

Аксенов Александр Геннадьевич

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ МАШИННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ДЛЯ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЛУКОВЫХ КУЛЬТУР**

**Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук**

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

Научный консультант доктор технических наук, профессор,
академик РАН **Измайлов Андрей Юрьевич**,
ФГБНУ «Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ», директор

Официальные оппоненты: **Кухарев Олег Николаевич**,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
аграрный университет», ректор,
кафедра «Организация и
информатизация производства», профессор

Славкин Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Российский государственный
аграрный заочный университет»,
кафедра «Эксплуатация и технический сервис машин»,
профессор

Старовойтова Оксана Анатольевна,
доктор сельскохозяйственных наук,
ФГБНУ «Федеральный исследовательский
центр картофеля имени А.Г. Лорха»,
отдел «Технологии и инновационных проектов»,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева»
(ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева)

Защита состоится «_____» _____ 2021 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д 006.110.01 на базе ФГБНУ «Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ» по адресу: 109428, РФ, г. Москва, ул. 1-й Институтский
проезд, дом 5. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и
на сайте <http://vim.ru>.

Автореферат размещен на сайте Министерства образования и науки Российской
Федерации: <http://www.vak3.ed.gov.ru>

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Пехальский И.А.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. В соответствии со Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации от 01 декабря 2016 года на сегодняшний день наиболее значимыми вызовами для общества, государства и науки является обеспечение продовольственной безопасности и независимости России, конкурентоспособности отечественной продукции на мировых рынках продовольствия, снижение технологических рисков в агропромышленном комплексе. При этом целью Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017 - 2025 годы является «Снижение уровня импортозависимости за счет внедрения и использования: технологий производства семян высших категорий и технологий производства, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия путем увеличения числа конкурентоспособных отечественных технологий».

Одной из наиболее импортозависимых отраслей сельского хозяйства является овощеводство. В 2018 году в Россию было импортировано более 1 млн. тонн овощей, а с учетом стран «Таможенного союза» более 2 млн. тонн. При этом среди овощей открытого грунта большая доля импорта приходится на луковые культуры, которые вместе с семенами импортируется ежегодно на общую сумму более 15 млрд. рублей. Это объясняется тем, что большая доля производства луковых культур приходится на хозяйства населения, где преобладает ручной труд. Из-за урбанизации сельского населения это производство стремительно снижается. Освоение данного объема производства в организованных хозяйствах (КФХ и СХО) затрудняется отсутствием на рынке комплексных технологических и технических решений для производства луковых культур в почвенно-климатических условиях РФ и в первую очередь технических средств для посева семян лука, посадки и калибрования луковиц.

Целью высокоэффективного производства луковых культур является достижение максимальных урожаев требуемого качества при минимальных затратах. Этого можно добиться применением подходящей технологии возделывания луковых культур на основе прогнозирования урожайности с учетом сорта, почвенно-климатических и агротехнических условий, за счет оптимизации норм внесения семян и удобрений. Анализ структуры производства показывает, что основной объем лука возделывается в однолетней культуре из семян, что не позволяет обеспечивать спрос на лук круглый год, так как такой лук созревает только в конце августа, а храниться до марта. В период с апреля по август внутреннее потребление может обеспечиваться луком, произведенным в двухлетней культуре из севка, при этом ключевыми операциями в этой технологии является ленточный посев семян лука, посадка и калибрование луковиц, однако технические средства в полной мере отвечающие агротехническим требованиям на эти операции отсутствуют. Основной проблемой в их разработке является широкая вариабельность форм и размеров луковиц, в результате имеется большое разнообразие конструкций машин, удовлетворительно работающих на отдельных сортах, но не адаптивные к существующему изменению форм и размеров луковиц.

В связи с этим, актуальной проблемой является разработка комплекса технических средств для возделывания луковых культур, включающего в себя машины для посева семян лука, посадки и калибрования луковиц, а также программное обеспечение для разработки машинных технологий адаптивных к почвенно-климатическим условиям и свойствам посадочного материала.

Степень разработанности темы. Разработкой машинных технологий возделывания овощных культур, а именно корнеплодов, картофеля и луковых культур в разное время занимались Н.В. Алдошин, С.Н. Борычев, А.М. Валге, Н.И. Верещагин, В.П. Горячкин, М.Н. Ерохин, П.А. Емельянов, Н.Н. Колчин, М.Ю. Костенко, К.З. Кухмазов, А.Б. Калинин, Ф.В. Кутейников, В.К. Кутеницын, Б.Н. Ким, О.Н. Кухарев, Н.П. Ларюшин, А.М. Ларюшин, Л.М. Максимов, Г.Д. Петров, К.А. Пшеченков, А.А. Протасов, Э.С. Рейнгарт, Г.К. Рембалович, А.П. Савельев, В.И. Славкин, В.И. Сизов, О.А. Старовойтова, И.А. Успенский, В.А. Хвостов, В. Amol, I Kemp, N. Nilesh, E. Ronald, Shen Qiang, L. James и др. Данные ученые внесли значительный вклад в изучение вопроса предпосевной подготовки почвы, посева семян, калибрования и посадки луковиц, но существующее разнообразие конструктивно-технологических схем машин не в полной мере обеспечивает эффективное производство луковых культур в почвенно-климатических условиях России. Кроме того, результаты известных теоретических и экспериментальных исследований посева семян, калибрования и посадки луковиц не могут быть непосредственно применены при разработке адаптивных технологий и рабочих органов посевных, калибровочных и посадочных машин, ввиду широкого разнообразия сортов и гибридов луковых культур с существенными различиями в размерно-массовых характеристиках и физико-механических свойствах. Работа выполнена в соответствии с планами НИОКР ФГБНУ ФНАЦ ВИМ на 2015 – 2018 гг., темы: № 24.3.11 «Разработать критические технологии и техническую документацию технологий и машин для селекции и семеноводства овощных культур», № 10.09.02.01 «Исследование закономерностей взаимодействия овощных культур с рабочими органами уборочных машин в различных почвенно-климатических условиях».

Научная гипотеза. Повышения эффективности возделывания луковых культур возможно достичь путём обоснования и разработки машинных технологий и технических средств, адаптивных к физико-механическим и технологическим свойствам семенного материала и почвы.

Цель работы. Повышение эффективности производства луковых культур путём обоснования и разработки адаптивных машинных технологий и технических средств для посева семян лука, калибрования и посадки луковиц.

Задачи исследований:

- проанализировать существующие технологии и технические средства для возделывания луковых культур и определить направления их совершенствования;
- разработать метод и модель проектирования адаптивных машинных технологий для возделывания луковых культур с учетом их адаптивности к физико-механическим и технологическим свойствам семенного материала и почвы;
- теоретически обосновать параметры и разработать конструкции технических средств для ленточного посева семян лука, калибрования и ориентированной посадки луковиц;
- экспериментально исследовать в лабораторных и полевых условиях разработанные адаптивные технологии и технические средства для возделывания луковых культур;
- провести технико-экономические исследования разработанных адаптивных машинных технологий и технических средств в производственных условиях;
- выполнить опытно-производственную проверку и внедрение разработанных адаптивных технологий и технических средств для возделывания луковых культур;

- разработать рекомендации по применению разработанных адаптивных машинных технологий и технических средств для возделывания луковых культур научно-образовательным, промышленным и сельскохозяйственным организациям.

Объект исследований. Машинные технологии и технические средства для возделывания луковых культур.

Предмет исследований. Адаптивность конструктивных и технологических параметров технических средств для возделывания луковых культур к изменению физико-механических свойств луковиц и почв.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных задач проведены аналитические исследования для классификации рабочих органов по степени их адаптивности к факторам производства. Применены элементы динамического программирования для формирования адаптивных машинных технологий возделывания луковых культур. В теоретических исследованиях применены законы и методы классической механики и математики. В экспериментальных исследованиях использованы теории однофакторного и многофакторного эксперимента для лабораторных и лабораторно-полевых условий в соответствии СТО АИСТ и ГОСТ. Обработка экспериментальных результатов исследований проводилась с использованием прикладных программ «Mathcad», «Exel», «STATISTICA».

Научную новизну представляют:

- принципы воздействия адаптивных технических средств эластичного типа на луковицы при их калибровании и посадке;
- критерий адаптации машинной технологии возделывания луковых культур, показывающий отзывчивость луковых культур на применение адаптивных технических средств в различных почвенно-климатических условиях;
- метод и модель разработки адаптивных машинных технологий возделывания луковых культур;
- классификация рабочих органов для посадки и калибрования луковиц по степени их адаптивности к факторам производства (форме луковиц и типу почв);
- конструктивно-технологические схемы и параметры сошника для ленточного посева с распределителем-отражателем семян изотонного типа, высаживающего аппарата комбинированного типа (катушечно-вильчатого), обеспечивающего ориентацию луковиц донцем вниз при посадке, роликового калибратора с эластичным интенсификатором;
- математические модели, описывающие параметры распределителя-отражателя семян изотонного типа; рабочий процесс катушечно-вильчатого высаживающего аппарата и роликового калибратора с эластичным интенсификатором;
- алгоритм компьютерной программы «Программа подбора оптимальной машинной технологии возделывания луковых культур» для формирования адаптивных машинных технологий.

Новизна технических решений подтверждается патентами РФ на изобретение № 2544631, № 2562535, № 2021108790, № 2708166; свидетельством на регистрацию программы для ЭВМ № 2018619692 и др.

Практическая значимость. Теоретические и экспериментальные зависимости для разработки и изготовления адаптивных технических средств для возделывания луковых культур. Компьютерная программа «Программа подбора оптимальной машинной технологии возделывания луковых культур» для разработки адаптивных машинных технологий возделывания луковых культур, которая позволяет реализовать в автоматическом режиме сравнение вариантов технологий по заданным параметрам для условий конкретной организации. Посевная машина для ленточного посева с сошником,

оснащенным распределителем-отражателем изотонного типа для посева семян лука во всем интервале рабочих скоростей 1,9-2,8 м/с, с соблюдением агротехнических требований по равномерности распределения семян. Роликовый калибратор с эластичными интенсификаторами для калибрования и получения первого сорта репчатого лука по ГОСТ при поступательной скорости транспортера 0,21 м/с и производительности калибратора 5,1 т/ч. Посадочная машина, оснащенная катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом для ориентированной посадки луковиц всех фракций и форм при угле наклона семяпровода в интервале 35-40 градусов.

Реализация результатов исследований. Разработанные и изготовленные в НПЦ «Сеялка» при ОАО «Радиозавод» (г. Пенза) и ООО «Агротехмаш» (г. Рязань), ФГБНУ ФНАЦ ВИМ адаптивные технические средства для возделывания луковых культур, в том числе машина для ленточного посева, машина с катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом для ориентированной посадки луковиц и роликовый калибратор с эластичными интенсификаторами, компьютерная программа «Программа подбора оптимальной машинной технологии возделывания луковых культур» по разработке адаптивных машинных технологий возделывания луковых культур прошли производственную проверку в АО «Озёры» (Московской области), в ООО «Новый урожай» (Пензенской области) и в ЗАО «Красный октябрь» (Ростовской области). Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Пензенский ГАУ», ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, ФГБОУ ВО «Самарский ГАУ» и др.

Апробация. Основные положения диссертации были доложены и одобрены на научно-практических конференциях ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (с 2015...2018 гг.), ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (2016 г.), ФГБОУ ВПО «Ярославская ГСХА» и ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ» (2013 г.), ФГОУ ВПО «Пензенская ГСХА» (с 2007...2010 гг.); на международной научно-технической конференции ГОУ ВПО «Пензенский ГУ» (2009 г.); на Всероссийских научно-практических конференциях ФГОУ ВПО «Мичуринский ГАУ» и «Самарская ГСХА» (2009 г.), а также в Вагенингенском университете, Нидерланды, (2019 г.).

Основные результаты исследований представлялись в качестве инновационного проекта на научно-инновационных конкурсах «УМНИК» и «СТАРТ» фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, в результате которых получено право на заключение двух государственных контрактов на выполнение НИОКР по теме данной диссертации.

Публикации. По теме данной диссертации опубликовано 70 печатных работ, в том числе 3 монографии; 5 статей в журналах, индексируемых в WoS и Scopus; 30 статей опубликованы в изданиях, указанных в «Перечне рецензируемых научных изданий ВАК» и 5 статей без соавторов. Получено 8 патентов на изобретение и полезную модель. Общий объем публикаций составляет 14,3 печатных листов, в том числе личный вклад автора данной диссертации - 7,2 печатных листа.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения; пяти разделов; общих выводов; списка использованной литературы, включающего 201 наименований и приложения на 34 страницах. Диссертация изложена на 281 странице, содержит 36 таблиц и 100 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследования, задачи и основные положения, выносимые на защиту диссертационной работы.

В первой главе «Современное состояние производства лука в мире и России» рассмотрены экономические, агробиологические, технологические и технические аспекты производства овощных культур на примере луковых. Основная доля импорта овощной продукции в России приходится на период с марта по август, что объясняется недостаточным количеством овощей длительного хранения (до мая) и технологий раннего производства овощных культур. Кроме того, в овощеводстве существует высокая зависимость от импортных семян. В связи с этим, импортозамещение и повышение конкурентоспособности овощных культур в России необходимо осуществлять за счет развития технологий получения продукции длительного хранения и получения раннего урожая овощей (май-июль). На производстве луковых это может быть решено расширением промышленного производства лука из севка, а также озимой посадкой семян и лука-севка.

Из всего цикла производства луковых культур в настоящий момент наиболее освоенным является производство лука из семян, обеспечивающее рынок продукцией с августа по март. В свою очередь технологии производства лука-севка, репчатого лука из севка, лука-чернушки имеют слабое научно-методическое обеспечение и как следствие, технологическое и техническое отставание от ведущих мировых производителей.

Проведенный анализ калибровальных и посадочных машин показал, что качество их работы сильно изменяется в зависимости от свойств посадочного материала.

Предложена классификация устройств для калибрования и посадки лукович по степени их адаптивности к изменению форм и размеров лукович (рисунок 1), которая позволяет обосновать принятие решения о выборе конструктивных схем машин для калибрования и посадки лукович в зависимости от поставленной задачи.

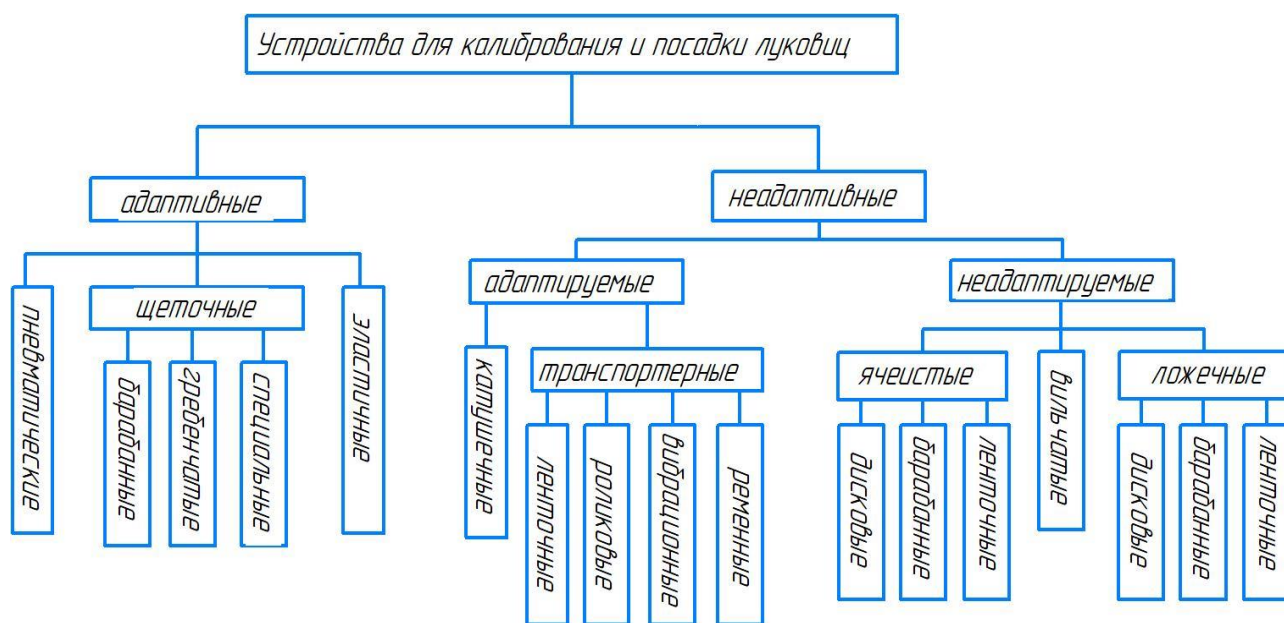


Рисунок 1 – Классификация устройств для калибрования и посадки лукович по их адаптивности к изменению форм и размеров лукович

Во второй главе «Методологические основы разработки адаптивных технологий и технических средств возделывания луковых культур» разработаны метод и модель проектирования машинных технологий для возделывания луковых культур с элементами динамического программирования.

Разработка технологического процесса производства луковых культур предусматривает следующие этапы:

1. Выбор культуры (определяется спросом на рынке или собственной потребностью).
2. Регион возделывания (определяет почвенно-климатические условия возделывания).
3. Товарное назначение продукции (входные параметры для выбора сорта и разработки технологии).
4. Выбор сорта (из госреестра допущенных сортов для различных регионов и с учетом товарного назначения).
5. Выбор севооборота (оптимальное сочетание выбранной культуры с уже имеющимися на предприятии).
6. Формирование агротехнологии возделывания (определение перечня необходимых технологических операций, с указанием требуемых сроков их выполнения и предельных параметров – разработка технологической карты).
7. Формирование машинной технологии возделывания (разработка технологического комплекса машин и оборудования для выполнения технологического процесса возделывания выбранной культуры, включающего технологические операции из пункта 6).

