

На правах рукописи



МЕШКОВА Светлана Сергеевна

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО АГРЕГАТА
ПО ПОЛЮ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

**Воронеж
2024**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ).

Научный руководитель **Астанин Владимир Константинович,**
доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Кузнецов Евгений Евгеньевич,**
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ), профессор кафедры эксплуатации и ремонта транспортно-технологических машин и комплексов;
Смирнов Игорь Геннадьевич,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), заведующий отделом технологий и машин для садоводства, виноградарства и питомниководства.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Курский государственный аграрный университет имени И.И. Иванова» (ФГБОУ ВО Курский ГАУ)

Защита состоится 30 мая 2024 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 35.2.008.01, созданного на базе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ и на сайте www.vsau.ru («Диссертационные советы» – «Защиты» – «35.2.008.01»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=11313>.

Автореферат разослан 05 апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В соответствии с ведомственным проектом «Цифровое сельское хозяйство» на 2019–2024 годы, основной целью которого являются: цифровая трансформация сельского хозяйства посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений для обеспечения технологического прорыва в агропромышленном комплексе и достижение роста производительности труда на «цифровых» сельскохозяйственных предприятиях в два раза к 2024 году, в Российской Федерации происходит интенсивное внедрение инновационных решений по возделыванию сельскохозяйственных культур, в том числе с использованием цифровых технологий.

При таком развитии отрасли растениеводства увеличиваются урожаи сельскохозяйственной продукции, сокращаются сроки полевых работ. Высокоэффективное управление процессами обработки поля и уборочно-транспортными операциями на основе применения цифровых технологий является перспективным направлением исследований и совершенствования технологий сельскохозяйственного производства.

Анализ литературных источников показывает, что около 30 % полей Воронежской области имеют геометрическую форму, отличающуюся от правильного четырехугольника. Границы таких полей образованы жилыми массивами, хозяйственными постройками или природными факторами: оврагами, балками, водоемами. Современные тракторы и комбайны оборудуются системами автоматической навигации, позволяющими организовать движение агрегатов с минимальным количеством разворотов тем самым снизить величину холостого пути и продолжительность полевых работ, повысить производительность агрегатов.

Сегодня для решения задач рациональной работы сельскохозяйственной техники разрабатываются различные программные продукты, предназначенные для рационального управления производительностью техники при выполнении сельскохозяйственных работ на полевых участках произвольной конфигурации, позволяющие формировать и хранить базы данных координат полевых участков индивидуально для каждого пользователя на основании электронных карт и цифровых паспортов полей.

При планировании обработки поля сложной конфигурации стоит задача определения рационального угла направления движения (угла гона), обеспечивающего минимальное число проходов агрегата, минимальное число разворотов и, как следствие, минимального холостого пути агрегата, экономии затрат на производство сельскохозяйственной продукции.

С 2017 года идет активное внедрение беспилотных тракторов и сельскохозяйственных дронов, которые позволяют выполнять основные сельскохозяйственные работы без участия оператора. Оператор может дистанционно контролировать работу трактора через компьютер или планшет в режиме реального времени, а также настраивать новые программы работы. Разработчики обращают внимание, что такие тракторы могут работать на одном поле одновременно с другими сельскохозяйственными машинами, управляемыми людьми.

Исследования с использованием элементов интеллектуальных технологий, позволяющие разработать методику аналитического обоснования рационального угла направления движения агрегатов по полю сложной конфигурации, обеспечивающего экономию затрат на производство сельскохозяйственной продукции, являются актуальными.

Диссертация выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-316-90039: «Разработка интеллектуальной системы управления сельскохозяйственным производством и программно-аппаратного комплекса для высокопроизводительных расчетов по прогнозированию потребности и потреблению ресурсов в онлайн режиме (на примере выполнения уборочно-транспортных процессов в сельском хозяйстве)» (код конкурса: «Аспиранты»), а также в рамках научно-исследовательской работы агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации и электрификации сельскохозяйственного производства», п. 2.1 «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации производства продукции растениеводства», которая утверждена ученым советом университета (номер государственной регистрации 01.200.1-003986).

Степень разработанности темы. Вопросы повышения эффективности работы сельскохозяйственных агрегатов при проведении сельскохозяйственных работ изложены в работах: Федоренко В.Ф., Труфляка Е.В., Смирнова И.Г., Дьячкова А.П., Балабанова В.И., Кузнецова Е.Е., Сазонова Д.С. и других. Теме исследования эффективности сельскохозяйственных работ посвятили труды ученые Германии, США, и других стран. Мировые лидеры по производству сельскохозяйственной техники и оборудования (John Deere, Claas, Ростсельмаш Минский тракторный завод), АО «Петербургский тракторный завод» активно работают над автономной системой вождения. В указанных исследованиях прослеживается необходимость разработки системы управления технологическими перемещениями сельскохозяйственной техники. Особенно это важно в условиях обеспечения продовольственной безопасности страны, импортозамещения технологий и средств, развития технологических платформ, опережающих мировой уровень, и повышения конкурентоспособности отечественных сельскохозяйственных товаропроизводителей.

Объектом исследования являются процессы сельскохозяйственных работ на полях сложной конфигурации.

Предметом исследования являются закономерности формирования управляющих решений по обеспечению эффективного использования машинно-тракторного парка в условиях полей сложной конфигурации.

Цель работы: повышение эффективности использования сельскохозяйственных агрегатов при производстве сельскохозяйственных работ на полях сложной конфигурации путем выбора рационального направления движения.

Поставленная цель может быть достигнута в случае реализации **научной гипотезы**, заключающейся в том, что условная ширина поля сложной

конфигурации зависит от угла направления движения агрегата, при этом существует угол, при котором условная ширина поля минимальна. Движение сельскохозяйственного агрегата под этим углом обеспечивает минимальное количество проходов и разворотов, минимальный холостой путь и минимальные затраты рабочего времени.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Сформировать концепцию подсистемы управления направлением движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации.
2. Установить зависимости для обоснования рационального угла направления движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации.
3. Изучить закономерности влияния угла подхода агрегата к границе поля сложной конфигурации на изменение величины холостого пути.
4. Разработать алгоритм и компьютерную программу для обоснования рационального угла направления движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации, выполнить их апробацию и подтвердить эффективность предложенных решений.

Научная новизна. Результаты диссертационной работы, обладающие научной новизной, заключаются в следующем:

1. Предложена концепция подсистемы управления направлением движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации, отличающаяся наличием элемента искусственного интеллекта.
2. Получены аналитические зависимости для обоснования рационального угла направления движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации, отличающиеся использованием метода многоугольников для представления полей сложной конфигурации и их участков.
3. Выявлены закономерности изменения величины холостого пути от угла подхода агрегата к границе поля сложной конфигурации, отличающиеся учетом параметров полей сложной конфигурации при их представлении методом многоугольников.
4. Разработаны алгоритм и компьютерная программа для обоснования рационального угла направления движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации, отличающиеся учетом параметров полей сложной конфигурации.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные аналитические зависимости позволяют при планировании и в процессе выполнения сельскохозяйственных работ обосновать рациональный угол направления движения агрегата по полю сложной конфигурации.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные алгоритм и компьютерная программа (свидетельство о регистрации программы № 2023610894) для обоснования рационального угла направления движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации позволяют обосновать рациональную схему движения агрегата при планировании сельскохозяйственных работ и тем самым обеспечить эффективное использование машинно-тракторного парка.

