

На правах рукописи



**КАЛУГИН ДЕНИС СЕРГЕЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ  
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ДОЗАТОРА ТУКОВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА  
ДЛЯ ПОДКОРМКИ ПРОПАШНЫХ КУЛЬТУР**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ставрополь – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ)

Научный руководитель: доктор сельскохозяйственных наук, профессор,  
Заслуженный изобретатель РФ  
**Руденко Николай Ефимович.**

Официальные  
оппоненты:

**Абезин Валентин Германович,**  
доктор технических наук, профессор, Заслуженный  
работник сельского хозяйства РФ, ФГБОУ ВО  
«Волгоградский государственный аграрный университет»,  
кафедра «Процессы и машины в АПК», профессор;

**Киреев Иван Михайлович,**  
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,  
ФГБНУ «Росинформагротех» – Новокубанский филиал  
(КубНИИТиМ), лаборатория разработки средств  
измерений и испытательного оборудования, заведующий  
лабораторией.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Горский государственный аграрный  
университет» (ФГБОУ ВО Горский ГАУ), г.Владикавказ.

Защита состоится « 1 » июля 2016 г. в 11 час. 00 мин. на заседании  
объединенного диссертационного совета Д 999.021.02 при ФГБОУ ВО «Донской государ-  
ственный аграрный университет» по адресу: 347740, Ростовская область, г. Зерноград, ул.  
Ленина, д. 21, АЧИИ, тел./факс 8 (86359) 433-80 e-mail: dissovetsd99902102@achgaa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Азово-Черноморского инже-  
нерного института – филиала ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный универ-  
ситет» в г. Зернограде и на сайте ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный уни-  
верситет» <http://www.dongau.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г. и размещен на официальном сайте  
ВАК при Министерстве образования и науки России <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте  
ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» <http://www.dongau.ru/>.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Шабанов Н. И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** При возделывании пропашных культур проводят одну или две подкормки минеральными удобрениями. Это способствует интенсификации вегетации растений, равномерности их созревания, увеличению урожайности.

Твердые минеральные удобрения различаются по форме выпуска: в виде гранул, кристаллов и порошка. Наибольшее распространение получили гранулированные минеральные удобрения.

Для внесения твердых минеральных удобрений при подкормке пропашных культур используют туковысевающие аппараты с различными видами дозаторов: катушечными, барабанными, спирально-винтовыми, тарельчатыми и ленточными. По имеющимся данным, дозатор должен обеспечивать норму внесения от 10 до 45 г/м<sup>2</sup>. Неравномерность внесения не должна превышать 7,5 %.

Наибольшее распространение получили аппараты со спирально-винтовыми дозаторами. В качестве недостатков данного вида дозаторов следует отметить, что они не обеспечивают внесение всех форм твердых минеральных удобрений и требуемую неравномерность дозирования, которая достигает 10 % и более. Исходя из конструктивных особенностей спирально-винтовых дозаторов, при их работе происходит стесненное воздействие на туки, из-за наличия активной и пассивной деталей в их конструкции. Это может приводить к заклиниванию туков относительно статичного кожуха дозатора, повышению энергозатрат. Изготовление дозаторов из конструкционной стали приводит к коррозии при взаимодействии с туками, что может снижать их срок эксплуатации.

В связи с этим разработка дозатора туковысевающего аппарата, при работе которого исключается стесненное воздействие на туки в процессе их дозирования, обеспечивается высева всех форм твердых минеральных удобрений, выполняются агротехнические требования по неравномерности подачи туков, обеспечивается необходимый диапазон нормы внесения, а материал для изготовления дозатора является химически инертным, представляет практический интерес, а тема является актуальной.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом Министерства сельского хозяйства Ставропольского края от 10 октября 2014 г. №125/14 на выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ для обеспечения государственных нужд Ставропольского края на тему «Разработка конструкторской документации сельскохозяйственных машин и оборудования для производства сельскохозяйственной продукции по инновационным технологиям: Универсальный туковысевающий аппарат АТГ-2 (взамен АТП-2)».

**Степень разработанности темы.** Вопросам внесения твердых минеральных удобрений и повышения эффективности их дозирования посвящены работы В. Г. Абезина, А. М. Бондаренко, М. Г. Догановского, В. П. Забродина, И. М. Киреева, Е. В. Козловского,

И. Г. Пономаренко, Н. Е. Руденко, В. А. Скользяева, В. А. Черноволова и других исследователей. Результаты теоретических и экспериментальных исследований шнековых и спиральных рабочих органов освещены в работах: В. Г. Артемьева, А. М. Григорьева, Ю. М. Исаева, В. Х. Малиева, С. К. Янчина. и др.

Несмотря на наличие большого количества исследований по дозированию, применению различных видов дозаторов туковысевающих аппаратов, они не в полной мере обеспечивают выполнение агротехнических требований по показателю неравномерности внесения при подкормке пропашных культур.

**Научная гипотеза** – повышение производительности, снижение неравномерности высева удобрений, уменьшение энергозатрат можно достичь путем изменения способа перемещения туков в дозаторе, исключив стесненное воздействие на них.

**Цель работы** – разработка и обоснование конструктивно-технологических параметров дозатора туковысевающего аппарата для подкормки пропашных культур, обеспечивающего нормы внесения с соблюдением агротехнических требований по неравномерности дозирования.

**Задачи исследований:**

1. Провести анализ существующих дозаторов туковысевающих аппаратов, выявить основные направления их совершенствования.
2. Обосновать конструктивно-технологическую схему дозатора, обеспечивающего выполнение агротехнических требований для внесения минеральных удобрений.
3. Теоретически исследовать процесс дозирования твердых минеральных удобрений.
4. Экспериментально исследовать влияние конструктивно-технологических параметров дозатора на качественные и энергетические показатели и определить их рациональные значения.
5. Провести производственную проверку разработанного туковысевающего аппарата с геликоидными дозаторами и определить технико-экономические показатели его использования.

**Объект исследований** – технологический процесс внесения твердых минеральных удобрений при подкормке пропашных культур.

**Предмет исследований** – закономерности взаимодействия элементов системы дозирования с твердыми минеральными удобрениями.

**Научную новизну** представляют:

- конструктивно-технологическая схема дозатора для внесения гранулированных, кристаллических и порошкообразных твердых минеральных удобрений, позволяющая изменить способ перемещения материала и исключая стесненное воздействие на него;
- аналитические зависимости, характеризующие закономерности взаимодействия разработанного дозатора с туками и процесса дозирования минеральных удобрений при их внесении;

– рациональные конструктивно-технологические параметры дозатора.

Новизна технического решения подтверждена патентом на полезную модель № 151893 «Универсальный туковысевающий аппарат для подкормки пропашных культур».

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы заключается в разработке аналитических зависимостей и установлении влияния технологических и конструктивных параметров разработанного дозатора на процесс внесения твердых минеральных удобрений.