От качества выполнения операций технологическим комплексом машин во многом зависит эффективность возделывания выбранной культуры и в конечном счете экономическая целесообразность производства.

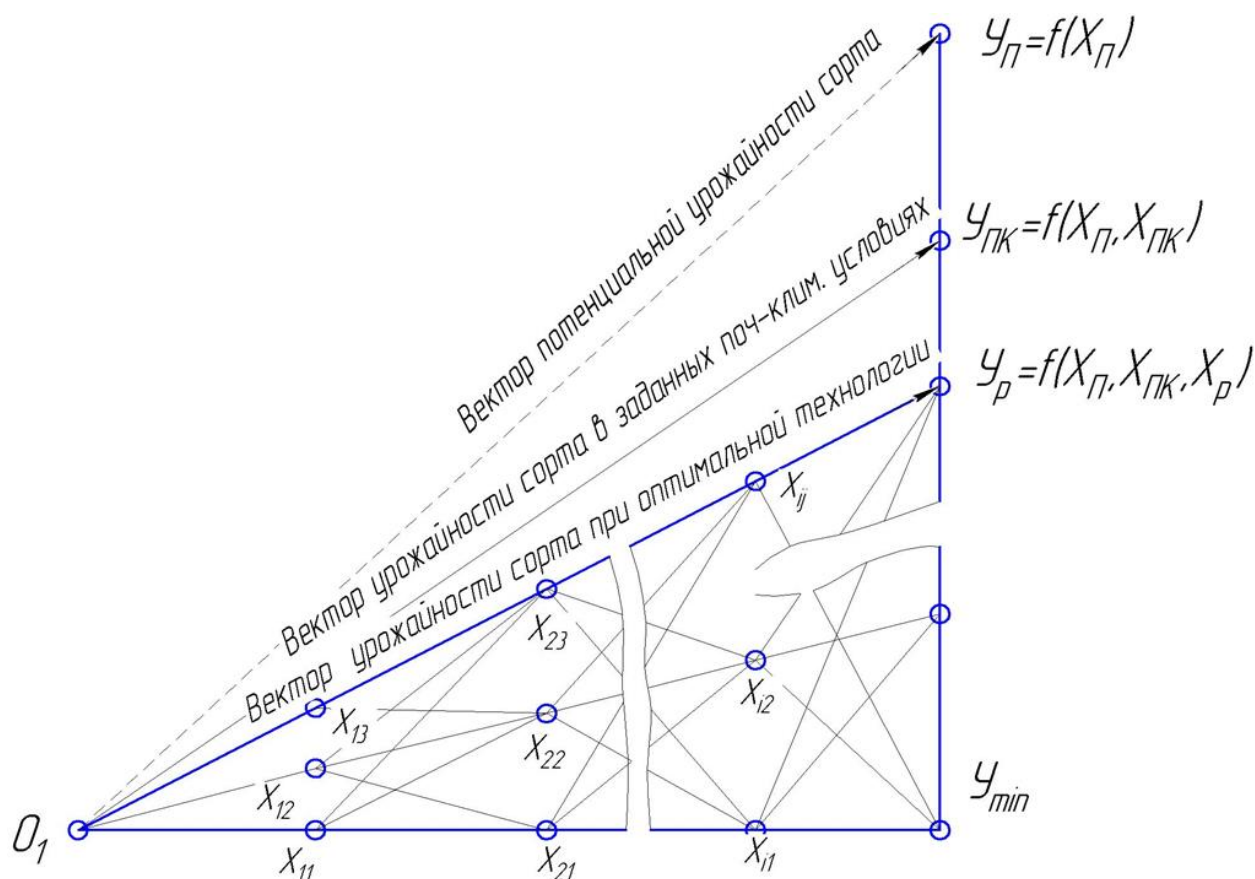
Для определения типов рабочих органов определяющее значение имеют почвенно-климатические условия, физико-механические свойства семенного материала.

Рассмотрены существующие зоны возделывания луковых культур на территории Российской Федерации (РФ) с целью формирования для каждой предпочтительную (наилучшую) технологию возделывания луковых культур. Для этого использованы карты агроклиматического районирования, почв и среднегодовых осадков РФ.

Выделены восемь зон возделывания луковых культур являющимися наиболее благоприятными по рассмотренным факторам. К ним отнесены: Северо-Западная, Волго-Вятская, Центральная зона, Центральнo-черноземная, Средневолжская, Нижневолжская, Северо-Кавказская, Южная.

Определены основные формы и размерно-массовые характеристики сортов лука, которые включены в госсортиреестр РФ, а именно 15 различных форм луковиц. При этом на округлую форму (округлая, ромбическая, кубовидная) приходится 67 % (233 сорта), на овальные (широкообратнойцевидная, широкоэллиптическая, поперечноэллиптическая, широкояйцевидная, овальная, обратнойцевидная, эллиптическая, яйцевидная и др.) – 28% (99 сортов), а на плоскоокруглую – только 5%. Плоскоокруглый сорт «Штутгартен Ризен» является наиболее распространенным и на него приходится до 50 % всего производства репчатого лука, также популярны сорта овальной формы «Геркулес F1», поэтому определены размерно-массовые характеристики этих сортов.

Сорта и гибриды каждой сельскохозяйственной культуры имеет свой потенциал урожайности $У_{п}$, реализовать который на практике бывает сложно. В зависимости от почвенно-климатических особенностей хозяйства и поля этот потенциал, как правило, изменяется до урожайности $У_{пк}$. Дальнейшее изменение урожайности обусловлено выбранной технологией возделывания и особенностями в работе применяемых машин и оборудования. Графически изменения потенциальной урожайности можно представить следующей диаграммой (рисунок 2).



Последовательно выполняемые n , технологических операций, m , способами

$$K_a = \frac{y_p}{y_{пк}} - \text{коэффициент адаптации машинной технологии}$$

Рисунок 2 – Диаграмма возможных комбинаций технологических операций по возделыванию сельскохозяйственных культур

Тогда отношение фактической урожайности, полученное при применении определенной технологии, к потенциальной урожайности для данной почвенно-климатической зоны, показывает приспособленность (адаптивность) данной технологии к зоне возделывания и такую технологию можно оценить коэффициентом адаптации:

$$K_a^л = \frac{y_p}{y_{пк}}, \quad (1)$$

где $y_{пк}$ – потенциальная урожайность сорта в рассматриваемых почвенно-климатических условиях, кг/га; y_p – фактическая урожайность сорта в рассматриваемых почвенно-климатических условиях, кг/га.

В данной диаграмме (рисунок 2) для достижения расчетной урожайности y_p с координатами $(i; j)$, учитывая, что технологические операции выполняются последовательно, перемещаться можно по горизонтали и диагонали с единичным шагом. То есть, из т. O_1 может быть осуществлен переход в ячейку с координатами $(1; 1)$ $(1; 2)$ $(1; \dots)$ $(1; M)$, из чего следует, что количество возможных переходов на первом шаге a_{1j} равно количеству вариантов выполнения операции M :

$$a_{1j} = M, \quad (2)$$

где i – последовательный номер технологической операции; j – максимальное количество вариантов выполнения технологической операции.

Тогда количество вариантов достижения заданной ячейки с координатами $(i; j)$ будет определяться формулой, представляющую из себя следующую рекуррентную последовательность:

$$a_{ij} = a_{i(j-1)} + a_{(i-1)(j-1)} + \dots + a_{(i-m-1)(j-1)}. \quad (3)$$

В машинных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур выделяют основные направления оптимизации - это повышение урожайности за счет агротехнических мероприятий Y_{ij} , снижение энергозатрат на выполнение операций Ξ_{ij} и повышение производительности Π_{ij} .

Выбор ячейки на первом шаге будет определен ценностью ячеек в 1 столбце и тогда в зависимости от задачи минимизации (или максимизации) стоимость пройденной цепочки из технологических операций в заданной ячейки $(i; j)$ описывается рекуррентной последовательностью:

$$c_{ij} = c_{\min(\max)(j-1)} + \min(\max)(c_{(i+1)j}; \dots; c_{(i+m)j}). \quad (4)$$

С учетом вышесказанного, метод проектирования адаптивных машинных технологий включает в себя ряд этапов, основанных на специфике управления машинной технологией возделывания луковых культур.

1. Целью управления машинной технологией возделывания луковых культур является обеспечение целевых показателей возделывания лука при изменении внешней среды, к таким показателям относятся:

- урожайность заданного качества Z_1 , т/га;
- затраты энергии на единицу продукции Z_2 , кВт/т;
- производительность Z_3 , га/ч.

Тогда вектор цели управления запишется в следующем виде:

$$Z = (z_1, \dots, z_k), \quad (5)$$

где z_i - целевой параметр, который определяется как

$$z_i = \psi_i(I) \quad (i = 1, \dots, k), \quad (6)$$

где ψ_i - функция определяющая связь состояния среды i и целевого параметра z_i . Исходя из сформулированной цели целевыми параметрами будут являться в первую очередь урожайность и затраты на ее достижения.

Тогда цель Z^* отражается в пространстве ситуаций $\{I\}$ в виде системы целевых требований:

$$I^*: S^*: \begin{cases} \psi_1(I) \rightarrow \max. \\ \psi_2(I) \rightarrow \min. \\ \psi_3(I) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (7)$$

2. Выбор объекта управления. Для рассматриваемой системы, (рисунок 3) управление урожайностью возможно формированием различных технологических комплексов машин для возделывания луковых культур с различными коэффициентами адаптации K_a^n машинной технологии, которые были определены экспериментально в серии полевых исследований для различных технологических комплексов.

3. Разработка структурной модели. Под структурой модели понимаем характер зависимости F объекта Y от его входов – неуправляемого X и управляемого U .

$$Y = F(X, U). \quad (8)$$

Условно можно считать, что модель F состоит из структуры и параметров:

$$F = (St, C), \quad (9)$$

где St – структура модели F , $C = (c_1, \dots, c_k)$ – ее параметры. Таким образом, целью третьего этапа является определение структуры St объекта управления (рисунок 3).

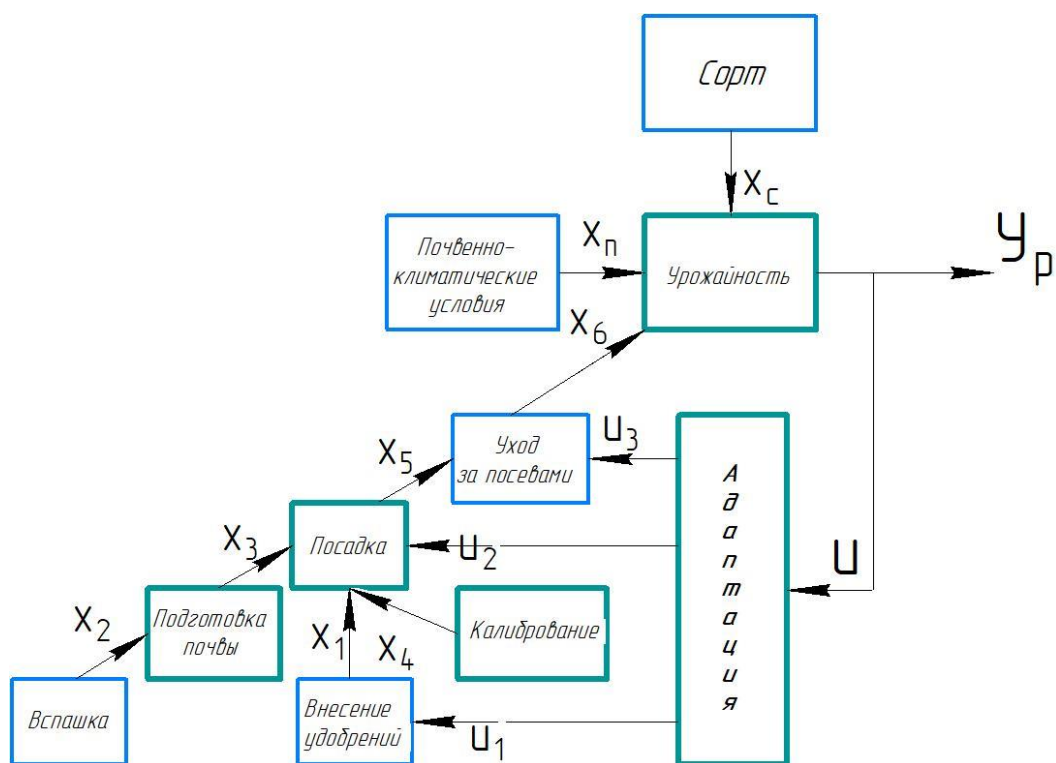


Рисунок 3 – Структурная модель адаптивной технологии возделывания луковых культур

4. Синтез параметров модели. Он связан с определением параметров $C = (c_1, \dots, c_k)$ модели

$$Y = F(X, U, C). \quad (10)$$

Для определения параметров существующих машин использован метод идентификации используя данные протоколов испытаний МИС и внутрихозяйственные сведения о качественных показателях работы машин.

Для разрабатываемых новых машин проведена серия экспериментальных исследований методом планированием эксперимента.

5. Синтез управления опирается на конструктивные и технологические параметры машин для возделывания луковых культур X и изменяющиеся качественные показатели их работы Y , а также ограничения R управления U . Синтез управления сводится к решению вариационной задачи, которая получается из выражения (5) при соответствующих преобразованиях и свертки, необходимых для преодоления многокритериальности.

6. Реализация управления связана с процессом отработки объектом программы, полученной на предыдущем этапе. После реализации цикла управления, в случае недостижения поставленной цели, корректируется один из этапов управления, т.е. проводится адаптация модели управления. Адаптацию также необходимо производить в случае изменения входных параметров, а именно при смене сорта, поля, состава машин и.т.д. Для автоматизации проектирования технологий возделывания луковых культур разработана компьютерная программа «Программа подбора оптимальной машинной технологии возделывания луковых культур» свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018619692 от 11.07.2018. Программа написана в среде Delphi, работа в ней происходит в режиме диалоговых окон.

В третьей главе «Разработка адаптивных технических средств для возделывания луковых культур» рассмотрены закономерности работы технических средств на возделывании луковых культур. На основе анализа устройств для посева

семян, наиболее перспективной представляется конструкция сошника для ленточного посева с пассивным распределителем выполненного в виде отражателя с криволинейной поверхностью.

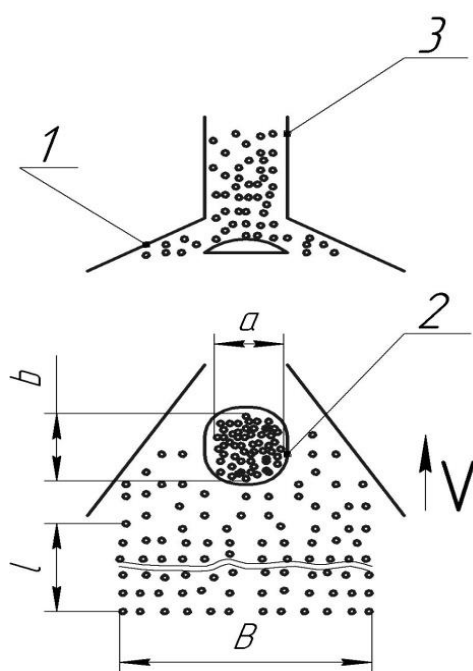
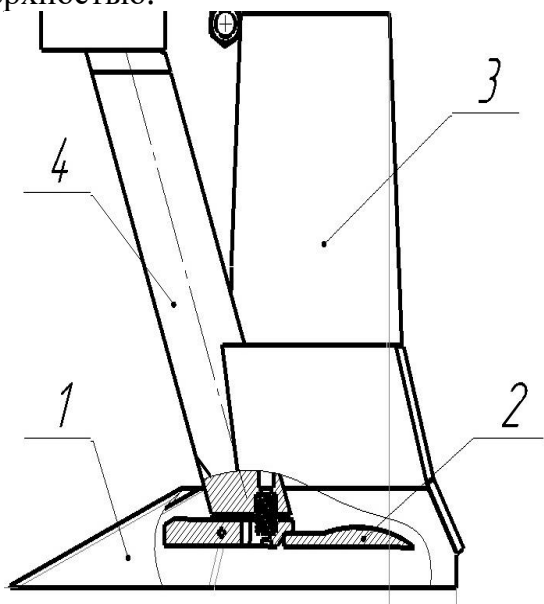


Рисунок 4 – Конструктивная схема сошника посевной машины вид сбоку:

1 – лапа стрельчатая; 2 – распределитель-отражатель; 3 – семяпровод; 4 – стойка сошника

Рисунок 5 – Схема распределения семян в сошнике:

1 – лапа сошника, 2 – распределитель-отражатель, 3 – семяпровод

Общая конструктивная схема сошника для ленточного посева представлена на рисунке 4. Рабочий процесс такого устройства осуществляется следующим образом. Семенной материал поступает по семяпроводу 3 равномерным потоком, на распределитель-отражатель сошника 2, находящийся под лаповым пространством, имеющий сложную форму, ограниченную кромкой стрельчатой лапы 1 (рисунок 5). При этом сошник равномерно и прямолинейно движется вместе с посевной машиной со скоростью V_m , (м/с).