Методология и методы исследования. Для достижения поставленной цели и решения задач использованы методы математического и геометрического моделирования, ситуационного анализа, натурные эксперименты. При проведении расчетов и обработки результатов использовали современные компьютеры и применяли программное обеспечение Microsoft Excel, Mathcad.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция подсистемы управления направлением движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации, позволяющая повысить эффективность использования машинно-тракторного парка.

2. Аналитические зависимости для обоснования рационального угла направления движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации, позволяющие при планировании и в процессе выполнения сельскохозяйственных работ обосновать рациональный угол направления движения агрегата по полю сложной конфигурации.

3. Закономерности изменения величины холостого пути от угла подхода агрегата к границе поля сложной конфигурации, позволяющие минимизировать холостые пути при работе агрегатов на полях сложной конфигурации.

4. Алгоритм и компьютерная программа для обоснования рационального угла направления движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации, позволяющие выполнять численные расчеты с высокой производительностью и анализом различных вариантов в подсистеме управления направлением движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена: численной реализацией аналитических зависимостей, использованием апробированных методов исследования, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, применением сертифицированного оборудования, современных компьютеров и программного обеспечения, результатами внедрения в производство.

Результаты диссертационных исследований используются в УНТЦ «Агротехнология», ООО «АВАНГАРД-АГРО-Воронеж», СХП «Рамонское-1», а также в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 35.03.06 «Агроинженерия» и магистров по направлению 35.04.06 «Агроинженерия», что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на международной научной конференции, посвященной 125-летию со дня рождения В.С. Немчинова в 2020 г., г. Москва; II Международной научно-технической конференции «Smart Energy Systems 2021» в 2021 г., г. Казань; конференции «Цифровые технологии в сельском хозяйстве Российской Федерации и мирового сообщества» в 2021 г., г. Ставрополь, а также на ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ в 2019–2024 годах.

Личный вклад соискателя. Личный вклад соискателя заключается в постановке задач исследования, выборе методов, разработке методики исследований, выполнении математических преобразований, получении и реализации на ЭВМ аналитических зависимостей, выполненных лично автором; разработке компьютерной программы для определения рационального направления движения агрегата по полю заданной конфигурации, проведении экспериментов, формулировке выводов, подготовке публикаций по теме диссертации, выполненных при участии автора.

Публикация результатов исследования. По материалам диссертации опубликовано 13 статей, в том числе четыре статьи – в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций; получено одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 138 наименований и 4 приложений. Диссертация изложена на 167 страницах, включает 64 рисунка и 21 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, приведена степень ее разработанности, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, изложены теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, отражены личный вклад соискателя, количество публикаций соискателя по теме диссертации, структура и объем диссертационной работы.

В первом разделе «Анализ существующих направлений движения сельскохозяйственных агрегатов при обработке полей» показано, что внедрение в полеводство цифровых технологий позволяет выполнить анализ условий выполнения сельскохозяйственных операций до выезда агрегатов в поле, провести моделирование операций технологического процесса, используя в качестве основы модели карты сельскохозяйственных полей, выбрать наиболее рациональные режимы возделывания и уборки культур. Для этого необходимы адекватные цифровые математические модели управления обработкой поля, позволяющие аналитическим методом обосновать рациональные рабочие режимы движения агрегатов на поле сложной конфигурации, согласовать работу технологических и транспортных средств. В настоящее время также остро стоит необходимость разработки методики и математических моделей, позволяющих выбрать рациональный путь и угол движения агрегата на поле сложной конфигурации, так как в известных цифровых устройствах отсутствует такая настройка системы.

Однако, исследования, посвященные обоснованию рационального угла направления движения агрегата на поле сложной конфигурации, не проведены. В цифровых паспортах поля не содержатся рекомендации по выбору рационального угла линий гона агрегата в зависимости от ширины захвата ра-

бочих органов агрегата и геометрических параметров не прямоугольной конфигурации поля: длины сторон и углов отклонения границ поля от прямоугольной конфигурации.

Во втором разделе «Теоретическое обоснование выбора направления движения сельскохозяйственного агрегата на полях сложной конфигурации» установлено, что существенное влияние на технико-экономические показатели работы агрегата при выполнении сельскохозяйственной операции оказывают угол подхода агрегата к границе поля и угол линий гона агрегата. Рассмотрена возможность применения предлагаемого автором рационального направления движения агрегата на различных технологических операциях. В качестве примера взяты технологические карты на производство озимой пшеницы, яровой пшеницы, люцерны. Анализ технологических операций позволяет выбрать операции, которые могут быть проведены без ограничения выбора угла направления движения агрегата, операции на которые накладываются ограничения и операции, на которых нецелесообразно использовать предлагаемый метод.

Предлагается в цифровой паспорт поля добавить информацию о величине рационального угла направления движения агрегата и координат точек начала обработки в зависимости от планируемого числа загонок. Исходным объектом исследования принималась Яндекс-карта или карта поля, полученная съемкой с использованием квадрокоптера с последующей обработкой численным методом путем сопоставления элементарных участков траектории агрегата с геометрическим объектом, представляющим поле (рисунок 1). Криволинейные границы на карте поля предлагается спрямить методом наименьших квадратов отрезками прямых линий и полученную геометрическую фигуру анализировать методом многоугольников.

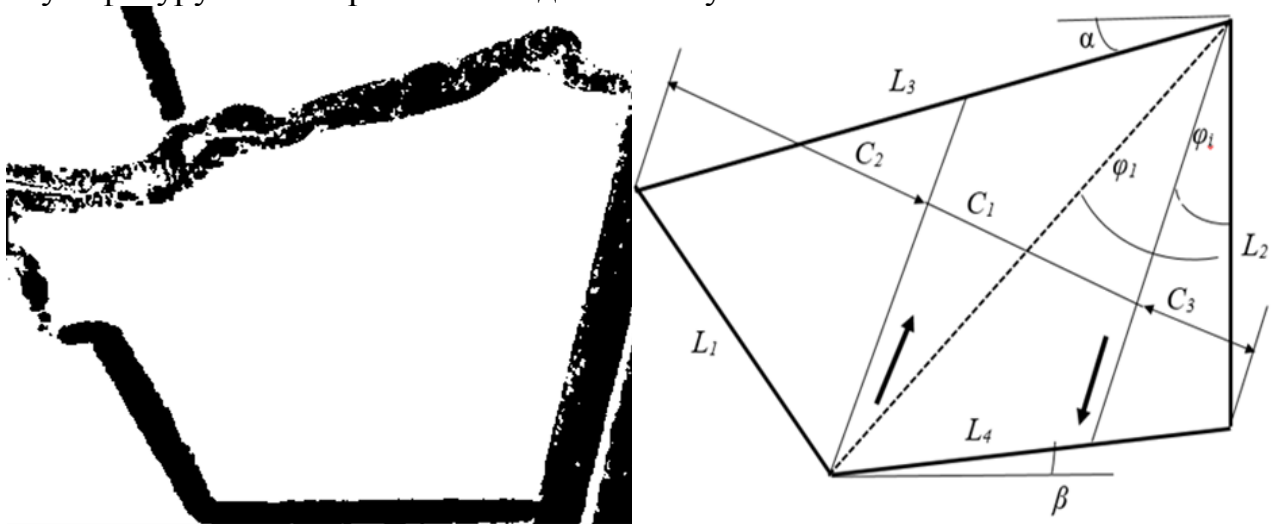


Рисунок 1 – Исходные данные для анализа рационального направления движения агрегата

При подходе агрегата к границе поля не под прямым углом изменяется минимальное расстояние от точки начала разворота агрегата до границы поля: добавляется недобег l_n агрегата до границы из-за смещения точки касания траектории внешней точки агрегата с линией границы поля (рисунок 2).

