

На правах рукописи



БАХАРЕВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ
ОБРАБОТКИ ПОЧАТКОВ СЕМЕННОЙ КУКУРУЗЫ НА ОСНОВЕ
ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОЭТАПНОГО ОБМОЛОТА**

Специальность: 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Белгород – 2022

Работа выполнена на кафедре технической механики и конструирования машин в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина»

Научный консультант: **Пастухов Александр Геннадиевич,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической механики и конструирования машин ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ.

Официальные оппоненты: **Жалнин Эдуард Викторович,**
доктор технических наук, профессор, заведующий отделом технологии и оборудования для зерновых, зернобобовых и масличных культур ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, заслуженный деятель науки России.

Алдошин Николай Васильевич,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сельскохозяйственных машин ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева.

Никитин Виктор Васильевич,
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технического сервиса ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет». ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ.

Защита состоится 08 сентября 2022 г. в 12³⁰ часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.179.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» по адресу: 393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545)3-88-13, доб. 3-82, e-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ и на сайте университета <http://www.mgau.ru>, а также на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: www.vak.minobrnauki.gov.ru. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направить ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Михеев Николай Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Увеличение объемов производства зерна кукурузы наряду с пшеницей и рисом является приоритетной задачей обеспечения продовольственной безопасности России. Кукуруза обладает высоким потенциалом урожайности, полнота реализации которого зависит от свойств и состояния почвы, достаточного наличия влаги, а также качества семенного зерна, определяемого не только уровнем селекции, но и количеством макро- и микроповреждений. Суммарное количество макро- и микроповреждённого зерна в объёме посевных единиц, полученных при реализации существующей технологии переработки початков на семенной материал, может достигать 71% (по данным И.Г. Строна, Н.Я. Феста, Г.Т. Кравцовой, М.Г. Голика, Л.В. Фадеева и др.). Наиболее активное повреждающее силовое воздействие семенное зерно испытывают при обмолоте, в результате чего травмируется до 30% зерна. Поверхностные повреждения зерна искусственно инкрустируются, однако внутреннее дробление эндосперма на части, различные повреждения зародыша, срывы больших участков защитной плодовой оболочки остаются и снижают полевую всхожесть до 54...73%, что приводит к недобору урожая в объёме 5...20 ц/га (по данным И.Г. Строна, А.Э. Панфилова, А.М. Гречанюка и др.). Минимизация количества макро- и микроповреждений зерна при послеуборочной обработке урожая семенной кукурузы это сложная многоуровневая научная проблема, в которой наиболее значимое место занимает обмолот. Совершенствование обмолота початков семенной кукурузы требует научного обоснования конструктивно-технологических параметров применяемых комплектов технических средств, теоретико-экспериментального определения рациональных режимов работы адаптивных рабочих органов, разработки цифровых систем управления интенсивностью силового воздействия на зерно, системного обоснования технологических решений по минимизации количества макро- и микроповреждений зерна при поэтапном выполнении процессов. Научное решение данной проблемы актуально и перспективно, а также несет большую практическую ценность.

Степень разработанности темы исследования. Разработкой механико-технологических основ теории обмолота кукурузы и созданием инновационных молотильно-сепарирующих устройств (МСУ) занимались отечественные и зарубежные ученые, которые работали в следующих направлениях:

- разработка барабанно-дековых систем: В.П. Горячкин, И.В. Бумбар, К.В. Шатилов, Б.Д. Козачок, А.П. Орехов, Т.К. Тоганбаев, В.И. Корчагин, Ло-Эр-Чжень, Dainius Steponavičius, Aurelija Kemzūraitė, Valdas Kiniulis, Karolis Zokaitis, Fred J. Skahill;

- разработка дисковых систем: Ю.А. Шекихачев, А.З. Цримов, Л.М. Хажметов, Н.Н. Прихода, А.М. Федюшкин, А.И. Яковлев, С.Н. Бочкарев, И.Ф. Кондратьев, В.П. Олейников, Е.М. Печерский, Е.М. Монах, В.А. Ткаченко, В.Т. Гриценко, Н.И. Высоцкий, Н.В. Лесуков, В.К. Треножкин;

- разработка вальцевых систем: В.С. Курасов, И.А. Петунина, В.С. Кравченко, В.М. Погосян, А.Е. Кошванец, А.И. Яковлев, Hamid Al-Jalil, J.T. Wilson, Tony L. Kaminski, Robert H. Spry;

- разработка роторных систем: И.Н. Гуров, В.С. Курасов, В.С. Кравченко, Н.В. Сережина, А.И. Яковлев, А.И. Политучий, М.В. Туманов, Е.В. Рябко, И.Н. Георгиев, А.К. Атанасов, П.Т. Радулов, И.Й. Стоянов, Ted Stott, Lyman J. Gunyou, Robertg A. Stelzer, Donald M. Young, Atanas L. Mitkov, Andrie Diederich Visagie;

- разработка специальных систем обмолота зерновых культур, в том числе кукурузы, воздействующих на початки направленным воздушным потоком или трением: Э.В. Жалнин, В.А. Сафонов, А.И. Ряднов, О.А. Федорова, В.В. Никитин, А.В. Анисимов, В.А. Анисимов, М.П. Васин, А.Е. Кошванец, А.И. Яковлев, А.М. Федюшкин, А.Н. Хабаров, Л.И. Горняцкий, М.А. Коваль, Е.М. Монах;

- анализ эффективности процессов переработки кукурузы на семенное зерно, в том числе перемещение початков в контейнерах, их обмолот, а также транспортировка зерна посредством сменных кузовов или бункеров: А.Ю. Измайлов, А.И. Купреенко, М.Г. Голик, А.И. Завражнов, В.И. Оробинский, В.И. Горшенин, С.В. Соловьёв, М.Л. Крюков, Г.И. Креймерман;

- изучение производственно-технических и экономических показателей работы новейших роторных самоходных комбайнов, способных убирать кукурузу на зерно: Э.В. Жалнин, Н.И. Кленин, В.Е. Бердышев, Н.В. Алдошин, М.Н. Московский, А.А. Золотов, С.Г. Ломакин, А.В. Шевцов, Г.В. Серга и др.

Большое количество теоретико-экспериментальных исследований по данной тематике выполнено в США сотрудниками Iowa State University, здесь большой вклад внесли: Ronald William Brass, Hilbert John Hoof, Hamid Fadhil Al-Jalil, Thomas E. Hitzhusen, Ali Ramadan Mahmoud, Vu Thai Nguyen, Pradip Kumar Dutta, Mofazzal Hossain Chowdhury и др. Ведущими зарубежными компаниями-производителями МСУ для кукурузы являются Cimbria, Serbia Product, Haldrup и др.

Перечисленные выше исследователи и практики внесли большой вклад в решение ряда научных проблем, связанных с разработкой эффективных обмолочивающих систем для кукурузы, однако многообразие их конструктивных решений указывает на то, что потенциал повышения эффективности процесса обмолота початков кукурузы не исчерпан.

Научная гипотеза – минимизация количества макро- и микроповреждений зерна семенной кукурузы в технологии послеуборочной обработки початков при их поэтапном обмолоте достигается рациональным силовым воздействием на зерно адаптивными рабочими органами аксиально-роторного МСУ, в которое початки подаются из защитных контейнеров дозированно и упорядоченно.

Цель исследования – минимизация макро- и микроповреждений семенного зерна кукурузы при поэтапном обмолоте в технологии послеуборочной обработки початков.

Объект исследования – процесс поэтапного обмолота семенной кукурузы с дозированной и упорядоченной подачей початков из защитных контейнеров после предварительной сушки.

Предмет исследования – закономерности минимизации макро- и микроповреждений зерна при поэтапном обмолоте початков семенной кукурузы.

Задачи исследования:

1. Изучить механико-технологические свойства початков и зерна кукурузы различных подвидов.

2. Обосновать технологические решения минимизации макро- и микроповреждений зерна при обмолоте початков семенной кукурузы в процессе их послеуборочной обработки.

3. Разработать способ поэтапного обмолота семенной кукурузы и теоретически обосновать конструктивные параметры комплекта технических средств, включающего защитный контейнер, ориентирующе-дозировочный загрузочный аппарат и аксиально-роторное МСУ.

4. Экспериментально подтвердить результаты теоретических исследований процесса поэтапного обмолота початков семенной кукурузы комплектом технических средств.

5. Разработать методику проектирования комплектов технических средств для поэтапного обмолота початков семенной кукурузы.

6. Выполнить технико-экономический анализ эффективности технических и технологических решений минимизации макро- и микроповреждений семенного зерна кукурузы и разработать рекомендации производству.

Научная новизна:

– впервые математически описаны начальные условия силового воздействия при поэтапном обмолоте с учетом особенностей естественной системы защиты зерна в початке кукурузы;

– разработана математическая модель, определяющая вероятность ориентирования початков в единое положение на этапе подачи в аксиально-роторное МСУ с учетом угла наклона днища контейнера, высоты его выгрузного окна и длины откидного лотка, соотношения суммарной ширины ручьев ориентирующе-дозировочного загрузочного аппарата (ОДЗА) с их длиной;

– получил развитие метод обоснования конструктивных особенностей эффективных фасонных шипов МСУ на основе инвариантности принципов построения биологических прототипов;

– для аксиально-роторного МСУ получила дальнейшее развитие математическая модель скорости осевого перемещения початков, при которой деформация защитной плодовой оболочки зерна не превышает предельно допустимого значения, а вдавливание зерна в стержень, его боковое отклонение от положения равновесия и колебания початка обеспечивают обмолот.