Необходимо математически описать форму криволинейной поверхности распределителя-отражателя, обеспечивающего равномерное распределение семян в подлаповом пространстве по всей длине ленты l_n , (м), на ширине B_n , (м). Коэффициент восстановления семян об отражатель равен k_c .

Семена, падающие со скоростью $V_{сл}$ вертикально вниз сталкиваются с распределителем-отражателем, поверхность которого задаётся графиком функции $f_{от}$, отражаются от него и далее движутся свободно, падая в некоторой области D. Требуется определить функцию $f_{от}$, соответствующую равномерному распределению семян в области.

На начальном этапе исследования рассматривается одномерная модель, в которой семяпровод есть некоторый отрезок $[0, A]$; поверхность распределителя-отражателя представляет собой монотонно убывающую непрерывно дифференцируемую функцию с начальным условием: $f(0) = a > 0$, заданную на рассмотренном отрезке. При этом картина отражения рассматривается следующая – семена совершают ровно одно отражение от поверхности и в дальнейшем не взаимодействуют ни с ней, ни между собой, двигаясь по параболе, а в момент падения на землю (уровень которой считаем нулевым)

немедленно фиксируются и перестают двигаться. То есть вторичными отражениями семян от земли в момент падения, их столкновениями друг с другом и с землёй, и сопротивлением воздуха пренебрегаем. Напротив, соударение семян с отражателем является абсолютно упругим и происходит без потери кинетической энергии (то есть модуль скорости не изменяется). Считается, что скорость падения семян в течение всего падения до момента отражения остаётся постоянной; тем самым, мы пренебрегаем небольшим увеличением скорости падения в тех точках отрезка, в которых $f(x) < a$ (что соответствует небольшому характерному вертикальному размеру отражателя); при этом после отражения движение семян становится, как и должно, равноускоренным с ускорением свободного падения. Направление скорости при соударении меняется строго по правилу «угол падения равен углу отражения», при этом имеется в виду угол с касательной (или, равносильно, с нормалью) к графику функции $f_{от}$ в точке соударения (рисунок 6).

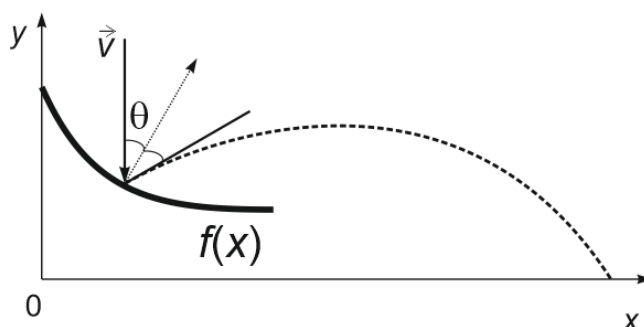


Рисунок 6 – Схема соударения семян лука и поверхности отражателя

Простота рассмотренной постановки позволяет аналитически свести задачу к решению некоторого дифференциального уравнения. При этом учёт неупругости столкновения семян с отражателем в виде мультипликативного коэффициента потери скорости $0 < k_c < 1$ несложен (и теоретически возможен) без усложнения модели, однако сводится всего лишь к подмене вертикальной скорости $V_{сл}$ скоростью $k_c V_{сл}$, которая получилась бы после соударения (с дальнейшим движением по параболе), что совершенно не влияет на общий вид уравнения.

Можно представить две альтернативные картины равномерного отражения: «изотонную» (рисунок 7(а)) и «антитонную» (рисунок 7(б)). Адекватная математическая модель должна включать в себя реализацию обеих возможностей в рамках одного решения дифференциального уравнения.

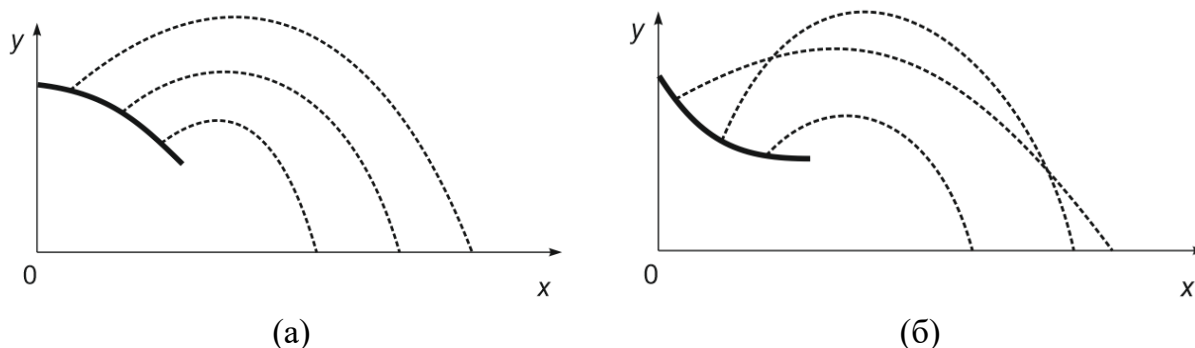


Рисунок 7 – Схема равномерного отражения от выпуклой (а) и вогнутой (б) поверхности

Для вывода уравнения полёта частицы потока семян до отражателя не является существенным и можно считать, что частица зарождается в точке графика функции $(x, f(x))$, вылетая из неё под углом 2θ к вертикали. Соответственно, вертикальная

составляющая скорости отражённой частицы равна $V_{\text{сл}} \cdot \sin 2\theta$, откуда ордината точки в момент времени t вычисляется по формуле $f(x) + (V_{\text{сл}} \cdot \sin 2\theta) \cdot t + \frac{gt^2}{2}$. Следовательно момент t_0 падения частицы потока семян на землю можно найти из квадратного уравнения:

$$(f(x) + h) + (V_{\text{сл}} \cdot \sin 2\theta) \cdot t + \frac{gt^2}{2} = 0. \quad (11)$$

Очевидно, что t_0 – больший корень уравнения. Тем самым:

$$t_0 = \frac{-V_{\text{сл}} \cdot \sin 2\theta + \sqrt{(V_{\text{сл}} \cdot \sin 2\theta)^2 - 2g(f(x) + h)}}{g}. \quad (12)$$

Далее, горизонтальная составляющая скорости отражённой частицы равна $V_{\text{сл}} \cdot \cos 2\theta$, откуда горизонтальное смещение частицы вычисляется по формуле:

$$(V_{\text{сл}} \cdot \cos 2\theta) \cdot t_0 = (V_{\text{сл}} \cdot \cos 2\theta) \cdot \frac{-V_{\text{сл}} \cdot \sin 2\theta + \sqrt{(V_{\text{сл}} \cdot \sin 2\theta)^2 - 2g(f(x) + h)}}{g}. \quad (13)$$

Прибавляя абсциссу точки, в которой происходит отражение и производя очевидные равносильные преобразования, окончательно получаем абсциссу падения частицы, отразившейся от графика функции-отражателя в точке $(x, f(x))$:

$$Q(x) = x + \frac{-V_{\text{сл}}^2 \cdot \frac{\sin 4\theta}{2} + V_{\text{сл}} \cdot \cos 2\theta \cdot \sqrt{(V_{\text{сл}} \cdot \sin 2\theta)^2 - 2g(f(x) + h)}}{g}. \quad (14)$$

Записывая условие равномерности в виде $\frac{dQ}{dx} = C$ (условие соответствует тому, что функция $Q(x)$ является приблизительно линейной или, равносильно, тому, что частицы, отразившиеся от небольшого интервала длины dx распределяются равномерно по интервалу $\frac{dQ}{C}$), получаем уравнение:

$$\frac{\left(\frac{dQ}{d\theta}\right)}{\left(\frac{d\theta}{dx}\right)} = C, \text{ или } \frac{d\theta}{dx} = \frac{1}{C} \cdot \frac{dQ}{d\theta}, \quad (15)$$

или, после очевидных преобразований:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dx} = & -\frac{V_{\text{сл}}^2}{gC} \cdot 2 \cos 4\theta + \frac{V_{\text{сл}}}{g} \cdot \left(2 \sin 2\theta \cdot \sqrt{(V_{\text{сл}} \cdot \sin 2\theta)^2 - 2g(f(x) + h)} + \right. \\ & \left. + \cos 2\theta \cdot \frac{V^2 \sin 4\theta}{\sqrt{(V_{\text{сл}} \cdot \sin 2\theta)^2 - 2g(f(x) + h)}} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Добавляя к полученному уравнению очевидное уравнение

$$\frac{df}{dx} = -\text{tg}\theta, \quad (17)$$

получаем окончательно искомое дифференциальное уравнение, точнее – систему двух дифференциальных первого порядка (равносильную уравнению второго порядка).

Полученная система дифференциальных уравнений была решена явным методом Рунге-Кутты четвёртого порядка. Типичное решение системы приведено на рисунке 8.

В действительности, от одного из упрощающих допущений на этом этапе исследования нетрудно избавиться: именно от того допущения, что все частицы потока семян в момент отражения имеют одинаковую вертикальную скорость

Пусть H – высота уровня, с которого с начальной скоростью $V_{\text{сл}}$ начинается свободное (с ускорением g) падение семян (до отражающей поверхности). Соответственно, частицам потока предстоит пролететь расстояние $H - f(x)$. Аналогично предыдущему, время падения t_0 является большим корнем уравнения: $H - f(x) = V_{\text{сл}} t_0 +$

$\frac{gt_0^2}{2}$. Соответственно, $t_0 = \frac{-V_{\text{сл}} + \sqrt{V_{\text{сл}}^2 - 2g(f(x) - H)}}{g}$, и скорость частицы в момент отражения равна:

$$V_{\text{сл}}(x) = V_{\text{сл}} + gt_0 = V_{\text{сл}} + g \cdot \frac{-V_{\text{сл}} + \sqrt{V_{\text{сл}}^2 - 2g(f(x) - H)}}{g}. \quad (18)$$

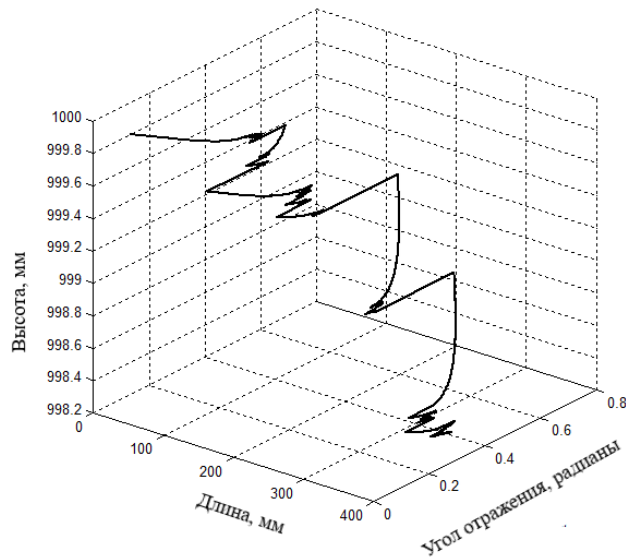


Рисунок 8 – Графическое представление решения системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты

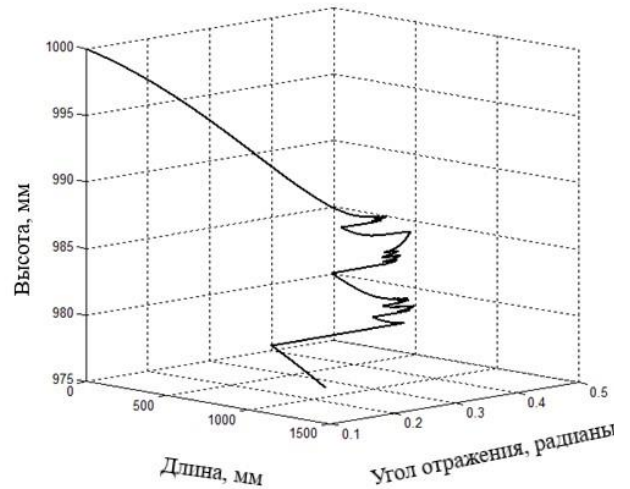
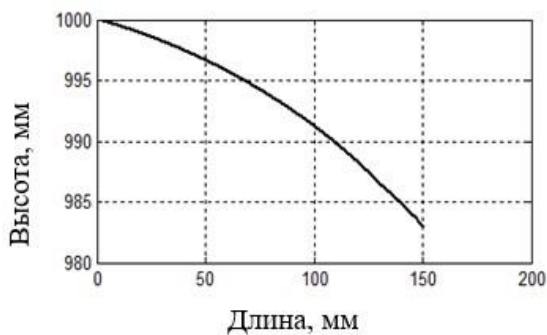


Рисунок 9 – Графическое представление решения системы модифицированных дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты

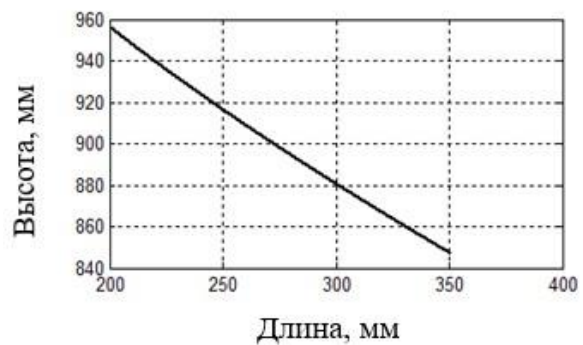
Подставляя это выражение вместо $V_{\text{сл}}$ в первоначальное уравнение, получаем уравнение, содержащее учёт эффекта изменения высоты отражающей поверхности. Это уравнение также было решено при помощи метода Рунге-Кутты 4 порядка, продемонстрировав несколько более регулярное поведение (рисунки 9 и 10).

Для получения геометрической формы распределителя-отражателя необходимо выбрать участок кривой являющейся решением системы дифференциального уравнения (16), (17), далее используя уравнение выбранной кривой построить его в графическом редакторе (КОМПАС-3D) и используя функцию получения формы детали «вращением» получить искомую форму.

Однако для выбора участка кривой необходимо обосновать геометрические размеры распределителя-отражателя, которые определяются требуемой шириной ленты посева семян и должны согласовываться с размерами сошника, таким образом, чтобы весь поток семян сходящий с семяпровода попал на распределяющую поверхность.



(а)



(б)

Рисунок 10 - Изотонные (а) и антитонные (б) естественные фрагменты решения модифицированного уравнения

Очевидно, что для распределения семян равномерно во всех направлениях, форма основания отражателя должна иметь окружность, тогда при вращении кривой поверхности, боковая поверхность отражателя будет иметь конусную или сферическую поверхность, в зависимости от формы кривой (рисунок 10).

Исходя из вышесказанного, диаметр основания распределителя будет равен:

$$D_{po} = P_{сп}, \quad (19)$$

где D_{po} – диаметр основания распределителя-отражателя, м; $P_{сп}$ – наименьший поперечный размер семяпровода для прямоугольной формы (для круглой формы диаметр семяпровода), м.

Для посева семян лука ширина ленты колеблется в пределах 50 - 80 мм, при этом диаметр подаваемого потока с семяпровода при норме высева 60 - 80 кг/га составляет 20-25 мм. Исходя из этого и из формы кривой (рисунок 10), полученной решением системы дифференциальных уравнений (16-17), поставленным требованиям в большей степени отвечает изотонная поверхность (рисунок 11а).

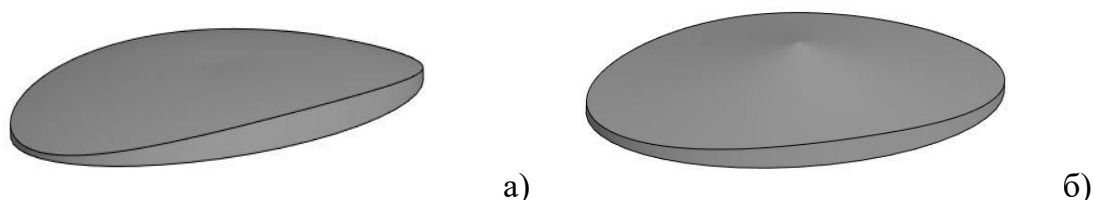


Рисунок 11 – 3D модель распределителя-отражателя семян: а) изотонного б) антитонного типа

Для калибровки луковиц на фракции перед посадкой в соответствии с ГОСТ ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разработана калибровочная машина (рисунок 12).

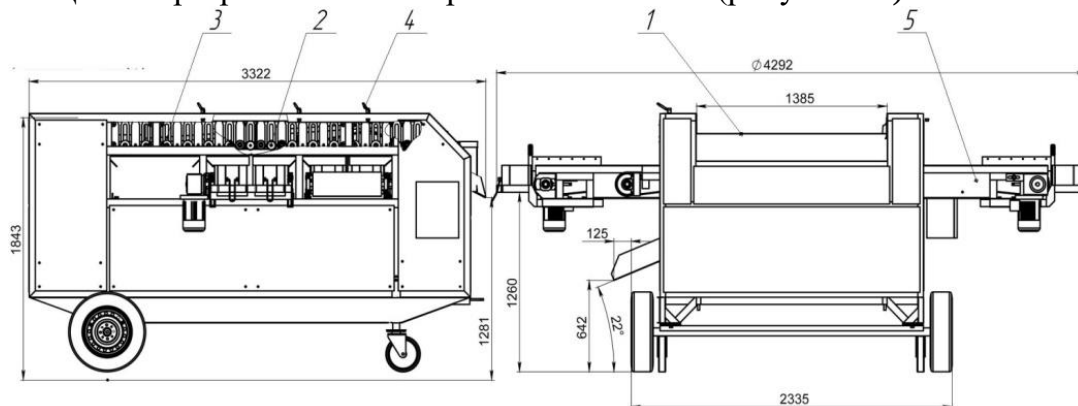


Рисунок 12 – Конструктивно-технологическая схема калибровочной машины с транспортером роликового типа и эластичными интенсификаторами: 1 – поверхность калибрующая эластичными интенсификаторами; 2 – ролики; 3 – направляющие; 4 – винт; 5 – транспортер выгрузной

Калибратор предназначен для разделения луковиц на фракции. Калибрующая поверхность 1 у него представляет собой бесконечный роликовый транспортер с размещением роликов 2 в шахматном порядке. В процессе работы расстояние между роликами изменяется за счет набегания нижнего ряда роликов на направляющие 3, положение которых регулируется винтом 4. Разделение по фракциям происходит за счет того, что, по мере продвижения роликового транспортера из начала в конец устройства, расстояние между роликами увеличивается, образуя щели, в которые проходит разделяемый продукт. Разделенный на фракции, продукт выгрузными транспортерами 5 отводится от линии и загружается в контейнеры или в сетку.

