

На правах рукописи



КУЛЕШОВ МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЯ И ШТАНГОВАЯ МАШИНА
ДЛЯ ВНЕСЕНИЯ ТВЁРДЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ
УДОБРЕНИЙ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мичуринск – Научноград РФ

2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации и информатизации агрохимического обеспечения сельского хозяйства» (ФГБНУ ВНИМС)

Научный руководитель	Макаров Валентин Алексеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ ВНИМС
Официальные оппоненты:	Личман Геннадий Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно- исследовательский институт механизации сельского хозяйства» (ФГБНУ ВИМ) Старовойтов Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по инновационной работе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно- исследовательский институт картофельного хозяйства им. Лорха», (ФГБНУ ВНИИКХ)
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства» (ФГБНУ СКНИИМЭСХ)

Защита диссертации состоится « 31 » марта 2016 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 220.041.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет» по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д.101., зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545) 9-44-12, E-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке университета ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет» и на сайте www.mgau.ru, с авторефератом - на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации www.vak.ed.gov.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные и скрепленные гербовой печатью, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан « » _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Н.В. Михеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. За период, начиная с 1995 по 2015 годы, объёмы внесения минеральных удобрений в некоторых регионах России сократились до 60-70%. Поэтому проблема эффективного использования минеральных удобрений приобретает особую актуальность.

Научными исследованиями установлено, что при внесении средней дозы питательных элементов в обычных технологиях 1 кг действующего вещества дает прибавку урожая до 4 кг зерна. Также установлено, что от характера распределения дозы удобрений по полю зависит урожайность сельскохозяйственных культур. С ростом неравномерности внесения удобрений значительно ухудшается отзывчивость растений на удобрения.

Неравномерное внесение удобрений оказывает влияние на свойства урожая, а также приводит к загрязнению окружающей среды.

Накопленный практический опыт и научный материал по изучению и описанию технологических процессов внесения минеральных удобрений, а также технические решения по управлению некоторыми параметрами машин являются основой создания новых технических средств. Главный критерий – качество распределения питательных веществ по полю внесения.

Настоящая работа направлена на решение важной народно-хозяйственной проблемы 09.01 – «Разработать высокопроизводительную технику нового поколения для производства приоритетных групп продукции растениеводства» по заданию РАСХН и этапу 09.01.02 «Разработать техническое задание, конструкторскую документацию и экспериментальный образец агрегата для внесения удобрений в период вегетации растений».

Степень её разработанности. Достоверность научных положений подтверждается результатами экспериментальных исследований и их сходимостью с теоретическими результатами, использованием действующих и вновь разработанных методик, новых экспериментальных стендов, обработкой экспериментальных данных с помощью математических программ.

На основании результатов испытаний, выполненных ФГБНУ ВНИМС в СПК «Садовод» Чучковского района Рязанской области, где проведена производственная проверка машины на подкормке зерновых культур в период их вегетации и в процессе подготовки почвы под урожай следующего года. Результаты производственной проверки штанговой машины показали её работоспособность на раздельном внесении трёх видов основной дозы твёрдых минеральных удобрений. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных международных научно-практических конференциях ФГБНУ ВИМ (Москва 2013-2015 гг.), научно-практических конференциях ФГБНУ ВНИМС (Рязань 2012-2015 гг.), и на конференциях ФГОУ ВПО РГАТУ (Рязань 2013-2015 гг.).

Цель и задачи – научное обоснование технологических и технических решений для равномерного рассева удобрений, обеспечивающих рациональное питание растений.

Научная новизна исследования включает:

- направления совершенствования технологических процессов и технических

средств адаптированного внесения удобрений штанговыми машинами;

- математические модели оптимизации технологических параметров штанговых машин для рассева твёрдых минеральных удобрений;
- закономерности процессов дозирования и распределения минеральных удобрений рабочими органами пневматических штанговых машин;
- конструктивно-технологические решения, параметры и режимы работы дозирующего устройства, рабочие органы для распределения минеральных удобрений по поверхности поля и методики технологических расчетов;
- экспериментально-теоретическое обоснование дозирующих и рассеивающих рабочих органов машины;
- предложены уравнения, описывающие закономерности технологического процесса взаимодействия частиц удобрений с рабочими органами при снижении их повреждаемости при дозировании и рассеве;
- способы контроля технологических процессов внесения удобрений, дающих точное дозированное распределение питательных элементов для обеспечения их эффективности и ресурсосбережения.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в теоретическом обосновании конструктивно-режимных параметров пневматической штанговой машины с катушечным высевающим аппаратом, обеспечивающих повышение равномерности высева твёрдых минеральных удобрений на 17-18% по сравнению с серийной машиной МВУ-0,8.

Внедрение (эксплуатационные испытания) пневматической штанговой машины в СПК «Садовод» Чучковского района Рязанской области показали повышение равномерности внесения твёрдых минеральных удобрений. Общий экономический эффект от экономии удобрений, повышения урожайности и реализации полученной дополнительной продукции составил 7200 руб./га.

Методология и методы исследования. Достижение поставленной цели осуществлялось теоретическими и экспериментальными исследованиями.

Теоретическое исследование посвящено определению зависимостей, позволяющих получить рациональные конструктивно-кинематические параметры устройства дозирования и распределения удобрений через эжекторы и рассеивающие поверхности с использованием законов и методов классической механики и математики.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием установки и экспериментальной машины на основании стандартных и частных методик и с применением методов планирования эксперимента.

Обработка результатов, полученных в ходе проведения экспериментов, проводилась методами математической статистики с применением ПЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

- математическое описание процессов внесения удобрений штанговыми высевающими аппаратами с учетом качественных показателей, направленных на повышение равномерности распределения по поверхности поля для внесения;
- закономерности транспортирования и дозирования катушечными высевающими аппаратами с обоснованием метода и способа распределения по каналам штанги;

- математическая модель процесса рассева и распределения частиц минеральных удобрений по поверхности поля;
- методики инженерного расчета катушечного эвольвентного аппарата и работы пневматической системы распределения удобрений по каналам штанги.

Степень достоверности и апробация результатов. На основании результатов испытаний, выполненных ФГБНУ ВНИМС, в СПК «Садовод» Чучковского района Рязанской области проведена производственная проверка машины по подкормке зерновых культур в период их вегетации и в процессе подготовки почвы под урожай следующего года.