Разработан геликоидный дозатор, позволяющий проводить внесение всех форм твердых минеральных удобрений: гранулированных, кристаллических, порошкообразных, обеспечивающий неравномерность внесения до 7,5 % при необходимой производительности от 10 до 45 г/м<sup>2</sup> согласно агротехническим требованиям для подкормки пропашных культур. Дозатор выполнен из химически инертного материала.

**Методология и методы исследований.** Проведенные исследования основаны на анализе научно-технической литературы: патентов, научных статей отечественных и зарубежных авторов, книг научной и производственной тематики. Теоретические исследования выполнялись с использованием законов математики, физики и теоретической механики. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и полевых условиях с использованием общепринятых и частных методик в соответствии с действующими ГОСТами, а также с использованием общепризнанных методик планирования многофакторных экспериментов. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием методов математической статистики, программ Microsoft Excel 2007, «STATISTICA 10» и «MathCAD 14».

**Положения, выносимые на защиту:**

- конструктивная схема туковысевающего аппарата с геликоидным дозатором;
- рациональные конструктивно-технологические параметры геликоидного дозатора;
- математические зависимости процесса дозирования туков;
- результаты экспериментальных исследований производительности дозатора и неравномерности подачи туков;
- технико-экономические показатели использования геликоидного дозатора туковысевающего аппарата при подкормке пропашных культур.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждена результатами лабораторных и полевых исследований, статистической обработкой экспериментальных данных методами дисперсионного и корреляционного анализов.

Результаты работы докладывались и получили положительную оценку на научно-практических конференциях ФГБОУ ВО «Ставропольский ГАУ» (2011...2016 гг.), на международных агропромышленных выставках «Агроуниверсал–2013», «Агроуниверсал–

2014», «Агроуниверсал–2015», на Международной научно-практической конференции молодых ученых «Аграрная наука XXI века». Соискатель, представив результаты данной работы, стал победителем открытого конкурса на премию губернатора Ставропольского края в области науки и инноваций (Ставрополь, 2014 г.), научно-инновационного конкурса «УМНИК» (Ставрополь, 2011 г.), II и III конкурса на соискание гранта и премии ФГБОУ ВПО «Ставропольский ГАУ» (2012...2013 гг.).

Результаты исследования реализованы в экспериментальном образце туковысевающего аппарата с геликоидными дозаторами, прошедшего проверку в производственных условиях в 2015 г. на полях ООО «АгроЦентрГрупп», с. Московское Изобильненского района Ставропольского края.

Материалы исследований по теме диссертации используются в учебном процессе в Ставропольском государственном аграрном университете.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 11 научных работ, в том числе 5 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ, 1 патент на полезную модель. Общий объем публикаций составляет 2,67 печ. л., из которых 1,35 печ. л. принадлежат лично автору.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 157 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников литературы из 131 наименований, содержит 49 рисунков, 36 таблиц и 21 приложение.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, приведены сведения о научной новизне, практической значимости, а также положения, выносимые на защиту.

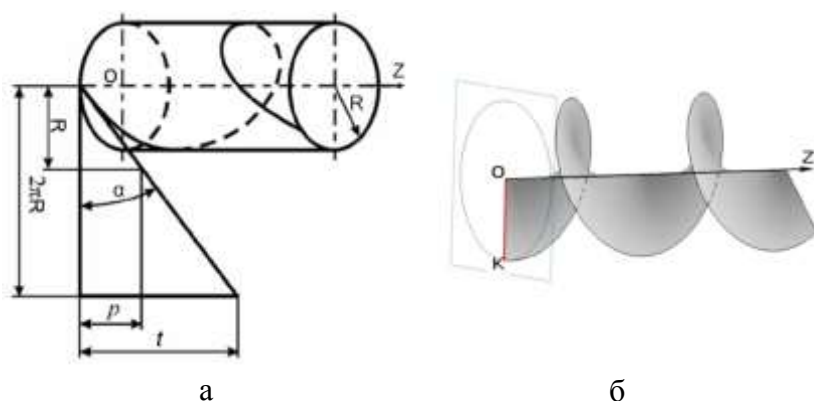
**В первой главе «Анализ технологий и технических средств для подкормки пропашных культур твердыми минеральными удобрениями»** приведен анализ существующих дозаторов туковысевающих аппаратов, технологий и минеральных удобрений, применяемых при подкормке пропашных культур.

Наибольшее применение получили гранулированные твердые минеральные удобрения с размерами гранул от 3 до 6 мм. Технологии внесения предусматривают размещение туков при подкормке возле рядков или посередине междурядий, применение последней по имеющимся данным более эффективно. В спирально-винтовых дозаторах ввиду перемещения туков под воздействием вращающихся витков спирали относительно статичного кожуха ведется пульсирующая подача туков, материал истирается и нарушается гранулометрический состав, а также возможно заклинивание, что сказывается на неравномерности высева удобрений. Работа этих дозаторов сильно зависит от влажности туков и при повышении ее свыше 7...10 % происходит залипание, образование комков, что нарушает технологический процесс. Опыт показывает, что изготовление дозаторов из конструкци-

онной стали приводит к коррозии при взаимодействии с туками, что может снижать срок их эксплуатации.

Необходима разработка дозатора, исключая стесненное воздействие на материал пассивной и активной частями в процессе перемещения, обеспечивающего внесение всех форм твердых минеральных удобрений и выполнение агротехнических требований по показателю неравномерности при производительности, удовлетворяющей требуемому диапазону нормы высева, с использованием химически инертных материалов при изготовлении.

Во второй главе «**Теоретические исследования**» обоснованы конструктивно-технологическая схема геликоидного дозатора, анализ процесса его работы, теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров дозатора.



а – развертка образующей винтовой линии на плоскость;  
б – схема

Рисунок 1 – Геликоидная винтовая поверхность

винтовую линию с углом подъёма  $\alpha$  к основанию направляющего цилиндра радиуса  $R$ . Винтовое движение образующей прямой характеризуют параметром  $p$ , представляющим величину осевого перемещения при повороте на 1 радиан.

Угол наклона винтовой линии  $\alpha$  (град) определяется из выражения

$$tg\alpha = \frac{t}{2\pi \cdot R}, \quad (1)$$

где  $t$  – шаг винтовой линии геликоидной поверхности, м;

$R$  – радиус образующего цилиндра, м.

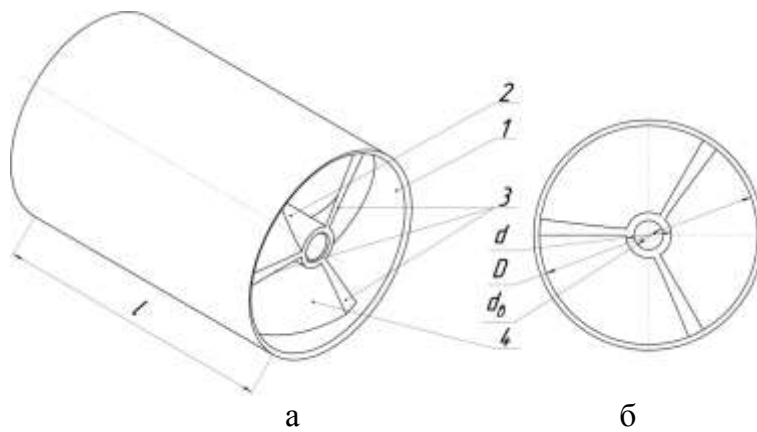
Тогда шаг винтовой линии можно определить из выражения

$$t = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot tg\alpha. \quad (2)$$

Принимая во внимание особенности построения винтовой поверхности, геликоидный дозатор (рисунок 2) состоит из внешнего 1 и внутреннего 2 цилиндров, между которыми размещены витки 3, выполненные по линейчатой винтовой поверхности 4. Внутренний цилиндр надевается на приводной вал.