Впервые получено выражение для определения производительности роликового калибратора:

$$\Pi_c = \frac{2V_T m_{\text{л}} B_{\text{к}}^p k_c}{3d_p h_{\text{л}}} \quad (20)$$

где V_T – скорость движения полотна, м/с; $n_{\text{л}}^1$ – максимальное количество лукович на 1 погонном метре, шт; $m_{\text{л}}$ – средняя масса одной луковичы, кг; $B_{\text{к}}^p$ – рабочая ширина калибратора, м; $h_{\text{л}}$ – высота луковичы, м; k_c – коэффициент учитывающий площадь, необходимую 1 луковиче для свободного и устойчивого калибрования (равен 0,5-0,75); $N_c^1 = \frac{1}{3d_p}$ – количество секций в 1 метре (т.к. секция состоит из 3х роликов (рисунок 13)), шт.

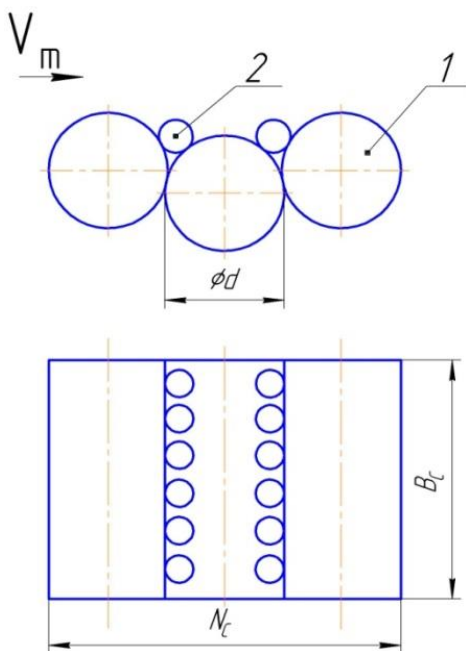


Рисунок 13 – Расчетная схема параметров калибровочной машины

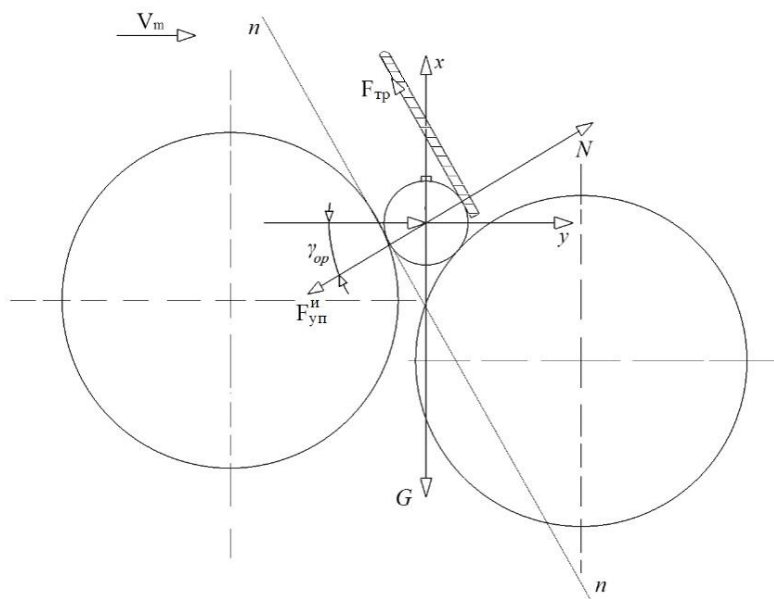


Рисунок 14 – Схема действия сил на луковичу, расположенную между роликами калибратора под эластичным интенсификатором

Данное выражение учитывает размерно-массовые характеристики разделяемых материалов, в частности для лукович это, кроме массы, диаметр и высота лукович, что позволяет с большей точностью произвести расчет конструктивных и режимных параметров калибратора.

Для повышения качества калибрования лукович, обоснованы параметры эластичных интенсификаторов. Упругость и жесткость интенсификаторов подбирается таким образом, чтобы они не повреждали поверхность лукович, но при этом создавали достаточную силу для разворота лукович осью симметрии поперек направления движения транспортера, что обеспечивает высокую точность разделения лукович по фракциям независимо от их формы. Разделение на фракции осуществляется по наибольшему поперечному диаметру лукович, поэтому для точного разделения важно, чтобы луковичы в момент движения над калибрующими отверстиями располагались центральной осью поперек к направлению движения и соответственно наибольшим диаметром вдоль направления движения, в котором положение центра тяжести лукович наименее для рассматриваемой системы.

На луковичу (рисунок 14) действует сила упругости интенсификатора $F_{\text{уп}}^n$, сила тяжести луковичы и интенсификатора, сила трения луковичы о ролики $F_{\text{тр}}^{\text{л}}$. Фактически в процессе взаимодействия луковичы и интенсификатора, луковича должна развернуться

на угол $\varphi_{ор}$ под воздействием силы упругости интенсификатора, при этом под воздействием силы трения луковича должна сохранить исходное расположение между двумя роликами, тогда условие интенсификации калибрования за счет ориентирования луковичи запишется в следующем виде:

$$\begin{cases} t_{вр}^л \geq t_{пр}^л \\ F_{тр}^л \geq F_{уп}^и \end{cases} \quad (21)$$

где $t_{вр}^л$ – время разворота (вращения) луковичи на угол $\varphi_{ор}$ вокруг неподвижной оси под воздействием интенсификатора, с; $t_{пр}^л$ – время прямолинейного движения луковичи, сопровождающееся воздействием на нее интенсификатора, с. $\gamma_{ор}$ – угол отклонения центральной оси луковичи от направления линии действия силы упругости эластичного экрана (далее угол ориентирования), град.

С учетом характера взаимодействия интенсификатора и луковичи (рисунок 14) значение абсолютной деформации эластичного элемента равно радиусу луковичи, а следовательно, с учетом выражения (21) коэффициент упругости эластичного интенсификатора равен:

$$k_{и} = \frac{m_{л}\pi^2 V_{т}^2}{H_{л}^2}. \quad (22)$$

Определив коэффициент упругости, подбирается материал для эластичного интенсификатора.

Для производства репчатого лука из севка разработан и обоснован катушечно-вильчатый высаживающий аппарат для ориентированной посадки луковых культур.

Катушечно-вильчатый высаживающий аппарат состоит из корпуса 1 и катушки 2 с желобками, образованными вильчатыми захватами, установленной на валу высаживающего аппарата и семяпровода 5 (рисунок 15 и 16).

Катушка высаживающего аппарата предназначена для поштучной подачи луковиц в семяпровод. Вильчатые захваты катушки выполнены в виде стержней, которые расположены под острым углом друг к другу, причем расстояние B между стержнями у основания меньше диаметра высаживаемых луковиц. Расстояние A , между вильчатыми захватами измеренное по касательной, проведенной к основанию катушки, больше диаметра высаживаемых луковиц. Такая конструкция позволяет осуществлять поштучный отбор и подачу луковиц в семяпровод независимо от фракции высаживаемых луковиц.

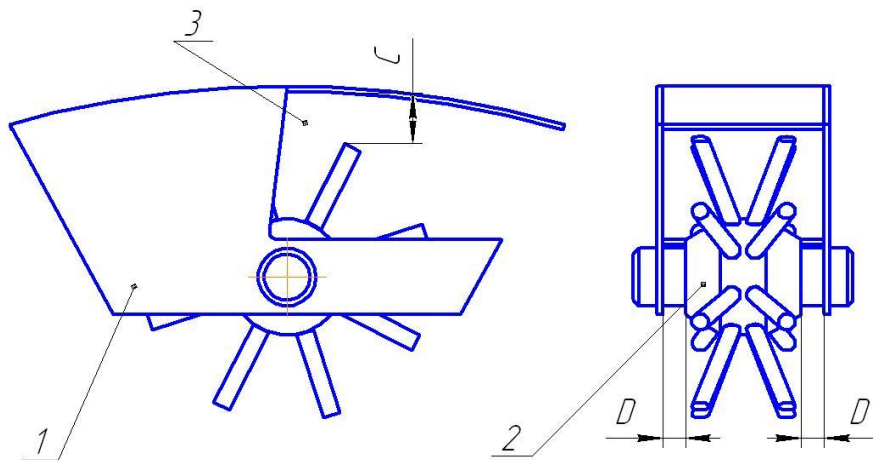


Рисунок 15 – Конструктивная схема катушечно-вильчатого высаживающего аппарата для ориентированной посадки луковых культур (без семяпровода): 1 – корпус, 2 – катушка, 3 – вырезы корпуса

Катушка 2 (рисунок 15) размещена в корпусе 1, в боковых стенках которого выполнены вырезы 3, таким образом, чтобы напротив выреза располагался сектор катушки размером не менее 90° , при этом расстояние C между верхними концами стержней вильчатых захватов и крышкой корпуса больше минимального диаметра и меньше максимального диаметра высаживаемых луковиц, а расстояние D между торцами катушки и боковыми стенками корпуса меньше минимального диаметра высаживаемых луковиц.

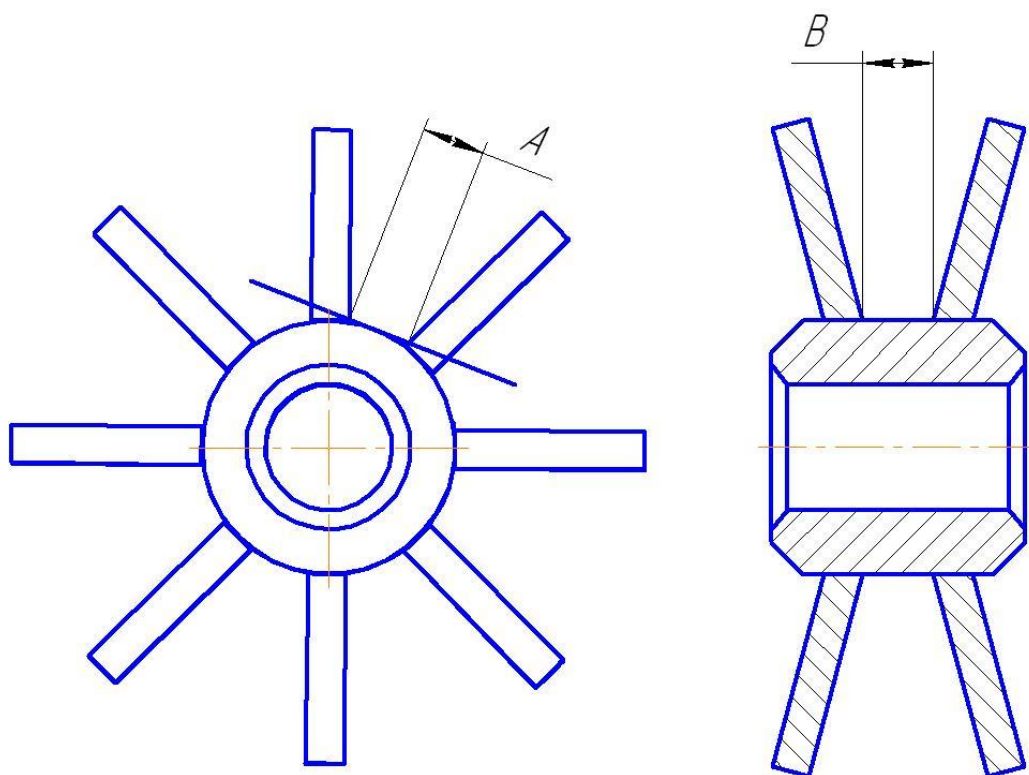


Рисунок 16 – Конструктивная схема катушки

Ориентирующий питатель-семяпровод 5 (рисунок 17) предназначен для поштучного транспортирования и ориентирования луковиц вешкой вниз, от высаживающего аппарата к сошнику. Он представляет собой питатель-семяпровод, имеющий два изгиба и образующий три участка питателя-семяпровода. На конце третьего участка питателя-семяпровода установлена воронка с эластичной боковой поверхностью из отдельных упругих элементов, сила упругости которых меньше силы тяжести высаживаемых луковиц, но позволяющая упругим элементам возвращаться в исходное положение после прохождения луковицы через воронки. Диаметр выходного отверстия воронки в исходном положении меньше диаметра высаживаемых луковиц.

Катушечно-вильчатый высаживающий аппарат работает следующим образом: луковицы 1 (рисунок 17) попадают в корпус 2 катушечно-вильчатого высаживающего аппарата через вырезы 3 и самопроизвольно располагаются в желобках катушки 4, которая совершает вращательное движение и транспортирует луковицы в семяпровод 5. При посадке крупных луковиц (диаметром до 40 мм) между вильчатыми захватами может расположиться не более одной луковицы. При посадке луковиц мелкой фракции (диаметром 10 -14 мм) при попадании двух и более луковиц в желобок, одна луковица располагается у основания катушки, а остальные на ней. Так как расстояние между стержнями у основания катушки меньше диаметра луковиц, то она захватывается и подается в семяпровод, а остальные луковицы проходят между стержнями и таким образом выносятся из желобка.

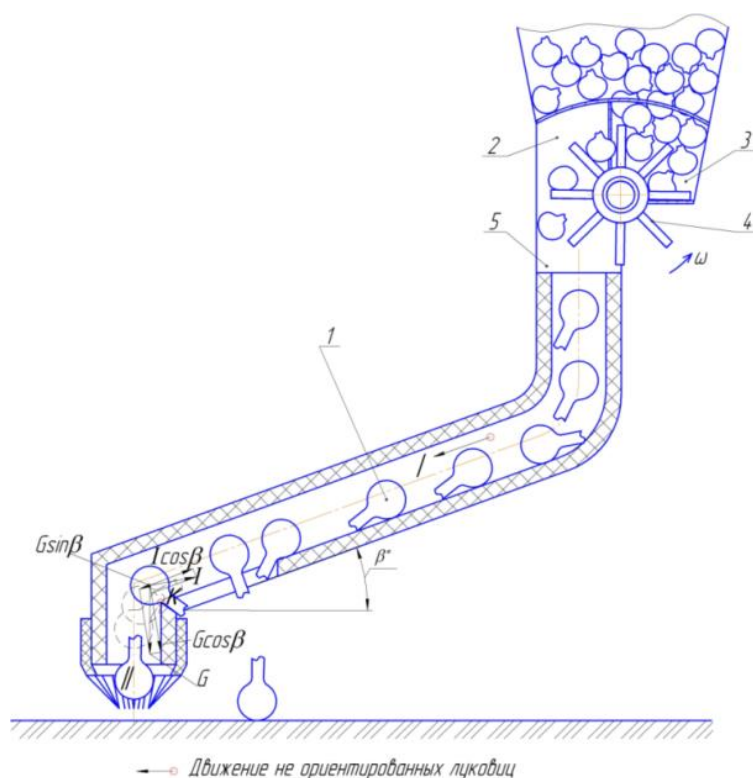


Рисунок 17 – Схема работы катушечно-вилчатого высаживающего аппарата для ориентированной посадки луковых культур: 1 – луковица, 2 – корпус катушки, 3 – вырезы, 4 – катушка, 5 – семяпровод с ориентирующей воронкой, 6 – воронка ориентирующая

Луковицы, поштучно подаваемые в ориентирующий питатель-семяпровод, выстраиваются по одной и движутся поступательно (позиция I). Задачей питателя-семяпровода является подача всех луковиц к сошнику вешкой вверх (позиция II). С этой целью на сходе семяпровода установлена ориентирующая воронка с эластичными элементами. Луковицы, попадая в воронку встречают сопротивление свободному прохождению со стороны эластичных элементов, в результате скорость их падения снижается, а под действием силы тяжести разворачиваются (ориентируются) собственным центром тяжести, смещенным к донцу, вниз. В результате этого луковицы попадают в сошник донцем вниз, где заделывающими органами «влет» фиксируются почвой в таком положении.

Одним из основных показателей качества работы высаживающего аппарата является шаг посадки. Для соблюдения заданного шага посадки высаживаемой культуры катушечно-вилчатым высаживающим аппаратом, необходимо чтобы при постоянном соотношении скорости движения посадочного агрегата и частоты вращения катушки, количество луковиц, забираемое одним вилчатым захватом катушки, было постоянным. Наиболее точным процесс посадки луковиц будет в том случае, если каждым вилчатым захватом будет подаваться в семяпровод по одной луковице.