Результаты производственной проверки штанговой машины показали её работоспособность на раздельном внесении трёх видов основной дозы твёрдых минеральных удобрений при подготовке почвы под посев озимых.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных международных научно-практических конференциях ФГБНУ ВИМ (Москва, 2013-2015 гг.), ФГБНУ ВНИМС (Рязань, 2012-2015 гг.) и на научно-практических конференциях ФГОУ ВПО РГАТУ (Рязань, 2013-2015 гг.)

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

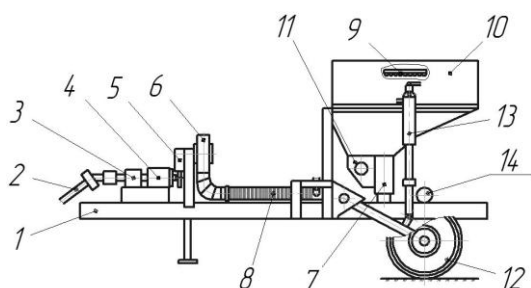
Во введении обоснованы актуальность и степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследований, дана её общая характеристика, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследования» приведен анализ работ по исследуемой теме. Предложены пути совершенствования процесса распределения твёрдых минеральных удобрений, направленные на повышение равномерности рассева частиц удобрений по площади поля.

На основании проведенного анализа научных работ по механизации применения твёрдых минеральных удобрений, созданных трудами известных учёных (М.Г. Догановского, Е.В. Козловского, Н.М. Марченко, Г.И. Личмана, Б.П. Черникова, В.П. Забродина, Б.А. Нефёдова, В.А. Макарова, С.К. Ячкина, В.В. Адамчука, А.А. Амельченко, В.А. Шмони́на, А.С. Мерзликина, R. G. Kachnovsk, D.W. Franzen и других авторов), сформулированы цель и задачи исследований, сущность которых заключается в научном обосновании технологических и технических решений равномерного внесения удобрений заданной дозы для минерального питания растений и в направлении совершенствования процессов и технических средств для внесения удобрений.

Во второй главе «Теоретические исследования по штанговой машине для внесения твёрдых минеральных удобрений» на основе исследований представлена конструктивная схема машины для рассева твёрдых минеральных удобрений (рисунок 1).

В существующей литературе по машинам для внесения твёрдых минеральных удобрений устанавливается поперечная неравномерность и недостаточно полно описывается продольная, выдаваемая дозирующими системами с катушкой, имеющей перемычки между пазами.



6

1 - рама; 2- карданный вал; 3 - обгонная муфта; 4 - эластичная муфта;
5 - ременная передача; 6 - вентилятор;
7 - эжектор; 8 - гофрированная труба;
9 - распределитель удобрений;
10 - бункер; 11 - высевая аппарат;
12 - колесо; 13 – гидроцилиндр;
14-штанга

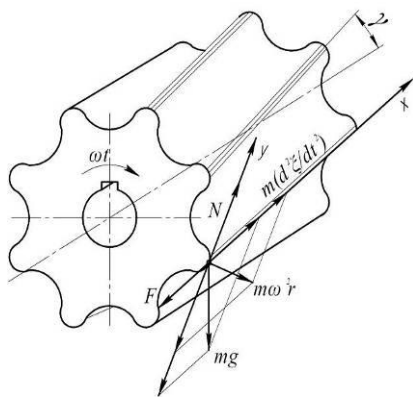
Рисунок 1 - Принципиальная схема машины для рассеивания удобрений

Для реализации сказанного предложена конструкция дозирующего аппарата с катушкой, где паз-выступ выполнен в форме эвольвенты, а желобки - наклонно под некоторым углом к оси вращения вала катушки (патент 151627). Производительность высева для этого случая определяем как

$$V = (\varphi_3 s + \pi D C_n + \pi C_n^2) l_p \rho_m n_{ep}, \quad (1)$$

где C_n - приведенная толщина активного слоя; D - диаметр катушки, м; l_p - длина рабочей части катушки, м; ρ_m - объёмная масса удобрений, кг/м³; n_{ep} - частота вращения вала катушки, с⁻¹; s - площадь желобка катушки, м².

Для обоснования угла наклона желобков катушки α и движения удобрений по ним рассматривается схема сил, действующих на частицу (рисунок 2).



N – сила нормального давления, Н;

F – сила трения, препятствующая сдвигу частицы, Н;

$mD^2 \zeta / dt^2$ – сдвигающая сила, Н;

$G = mg$ – масса частицы, кг;

$m\omega^2 r$ – сила инерции, Н.

Рисунок 2 - Схема сил, действующих на частицу в желобе катушки

Условием относительного перемещения частицы удобрений по желобу катушки будет являться наличие относительного ускорения, то есть:

$$mg \cdot \sin \alpha + mdr \cos(\omega t - \alpha) > [md \cos \alpha + m\omega^2 r \sin(\omega t - \alpha)] \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

$$\sin \alpha + \frac{\omega^2 r}{g} \cos(\omega t - \alpha) > [\cos \alpha + \frac{\omega^2 r}{g} \sin(\omega t - \alpha)] \operatorname{tg} \varphi. \quad (3)$$

В пневматической машине для внесения удобрений частицы из катушки выдаются на верхнюю часть делителя потока. Форма и параметры делителя рассчитываются из максимальной скорости частицы, когда она отрывается от его поверхности (рисунок 3). В этом случае радиус кривизны может быть представлен как

$$\rho = \frac{ds}{d\alpha},$$

а нормальная сила реакции

$$N = mg \cos \alpha + \frac{mv^2}{\rho} \quad (4)$$

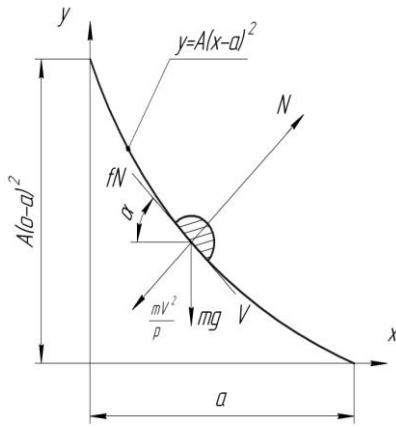


Рисунок 3 - Схема движения частицы удобрений по поверхности делителя

Если уравнение связи задано, то дифференциальное уравнение движения частицы приводится к линейному дифференциальному уравнению Бернулли.