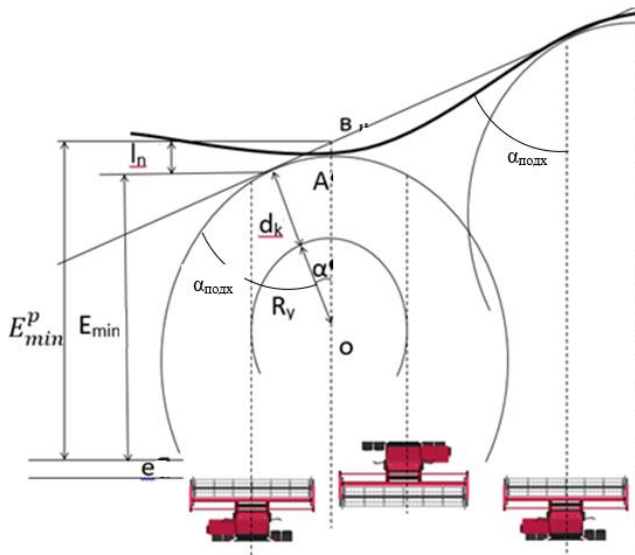


Рисунок 2 – Расчетная схема к определению минимального недобега агрегата до границы поля при подходе его к границе поля не под прямым углом

На рисунке 3 представлен график общей длины недобега агрегата в зависимости от угла подхода к границе поля и габаритного радиуса поворота.

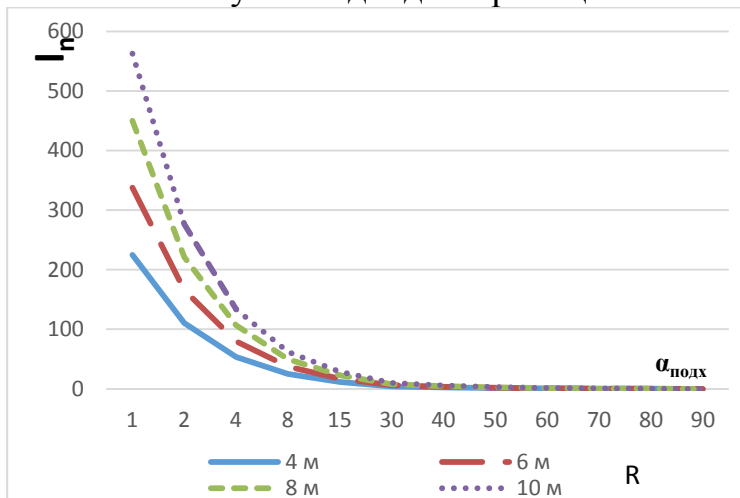


Рисунок 3 – Зависимость общей длины недобега агрегата от угла подхода к границе поля и габаритного радиуса поворота агрегата

График выполнен при габаритном радиусе поворота агрегата: 4, 6, 8 и 10 метров. Величина недобега агрегата при возрастании угла подхода агрегата к границе поля снижается по экспоненциальному закону, а при угле подхода 90° величина недобега агрегата равна нулю. На рисунке 4 представлены графики изменения углов подхода агрегата к границе поля $\alpha^{nod}(\varphi)$ и $\beta^{nod}(\varphi)$ (верхние три графика), и графики зависимости длины L_x разворотной линии от угла линий гона φ_i .

Из графиков рисунка 4 видно, что длина разворотных линий L_x трапециевидного участка C_1 в 2,5 раза меньше, чем длина разворотных линий треугольных участков C_2 и C_3 . Это объясняется тем, что на участке C_1 отсутствуют диапазоны углов направления движения агрегата, где агрегат движется вдоль какой-либо границы поля. На треугольных участках C_2 и C_3 таких три диапазона.

Для того чтобы информационно-аналитическая система предприятия успешно решала поставленные перед ней задачи, предложены следующие аналитические зависимости.

1. Количества проходов агрегата, необходимых для обработки всего поля $n_{п}$ и участка поля $n_{п}^{уч}$:

$$n(\varphi_i) = \frac{C_{\text{усл}}(\varphi_i)}{B_p}; \quad (1)$$

$$n_{\text{уч}}(\varphi_i) = \frac{C_{\text{усл}}^{\text{уч}}(\varphi_i)}{B_p}, \quad (2)$$

где $n(\varphi_i)$, $n_{\text{уч}}(\varphi_i)$ – общее количество проходов агрегата для обработки всего поля, участка поля сложной конфигурации при угле линий гона φ_i ; $C_{\text{усл}}(\varphi_i)$, $C_{\text{усл}}^{\text{уч}}(\varphi_i)$ – условная ширина поля, участка поля при угле линий гона φ_i ; B_p – ширина захвата агрегата, м.

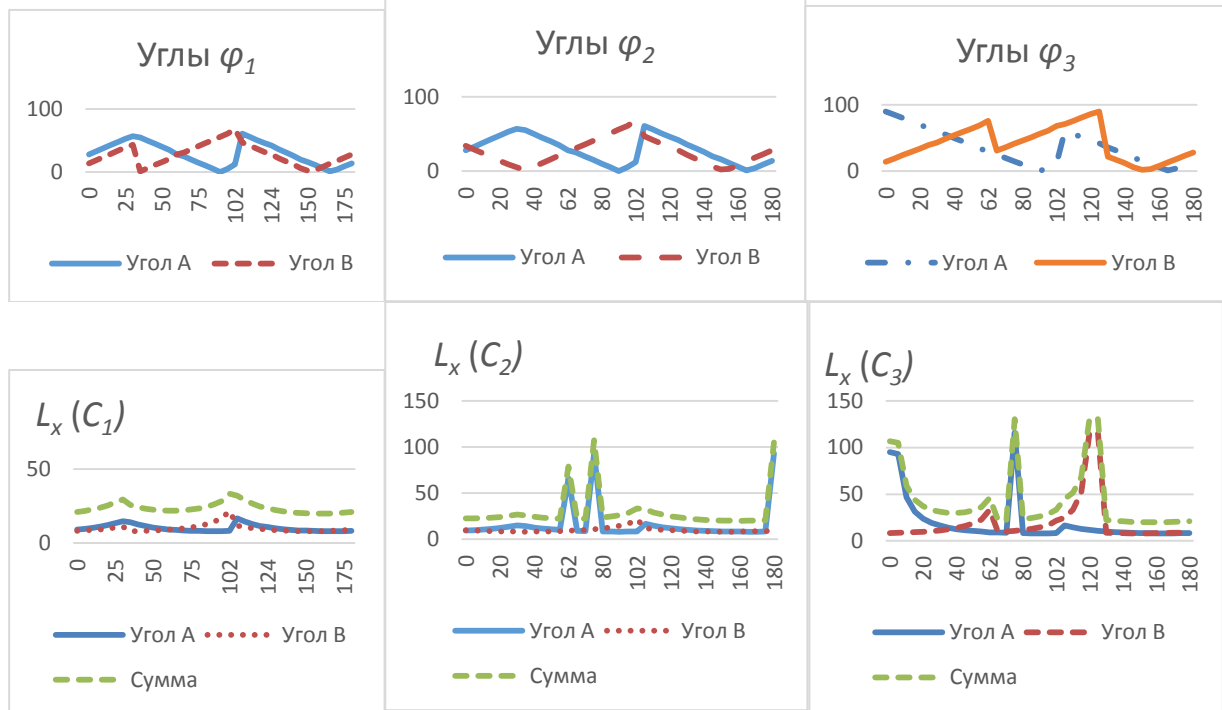


Рисунок 4 – Графики изменения углов $\alpha^{nod}(\varphi)$ и $\beta^{nod}(\varphi)$ подхода агрегата к границе поля (верхние три графика), и графики зависимости длины разворотной линии L_x от угла линий гона φ_i агрегата (нижние три графика)