Таким образом, задача теоретических исследований работы катушки катушечно-вилчатого высаживающего аппарата сводится к составлению математической модели процесса поштучного забора вилчатыми захватами катушки луковиц из бункера и подачи их в семяпровод.

Технологический процесс катушечно-вилчатого высаживающего аппарата должен выполняться таким образом, чтобы при работе лишние луковицы выпали из вилчатого захвата. На наш взгляд, такие условия можно обеспечить за счет формы вилчатого захвата, а именно, взаимного расположения его стержней, расстояния между ними и их геометрических размеров.

Рассмотрим возможные варианты процесса забора луковиц вильчатым захватом (рисунок 18).

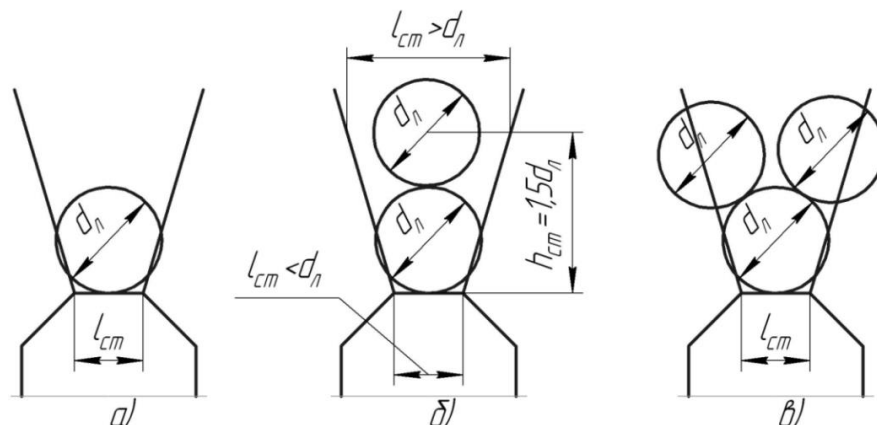


Рисунок 18 – Схемы захвата луковиц вильчатым захватом: а) одной луковицы б) двух луковиц в) трех луковиц

Наилучшим является вариант, когда изначально захватывается только одна луковица, это будет обеспечиваться в том случае, если расстояние между стержнями вильчатого захвата у основания катушки будет меньше диаметра луковицы. Это условие можно записать в следующем виде:

$$l_{ст} < d_{л}^{min} \text{ при } h_{ст} = 0, \quad (23)$$

где $l_{ст}$ – расстояние между стержнями вильчатого захвата, м; $d_{л}^{min}$ – наименьший диаметр, высаживаемых луковиц, м; $h_{ст}$ – высота стержня от основания катушки, м.

В случае попадания на вильчатый захват двух луковиц, причем одна луковица располагается у основания, а вторая над ней, то необходимо, чтобы вторая луковица прошла между стержнями вильчатого захвата, поэтому на высоте 1,5 диаметра луковицы от основания катушки, расстояние между стержнями должно быть больше диаметра луковицы (рисунок 18). Получаем второе условие поштучной подачи луковиц:

$$l_{ст} > d_{л}^{min} \text{ при } h_{ст} = 1,5d_{л}^{min}. \quad (24)$$

Более сложный вариант, когда вильчатый захват забирает три луковицы. Луковицы в этом случае будут располагаться следующим образом, одна луковица лежит у основания катушки, а две других над ней и опираются на стержни вильчатого захвата и на нижнюю луковицу. Необходимо, чтобы в процессе работы, две верхних луковицы были сброшены.

Рассмотрим силы, действующие на одну из верхних луковиц в плоскопараллельном движении, и условимся, что на вторую из них действуют точно такие же силы (рисунок 19).

На луковицу действуют следующие силы: сила тяжести луковицы $G = m_{л}g$ направленная вниз; силы трения луковицы с соседними луковицами и стержнем вильчатого захвата $F_{тр} = f m_{л}g$, направленные противоположно направлению движения луковиц, реакция опоры луковицы $N = m_{л}g$; сила инерции $J = m_{л}\omega_k^2 R$, направленная по радиусу катушки. Все силы приложены в центре тяжести луковицы. Направим ось X по линии действия силы тяжести G и спроецируем на нее все силы, получим следующее уравнение:

$$N_x + J_x - F_{трx} - G_x = 0. \quad (25)$$

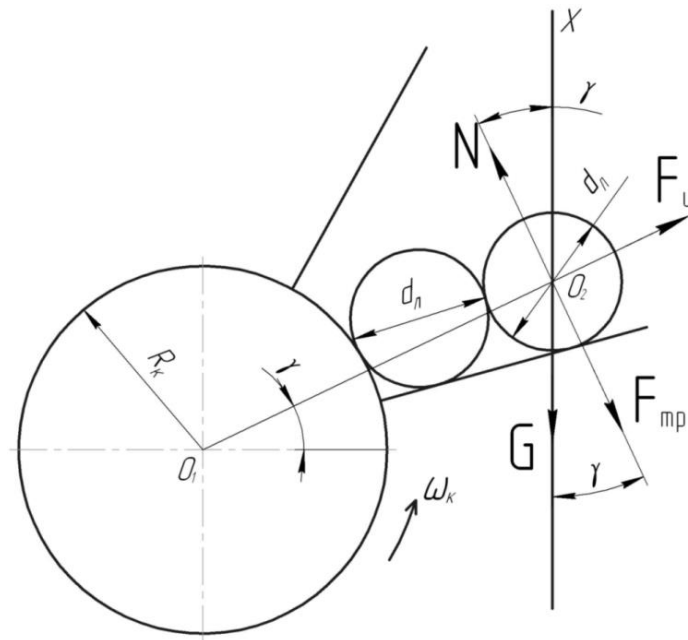


Рисунок 19 – Расчетная схема к определению радиуса катушки

Для того, чтобы лишние луковицы в процессе работы были сброшены, сумма сил противодействующих движению луковиц, должна быть больше суммы сил, вовлекающих луковицу во вращательное движение, то есть условие поштучного захвата луковиц можно записать в следующем виде:

$$F_{тр}\cos\gamma + G > N\cos\gamma + J\sin\gamma, \quad (26)$$

или с учетом формул для определения сил, действующих на рассматриваемую луковицу:

$$f_{ст}m_{л} g\cos\gamma + m_{л} g > mg\cos\gamma + m_{л} \omega_k^2 R\sin\gamma, \quad (27)$$

где $m_{л}$ – масса луковицы, кг; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;

γ – угол поворота катушки, град; ω_k – угловая скорость вращения катушки, $1/c$;

R – расстояние от центра катушки до центра тяжести луковицы ($R=R_k+1,5d_{л}$), м;

$f_{ст}$ – суммарный коэффициент трения луковицы со стержнем и соседними луковицами.

Проведя ряд преобразований условия (27), получим выражение для определения радиуса катушки:

$$R_k > \frac{g(f_{ст}\cos\gamma - \cos\gamma - 1)}{\omega_k^2 \sin\gamma} - 1,5d_{л}. \quad (28)$$

Кроме этого, сброс лишних луковиц должен произойти до того момента, как они начнут скатываться с нижней луковицы, то есть угол поворота катушки γ должен быть равен или меньше угла трения качения луковицы $\varphi_{тр}^k$. С учетом этого, а также выражений (23), (24) и (28) математическая модель поштучной подачи луковиц катушкой катушечно-вильчатого высаживающего аппарата примет вид:

$$\begin{cases} l_{ст} < d_{л}^{min} \text{ при } h_{ст} = 0. \\ l_{ст} > d_{л}^{min} \text{ при } h_{ст} = 1,5d_{л}^{min}. \\ R_k > \frac{g(f_{ст}\cos\gamma - \cos\gamma - 1)}{\omega_k^2 \sin\gamma} - 1,5d_{л} \text{ при } \gamma \leq \varphi_{тр}^k. \end{cases} \quad (29)$$

Полученная математическая модель позволяет произвести расчет основных конструктивных параметров катушки с вильчатыми захватами для выполнения поштучной подачи луковиц катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом из бункера в семяпровод.

Ориентирующая воронка предназначена для ориентирования луковиц донцем вниз и стабилизации места выпадения луковиц из семяпровода в сошник. Для свободного входа луковиц в воронку ее вход должен быть равен диаметру семяпровода. Диаметр

выходного отверстия воронки должен позволять луковицам самой мелкой фракции проходить с минимальным сопротивлением, так как такие луковицы очень легкие (до 1 грамма) и, в случае сильного сопротивления со стороны эластичных элементов, они будут застревать на выходе. Расчет параметров ориентирующей воронки производится по аналогии с эластичными интенсификаторами.

В четвертой главе «Экспериментальные исследования разработанных адаптивных технологий и технических средств для возделывания луковых культур» описана программа и методика экспериментальных исследований, которые включали в себя лабораторные и лабораторно-полевые исследования разработанных технических средств.

Лабораторные исследования направлены на определение рациональных и оптимальных параметров распределителя-отражателя для ленточного посева семян лука, катушечно-вилчатого высаживающего аппарата, роликового калибратора с эластичными интенсификаторами и исследование влияния отдельных факторов на качество посева семян лука, калибрования и посадки луковиц. Лабораторно-полевые исследования направлены на установление достоверности выведенных теоретических зависимостей для определения конструктивных и режимных параметров машин, рациональных и оптимальных режимов работы опытных образцов посевной машины, оснащенной сошником для ленточного посева и посадочной машины, оснащенной катушечно-вилчатым высаживающим аппаратом для ориентированной посадки лука-севка и определение их количественных показателей работы; определение рациональных и оптимальных режимов работы опытного образца роликового калибратора с эластичным интенсификатором и определение его количественных показателей работы.

Исследования влияния конструктивных параметров распределителя-отражателя на равномерность распределения семян проводились в соответствии с СТО АИСТ 5.6 - 2018 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины посевные и посадочные. Показатели назначения и надежности. Общие требования», а также разработанной методикой проведения исследований. Для исследований выбран сошник посевной машины для ленточного посева со следующими параметрами: ширина захвата – 80 мм, длина 65 мм, угол раствора лапы – 90 градусов, высота подлапового пространства - 21 мм.



Рисунок 20 – Общий вид лабораторной установки для проведения исследований распределителей-отражателей семян лука для ленточного посева: 1 – почвенный канал; 2 – тележка; 3 – исследуемый сошник; 4 – рама с механизмом регулирования положения сошника; 5 – электропривод с динамометром; 6 – пульт управления; 7 – воронка; 8 – экспериментальный распределитель-отражатель; 9 – липкая лента с учетными квадратами.

Размеры распределителя-отражателя семян (длина - 45 и ширина - 30) принят, исходя из размеров выходного канала семяпровода и обеспечения подачи семян на вершину распределителя.

С учетом системы уравнений (16), (17) ширина рассева семян будет зависеть от кривизны поверхности отражателя определяемая углом θ , который при постоянной ширине и длине распределителя семян зависит от его высоты. В связи с этим для исследования был принят этот параметр. Исследуемый диапазон высоты распределителя 5-9 мм, принят исходя из конструктивных размеров сошника.

Исследования проводились на лабораторной установке (рисунок 20). За критерий оценки равномерности распределения семян по площади рассева принимали коэффициент вариации (v_p , %). Для проведения исследований были изготовлены пять распределителей-отражателей с высотой 5, 6, 7, 8 и 9 мм.

Опыты проводились при постоянной норме высева 20 млн. шт./га, скорости перемещения сошника – 1,5 м/с и высоте падения семян - 0,5 м.

По результатам обработки опытных данных строили графики зависимости равномерности распределения семян лука по площади рассева от высоты распределителя-отражателя (рисунок 21).

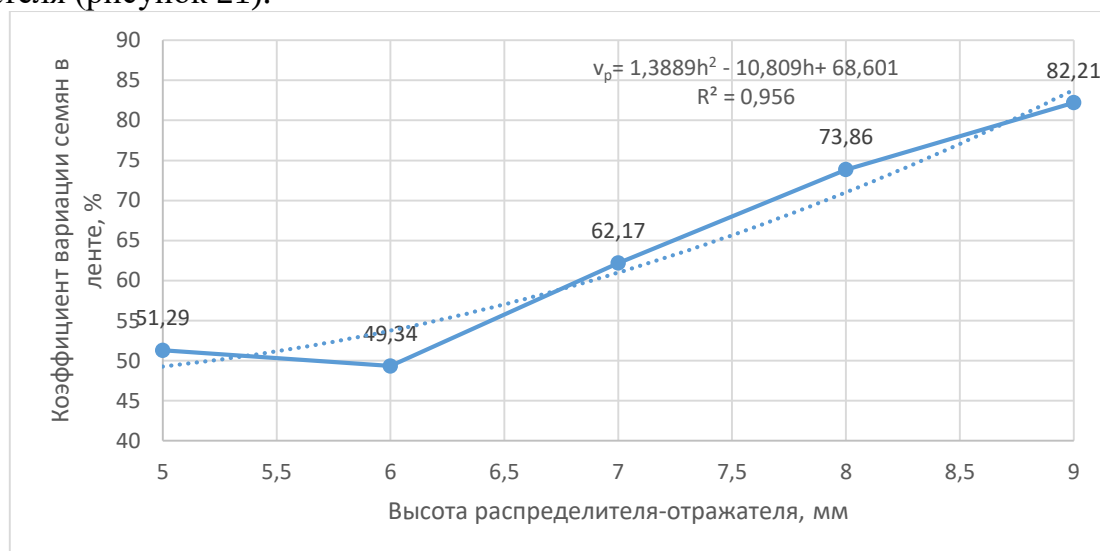


Рисунок 21 – Зависимость равномерности распределения семян от высоты распределителя-отражателя

Уравнение кривой, описывающее зависимость коэффициента вариации распределения семян от скорости движения посевного агрегата имеет следующий вид:

$$v_p = 1,3889h_p^2 - 10,8090h_p + 68,6010 \quad (30)$$

Низкие значения равномерности, при высоте распределителя-отражателя 7-9 мм объясняется тем, что при этих значениях семена долетают до стенок сошниковой лапы и отражение в этом случае носит хаотичный характер, что приводит к уменьшению ширины ленты до 30-40 мм и как следствие загущенному посеву.

Лабораторно-полевых исследований машины для посева семян лука, оснащенной сошником для ленточного посева проводились в соответствии с СТО АИСТ 5.6-2018 на полях АО «Озёры» Московской области в 2016-2018 гг. В качестве посевного материала использовали сорт «Штуттгартер Ризен» с нормой высева 80 кг/га.

Посев проводился экспериментальным образцом посевной машины, оснащенной сошником для ленточного посева агрегатированной с трактором МТЗ - 82.1 (рисунок 22).



Рисунок 22 – Общий вид посевного агрегата МТЗ-82.1+посевная машина, оснащенная сошником для ленточного посева с распределителем-отражателем изотонного типа

Посевная машина состоит из рамы 1, бункера 2, высевающего аппарата катушечного типа 3, семяпроводов 4, сошников для ленточного посева 5, опорно-приводных колес 6, механизма привода высевающего аппарата с редуктором 7, опорно-прикатывающего 8 и уплотняющего 9 катков.

Посев проводился на ровном однородном участке, где в день проведения исследований в слоях почвы 0-5, 5-10 и 10-15 см определялись влажность почвы и ее твердость в соответствии с ГОСТ 20915-2011 «Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний».

По результатам обработки опытных данных строили графики зависимости равномерности распределения семян лука по площади рассева от скорости движения посевного агрегата (рисунок 23).



Рисунок 23 – Зависимость равномерности распределения семян от скорости движения посевного агрегата

Уравнение кривой, описывающее зависимость коэффициента вариации распределения семян от скорости движения посевного агрегата имеет следующий вид:

$$v_{\text{лп}} = 6,6037v_{\text{м}}^2 - 32,7710v_{\text{м}} + 89,8300 \quad (31)$$

На рисунке 23 видно, что наилучшие показатели равномерности достигаются при рабочей скорости в интервале 1,9-2,8 м/с, что соответствует значению коэффициента вариации 0,49-0,51.

Причем увеличение коэффициента вариации в большую сторону при значении меньше 1,9 и больше 2,8 носит разный характер. В первом случае происходит загущение периферии ленты, что объясняется малым значением секундной подачи семян высевающим аппаратом, в результате чего большая часть семян попадает на вершину распределителя, а в соответствии с теорией распределения семян отражением от изотонной поверхности, чем ближе к вершине распределителя попадают семена, тем дальше они от нее отражаются.

Во втором случае из-за высокой скорости движения почвенных частиц за сошником ширина ленты уменьшалась за счет смещения семян к центру ленты. Кроме того, при скорости выше 3 м/с возникают вертикальные вибрации посевной машины в результате чего, значительно варьировалась глубина заделки семян.

Лабораторные исследования опытного образца роликового калибратора с эластичным интенсификатором методом планирования эксперимента проводились на опытном образце роликового калибратора с интенсификатором (рисунок 24) предназначенного для разделения луковиц плоской, округлой и овальной формы на фракции.