Теоретическая и практическая значимость работы. *Теоретическая значимость* диссертации заключается в:

- математическом описании начальных условий силового воздействия при поэтапном обмолоте с учетом особенностей естественной системы защиты зерна в початке кукурузы от механических повреждений;
- разработке математической модели, определяющей вероятность ориентирования початков в единое положение на этапе подачи в МСУ с учетом угла наклона днища контейнера, высоты его выгрузного окна и длины откидного лотка, соотношения суммарной ширины ручьев ОДЗА с их длиной;
- развитии метода обоснования конструктивных особенностей эффективных фасонных шипов МСУ на основе инвариантности принципов построения биологических прототипов;
- развитии для аксиально-роторного МСУ математической модели скорости осевого перемещения початков, при которой деформация защитной плодовой оболочки зерна не превышает предельно допустимого значения, а вдавливание зерна в стержень, его боковое отклонение от положения равновесия и колебания початка обеспечивают обмолот.

Практическая значимость работы характеризуется:

- результатами изучения механико-технологических свойств початков и зерна кукурузы различных подвидов;
- разработкой технологической схемы ресурсосберегающей заводской технологии обработки початков и зерна семенной кукурузы;
- технологическими решениями минимизации макро- и микроповреждений зерна при обмолоте посредством перемещения початков в защитных вентилируемых контейнерах, разгрузки контейнеров без опрокидывания, ориентирования початков и их дозированной подачи многоручьевым ОДЗА, адаптивного силового воздействия аксиально-роторным МСУ с многосекционной декой;
- разработкой комплекта технических средств для поэтапного обмолота початков семенной кукурузы и его рациональными конструктивно-технологическими параметрами, минимизирующим макро- и микроповреждения зерна;
- обоснованием целесообразности объединения комплектов технических средств для поэтапного обмолота початков семенной кукурузы в многоканальную систему, где каждый канал независим и взаимозаменяем;
- совершенствованием методики теоретико-экспериментального определения энергоемкости процесса поэтапного обмолота початков семенной кукурузы;
- разработкой действующего образца системы цифрового управления пневмоадаптивной декой МСУ и программного кода ее контроллера;
- методикой проектирования комплектов технических средств для поэтапного обмолота початков семенной кукурузы.

Методология и методы исследования. При выполнении аналитических исследований использовались общепринятые системные методы: построения Парето-оптимальной границы, расстояния к цели, экспертных процедур установления приоритетов, и классические методы статистики. Теоретические исследования проводились с применением базовых методологий и методов

высшей математики, теоретической механики и сопротивления материалов. Использовалась теория реологии, контактная задача Герца, теория тонких оболочек и волновая теория удара. Применялись базовые методы бионики. Технические измерения выполнялись в соответствии со стандартными методиками посредством сертифицированного и оригинального испытательного оборудования. Результаты исследований обрабатывались посредством прикладных компьютерных программ.

Положения, выносимые на защиту:

- математическое описание начальных условий силового воздействия при поэтапном обмолоте с учетом особенностей естественной системы защиты зерна в початке кукурузы от механических повреждений;
- математическая модель, вероятности ориентирования початков в единое положение перед подачей в МСУ с учетом угла наклона днища контейнера, высоты его выгрузного окна и длины откидного лотка, а также соотношения суммарной ширины ручьев ОДЗА с их длиной;
- метод обоснования конструктивных особенностей эффективных фасонных шипов МСУ на основе инвариантности принципов построения биологических прототипов;
- для аксиально-роторного МСУ математическая модель скорости осевого перемещения початков, при которой деформация защитной плодовой оболочки зерна не превышает предельно допустимого значения, а вдавливание зерна в стержень, его боковое отклонение от положения равновесия и колебания початка обеспечивают обмолот.

Степень достоверности и апробация результатов. Материалы диссертации, основные научные положения, выводы и практические рекомендации исследований были доложены, обсуждены и одобрены на: Международных и всероссийских научно-практических конференциях: ЛНАУ (г. Луганск, 2009-2013 г.); ХНТУСХ им. П Василенко (Украина, г. Харьков, 2010-2013 г.); НУБиП (Украина, г. Киев, 2010 г.); ТГАТУ (Украина, г. Мелитополь, 2011 г.); ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ (РФ, п. Майский, 2017-2021 г.); LLU (Latvia, Jelgava, 2019-2021 г.); ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (РФ, г. Москва, 2018-2019 г.); ISB-INMA-ТЕН (Romania, Bucharest, 2018 г.); JUMTO (Сербия, Новый Сад, 2018 г.); РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева (РФ, г. Москва, 2019 г.); ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА (РФ, г. Нижний-Новгород, 2019 г.); CzULS (Czech Republic, Prague, 2019 г.); ФГБОУ ВО Донской ГАУ (РФ, г. Зерноград, 2020 г.). В полном объеме диссертация заслушана и одобрена на расширенных заседаниях кафедр: технической механики и конструирования машин ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ и сельскохозяйственных машин РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева.

Результаты научных исследований используются в учебном процессе на инженерных факультетах ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ГОУ ВО ЛНР Луганский ГАУ и на инженерно-технологическом факультете Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

Научно-методические рекомендации, разработанные по результатам исследований, рассмотрены, одобрены и рекомендованы департаментом АПК и воспроизводства окружающей среды Белгородской области. Результаты

исследования в виде научно-технической продукции внедрены в: ФГБНУ Белгородский ФАНЦ РАН (РФ), ОАО «Белагромаш-Сервис имени В.М. Рязанова» (РФ), КФХ «Краснополянское» (РФ); ООО «Научно-производственное предприятие» АгроЛугань (ЛНР), ООО «ЛуганьПлемсервис» (ЛНР), ФХ Богданова В.А. (ЛНР), ФХ «Родник-С» (ЛНР).

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 42 научные работы, из них 11 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (5,03 п.л., из них автору принадлежит 4,41 п.л. или 87,67 %), 4 – индексированы в международных наукометрических базах SCOPUS и Web of Science, 4 – монографии, 4 – патента РФ на полезную модель, 4 - патента Украины на полезную модель, 1 – свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 446 страницах, состоит из введения, основной части, содержащей 112 рисунков, 52 таблицы, заключения, принятых сокращений, списка литературы (включает 339 наименования, в том числе 44 – на иностранном языке) и 20 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, показана степень разработанности темы исследования, сформулирована цель и задачи исследования, описана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, и степень достоверности и апробации результатов, также приведены данные по публикациям материалов исследования и описана структура и объем диссертации.

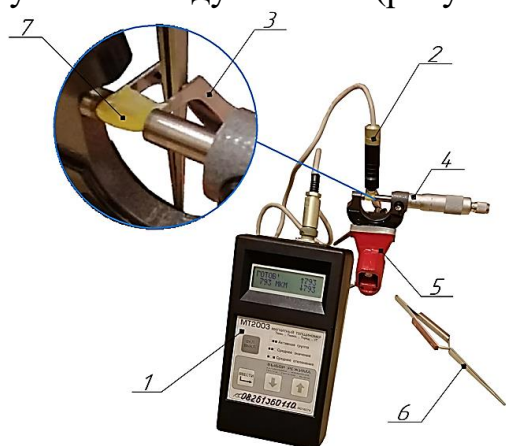
В первой главе «Состояние проблемы и перспективы развития технологий и технических средств для обмолота початков семенной кукурузы. Цель и задачи исследований» проведены аналитические исследования потенциала Белгородской области в контексте увеличения валового сбора зерна кукурузы, в результате чего установлена целесообразность повышения эффективности существующей системы семеноводства совершенствованием технологии послеуборочной обработки урожая семенной кукурузы. Изучены современные технологии обработки початков и зерна кукурузы, определена связь их эффективности с количеством макро- и микроповреждений зерна. На основании анализа общих принципов функционирования кукурузоуборочной и кукурузоперерабатывающей техники обоснована необходимость предварительного придания початкам кукурузы рационального пространственного положения относительно рабочих органов МСУ.

Систематизация и обобщение существующих теорий обмолота початков кукурузы позволили установить, что научная основа минимизации макро- и микроповреждений зерна требует дальнейшего развития методологии математического моделирования ударного контактного взаимодействия.