Решая уравнение, приходим к выражению

$$v^2 = e^{-2 \int P_{(x)} dx} \cdot [c + 2 \int Q_{(x)} e^{2P_{(x)} dx} \cdot dx], \quad (5)$$

где c - произвольная постоянная.

В качестве уравнения связи примем параболу вида:

$y = A(x-a)^2$, где $A > 0$ и $a > 0$. Начальные условия при $x=0$, $V=V_0$.

Взяв интеграл от $P_{(x)}$ и $Q_{(x)}$ и проведя необходимые преобразования, получим:

$$v_{(x)}^2 = e^{-2 \operatorname{farctg} 2A(x-a)} \left\{ c + [1 + 4A^2(x-a)^2] e^{1 \operatorname{farctg} 2A(x-a)} + \left(\frac{ag}{f} - \frac{g}{A} \right) [4aF(x-a)(1 + 2 \operatorname{farctg} 2A \cdot (x-a) - 2f \ln[1 + 4A^2(x-a)^2]) \right\}. \quad (6)$$

В момент, когда частица покидает делитель, её скорость определяется как

$$v_{(x-a)}^2 = v_0^2 e^{-2 \operatorname{farctg} 2Aa} - (1 + 4A_2 a^2) \frac{G}{2A} e^{-2 \operatorname{farctg} 2Aa} - \left(\frac{ag}{f} - \frac{g}{f} - \frac{g}{f} \right) \cdot [4Aaf(2 \operatorname{farctg} 2Aa - 1) - 2f \ln(1 + 4A^2 a^2)] + \frac{g}{2A}. \quad (7)$$

При работе пневматической машины удобрения высеваящим аппаратом подаются на направляющий конус (рисунок 4). Скорость движения частицы удобрений V_0 будет зависеть от высоты конуса делителя потока. В этом случае условие свободного падения частицы запишем как

$$F_p = mg - mk_n v, \quad (8)$$

где F_p – равнодействующая сила, Н; m - масса частицы, кг; k_n -коэффициент парусности; v -скорость движения частицы, м/с²; g - ускорение свободного падения, м/с².

$$v = \frac{g}{k_n} \left(1 - e^{-k \sqrt{\frac{2x}{g}}} \right). \quad (9)$$

Если учесть, что сила сопротивления частицы воздушному потоку пропорциональна квадрату скорости, то уравнение можно записать как

$$x dx = (g - k_n \dot{x}^2) dx dt, \quad (10)$$

$$\ddot{x} dx = (d - k_n \dot{x}^2) dx \quad (11)$$

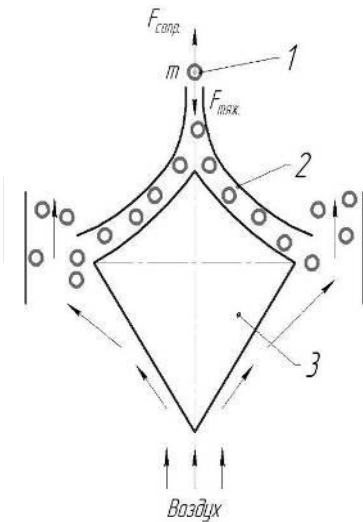


Рисунок 4 - Принципиальная схема делителя потока удобрений

Уравнение движения частицы по гравитационной поверхности представится в виде:

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \alpha - fn. \quad (12)$$

Приняв во внимание, что $\sin \alpha = \frac{dy}{ds}$, $\cos \alpha = \frac{dx}{ds}$, а $\rho = \frac{ds}{d\alpha}$, можно записать:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} = dy^1, \quad \alpha = \operatorname{arctg} y^1, \quad \text{тогда} \quad d\alpha = d(\operatorname{arctg} y^1) \quad \text{или} \quad d\alpha = \frac{1}{1+(y^1)^2} y^{11} dx.$$

Для определения постоянной c воспользуемся начальными условиями при $x=0$, $v=v_0$. Подставляя эти значения в формулу, получим:

$$c = v_0^2 \cdot e^{-2 \operatorname{arctg} 2Aa} - (1 + 4A^2 a^2) \frac{g}{2A} e^{-2 \operatorname{arctg} 2Aa} - \left(\frac{ag}{f} - \frac{g}{f} - \frac{g}{A} \right) \cdot [4Aaf(2 \operatorname{arctg} - 1) - 2f \ln(1 + 4A^2 a^2)]. \quad (13)$$

Подставив найденное значение c в формулу, получим:

$$v_{(x)}^2 = e^{-2 \operatorname{arctg} 2A(x-a)} \left\{ v_0^2 e^{-2 \operatorname{arctg} 2Aa} - [(1 + 4A^2 a^2) \frac{g}{2A} e^{-2 \operatorname{arctg} 2Aa} - \left(\frac{ag}{f} - \frac{g}{f} - \frac{g}{A} \right) [4Aaf] \right. \\ \left. [4Aaf(2 \operatorname{arctg} 2Aa - 1) - 2f \ln(1 + 4A^2 a^2)] + [1 + 4A^2 (x-a)^2] \frac{g}{2A} e^{2 \operatorname{arctg} 2A(x-a)} + \right. \\ \left. + \left(\frac{ag}{f} - \frac{g}{f} - \frac{g}{A} \right) [4Af(x-a)(1 + 2 \operatorname{arctg} 2A(x-a) - 2f \ln[1 + 4A^2 (x-a)^2]) \right]. \quad (14)$$

Выбор пределов изменения A и a показал, что в момент схода частицы с поверхности делителя с коэффициентом трения $f=0,35$, появляются значения $A=0,03$, $a=60$ мм.

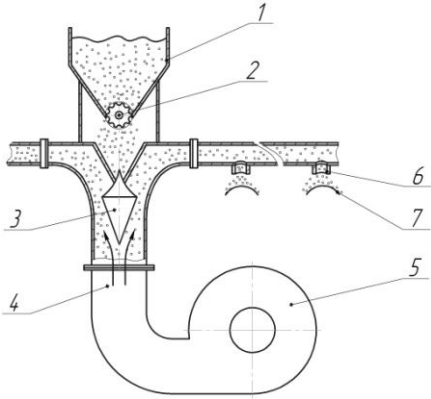
Принципиальная схема устройства для рассева удобрений представлена на рисунке 5.

