

На правах рукописи

**ИЛЬИЧЁВ Валерий Вячеславович**

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ АГРЕГАТА ДЛЯ ОСНОВНОЙ  
И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства  
механизации сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Киров – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого» и Государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».

Научный руководитель: **Дёмшин Сергей Леонидович**, доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Новожилов Алексей Иванович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия», заведующий кафедрой «Эксплуатация мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин»;

**Созонтов Александр Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», заведующий кафедрой «Эксплуатация и ремонт машинно-тракторного парка»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия»

Защита состоится « 04 » июня 2020 г. в 15.30 часов на заседании диссертационного совета Д 006.048.02 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В.Рудницкого» по адресу: 610007, г. Киров, ул. Ленина, 166 а, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого» и на официальном сайте <http://fanc-sv.ru/>.

Автореферат разослан 08 апреля 2020 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

Глушков Андрей Леонидович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Обработка почвы проводится с целью создания благоприятных водно-воздушного, теплового, питательного баланса и фитосанитарных условий для возделываемых сельскохозяйственных культур. В природно-климатических условиях Северо-Востока европейской части России целесообразно применение системы обработки почвы, предполагающей чередование отвальной и безотвальной основной обработки.

Повышение эффективности почвообработки невозможно рассматривать без решения проблемы снижения энерго- и трудозатрат путём совмещения технологических операций, использования комплектов сменных рабочих органов для расширения числа технологических операций, выполняемых одним орудием, и ряда других приёмов. В связи с этим разработка многофункционального почвообрабатывающего агрегата, способного осуществлять основную безотвальную обработку почвы и комплекс операций мелкой и поверхностной обработки почвы является актуальной.

Работа выполнена в рамках НИР по теме № 0767-2018-0025 «Разработать инновационные технические средства обработки почвы, посева и уборки для ресурсосберегающих технологий возделывания сельскохозяйственных культур» (подраздел 162 Программы ФНИ государственных академий наук на 2013-2020 гг.), № гос. рег. АААА-А16-116021950065-0.

**Степень разработанности темы исследований.** В России накоплен большой опыт разработки многооперационных почвообрабатывающих машин. В ВИМ, СЗ НИИМЭСХ, СибИМЭ, СК НИИМЭСХ, ТатНИИСХ и других организациях разработана разнообразная почвообрабатывающая техника, в т.ч. выполняющая несколько технологических операций за один проход и обеспечивающая потребности сельхозпроизводителей в машинах для основной отвальной, безотвальной, мелкой или поверхностной обработки почвы. Экономический эффект от её применения складывается из улучшения качества обработки почвы, снижения энерго- и металлоёмкости, сглаживания пиков потребности в технике и трудовых ресурсах. В то же время, вопросы выполнения одним орудием технологических операций основной безотвальной и комплекса операций мелкой и поверхностной обработки почвы проработаны недостаточно.

**Цель исследования:** обосновать конструктивно-технологические параметры многофункционального почвообрабатывающего агрегата со сменными рабочими органами для основной безотвальной и поверхностной обработки почвы.

**Задачи исследования:**

- обосновать конструктивно-технологическую схему многофункционального почвообрабатывающего агрегата со сменными рабочими органами для основной безотвальной обработки почвы и комплекса операций мелкой и поверхностной обработки почвы;

- провести теоретические исследования по определению основных параметров размещения рабочих органов многофункционального почвообрабатывающего агрегата;

- определить рациональную схему размещения рабочих органов для основной безотвальной обработки почвы на раме агрегата и их основные параметры;

- оценить эффективность функционирования агрегата для основной безотвальной и поверхностной обработки почвы в полевых условиях;

- провести оценку эффективности использования многофункционального почвообрабатывающего агрегата в производственных условиях.

**Объекты исследования:** технологические процессы выполнения основной безотвальной, мелкой и поверхностной обработки почвы, опытный образец многофункционального почвообрабатывающего агрегата.

**Предмет исследования:** закономерности влияния конструктивно-технологических параметров многофункционального почвообрабатывающего агрегата на тяговое сопротивление его рабочих органов и качество обработки почвы.

**Научную новизну работы** составляют:

- аналитические зависимости для определения основных параметров размещения рабочих органов многофункционального почвообрабатывающего агрегата;

- модель регрессии функционирования многофункционального почвообрабатывающего агрегата, позволяющая определить оптимальные параметры размещения плоскорезущих лап;

- результаты полевого опыта по изучению способов основной и предпосевной обработки почвы на агрофизические, биологические показатели почвенного плодородия, фитосанитарное состояние посевов и урожайность сельскохозяйственных культур.

**Теоретическая и практическая значимость.** На основании теоретических и экспериментальных исследований предложена конструктивно-технологическая схема и обоснованы основные параметры многофункционального почвообрабатывающего агрегата, способного выполнять основную безотвальную обработку почвы и комплекс операций мелкой и поверхностной обработки почвы. Разработана конструкторская документация и изготовлен опытный образец многофункционального почвообрабатывающего агрегата, который используется при выполнении полевых работ в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока и в КФХ «Садовое» Нижегородской области.

Результаты исследований могут быть использованы научными и проектно-конструкторскими организациями в процессе разработки и совершенствования машин и орудий для обработки почвы.

**Методология и методы исследований.** Теоретические исследования выполнены с использованием положений и законов классической ме-

ханики и основ математического анализа. Экспериментальные исследования проводились по стандартным и разработанным методикам. При проведении исследований применена методика планирования эксперимента, экспериментальные данные обрабатывались с помощью программ Microsoft Excel и Statgraphics Plus 5.1.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- конструктивно-технологическая схема многофункционального почвообрабатывающего агрегата;
- аналитические зависимости для определения основных параметров размещения рабочих органов многофункционального почвообрабатывающего агрегата;
- модель регрессии функционирования плоскорежущих лап почвообрабатывающего агрегата и их оптимальные параметры;
- результаты исследования агрегата для основной безотвальной и поверхностной обработки почвы в полевых условиях;
- результаты оценки эффективности применения многофункционального почвообрабатывающего агрегата в производственных условиях.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность основных выводов подтверждена результатами экспериментальных исследований базовой модели многофункционального почвообрабатывающего агрегата, разработанного при участии автора, в том числе в полевых и производственных условиях.

Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на Международных научно-практических конференциях «Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Мосоловские чтения» (Марийский ГУ, г. Йошкар-Ола, 2018 и 2019 гг.), на Международных научно-практических конференциях «Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве» и школе молодых ученых по эколого-генетическим основам северного растениеводства (ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, 2018 и 2019 гг.), на Всероссийских научно-практических конференциях «Актуальные направления развития техники и технологий в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы» (Нижегородский ГИЭУ, г. Княгинино, 2018 и 2019 гг.), на Международной научной конференции «Энергосберегающие агротехнологии и техника для северного земледелия и животноводства» и семинаре для молодых ученых «Методика научных исследований в механизации сельского хозяйства» (ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, 2018 г.).

**Публикация материалов исследования.** По теме диссертации опубликовано в 15 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций

на соискание учёной степени кандидата технических наук, одна статья в издании, входящем в международную базу данных Scopus, а также получены 2 патента РФ на изобретение и полезную модель. Общий объём публикаций составляет 11,17 п.л., из них автору принадлежит 2,92 п.л.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и приложений. Содержание работы изложено на 144 страницах основного текста, включая 41 рисунок, 16 таблиц и список литературы, содержащий 149 источников.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы, сущность выполненной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** «Состояние вопроса и задачи исследования» рассмотрены агротехнические и технологические условия производства продукции растениеводства в регионе Евро-Северо-Востока России, приведён анализ применяемых технологий и почвообрабатывающей техники, сделан обзор теоретических исследований по теме работы.

Отличительной чертой региона является высокий процент мелкоконтурных полей с неровным рельефом и сложной конфигурацией, что снижает эффективность использования широкозахватной почвообрабатывающей техники. Также к особенностям региона следует отнести достаточное или даже избыточное накопление влаги в пахотном горизонте, что делает необходимым проведение вспашки и, как следствие, последующего комплекса мелкой и поверхностной обработки почвы при её подготовке к посеву. Оптимальным вариантом основной обработки почвы является чередование безотвальной обработки и вспашки с интервалом 1...3 года, что позволяет наиболее рационально использовать их положительные стороны и минимизировать влияние отрицательных. Поэтому разработка многофункционального агрегата, предназначенного для выполнения основной безотвальной обработки почвы на глубину до 25 см или завершённого комплекса операций мелкой и поверхностной обработки на глубину до 14 см, адаптированного к условиям региона, является актуальной.