Геликоидные витки, внутренний и внешний цилиндры образуют объемное пространство, внутри которого материал перемещается винтовой поверхностью при вращении дозатора.

При разработке дозатора была использована линейчатая конволютная геликоидная винтовая поверхность, которая образована движением образующей прямой  $OK$  вдоль оси  $OZ$  (рисунок 1) при вращении вокруг неё с постоянной скоростью. Данная прямая остаётся при этом перпендикулярной к оси  $OZ$  и описывает



1 – внешний цилиндр; 2 – внутренний цилиндр; 3 – заходы; 4 – винтовая поверхность геликоида;  $D$  – диаметр внешнего цилиндра;  $d$  – диаметр внутреннего цилиндра;  $d_0$  – диаметр вала;  $l$  – длина дозатора

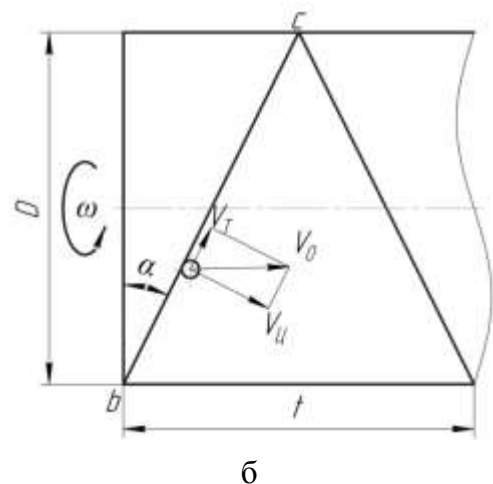
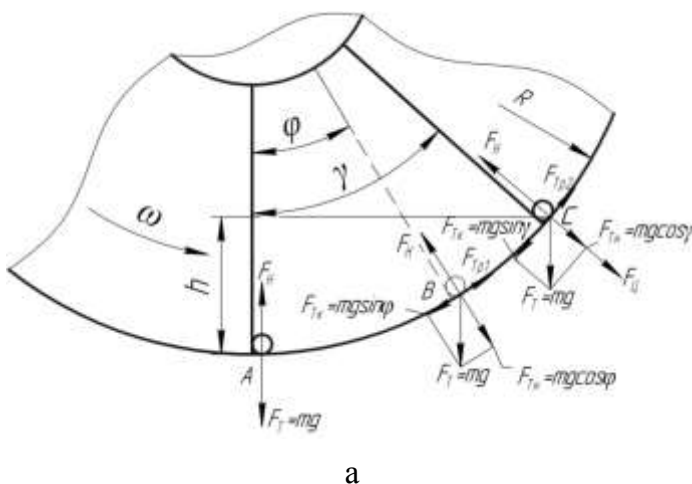
Рисунок 2 – Схема геликоидного дозатора (а), вид спереди (б), общий вид дозаторов (в)

При проведении теоретических исследований процесса дозирования, за основу была взята работа с гранулированными минеральными удобрениями, что позволило использовать основные положения модели сыпучего тела, предложенной Л. В. Гячевым и В. А. Богомягких, с целью определения характера движения туков в геликоидном дозаторе.

Исходя из принятой модели «сыпучего тела» туки поступают в дозатор под углом естественного откоса  $\beta$ .

Туки действуют на внутреннюю поверхность внешнего цилиндра с силой  $F_T$  в точке  $A$  (рисунок 3):

$$F_T = m \cdot g \quad (3)$$



а – схема сил, действующих на туки при работе дозатора; б – план скоростей движения туков

Рисунок 3 – Схема для определения движения туков в дозаторе

При вращении дозатора за счет силы трения  $F_{Tр1}$  туки поднимаются на угол трения движения  $\phi$  в точку  $B$ :

$$F_{Tр1} = F_k, F_k = mg \cdot \sin \phi \quad (4)$$



Кроме того, туки прижимаются к поверхности внешнего цилиндра центробежной силой  $F_{ц}$ :

$$F_{ц} = m \cdot \omega^2 \cdot R. \quad (5)$$

Данная сила увеличивает силу трения  $F_{тр2}$ :

$$F_{тр2} = m[g \cdot \cos\gamma + (2 \cdot \pi \cdot n)^2 \cdot R]f. \quad (6)$$

Она поднимет материал на угол  $\gamma$  в точку  $C$  на высоте  $h$ , при этом

$$\frac{F_k}{F_{тр2}} > 1; \frac{m \cdot g \cdot \sin\gamma}{m[g \cdot \cos\gamma + (2 \cdot \pi \cdot n)^2 \cdot R]f} > 1. \quad (7)$$

При работе дозатора на туки действует также сила Кориолиса, но ввиду маленького значения её величины, она не учитывается.

По данным Б. Г. Турбина, угол подъема  $\gamma$  определяется из выражения

$$\gamma = \varphi + \arcsin\left(\frac{\omega^2 R}{g} \cdot tg\varphi\right). \quad (8)$$

Используя схему (рисунок 3 а), определяется высота подъема туков  $h$  (м):

$$h = R(1 - \cos\gamma). \quad (9)$$

Под действием составляющей силы тяжести  $mg \cdot \sin\gamma$  туки переходят в фазу относительного скольжения со скоростью  $V_T$  и стремятся вернуться в положение покоя, но виток  $bc$ , расположенный под углом  $\alpha$ , нормальной реакцией препятствует этому и сообщает тукам скорость  $V_{ц}$ , при вращении дозатора сопровождает туки, заставляя их двигаться вдоль оси вращения со скоростью  $V_o$  (м/с). Движению туков препятствует сила трения о поверхности внешнего цилиндра и витка.

$$\text{Исходя из этого:} \quad V_o = t \cdot n \cdot \cos\alpha(1 - f). \quad (10)$$

где  $n$  – частота вращения дозатора,  $c^{-1}$ ;

$f$  – коэффициент трения движения туков по поверхности дозатора.

После математических преобразований:

$$V_o = \pi \cdot D \cdot n \cdot \sin\alpha(1 - f), \quad (11)$$

где  $D$  – диаметр внешнего цилиндра дозатора, м.

Исходя из анализа существующих конструкций дозаторов туковысевающих аппаратов, диаметр приводного вала дозатора по аналогии со спирально-винтовыми дозаторами принимаем  $d_b = 20$  мм.