2. Длины одного рабочего прохода агрегата $l_p^{\text{п}}$ от границы до границы поля с учетом параметров разворота агрегата и геометрических параметров конфигурации поля при подходе агрегата к границе поля под острым углом:

$$l_p^{\text{п}} = l^{\text{п}} - E_{\text{min}}^c - E_{\text{min}2}^c, \quad (3)$$

$$l_p^{\text{п}} = l^{\text{п}} - \left[3,4R_y + 2e + (R_y + d_{\kappa}) \left(\frac{1}{\sin \alpha^{\text{под}}} + \frac{1}{\sin \beta^{\text{под}}} \right) \right], \quad (4)$$

где $l_p^{\text{п}}$ – длина одного рабочего прохода по средней линии движения агрегата (длина гона); $l^{\text{п}}$ – расстояние от границы до границы поля по средней линии движения агрегата для исследуемого прохода; E_{min}^c – ширина поворотной полосы; R_y – габаритный радиус поворота; d_{κ} – радиус поворота по центру агрегата; e – длина выезда агрегата; $\alpha^{\text{под}}$, $\beta^{\text{под}}$ – углы подхода агрегата к границам поля.

3. Суммарной длины рабочего пути агрегата при обработке всего поля $L_{\text{рп}}^{\text{общ}}$, а также трапецевидного и треугольного участков поля $L_{\text{рп}}^{\text{уч}}$:

$$L_{\text{рп}}^{\text{общ}} = \frac{S_{\text{п}}}{B_{\text{п}}} + \Delta, \quad L_{\text{рп}}^{\text{уч}} = \frac{S_{\text{уч}}}{B_{\text{п}}} + \Delta, \quad (5)$$

где $S_{\text{п}}$ – площадь поля, м²; $S_{\text{уч}}$ – площадь участка, м²; Δ – площадь участков перекрытия обработки основного массива поля и поворотных полос, м².

Длина рабочего пути агрегата при обработке всего участка поля без учета рабочих проходов для обработки поворотных полос определяется следующими выражениями.

1. Для трапециевидного участка:

$$L_{\text{рп}}^{\text{трап}} = \frac{l_3 \cos \alpha}{B_{\text{п}}} \left\{ \frac{l_1^{\text{п}} - l_{\text{п}}^{\text{п}}}{2} - \left[3,4R_{\text{у}} + 2e + (R_{\text{у}} + d_{\text{к}}) \left(\frac{1}{\sin \alpha^{\text{под}}} + \frac{1}{\sin \beta^{\text{под}}} \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

Для треугольного участка:

$$L_{\text{рп}}^{\text{треуг}} = \frac{l_3 \cos \alpha}{B_{\text{п}}} \left\{ \frac{l_1^{\text{п}}}{2} - \left[3,4R_{\text{у}} + 2e + (R_{\text{у}} + d_{\text{к}}) \left(\frac{1}{\sin \alpha^{\text{под}}} + \frac{1}{\sin \beta^{\text{под}}} \right) \right] \right\}, \quad (7)$$

где $l_1^{\text{п}}$ – длина от одной границы поля до основания трапеции, м; $l_{\text{п}}^{\text{п}}$ – длина от одной границы поля до другой, м.

2. Суммарной длины холостых проходов при обработке поля $L_{\text{х}}^{\text{п}}$ или участка поля;

$$L_{\text{х}}^{\text{п}} = l_{\text{х}} \left(\frac{C_{\text{учсл}}^{\text{п}}}{B_{\text{п}}} - 1 \right), \quad (8)$$

где $L_{\text{х}}^{\text{п}}$ – суммарная длина холостых проходов при обработке поля или участка поля, м;

$l_{\text{х}}$ – длина холостого прохода агрегата при развороте в конце гона, м.

Для определения общей длины холостого $L_{\text{х}}$ и рабочего $L_{\text{р}}$ пути агрегата при обработке поля предложены зависимости:

$$L_{\text{х}} = \sum_{i=1}^{i=\frac{C(\varphi)}{B}} \left(\frac{R}{\cos \alpha^i(\varphi)} + \frac{R}{\cos \beta^i(\varphi)} \right) + \frac{2F(\varphi)}{B} \sqrt{R^2 - B_{\text{п}}^2}; \quad (9)$$

$$L_{\text{х}} = \frac{C(\varphi)}{B_{\text{п}}} \left(\frac{R}{\cos \alpha_{\text{сп}}(\varphi)} + \frac{R}{\cos \beta_{\text{сп}}(\varphi)} + 2 \sqrt{R^2 - B_{\text{п}}^2} \right) \quad (10)$$

$$L_{\text{р}} = \frac{S}{B_{\text{п}}} - \sum_{i=1}^{i=\frac{C(\varphi)}{B_{\text{п}}}} \left(\frac{R}{\cos \alpha^i(\varphi)} + \frac{R}{\cos \beta^i(\varphi)} \right) - \frac{2F(\varphi)}{B} \sqrt{R^2 - B_{\text{п}}^2}; \quad (11)$$

$$L_{\text{р}} = \frac{S}{B_{\text{п}}} - \frac{C(\varphi)}{B_{\text{п}}} \left(\frac{R}{\cos \alpha_{\text{сп}}(\varphi)} + \frac{R}{\cos \beta_{\text{сп}}(\varphi)} + 2 \sqrt{R^2 - B_{\text{п}}^2} \right) \quad (12)$$

где $L_{\text{х}}$ – общая длина холостого хода, м; $L_{\text{р}}$ – рабочего пути агрегата, м; $C(\varphi)$ – ширина поля при заданном угле φ направления движения агрегата, м; φ – угол заданного направления движения агрегата относительно нулевой линии; S – площадь поля, м²; $B_{\text{п}}$ – ширина захвата агрегата, м; R – радиус разворота агрегата, м; $\alpha^i(\varphi)$, $\alpha_{\text{сп}}(\varphi)$, $\beta^i(\varphi)$ и $\beta_{\text{сп}}(\varphi)$ – углы подхода агрегата к линиям границ поля при входе агрегата на линию прохода и при выходе агрегата с прохода; i – номер прохода агрегата по полю.

Анализ направлений движения агрегата в поле выполнялся методом многоугольников. При разделении геометрической модели поля образуются участки в виде трапеций C_1 , треугольников C_2 , C_3 (рисунок 1) форма и размеры образованных геометрических элементов зависят от угла направления движения агрегата в поле.

Наблюдаются диапазоны углов, в которых параметры фигур сохраняют идентичные закономерности.

Автором выделены шесть диапазонов и предложены аналитические выражения для определения условной (для рассматриваемого угла) ширины каждой геометрической фигуры и углов подхода агрегата к обеим границам для каждого диапазона (таблица 1).