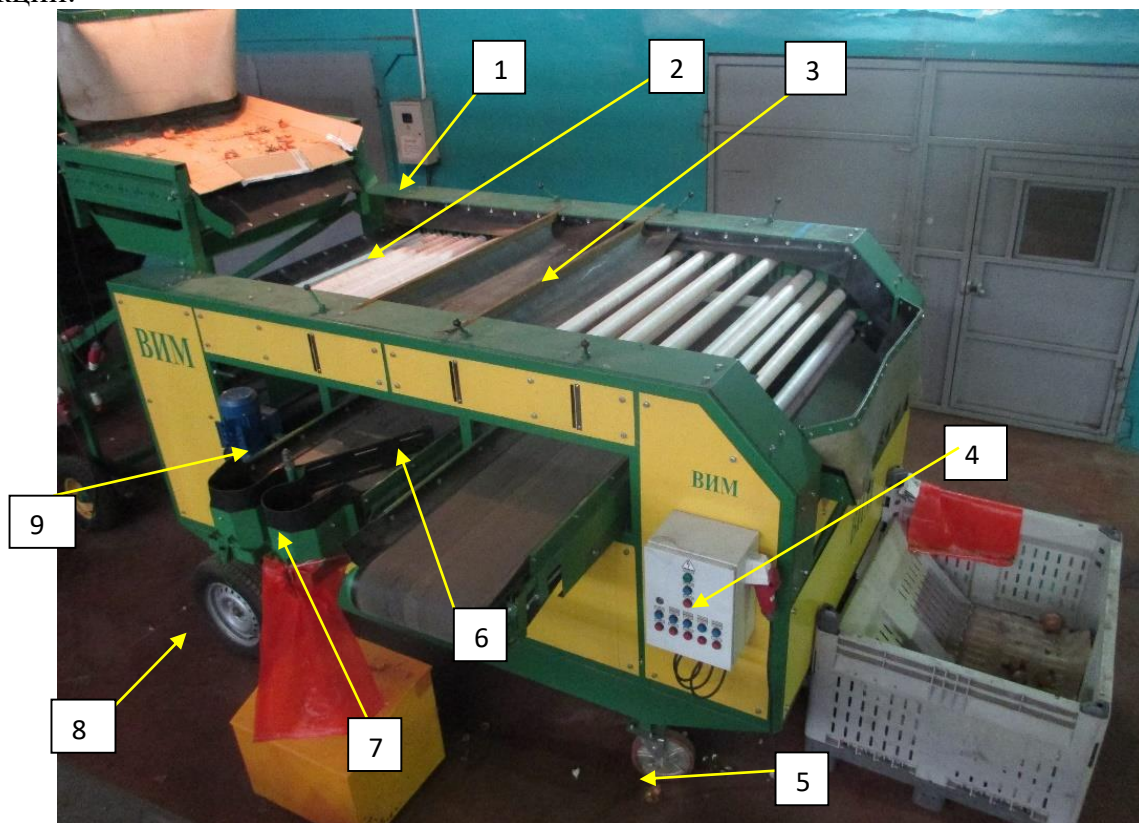


Рисунок 24 – Общий вид роликового калибратора с эластичным интенсификатором:
1 – рама; 2 – полотно роликовое; 3 – эластичные интенсификаторы; 4 – шкаф управления; 5 – колесо опорно-поворотное; 6 – транспортёр средней фракции;
7 – мешкодержатель; 8 – колесо ходовое; 9 – транспортёр мелкой фракции

Исследования проводились в марте 2017 года на экспериментальном производстве ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в закрытом помещении при температуре 18 градусов, влажности 55 %. Используемый материал лука хранился по холодной технологии, к месту исследований доставлен в сетках по 40 кг.

Для каждого сорта с различным индексом формы последовательно менялось количество интенсификаторов и поступательная скорость в соответствии с принятым планом Бокса-Бенкина.

В каждом эксперименте использовалось не менее 200 кг. лука, весь лук использовался однократно, повторность эксперимента трехкратная, в таблицу вносились средние значения исследуемых критериев оптимизации по трем экспериментам.

Луковицы калибровались по 3 фракциям: 30-40 мм, 40-70 мм, 70+ мм, после прохождения через калибратор они загружались в сетку.

В результате реализации многофакторного эксперимента получено уравнение регрессии:

$$T = 91,2463 - 5,375i + 2,5463i^2 + 6,9917n_{\text{и}} - 1,0458n_{\text{и}}^2 + 1,8565V_{\text{т}} - 6,8982V_{\text{т}}^2 - 0,833in_{\text{и}} + 1,9444iV_{\text{т}} - 1,6667V_{\text{т}}n_{\text{и}}. \quad (33)$$

Для анализа лабораторно-полевых исследований строили поверхности отклика критерия оптимизации в зависимости от исследуемых факторов (рисунок 25).

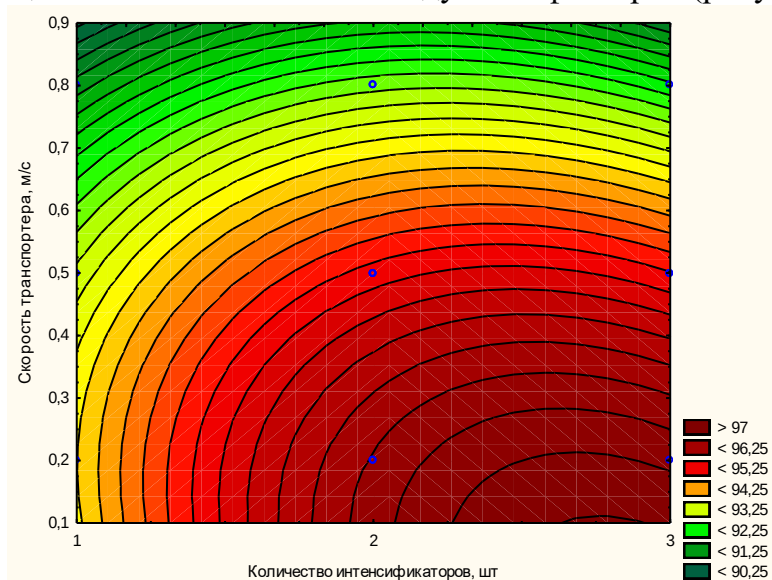


Рисунок 25 – График поверхности отклика точности калибрования в зависимости от скорости транспортера и количества интенсификаторов калибратора

Лабораторно-полевые исследования калибратора с эластичными интенсификаторами проводились в 2017 году в ЗАО «Красный октябрь» Ростовской области в закрытом помещении при температуре 16 градусов, влажности 65 %, лук к линии доставлялся после уборки и дозревания на поле.

Для лабораторно-полевых исследований спроектирована линия для послеуборочной доработки, предпосадочной и товарной подготовки луковиц в хранилищах, включающая в себя опытный образец калибратора с эластичными интенсификаторами, изготовленный в ООО «Агротехмаш» (г. Рязань) (рисунок 26). По результатам лабораторных исследований количество интенсификаторов принято двум, скорость изменялась в интервале от 0,2 до 0,6 м/с. Качество работы оценивалось - по производительности и точности калибрования, потерям и повреждению луковиц.

В процессе лабораторно-полевых исследований на опытном образце линии для послеуборочной обработки лука происходило разделение лука репки на фракции (мм)

30+, 40+, 70+ и отходы. В фракцию 30+ отсортировывались луковицы диаметром от 30мм и выше, в фракцию 40+ соответственно от 40мм и выше, в фракцию 70+ соответственно от 70мм и выше. В отходы отсортировывались луковицы диаметром до 30мм и прочие отходы. Результаты лабораторно-полевых исследований представлены на рисунках 27-28.



Рисунок 26 – Опытный образец линии для послеуборочной обработки лука с роликовым калибратором, оснащенный эластичными интенсификаторами: 1 – приемный бункер; 2 – загрузочный конвейер; 3 – отделитель примесей; 4 – переборочный стол; 5 – калибратор с эластичными интенсификаторами

Наилучшее значение точности калибрования составила 97 % при поступательной скорости транспортера 0,21 м/с и производительности калибратора 5,1 т/ч (рисунки 27 и 28), что по ГОСТ 34306-2017 «Лук репчатый свежий. Технические условия» соответствует 1 сорту.

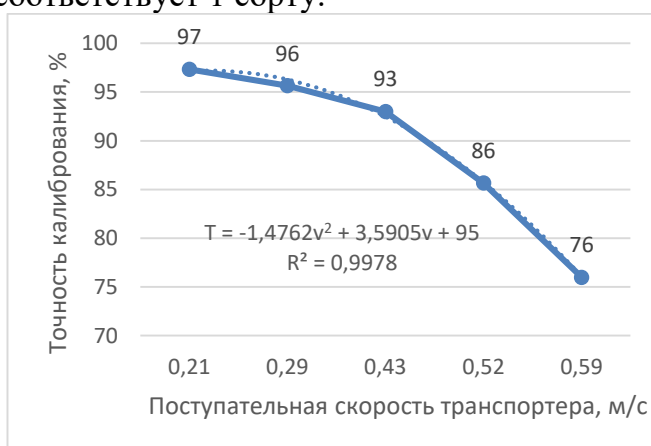


Рисунок 27 – График зависимости точности калибрования от поступательной скорости транспортера

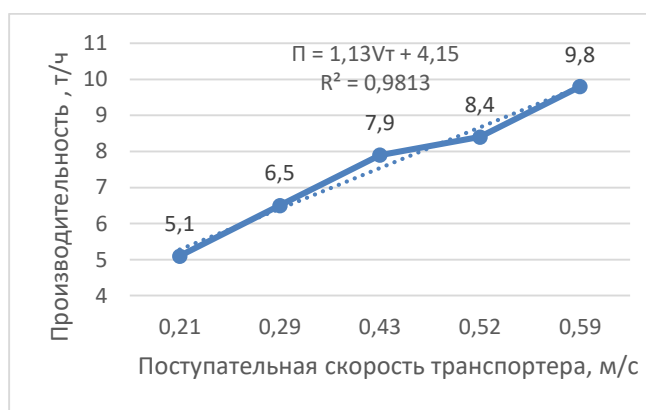


Рисунок 28 – График зависимости производительности от поступательной скорости транспортера

При поступательной скорости транспортера 0,29-0,43 м/с и производительности калибратора 6,5-7,9 т/ч, точность калибрования соответствует 2 сорту и доходит до 96 %, при дальнейшем увеличении скорости транспортера точность калибрования снижается

ниже допустимых значений. Повреждение луковиц составило 0,8% (не более 3% по требованиям ГОСТ). Увеличение оголенных луковиц по фракциям не отмечается, величина осталась прежней как в исходном ворохе (17,5%). Машиной не производилось повреждение луковиц в виде оголения. Потери в процессе работы отсутствовали. При проведении исследования опытного образца посадочной машины, оснащенной катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом (рисунок 29) изменялся один параметр – угол наклона семяпровода в интервале от 30 до 50 градусов.

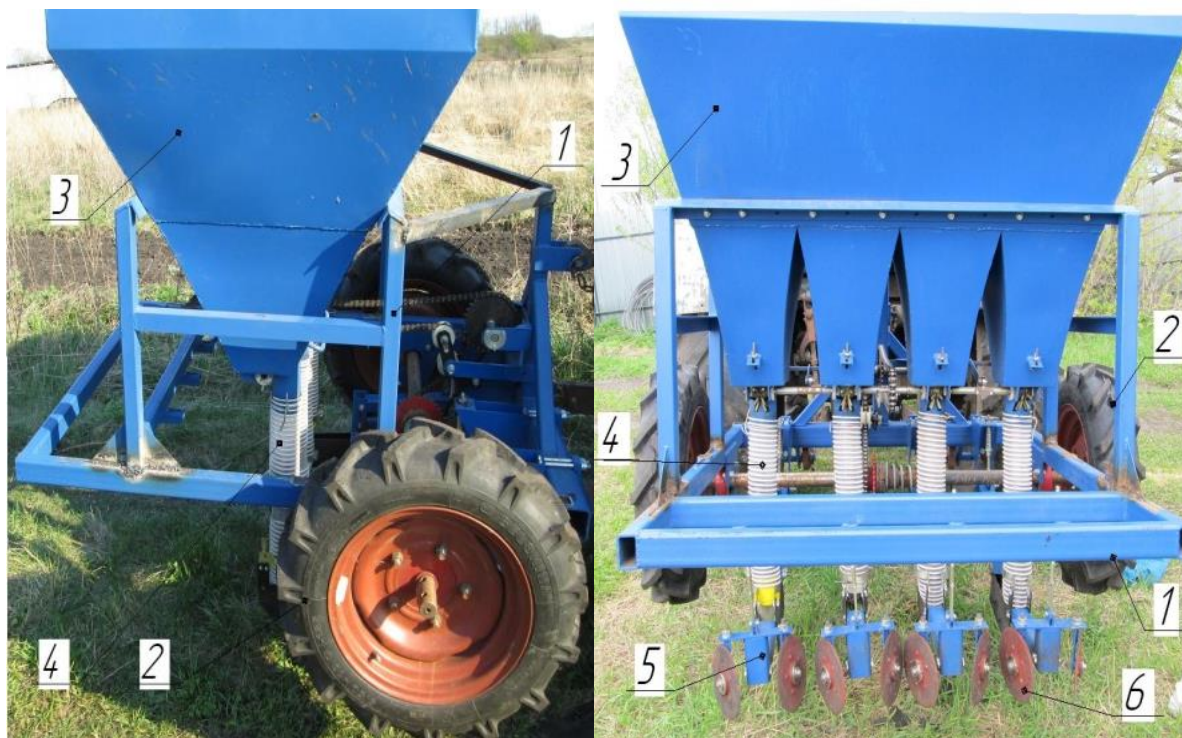


Рисунок 29 - Общий вид лукопосадочной машины, оснащенной катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом (вид справа): 1 – рама; 2 – опорно-приводное колесо; 3 – бункер; 4 – семяпровод с сошником; 5 – сошник; 6 – заделывающий диск

Частота вращения катушки высаживающего аппарата, высота установки выходного отверстия семяпровода относительно поверхности почвы (борозды) и скорость движения опытного образца посадочной машины оставались постоянными и равнялись соответственно $2,2 \text{ с}^{-1}$, 0,12 м и 1,8 м/с.

Опыты проводили в трехкратной повторности. Продолжительность опыта фиксировали секундомером (включение и отключение секундомера производилось в момент пересечения заделывающим органом уровня установленной вешки).

Показатели качества заделки луковиц лука-севка определяли раскрытием закрытой борозды.

На каждой учетной делянке, после прохода посадочной машины делали следующие замеры:

- угол наклона вешки относительно дна борозды, град;
- расстояние между луковицами в рядке, м.

По результатам обработки опытных данных, строили графики зависимостей количества луковиц, посаженных донцем вниз, K , % и равномерности распределения луковиц вдоль рядка P , % от угла наклона семяпровода посадочной машины (рисунок 30).

Рациональное значение угла наклона семяпровода определяем по сумме двух критериев качества посадки – равномерности распределения луковиц вдоль рядка и

количества луковиц, посаженных донцем вниз. Этому значению соответствует угол наклона семяпровода в интервале 36-40 градусов.

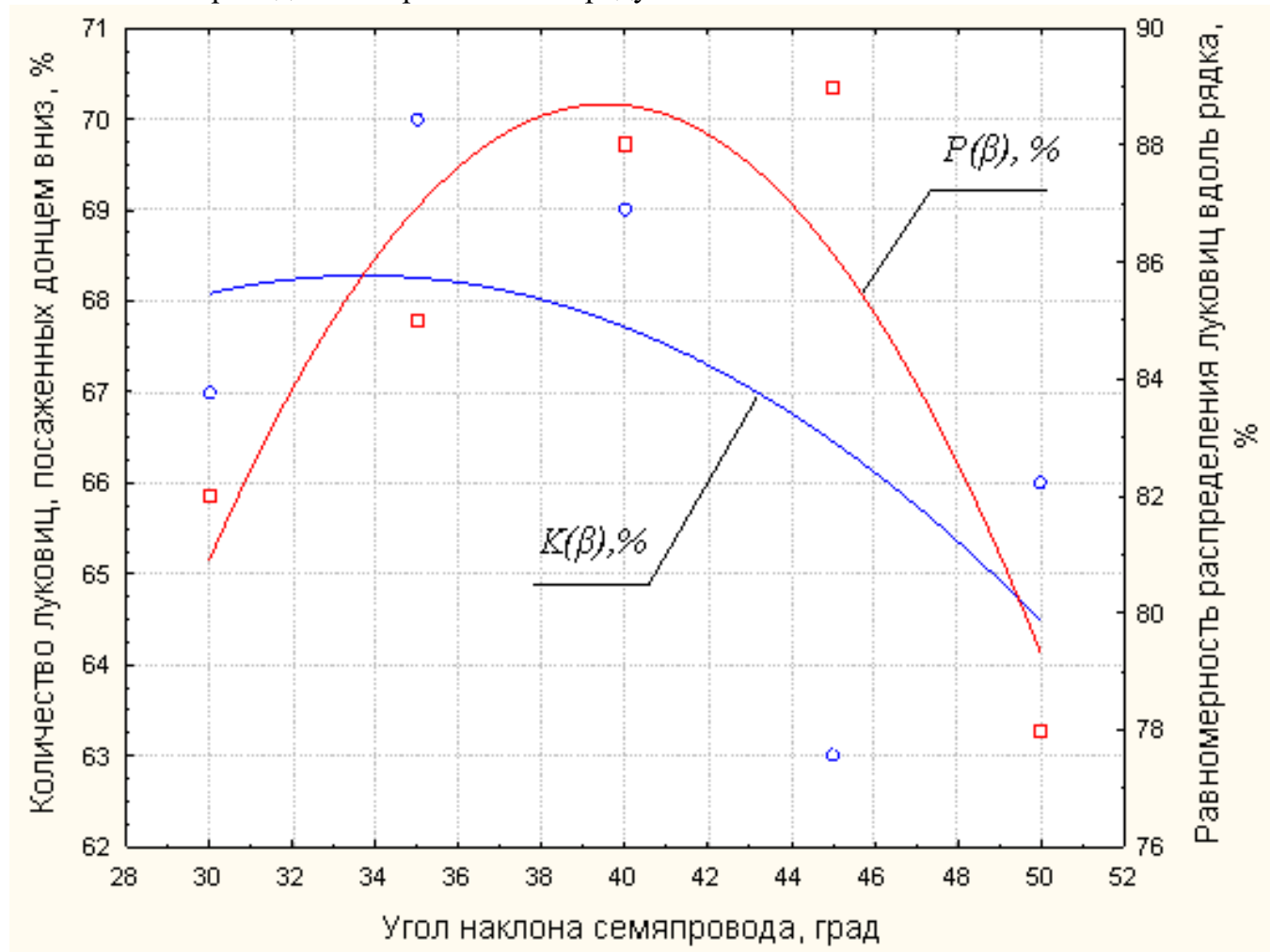


Рисунок 30 – График зависимости количества луковиц, посаженных донцем вниз и равномерности распределения луковиц вдоль ряда от угла наклона семяпровода

В пятой главе «Технико-экономические исследования адаптивных машинных технологий и технических средств в производственных условиях» представлены результаты экономической оценки разработанных адаптивных технических средств в производственных условиях с помощью программы разработанной программы «Подбора оптимальной машинной технологии возделывания луковых культур». Для экономической оценки разработанных адаптивных технических средств в производственных условиях использовали разработанную программу «Программа подбора оптимальной машинной технологии возделывания луковых культур» свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018619692 от 11.07.2018. В основе программы лежит база данных результатов экспериментальных исследований. Выбрав последовательно в программе (рисунок 31) тип конечной продукции, почвенные условия, сорт, а также варианты типов рабочих органов для операций по возделыванию луковых культур, программа выдает результаты сравнения сформированных вариантов технологии по урожайности, затратам и себестоимости полученной продукции.