Примем во внимание, что объемный поток на входе в штангу будет равен

$$Q_{\text{вх}} = S v_0, \quad Q_{\text{вых}} \geq \sum_{i=1}^n S_i v_i, \quad (15)$$

где S - площадь сечения штанги, m^2 ; V_0 - начальная скорость потока, m/c ;

S_i - площадь сечения i -го эжектора, m^2 ; V_i - скорость истечения через i -й эжектор, m/c ; n - количество эжекторов на штанге, шт.



- 1-бункер; 2-дозатор;
3-делитель потока;
4- направление подачи воздуха;
5-вентилятор; 6-трубопровод
с эжекторами;
7- сферы рассеивания

Рисунок 5 - Принципиальная схема устройства для рассеивания удобрений

Воспользовавшись тем, что создаваемое давление воздушно-минеральной смеси можно подчинить уравнению Клайперона-Менделеева, можно записать его как

$$\frac{d\rho}{dx} + \frac{d\rho v_x}{dx} + \frac{d\rho v_y}{dy} + \frac{d\rho v_z}{dz} = 0, \quad (16)$$

$$\frac{dv_x}{dx} + v_x \frac{dv_x}{dx} + v_y \frac{dv_y}{dy} + v_z \frac{dv_z}{dz} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx}, \quad (17)$$

$$\frac{dv_y}{dx} + v_x \frac{dv_x}{dx} + v_y \frac{dv_y}{dy} + v_z \frac{dv_z}{dz} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy}, \quad (18)$$

$$\frac{dv_z}{dx} + v_x \frac{dv_x}{dx} + v_y \frac{dv_y}{dy} + v_z \frac{dv_z}{dz} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz}, \quad (19)$$

где ρ - плотность потока воздушно-минеральной смеси, $кг/м^3$; F - внешняя массовая сила, $кг \cdot м \cdot с^{-2}$, действующая на входе в штангу $F = \rho S v_0^2$.

Тогда давление на входе в эжекторы штанги можно записать как

$$P(x=0) = P \frac{\rho v_0^2}{2} + P_{атм}. \quad (20)$$

Записав силу трения через коэффициенты скоростей, получим уравнения:

$$\frac{dv_x}{dt} + v_x \frac{dv_x}{dx} = F - \frac{dp}{\rho dx} + \frac{\lambda + 2\mu d^2 x}{\rho} \frac{v_x}{dx}. \quad (21)$$

$$v_x v' = F - \frac{1}{\rho} P, \quad \rho v' = -\frac{v_x}{C^2 P'}. \quad (22)$$

Исключив из этих уравнений P' , после интегрирования получим

$$v^2 - C^2 \ln v = F_x + C. \quad (23)$$

Уравнение расхода воздушно-минеральной смеси можно записать в виде

$$Q_1 K_1 = Q_2 K_2 = Q_n K_n, \quad (24)$$

где Q_n - расход воздушно-минеральной смеси на n -м участке, $кг/м^2$;

K_n - коэффициент гидравлического сопротивления на n -м участке.

Для вывода расхода через эжектор воспользуемся формулой Бернулли:

$$Q = \mu S_{\text{эжк}} \sqrt{2gH}, \quad (25)$$

где μ - коэффициент расхода; g - ускорение свободного падения, m/c^2 ; $S_{\text{эжк}}$ - площадь эжектора, mm^2 ; H - напор истечения, м.

Для нашего эжектора $\varphi = 0,96$; $\xi = 0,06$; $\mathcal{E} = 0,63$; $\mu = 0,62$.

$$Q_{\text{общ}} = \xi \frac{v^2}{2g} + \xi + \chi (\mu S_1 \sqrt{2gh} (\frac{v_1^2}{2g} + \frac{Q^2}{K_1^2}) + \mu S_2 \sqrt{2gh} (\frac{v_1^2}{2g} + \frac{Q^2}{K_1^2} I_1 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{Q^2}{K_2^2} I_2) + Q_1 + \dots + Q_n) \quad (26)$$

где ξ - местные потери напора, %; χ - коэффициент сопротивления вентилятора.

Для равномерности внесения частиц удобрений при выходе из эжекторов установлены сферические рассеиватели (рисунок 6).

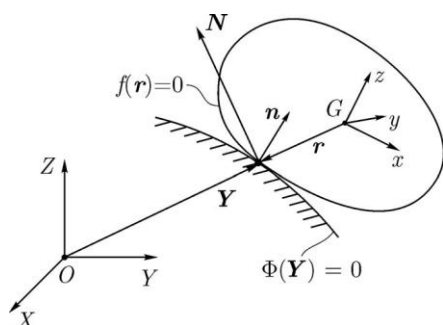


Рисунок 6 – Схема взаимодействия частиц рассеивающей поверхностью

Для описания модели можно использовать методы гамильтоновой механики.

Уравнения поверхностей катящейся частицы и неподвижной сферы запишутся в форме:

$$\begin{aligned} f(r) &= 0 \text{ (для катящейся частицы),} \\ \Phi(Y) &= 0 \text{ (для неподвижной сферы),} \end{aligned} \quad (27)$$

где r - радиус-вектор, проектируемый на подвижные оси;

Y - радиус-вектор, проецируемый на неподвижные оси.

Конфигурационное пространство системы в данном случае является группой движений трехмерного пространства.

Параметризуем её с помощью матрицы направляющих косинусов Q и радиус-вектора центра масс G в неподвижном пространстве X и запишем:

$$Q = \begin{pmatrix} \alpha_1 \beta_1 \gamma_1 \\ \alpha_2 \beta_2 \gamma_2 \\ \alpha_3 \beta_3 \gamma_3 \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Уравнение движения записывается в виде уравнения неголономной связи как

$$v + r \omega = 0, \quad (29)$$

где v — скорость центра масс тела, m/c^2 ; ω - его угловая скорость, m/c^2 ;

r - радиус-вектор точки контакта.