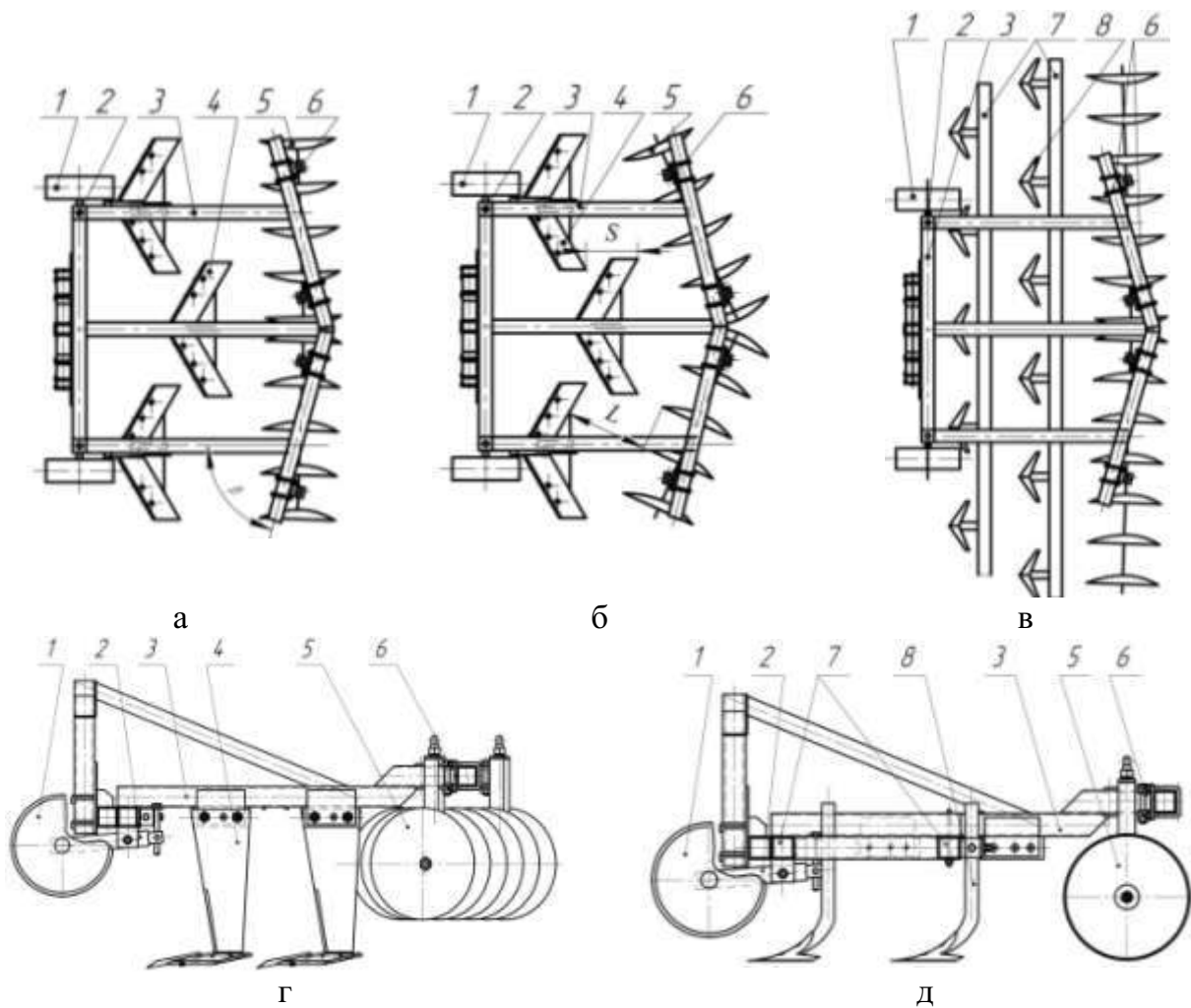
Качество функционирования почвообрабатывающей техники определяется оптимальным размещением рабочих органов на рамах машин, правильно выбранными их параметрами, а также рядом других факторов. Весомый вклад в исследование процессов взаимодействия рабочих органов сельскохозяйственных машин с почвой, обоснование их основных параметров, изучение устойчивости движения машинно-тракторных агрегатов внесли В.В. Бледных, П.Н. Бурченко, П.М. Василенко, В.П. Горячкин, Л.В. Гячев, А.Ф. Жук, Ф.М. Канарёв, А.Д. Кормщиков, М.Н. Летошнев, Я.П. Лобачевский, А.Б. Лурье, Н.К. Мазитов, П.И. Макаров, И.И. Максимов, И.М. Панов, П.Г. Свечников, Г.Н. Синеоков, Г.С. Юнусов и другие учёные.

Во второй главе «Теоретические предпосылки к обоснованию конструктивно-технологических параметров многофункционального почвообрабатывающего агрегата» обоснована конструктивно-технологическая схема агрегата, изучены устойчивость его движения в продольно-вертикальной плоскости, влияние параметров и режима работы рабочих органов на допустимое расстояние между их рядами.

В основе схемы многофункционального почвообрабатывающего агрегата применён принцип блочно-модульности конструкции, т.е. использование универсальной рамы, позволяющей размещать сменные рабочие органы в виде рыхлительных лап, дисковых секций, различных типов борон, катков и т.д., собранных в унифицированные по виду выполняемой операции сменные модули. В данной работе исследуется базовая модель агрегата с основными комплектами сменных рабочих органов, которые должны выполнять основную безотвальную обработку почвы и комплекс операций мелкой и поверхностной обработки на уровне агротребований, а также она должна являться основой для формирования более узкоспециализированных вариантов агрегата, максимально адаптированных к условиям производства путём оснащения сменными адаптерами для дополнительной обработки почвы. С учётом этого предложена схема агрегата (патент № 2679700 РФ), включающего раму 3 с опорными колёсами 1, комплекты сменных рабочих органов – плоскорезующих 4 и стрельчатых культиваторных лап 8 и дисковые секции 5. Колеса и дисковые секции снабжены механизмами регулирования глубины обработки 2, что при жёстком креплении дисковых секций на раме обеспечивает стабильность глубины обработки почвы рабочими органами (рис. 1).

При установке трёх плоскорезующих лап производится основная обработка почвы, при этом две дисковые секции рыхлят верхний слой почвы на глубину до 8 см (рис. 1, а, б, г). При монтаже культиваторных лап 8 на быстросъёмном бруске 7 выполняется поверхностная обработка почвы, причём удлиненные дисковые секции, установленные с минимальным углом атаки  $\beta$ , выравнивают и прикатывают почву (рис. 1, в, д). Кронштейны крепления 6 секций к раме имеют шарнирное сопряжение, позволяющее ступенчато изменять угол атаки в пределах  $0...30^\circ$  за счёт изменения расстояния между кронштейнами. Угол вхождения плоскорезующих лап в почву плавно регулируется (патент № 192093 РФ) с помощью эксцентриковых втулок одного из болтовых креплений в отверстии стойки лапы 4.

Для обоснования схемы размещения плоскорезующих и культиваторных лап относительно дисковых секций исследована устойчивость агрегата в продольно-вертикальной плоскости. На агрегат при обработке почвы воздействуют различные возмущения в виде переменного уклона, неровности и неоднородности почвы по твёрдости, влажности и т.д., которые сообщают ему дополнительные перемещения, скорости и ускорения.



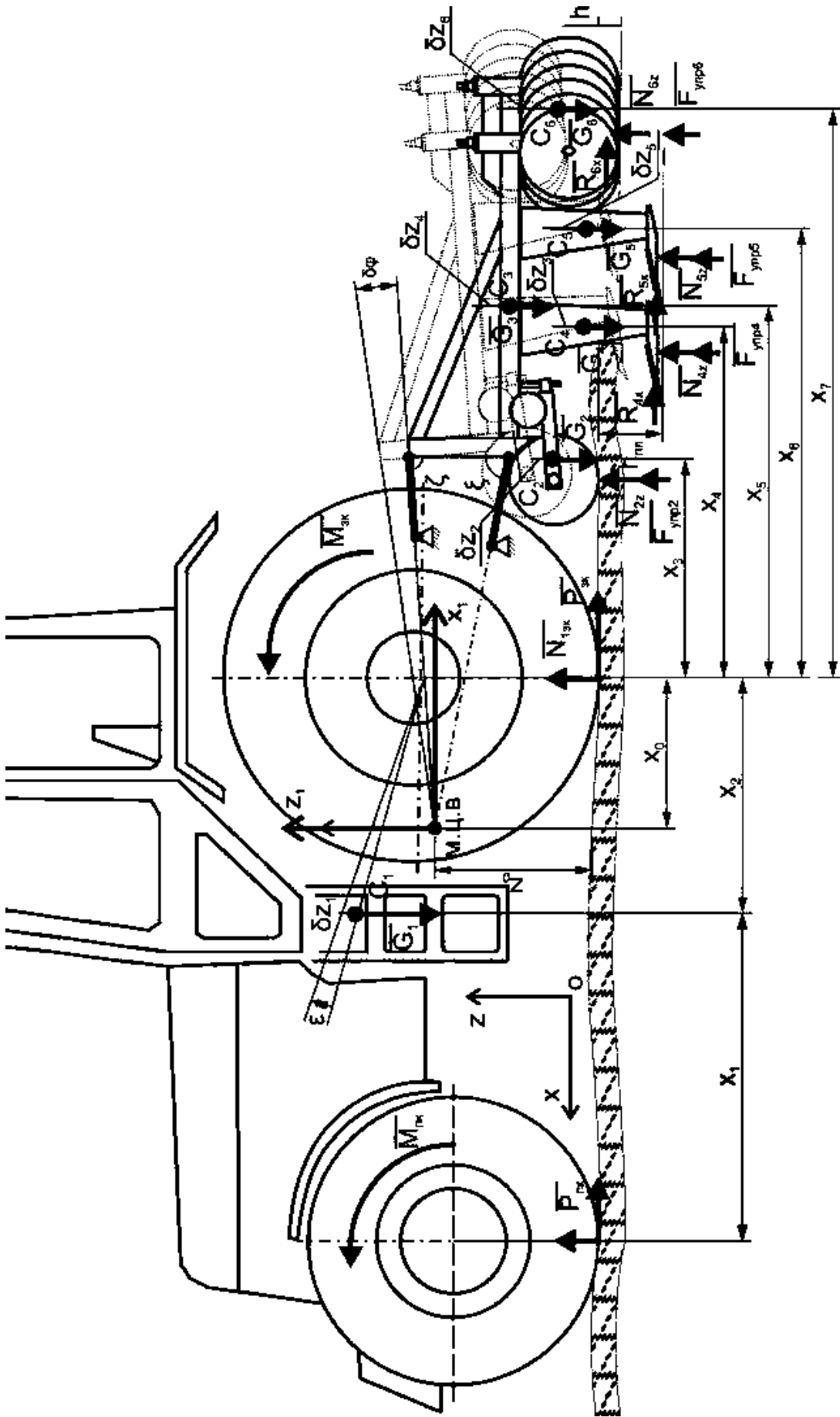
а, б – вид сверху при установке плоскорежущих лап и дисковых секций при минимальном и максимальном углах атаки; в – вид сверху при установке культиваторных лапы и дисковых секций при минимальном угле атаки; г, д – вид сбоку при комплектации агрегата плоскорежущими и культиваторными лапами

Рисунок 1 – Схема многофункционального почвообрабатывающего агрегата

Рассмотрим систему «трактор + орудие» (рис. 2) как двухмассовую, у которой масса трактора  $m_{\text{тр}}$  сосредоточена в его центре масс  $S_1$ , а масса агрегата  $m_{\text{ор}}$ , равная сумме масс рамы, колёс, плоскорежущих или культиваторных лап и дисковых секций – в центре масс орудия  $S_{\text{ор}}$  или приведена к оси его вращения, проходящей через мгновенный центр вращения (м.ц.в.). Примем две координатных системы: одна – подвижная  $x_1y_1z_1$ , движущаяся поступательно и с постоянной скоростью  $v_0 = \text{const}$ , с началом, совпадающим с м.ц.в.; вторая  $Oxyz$  – жёстко связана с поверхностью почвы. В качестве обобщённых координат примем угол  $\varphi_{\text{ор}}$  поворота агрегата относительно м.ц.в., угол  $\varepsilon_{\text{тр}}$  поворота трактора относительно горизонтали и путь  $x_{\text{тр}}$ , пройденный агрегатом.