Таблица 1 – Аналитические выражения для определения условной ширины каждой геометрической фигуры и углов подхода агрегата к обеим границам поля для каждого диапазона углов линий гона

Диапазон углов направления движения	Ширина участков	№ формулы	Углы подхода к границам			
			к условно верхней $\alpha^{\text{под}}$		к условно нижней $\beta^{\text{под}}$	
$\varphi_i = 0$	$C_{3i}=0$		$\alpha_{\varphi(i=0)} = \alpha$		$\beta_{\varphi(i=0)} = \beta$	
От $\varphi_i = 0$ до $\varphi_i = \varphi_1$ 29	$C_{1i}=L_4 \cos(\varphi_i+\beta)-F_{3i}$	13	$\alpha_{1i}=\varphi_i + \alpha$	22	$\beta_{1i} = \varphi_i+\beta$	36
	$C_{2i}=L_1 \sin(\varphi_i+\gamma)$	14	$\alpha_{2i}=\varphi_i + \alpha$	29	$\beta_{2i} = 90-\varphi_i-\gamma$	37
	$C_{3i}=L_2 \sin\varphi_i$	15	$\alpha_{3i} = 90- \varphi_i$	30	$\beta_{3i} = \varphi_i+\beta$	38
$\varphi_i = \varphi_1$	$C_{1i}=0$					
От $\varphi_i = \varphi_1$ 29 до $\varphi_i = 90 - \alpha$ 62	$C_{1i}=L_2 \sin(\varphi_i) - F_{3i}$	16	$\alpha_{1i} = 90- \varphi_i$	30	$\beta_{1i} = \varphi_i+\gamma-90$	39
	$C_{2i}=L_3 \cos(\varphi_i + \alpha)$	17	$\alpha_{2i} = 90- \varphi_i$	30	$\beta_{2i} = \gamma-90-\varphi_i$	40
	$C_{3i}=L_4 \cos(\varphi_i + \beta)$	18	$\alpha_{3i} = 90- \varphi_i$	30	$\beta_{3i} = \varphi_i + \beta$	41
$\varphi_i = 90 - \alpha$	$F_{2i}=0$					
От $\varphi_i = 90 - \alpha$ 62 до $\varphi_i=90-\beta$ 76	$C_{1i}=L_1 \sin(180-\varphi_i-\gamma)-F_{3i}$	19	$\alpha_{1i} = 90- \varphi_i$	30	$\beta_{1i} = \varphi_i+\gamma-90$	42
	$C_{2i}=L_3 \sin(\varphi_i+\alpha-90)$	20	$\alpha_{2i} = 90- \varphi_i$	30	$\beta_{2i} = 90-\varphi_i+\gamma$	43
	$C_{3i}=L_4 \cos(\varphi_i + \beta)$	18	$\alpha_{3i} = 90- \varphi_i$	30	$\beta_{3i} = \varphi_i-\beta$	44
$\varphi_i = 90-\beta$ 76	$C_{3i}=0$					
От $\varphi_i = 90-\beta$ 76 до 102 $\varphi_i = 90 + \varphi_2$	$C_{1i}=L_1 \sin(180-\varphi_i-\gamma)-F_{3i}$	19	$\alpha_{1i} = \varphi_i - 90$	31	$\beta_{1i} = \varphi_i+\gamma-90$	45
	$C_{2i}=L_3 \sin(\varphi_i+\alpha-90)$	21	$\alpha_{2i} = \varphi_i - 90$	31	$\beta_{2i}=180-\varphi_i-\alpha$	46
	$C_{3i}=L_4 \sin(\varphi_i+\beta-90)$	22	$\alpha_{3i} = \varphi_i - 90$	31	$\beta_{3i} = \varphi_i-\beta$	47
$\varphi_i = \varphi_2$ 102	$C_{1i}=0$					
От $\varphi_i = \varphi_2$ 102 до $\varphi_i = 180-\gamma$ 124	$C_{1i}=L_3 \cos(180-\varphi_i-\alpha)-F_{2i}$	23	$\alpha_{1i} = \varphi_i - 90$	31	$\beta_{1i} = \varphi_i-90-\gamma$	48
	$C_{2i}=L_2 \sin(180-\varphi_i)$	24	$\alpha_{2i} = \varphi_i - 90$	31		
	$C_{3i}=L_1 \sin(180-\varphi_i-\gamma)$	19	$\alpha_{3i} = \varphi_i - 90+\beta$	32	$\beta_{3i} = \varphi_i-90-\gamma$	49
$\varphi_i = 180-\gamma$ 124	$C_{3i}=0$					
От $\varphi_i=180-\gamma$ 124 до $\varphi_i = 180$	$C_{1i}=L_3 \cos(\varphi_i+\alpha-180)-F_{2i}-F_{3i}$	25	$\alpha_{1i}=180-\varphi_i+\beta$	33	$\beta_{1i} = 180-\varphi_i-\alpha$	50
	$C_{2i}=L_2 \sin(180-\varphi_i)$	26	$\alpha_{2i}=\varphi_i-90$	34	$\beta_{2i} = 180-\varphi_i-\alpha$	51
	$C_{3i}=L_1 \sin(\varphi_i+\gamma-180)$	27	$\alpha_{3i}=180-\varphi_i+\beta$	35	$\beta_{2i} = 180-\varphi_i+\gamma$	52

Ширина геометрической фигуры формирует количество проходов агрегата для обработки рассматриваемого участка, угол подхода агрегата к границе поля определяет длину холостого пробега агрегата.

График зависимости ширины участков поля от угла линий гона (рисунок 5) показывает: с изменением угла φ линий гона изменяется условная ши-

рина геометрических фигур участков C_1 , C_2 , и C_3 , а следовательно, и количество проходов агрегата и, как следствие, путь холостого L_x и рабочего L_p движений агрегата. Анализ данных позволяет обосновать направление угла линий гона с максимальной длиной рабочего хода L_p и минимальной длиной холостого хода L_x : на графике – это угол 62° .

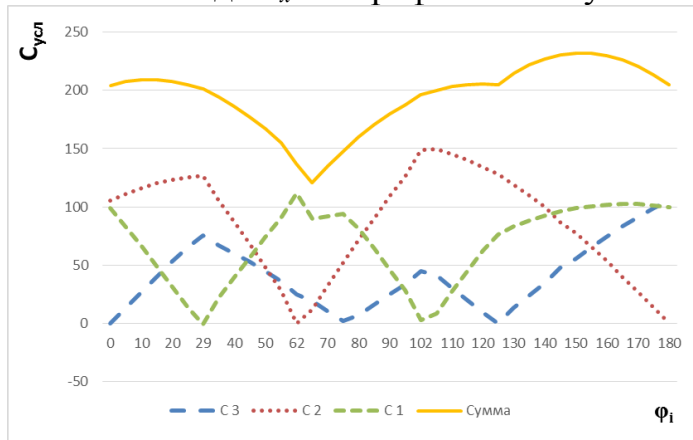


Рисунок 5 – График зависимости ширины участков и суммарной ширины поля от угла линий гона

При выборе оптимального угла линий гона $\phi_i=62^\circ$ холостой путь агрегата может быть снижен по сравнению с направлением вдоль правой границы поля $\phi_i=0^\circ$ на 27 % и при движении перпендикулярно правой границе поля $\phi_i=90^\circ$ на 36 %.

В случае работы двух агрегатов на исследуемом поле работа может быть организована следующим образом: из цифрового паспорта поля выбирается информация о рациональном направлении движения агрегата и координатах точки начала обработки поля под рациональным углом, и передается операторам сельскохозяйственных агрегатов.