Векторные поля на группе, соответствующие квазискоростям v_i , ω_i , представляются в форме:

$$\omega = \sum_k \omega_k \xi_k, \quad \xi_k = -\sum_{ij} \epsilon_{ijk} \left(\alpha_i \frac{d}{d\alpha_i} + \beta_j \frac{d}{d\beta_j} + \gamma_j \frac{d}{d\gamma_j} \right), \quad (30)$$

$$v = \sum_k v_k \xi_k, \quad \xi_k \frac{d}{dX_1} + \beta_k \frac{d}{dX_2} = \gamma_k \frac{d}{dX_3}. \quad (31)$$

Записываем уравнение со связями:

$$m\dot{v} = mv \cdot \omega - Q \frac{dv}{dX} + N, \quad (32)$$

$$I\dot{\omega} = I\omega + \omega + \alpha + \frac{dU}{d\alpha} \cdot \frac{dU}{d\beta} + \gamma \frac{dU}{d\gamma} + r \cdot N, \quad (33)$$

где N - множители, которые имеют физический смысл вектора сил реакции в точке контакта; α, β, γ - проекции неподвижных ортов на подвижные оси.

С помощью уравнения связи исключим реакцию N , в результате находим:

$$M = M\omega + mr \cdot (\omega \cdot r) + MQ, \quad (34)$$

$$M = I\omega + mr \cdot (\omega \cdot r), \quad (35)$$

$$MQ = \alpha \cdot dUd\alpha + \beta \cdot dUd\beta + \gamma \cdot dUd\gamma + r \cdot QdUdX, \quad (36)$$

где M, MQ - кинетический момент и момент внешних сил точки контакта.

В третьем разделе «Программа и методика экспериментальных исследований», исходя из задач, программа исследований предусматривает:

- изучить процессы дозирования и распределения воздушно-минеральной смеси по каналам штанги в лабораторных и полевых условиях;
- выявить факторы и изучить их влияние на распределение удобрений по ширине полосы рассева машины;
- провести лабораторные исследования по определению показателей качества распределения минеральных удобрений по поверхности;
- провести производственную проверку работоспособности машины в хозяйственных условиях Рязанской области и определить её эффективность.

Лабораторные исследования проводятся с целью выявления факторов, влияющих на дозирование и равномерность распределения удобрений по эжекторам штанги, они определяются из формулы

$$\tau_i = \left(1 - \frac{g_{cp} - g_i}{g_{cp}}\right) \cdot 100, \quad (37)$$

где τ_i - равномерность распределения удобрений, %; g_{cp} - средняя масса удобрений в противнях, г; g_i - масса удобрений в одном противне, г.

Полевые исследования проводятся с целью проверки достоверности теоретических исследований обоснования режимов работы, обеспечивающих повышение равномерности рассева удобрений по поверхности поля.

В качестве параметров оптимизации факторов принято фактическое среднее ближайшее расстояние между частицами – U_{cp} . На величины U_{cp} будут оказывать влияние соответствующие факторы, которые можно разделить на управляемые и не управляемые, в большей степени влияющие на выходные параметры: $x_1(G)$ – доза высева удобрений; $x_2(H)$ – сила воздушного напора в эжекторах; $x_3(V)$ – скорость движения агрегата.

К неуправляемым факторам (параметрам) относятся: x_4 - атмосферная влажность; x_5 - структурность состава удобрений; x_6 - неоднородность потока.

Для построения математической модели используется центральный, ортогональный, композиционный план порядка 2^3 (таблица 1).

Истинные и кодированные значения факторов производились по видам и дозе высева G , кг/га - x_1 ; воздушном напоре H , Па - x_2 ; скорости движения V , м/с - x_3 .

Таблица 1 - План полнофакторного эксперимента 2^3

№№ опытов	Факторы и их взаимодействие							
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_1$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
		G	H	V	GH	GV	HV	GHV
1	+	-	-	-	+	+	+	-
2	+	+	-	-	+	-	+	+
3	+	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	+	+	+	-	-	-
5	+	-	-	+	+	-	-	-

Кодирование самих факторов осуществляется по выражению $x_i = \frac{k_i - k_{oi}}{\varepsilon}$,

где x_i - кодирование значения фактора; k_i - истинное значение фактора; k_{oi} - истинное значение фактора по нулевому уровню; ε - интервал варьирования. Величина воздушного напора измерялась манометром по каждому эжектору.

Порядок проведения опытов в матрице планирования экспериментов определялся с помощью таблицы случайных чисел.

В главе четыре «Результаты экспериментальных исследований и производственных испытаний штанговой машины для посева удобрений» установлено, что задачи теоретико-экспериментальных исследований причинно-следственной связи между факторами позволяют свести их к изучению системы, где входными параметрами будут факторы, а выходными – критерии оценки равномерности распределения. Исследования в производственных условиях проводятся на экспериментальном образце машины (рисунок 7).



Рисунок 7 - Экспериментальный образец штанговой машины для посева минеральных удобрений

Качественные показатели по физико-механическим свойствам твердых минеральных удобрений проверяются после однократного прохода через высевающие аппараты каждого вида и сравниваются с качеством исходных удобрений (ГОСТ 2081-92, ГОСТ 16306-80, ГОСТ 4568-85).

В процессе исследований были получены параметрические показатели эвольвентной катушки, представленные в таблице 2.

Для анализа результатов эксперимента при производственной проверке строились зависимости дозы посева за 1 минуту от радиуса паза R и частоты вращения катушки $n_{об}$.

Таблица 2- Техническая характеристика катушечного аппарата

Наименование показателей	Обозначение	Единица измерения	Значение показателя
Диаметр катушки	D	мм	100
Длина катушки	L	мм	150
Количество желобков	Z	шт	10
Угол наклона желобков	γ	град.	10
Площадь сечения желобка	F	мм	490
Максимальная доза высева при $i=0,23$			
азотных	Q	кг/га	260
фосфорных	Q	кг/га	290
калийных	Q	кг/га	310

Для математического моделирования и построения соответствующих поверхностей диапазон изменения каждого из параметров разбивался с равномерным шагом на 50 значений (рисунок 8).