Распределённые силы, возникающие на рабочих органах и в точке контакта колёс с поверхностью поля, заменим сосредоточенными силами. Если пренебречь силами инерции неуравновешенных масс агрегата, то на него помимо веса  $G_k$  действуют реакции  $N_k$  опорной поверхности.





Координаты центров тяжести:  $C_1$  – трактора;  $C_2$  – опорного колеса;  $C_3$  – рамы агрегата;  $C_4$  и  $C_5$  – первого и второго ряда лап;  $C_6$  – дисковой секции

Рисунок 2 – Расчётная схема машинно-тракторного агрегата (МТА) в продольно-вертикальной плоскости с учётом возможных перемещений

Для описания движения машинно-тракторного агрегата (МТА) воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial \Pi}{\partial q} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}} = Q, \quad (1)$$

где  $T$ ,  $\Pi$  – кинетическая и потенциальная энергия МТА;  $\Phi$  – функция сопротивления;  $q$  – обобщённая координата;  $Q$  – обобщённые силы.

Кинетическая энергия агрегата находится как сумма кинетической энергии трактора  $T_{\text{тр}}$  и навесного орудия  $T_{\text{ор}}$ :

$$T = T_{\text{тр}} + T_{\text{ор}} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6, \quad (2)$$

где  $T_{\text{тр}} = T_1$  – кинетическая энергия трактора, Дж;  $T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  – кинетическая энергия, соответственно, опорного колеса, рамы, первого и второго ряда плоскорезующих лап, дисковой секции, Дж.

После подстановки слагаемых получим:

$$T = \frac{1}{2} (m_{\text{тр}} \dot{x}_{\text{тр}}^2 + m_2 \dot{x}_2^2 + J_2 \dot{\phi}_2^2 + m_3 \dot{x}_3^2 + J_3 \dot{\phi}_3^2 + m_4 \dot{x}_4^2 + J_4 \dot{\phi}_4^2 + m_5 \dot{x}_5^2 + J_5 \dot{\phi}_5^2 + m_6 \dot{x}_6^2 + J_6 \dot{\phi}_6^2) = \frac{1}{2} (m_{\text{ар}} \dot{x}_{\text{тр}}^2 + (m_2(x_0 + x_3)^2 + m_3(x_0 + x_4)^2 + m_4(x_0 + x_5)^2 + m_5(x_0 + x_6)^2 + m_6(x_0 + x_7)^2) \cdot \dot{\phi}_{\text{ор}}^2), \quad (3)$$

где  $m_{\text{ар}} = m_{\text{тр}} + m_{\text{ор}}$  – масса МТА, кг;  $m_{\text{тр}}, m_i$  – масса трактора и  $i$ -части агрегата, кг;  $\dot{x}_{\text{тр}}, \dot{x}_i$  – скорость центра масс трактора и центра масс  $i$ -части агрегата, м/с;  $J_i = m_i r_i^2$  – осевой момент инерции элемента агрегата относительно м.ц.в., кг·м<sup>2</sup>;  $r_i$  – расстояние от центра масс  $i$ -элемента до м.ц.в., м;  $\dot{\phi}_i$  – угловая скорость поворота агрегата в продольной плоскости, с<sup>-1</sup>.

К силам, имеющим потенциал  $\Pi$ , относят силы упругости и тяжести МТА. Трактор рассмотрим как твёрдое тело, опирающееся на опоры с жёсткостями  $c_3$  и  $c_{\text{п}}$ , причём эластичность опор в продольном и поперечном направлении не учитывается. Тогда потенциальная энергия механической системы равна сумме потенциальных энергий трактора и агрегата:

$$\Pi_{\text{тр}} = \Pi_{\text{тр}}^{\text{тяж}} + \Pi_{\text{тр}}^{\text{упр}}; \quad \Pi_{\text{ор}} = \sum \Pi_i^{\text{тяж}} = \Pi_2^{\text{тяж}} + \Pi_3^{\text{тяж}} + \dots + \Pi_6^{\text{тяж}}. \quad (4)$$

Потенциальная энергия силы тяжести:

$$\Pi^{\text{тяж}} = mgz_k, \quad (5)$$

где  $\Delta z_k$  – деформация  $k$ -й упругой опоры трактора, Дж.

Потенциальная энергия силы упругости элементов трактора

$$\Pi^{\text{упр}} = \frac{1}{2} \sum c_k (\Delta z_k)^2. \quad (6)$$

Тогда общая потенциальная энергия МТА

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} \sum_1^2 c_{\text{п}} \left( (x_1 + x_2) \varepsilon_{\text{тр}} - \dot{z}_{\text{п}} \right)^2 - \sum_1^2 c_{\text{п}} \partial_{\text{п}} \left( (x_1 + x_2) \varepsilon_{\text{тр}} - \dot{z}_{\text{п}} \right) + \\ & + \frac{1}{2} \sum_1^2 c_{\text{п}} \partial_{\text{п}}^2 + \frac{1}{2} \sum_1^2 c_3 \dot{z}_3^2 + \sum_1^2 c_3 \partial_3 \dot{z}_3 + \frac{1}{2} \sum_1^2 c_3 \partial_3^2 + m_1 g x_2 \varepsilon_{\text{тр}} + g (m_2 x_3 + \\ & + m_3 x_4 + m_4 x_5 + m_5 x_6 + m_6 x_7) \cdot \varphi_{\text{ор}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Функцию сопротивления МТА можно записать в следующем виде:

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_1^n d_k (\Delta \dot{z}_k)^2, \quad (8)$$

где  $\Delta \dot{z}_k$  – скорость деформации, м/с;  $d_k$  – коэффициент сопротивления.

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_1^2 d_{\text{п}} \left( (x_1 + x_2) \varepsilon_{\text{тр}} \right)^2 - \sum_1^2 d_{\text{п}} \left( (x_1 + x_2) \varepsilon_{\text{тр}} \right) \dot{z}_{\text{п}} + \frac{1}{2} \sum_1^2 d_{\text{п}} \dot{z}_{\text{п}}^2 + \frac{1}{2} \sum_1^2 d_3 \dot{z}_3^2. \quad (9)$$

Для определения обобщённых сил  $Q_i$  придадим механической системе такое виртуальное перемещение, при котором все вариации обобщённых координат кроме  $\delta q_i$  равны нулю, тогда

$$Q_x = \frac{\sum A(\bar{F}_i)}{\delta q_x} = \frac{-R_{4x} \delta x_{\text{тр}} - R_{5x} \delta x_{\text{тр}} - R_{6x} \delta x_{\text{тр}} + \frac{M_{\text{пк}}}{r_{\text{пк}}} \delta x_{\text{тр}} + \frac{M_{\text{зк}}}{r_{\text{зк}}} \delta x_{\text{тр}}}{\delta x_{\text{тр}}} = \frac{M_{\text{пк}}}{r_{\text{пк}}} + \frac{M_{\text{зк}}}{r_{\text{зк}}} - (R_{4x} + R_{5x} + R_{6x}); \quad (10)$$

$$Q_{\varphi} = \frac{\sum A(\bar{F}_i)}{\delta q_{\varphi}} = \left( (R_{4x} + R_{5x} + R_{6x}) z_0 + (R_{4x} + R_{5x}) h_{\text{пл}} + R_{6x} h_{\text{д}} \right) - g \left( (m_2 x_3 + m_3 x_4 + m_4 x_5 + m_5 x_6 + m_6 x_7) + x_0 (m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6) \right) + (N_{2z} \dot{l}_2 + N_{4z} \dot{l}_4 + N_{5z} \dot{l}_5 + N_{6z} \dot{l}_6) + (F_{\text{упр}2} \dot{l}_2 + F_{4\text{упр}} \dot{l}_4 + F_{5\text{упр}} \dot{l}_5 + F_{6\text{упр}} \dot{l}_6), \quad (11)$$

$$Q_{\varepsilon} = \frac{\sum A(\bar{F}_i)}{\delta q_{\varepsilon}} = N_{1\text{пк}} x_1 - N_{2z} \dot{l}_2 - N_{4z} \dot{l}_4 - N_{5z} \dot{l}_5 - N_{6z} \dot{l}_6 - R_{6x} h_{\text{д}} + x_2 (N_{1\text{пк}} - m_1 g) + x_0 (N_{2z} + N_{4z} + N_{5z} + N_{6z}) - r_{\text{зк}} (R_{4x} + R_{5x} + R_{6x}) - r_{\text{зк}} (R_{4x} + R_{5x}), \quad (12)$$

где  $\dot{l}_2, \dot{l}_4, \dot{l}_5, \dot{l}_6$  – расстояние по горизонтали от м.ц.в., соответственно, до точек приложения сил  $R_{2x}, R_{4x}, R_{5x}$  и  $R_{6x}$ , м.