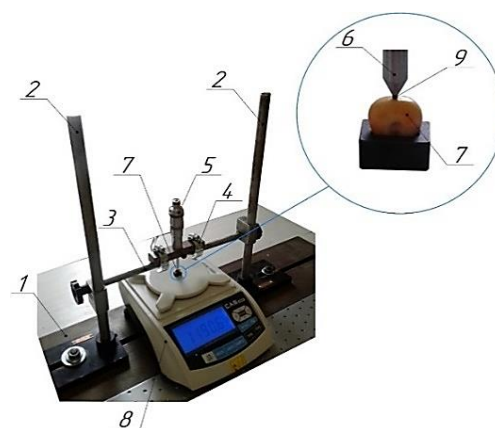
Выполнен системный анализ устройства для пространственного ориентирования и обмолота початков семенной кукурузы аксиально-роторными МСУ. Установлена необходимость создания комплекта технических средств для

поэтапного обмолота с пневмоадаптивными рабочими органами. Выявлены нерешенные вопросы изучаемой проблемы, определена концепция их решения. В результате аналитических исследований и на основании научной гипотезы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе «Исследования механико-технологических свойств початков и зерна кукурузы различных подвидов» установлено, что среднее значение динамического коэффициента трения скольжения зерна зубовидной, кремнистой, сахарной и лопающейся кукурузы по стали составляет $f_{\text{дз}} = 0,31$, а стержня початка без зерна – $f_{\text{дз}} = 0,36$. Угол естественного откоса початков кукурузы равен $\varphi_{\text{EO}} = 31,2^\circ$. Коэффициент Пуассона защитной плодовой оболочки зерна равен $\nu = 0,356$, а ее модуль Юнга у зубовидной кукурузы равен 78...127 МПа, кремнистой – 98...125 МПа, сахарной – 97...124 МПа, лопающейся – 127...169 МПа. Определено среднее значение усилия, необходимого для разрыва зерновой ножки в области носка, середины и комля початков вышеописанных подвидов кукурузы составляет 11,67; 19,71 и 6,81 Н, соответственно. Предложены методики исследования и оборудование для изучения коэффициента Пуассона защитной плодовой оболочки зерна кукурузы и ее модуля Юнга (рисунки 1 и 2).

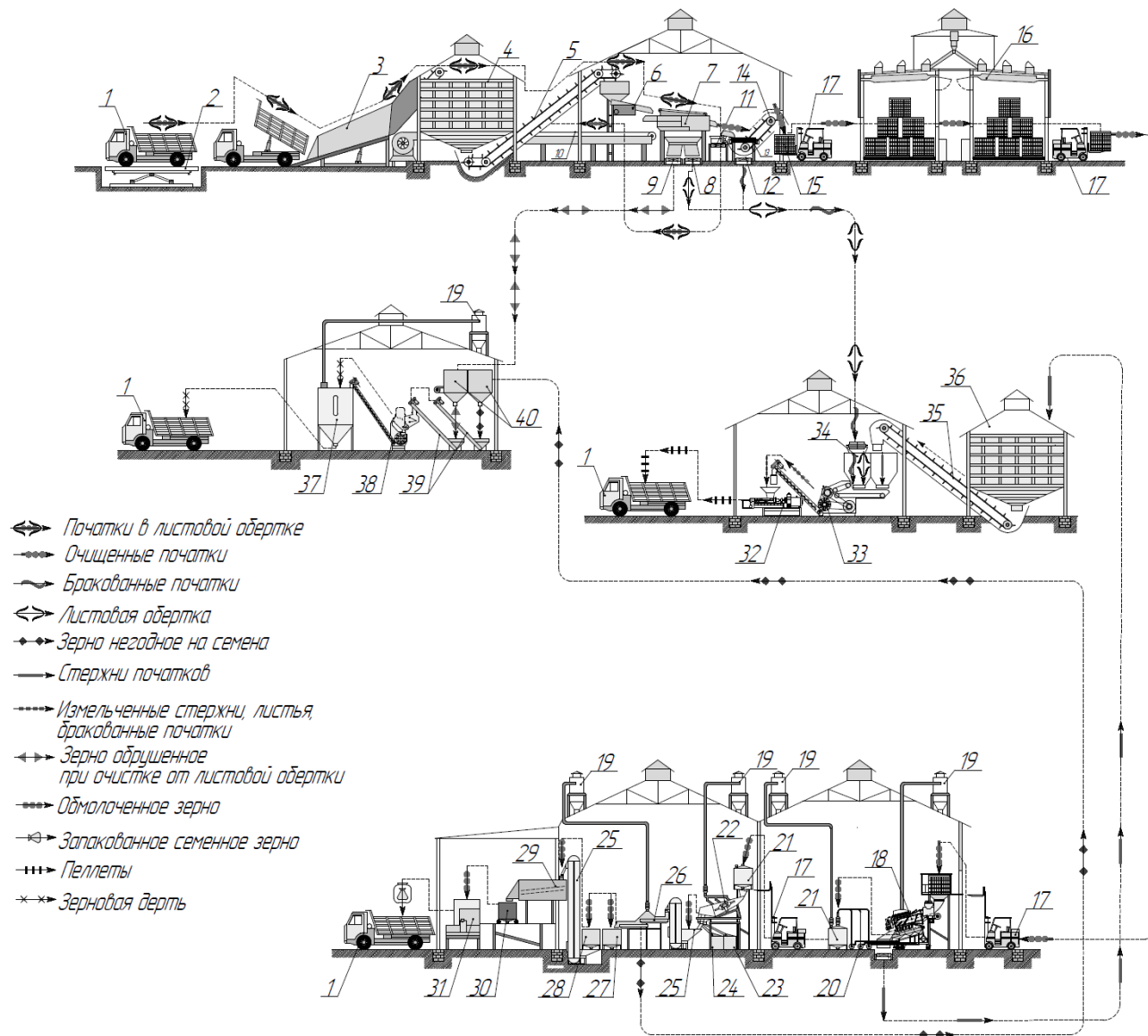


1 – магнитный толщиномер; 2 – датчик толщиномера; 3 – захват-расширитель;
4 – микрометр; 5 – минитиски;
6 – обратный пинцет; 7 – защитная плодовая оболочка зерна кукурузы
Рисунок 1 – Установка для определения коэффициента Пуассона защитной плодовой оболочки зерна кукурузы



1 – салазки станда; 2 – стойка-штатив;
3 – опора; 4 – фиксирующая лента;
5 – микрометрический глубиномер;
6 – шток; 7 – зерно; 8 – аналитические электронные весы; 9 – индентор
Рисунок 2 – Экспериментальная установка для изучения модуля Юнга защитной плодовой оболочки зерна

В третьей главе «Теоретическое обоснование технологических решений и комплекта технических средств поэтапного обмолота початков семенной кукурузы» обоснована укрупненная технологическая схема щадящей безотходной заводской обработки урожая семенной кукурузы (рисунок 3). Выявлено, что технология переработки початков кукурузы на семенное зерно состоит из обработки початков и обработки обмолоченного зерна, а обмолот является точкой перехода от одной фазы переработки к другой, в котором повреждается до 30% зерна.



- 1 – грузовое транспортное средство;
 2 – весы; 3 – приемник-погрузчик;
 4, 5 – временное хранилище и устройство для его разгрузки; 6, 7 – промежуточный бункер и очиститель початков от листовой обертки;
 8 - 12 – транспортёры;
 13 – сортировочный ленточный конвейер;
 14 – конвейер; 15 – контейнер для очищенных початков; 16 – сушилка початков; 17 – погрузчик; 18 – аксиально-роторное МСУ; 19 – циклон;
 20 – пневмозагрузчик; 21 – три переносных бункера для зерна с комля, середины и носка початков; 22 – аспиратор;
 23 и 24 – бункеры для крупного и мелкого сора; 25 – нория Фадеева; 26 – очиститель-калибровщик; 27 и 28 – бункеры для легковесного и кондиционного зерна; 29 – инкрустатор (протравитель); 30 – бункер для семян готовых к посеву; 31 – комплекс затаривания Big-bag; 32 – аппарат для производства пеллет;
 33 – двухступенчатый измельчитель;
 34 – секционный бункер; 35 – транспортер;
 36 – секционное временное хранилище;
 37 – бункер для дерти; 38 – дробилка;
 39 – шнековый зернопогрузчик;
 40 – зерновой бункер

Рисунок 3 - Технологическая схема щадящей безотходной заводской обработки урожая семенной кукурузы

Установлено, что применение защитных вентилируемых контейнеров при сушке початков, их транспортировке на обмолот и подаче в МСУ позволяет снизить количество макро- и микроповреждений зерна на 7%. Кроме того, результаты аналитических исследований позволяют сделать прогноз, что последовательное выполнение разгрузки контейнеров без опрокидывания, ориентирования початков перед обмолотом в единое положение, их дозирование при подаче в МСУ и обмолот аксиально-роторным МСУ с трехсекционной декой, адаптивно изменяющей интенсивность силового воздействия в каждой независимой секции, позволяет снизить количество макро- и микроповреждений обмолоченного зерна до уровня менее 10%.

При контейнерной системе перемещения початков разрыв фаз обработки початков и обработки обмолоченного зерна исключается путем применения многоканального комплекта технических средств обмолота (МТСО). Такой комплект работает по принципу массового обслуживания контейнеров с ограниченной очередью (рисунок 4), а его эффективность характеризуется как предельной вероятностью многоканальной системы массового обслуживания с ограниченной очередью определяемой уравнениями А.К. Эрланга и А.Н. Колмогорова, так и минимальным количеством машин, согласуемых по производительности, количеством операторов, а также энергоемкостью процесса и показателем технологического ресурсосбережения.