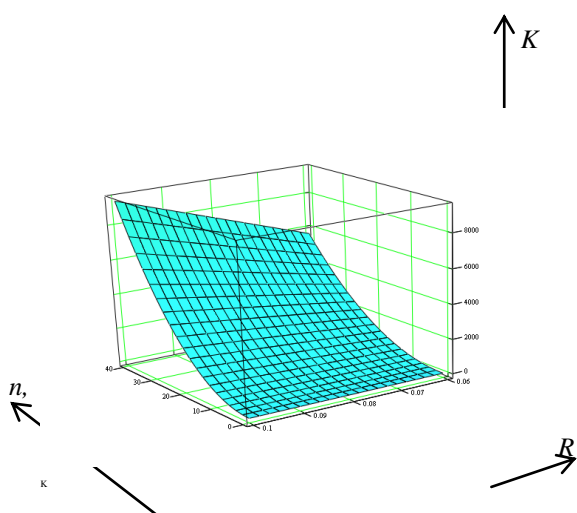


Рисунок 8 – Зависимость дозы высева за 1 минуту от радиуса катушки и частоты вращения при $l = 0,05$ м для мочевины $\gamma = 745$ кг/м³

Надёжность рассева удобрений, обеспечивающего создание равномерного потока при условиях:

максимальная доза рассева частиц удобрений -270-280 кг/га;

рабочая скорость агрегата – 2 м/с;

ширина захвата -12 м.

По методике и с учётом результатов теоретических исследований был произведен расчёт основных параметров пневмо-транспортирующей системы штанговой машин, по результатам которого получено: $\Delta P = 0,0138$ Па; и на распределителе $\Delta P = 0,4950$ Па.

Анализ показывает, что неравномерность распределения в среднем составляет по: мочеине - 6,7%; суперфосфату -7,3%; калию хлористому гранулированному - 7,5%.

В качестве критерия равномерности распределения η принято отношение фактического ближайшего расстояния между частицами крупной фракции калия y_{ϕ} в противне и расстояние между крупными частицами при их идеальном размещении $y_{ид}$, выраженное в %. Значение y_{ϕ} и $y_{ид}$ определяется по формулам:

$$y_{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n-1}; \quad y_{уд} = 1,09 \sqrt{\frac{F}{n}}, \quad (38)$$

где y_i - кратчайшее расстояние между крупными частицами, м; F - площадь, занятая частицами в ячейке противня, m^2 ; n - количество крупных частиц калия в ячейке противня, шт.

Для реализации сказанного в полевых условиях был произведен рассев удобрений в противни по ходу движения агрегата. При этом скорость движения машины составляла 1,2 м/с, напор воздушно-минеральной смеси изменялся в пределах 300-1200 Па с интервалом через 200 Па, и по полученным данным построены графики зависимости (рисунок 9) среднего ближайшего расстояния $y_{\phi}(\eta)$, дисперсия $\sigma_{y_{\phi}}^2$ и коэффициент вариации v_{y_i} , кратчайшее расстояние между соседними частицами в противне.

$$y_{уд} = 1,08 \sqrt{\frac{F}{n}} \quad (39)$$

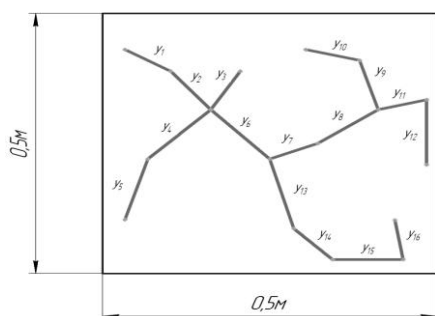


Рисунок 9 – Схема к определению среднего ближайшего расстояния между частицами калийных удобрений в поддоне

На наш взгляд, наиболее удобным способом представления экспериментальных данных является графический способ, дающий возможность выбрать оптимальный воздушный напор (рисунок 10).

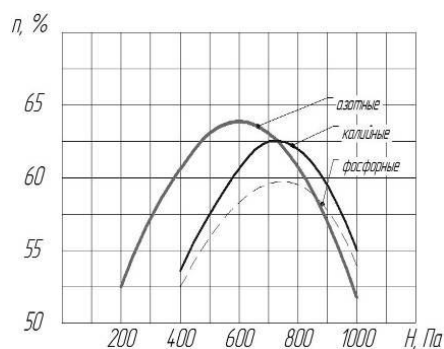


Рисунок 10 - Влияние воздушного напора на равномерность распределения частиц удобрений по площади рассева

Анализируя графические зависимости, можно увидеть, что с увеличением напора величина $y_{\phi}(\eta)$ возрастает, достигая своего максимума, и затем уменьшается. Дисперсия $\sigma_{y_{\phi}}^2$ постоянно возрастает. Коэффициент вариации $v_{y_{\phi}}$ до значения напора, при котором $y_{\phi}(\eta)$ достигает максимума, а дальше начинает возрастать. Отсюда можно видеть, что крупные частицы удобрений располагаются в противне более равномерно при значениях напора, где коэффициент вариации меньше.

Так как удобрения имеют различные физико-механические свойства, то очевидно, что величина воздушного напора в системе должна быть различной.

Поэтому для каждого вида удобрений выбираются пределы варьирования факторов, составлен центральный ортогональный план порядка 2^3 , выполнены опыты, цель которых – получение математических моделей технологического распределения удобрений по площади посева. На основании откликов с трёхкратной повторностью подсчитывались значения откликов \bar{y}_ϕ .

Рассчитывалась дисперсия в каждом опыте по зависимости:

$$S_u^2 = \frac{\sum_{\gamma=1}^{c_u} (y_{\phi u}^\gamma - \bar{y}_{\phi u})^2}{c_u - 1}, \quad (40)$$

где $y_{\phi u}^\gamma$ - значение отклика γ -й повторности i -го опыта, мм;

$\bar{y}_{\phi u}$ - среднее значение отклика γ -го опыта, мм;

c_u - число опытов.

Проверка дисперсии опытов производилась по критерию Корхена:

$$G_p = \frac{S_u^2 \max}{\sum_{i=1}^u S_u^2}, \quad (41)$$

где G_p - расчётное значение критерия Корхена; $S_u \max$ - максимальное значение дисперсии воспроизводимости матрицы планирования эксперимента; $\sum_{\gamma=1}^u S_u^2$ -

сумма дисперсий по опытам. Расчётные значения критерия Кохрена: для мочевины - 0,285; нитрофоски – 0,237; калия - 0,296. Полученные табличные значения критерия Кохрена при уровне надёжности $\alpha = 0,95$ и числа степеней свободы $f = \gamma - 1 = 3 - 1 = 2$ равно $G_p = 0,516$.

Дисперсия воспроизводимости по каждому опыту определялась по зависимости:

$$S_u^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (c_u - 1) S_u^2}{\sum_{u=1}^n c_u - N}, \quad (42)$$

где $N=8$ число опытов в матрице планирования эксперимента.