По прибытию на поле каждый агрегат подходит к точке начала первого прохода, предусмотренной программой, и начинает движение в загонке под заданным рациональным углом челночным способом. В конце обработки поля проводится обработка поворотных полос и образовавшихся огрехов (рисунок 6).

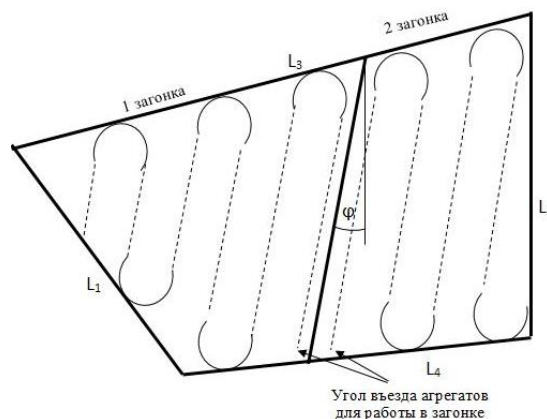


Рисунок 6 – Схема движения двух агрегатов при работе в загонках

В третьем разделе «Программа и методика экспериментальных исследований» представлены: программа экспериментальных исследований, методики проведения экспериментальных исследований и обработки результатов.

Программа экспериментальных исследований состоит из следующих этапов: подготовить графические модели исследуемых полей сложной конфигурации; подготовить разработанный программно-аппаратный комплекс для полевых испытаний; провести экспериментальные исследования влияния направления движения агрегата (угла гона) на эксплуатационные показатели агрегата для каждого экспериментально установленного угла гона путем измерения условной ширины графической модели поля. Экспериментальные исследования проводили для полей № 1, № 2, № 3; проводили экспериментальные исследования для обоснования направления движения агрегатов при планировании сельскохозяйственных работ для полей № 3, № 4, № 5; выполнили полевые испытания влияния угла подхода агрегата к границе поля для разворота на величину его холостого пути и определения сходимости экспериментальных результатов с теоретическими.

При полевых исследованиях использовался метод пассивного эксперимента. В ООО «АВАНГАРД-АГРО-Воронеж» Воронежской области изыскивались участки поля, соответствующие условиям эксперимента, и в процессе выполнения сельскохозяйственных работ производились хронометражные, угловые и линейные измерения.

Электронная карта и графическая модель поля показаны на рисунке 7. Измерения проводились 8-го и 9-го апреля 2023 года. Площадь поля 115,5 гектаров. Длинная прямолинейная сторона поля (1584 м) расположена под углом 23° к направлению «на север».

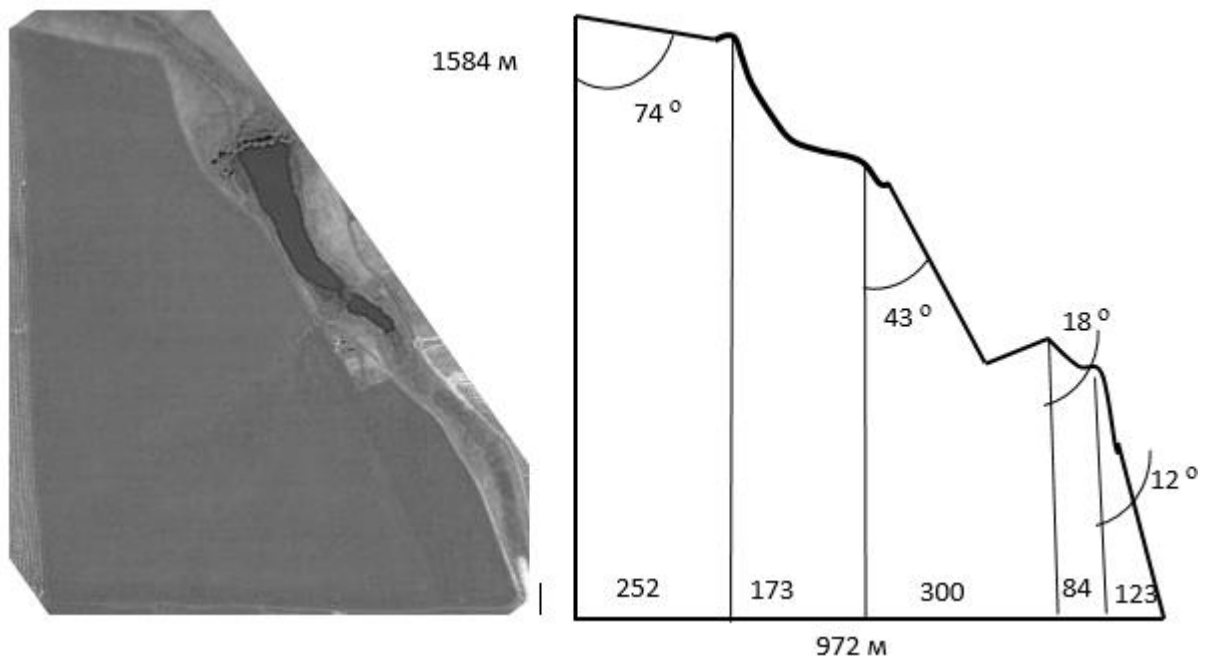


Рисунок 7 – Электронная карта и графическая модель поля

Короткая прямолинейная сторона поля (972 м) перпендикулярна длинной стороне. Правая сторона поля ограничена рельефом местности и представляет собой волнистую линию, на которой имеется возможность выделить спрямляющие прямолинейные отрезки, расположенные под углами к направлению движения агрегата, близкими углам, заданным программой исследования.

Разработаны алгоритм и компьютерная программа для обоснования рационального угла направления движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации, отличающиеся учетом параметров полей сложной конфигурации (рисунок 8).