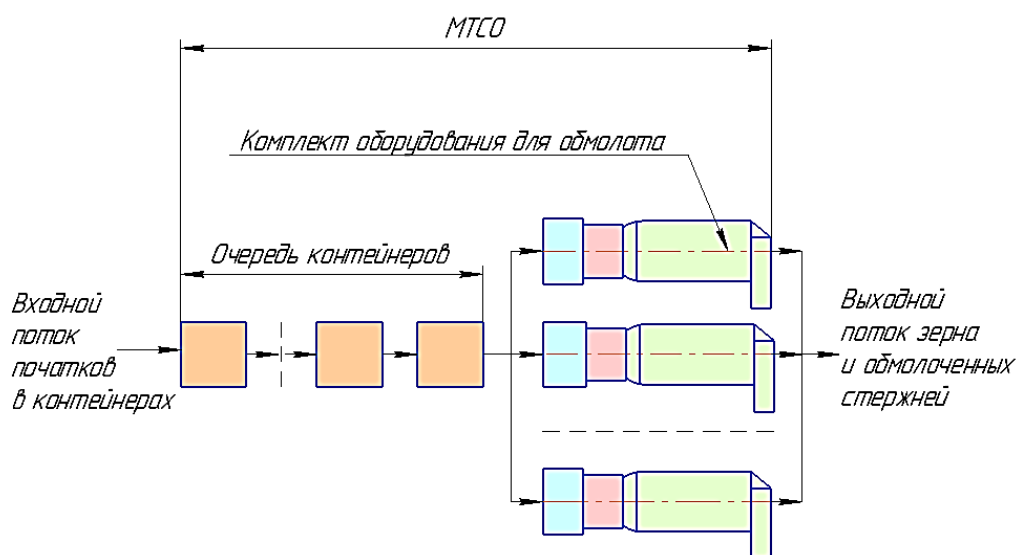


Рисунок 4 – Принципиальная схема МТСО

Уровень ресурсосбережения при механизированном обмолоте початков кукурузы определяется количеством макро- и микроповреждений зерна и потерями от дробления, недомолота, схода свободным зерном и выражается уравнением:

$$y_{PC}^{OБM} = k_{мех} \cdot \left(\frac{\left(M_{общ}^{OБM} - \sum_{i=1}^n m_{mm} \right)}{M_{общ}^{OБM}} \cdot 100\% - \left(\sum_{i=1}^n \Delta_{di} + \Delta_n + \Delta_c \right) \right), \quad (1)$$

где $k_{мех}$ – уровень механизации процесса; $M_{общ}^{ОБМ}$ – общее количество обмолоченного зерна, кг; $\sum_{i=1}^n m_{mm}$ – суммарная масса зерна с макро- и микроповреждениями, кг; $\sum_{i=1}^n \Delta_{oi}$ – суммарный показатель дробления зерна, %; Δ_n – общий показатель недомолота, %; Δ_c – общий показатель схода свободным зерном, %; n – количество этапов обмолота, штук.

Вышеописанные характеристики позволили осуществить оценку и сравнение комплектов технических средств на этапе «разгрузка сушиллки → транспортировка на обмолот → обмолот», в которых реализована конвейерная и контейнерная погрузочно-транспортная система для початков (рисунок 5). Контейнерная система работает как МТСО с очередью не более трех контейнеров.

Полученные расчетно-аналитические значения обобщённых критериев эффективности и результаты сравнения комплектов технических средств на этапе «разгрузка сушиллки → транспортировка на обмолот → обмолот» приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения обобщённых критериев эффективности

Параметр	Значение для оцениваемого варианта		
	Код	С применением конвейеров	С применением защитных контейнеров
Отношение общего количества показателей к количеству прогнозируемых организационных показателей	J_1	2	1
Минимальное количество машин, согласуемых по производительности с МТСО, шт.	J_2	5	2
Сумма показателей макро- и микроповреждений, дробления и потерь зерна на этапе: разгрузка сушиллки → транспортировка початков в МТСО → обмолот, %.	J_3	36	13
Количество операторов	J_4	2	3
Площадь анализируемого графа S_j , мм ²	-	3350	1240
Площадь идеального графа S_i , мм ²	-	970	
Критерий расстояния к цели Θ_j	-	3,25	1,28
Соотношение критериев расстояния к цели Θ	-	2,5:1	

Здесь $\Theta = 2,5$ показывает, что при контейнерном подходе обобщенный критерий совместного и единовременного ограничивающего влияния J_1, J_2, J_3, J_4 (таблица 1) на эффективность применяемых технологических решений при разгрузке сушиллки, транспортировке початков в МТСО и обмолоте в 2,5 раза меньше, чем при конвейерном подходе.

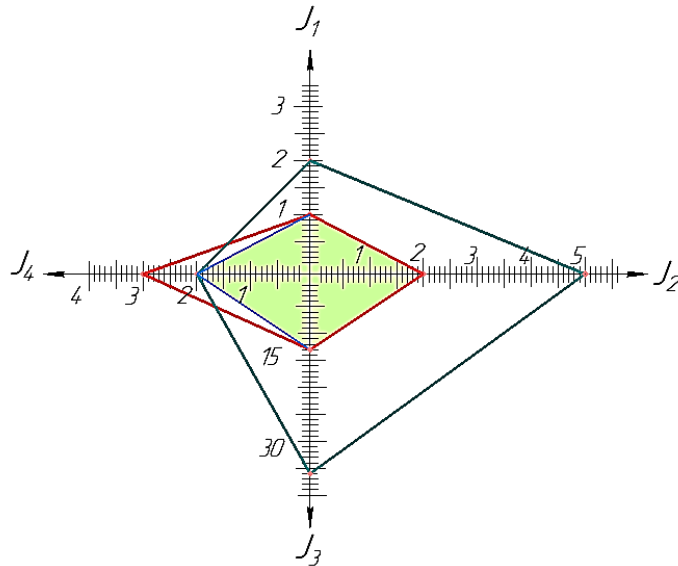


Рисунок 5 – Оценочный граф для сравнения технологических решений

Для построения плана дальнейших теоретических исследований на основании научной гипотезы предложена модель функционирования одного канала МТСО (рисунок 6).

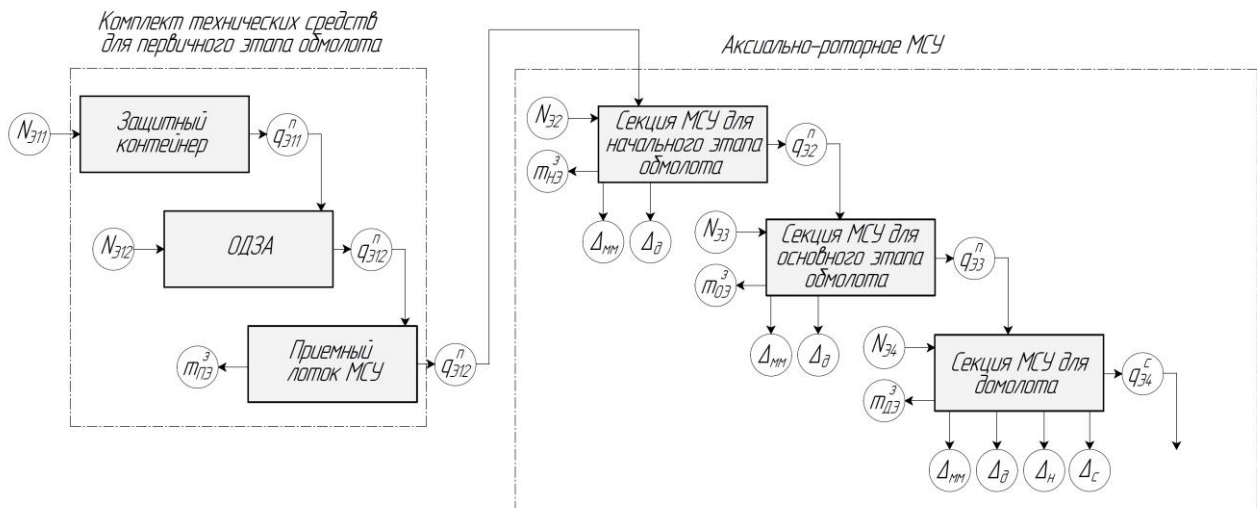


Рисунок 6 – Модель функционирования комплекта технических средств для поэтапного обмолота початков семенной кукурузы

Для данной модели функционирования системная функция взаимосвязи параметров имеет вид математической модели поэтапной характеристики процесса:

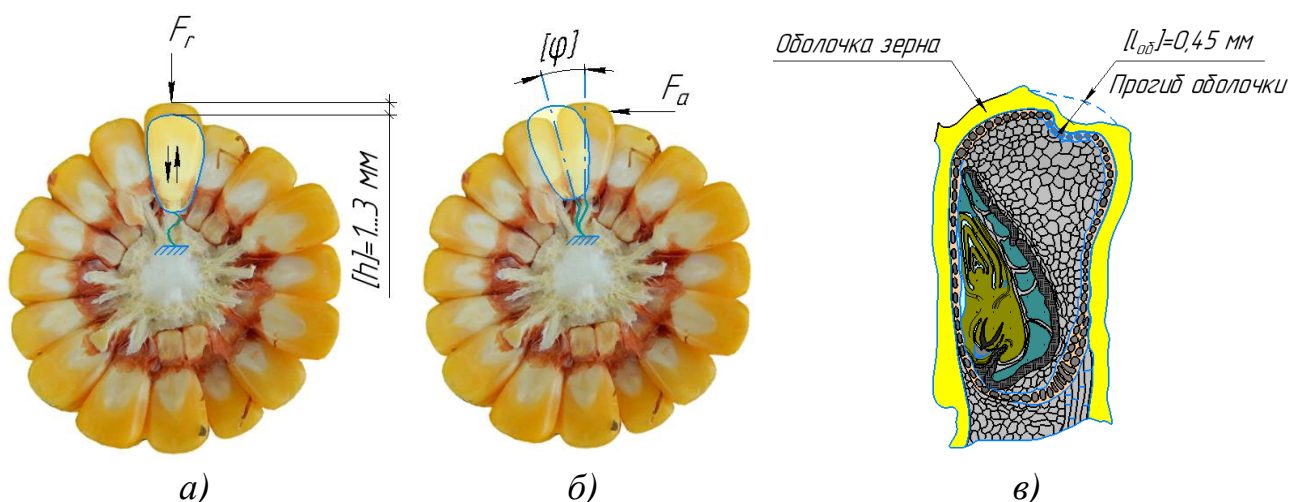
$$I_M^{ОБМ} = f(\mathcal{E}_V^{ОБМ} \Lambda U_{PC}^{ОБМ}) \equiv \begin{cases} N_{Э11} + N_{Э12} \Lambda q_{Э11}^n + q_{Э12}^n \Lambda m_{ПЭ}^3; \\ N_{Э2} \Lambda q_{Э2}^n \Lambda m_{НЭ}^3 \Lambda \Delta_{mm} \Lambda \Delta_\delta; \\ N_{Э3} \Lambda q_{Э3}^n \Lambda m_{ОЭ}^3 \Lambda \Delta_{mm} \Lambda \Delta_\delta; \\ N_{Э4} \Lambda q_{Э4}^c \Lambda m_{ДЭ}^3 \Lambda \Delta_{mm} \Lambda \Delta_\delta \Lambda \Delta_H \Lambda \Delta_c. \end{cases} \quad (2)$$

где $I_M^{ОБМ}$ – условное обозначение поэтапного обмолота; $\mathcal{E}_V^{ОБМ}$ – энергоемкость обмолота, кВтч/т, %; $N_{Э11}$ – мощность, затраченная на подъем контейнера, кВт; $N_{Э12}$ – мощность, затраченная на привод ОДЗА, кВт; $N_{Э2}$ – мощность, затраченная на начальный этап обмолота, кВт; $N_{Э3}$ – мощность, затраченная на

основной этап обмолота, кВт; $N_{Э4}$ – мощность, затраченная на домолот, кВт; $q_{Э11}^n$ – подача початков из контейнера на ОДЗА, кг/с; $q_{Э12}^n$ – подача початков ОДЗА, кг/с; $q_{Э2}^n$ – пропускная способность секции начального обмолота, кг/с; $q_{Э3}^n$ – пропускная способность секции основного обмолота, кг/с; $q_{Э4}^c$ – пропускная способность секции домолота, кг/с; $m_{ПЭ}^3$ – сход зерна в бункер МСУ после первичного этапа обмолота, кг; $m_{НЭ}^3$ – сход зерна в бункер МСУ после начального этапа обмолота, кг; $m_{ОЭ}^3$ – сход зерна в бункер МСУ после основного этапа обмолота, кг; $m_{ДЭ}^3$ – сход зерна в бункер МСУ после этапа домолота, кг; $\Delta_{мм}$ – показатель макро- и микроповреждений зерна, %; Δ_n – показатель недомолота зерна, %; Δ_δ – показатель дробления зерна, %; Δ_c – сход свободным зерном, %.

Математическая модель (2) является первой логической формой описания условий поэтапного обмолота.

Особенности естественной системы защиты зерна в початке кукурузы графически интерпретируются рисунком 7.



а – способность зерна углубляться в стержень; *б* – способность зерна отклоняться в сторону; *в* – способность оболочки зерна прогибаться под нагрузкой

Рисунок 7 – Элементы естественной системы защиты зерна кукурузы от механических повреждений

Зерно, находясь в початке, под действием радиальной статической нагрузки или ударного импульса $[S] = 1,45$ Нс (значение определено И.Н. Гуровым) может углубляться в тело стержня на глубину $[h] = 3$ мм (значение определено К.В. Шатиловым и подтверждено И.Н. Гуровым) (рисунок 7, *а*).

При воздействии на початок под углом к его радиусу зерно, сохраняя целостность крепления к стержню, может отклоняться в сторону на угол $[\varphi] = 7...12^\circ$ (значение определено по методике А.И. Пьянкова) вместе с несколькими смежными зернами, опираясь на последние (рисунок 7, *б*).

Защитная плодовая оболочка зерна без повреждений может прогибаться на величину $[l_{об}] = 0,45$ мм (значение определено Н.Ф. Рожковским) (рисунок 7, в).

Следовательно, начальные условия (НУ) ударного силового воздействия при поэтапном обмолоте с учетом особенностей естественной системы защиты зерна в початке кукурузы выражаются функцией Φ_1 в виде системы ограничений:

$$\Phi_1 = \left(\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_V^{ОБМ} \rightarrow \min \\ \mathcal{Y}_{PC}^{ОБМ} \rightarrow \max \end{array} \right\} \right) \equiv \left\{ \begin{array}{l} S \leq [S] \\ l_{об} \leq [l_{об}] \\ h \geq [h] \\ \varphi \geq [\varphi] \end{array} \right. , \quad (3)$$

где $S, [S]$ – необходимое и предельно допустимое значение ударного импульса, соответственно, Нс; $l_{об}, [l_{об}]$ – необходимое и предельно допустимое значение прогиба защитной оболочки зерна, соответственно, мм; $h, [h]$ – необходимое и предельно допустимое значение углубления зерна в тело стержня початка, соответственно, мм; $\varphi, [\varphi]$ – необходимое и предельно допустимое значение углового отклонения нагруженного зерна в участке смежных зерен на початке, соответственно, град.

Для трения зерна о рабочие органы МСУ при движении початков в процессе поэтапного обмолота НУ силового воздействия с учетом особенностей естественной системы защиты зерна в початке кукурузы выражаются функцией Φ_2 в виде системы ограничений:

$$\Phi_2 = \left(\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_V^{ОБМ} \rightarrow \min \\ \mathcal{Y}_{PC}^{ОБМ} \rightarrow \max \end{array} \right\} \right) \equiv \left\{ \begin{array}{l} R_{Fc} \leq [R_{Fc}] \\ \varphi \geq [\varphi] \\ l_{об} \leq [l_{об}] \end{array} \right. , \quad (4)$$

где R_{Fc} и $[R_{Fc}]$ – необходимое и предельно допустимое значение сил трения скольжения, способствующих отделению зерна от стержня, соответственно, Н.

Математические модели (3) и (4) являются второй и третьей логической формой описания условий поэтапного обмолота. На основании вышеизложенного разработан способ поэтапного обмолота, предполагающий последовательное выполнение первичного, начального, основного этапа обмолота и домолота початков кукурузы.

Первичный этап осуществляется в процессе разгрузки початков из защитного вентилируемого контейнера, перемещения по откидному лотку, движения по рабочему органу многоручьевого ОДЗА, а также подачи параллельно оси ротора в приемный лоток МСУ.

Начальный этап реализуется в первой секции аксиально-роторного МСУ при взаимодействии с разрезным шипованным конусом деки, выполненным в виде четырех подвижных подпружиненных участков.

Основной этап обмолота протекает во второй удлиненной секции МСУ под действием двухзаходной навивки ротора и шипованной пневматической деки.