Тогда диаметр внутреннего цилиндра  $d$  (мм):

$$d = d_b + 2\delta, \quad (12)$$

где  $\delta = 2,5$  мм – толщина стенки внутреннего цилиндра.

Диаметры известных спирально-винтовых дозаторов туковысевающих аппаратов варьируют в пределах 60...80 мм. По аналогии можно принять диаметр внешнего цилиндра геликоидного дозатора  $D = 80$  мм, что обеспечивает большую производительность при меньшей частоте вращения.

Частота вращения дозатора, при которой прекращается движение вдоль оси вращения материала, называется критической  $n_{кр}$  ( $c^{-1}$ ). Это происходит при условии:

$$m(2 \cdot \pi \cdot n_{кр})^2 \cdot \frac{D}{2} = m \cdot g. \quad (13)$$

После преобразования и упрощения данной зависимости, получим

$$n_{кр} = \sqrt{\frac{2g}{4 \cdot \pi^2 \cdot D}}, n_{кр} = 2,5 \text{ с}^{-1}. \quad (14)$$

Для транспортирующих труб, по данным М. П. Александрова, которой в некоторой степени является геликоидный дозатор, экспериментально установлена зависимость

$$n_{кр} = \frac{42,3}{\sqrt{D}}, \quad (15)$$

где  $n_{кр}$  – критическая частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$ .

Используя данную зависимость, проверяется правильность выбора диаметра внешнего цилиндра геликоидного дозатора:  $D = \frac{42,3^2}{150^2} = 0,08 \text{ м}$ .

Максимальная рабочая частота вращения дозатора  $n_{max} = 0,7 \dots 0,8 n_{кр} (\text{с}^{-1})$ .

Из литературных источников известно, что для хорошо сыпучих материалов шаг винтовой поверхности  $t$  равен диаметру внешнего цилиндра  $t = D$ .

Подставив данное равенство в формулу (1), определяется угол наклона винтовой линии  $\alpha = 17^\circ$ .

Число заходов  $Ч_3$  геликоида связано с условием прохождения туков через отверстия, образованные заходами витков и цилиндрами дозатора:

$$\frac{D-d}{Ч_3} \geq 3 \cdot d_{Гmax}, \quad (16)$$

где  $d_{Гmax}$  – максимальный размер гранул.

Отсюда: 
$$Ч_3 \leq \frac{D-d}{3d_{Гmax}}. \quad (17)$$

При  $d_{Гmax} = 6 \text{ мм}$ :  $Ч_3 \leq 3$ .

Площадь заполнения поперечного сечения дозатора  $S_p (\text{м}^2)$  находят по следующей зависимости:

$$S_p = \frac{\pi(D^2-d^2)}{4} \text{tg}\alpha + \frac{\pi(D^2-d^2)}{4 \cdot Ч_3} \text{tg}\alpha \cdot \text{tg}\beta.$$

Отсюда: 
$$S_p = \frac{\pi(D^2-d^2)}{4} \left(1 + \frac{\text{tg}\beta}{Ч_3}\right) \text{tg}\alpha. \quad (18)$$

Наполняемость дозатора туками оценивают коэффициентом заполнения:

$$\psi = \frac{A_d}{A}, \quad (19)$$

где  $A_d$  – объём туков, находящихся в дозаторе в процессе перемещения,  $\text{м}^3$ :

$$A_d = S_p \cdot l \cdot \sin\alpha; \quad (20)$$

$$A - \text{вместимость дозатора, } \text{м}^3: A = l(D-d) \left[ \frac{\pi(D+d)}{4} - \frac{\Delta \cdot Ч_3}{\sin\alpha} \right], \quad (21)$$

где  $\Delta$  – толщина витка, м;

$l$  – длина дозатора, м.

Чтобы исключить самовысыпание туков из дозатора и обеспечить компоновку туковысевающего аппарата по ширине в пределах величины междурядья для пропашных

культур  $b_m = 0,45...0,7$  м, длина дозатора  $l \geq 2t$ .

Исходя из известной скорости осевого движения туков  $V_o$  и площади заполнения поперечного сечения дозатора  $S_p$ , определяют производительность дозатора  $Q$  (кг/с):

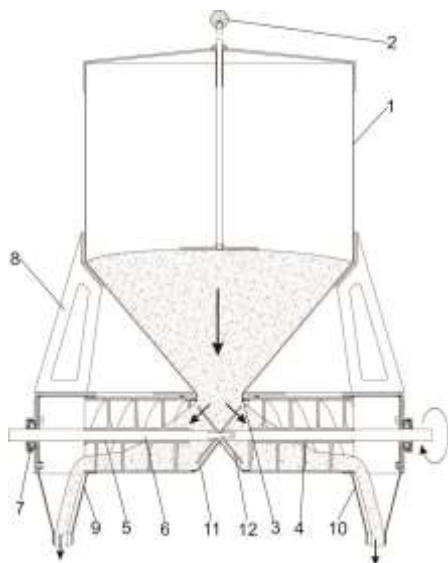
$$Q = S_p \cdot V_o \cdot \rho, \quad (22)$$

где  $\rho$  – насыпная плотность туков, кг/м<sup>3</sup>.

Тогда: 
$$Q = \frac{\pi^2 \cdot (D^2 - d^2)}{4} \cdot \left(1 + \frac{tg\beta}{\chi_3}\right) \cdot D \cdot tg\alpha \cdot n \cdot \sin\alpha (1 - f) \cdot \rho. \quad (23)$$

Как видно из формулы (23), производительность геликоидного дозатора при известных конструктивных ( $D$ ,  $d$ ) и технологических ( $\beta$ ,  $\varphi$ ,  $\rho$ ) параметрах зависит от числа заходов  $\chi_3$ , частоты вращения дозатора  $n$  и угла наклона винтовой линии  $\alpha$ .

Используя современные аддитивные технологии, была реализована конструктивно-технологическая схема геликоидного дозатора с последующим изготовлением физических прототипов. Идентичность физического прототипа дозатора теоретически обоснованным параметрам обеспечена трехмерной моделью, созданной в системе автоматизированного проектирования Компас 3D V15. Прототип изготавливался методом трехмерной печати на принтере Picasso 3D из химически инертного материала (ABS-пластик) для увеличения срока эксплуатации дозатора.