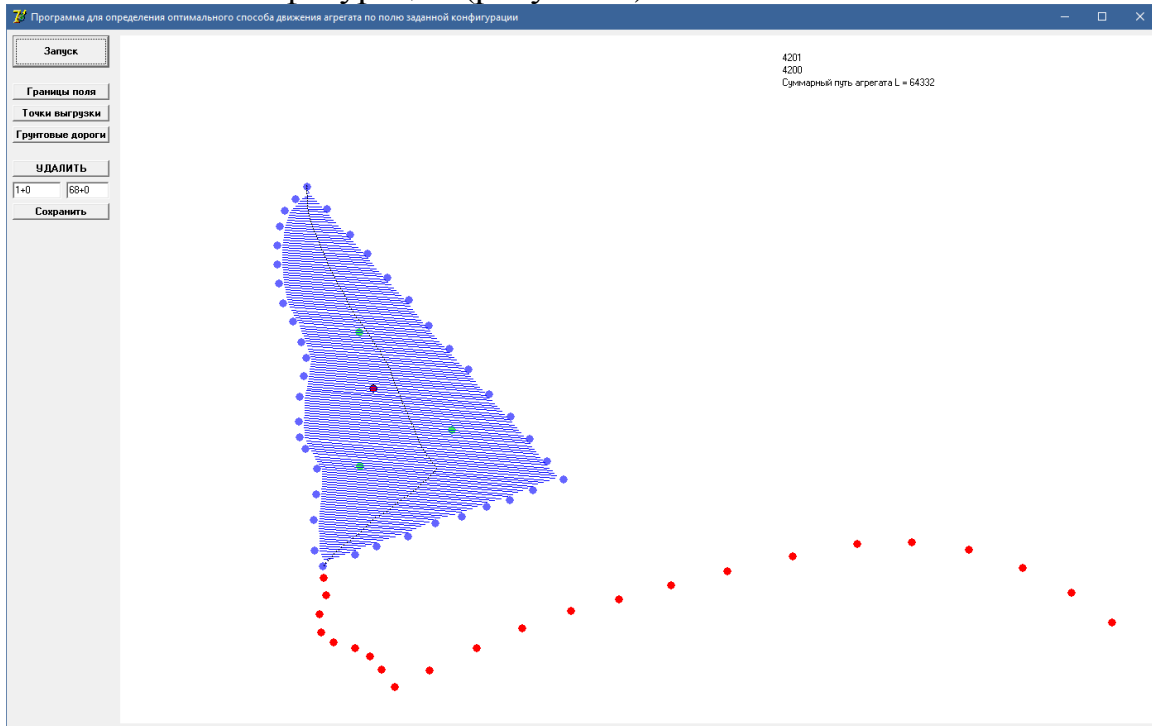


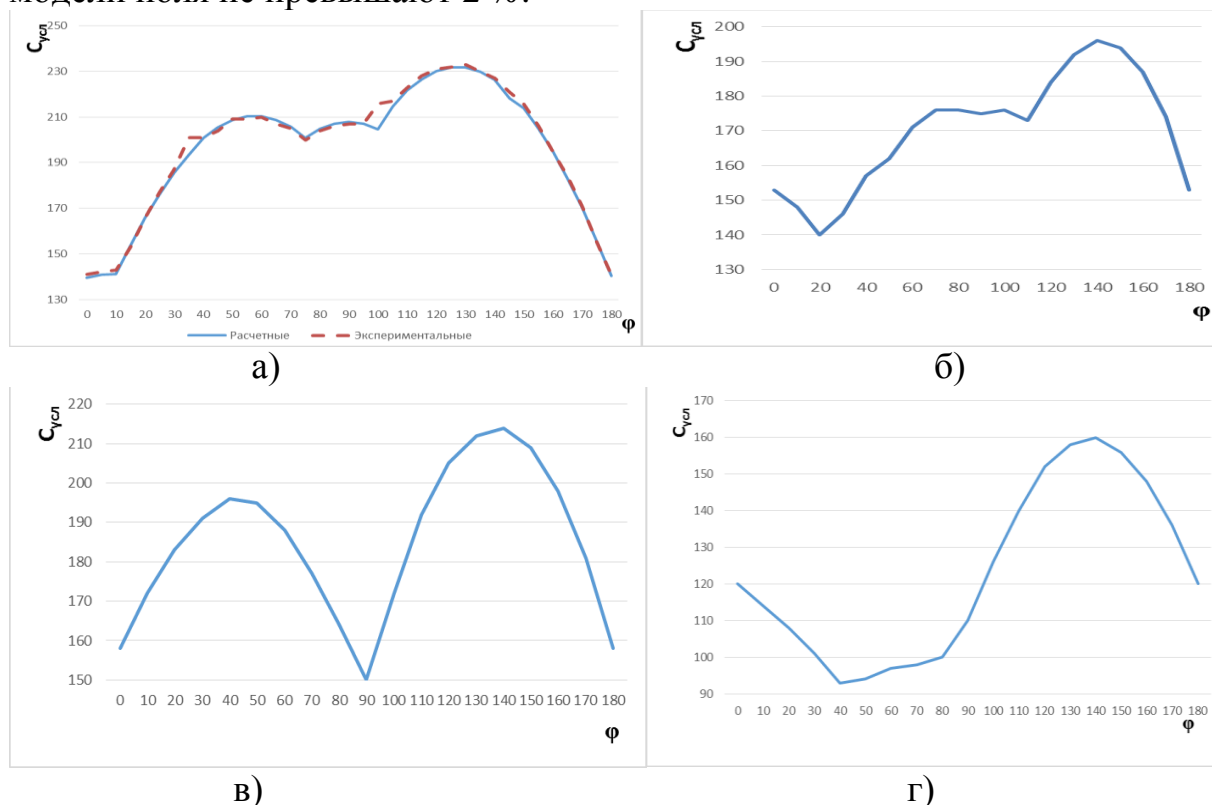
Рисунок 8 – Интерфейсная форма программы для обоснования рационального способа движения агрегата по полю заданной конфигурации

Программа для определения оптимального способа движения агрегата по полю заданной конфигурации (свидетельство о государственной регистрации № 2023610894) предназначена для задания конфигурации поля по спутниковой карте и проверки различных схем движения агрегата по полю с целью определения оптимальной схемы движения. Она позволяет указать на спутниковой карте ключевые точки поля и подъездных дорог, задать направление преимущественного движения агрегата после чего строит траектории движения агрегата с учетом разворотов с заданным радиусом на краях поля и подсчитывает суммарную длину пути агрегата. Программа выводит на экран траекторию движения агрегата и суммарную длину пути. Полученные данные заносятся в цифровой паспорт поля.

В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований направления движения сельскохозяйственного агрегата по полю сложной конфигурации» в качестве графических моделей поля использовались электронные карты реальных полей, расположенных в ООО «АВАНГАРД-АГРО-Воронеж» и СХА «Терновская».

На рисунке 9а представлена модель поля № 1 для уборки травы на сено площадью 71 га. Минимальная условная ширина модели поля формируется при угле гона $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=180^\circ$ и составляет $C_{\min}=141$ мм, при угле направления движения агрегата $\varphi=75^\circ$ составляет $C=201$ мм. Максимальная условная ширина модели поля наблюдается при угле направления движения агрегата $\varphi=130^\circ$ и составляет $C_{\max}=233$ мм.

Отклонения результатов расчета по предложенным формулам зависимости условной ширины поля № 1 от угла направления движения агрегата в сравнении с данными, полученными измерением параметров графической модели поля не превышают 2 %.



а – скашивание травы 71 га (поле № 1); б – уборка ячменя 153 га (поле № 3);
в – уборка озимой пшеницы 95 га (поле № 4); г – скашивание травы 45 га (поле № 5)
Рисунок 9 – Зависимости условной ширины модели поля от угла линий гона

В таблице 2 представлены полученные результаты экспериментальных исследований.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований

Технологические операции и агрегаты	Показатели					
	F	φ	C _{min}	T	B	W
Скашивание травы МТЗ-82.1 + КРН-2,1Б	71	0	141	2,9	5,4	5,4
Предпосевная культивация Кировец К-7М + КПС-12К	147	63	135	0,61	7,7	7,04
Уборка ячменя комбайном ACROS-530	153	20	140	0,51	0,77	0,77
Уборка озимой пшеницы комбайном АГРО-МАШ-3000	95	90	150	0,19	0,31	0,31
Скашивание травы Беларусь 1221+КДП-310	45	40	93	1,14	2,2	2,15

F – Площадь поля, га; φ – рациональный угол гона, град; C_{min} – условная ширина модели поля, мм; T – экономия топлива, %; B – экономия времени, %; W – экономия затрат, %; W – повышение производительности, %

На поле № 3 изменение угла направления движения комбайна при скашивании ячменя от традиционного (вдоль длинной прямолинейной границы поля) до расчетного $\varphi_i=20^\circ$ не дает существенного эффекта: увеличение показателей не превышает 1 %. На поле № 4 при уборке пшеницы направления движения $\varphi_i=0^\circ$ и $\varphi_i=90^\circ$ практически равнозначны: различие показателей не

превышает 1 %. На полях № 1, № 2 и № 5 выбор рационального угла направления движения позволит снизить затраты времени на выполнение сельскохозяйственной операции на 2,2...7,7 % и расход топлива на 1,14...2,9 %, увеличить производительность агрегата на 2,15...7,04 %.