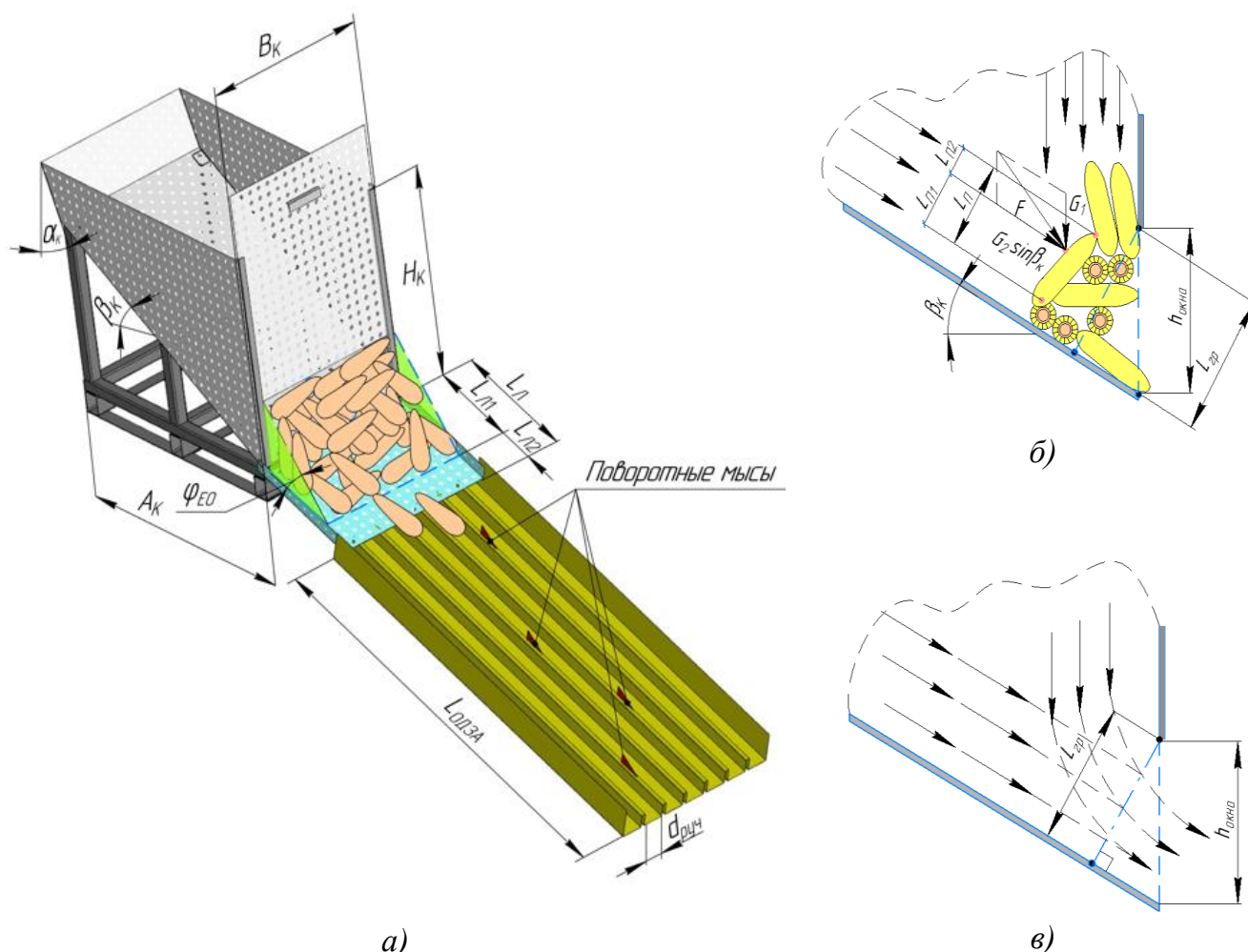
Домолот реализуется в третьей укороченной секции МСУ под действием четырехзаходной навивки ротора и шипованной пневматической деки.

Ориентирование початков кукурузы в единое положение достигается посредством их управляемого выхода из контейнера, движения по поверхности откидного лотка и перемещения в ручьях рабочего органа ОДЗА (рисунок 8).

Вероятность ориентирования початков определяется математической моделью:

$$p(A) = \begin{cases} p(A_1) \cdot p(A_2) \rightarrow \text{создание рациональных условий ориентирования} \\ p(A_3) \rightarrow \text{ориентирование массы початков} \end{cases}, \quad (5)$$

где $p(A_1)$ и $p(A_2)$ – вероятность создания рациональных условий для ориентирования початков при выходе из защитного контейнера и при перемещении по рабочей поверхности откидного лотка, соответственно; $p(A_3)$ – вероятность ориентирования початков рабочей поверхностью ОДЗА.



a – схема системы «защитный бункер-ОДЗА»; *б* – представление массы початков в зоне выхода из контейнера в виде системы хаотично сложенных двухпорных стержней;
в – графическая интерпретация истечения початков из бункера
 *(пояснения обозначений на рисунке приведены в тексте ниже)

Рисунок 8 – Система ориентированной загрузки (СОЗ) початков в МСУ

В развернутой форме математическая модель (5) имеет вид:

$$p(A) = \begin{cases} p(A_1) \cdot p(A_2) = p(\Pi) \cdot \frac{L_{\Pi 1}}{L_{\Pi}} \cdot \frac{L_{\Pi 1}}{L_{\Pi}} \text{ при } \begin{cases} \frac{h_{\text{окна}}}{\text{tg} \varphi_{EO} \cdot \cos \varphi_{EO}} \leq L_{\Pi 1} \leq L_{\Pi} \\ L_{\Pi} = (2,0 \dots 2,5) \cdot h_{\text{окна}} \end{cases} \\ p(A_3) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n d_{\text{руч}} \cdot k}{L_{\text{ОДЗА}}} \end{cases}, \quad (6)$$

где $p(\Pi)$ – вероятность выхода початков из контейнера на откидной лоток в благоприятном для ориентирования положении; $L_{\Pi 1}$ – расстояние от удаленной опоры початка до точки приложения равнодействующей внешних сил F ; L_{Π} – средняя (эффективная) длина початков в насыпи, м; $L_{\Pi 1}$ – длина откидного лотка от его начала до границы насыпи, формирующей естественный откос с углом φ_{EO} , м; L_{Π} – общая длина откидного лотка, м; $h_{\text{окна}}$ – высота выгрузного окна контейнера, м; φ_{EO} – угол естественного откоса початков кукурузы; $d_{\text{руч}}$ – ширина ручья ОДЗА, м; $k = 1 - p(A_1) \cdot p(A_2)$ – поправочный коэффициент, учитывающий процент початков подаваемых в ОДЗА в неблагоприятном для ориентирования положении; $L_{\text{ОДЗА}}$ – длина ручья ОДЗА, м.

Введено допущение, что в зоне выхода початков из контейнера (в области соединения вертикального истечения и наклонного) усредненное значение отношения расстояния $L_{\Pi 1}$ к L_{Π} пропорционально отношению минимальной высоты потока $L_{\text{зр}}$ к высоте выгрузного окна контейнера $h_{\text{окна}}$. Установлено ограничение – равнодействующая сил, смещающих початки по наклонной плоскости днища $G_2 \sin \beta_K$ должна превышать вес пласта початков G_1 над областью соединения вертикального и наклонного истечения, что обеспечивается соотношением длины A_K , ширины B_K и высоты H_K контейнера, а также углом наклона его днища β_K . В связи с этим для предложенного защитного вентилируемого контейнера рациональным является $A_K = 800 \dots 1600$, $B_K = 400 \dots 800$, $H_K = 600 \dots 1000$ мм; угол наклона днища – $27 \dots 35^\circ$; высота выгрузного окна – $250 \dots 300$ мм; длина откидного лотка – не менее 600 мм, максимальный угол его установки – 35° . Для многоручьевого ОДЗА, предназначенного для работы с контейнером вышеописанных размеров: количество ручьев – $5 \dots 9$; ширина ручья – $80 \dots 100$ мм; длина ручья не менее 1600 мм. При этом вероятность создания рациональных условий для ориентирования $p(A_1) = 0,664 \dots 0,704$, $p(A_2) \approx 0,99$, а вероятность ориентирования початков в единое положение $p(A_3) = 0,85 \dots 0,87$.

Единичные початки, перекатывающиеся по выступам ручьев, укладываются в ручьи четырьмя поворотными мысами, расположенными в шахматном порядке, при этом ОДЗА посредством вибратора придаются малые вынужденные колебания, целью которых является обеспечение эффективной работы мысов. Глубина ручьев ОДЗА принята на основании анализа размерных характеристик початков и составляет – $60 \dots 100$ мм. На основании условия исключения прохода зерна с рассчитанным условным эквивалентным диаметром 7 мм, диаметр перфораций в стенках контейнера принят равным $4,0 \dots 5,0$ мм.

Угол наклона ОДЗА определяет скорость схода початков в МСУ и находится в регулируемом диапазоне 20...35°. Пройдя СОЗ початки в строго сориентированном положении своей покрытой зерном поверхностью контактируют с рабочими органами МСУ, среди которых наиболее травмирующими являются шипы деки.

Скоростные режимы обмолота кукурузы таковы, что за время удара зерна о шип адаптивные рабочие органы деки не всегда успевают отреагировать и перевести силовой режим обмолота в НУ вышеописанной системы естественной защиты зерна в початке. Поэтому форма и размеры шипов должны быть такими, при которых нормальная составляющая ударного импульса зерна о шип не превысит допустимого значения, а внедрение шипа в оболочку зерна не превысит $[l_{об}]$, но произойдет разрыв зерновой ножки, соединяющей зерно со стержнем. Параметры таких шипов определяются геометрической совместимостью с зерном кукурузы. Следовательно, форма и размер шипа должны быть выполнены с учетом биосимметрии зерна.

В соответствии с методикой С.В. Петухова установлено, что двойное отношение линейных размеров, так называемый вурф W , для зерна кукурузы шести основных подвидов составляет $W_з = 1,26...1,31$. Приняв $W_з$ как критерий сравнения, был осуществлен поиск биологических прототипов шипов МСУ. В результате выявлено, что жвалы большинства амбарных вредителей, поедающих зерно кукурузы, конструктивно состоят из трех криволинейных рабочих поверхностей, среднее значение двойного отношения линейных размеров которых $W_{жс} = 1,29$.