- 1 – бункер; 2 – указатель уровня туков;
- 3 – приемно-распределительная камера;
- 4, 5 – геликоидные дозаторы;
- 6 – приводной вал; 7 – подшипниковая опора; 8 – рама; 9, 10 – выгрузные камеры с воронками; 11 – щиток; 12 – ворошилки

Рисунок 4 – Конструктивно-технологическая схема туковысевающего аппарата с геликоидными дозаторами

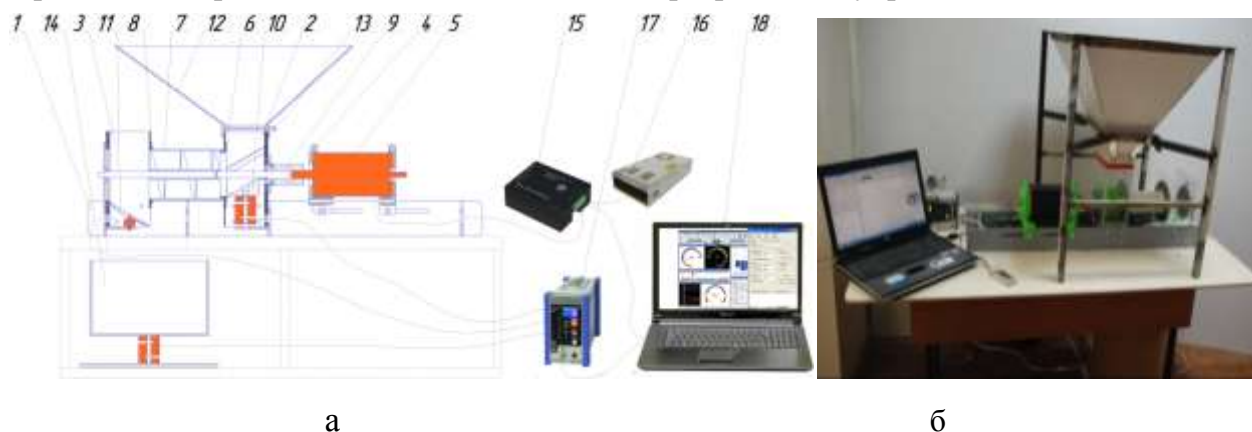
Исходя из анализа процесса дозирования туков, разработана конструктивно-технологическая схема (рисунок 4) туковысевающего аппарата с геликоидными дозаторами.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» изложены методики экспериментальных исследований, приведен перечень оборудования и приборов, используемых при проведении опытов, описана методика проведения сравнительных полевых исследований.

В программу экспериментальных исследований входило: уточнить некоторые физико-механические свойства твердых минеральных удобрений (влажность, насыпная плотность, угол естественного откоса, фрикционные свойства); изучить влияние угла наклона винтовой линии геликоидной поверхности витка, числа заходов и частоты вращения дозатора на его производительность, неравномерность подачи туков, коэффициент заполнения и скорость движения туков в дозаторе.

При проведении экспериментальных исследований использовалось следующее оборудование: цифровой штангенциркуль типа ШЦЦ-I ГОСТ 24156-02, ноутбук с программным обеспечением; экспериментальная лабораторная установка; тензометрическая станция «KYOWA» (Сертификат JP.C.34.004.A № 30298); влагомер «Эвла-С» (ТУ 404724.007), прибор для определения угла естественного откоса, весы ВЛКТ-500 4 класс, лабораторная установка «Трибометр», тарировочный комплекс Г-4-211,10 ГОСТ 7328-73. Программное обеспечение для фиксации и обработки тензометрических данных DCS-100A v.02.20 и DAS-100A. Используемое программное обеспечение позволяет фиксировать данные с тензометрических датчиков при частоте опроса 100 Гц и более, что обеспечивает высокую точность измерений.

Для определения качественных показателей дозирования твердых минеральных удобрений разработана и изготовлена экспериментальная лабораторная установка (рисунок 5) с применением современных технологий цифровых производств: лазерной резки, плазменного раскроя, САМ-обработки на станках с числовым программным управлением.



- 1 – рама; 2 – приемный отсек; 3 – выгрузной отсек; 4 – каретка крепления двигателя; 5 – шаговый электродвигатель; 6 – переходной сменный фланец; 7 – геликоидный дозатор; 8 – приемный сменный фланец; 9 – приводной вал; 10 – наклонное приемное дно с датчиком сжатия; 11 – наклонное выгрузное дно с датчиком сжатия; 12 – бункер; 13 – шибер бункера; 14 – приемная тара с датчиком сжатия; 15 – блок управления шаговым двигателем; 16 – блок питания шагового двигателя; 17 – тензометрическая станция «Kyowa» EDX-100A; 18 – ноутбук с программным обеспечением

Рисунок 5 – Схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки

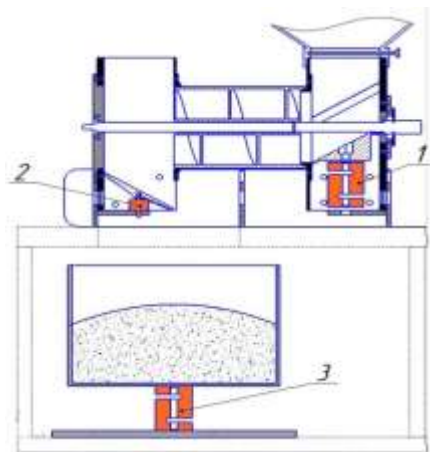
Определение производительности геликоидного дозатора проводилось с использованием тензометрического датчика 3 (рисунок б), фиксирующего массу туков, поданных дозатором в единицу времени. Производительность  $Q$  (кг/с) вычисляют по следующей зависимости:

$$Q = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}, \quad (24)$$

где  $t_1, t_2$  – контрольные величины времени, с;

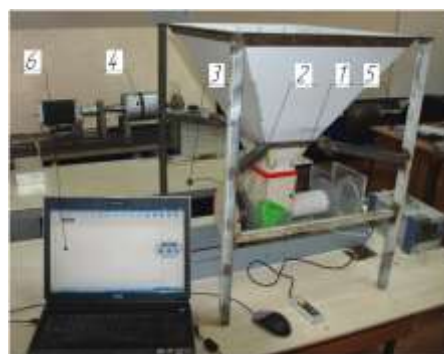
$m_1, m_2$  – масса туков, зафиксированная на контрольных отметках.

Неравномерность подачи туков дозатором характеризуется коэффициентом вариации.



- 1 – тензометрический датчик «Dacell» UU-K10 частота опроса 100 Гц;
- 2 – тензометрический датчик «Dacell» UMM-K10 частота опроса 100 Гц;
- 3 – тензометрический датчик «Dacell» UU-K100 частота опроса 10 Гц

Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки с расположением тензодатчиков



- 1 – геликоидный дозатор; 2 – шкив привода;
- 3 – тензодатчик «Dacell» UUM-K50;
- 4 – барабан с тяговым тросом;
- 5 – тензометрическая станция «Kyowa» EDX-100A;

6 – компьютер с программным обеспечением  
Рисунок 7 – Установка для определения мощности на привод дозатора

Определение мощности на привод осуществлялось с помощью экспериментальной установки (рисунок 7). Усилие на привод дозатора  $F_k$  фиксировалось датчиком 3. Мощность  $N_d$  (Вт) на привод дозатора рассчитывают по формуле

$$N_d = F_{kd} \cdot r_{шк} \cdot 2\pi n, \quad (25)$$

где  $r_{шк}$  - радиус шкива, м;

$F_{kd}$  - усилие на привод туковысевающего аппарата, Н.

Исследования проводили с гранулированными минеральными удобрениями «Аммофоска», при их влажности 5,5 %.

Разработана программа и методика многофакторного эксперимента. Ввиду того, что между факторами и критериями оптимизации существует прямая зависимость (23), эксперимент проводился по плану ПФЭ  $2^3$ .