Согласно выражению (1) найдём частные производные от формул (3), (7), (9) и, проведя замену переменных:  $A = \sum_1^2 c_{\text{п}} (x_1 + x_2)^2 + 1$ ;  $B = \sum_1^2 c_{\text{п}} (x_1 + x_2) \dot{z}_{\text{п}} - \sum_1^2 c_{\text{п}} \partial_{\text{п}} (x_1 + x_2) + \sum_1^2 d_{\text{п}} (x_1 + x_2) \dot{z}_{\text{п}}$ , учитывая, что момент (Н·м) от сил сопротивления рабочих органов относительно оси заднего моста  $M_{\text{сопр.зм}} = r_{\text{зк}} (R_{4x} + R_{5x} + R_{6x}) + h_{\text{пл}} (R_{4x} + R_{5x}) + R_{6x} h_{\text{д}}$ , сила тяги трактора (Н) на передней и задней оси  $T_{\text{пк}}$  и  $T_{\text{зк}}$ , сила сопротивления агрегата (Н)  $R_{\text{общ}} = R_{4x} + R_{5x} + R_{6x}$ , приведённый момент инерции агрегата (кг·м<sup>2</sup>) относительно м.ц.в.  $J_{\text{пр.}} = m_2 (x_0 + x_3)^2 + m_3 (x_0 + x_4)^2 + m_4 (x_0 + x_5)^2 + m_5 (x_0 + x_6)^2 + m_6 (x_0 + x_7)^2$ , момент силы тяжести агрегата (Н·м) относительно м.ц.в.  $M_{\text{пр.тяж}} = m_{\text{аг}} g x_0 + g (m_2 x_3 + m_3 x_4 + m_4 x_5 + m_5 x_6 + m_6 x_7)$ , момент силы тяжести (Н·м) относительно оси заднего колеса трактора  $M_{\text{тяж}} = g (m_2 x_3 + m_3 x_4 + m_4 x_5 + m_5 x_6 + m_6 x_7)$ , момент от сил сопротивления рабочих органов (Н·м) относительно м.ц.в.  $M_{\text{сопр}} = (R_{4x} + R_{5x} + R_{6x}) z_0 + (R_{4x} + R_{5x}) h_{\text{пл}} + R_{6x} h_{\text{д}}$ , момент (Н·м) от реакции почвы относительно м.ц.в.  $M_{\text{реак.}} = N_{2z} \dot{l}_2 + N_{3z} \dot{l}_4 + N_{5z} \dot{l}_5 + N_{6z} \dot{l}_6$ , равный в случае устойчивого движения  $M_{\text{пр.тяж}}$ , получим выражения:

$$A \varepsilon_{\text{тр}} - B + m_1 g x_2 = -N_{1\text{пк}} x_1 + M_{\text{реак.}} + x_2 (m_1 g - N_{1\text{пк}}) + M_{\text{сопр.зм}}; \quad (13)$$

$$m_{\text{аг}} \ddot{x}_{\text{тр}} = T_{\text{пк}} + T_{\text{зк}} - R_{\text{общ}}; \quad (14)$$

$$J_{\text{пр.}} \ddot{\varphi}_{\text{ор}} = M_{\text{реак.}} + M_{\text{сопр}} - M_{\text{тяж}} - M_{\text{пр.тяж}} + (F_{\text{упр}2} \dot{l}_2 + F_{4\text{упр}} \dot{l}_4 + F_{5\text{упр}} \dot{l}_5 + F_{6\text{упр}} \dot{l}_6). \quad (15)$$

Уравнения (13)...(15) достаточно полно описывают движение трактора с навесным орудием с учётом их конструктивных параметров (массы  $m_1 \dots m_6$ ; размеров  $x_1 \dots x_7$ ,  $l_2 \dots l_6$ ,  $r_{пк}$ ,  $r_{зк}$ ; тягового усилия на различных осях трактора  $M_{пк}$ ,  $M_{зк}$ ), расположения рабочих органов  $x_3 \dots x_7$ , настройки элементов навески  $x_0$  трактора, возмущений от поверхности поля  $\dot{z}_n$  и возмущений от неравномерностей тягового усилия  $R_x$ ,  $N_z$ . На устойчивость движения МТА наибольшее влияние оказывает значение его приведённого момента инерции и положение его центра масс, а зависимость от тягового сопротивления и силы тяжести не столь значима.

Для сравнительной оценки устойчивости движения МТА в продольно-вертикальной плоскости при разных схемах размещения рабочих органов рассмотрены свободные колебания системы согласно уравнения (15) без учёта их затухания. Считая, что сила тяжести агрегата уравновешена предварительной деформацией почвы при  $z = 0$ , т.е.  $M_{реак.} = M_{пр.тяж}$ , силу реакции  $N_z$  почвы можно заменить силой  $F_{упрз}$  её упругости, тогда

$$\begin{cases} F_{упрz2} = c_2 \cdot z_2 = c_2 \cdot \varphi_{ор} \cdot (x_0 + x_3), \\ F_{упрz3} = c_3 \cdot z_3 = c_3 \cdot \varphi_{ор} \cdot (x_0 + x_4), \\ F_{упрz5} = c_3 \cdot z_5 = c_3 \cdot \varphi_{ор} \cdot (x_0 + x_6), \\ F_{упрz6} = c_4 \cdot z_6 = c_4 \cdot \varphi_{ор} \cdot (x_0 + x_7). \end{cases} \quad (16)$$

где  $z$  – элементарное перемещение, м;  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$  – обобщённые коэффициенты жёсткости колеса, лап и дисковой секции орудия.

Подставляя значения из системы (16) в выражение (15), получим:

$$\ddot{\varphi}_{ор} - \varphi_{ор} \frac{c_2(x_0+x_3)l_2+c_3(x_0+x_4)l_4+c_3(x_0+x_6)l_5+c_4(x_0+x_7)l_6}{J_{пр.}} = \frac{M_{сопр}-M_{тяж}}{J_{пр.}}. \quad (17)$$

Обозначив

$$k^2 = \frac{c_2(x_0+x_3)l_2+c_3(x_0+x_4)l_4+c_3(x_0+x_6)l_5+c_4(x_0+x_7)l_6}{J_{пр.}}; \quad H = \frac{M_{сопр}-M_{тяж}}{J_{пр.}} \quad (18)$$

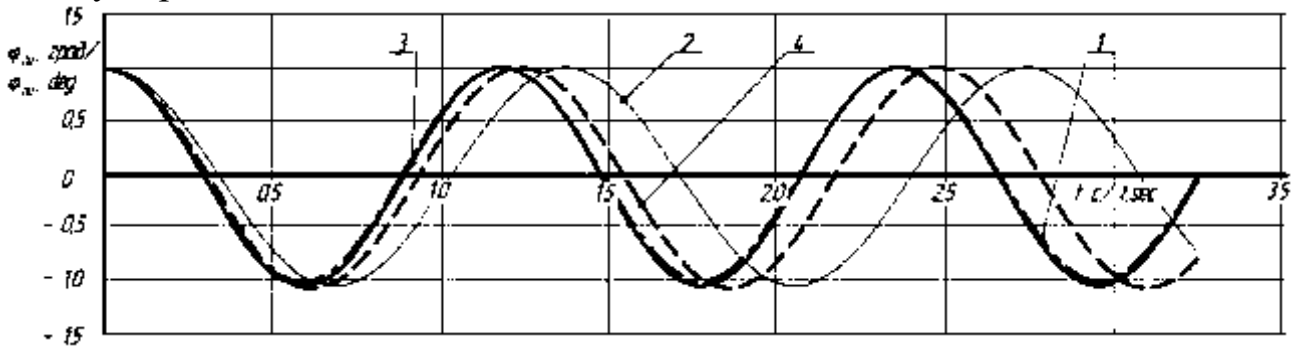
и проведя преобразования, получим уравнение движения почвообрабатывающего агрегата в продольно-вертикальной плоскости:

$$\varphi_{ор} = \left( \varphi_{ор0} - \frac{H}{k^2} \right) \cos kt + \frac{H}{k^2}. \quad (19)$$

Для изучения устойчивости движения агрегата в продольно-вертикальной плоскости сравнены свободные колебания системы при четырёх вариантах размещения рабочих органов. Результаты расчёта периода свободных колебаний системы представлены в виде графиков изменения угла поворота  $\varphi_{ор}$  агрегата при его движении (рис. 3).

В расчётах не учитывались силы сопротивления, обуславливающие затухание колебаний системы, поэтому считаем, чем меньше время до первого пересечения оси  $t$ , тем быстрее возврат рабочих органов в поле допуска и, следовательно, более устойчивое движение МТА. Так, время периода колебаний для варианта расположения плоскорежущих лап впереди дисковых секций составило 1,213 с, позади – 1,385 с, т.е. меньше на

13,3%. При установке культиваторных лап впереди дисковых секций период свободных колебаний составил 1,204 с; позади – 1,253 с; разница между вариантами составляет 4,22%.



1 – плоскорезущие лапы + дисковые секции; 2 – дисковые секции + плоскорезущие лапы; 3 – культиваторные лапы + дисковые секции; 4 – дисковые секции + культиваторные лапы

Рисунок 3 – Изменение периода свободных колебаний агрегата в зависимости от схемы размещения его рабочих органов

Для компактности конструкции агрегата необходимо определить рациональное расстояние между рядами плоскорезущих лап и дисковых секций, которое зависит от траектории пласта после схода с лемеха лапы. На пласт почвы (рис. 4, а) действуют силы тяжести  $G$ , трения пласта о плоскость клина  $F$ , динамического давления пласта  $P_d$ , реакции недеформированной почвы  $R$ . Условием движения пласта по лемеху является положительная сумма проекции всех сил на ось  $OX$ .

