственной техники. В таких условиях основное сопротивление движителям создают усилие отрывания движителя платформы от грунта – липкость грунта, и податливость грунта – пластичность. Липкость глинистых грунтов может меняться в пределах 50–200 г/см². Пластичность I_p меняется в зависимости от количества удерживаемой грунтом воды (до перехода грунта в текучее состояние). По ГОСТ 5180–84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик» связные грунты подразделяют на следующие виды по пластичности: 1) супесь – $0,01 < I_p < 0,07$; 2) суглинок – $0,07 < I_p < 0,17$; 3) глина – $I_p < 0,17$; 4) песок – $I_p < 0,01$. Пластичность связных грунтов очень сильно зависит от дисперсности глинистой фракции и возрастает пропорционально увеличению содержания органических коллоидов. При определенных комбинациях водности, глинистости и типа минерализации проявляется тиксотропность грунтов – способность грунта разжижаться под влиянием механического воздействия и переходить в прежнее гелеобразное состояние после прекращения воздействия. В результате под движителем платформы происходит разупрочнение таких грунтов и потеря несущей способности с соответственным увеличением сопротивления движению из-за углубления колеи и, одновременно – увеличением сопротивления движению из-за возникновения растущих сил липкости вследствие последующего тиксотропного упрочнения [21]. В этой ситуации становится актуаль-

ным время застудневания – время, необходимое для обратного перехода системы из золеобразного состояния в гелеобразное. Это время определяет оптимальную скорость движения платформы с определенным типом движителей. Чем меньше длительность времени застывания, тем более тиксотропна система и тем больше минимальная экономичная скорость движения. Это обстоятельство порождает явление тиксотропного предела, когда разжиженный грунт под опорной площадкой движителя свободно перемещается, приводя к пробуксовке ведущих движителей, и блокируется в колее после непроложительного покоя. Очевидно, что тиксотропный предел наиболее актуален для платформы на гусеничных движителях, а для колесных движителей актуальность его расстет с увеличением радиуса колес вместе с увеличением времени сцепления обода колеса с грунтом. Это время определяется скоростью движения платформы, величиной радиуса колеса и величиной осадки движителя в грунт. Для платформы с колесными движителями общее время контакта обода колеса с липким грунтом составит

$$t = 2 \frac{R}{V} \arccos \frac{R - h}{R}, \quad (3)$$

где t – время контакта участка обода колеса с грунтом; R – радиус обода; V – скорость движения платформы; h – глубина осадки обода колеса в грунте.

При минимальном времени контакта обода с грунтом до застудневания, равном t_{\min} , имеем минимальную скорость оптимального режима передвижения по межурядью не менее величины отношения длины хорды С погруженного в грунт сегмента обода колеса к t_{\min} :

$$V_{\min} = \frac{C}{t_{\min}} = \frac{2}{t_{\min}} \sqrt{h(2R - h)}, \quad (4)$$

Например, при $R = 0,6$ м, $h = 0,03$ м, $t_{\min} = 2$ с минимальная скорость движения по межурядью составит примерно 665 м/ч. При движении платформы в межурядье с грунтом, тиксотропный эффект для которой проявляется течение 2 с, при скоростях движения, меньших V_{\min} , прогрессивно возрастает энергопотребление движителей, снижается управляемость и возникают неконтролируемые изменения сопротивления движению на разных движителях и раскачивания платформы.

При качении колеса без буксования режим установившегося движения можно описать уравнением

$$\tau_n = c + P \operatorname{tg} \varphi - \frac{P^{\frac{n+1}{n}}}{\lambda b(n+1)(\frac{k_c}{b} + k_{\varphi})^{\frac{1}{n}}}, \quad (5)$$

где τ_n соответствует удельному тяговому усилию при условии равномерного распределения давления P по площади пятна контакта колеса с грунтом; λ – отношение длины пятна контакта к ее ширине, а большая дробная часть отображает сопротивление качению; b – ширина пятна контакта; n – коэффициент сжимаемости грунта; k_c и k_{φ} – коэффициенты сцепления и трения; C и φ – силы сцепления и трения.

Из (5) следует, что характер зависимости удельного тягового усилия от условий в междуурядье предполагает расход части мощности двигателя на преодоление сопротивления движению, возникающего из-за смятия грунта.

Из (5) можно получить выражение для определения максимального значения удельного тягового усилия:

$$\tau_n = c + \frac{P_0 \operatorname{tg} \varphi}{n+1}. \quad (6)$$

Из (6) следует явный вид зависимости эффективности движителей от сжимаемости грунта при заданном сцеплении с грунтом и силах трения.

Также выявляется неочевидный фактор – независимость величины удельного тягового усилия от формы пятна контакта движителя с грунтом. Это обстоятельство позволяет конструктору избавиться от ограничений на форму и диаметр обода колеса при решении задачи обеспечения максимального тягового усилия при заданных массогабаритных и энергетических характеристиках платформы. Остается только ограничение нагрузки на колесо и на обеспечение максимально высоких значений сил сцепления за счет грунтозацепов на ободе и связанной с силой сцепления силы трения. Причем тангенциальная зависимость силы трения от коэффициента трения позволяет использовать гидродинамические и тиксотропные эффекты для достижения максимального удельного тягового усилия на движителе за счет варьирования скорости движения, диаметра колеса движителя и нагрузки на колесо. Скорость движения платформы лимитирована временем выполнения локальных и региональных пере-

мещений рабочих органов, нагрузка на колеса определяется их количеством, которое у платформы для движения по междуурядьям тоже жестко ограничено. Соответственно, на первый план выходит диаметр колес движителя. Выбирать диаметр колес следует с учетом преимущественного предназначения робототехники в отношении вида посевов полевых культур, определяющих физико-механические и химические особенности грунтов в междуурядьях.