Теоретически определены для данных конструктивно-технологических параметров дозатора расчетные показатели:  $\alpha = 17^\circ$ ,  $n_{\max} = 2,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $Q_{3\max} = 3$  шт. Исходя из этого определены уровни и интервалы их варьирования (таблица 1).

Таблица 1 – Факторы, уровни и интервалы варьирования

Факторы, уровни	Угол наклона линии винтовой поверхности	Частота вращения	Количество заходов
Натуральное обозначение	$\alpha$ , град	$n$ , $\text{с}^{-1}$	$Q_3$ , шт
Верхний	22	2,0	3
Основной (нулевой)	17	1,3	2
Нижний	12	0,6	1
Кодированное обозначение	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Верхний	+1	+1	+1
Основной (нулевой)	0	0	0
Нижний	-1	-1	-1

С целью обоснования рациональных параметров и режимов работы дозатора туковысевающего аппарата за критерии оптимизации были взяты производительность и неравномерность подачи туков. Для экспериментального подтверждения теоретических исследований определялась скорость движения туков в дозаторе и коэффициент его заполнения.

Были проведены полевые сравнительные исследования базового туковысевающего аппарата со спирально-винтовыми дозаторами АТП-2 и разработанного аппарата с геликоидными дозаторами АТГ-2. Оценку неравномерности внесения удобрений вдоль междурядий проводили по ГОСТ 28714–2007.

Результаты экспериментов обработаны в пакетах компьютерных программ «STATISTICA 10» и «MathCAD 14», получены уравнения регрессии и рациональные значения факторов.

В четвертой главе «**Результаты экспериментальных исследований**» уточнены некоторые физико-механические свойства твердых минеральных удобрений (таблица 2).

Таблица 2 – Физико-механические свойства гранулированных минеральных удобрений «Аммофоска»  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4$

Наименование	Диаметр гранул, мм			Влажность, %	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Угол естественного откоса, град	Угол трения по пластиковой поверхности, град
	$d_{Гср}$	$d_{Гmin}$	$d_{Гmax}$				
Аммофоска	4,1	3,1	6,0	5,5	939,6	32,94	12

Использование пластика ABS для изготовления дозатора обеспечивает сравнительно небольшой угол трения движения туков  $\varphi = 12^\circ$ .

Установлены зависимости производительности  $Y_Q$  и неравномерности подачи  $Y_M$  от угла наклона винтовой линии геликоидной поверхности, числа заходов и частоты вращения дозатора.

В результате расчетов по общепринятой методике получены уравнения регрессии в кодированном (26,27) и натуральном (28,29) видах:

$$Y_Q = 77,525 + 20,058 \cdot X_1 + 32,2 \cdot X_2 - 6,425 \cdot X_3 + 6,967 \cdot X_1 \cdot X_2 + 3,508 \cdot X_1 \cdot X_3 - 4,283 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (26)$$

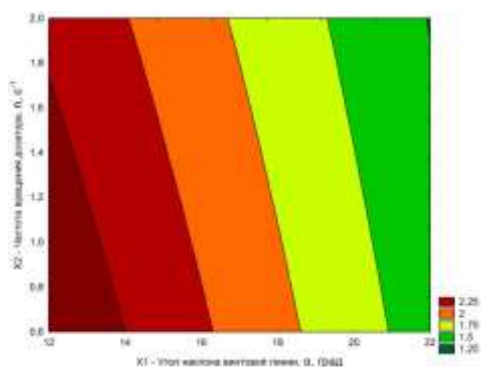
$$Y_M = 3,818 - 0,972 \cdot X_1 - 0,065 \cdot X_2 - 1,995 \cdot X_3 + 0,46 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,037 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,044 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (27)$$

$$Q = 0,0206 \cdot \alpha + 24,397 \cdot n - 10,398 \cdot \text{Ч}_3 + 1,990 \cdot \alpha \cdot n + 0,7016 \cdot \alpha \cdot \text{Ч}_3 - 6,118 \cdot n \cdot \text{Ч}_3 + 14,315 \quad (28)$$

$$M = 0,025 \cdot \alpha \cdot n - 0,415 \cdot n - 3,768 \cdot \text{Ч}_3 - 0,411 \cdot \alpha + 0,108 \cdot \alpha \cdot \text{Ч}_3 + 0,160 \cdot n \cdot \text{Ч}_3 - 0,0126 \cdot \alpha \cdot n \cdot \text{Ч}_3 + 14,781 \quad (29)$$

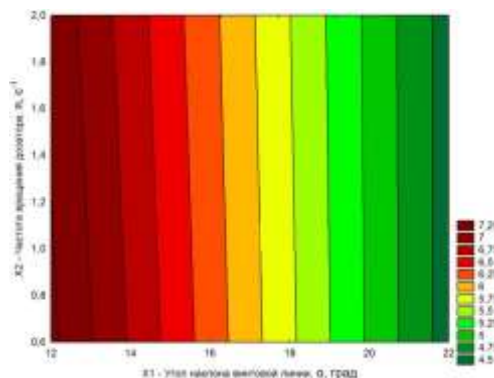
Из анализа уравнений и кривых (изолиний) равного отклика следует, что из трех регулируемых факторов в исследуемых пределах наибольшее влияние на параметры оптимизации оказывают: на  $Y_Q$  производительность (г/с) – частота вращения дозатора ( $X_2$ ) и угол наклона винтовой линии ( $X_1$ ), на  $Y_M$  неравномерность подачи (%) – влияют число заходов ( $X_3$ ) и угол наклона винтовой линии ( $X_1$ ).

Определены рациональные параметры дозатора с использованием поверхностей отклика и их изолиний (рисунки 8,9).



а

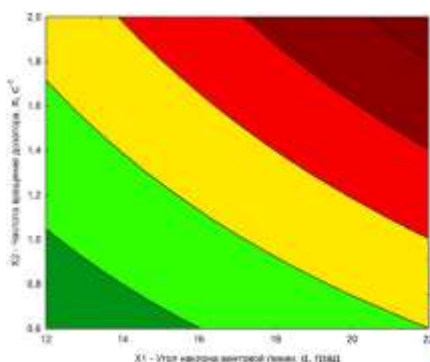
Двухмерное сечение поверхности отклика неравномерности подачи туков  $M$ , %, в зависимости от частоты вращения  $n$  и угла наклона винтовой линии  $\alpha$  при  $C_3=3$



б

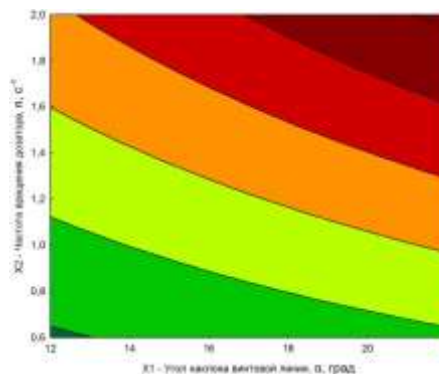
Двухмерное сечение поверхности отклика неравномерности подачи туков  $M$ , %, в зависимости от частоты вращения  $n$  и угла наклона винтовой линии  $\alpha$  при  $C_3=1$