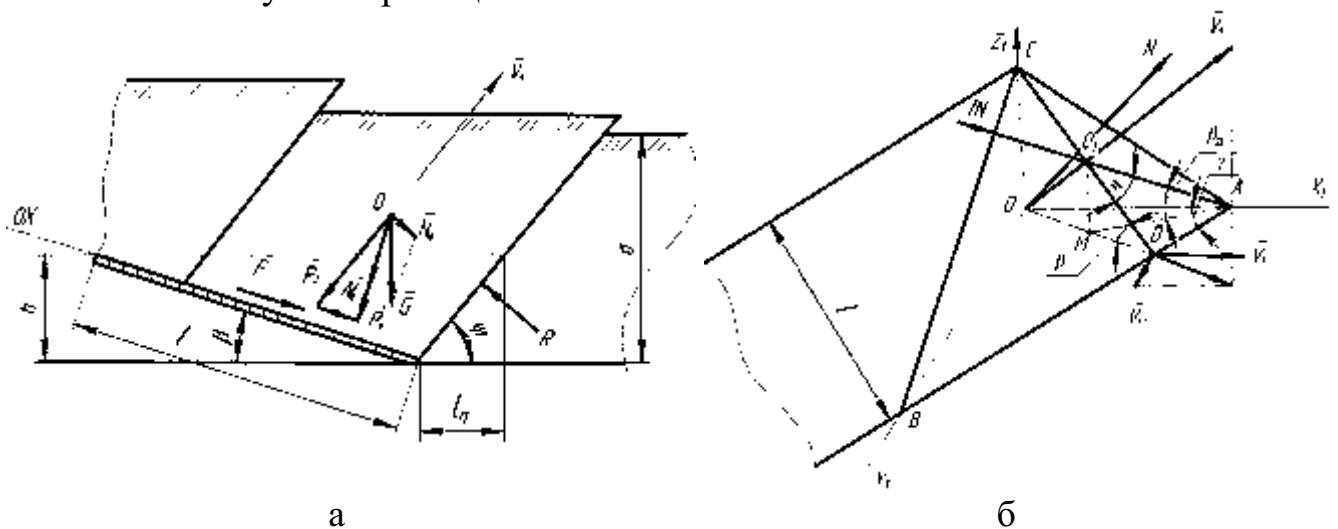


Рисунок 4 – Схемы взаимодействия пласта почвы с клином в продольно-вертикальной плоскости (а) и перемещения пласта почвы по лемеху, расположенного под углом  $\gamma$  к направлению движения агрегата (б)

Дифференциальное уравнение движения пласта по лемеху имеет вид:

$$\frac{mdV_x}{dt} = \frac{V^2 \cdot a \cdot b \cdot \rho \cdot \sin \beta}{g \cdot \operatorname{ctg}(\beta + \psi)} + \frac{h \cdot b \cdot \sigma_{\text{сп}} \sin(\beta + \psi)}{\sin \psi} - mg \cdot \sin \beta - \operatorname{tg} \varphi \left( \frac{mg \cdot \sin \psi}{\sin(\beta + \psi)} + \frac{V^2 \cdot a \cdot b \cdot \rho \cdot \sin \beta}{g} \right), \quad (20)$$

где  $\beta$  - угол крошения, град.;  $\psi$  - угол сдвига, град.;  $a$  – глубина обработки, м;  $b$  – ширина лемеха, м;  $V$  – скорость агрегата, м/с;  $\rho$  – удельный вес почвы, Н/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – угол трения почвы о поверхность лемеха, град.;  $\sigma_{вр}$  – временное сопротивление почвы сжатию, МПа;  $h$  – высота подъёма пласта, м.

Пласт почвы при установке лемеха с углом раствора  $\gamma$  движется (рис. 4, б) под некоторым углом  $\eta$  к плоскости лемеха. После преобразования уравнения (20), сгруппировав его слагаемые члены

$$A = \frac{\sin \beta}{\operatorname{ctg}(\beta + \psi) \cdot l} - \frac{\sin \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \eta}{l}, \quad B = g \left[ \frac{h \cdot \sigma_{вр} \sin(\beta + \psi)}{\sin \psi \cdot a \cdot \rho \cdot l} - \sin \beta - \frac{\sin \psi \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \eta}{\sin(\beta + \psi)} \right]$$

и решив его при начальных условиях  $t = 0, V_x = 0$ , получим следующее выражение скорости пласта почвы:

$$V_x = \frac{(A \cdot V^2 + B)}{V \cdot \sin \gamma \cdot \operatorname{tg} \psi} \cdot l \cdot \sin \beta. \quad (21)$$

Рассмотрим траекторию движение пласта почвы после схода с лемеха лапы, как тела, свободно брошенного под углом  $\beta_d$  к горизонту. Решая дифференциальное уравнение движения частицы пласта почвы как материальной точки, получим зависимость для определения расстояния  $L$  (м), на которое переместится пласт относительно лемеха лапы:

$$L = \frac{-\operatorname{tg} \beta_d - \sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta_d + 2h \cdot g \left( \frac{V \cdot \sin \gamma \cdot \operatorname{tg} \psi}{(A \cdot V^2 + B) \cdot l \cdot \cos \beta_d \cdot \sin \beta} \right)^2}}{-g \left( \frac{V \cdot \sin \gamma \cdot \operatorname{tg} \psi}{(A \cdot V^2 + B) \cdot l \cdot \cos \beta_d \cdot \sin \beta} \right)^2}. \quad (22)$$

Графическое решение уравнения (22), выполненного при параметрах лемеха и почвы  $\varphi = 35^\circ$ ;  $\varphi' = 45^\circ$ ;  $\rho = 14000$  Н/м<sup>3</sup>;  $\psi = 40^\circ$ ;  $\gamma = 50^\circ$ ;  $\beta = 22^\circ$ ;  $l = 0,12$  м;  $a = 0,20$  м;  $b = 0,35$  м;  $\sigma_{вр} = 10500$  Па представлено на рисунке 5.

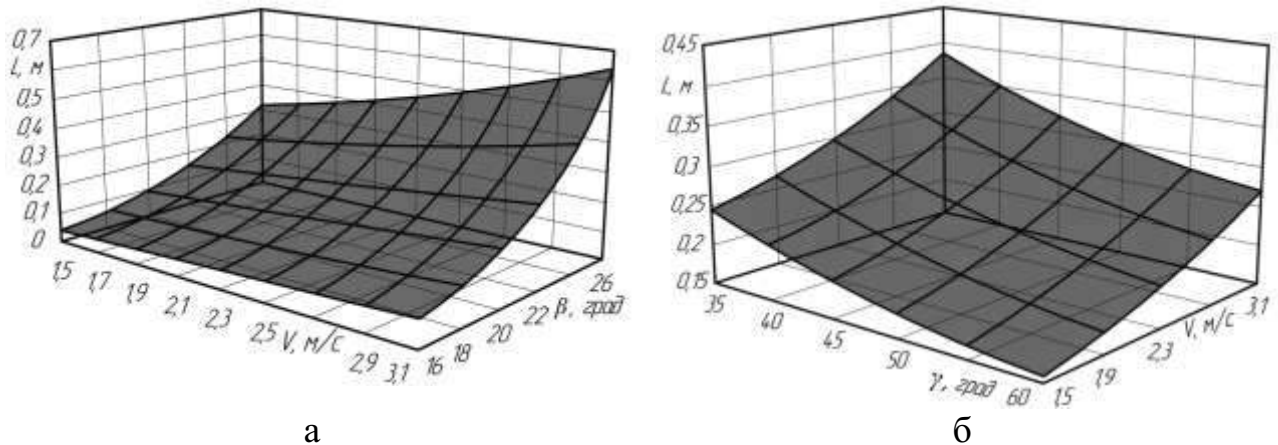


Рисунок 5 – Зависимости расстояния  $L$  (м) отброса пласта от скорости  $V$  (м/с) и параметров лемеха: а – угла крошения  $\beta$  (град.) при угле её раствора  $\gamma = 50^\circ$  и ширине лемеха  $l = 0,12$  м; б – угла раствора  $\gamma$  (град.) при угле крошения  $\beta = 22^\circ$  и ширине лемеха лапы  $l = 0,12$  м

Повышение поступательной скорости агрегата и угла крошения приводят к существенному росту расстояния отброса пласта почвы после схода с лемеха. Изменение угла  $\gamma$  до  $60^\circ$  увеличивает  $L$  на 29...36%, при уменьшении угла  $\gamma$  раствора значительно увеличивается боковой отброс почвы. При безотвальной обработке дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы для плоскорежущих лап с параметрами  $2\gamma = 100...120^\circ$ ,  $\beta = 20...22^\circ$ ,  $l = 0,12...0,14$  м оптимальное расстояние между рядами плоскорежущих лап и дисковыми секциями составляет  $L = 0,50...0,55$  м.

В третьем разделе «**Программа и методика экспериментальных исследований**» приведена программа экспериментальных исследований, представлена лабораторно-полевая установка, описаны использованные приборы и оборудование, общепринятые и частные методики.

Влияние параметров плоскорежущих лап и схемы их размещения на раме орудия на тяговое сопротивление изучено с использованием лабораторно-полевой установки, общий вид которой приведён на рисунке 6.