Аппроксимация кривых, задающих кривизну участков жвал дала полиномиальную функцию 2-й степени. Анализ результатов аппроксимации кривых и расчет масштабного множителя линейного преобразования методами теории подобия размерностей позволил осуществить 3D-моделирование рабочей поверхности фасонного шипа (рисунок 9) и выразить его пропорции соотношениями:

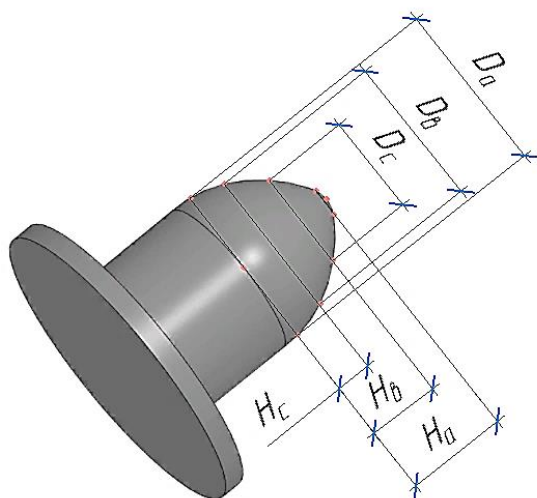


Рисунок 9 – 3D модель бионически обоснованного фасонного шипа МСУ

$$\frac{(D_a + D_b) \cdot (D_b + D_c)}{D_c \cdot (D_a + D_b + D_c)} = 1,26...1,31; \quad (7)$$

$$\frac{(H_a + H_b) \cdot (H_b + H_c)}{H_c \cdot (H_a + H_b + H_c)} = 1,26...1,31. \quad (8)$$

Базовый размер D_a находится в интервале 2,0...2,5 от условного эквивалентного диаметра зерна для шести основных подвидов кукурузы, а размер H_a равен максимальной возможной высоте зерна для шести основных подвидов кукурузы. В связи с этим, размеры шипа в диаметральном направлении $D_a \times D_b \times D_c = 17 \times 15 \times 11$ мм, а по высоте – $H_a \times H_b \times H_c = 12 \times 9 \times 6$ мм. Математическое моделирование и сравнение шипа предложенной формы с существующим шипом сферической формы (рисунок 10) позволило установить среднеинтегральную угловую разницу $\Delta\varphi$, характеризующую влияние ударного импульса.

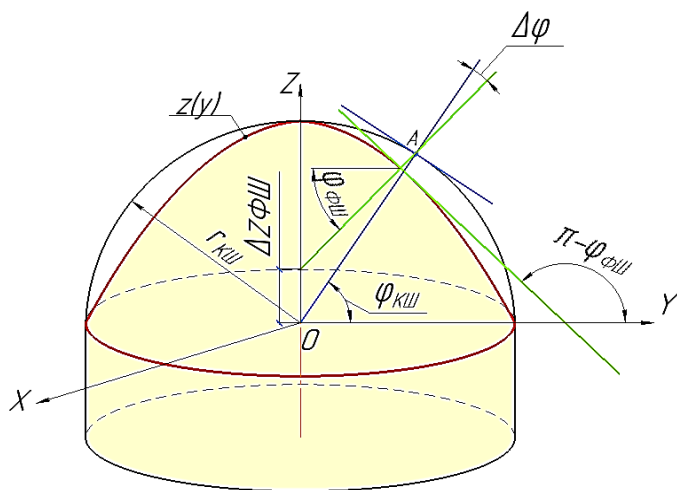


Рисунок 10 – Сопоставление рабочих поверхностей существующего сферического и бионически-обоснованного фасонного шипа деки МСУ

Среднеинтегральная угловая разница определяется выражением:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{d_{зк}} \int_0^{d_{зк}} \left(\pi - \arctg(2ay + b) - \arccos \frac{y}{\sqrt{4 \cdot \left(\frac{ad_{зк}^3}{3} + \frac{bd_{зк}^2}{2} + cd_{зк} \right)}} \right) dy. \quad (9)$$

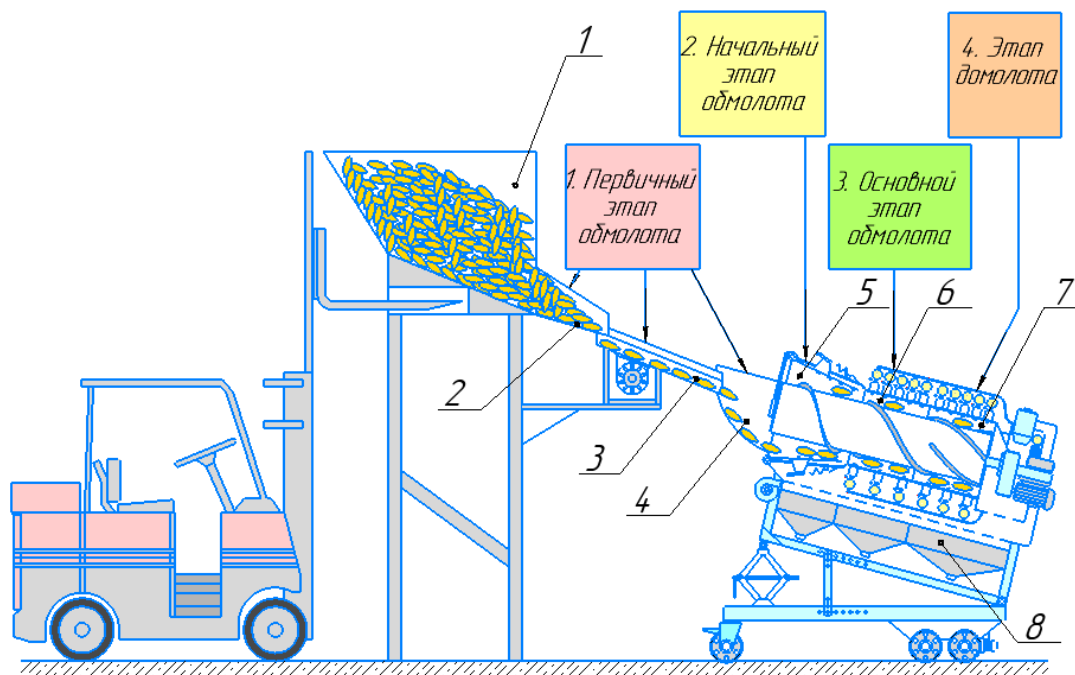
Для бионически обоснованного профиля эмпирические коэффициенты модели (9) принимают значения: $a = -0,1072$; $b = 0,2117$; $c = 9,8273$ и условного эквивалентного диаметра зерна кукурузы $d_{зк} = 8,2 \dots 8,8$ мм, среднеинтегральная угловая разница достигает $\Delta\varphi = 0,20 \dots 0,29$ рад ($11 \dots 17^\circ$). Для практических расчетов целесообразно принимать значение $\Delta\varphi = 14^\circ$.

Последующее 3D-моделирование контакта бионически-обоснованного фасонного шипа и модели защитной плодовой оболочки зерна кукурузы, выполненных в натуральных размерах, а также проведенная аналитическая оценка, показали равенство выдавленных в оболочке объемов при увеличении площади контакта фасонного шипа на 65,7%. Глубина проникновения в оболочку принята $[l_{об}] = 0,45$ мм. При таком проникновении в процессе удара зерно ведет себя на грани прочностных свойств (по данным Н.Ф. Рожковского).

Предложенные технические решения позволили на основании вышеописанной модели функционирования разработать для одного канала

МТСО конструктивно-технологическую схему (КТС) комплекта технических средств поэтапного обмолота початков семенной кукурузы (рисунок 11).

Комплект работает следующим образом. Початки из защитного контейнера сплошной насыпью самотёком выходят сквозь регулируемое по высоте окно, затем насыпь распределяется по откидному лотку и уменьшается по высоте, после чего пересыпается на многоручьевой ОДЗА. Здесь посредством угла наклона ручьев и их вибрации обеспечивается ориентирование початков параллельно оси ротора и укладка насыпи в один слой. Сориентированные початки сходят в загрузочный лоток МСУ, откуда захватываются ротором.



1 – защитный контейнер; 2 – откидной лоток контейнера; 3 – ОДЗА; 4 – загрузочный лоток МСУ; 5 – камера МСУ для выполнения начального этапа обмолота; 6 – камера МСУ для выполнения основного этапа обмолота; 7 – камера МСУ для выполнения этапа домолота; 8 – секционный бункер МСУ

Рисунок 11 – КТС комплекта технических средств поэтапного обмолота кукурузы

Все вышперечисленное отнесено к первичному этапу обмолота. Войдя в рабочий зазор СРД, осуществляется начальный обмолот посредством адаптивных подпружиненных участков с шипами. Здесь нарушается целостность зерновой структуры початка. Далее в основном этапе обмолота и при домолоте початки контактируют с независимыми фасонными шипами, прижатыми пневматическими подушками с гибким дном.

В соответствии с инвариантностью принципов построения биологических прототипов соотношение длин секций деки в зонах начального, основного этапа обмолота и домолота соответствует $W_{жк} = 1,29$ и с учетом размера початков составляет $470 \times 650 \times 300$ мм, при максимальном диаметре навивки ротора не более 400 мм. В результате реализуется адаптивность действия каждого шипа и минимизируются повреждения зерна.