Рисунок 8 – Двухмерные сечения поверхностей отклика неравномерности подачи туков  $M$ , %



а

Двухмерное сечение поверхности отклика производительности дозатора  $Q$ , г/с, в зависимости от частоты вращения  $n$  и угла наклона винтовой линии  $\alpha$  при  $C_3=3$



б

Двухмерное сечение поверхности отклика производительности дозатора  $Q$ , г/с, в зависимости от частоты вращения  $n$  и угла наклона винтовой линии  $\alpha$  при  $C_3=1$

Рисунок 9 – Двухмерные сечения поверхностей отклика производительности дозатора  $Q$ , г/с

С помощью критерия Кохрена была проведена оценка однородности дисперсий, используя критерий Стьюдента проверена гипотеза о значимости коэффициентов уравнений  $q$ , в следствие чего установлено, что коэффициенты:  $b_{123}$  для уравнения  $Y_Q$ ;  $b_{12}$  для уравнения  $Y_M$  – являются незначимыми. Применяя критерий Фишера, проверена адекватность математических моделей. Выяснено, что полученные математические модели адекватны.

Об изменении критериев оптимизации делали выводы по двумерным сечениям поверхностей откликов и уравнениям регрессии, анализ которых показал, что качественное равномерное дозирование происходит при угле наклона винтовой линии витков



$\alpha = 14$  градусов, количестве заходов витков дозатора 3 шт., при различной частоте вращения, которая выбирается в зависимости от необходимой нормы внесения минеральных удобрений.

Полученные экспериментальные данные адекватны теоретическим по критерию Пирсона  $\chi^2$  (рисунок 10).

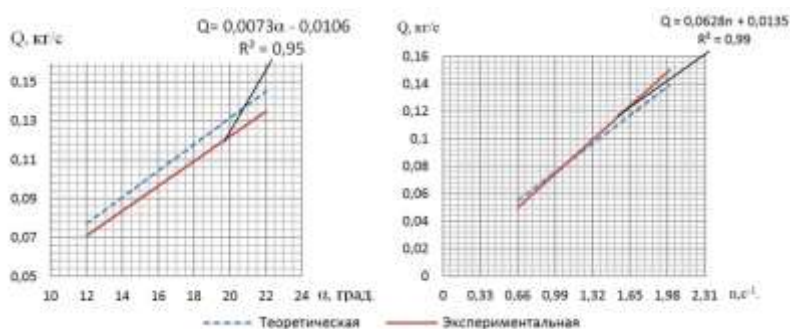


Рисунок 10 – Теоретические и экспериментальные зависимости производительности  $Q$  геликоидного дозатора от угла наклона винтовой линии геликоида  $\alpha$  и частоты вращения дозатора  $n$  при  $\chi_3=3$ .

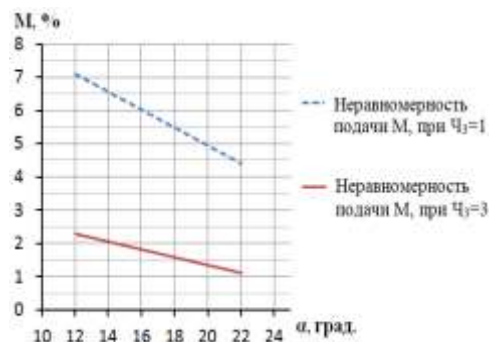


Рисунок 11 – Экспериментальные зависимости неравномерности подачи туков  $M$ , %, от угла наклона винтовой линии геликоида при частоте вращения  $n=2 \text{ с}^{-1}$

Проведены сравнительные лабораторные исследования по определению мощности на привод туковысевающих аппаратов, размещенных на культиваторе: со спирально-винтовыми дозаторами АТП-2 – контроль и разработанного аппарата с геликоидными дозаторами АТГ-2 – вариант: для контроля  $N_k=66,82$  Вт; для варианта  $N_g=24,61$  Вт. Меньшая мощность объясняется принципом перемещения материала в разработанном дозаторе, снижением трения гранул о поверхности дозатора.

Проведены полевые исследования туковысевающих аппаратов (рисунок 12).



1 – КРН-5,6А; 2 – АТП-2; 3 – АТГ-2; 4 – полиэтиленовая пленка с делениями

Рисунок 12 – Общий вид культиватора с туковысевающими аппаратами

Установлено, что неравномерность внесения вдоль междурядий у разработанного аппарата составляет  $P_{нр}=3,4$  %, у серийного  $P_{нр}=11,6$  %. Производительность геликоидного дозатора в 2,1 раза выше, чем у спирально-винтового, при меньшей неравномерности внесения. Это позволяет устанавливать на культиватор не восемь, а четыре туковысевающих аппарата.



Проведена проверка возможности высева кристаллических и порошкообразных минеральных удобрений (рисунок 13).



Рисунок 13 – Высев геликоидным дозатором кристаллических (а) и порошкообразных (б) минеральных удобрений

В пятой главе «Технико-экономическая эффективность универсального туковысевающего аппарата с геликоидным дозатором» расчетами подтверждена экономическая эффективность подкормки пропашных культур твердыми минеральными удобрениями с применением туковысевающего аппарата с геликоидным дозатором, которые проводились по методике определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники ГОСТ Р 53056–2008. Установлено, что при использовании туковысевающих аппаратов с геликоидными дозаторами для подкормки пропашных культур снижаются эксплуатационные затраты на 5,1%, расход топлива снижается на 5,2 %, общая годовая экономия составит 303144 руб., срок окупаемости капиталовложений – один сезон.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Итоги выполненного исследования

1. Основные направления совершенствования дозатора туковысевающего аппарата: исключение стесненного воздействия на материал пассивной и активной деталей дозатора в процессе перемещения, при обеспечении высева всех форм твердых минеральных удобрений и выполнении агротехнических требований по показателю неравномерности при производительности, удовлетворяющей требуемому диапазону нормы внесения, с использованием химически инертных материалов при изготовлении.

2. Разработана конструктивно-технологическая схема геликоидного дозатора, состоящего из внешнего цилиндра диаметром 80 мм, внутреннего цилиндра диаметром 25 мм и расположенными между ними несколькими витками, выполненными по линейчатой конволютной геликоидной поверхности с постоянным углом наклона винтовой линии. Разработана конструкция туковысевающего аппарата с геликоидным дозатором, защищена патентом № 151893. Изготовление физических прототипов геликоидного дозатора с обеспечением полного соответствия их обоснованным конструктивным параметрам осуществлялось при помощи современных аддитивных технологий.

3. Обоснованы аналитические зависимости производительности геликоидного дозатора и неравномерности высева. Производительность возрастает с увеличением частоты вращения дозатора и угла наклона винтовой линии от 0,05 до 0,15 кг/с. Неравномерность высева уменьшается с увеличением числа заходов витков от 7,1 до 2,8 % и угла наклона

винтовой линии от 2,3 до 1,1 % при числе заходов  $Ч_3=3$ . Коэффициент заполнения дозатора составляет 0,43...0,50, что выше, чем для спирально-винтового дозатора.