В пятом разделе «Экономическое обоснование предложенных решений» приведен расчет экономических показателей при использовании предложенных рекомендаций рационального направления движения агрегата по полю сложной конфигурации. Результаты экономической оценки показали: предложенное направление движения агрегата по сравнению с направлением по длинной стороне гона позволяет достигнуть снижения эксплуатационных затрат до 14 руб/га и экономии затрат труда на 0,01 чел-ч/га. Годовой экономический эффект от применения рационального направления движения агрегата может достигнуть: при предпосевной культивации (площадь поля 147 га) – 23814 руб.; при скашивании травы (площадь поля 45 га) – 7560 руб. Применение предложенного направления движения агрегата экономически целесообразно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Концепция подсистемы управления направлением движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации предусматривает в подсистеме элемент искусственного интеллекта, позволяющий работать с базами событий, знаний и формирования решений, способный выбрать из базы знаний, необходимые математические модели, описывающие конфигурацию исследуемого поля, выполнить расчеты, определить рациональный угол направления движения агрегата и передать данные в навигационную систему машины.

2. Полученные при теоретических исследованиях аналитические зависимости позволяют при заданных значениях угла направления движения агрегата, ширины захвата рабочих органов агрегата и геометрических параметров конфигурации поля (длины сторон и углов отклонения границ поля от прямоугольной конфигурации) рассчитать:

- условную ширину поля и участка поля;
- количество проходов агрегата, необходимых для обработки всего поля и участка поля;
- длину одного рабочего прохода агрегата от границы до границы поля с учетом параметров разворота агрегата и геометрических параметров конфигурации поля при подходе агрегата к границе поля под острым углом;
- общую длину рабочего пути агрегата при обработке всего поля, а также трапециевидного и треугольного участков поля;
- суммарную длину холостого пути при обработке поля или участка поля.

Для численной реализации указанных аналитических зависимостей разработаны алгоритм и компьютерная программа, интегрированные в подсистему управления направлением движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации.

3. При подходе агрегата к границе поля под острым углом холостой путь увеличивается по сравнению с обработкой прямоугольного участка поля

на величину недобега агрегата до границы поля. Полученные зависимости угла подхода агрегата к границе поля от угла направления движения агрегата и угла отклонения границы поля от прямоугольной конфигурации позволяют вычислить рациональное значение угла подхода агрегата к границе поля при планировании сельскохозяйственных работ.

4. Отклонение результатов расчета по предложенным формулам от условной ширины поля для заданных углов линий гона агрегата, полученных измерением параметров геометрической модели поля, не превышают 2 %, а при полевых испытаниях – 10,2 %.

5. Применение предложенных решений позволяет повысить производительность сельскохозяйственных агрегатов при возделывании сельскохозяйственных культур за счет выбора рационального направления движения агрегата и более точного согласования работы технологических и транспортных средств до 7 % и обеспечивает годовой экономический эффект:

- при предпосевной культивации (площадь поля 147 га) – 23814 руб.;
- при скашивании травы (площадь поля 45 га) – 7560 руб.

6. Целесообразно рекомендовать алгоритм и компьютерную программу для обоснования рационального направления движения сельскохозяйственного агрегата по полю сложной конфигурации для использования в подсистеме управления направлением движения сельскохозяйственных агрегатов по полю сложной конфигурации.

7. Перспективы дальнейшей разработки темы состоят в изучении процессов управления движением сельскохозяйственных агрегатов по полям сложной конфигурации с применением систем навигации, искусственного интеллекта для оптимизации реализуемых технологических процессов по критериям эффективности использования машинно- тракторного парка.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ СОИСКАТЕЛЕМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Моделирование процессов функционирования транспортных и технологических машин на примере уборки зерновых культур / Пухов Е.В., Астанин В.К., Следченко В.А., Мешкова С.С., Волков В.С. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 12. – № 3(62). – С. 19–25.

2. Пухов Е.В. Разработка имитационной модели движения сельскохозяйственных агрегатов на поле/ Е.В. Пухов, С.С. Мешкова, С.С. Кочкин// Международный технико- экономический журнал. – 2022. – Т. 84. – № 3. – С. 26–36.

3. Пухов Е.В. Результаты моделирования и оценка эффективности движения транспортно-технологических машин на поле/ Е.В. Пухов, С.С. Мешкова // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 9(136). – С. 53–64.

4. Мешкова С.С. Обоснование рациональных способов перемещения сельскохозяйственных агрегатов на поле сложной конфигурации/ С.С. Мешкова, В.К. Астанин // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 9(148). – С. 7–15.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для определения оптимальной схемы движения агрегата по полю заданной конфигурации/ Е.В. Пухов, С.С. Мешкова, В.В. Посметьев; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I». – 2023610894, 16.01.2023. – Заявка № 2023610299 от 16.01.2023.

Статьи в научных журналах и материалах конференций

6. Астанин В.К. Обзор цифровых технологий и систем управления сельскохозяйственным производством/ В.К. Астанин, С.С. Мешкова// Инновационные технологии в агропромышленном комплексе: Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 23 мая 2023 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 73–78.

7. Астанин В.К. Обзор существующих рекомендаций по обработке сельскохозяйственных полей сложной конфигурации на различных операциях / В.К. Астанин, С.С. Мешкова // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научно-практической конференции, Воронеж, 01-28 марта 2023 г. Том Часть V. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 349–352.

8. Мешкова С.С. Российские аналоги цифровых технологий в сельском хозяйстве/ С.С. Мешкова, Н.С. Лымарь, М.А. Тишковский// Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 110-летию ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Воронеж, 10-11 ноября 2022 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 278–282.

9. Системы навигации ГЛОНАСС в сельском хозяйстве. Преимущества использования / С.С. Мешкова, Е.Г. Аннакурбанова, В.В. Фукс, В.А. Следченко // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 110-летию ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Воронеж, 10-11 ноября 2022 г.– Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 282–285.

10. Пухов Е.В. Оценка схем перемещения сельскохозяйственных агрегатов на поле / Е.В. Пухов, С.С. Мешкова, С.С. Кочкин // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной научно-практической конференции. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – С. 89–94.

11. Пухов Е.В. Пути снижения потерь рабочего времени сельскохозяйственной техники при проведении сельскохозяйственных работ/ Е.В. Пухов, С.С. Мешкова, В.А. Следченко // Доклады ТСХА. – М.: ФГБОУ ВО «Российский ГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева», 2020. – С. 264–267.

12. Повышение эффективности уборочно-транспортных работ при уборке зерновых культур / Е.В. Пухов, В.А. Следченко, Д.Н. Лавренов, С.С.

Мешков// Доклады ТСХА. – М.: ФГБОУ ВО «Российский ГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева», 2019. – С. 11–14.

13. Пухов Е.В. Перспективы использования информационных технологий в транспортных процессах сельскохозяйственного производства / Е.В. Пухов, В.А. Следченко, С.С. Мешкова // Автотранспортная техника XXI века: сборник статей III международной научно-практической конференции. – М.: ФГБОУ ВО «Российский ГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева», 2018. – С. 117–123.

Просим принять участие в работе диссертационного совета 35.2.008.01 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д.13, ученому секретарю Афоничеву Д.Н.

Телефон: +7(473)224-39-39 (доб. 3320),

E-mail: et@agroeng.vsau.ru.