Дисперсия оказалась равной для: калия хлористого - 2,36 мм²; нитрофоски – 2,48 мм²; мочевины – 1,85 мм².

Среднее значение дисперсии воспроизводимости отклика:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^u S_u^2}{\sum_{u=1}^u c_u}, \quad (43)$$

Дисперсия оказалась равной: для калия хлористого - 0,79 мм²; нитрофоски – 0,83 мм²; мочевины – 0,62 мм².

Дисперсия коэффициентов модели определялась по выражению

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{N}. \quad (44)$$

Она равна: для калия – 0,79 мм²; нитрофоски – 0,83 мм²; мочевины – 0,62 мм².

Критическое значение коэффициента уравнения модели определялось по выражению

$$\Delta b_i = t_{(\alpha, f)} \sqrt{S_{b_i}^2}, \quad (45)$$

где $t_{(\alpha, f)}$ - табличное значение коэффициента Стьюдента (t - критерии) при числе степеней свободы f и уровне надёжности α и равно: для калия – 0,10 мм², нитрофоски – 0,10 мм², мочевины – 0,08 мм².

Для $\alpha = 0,95$ и $f = \sum_{u=1}^N c_u - N = 24 - 8 = 16$ значение коэффициента Стьюдента $t(\alpha = 0,95, f = 16) = 2,12$. Критическое значение соответственно будет равно для калия хлористого – 0,32, нитрофоски -0,32, мочевины - 0,60.

Значение коэффициентов уравнения сведены в таблице 3.

Таблица 3 -Значения коэффициентов модели для различных видов удобрений

Вид удобрений	Факторы							
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
	Значения коэффициентов							
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	β_{123}
Калий	38,11	-3,26	2,85	-1,86	-1,06	0,6	0,9	-0,4
Нитрофоска	35,43	-2,55	2,96	-2,02	-0,95	-0,25	-0,08	-0,16
Мочевина	34,83	-2,30	2,18	-1,93	-0,45	0,20	0,13	-0,05

Сравнивались значения коэффициентов с ранее определёнными критическими значениями и в случае если $\beta_i \leq \Delta \beta_i$, считаем этот коэффициент незначимым, и на основании этого математические уравнения имеют вид: для

$$\text{калия } y = 38,11 - 3,26x_1 + 2,86x_2 - 1,86x_3 - 1,06x_1x_2,$$

$$\text{мочевины } y = 34,83 - 2,30x_1 + 2,18x_2 - 1,93x_2$$

Полученные модели определялись на адекватность путём сравнения расчётных и табличных значений критерия Фишера.

Расчётные значения F – критерия соответственно равны для: калия хлористого - 0,05; нитрофоски -0,30; мочевины – 0,83.

Табличные значения критерия A при уровне надёжности $\alpha = 0,95$ и числе степеней свободы $\eta_{ad} = 3$ и $\eta_y = 16$ равны для: калия – 3,20; нитрофоски - 3,20; мочевины -3,00.

Поскольку для этих видов удобрений значение F больше расчётного, то можно сделать вывод, что полученные математические модели адекватно описывают процесс распределения удобрений по площади и ими можно пользоваться для установления зависимости между воздушным потоком, дозой высева и скоростью движения (рисунок 11).

Установлено, что равномерное распределение частиц при норме рассева 120 кг/га и скорости движения машины $V=0,6$ м/с может быть достигнуто при величине воздушного напора $H=400$ Па (точка а). Подставив значение $\hat{y} = 39,3$ мм $Q=120$ кг/га и $V= 3$ м/с, определим в закодированном виде величину воздушного напора $H = -0,65$, что соответствует величине воздушного напора в 590 Па (точка в). Аналогичным образом определим координаты точек c и d .

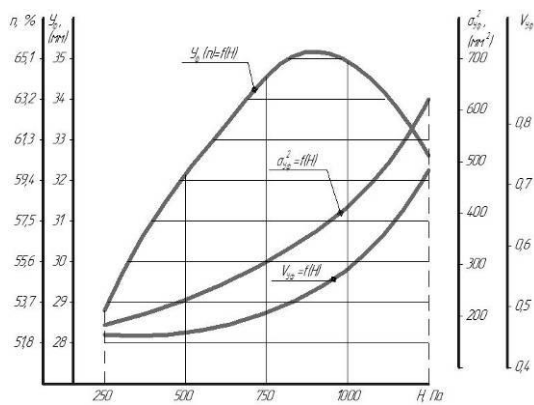


Рисунок 11 - Номограмма процесса распределения по площади рассева удобрений

Соединяя точки a и c , b и d , получаем область рабочих режимов для величины Q и V в выбранных интервалах варьирования.

Пятая глава «Экономическая эффективность применения штанговой машины для рассеивания твёрдых минеральных удобрений». Оценку эффективности работы штанговой машины производили путём сравнения с показателями машины МВУ-0,8, имеющие одинаковую ширину захвата (12 м), и трактором МТЗ-80/82. Расчёты и фактические данные показали, что годовой экономический эффект получен за счёт повышения равномерности рассеивания твёрдых минеральных удобрений и повышения урожайности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общие выводы

1. Проведенный анализ показал, что машины для поверхностного внесения минеральных удобрений не удовлетворяют агротехническим требованиям по равномерности распределения твёрдых минеральных удобрений по поверхности поля, что приводит к неравномерному развитию растений и потерям урожая сельскохозяйственных культур. Повышение эффективности применения минеральных удобрений может быть достигнуто использованием технических средств, разработанных на основе научно обоснованных технологических и технических решений, обеспечивающих адаптацию процессов к потребностям возделываемых культур в дозах и видах минерального питания.

2. Наиболее перспективными машинами для поверхностного внесения твёрдых минеральных удобрений по сравнению с машинами броскового типа являются штанговые машины, обеспечивающие рассеивание удобрений за счёт снижения поперечной, продольной и соответственно, общей неравномерности рассеивания в пределах 7-8%.

3. Разработана математическая модель технологического процесса рассеивания твёрдых минеральных удобрений рабочим органом - эжектором, которая описывается полиномом второго порядка.

4. Установлено, что технологический процесс поверхностного рассеивания твёрдых минеральных удобрений по их видам выполняется устойчиво при дозе высева до 300 кг/га в физическом весе.