Выводы о требованиях к транспортным платформам для роботизированной обработки междуурядий посевов сельскохозяйственных культур

Для обеспечения экономического эффекта роботизации полеводства необходимы, прежде всего, полностью управляемые транспортные платформы для перемещения агротехнического оборудования по междуурядьям с высокой точностью. Для этого транспортная платформа должна быть высокопроходимой и высокоуправляемой в условиях перемещения по рыхлым, часто увлажненным и с наличием твердотельных препятствий грунтам междуурядий. При разработке полеводческой робототехники необходимо исходить из требования снижения производства энтропии при выполнении производственных операций и согласовывать время выполнения региональных и локальных перемещений рабочих органов с ограничениями на скорость перемещения платформы из-за тиксотропных и экскавационных эффектов на движителях платформы. Наиболее критичными факторами при конструировании высокопроходимой и высокоуправляемой колесной платформы являются диаметр колес и их количество.

Список литературы

1. Белоусов А.А. Свойства почв. Понятие о деградации и ее виды. Факторы и причины деградации. Почвоведение: электронный учебно-методический комплекс. Красноярск: ФГОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», 2016. 225 с.
2. Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве. Курс лекций для аспирантов по дисциплине «Эксплуатация машинно-тракторных агрегатов (МТА) в растениеводстве», Краснодар: КубГАУ, 2016. 92 с.
3. Обзор рынка зерновых // Международный совет зерновых. 2019. 8 с.
4. Позин Б.М., Трояновская И.П. Тяговая характеристика трактора (основы теории и расчет). Челябинск: ЮУрГУ, 2016. 83 с.
5. Селиванов Н.И., Макеева Ю.Н. Адаптация колесных тракторов к технологиям почвообработки // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19086> (дата обращения: 07.02.2023).

6. Поддубко С.Н., Амельченко П.А., Стасилевич А.Г., Витязь П.А., Дубовик Д.А., Ващула А.В., Жуковский И.Н., Ключников А.В. Тракторы XXI века. Состояние и перспективы. Минск: Беларусская наука, 2019. 208 с.

7. Капов С.Н., Орлянский А.В., Кожухов А.А., Бобрышов А.В., Лиханос В.А., Мирошникова В.В. Энергетическая оценка обработки почвы // Вестник аграрной науки Дона. 2018. № 3. С. 8–15.

8. Карабаницкий А.П., Левшукова О.А. Теоретическое обоснование параметров энергосберегающих машинно-тракторных агрегатов. Краснодар: КубГАУ, 2014. 104 с.

9. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 264 с.

10. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функции почв в биосфере и экосистемах. М.: Наука, 1990. 261 с.

11. Абакумов Е.В. Теория экогенеза и экология почв // Роль почв в биосфере и жизни человека: материалы докладов Международной научной конференции к 100-летию со дня рождения академика Г.В. Добровольского, к Международному году почв (Москва, 5–7 октября 2015 г.). М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2015. С. 13.

12. Здоровые почвы для здоровой планеты и здорового населения: ФАО призывает обратить вспять процесс деградации почв // Всемирный форум по продовольствию и сельскому хозяйству (Берлин, 31 октября 2022 г.). Берлин, 2022. 3 с.

13. Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельскохозяйственное и лесное хозяйство) // Национальный доклад. М.: ООО «Издательство МБА», 2019. Т. 2. 476 с.

14. Пляцук Л.Д., Черныш Е.Ю. Синергетика: нелинейные процессы в экологии: монография. Сумы: Сумський го-сударствений університет, 2016. 229 с.

15. Когякова В.В., Мамонтова С.А. Альтернативные си-стемы земледелия // Проблемы современной аграрной науки: материалы международной научной конференции (Красноярск, 15 октября 2019 г.). Красноярск, 2019. С. 34–39.

16. Филиппов А.И., Заяц Э.В., Стуканов С.В., Чеботарев В.П., Пузевич К.Л. Обзор рабочих органов пропашных культиваторов и разработка новых в концепции экологиче-ского земледелия // Механизация и сельскохозяйственное машиностроение. 2020. № 4. С. 121–126.

17. Поздняков А.В., Шуркина К.А. Новый методологи-ческий подход к анализу функционирования агроэкосистем // Науки о Земле. 2008. С. 206–212.

18. Профстандарт: 13.006. Тракторист-машинист сель-скохозяйственного производства. 2014.

19. Wenderborn J.O. Lie Unebenheiten landwirtschaftlicher Fahrbahnen (Roughness of field Roads). Grundl. Der Landtechn. 1965. Vol. 15. No. 2. P. 33–64.

20. Bekker M. Theory of Land Locomotion: The Mechanics of Vehicle Mobility. The Univ. Of Michigan Press, Mich. 1956. 530 P. DOI: 10.3998/mpub.9690401.

21. Bekker M. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. The Univ. Of Michigan Press, Hardcover. 1969. 846 с.