Для расчета и сравнения дополнительных расходов и доходов по каждой технологии необходимо в диалоговом окне «Результат расчета» (рисунок 32) внести информацию о норме высева, планируемой урожайности, цены на энергоносители и стоимость готовой продукции.

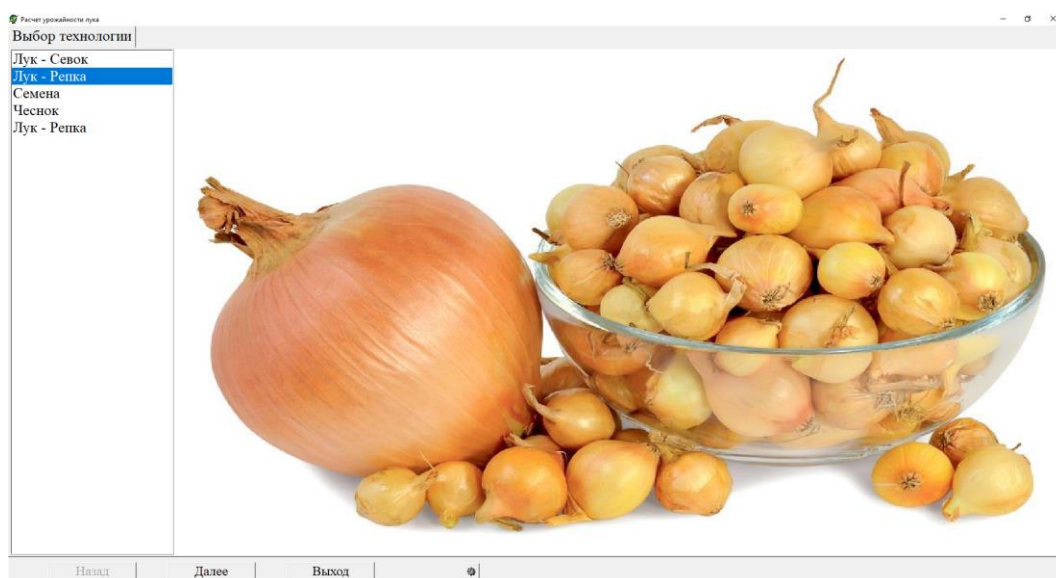


Рисунок 31 – Главное меню программы «Программа подбора оптимальной машинной технологии возделывания луковых культур»

Расчет урожайности лука

Результат расчета

Критерий выбора

☒ Урожайность

☐ Доп.расходы

☐ Доход

Калибратор: Радиальная; Решетная; Барабанная;
 Высадка(репка): Вибр.-пневм.; Катущ.-вильч.; Ленточный;
 Опрыскиватель: Опрыскиватель навесной 24 м

План. урожайность, кг/га	40000	Цена эл.энергии, руб/кВт	4.2
Стоимость 1кг, руб	10	Цена топлива, руб/кг	44.0
Норма высева, кг/га	1000	Пересчитать	

Округлые	Чернозем обыкн	Разбрасыватель	ППО (Оборотны	Фреза вертикаль	Радиальная	Вибр.-пневм.	Опрыскиватель	48060.00
Округлые	Чернозем обыкн	Разбрасыватель	ППО (Оборотны	Фреза вертикаль	Решетная	Вибр.-пневм.	Опрыскиватель	47526.00
Округлые	Чернозем обыкн	Разбрасыватель	ППО (Оборотны	Фреза вертикаль	Барабанная	Вибр.-пневм.	Опрыскиватель	46458.00
Округлые	Чернозем обыкн	Разбрасыватель	ППО (Оборотны	Фреза вертикаль	Радиальная	Катущ.-вильч.	Опрыскиватель	45924.00
Округлые	Чернозем обыкн	Разбрасыватель	ППО (Оборотны	Фреза вертикаль	Решетная	Катущ.-вильч.	Опрыскиватель	45123.00
Округлые	Чернозем обыкн	Разбрасыватель	ППО (Оборотны	Фреза вертикаль	Радиальная	Ленточный	Опрыскиватель	44856.00
Округлые	Чернозем обыкн	Разбрасыватель	ППО (Оборотны	Фреза вертикаль	Барабанная	Катущ.-вильч.	Опрыскиватель	44322.00
Округлые	Чернозем обыкн	Разбрасыватель	ППО (Оборотны	Фреза вертикаль	Решетная	Ленточный	Опрыскиватель	40584.00
Округлые	Чернозем обыкн	Разбрасыватель	ППО (Оборотны	Фреза вертикаль	Барабанная	Ленточный	Опрыскиватель	39516.00

Рисунок 32 – Диалоговое окно «Результат расчета»

Производственная сравнительная оценка сформированной технологии возделывания лука-севка в программе «Программа подбора оптимальной машинной технологии возделывания луковых культур» в сравнение с базовой зональной технологией позволяет за счет дополнительных капитальных вложений 1,5 млн. рублей, которые окупаются за 0,08 года, повысить производительность труда рабочих на 17 % и снизить себестоимость лука-севка на 5,5 тыс. рублей за 1 тонну. На возделывании репчатого лука за счет дополнительных капитальных вложений 0,5 млн. рублей, которые окупаются за 1,26 года повысили производительность труда рабочих на 9,4 % и снизили себестоимость репчатого лука на 6 %.

Расчет экономической эффективности опытной посевной машины с распределителем-отражателем изотонного типа для ленточного посева семян лука показывает, что ее применение позволяет за счет более равномерного распределения

семян в ленте повысить урожайность на 17 % и снизить совокупные затраты на 1 тонну продукции на 17,3 %, при этом годовая экономия составила 102830,54 рублей. Расчет для опытного роликового калибратора с эластичными интенсификаторами показывает, что за счет повышения точности калибрования повышается выход товарной продукции на 8 % в результате этого годовая экономия составила 34641 рубль при годовой загрузке 150 часов. Оценка опытной посадочной машины для ориентированной посадки лука-севка катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом показывают, что за счет более высокой производительности посадочного агрегата снижены совокупные затраты на 1 тонну продукции на 16 %, при этом годовая экономия на 1 га составила 172507 рублей.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ современного состояния возделывания луковых культур показал, что наиболее перспективным направлением повышения эффективности возделывания луковых культур является разработка автоматизированных средств для проектирования машинных технологий адаптивных к почвенно-климатическим условиям и свойствам посадочного материала, а также разработка технических средств для ленточного посева семян лука с пассивными распределителями, для посадки лукович донцем вниз и калибрования на фракции с адаптивными интенсификаторами в виде эластичных рабочих органов.

2. Разработан метод и модель проектирования наиболее эффективных адаптивных машинных технологий возделывания луковых культур в заданных условиях, основанный на коэффициенте адаптации машинных технологий возделывания луковых культур, представляющего собой отношение фактической урожайности, полученной при применении сформированной технологии, к потенциальной урожайности при зональной технологии, который показывает адаптивность сформированной технологии к зоне возделывания и сорту.

3. Разработана компьютерная программа «Программа подбора оптимальной машинной технологии возделывания луковых культур» свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018619692 от 11.07.2018., которая позволяет реализовать в автоматическом виде сравнение вариантов технологий возделывания луковых культур по заданным параметрам.

4. Разработана классификация устройств для калибрования и посадки лукович по степени их адаптивности к изменению форм и размеров лукович, которая позволяет обосновать параметры и конструктивные схемы машин для калибрования и посадки лукович.

5. Обоснованы и разработаны конструктивные и технологические схемы машин для ленточного посева с распределителем-отражателем изотонного типа, машины для ориентированной посадки лукович с катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом и роликового калибратора с эластичными интенсификаторами.

Теоретические и экспериментальные исследования разработанных технических средств для возделывания луковых культур позволили получить:

- для машины ленточного посева семян лука систему дифференциальных уравнений отражающая зависимость конструктивных параметров поверхности распределителя-отражателя изотонного и антитонного типа, экспериментальные исследования которых показали, что наибольшее значение частоты квадратов с количеством семян 1 и 2 у сошника, оснащенного распределителем-отражателем изотонного типа и равно соответственно 48 % и 32 %;

- для катушечно-вильчатого высаживающего аппарата машины для ориентированной посадки лука-севка математическую модель, которая позволяют

произвести расчет основных конструктивных параметров - радиус катушки, высота стержня вильчатого захвата и расстояние между стержнями, для выполнения поштучной подачи луковиц из бункера в семяпровод; зависимости для определения параметров ориентирующей воронки и алгоритм проектирования ориентирующей воронки высаживающего аппарата для посадки луковиц донцем вниз. Установлено, что наибольшая равномерность распределения луковиц катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом для ориентированной посадки при наличии ориентирующей воронки, равная 88 %, при частоте вращения катушки высаживающего аппарата $2,5 \text{ с}^{-1}$;

- для роликового калибратора с эластичными интенсификаторами выражение для определения производительности роликового калибратора, которое учитывает размерно-массовые характеристики разделяемых материалов, что позволяет с большей точностью произвести расчет конструктивных и режимных параметров калибратора; условие интенсификации калибрования за счет ориентирования луковиц относительно калибрующих роликов, применением эластичного элемента. Оптимальное значение скорости транспортера роликового калибратора с эластичными интенсификаторами 0,27-0,28 м/с, для луковиц с индексом формы 0,9 - 1,1 и двух эластичных интенсификаторах, что соответствует точности калибрования в пределах 95 - 97 %.

6. По результатам лабораторно-полевых исследований разработанных и изготовленных опытных образцов машин для ленточного посева семян лука, машин для ориентированной посадки лука-севка, машин для калибрования луковиц на фракции определено:

- наилучшие показатели равномерности распределения семян лука, отвечающие агротехническим требованиям, достигаются во всем диапазоне рабочих скоростей 1,9-2,8 м/с, что соответствует значению коэффициента вариации 0,49-0,51;

- значение точности калибрования репчатого лука на опытном образце роликового калибратора с эластичными интенсификаторами составляет 97 %, что соответствует 1 сорту репчатого лука по ГОСТ при поступательной скорости транспортера 0,21 м/с и производительности калибратора 5,1 т/ч;

- максимальная равномерность распределения луковиц 87-88 % и количество луковиц, посаженных донцем вниз 69-70 % опытным образцом посадочной машины, оснащенной катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом, достигается при угле наклона семяпровода в интервале 35-40 градусов и частоте вращения катушки высаживающего аппарата $2,5 \text{ с}^{-1}$, что соответствует норме высева фракции 15-22 мм 1000 кг/га.

7. Производственная сравнительная оценка сформированной технологии возделывания лука-севка в программе «Программа подбора оптимальной машинной технологии возделывания луковых культур» в сравнение с базовой зональной технологией позволяет за счет дополнительных капитальных вложений 1,5 млн. рублей, которые окупаются за 0,08 года, повысить производительность труда рабочих на 17 % и снизить себестоимость лука-севка на 5,5 тыс. рублей за 1 тонну. На возделывании репчатого лука за счет дополнительных капитальных вложений 0,5 млн. рублей, которые окупаются за 1,26 года повысили производительность труда рабочих на 9,4 % и снизили себестоимость репчатого лука на 6 %.

Расчет экономической эффективности опытной посевной машины с распределителем-отражателем изотонного типа для ленточного посева семян лука показывает, что ее применение позволяет за счет более равномерного распределения семян в ленте повысить урожайность на 17 % и снизить совокупные затраты на 1 тонну продукции на 17,3 %, при этом годовая экономия составила 102830,54 рублей. Расчет

для опытного роликового калибратора с эластичными интенсификаторами показывает, что за счет повышения точности калибрования повышается выход товарной продукции на 8 % в результате этого годовая экономия составила 34641 рубль при годовой загрузке 150 часов. Оценка опытной посадочной машины для ориентированной посадки лука-севка катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом показывают, что за счет более высокой производительности посадочного агрегата снижены совокупные затраты на 1 тонну продукции на 16 %, при этом годовая экономия на 1 га составила 172507 рублей.

Рекомендации научно-исследовательским организациям

Для формирования адаптивных машинных технологий по критерию адаптации, представляющего собой отношение фактической урожайности, полученной при применении сформированной технологии, к потенциальной урожайности для зональной технологии заданной почвенно-климатической зоны предлагается использование разработанного метода и модели, основанных на элементах теории динамического программирования.

Рекомендации промышленным организациям

Для изготовления и разработки технических средств для возделывания луковых культур с адаптивными рабочими органами рекомендуется рассчитывать конструктивные и технологические параметры по теоретически полученным и экспериментально подтвержденным зависимостям.

Для проектирования трехмерной модели распределителя-отражателя в КОМПАС 3D с дальнейшим его изготовлением на 3D принтере методику, основанную на системе дифференциальных уравнений.

Для проектирования адаптивных рабочих органов эластичного типа для посадки и калибрования луковиц алгоритм проектирования ориентирующей воронки высаживающего аппарата для посадки луковиц донцем вниз и эластичного интенсификатора для роликового калибратора.

Рекомендации сельскохозяйственным организациям

Для применения программного обеспечения и технических средств на возделывании луковых культур рекомендуется:

- использовать компьютерную программу «Программа подбора оптимальной машинной технологии возделывания луковых культур», для формирования машинных технологий возделывания луковых культур, которая позволяет реализовать в автоматическом режиме сравнение вариантов технологий по заданным параметрам для условий конкретной организации;

- использовать для посева семян лука посевную машину ленточного типа с сошником оснащенным распределителем-отражателем изотонного типа при рабочей скорости в интервале 1,9-2,8 м/с, что соответствует значению коэффициента вариации 0,49-0,51;

- использовать на калибровании репчатого лука роликовый калибратор с эластичными интенсификаторами при поступательной скорости транспортера 0,21 м/с и производительности калибратора 5,1 т/ч, для получения 1 сорт репчатого лука по ГОСТ и при поступательной скорости транспортера 0,29-0,43 м/с и производительности калибратора 6,5-7,9 т/ч, получения репчатого лука 2 сорта;

- использовать посадочную машину, оснащенной катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом для ориентированной посадки луковиц при угле наклона семяпровода в интервале 35-40 градусов при частоте вращения катушки высаживающего аппарата в $2,5 \text{ с}^{-1}$, что соответствует норме высева фракции 15-22 мм - 1000 кг/га.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Развитие цифровых интеллектуальных систем в сельскохозяйственном производстве обеспечивающих новый уровень автоматизации технологических процессов мониторинга и управления адаптивными технологиями и техническими средствами возделывания сельскохозяйственных культур.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Монографии, учебные пособия, рекомендации

1. Емельянов, П.А. Теоретические и экспериментальные исследования вибрационно-пневматического высаживающего аппарата для посадки луковиц лука-севка: Монография / П.А. Емельянов, А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов. – Пенза РИО ПГСХА. – 2013. – 104 с.
2. Емельянов, П.А. Теоретические и экспериментальные исследования дискового заделывающего органа лукопосадочной машины: Монография / П.А. Емельянов, А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов. – Пенза РИО ПГСХА. – 2015. – 174 с.
3. Лобачевский, Я.П. Машинная технология производства лука: Монография / Я.П. Лобачевский, П.А. Емельянов, А.Г. Аксенов и др. – М.: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. – 2016. – 168 с.