5. При данных конструктивных и кинематических параметрах экспериментальной штанговой машины для рассеивания твёрдых минеральных удобрений неравномерность внесения гранулированного суперфосфата не

превышает 7,0%, аммиачной селитры - 6%, хлористого калия - 8,0% на ширине захвата машины 12м.

6. Полевые и производственные опыты показали, что снижение неравномерности рассеивания удобрений экспериментальной штанговой машиной обеспечивает повышение урожайности пшеницы на 4,2 ц/га.

7. Применение технологий посева твердых минеральных удобрений в базовых севооборотах Рязанской области позволит получить общий экономический эффект – 7200 руб./га.

Рекомендации производству

1. Разработанная конструкция штанговой машины включает: раму; бункер; высевающий аппарат; карданный вал; обгонную муфту; эластичную муфту; ременную передачу; вентилятор; воздушный эжектор; распределитель удобрений; приводное колесо; штанги.

2. Обоснованные рациональные конструктивные параметры дозирующего рабочего органа: диаметр катушки – 100 мм; длина катушки – 160 мм; количество желобков катушки – 10 шт.; угол наклона желобков катушки – 10° (патент № 161627).

3. Результаты исследований технологических процессов машин с штанговыми рассеивающими органами реализованы в методиках технологического расчета, в макетных образцах и проверены в лабораторных и производственных условиях.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. С учётом разработанных рекомендаций институту ФГБНУ ВНИМС доработать конструкторскую документацию на штанговую пневматическую машину для изготовления и внедрения в сельскохозяйственное производство опытной партии.

2. Продолжить научно - исследовательские работы, направленные на снижение неравномерности внесения удобрений и повышение производительности штанговых машин при увеличении ширины захвата.

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Кулешов М.С., Макаров В.А., Марченко Н.М. Исследование вопроса распределения воздушно-минеральной смеси по каналам штанговой машины для внесения удобрений //Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2015. -№3. -С.17-19.

2. Кулешов М.С., Теоретическое исследование процесса распределения воздушно-минеральной смеси в штангах машины для рассеивания твердых минеральных удобрений //Вестник РГАТУ.- 2015. - № 3. – С. 69-72.

3. Кулешов М.С., Макаров В.А. Оптимизация основных параметров высевающего катушечного аппарата машины для внесения минеральных удобрений// Механизация и электрификация сельского хозяйства . -2015. - № 12. – С. 27-29.

Патенты

4. Патент RU 151627 Российская Федерация, МПК А01С7/12. Катушечный высевающий аппарат/ заявители: Кулешов М.С., Хрипин В.А., Макаров В.А.; патентообладатель ГНУ ВНИМС.- № 2014130958/13; заявл. 25.07.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. №10.

Статьи в других изданиях

5. Кулешов М.С. К вопросу использования штанговых машин для внесения удобрений // Инновации в сельском хозяйстве. – 2015. - № 3(13). – С.155-160.
6. Кулешов М.С. К вопросу создания машины для подкормки зерновых культур// Проблемы механизации агрохимического обслуживания сельского хозяйства: сб. науч. тр. / ГНУ ВНИМС Россельхозакадемии.- Рязань: ГНУ ВНИМС, 2013. - С.126-131.
7. Кулешов М.С., Макаров В.А. Параметры делителя пневматической машины для внесения твердых минеральных удобрений //Проблемы механизации агрохимического обслуживания сельского хозяйства: сб. науч. тр. / ГНУ ВНИМС Россельхозакадемии.- Рязань: ГНУ ВНИМС, 2013. - С.224 -227.
8. Кулешов М.С., Левин А.Е, Макаров В.А. Теория вопроса работы эвольвентной дозирующей катушки высевающих аппаратов // Проблемы механизации агрохимического обслуживания сельского хозяйства: сб. науч. тр. / ГНУ ВНИМС Россельхозакадемии.- Рязань: ГНУ ВНИМС, 2013. - С.228-229.
9. Кулешов М.С., Шестаков Н.И., Макаров В.А., Ерешко Ф.И. Модель иерархической декомпозиции в координации и задачах с ресурсными ограничениями //Проблемы механизации агрохимического обслуживания сельского хозяйства: сб. науч. тр. / ГНУ ВНИМС Россельхозакадемии.- Рязань: ГНУ ВНИМС, 2013. - С.274-283.
10. Кулешов М.С., Макаров В.А. Теоретическое обоснование параметров делителя потока удобрений в пневматических машинах для внесения //Проблемы механизации агрохимического обслуживания сельского хозяйства: сб. науч. тр. по материалам заочной международной научно-практич. конф. (г. Рязань, ФГБНУ ВНИМС,15 декабря 2014 г.) / ФГБНУ ВНИМС.- Рязань, 2014.- С.18-22.
11. Кулешов М.С., Макаров В.А. Обоснование параметров штангового пневматического распределителя для внесения твердых минеральных удобрений// Проблемы механизации агрохимического обслуживания сельского хозяйства: сб. науч. тр. по материалам заочной международной научно-практич. конф. (г. Рязань, ФГБНУ ВНИМС,15 декабря 2014 г.) / ФГБНУ ВНИМС.- Рязань, 2014.- С.53-57.
12. Кулешов М.С, Макаров В.А. Условие движения частиц удобрений по гравитационной криволинейной поверхности делителя потока // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий: сб. науч. тр. по материалам международной научно-практич. конф. (г. Москва, ФГБНУ ВИМ, 17-18 сентября 2014 г.) / ФГБНУ ВИМ.- Москва, 2014.- С. 156-158.
13. Макаров В.А., Кулешов М.С., Журавлева О.И. Технические средства для внесения удобрений // Проблемы механизации агрохимического обслуживания сельского хозяйства: сб. науч. тр. / ФГБНУ ВНИМС.- Рязань: ВНИМС, 2015.- С.63-69.

Кулешов Михаил Сергеевич

ТЕХНОЛОГИЯ И ШТАНГОВАЯ МАШИНА
ДЛЯ ВНЕСЕНИЯ ТВЁРДЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ
УДОБРЕНИЙ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать 25.01.2016. Бумага офсетная. Формат бумаги 60×90 1/16

Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.

Уч.-изд.л. 1,1. Тираж 100. Заказ № 3.

Отпечатано на участке оперативной полиграфии ФГБНУ ВНИМС

г. Рязань, ул. Щорса, 38/11