а

б

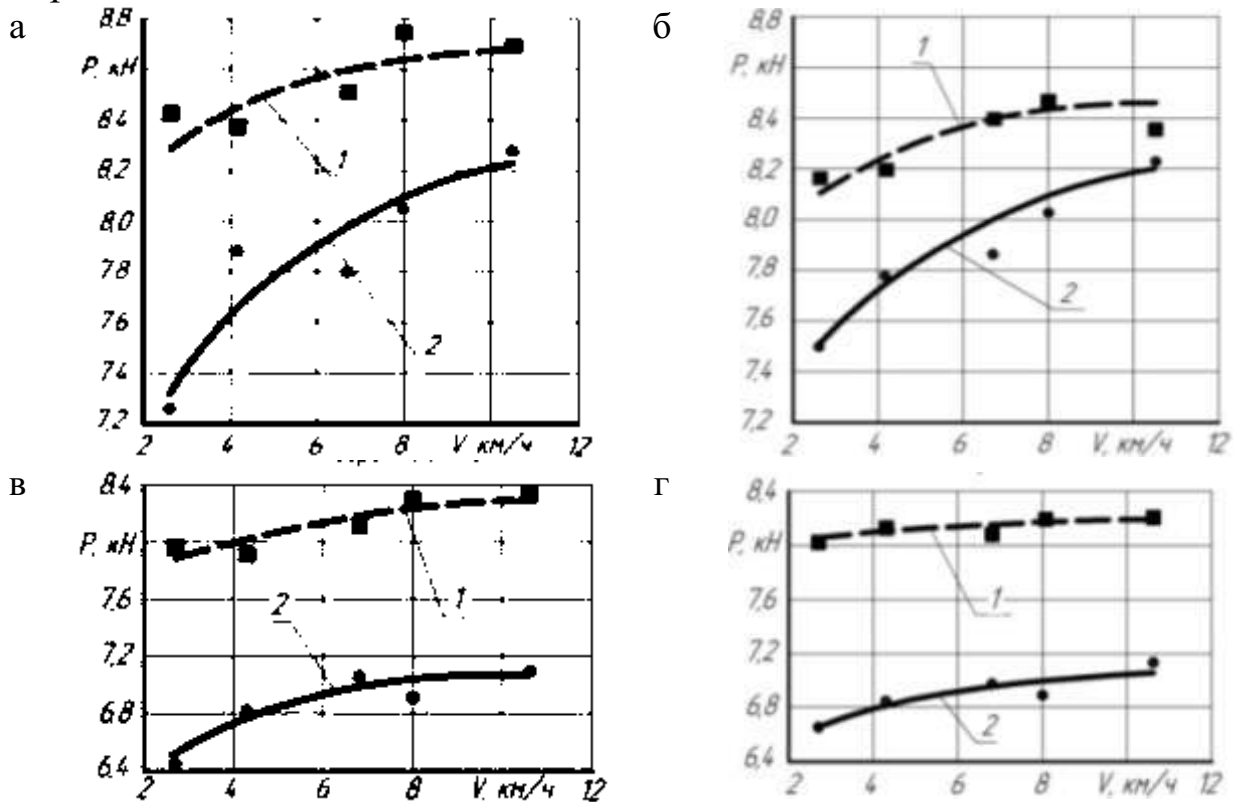
*Рисунок 6 – Лабораторно-полевая установка: а – общий вид; б – расположение динамометра на снице установки*

Исследования проводились согласно ГОСТ, ОСТ и общепринятых методик испытаний почвообрабатывающих машин. Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью программ Microsoft Excel 2007, AGROS 207, Statgraphics Plus 5.1.

В четвёртом разделе «**Результаты экспериментальных исследований**» представлены итоги исследований по изучению влияния схемы размещения и параметров плоскорежущих лап на тяговое сопротивление агрегата, а также результаты оценки эффективности применения опытного образца многофункционального почвообрабатывающего агрегата.

Для определения рационального угла раствора плоскорежущей лапы проведены однофакторные эксперименты для двух вариантов размещения лап с углами раствора  $95^\circ$  и  $110^\circ$  по схеме «прямого» и «обратного» клина со смещением средней лапы относительно боковых лап на  $S = \pm 0,4$  м.

Исследования показали (рис. 7), что вне зависимости от величины скорости и типа агрофона тяговое сопротивление плоскорежущих лап с углом раствора  $2\gamma = 95^\circ$  существенно превышает тяговое усилие при работе плоскорежущих лап с углом раствора  $2\gamma = 120^\circ$ . При основной обработке стерни разница в тяговом сопротивлении плоскорежущих лап, расположенных по схеме «прямого» клина, составляет 5,7...12,1%, для установки лап по схеме «обратного» клина – 4,7...7,4%. В условиях обработки чистого пара эта разница для «прямого» клина равна 14,7...20,2%, для «обратного» клина – 13,4...19,1%.



1 – угол раствора  $2\gamma = 95^\circ$ ; 2 – угол раствора  $2\gamma = 120^\circ$

Рисунок 7 – Влияние угла раствора  $2\gamma$  (град) плоскорежущей лапы при расположении лап по схеме «обратного» (а, в) и «прямого» (б, г) клина на тяговое сопротивление  $P_T$  (кН) при обработке стерни (а, б) и чистого пара (в, г)

Уменьшение тягового сопротивления плоскорежущих лап с углом раствора  $2\gamma = 120^\circ$  вызвано тем, что снижается площадь лемехов и башмака лапы, соприкасающихся с почвой, и, соответственно, объём почвы, подвергаемый деформации. Применение плоскорежущих лап с углом раствора более  $2\gamma = 120^\circ$  вызывает необходимость повышения жёсткости башмака лапы и, как следствие, роста объёма деформируемой почвы.

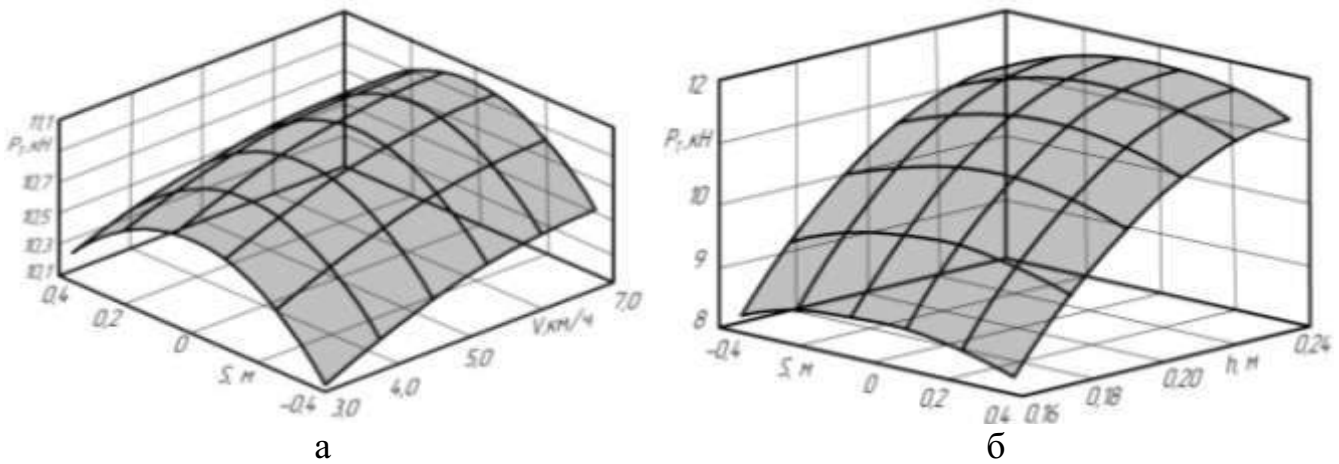
Для более полного изучения влияния параметров размещения плоскорежущих лап по схеме «прямого» и «обратного» клина на тяговое сопротивление плоскореза реализован трёхуровневый план Бокса-Бенкина для трёх факторов. В качестве факторов, определяющих процесс обработки почвы, выбраны скорость агрегата  $V = 3,2; 5,55$  и  $7,90$  км/ч (кодирован-



ное обозначение  $x_1$ ), расположение ( $x_2$ ) средней плоскорежущей лапы относительно боковых  $S = -0,4; 0$  и  $+0,4$  м и глубина обработки ( $x_3$ ) почвы  $h = 0,16; 0,2$  и  $0,24$  м. В качестве критерия оптимизации принято тяговое сопротивление  $P_T$  (кН) плоскорежущих лап. После реализации плана эксперимента и обработки данных получена модель регрессии, проверенная на адекватность по  $F$ -критерию Фишера (вероятность  $p = 0,95$ ):

$$Y_1 = 10,946 + 0,198 \cdot x_1 + 1,569 \cdot x_3 - 0,476 \cdot x_2^2 - 0,771 \cdot x_3^2. \quad (23)$$

Анализ поверхностей отклика (рис. 8) показывает, что при выбранных уровнях факторов основное влияние на тяговое сопротивление плоскорежущих лап оказывает глубина обработки почвы. Скорость движения агрегата на тяговое сопротивление оказывает несколько меньшее влияние.



а –  $h = 0,2$  м ( $x_3 = 0$ ); б –  $V = 5,55$  км/ч ( $x_1 = 0$ )