4. При реализации многофакторного эксперимента построены математические модели критериев оптимизации в зависимости от трех факторов: частоты вращения дозатора, угла наклона винтовой линии и количества заходов витков. Найдены рациональные конструктивные и кинематические параметры геликоидного дозатора: угол наклона винтовой линии –  $\alpha=14^\circ$ , число заходов –  $Ч_3=3$  шт., при которых выполняются агротехнические требования для внесения минеральных удобрений при подкормке пропашных культур.

5. Производственная проверка туковысевающих аппаратов с геликоидным и спирально-винтовым дозаторами показали, что неравномерность внесения у разработанного аппарата составляет  $П_{нр}=3,4\%$ , у серийного  $П_{нр}=11,6\%$ . Количество вносимых туков соответственно 0,032 и 0,015 кг/м. Производительность геликоидного дозатора выше в 2,1 раза, чем у спирально-винтового, что позволяет уменьшить число туковысевающих аппаратов на культиваторе. Обеспечивается движение туков в дозаторе сплошным потоком без заклинивания. Проверка геликоидного дозатора при высева кристаллических и порошкообразных минеральных удобрений показывает его универсальность.

6. Расчетами подтверждена эффективность применения предлагаемого дозатора туковысевающего аппарата на пропашных культиваторах: снижаются эксплуатационные затраты на 5,1 %, расход топлива при внесении удобрений снижается на 5,2 %, общая годовая экономия составит 303144 руб., срок окупаемости капиталовложений – один сезон.

#### **Рекомендации производству**

1. Разработанный туковысевающий аппарат с геликоидным дозатором АТГ-2, может быть использован для замены широко применяемого сейчас туковысевающего аппарата АТП-2 со спирально-винтовым дозатором и подобных ему моделей.

2. Для качественного внесения твердых минеральных удобрений при подкормке пропашных культур выполнять настройку на требуемую норму внесения по разработанной номограмме.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

– Изучить возможность использования геликоидного дозатора для высева сельскохозяйственных культур: зерновых колосовых, рапса, свеклы, мелкосеменных овощных культур.

– Проверить возможность использования разработанного туковысевающего аппарата с геликоидными дозаторами и шаговыми электродвигателями в качестве привода для дифференцированного внесения твердых минеральных удобрений.

#### **Основные публикации по материалам диссертационной работы:**

в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Руденко, Н. Е. Универсальный туковысевающий аппарат АТГ - 2 / Н. Е. Руденко, Е. В. Кулаев, Д. С. Калугин, И. А. Носов // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 10. – С. 10–11. – 0,1 п. л./ в т. ч. автора 0,025 п. л.

2. Руденко, Н. Е. Теоретическое и экспериментальное определение производительности геликоидного дозатора при внесении минеральных удобрений / Н. Е. Руденко, Д. С. Калугин,

Е. В. Кулаев // Вестник АПК Ставрополя. – 2016. – №1 (21). – С. 33–37. – 0,25 п. л./ в т. ч. автора 0,083 п. л.

3. Калугин, Д. С. Эффективность подкормки пропашных культур с использованием геликоидного туковысевающего аппарата / Д. С. Калугин // Вестник АПК Ставрополя. – 2016. – № 1 (21). – С. 11–12. – 0,06 п. л./ в т. ч. автора 0,06 п. л.

4. Калугин, Д. С. Сравнительные испытания туковысевающих аппаратов / Д. С. Калугин, Н. Е. Руденко, Е. В. Кулаев // Научное обозрение. – 2016. – № 3. – С. 59–62. – 0,25 п. л. / в т. ч. автора 0,083 п. л.

5. Калугин, Д. С. Теоретическое и экспериментальное определение коэффициента заполнения туками геликоидного дозатора / Д. С. Калугин, Н. Е. Руденко, Е. В. Кулаев // Научная жизнь. – 2016. – № 2. – С. 30–38. – 0,5 п. л./ в т. ч. автора 0,166 п. л.

#### **патенты РФ:**

6. Пат. 151893 Российская Федерация, МПК<sup>51</sup> А01С 15/00. Универсальный туковысевающий аппарат для подкормки пропашных культур / Руденко Н. Е., Кулаев Е. В., Калугин Д. С., Носов И. А. – № 2014140036/13 ; заявл. 02.10.2014 ; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11. – 7 с. : ил.

#### **публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций:**

7. Калугин, Д. С. Механизация подкормки пропашных культур минеральными удобрениями / Д. С. Калугин, И. А. Носов // Молодые аграрии Ставрополя : сборник научных статей по материалам 78-й научно-практической конференции Ставропольского государственного аграрного университета (Ставрополь, 2014 г.) / СтГАУ. – Ставрополь : АГРУС, 2014. – С. 78–81. – 0,19 п. л./ в т. ч. автора 0,095 п. л.

8. Калугин, Д. С. Обоснование гравитационного туковысевающего аппарата / Д. С. Калугин, И. А. Носов // Молодые аграрии Ставрополя : сборник научных статей по материалам 78-й научно-практической конференции Ставропольского государственного аграрного университета (Ставрополь, 2014 г.) / СтГАУ. – Ставрополь: АГРУС, 2014. – С. 83–85. – 0,12 п. л./ в т. ч. автора 0,06 п. л.

9. Калугин, Д.С. Физико-механические свойства минеральных удобрений применительно к универсальному туковысевающему аппарату / Д. С. Калугин, Е. В. Кулаев, И. А. Носов // Актуальные проблемы научно-технического процесса в АПК : сборник научных статей по материалам XI Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал-2015» / СтГАУ. – Ставрополь : АГРУС, 2015. – С. 61–66. – 0,31 п. л./ в т. ч. автора 0,103 п. л.

10. Калугин, Д. С. Скорость движения туков в геликоидном дозаторе / Д. С. Калугин, Н. Е. Руденко, Е. В. Кулаев // Научно-технический прогресс в АПК: Проблемы и перспективы: Сборник научных статей по материалам XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал-2016» / СтГАУ. – Ставрополь : АГРУС, 2016. – С. 233–239. – 0,56 п. л./ в т. ч. автора 0,186 п. л.

11. Калугин, Д. С. Настройка геликоидного дозатора универсального туковысевающего аппарата АТГ-2 / Д. С. Калугин, Н. Е. Руденко, Е. В. Кулаев // Научно-технический прогресс в АПК: Проблемы и перспективы : сборник научных статей по материалам XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал-2016» / СтГАУ. – Ставрополь : АГРУС, 2016. – С. 145–149. – 0,31 п. л./ в т. ч. автора 0,103 п. л.

Подписано в печать 29.04.2016. Формат 60x84 1/16.  
Гарнитура «Таймс». Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0.  
Тираж 100. Закз №127.  
Отпечатано в типографии издательско-полиграфического комплекса  
СтГАУ «АГРУС», г. Ставрополь, ул. Пушкина, 15.