Публикации Web of Science и Scopus

4. Аксенов, А.Г. Ориентированная посадка луковиц катушечно-вилочатым высаживающим аппаратом / А.Г. Аксенов, П.А. Емельянов, А.В. Сибирёв // Вестник Мордовского университета. – 2018. – № 1. – С. 20 – 24.
5. Aksenov, A.G. Onion bulbs orientation during aligned planting of seed-onion using vibration-pneumatic planting device / A.G. Aksenov, A.Yu. Izmailov, A.S. Dorokhov, A.V. Sibirev // INMATEH - Agricultural Engineering. – 2018. – Т. 55. – № 2. pp. 63-69.
6. Dorokhov, A.S. Methodological justification of dynamic systems model construction by artificial neural networks / A.S. Dorokhov, A.G. Aksenov, A.V. Sibirev // INMATEH – Agricultural Engineering. – 2019. – № 2. (58). – pp. 63-75.
7. Dorokhov, A.S. Laboratory-field research results for onion cleaning / A.S. Dorokhov, A.V. Sibirev, A.G. Aksenov, M.A. Mosyakov // INMATEH – Agricultural Engineering. – 2020. – № 2. (57). – pp. 41 – 48.
8. Aksenov, A.G. Technical Support of Vegetable Growing in Countries of the Eurasian Economic Union / Aleksandr G Aksenov, Aleksey V. Sibirev // AMA – Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. – 2020. - № 3. (51). – pp. 12-18.

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК

9. Дорохов, А.С. Разработка показателей комплексной оценки интеллектуализации машинного производства овощных культур / А.С. Дорохов А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов, // Тракторы и сельхозмашины – 2020. – № 1. – С. 20 – 24.
10. Емельянов, П.А. Ориентирование луковиц в восходящем воздушном потоке / П.А. Емельянов, А.Г. Аксенов // Достижения науки и техники АПК. – 2006. – №8. – С.34–35.
11. Емельянов, П.А. Использование воздушного потока при ориентировании тел луковиц / П.А. Емельянов, А.Г. Аксенов А.В. Коновалов // Аграрная наука - 2007. – № 3. – С. 31–32.
12. Емельянов, П.А. Модернизированная сеялка для посева лука-севка / П.А. Емельянов, А.Г. Аксенов // Тракторы и сельскохозяйственные машины - 2007. – № 5. – С. 11.
13. Емельянов, П.А. Исследование физико-механических свойств лука-севка сорта Бессоновский местный / П.А. Емельянов, А.Г. Аксенов // Нива Поволжья. – 2009. – № 1. – С. 55–61.

14. Емельянов, П.А. Классификация средств механизации посадки лука-севка / П.А. Емельянов, А.Г. Аксенов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2009. – №2. – С. 29–30.
15. Емельянов, П.А. Прибор для определения усилия на разрыв листьев лукович / П.А. Емельянов, А.Г. Аксенов // Сельский механизатор. – 2009. – № 5. С. 14.
16. Емельянов, П.А. Теоретические исследования рабочего процесса вибрационно-пневматического высаживающего аппарата при ориентированной посадке лука-севка / П.А. Емельянов, А.Г. Аксенов // Нива Поволжья. – 2011. – № 2. – С. 60–64.
17. Емельянов, П.А. Экспериментальные исследования вибрационно-пневматического высаживающего аппарата на посадке лукович лука-севка / П.А. Емельянов, А.Г. Аксенов // Нива Поволжья. – 2011. - № 3. – С. 56–63.
18. Емельянов, П.А. Классификация средств механизации заделывающих органов семенного материала посевных и посадочных машин / П.А. Емельянов, А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 11. – С. 28 – 30.
19. Емельянов, П. А. Теоретические предпосылки процесса заделки лукович в борозде / П. А. Емельянов, А. В. Сибирёв, А. Г. Аксенов // Нива Поволжья. – 2012. – № 3. (24). – С. 33 – 36.
20. Емельянов, П.А. Исследование силовой характеристики дискового заделывающего органа луковой сеялки / П.А. Емельянов, А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов // Нива Поволжья. – 2013. – № 1 (26). – С. 40 – 46.
21. Емельянов, П.А. Вибрационно-пневматический высаживающий аппарат/ П. А. Емельянов, А. Г. Аксенов // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 9. – С. 11 – 13.
22. Емельянов, П.А., Лукопосадочная машина / Емельянов П.А., Аксенов А.Г. // Сельский механизатор. – 2013. – № 10. – С. 12-13.
23. Емельянов, П.А. Эффективность применения передвижного почвенного канала при проведении лабораторных исследований / П.А. Емельянов, А.В. Сибирёв, А. Г. Аксенов // Вестник Красноярского ГАУ. – 2013. – № 10. – С. 216 – 219.
24. Емельянов, П.А. Определение количества почвы для качественной заделки лукович лука-севка в борозде / П.А. Емельянов, А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 1. – С. 25 – 27.
25. Емельянов, П.А. Ориентированная посадка лукович /Емельянов П.А., Овтов В.А., Аксенов А.Г. // Сельский механизатор. – 2014. – № 4 (62). – С. 10.
26. Емельянов, П.А. Устройство для заделки лукович в борозде / П. А. Емельянов, А. В. Сибирёв, А. Г. Аксенов // Сельский механизатор. – 2014. – № 7. – С. 13 – 14.
27. Емельянов, П.А. Сошник посадочной машины / П.А. Емельянов, А.В. Сибирёв, А. Г. Аксенов // Сельский механизатор. – 2015. – № 4.–С. 13 – 14.
28. Емельянов, П.А. Экспериментальные лабораторные исследования сошника лукопосадочной машины / П.А. Емельянов, А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов // Нива Поволжья. – 2015. – № 2. (24). – С. 33–36.
29. Аксенов, А.Г. Катушечно-вилчатый высаживающий аппарат / А.Г. Аксенов, П.А. Емельянов, В.А. Овтов, А.В. Сибирёв // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2015. – № 5. С. 20-24.
30. Аксенов А.Г. Сводоразрушитель в бункере лукопосадочной машины / А.Г. Аксенов, А.В. Сибирёв, П.А. Емельянов, В.А. Овтов //Сельский механизатор. – 2015. – № 9. – С. 16 – 17.
31. Сибирёв, А.В. Результаты поисковых исследований по обоснованию конструкции дискового заделывающего органа лукопосадочной машины / А.В. Сибирёв,

А.Г. Аксенов, П.А. Емельянов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – № 1. – С. 20 – 24.

32. Аксенов, А.Г. Современное состояние производства лука в России и перспективы развития / А.Г. Аксенов, С.Б. Прямов, А.В. Сибирёв // Картофель и овощи. – 2016. – № 1. – С. 16 – 17.

33. Аксенов, А.Г. Математическая модель ориентированной посадки луковиц донцем вниз / А.Г. Аксенов, А.В. Сибирёв, П.А. Емельянов // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 7. – С. 16 – 17.

34. Емельянов, П.А. Подпочвенно-разбросной посев зерновых культур / П.А. Емельянов, В.А. Овтов, Д.М. Матвеев, А.Г. Аксенов, А.В. Сибирёв // Сельский механизатор. – 2016. – № 5. – С. 16.

35. Аксенов, А.Г. Исследование размерно-массовых характеристик лука-севка гибрида «Геркулес F1» / А.Г. Аксенов, А.В. Сибирёв // Вестник Казанского ГАУ. – 2016. – № 2 (40). – С.5 – 10.

36. Аксенов, А.Г. Обеспеченность техникой для овощеводства / А.Г. Аксенов, А.В. Сибирёв, П.А. Емельянов // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 8. – С. 25 – 30.

37. Емельянов, П.А. Модернизация сошниковой группы зерновой сеялки для подпочвенного рассева семян / П.А. Емельянов, В.А. Овтов, А.Г. Аксенов, А.В. Сибирёв // Нива Поволжья. – 2017. – № 2. (43). – С. 61 – 67.

38. Колчин, Н.Н. Механизация отечественного овощеводства: состояние и основные направления развития / Колчин Н.Н., Туболев С.С., Аксенов А.Г., Петухов С.Н., Зволинский В.Н. // Картофель и овощи. - 2017. - № 5. - С. 2-8.

Патенты РФ на изобретение и полезную модель

39. Патент № 82511 Россия, МПК A01 C11/02 Высевающее устройство для ориентированного посева лука-севка / П.А. Емельянов А.Г. Аксенов. – Заявл. 10.12.07. Оpubл. 10.05.09 г. Бюл. № 13.

40. Патент № 2407271 Россия, МПК A01 C11/02 Вибрационно-пневматический высаживающий аппарат для ориентированной посадки лука-севка / П.А. Емельянов, А.Г. Аксенов. – № 2008149668/21; Заяв. 16.12.2008; Оpubл. 27.12.2010, Бюл. № 36.

41. Патент № 2492615 Россия, МПК A01 C11/02 Пневмомеханический высаживающий аппарат с вибрационно-ориентирующим питателем для ориентированной донцем вниз посадки лука-севка / П.А.Емельянов, В.А. Овтов, А.Г. Аксенов. – № 2011142657/13; Заяв. 16.12.2008; Оpubл. 21.10.2011, Бюл. № 36.

42. Патент № 2490851 Россия, МПК A01 C5/00. Устройство дискового типа для заделки луковиц в борозде / П. А. Емельянов, А. В. Сибирёв, А.Г. Аксенов. – № 2490851; Заяв. 6.04.2012; Оpubл. 27.08.2013, Бюл. № 24.

43. Патент № 2544631 Россия МПК: A01C7/12; A01C7/16. Катушечно-вильчатый высаживающий аппарат для посадки луковичных культур / П.А. Емельянов, А.Г. Аксенов, В.А. Овтов, П.А. Сидоров. – № 2013130113/13; Заяв. 01.07.2013; Оpubл. 01.07.2015, Бюл. № 24.

44. Патент № 2493684 Россия, МПК A01 C5/00. Сошник посадочной машины / П. А. Емельянов, А. В.Сибирёв, А.Г. Аксенов. – № 2493684; Заяв. 6.04.2012; Оpubл. 27.08.2013, Бюл. № 24.

45. Патент № 2562535 Россия, МПК A01 C7 / 20. Сошник для подпочвенного разбросного посева семян / П.А. Емельянов, В.А. Овтов, А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов, Д.М. Матвеев. – № 2562535; Заяв. 18.02.2014; Оpubл. 10.09.2015, Бюл. № 24.

46. Патент № 2708166 Россия, МПК A23N 15/00. Линия для послеуборочной обработки, предпосадочной и товарной подготовки корневых клубнеплодов и луковиц/

А.Г. Аксенов, А.В. Сибирёв, Измайлов А.Ю. и др. – № 2019103164; Заяв. 5.02.2019; Оpubл. 04.12.2019, Бюл. № 34.

47. Патент № 2595397 Россия, МПК A01 C11/02. Высаживающий аппарат для ориентированной посадки луковых культур / А.Г. Аксенов, П.А. Емельянов, В.А. Овтов, А.В. Сибирёв № 2595397; Заяв. 18.05.2015; Оpubл. 8.08.2016, Бюл. № 15.

48. Патент № 2630449 Россия, МПК A01 D33/00. Линия для послеуборочной доработки, предпосадочной и товарной подготовки корнеклубнеплодов и луковиц / А.Г. Аксенов, А.В. Сибирёв, В.В. Михеев, А.Г. Пономарев, Н.Н. Колчин, В.К. Пышкин, А.С. Чулков, А.В. Трифонов. № 2016126467; Заяв. 01.07.2016; Оpubл. 08.09.2017, Бюл. № 25.

49. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS №2018619692 от 11.07.2018 Программа подбора оптимальной машинной технологии возделывания луковых культур / Зуб Д.В., Аксенов А.Г., Измайлов А.Ю. – заяв. №2018619692 от 11.07.2018.

В сборниках научных трудов и материалах конференций

50. Аксенов, А.Г. Исследование характера движения воздушного потока в вертикально расположенных направлятелях / А.Г. Аксенов, А.В. Коновалов, П.А. Емельянов // Студенческая наука – производству: сборник материалов XXXXX научно-практической конференции студентов инженерного факультета Пензенской ГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА, 2005. – С. 160.

51. Аксенов, А.Г. Расчет и обоснование пневматической системы при модернизации сеялки СЛН-8А для посева лука-севка / А.Г. Аксенов, П.А. Емельянов // Современные аспекты развития АПК: сборник материалов 51-й научно-практической конференции студентов инженерного факультета Пензенской ГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА, 2006. – С. 155.

52. Аксенов, А.Г. Основные факторы, влияющие на процесс ориентированного посева лука-севка / А.Г. Аксенов // Инновации молодых ученых агропромышленному комплексу: Сборник научно-практической конференции Пензенской ГСХА – Пенза: РИО ПГСХА, 2007. – С. 248.

53. Емельянов, П.А. Прибор для определения усилия на разрыв листьев луковиц / П.А. Емельянов, В.П. Никульшин, А.Г. Аксенов. – Материалы МНПК, посвящённой памяти профессора А.Ф. Блинохвата // Образование, наука, практика, инновационный аспект. – Пенза, 2008. – С. 194.

54. Аксенов, А.Г. Автоматическое ориентирование луковиц севка при посадке / А.Г. Аксенов // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Труды Международной научно-технической конференции. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2009. – С. 13–16.

55. Аксенов, А.Г. Вибрационный питатель / А.Г. Аксенов // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России: сборник материалов всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Пенза: РИО ПГСХА, 2009. – С. 49.

56. Емельянов, П.А. Высевающий аппарат для ориентированного посева лука-севка / Емельянов П.А. Аксенов А.Г. // В сборнике: Аграрная наука - сельскому хозяйству сборник научных трудов, посвященный 90-летию Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – Самара: Самарская ГСХА, 2010. – С. 152-156.

57. Сибирёв, А.В. Методика проведения поисковых опытов по заделке луковиц в борозде / А.В. Сибирёв, А. Г. Аксенов // Вклад молодых учёных в инновационное развитие АПК России: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Том II. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – С.151 – 153.

58. Аксенов, А.Г. Определение конструктивных параметров вибрационно-пневматического высаживающего аппарата посадочной машины / А.Г. Аксенов // В сборнике: Инновационные направления развития АПК и повышение конкурентоспособности предприятий, отраслей и комплексов - вклад молодых ученых Сборник научных трудов по материалам XVI международной научно-практической конференции. Главный редактор: Дугин П.И., 2013. С. 3-8.

59. Аксенов, А.Г. Согласование работы высаживающего аппарата и заделывающих органов на посадке луковиц лука-севка / А.Г. Аксенов, А.В. Сибирёв // Новые технологии и технические средства в АПК: сборник материалов международной конференции, посвященной 105 – летию со дня рождения профессора Красникова Владимира Васильевича. – Саратов: Издательство «КУБиК», 2013. – С. 3 – 6.

60. Сибирёв, А.В. Методика экспериментального определения частоты вращения дискового заделывающего органа с почвонаправителями / А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов, А.Ю. Дунюшкин // Инновационные идеи молодых исследователей для АПК России: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Том III. – Пенза: РИО ПГСХА, 2013. – С.195 – 197.

61. Сибирёв, А.В. Методика проведения лабораторных исследований дискового заделывающего органа с почвонаправителями по определению глубины заделки луковиц в борозде / А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов, А.Ю. Дунюшкин // Инновационные идеи молодых исследователей для АПК России: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Том II. – Пенза: РИО ПГСХА, 2014. – С. 215 – 217.

62. Емельянов, П.А. Теоретическое обоснование по применению заделывающих органов на посевных и посадочных машинах / П.А. Емельянов, А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов // Ресурсосберегающие технологии и технические средства для производства продукции растениеводства и животноводства: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА, 2014. – С. 62-64

63. Аксенов, А.Г. Методология разработки технологических и технических решений на возделывании овощных культур на примере посадки лука-севка / А.Г. Аксенов, А.В. Сибирёв, А.И. Козлова // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации государственной программы развития сельского хозяйства – международная научно-техническая конференция. – Москва: ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства», 2015. – С. 284-288.

64. Емельянов, П.А. Математическая модель работы катушки катушечно-вильчатого высаживающего аппарата / П.А. Емельянов, В.А. Овтов, А.Г. Аксенов, А.В. Сибирёв // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации государственной программы развития сельского хозяйства – международная научно-техническая конференция. – Москва: ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства», 2015. – С. 246-249.

65. Зернов, В.Н. Методология формирования технологий и технических средств для выполнения работ в селекции и семеноводстве картофеля / В.Н. Зернов, Н.Н. Колчин, А.Г. Аксенов и др. // Научно-практическая конференция «Современные технологии производства, хранения и переработки картофеля» – Москва: ФГБНУ «ВНИИКХ им. А.Г. Лорха», 2017. – С. 107 – 111.

66. Колчин, Н.Н. Применение и развитие машинных технологий производства картофеля / Н.Н. Колчин, В.Н. Зернов, С.Н. Петухов, А.Г. Аксенов и др. // Научно-практическая конференция «Современные технологии производства, хранения и

переработки картофеля» – Москва: ФГБНУ «ВНИИКХ им. А.Г. Лорха», 2017. – С. 111 – 117.

67. Аксенов, А.Г., Теоретические аспекты динамического программирования адаптивных машинных технологий возделывания сельскохозяйственных культур / Аксенов А.Г., Зуб Д.В. // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – № 3(28). – С. 253-259.

68. Сибирёв, А.В. Обоснование конструктивных параметров сошника с пружинно-упругим механизмом для заделки посадочного материала почвой / А.В. Сибирев, А.Г. Аксенов, М.А. Мосяков // Вестник ФГБОУ ВПО "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2019. – № 2 (90). – С. 20-24.

69. Аксенов, А.Г. Анализ интеллектуальных систем поддержки принятия решений в сельском хозяйстве / А.Г. Аксенов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК – 2019. - № 3. С. 46-51.

70. Aksenov, A.G. Onion set bulb position during planting with vibration-pneumatic planting device / A.G. Aksenov // Agricultural Research and Technology: Open Access Journal. – 2018. Т. – 16. С. 1.