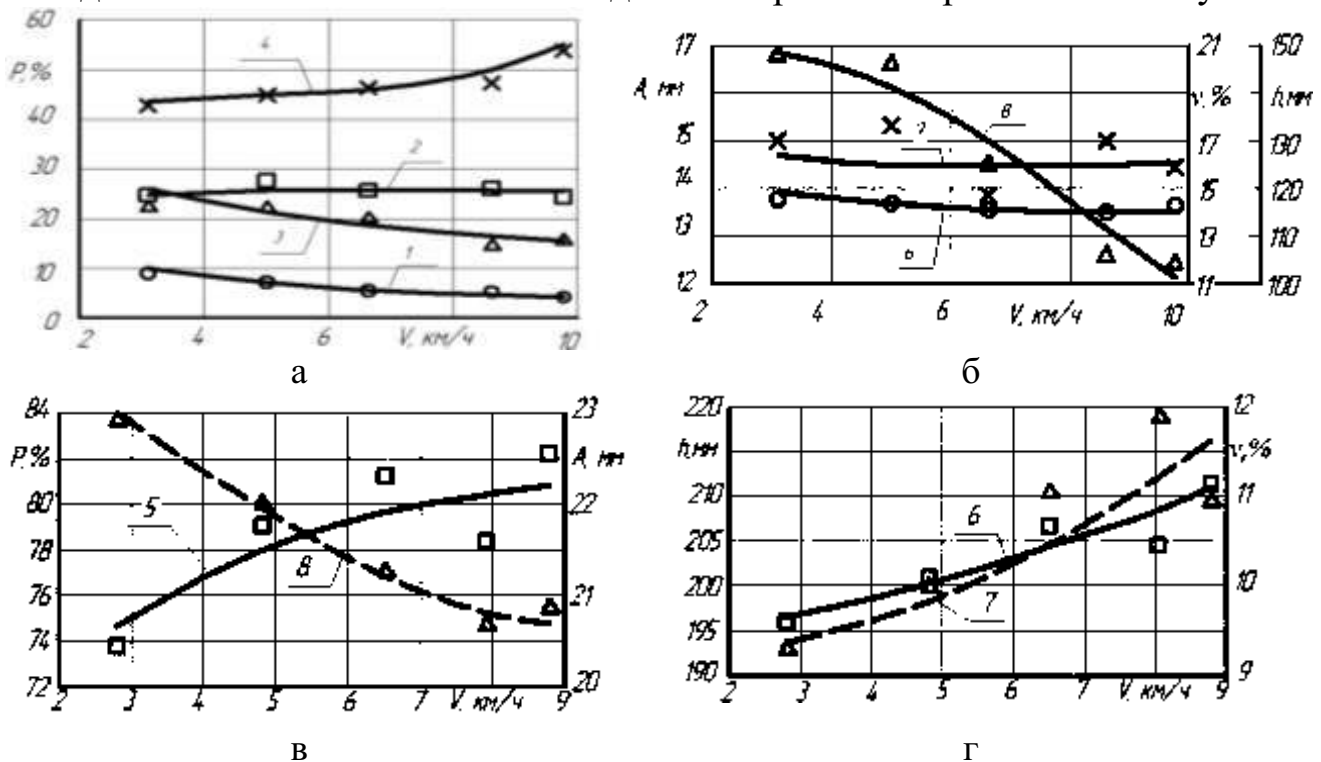
Рисунок 8 – Влияние скорости  $V$  (км/ч) агрегата ( $x_1$ ), положения  $S$  (м) средней плоскорежущей лапы относительно боковых ( $x_2$ ) и глубины обработки  $h$  (м) почвы ( $x_3$ ) на его тяговое сопротивление  $P_T$  (кН)

Расположение плоскорежущих лап на тяговое сопротивление орудия влияет неоднозначно. Установка лап в виде «прямого» клина (средняя лапа смещена вперёд относительно боковых на расстояние  $S = +0,4$  м) снижает тяговое усилие на  $4,3...5,4\%$ , для «обратного» клина – на  $4,2...4,7\%$  по сравнению с однорядной схемой размещения. Значения тягового сопротивления плоскорежущих лап, установленных на расстоянии  $S = \pm 0,4$  м, для обеих схем размещения лап практически одинаковы. Для «обратного» клина при минимальной скорости и глубине обработки  $h = 0,2$  м тяговое сопротивление плоскорежа на  $0,14$  кН меньше по сравнению со схемой «прямого» клина, а при максимальной скорости наблюдается обратная ситуация с разницей в тяговом сопротивлении  $0,06$  кН. Для компактности агрегата более приемлема схема размещения плоскорежущих лап в виде «обратного» клина при расположении средней плоскорежущей лапы относительно боковых лап на расстояние  $S = 0,35...0,40$  м.

По результатам исследований изготовлен опытный образец многофункционального почвообрабатывающего агрегата МПА-2,2/3,0. Для

оценки эффективности его применения на основной и мелкой обработке почвы проведены полевые исследования.

С увеличением скорости движения агрегата для обоих видов обработки почвы степень крошения почвы существенно улучшается (рис. 9), причём при скорости более 6 км/ч содержание фракций почвы достигает значений, соответствующих агротребованиям, и продолжает улучшаться вследствие более интенсивного воздействия рабочих органов на почву.



Содержание фракций почвы: 1 – более 50 мм; 2 – 25...50 мм; 3 – 10...25 мм; 4 – 0...10 мм; 5 – менее 50 мм; 6 – средняя глубина  $h$  обработки; 7 – коэффициент вариации  $v$  глубины обработки; 8 – гребнистость  $A$  поля после обработки  
 Рисунок 9 – Влияние скорости агрегата  $V$  (км/ч) с культиваторными (а, б) и плоскорезущими (в, г) лапами на содержание фракций почвы  $P$  (%), гребнистость  $A$  (мм), среднюю глубину  $h$  (мм) обработки и её коэффициент  $v$  (%) вариации

Показатели стабильности глубины хода рабочих органов для обоих видов обработки почвы соответствуют агротребованиям. При основной обработке почвы её средняя глубина составляет 19,5...21,0 см при установочной глубине обработки 20 см, а с рабочими органами для мелкой обработки почвы – 11,5...12,0 см при установочной глубине обработки 12 см. Гребнистость поверхности поля после прохода агрегата при основной обработке почвы составила 20,7...23,0 мм, при мелкой обработке почвы – 12,5...17,0 мм. Плотность почвы после мелкой обработки составляет 1,14...1,18 г/см<sup>3</sup>, при основной обработке – 1,26...1,32 г/см<sup>3</sup>, что соответствует агротребованиям для предпосевной и зяблевой обработки почвы.

В пятом разделе «Реализация результатов исследований» приведены результаты испытаний опытного образца многофункционального

почвообрабатывающего агрегата МПА-2,2/3,0 (рис. 10, табл. 1), и полевого опыта по оценке эффективности применения агрегата на основной обработке почвы.

а



б



Рисунок 10 – Общий вид многофункционального агрегата МПА-2,2/3,0 со сменными рабочими органами для основной (а) и мелкой (б) обработки почвы

Таблица 1 – Техническая характеристика опытного образца агрегата МПА-2,2/3,0

Показатель	Обработка почвы	
	основная	мелкая
Рабочая скорость, км/ч	5...9	до 12
Ширина захвата агрегата, м	max 2,20 / min 1,95	3,0
Производительность, га/ч	до 1,8	до 3,0
Глубина обработки, см:		
- сменными рабочими органами	14...25	6...12
- дисковыми секциями	до 8	до 6
Ширина захвата лапы, м	0,76	0,33
Количество лап, шт.	3	11
Габаритные размеры, мм:	2300×2500×1250	2150×3150×1150
Масса машины, кг	575	630
Трудоёмкость переоборудования, чел.-ч	не более 3,0	

Испытания опытного образца агрегата МПА-2,2/3,0 с рабочими органами для основной обработки почвы показали, что степень крошения почвы составила 82,3%. При мелкой обработке почвы содержание фрак-

ций почвы более 50 мм составило 5,1%, менее 10 мм – 54,3%, 10...25 мм – 17,5%, 25...50 мм – 23,1%. Величина средней глубины обработки при основной безотвальной обработке почвы равняется 21,0 см при установочной глубине хода 20 см, среднее квадратическое отклонение – 2,2 см, коэффициент вариации – 10,5%, а при мелкой обработке почвы, соответственно, – 11,7 см при установочной глубине обработки 12 см, 1,82 см и 15,5%. После прохода агрегата МПА-2,2/3,0 с рабочими органами для основной обработки почвы гребнистость составила 20,9 мм, для мелкой обработки почвы – 12,6 мм. Плотность почвы после основной безотвальной обработки равна 1,28 г/см<sup>3</sup>, после мелкой обработки – 1,17 г/см<sup>3</sup>.

Заложены полевые опыты для изучения влияния способа основной обработки почвы в виде вспашки на глубину 20...22 см и безотвальной обработки почвы на глубину 18...20 см на урожайность овса сорта Сельма при разных видах предпосевной обработки почвы и посева: культивация КПС-4 и посев сеялкой СЗ-3,6; культивация КБМ-4,2 и посев сеялкой СЗ-3,6; предпосевная обработка почвы с одновременным посевом с помощью агрегата АППН-2,1 (табл. 2).

Таблица 2 – Эффективность технологий возделывания овса

Основная обработка	Предпосевная обработка	Урожайность, т/га	Затраты энергии, ГДж/га	Получено энергии, ГДж/га	КЭЭ	Себестоимость, руб./т	Рентабельность, %
ПЛН-3-35	КПС-4	3,01	20,55	48,73	2,37	3201	87,6
	КБМ-4,2	2,87	20,46	46,35	2,26	3411	76,0
	АППН-2,1	3,46	20,42	56,00	2,74	2869	110,6
МПА-2,2/3,0	КПС-4	3,26	20,31	52,71	2,60	2909	106,4
	КБМ-4,2	3,07	20,21	49,70	2,46	3126	92,0
	АППН-2,1	3,29	19,99	53,25	2,66	2946	104,4

В среднем за два года наибольшую урожайность овса (3,46 т/га) обеспечила технология возделывания с использованием вспашки и применении агрегата АППН-2,1, что обусловило максимальный выход обменной энергии, равный 56,0 ГДж/га, и наиболее высокий коэффициент энергетической эффективности (КЭЭ), равный 2,74. В то же время, в пределах ошибки опыта находятся два варианта безотвальной обработки почвы с использованием КПС-4 и АППН-2,1, коэффициенты КЭЭ которых составляют 2,60 и 2,66. Из трёх вариантов технологии возделывания овса, обеспечивших уровень рентабельности производства зерна выше 100%, два имеют в основе безотвальную обработку агрегатом МПА-2,2/3,0.

Опытный образец агрегата МПА-2,2/3,0 апробирован на безотвальной обработке стерни зерновых и обработке паров на площади 70 га в условиях серых лесных почв в КФХ «Садовое» Нижегородской области.

Экономическая эффективность агрегата МПА-2,2/3,0 рассчитыва-

лась в сравнении с наиболее близкими аналогами: на основной обработке почвы – культиватором-плоскорезом КПП-3Н с приспособлением для дискования почвы; на предпосевной обработке почвы – культиватором КПС-4У с боронами БЗТС-1,0. Годовой экономический эффект от использования агрегата в сравнении с аналогами в сумме 145985 рублей достигнут за счёт его универсальности. Экономический эффект по приведённым затратам составляет 417,1 руб./га, срок окупаемости – 1,85 года.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Предложена конструктивно-технологическая схема многофункционального почвообрабатывающего агрегата (патент № 2679700 РФ на изобретение) со сменными рабочими органами в виде плоскорежущих или стрельчатых культиваторных лап, комбинация которых с дисковыми секциями позволяет выполнять посредством одного технического средства как основную безотвальную обработку почвы на глубину до 25 см, так и завершённый комплекс операций мелкой и поверхностной обработки почвы на глубину до 14 см.

Угол вхождения плоскорежущих лап в почву регулируется с помощью эксцентриковых втулок, а ширина захвата орудия может изменяться за счёт перестановки плоскорезных лап по разные стороны площадок кронштейнов крепления лап на раме агрегата (патент № 192093 РФ на полезную модель).

2. Получены аналитические зависимости (13)...(15), достаточно полно описывающие движение машинно-тракторного агрегата с учётом конструкционных параметров трактора и почвообрабатывающего агрегата, тягового сопротивления рабочих органов и возмущений от неровностей поверхности поля. Для сравнительной оценки устойчивости его движения в продольно-вертикальной плоскости изучено влияние схемы размещения рабочих органов на свободные колебания системы. Установка дисковых секций позади плоскорежущих лап снижает период свободных колебаний агрегата на 13,3%, а культиваторных лап – на 4,22%.

Аналитическая зависимость (22) позволяет определить минимально допустимое расстояние между рядами плоскорежущих лап и дисковых секций, оптимальная величина которого при безотвальной обработке почвы на глубину 0,18...0,20 м составляет 0,50...0,55 м.

3. Получена модель регрессии (23), описывающая зависимость тягового сопротивления агрегата от скорости его движения, положения средней плоскорежущей лапы относительно боковых лап и глубины обработки почвы. Установка плоскорежущих лап по схеме «прямого» клина (средняя лапа установлена впереди боковых на расстоянии 0,4 м) по сравнению с размещением лап в один ряд снижает тяговое усилие плоскореза на 4,3...5,4%, по схеме «обратного» клина (средняя лапа позади боковых на расстоянии 0,4 м) - на 4,2...4,7%. Наиболее приемлемым является исполь-

зование плоскорежущих лап с углом раствора  $2\gamma = 120^\circ$ , обладающих наименьшим тяговым сопротивлением.

4. Экспериментальные исследования многофункционального почвообрабатывающего агрегата выявили, что степень крошения почвы при основной безотвальной обработке дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы на скорости более 6,5 км/ч превышает 80%, при мелкой обработке на скорости выше 7,0 км/ч наличие фракции почвы до 25 мм составляет более 70%. Показатели стабильности глубины обработки, выровненности поверхности и плотности почвы также соответствуют агротребованиям: при основной обработке средняя величина глубины обработки составляет 21,0 см при среднеквадратическом отклонении 2,2 см и коэффициенте вариации 10,5%, гребнистость поверхности поля – 20,9 мм; при мелкой обработке почвы - показатели стабильности глубины обработки соответственно равны – 11,7 см, 1,82 см и 15,5%, гребнистость поверхности поля – 12,6 мм.

Результаты полевого опыта по изучению сочетания способов основной и предпосевной обработки почвы на агрофизические, биологические показатели почвенного плодородия, фитосанитарное состояние посевов и урожайность сельскохозяйственных культур свидетельствуют, что применение опытного образца многофункционального почвообрабатывающего агрегата МПА-2,2/3,0 в качестве машины для основной обработки почвы обеспечивает поддержание показателей исследуемых параметров почвы на уровне вспашки.

5. Многофункциональный почвообрабатывающий агрегат МПА-2,2/3,0 использовался при выполнении основной и предпосевной обработки почвы на опытном поле ФАНЦ Северо-Востока и в КФХ «Садовое» Нижегородской области. Годовой экономический эффект от использования агрегата в сумме 145985 руб. достигнут за счёт его универсальности, обеспечивающей выполнение основной безотвальной и предпосевной обработки почвы. Экономический эффект по приведённым затратам составляет 417,1 руб./га, срок окупаемости - 1,85 года.

### **РЕКОМЕНДАЦИИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ**

1. Для повышения качества предпосевной обработки тяжёлых по механическому составу почв опытный образец многофункционального почвообрабатывающего агрегата следует оборудовать сменными адаптерами для дополнительной обработки почвы, в качестве которых возможно использование катков различной конструкции, штригель-борон, гребнеобразующих приставок и др. Окончательно конструкция и номенклатура сменных адаптеров должна быть определена в процессе дополнительных исследований по данной теме.

2. Работа по дальнейшему совершенствованию процесса основной обработки почвы должна быть направлена на повышение степени крошения слоя, расположенного ниже глубины обработки дисковыми рабочими орга-

нами, что особенно актуально для тяжёлых глинистых и суглинистых почв, и на снижение гребнистости в местах прохода стоек плоскорежущих лап.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

***Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ***

1. Ильичёв, В.В. Многофункциональный почвообрабатывающий агрегат со сменными рабочими органами / В.Л. Андреев, С.Л. Дёмшин, В.В. Ильичёв, Д.А. Черемисинов, Г.С. Юнусов // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 11 (90). – С. 87-102.

2. Ильичёв, В.В. Результаты исследования базовой модели многофункционального почвообрабатывающего агрегата / С.Л. Дёмшин, Д.А. Черемисинов, В.П. Остальцев, В.В. Ильичёв // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2019. – № 2 (20). – С. 172-182.

3. Ильичёв, В.В. Оценка эффективности работы базовой модели многофункционального почвообрабатывающего агрегата / В.Л. Андреев, С.Л. Дёмшин, В.В. Ильичёв, Ф.А. Попов, Е.Н. Носкова // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 5 (96). – С. 34-47.

4. Ильичёв, В.В. Определение оптимального расстояния между рядами плоскорежущих лап и дисковых секций почвообрабатывающего агрегата / С.Л. Дёмшин, Д.А. Черемисинов, В.В. Ильичёв // Пермский аграрный вестник. – 2019. – № 3. – С. 19-29.

5. Ильичёв, В.В. Теоретическое обоснование конструктивно-технологической схемы многофункционального почвообрабатывающего агрегата / С.Л. Дёмшин, В.Л. Андреев, В.В. Ильичёв, А.Ю. Исупов // Вестник НГИЭИ. – 2020. – № 2 (105). – С. 18-31.

***Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS***

6. Ilichev, V.V. Justification of constructive technological scheme of multifunctional unit / V.L. Andreev, S.A. Vasilyev, S.L. Demshin, V.V. Ilichev, D.A. Cheremisinov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 560, № 1 (2019) 012051. doi:10.1088/1757-899X/560/1/012051.

***Патенты***

7. Пат. 2679700 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А01В49/02. Многофункциональный почвообрабатывающий агрегат / Дёмшин С.Л., Андреев В.Л., Черемисинов Д.А., Ильичёв В.В.; заявитель и патентообладатель Нижегород. гос. инженерно-эконом. ун-т. – № 2018110972; заявл. 27.03.2018; опубл. 12.02.2019. – Бюл. № 5. – 10 с.

8. Пат. 192093 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А01В49/02. Комбинированный почвообрабатывающий агрегат / Дёмшин С.Л., Андреев В.Л., Черемисинов Д.А., Ильичёв В.В.; заявитель и патентообладатель Нижегород. гос. инженерно-эконом. ун-т. – № 2018117042; заявл. 07.05.2018; опубл. 03.09.2019. – Бюл. № 25. – 9 с.

***Публикации в журналах***

9. Ильичёв, В.В. Обоснование основных параметров почвообрабатывающего агрегата / В.В. Ильичёв // Евразийский союз учёных. – 2019. – № 8 (65). – С. 34-47.

*Статьи в сборниках научных трудов и материалах научных конференций*

10. Ильичёв, В.В. Оценка эффективности работы многофункционального почвообрабатывающего агрегата / С.Л. Дёмшин, Ф.А. Попов, Е.Н. Носкова В.В. Ильичёв // Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве: материалы IV Международ. науч.-практ. конф. – Киров: ФАНЦ Северо-Востока, 2018. – С. 339-343.

11. Ильичёв, В.В. Определение основных параметров многофункционального почвообрабатывающего агрегата / С.Л. Дёмшин, Р.З. Аскарлов, В.Л. Андреев, В.В. Ильичёв // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. – Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2018. – № 20. – С. 409-413.

12. Ильичёв, В.В. Обоснование конструктивно-технологической схемы многофункционального почвообрабатывающего агрегата / С.Л. Дёмшин, В.Е. Сайтов, Д.А. Черемисинов, В.П. Остальцев, В.В. Ильичёв // Энергосберегающие агротехнологии и техника для северного земледелия и животноводства: материалы Международ. конф. / Под общ. ред. В.А. Сысуева. – Киров: Киров. обл. тип., 2018. – С. 21-27.

13. Ильичёв, В.В. Оценка рентабельности основной обработки почвы многофункциональным агрегатом МПА-2,2/3,0 / С.Л. Дёмшин, Ф.А. Попов, Е.Н. Носкова, В.В. Ильичёв // Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве: материалы V Международ. науч.-практ. конф. – Киров: ФАНЦ Северо-Востока, 2019. – С. 300-304.

14. Ильичёв, В.В. Экспериментальное обоснование оптимальной схемы размещения плоскорезующих лап / С.Л. Дёмшин, В.Л. Андреев, Д.А. Черемисинов, В.В. Ильичёв // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. – Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2019. – № 21. – С. 487-491.

15. Ильичёв, В.В. Техничко-экономическое обоснование разработки многофункционального почвообрабатывающего агрегата / В.Л. Андреев, С.Л. Дёмшин, В.В. Ильичёв, Д.А. Черемисинов // Актуальные направления развития техники и технологий в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. – Княгинино: Нижегород. гос. инженерно-эконом. ун-т, 2019. – С. 86-90.

Подписано в печать 28 марта 2020 г.

Формат 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 8

Отпечатано с оригинал-макета.

ИПЦ Государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования

«Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»  
606340, Россия, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а