Производительность комплекта ограничивается скоростью удара початком о рабочую поверхность шипа в МСУ (окружной скоростью ротора), при которой

сила удара приводит к границе прочностных свойств зерна. В свою очередь скорость удара определяет скорость осевого перемещения початков в МСУ.

На основании уточнения и дополнения выражений И.Ф. Василенко и И.Н. Гурова определена скорость осевого перемещения початков на этапе основного обмолота в аксиально-роторном МСУ предложенной конструкции:

$$v_{оп} = \frac{\xi_{\Pi} \cdot \cos \psi}{(1 - k_e) \cdot \cos \Delta \varphi} \sqrt{\frac{2 \cdot \zeta \cdot (F_y^{n1} \cdot [h] + F_y^{n1} \cdot [l_{об}] + F_y^{r1} \cdot l_z \cdot \operatorname{tg} [\varphi] + A_{кнз})}{m_{\Pi}}}, \quad (10)$$

где ξ_{Π} – эмпирический коэффициент проскальзывания початка вдоль винтовой лопасти ротора, $\xi_{\Pi} = 0,7 \dots 0,9$; ψ – угол подъема винтовой лопасти ротора (определяемый на основании исследований И.Н. Гурова), град; k_e – коэффициент восстановления зерна кукурузы (определяемый на основании исследований И.А. Петуниной); ζ – поправка на среднеинтегральное значение допустимых перемещений $\zeta = 0,85 \dots 0,95$; F_y^{n1}, F_y^{r1} – нормальная и касательная составляющая силы удара зерном в початке о шип, Н; l_z – высота зерна; $A_{кнз}$ – работа, расходуемая на колебание початка и зерна в нем, Дж; m_{Π} – массовая характеристика системы ротор-початок приведенная к точке соударения, Нс²/м (определяемый на основании исследований Курасова В.С).

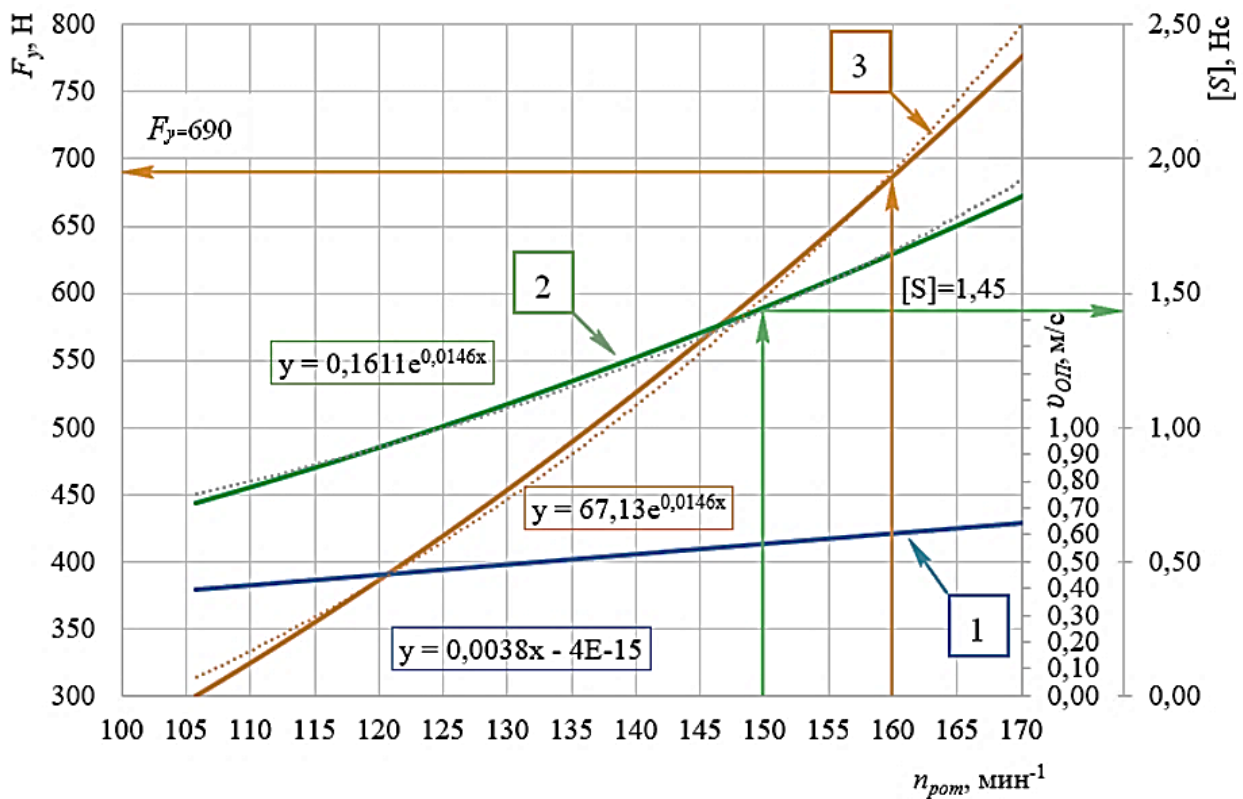
Работа, расходуемая на колебание початка в целом и не отделившегося после удара зерна, определяется выражением:

$$A_{кнз} = 2F_y^{n1} \cdot e^{-pT_{y\delta}} \cdot (\Delta_{кк} \cdot B_{кк} + \Delta_{кз} \cdot B_{кз}) \quad (11)$$

где p – коэффициент затухания колебаний; $T_{y\delta}$ – время удара зерном в початке о шип, $T_{y\delta} = 0,0019 \dots 0,0035$ с (принято на основании исследований М.Ф. Рожковского); $\Delta_{кк}$ – амплитуда колебаний початка, $\Delta_{кк} \leq [h]$; $\Delta_{кз}$ – амплитуда колебаний зерна в початке после удара, $\Delta_{кз} \leq [l_{об}]$; $B_{кк}$ и $B_{кз}$ – коэффициенты, учитывающие влияние частоты ударов по початку и механических свойств зерна на амплитуду затухающих колебаний початка и зерна в нем, соответственно.

При времени релаксации оболочки зерна кукурузы равном $10T_{y\delta}$ (принято на основании исследований М.Ф. Рожковского) работа на колебания не превышает 10% от работы на деформацию початка при обмолоте.

Допустимое значение обмолачивающего силового воздействия на зерно в початке кукурузы находится в пределах 300...700 Н (по данным И.Н. Гурова, В.С. Курасова, И.А. Петуниной, Е.В. Труфляка, Н.Ф. Рожковского, Н.А. Бобрикова и др.). В данном интервале силового воздействия теоретически установлен рациональный скоростной режим обмолота, который достигается при частоте вращения ротора $n_{ром} = 140 \dots 170$ мин⁻¹, при этом скорость осевого перемещения початков в МСУ составляет 0,53...0,64 м/с (рисунок 12), а производительность МСУ на этапе основного обмолота, подобно винтовой транспортирующей системе составляет 3,07...3,88 т/ч.



— — теоретическая зависимость; — аппроксимационная кривая;

- 1 – скорость осевого перемещения початков в секции основного обмолота МСУ;
 2 – ударный импульс; 3 – ударное силовое воздействие шипами по оболочке зерна

Рисунок 12 – Зависимость скорости осевого перемещения початков и величины ударного силового воздействия шипами по защитной плодовой оболочке зерна от частоты вращения ротора

Согласно теории, разработанной В.С. Курасовым, мощность, затраченная на обмолот, является суммой мощности, расходуемой на перемещение початков и их деформацию. Тогда для поэтапного обмолота можно записать выражение:

$$N_{ОБМ} = N_{Э12} + N_{трЭ2} + N_{трЭ3} + N_{трЭ4} + N_{дефЭ}, \quad (12)$$

где $N_{Э12}$ – мощность, затраченная на привод вибратора ОДЗА, кВт; $N_{трЭ2}$ – мощность, расходуемая на преодоление обмолачивающих сил трения в рабочей камере СРД на начальном этапе обмолота, кВт; $N_{трЭ3}$ – мощность, расходуемая на преодоление обмолачивающих сил трения в рабочей камере СРД на основном этапе обмолота, кВт; $N_{трЭ4}$ – мощность, расходуемая на преодоление обмолачивающих сил трения в рабочей камере СРД на этапе домолота, кВт; $N_{дефЭ}$ – мощность, расходуемая на необходимую для обмолота деформацию початка ударным воздействием в рабочей камере СРД, кВт.

Мощность, затраченная на вибрацию ОДЗА, определяется с учетом обеспечения требуемого значения вынуждающей силы вибропривода:

$$N_{Э12} = 10^{-3} \cdot \frac{F_{ВВ} \cdot v_{ОДЗА}}{\eta}, \quad (13)$$

где $F_{BB} = m_{\Sigma} \cdot e_{\delta} \cdot \omega_{\delta}^2$ – необходимая для стабильной вибрации ОДЗА вынуждающая сила вибропривода, Н; m_{Σ} – масса дебаланса, кг; e_{δ} – расстояние от центра вращения до центра масс дебаланса, м; ω_{δ} – угловая скорость вращения дебаланса, с^{-1} ; $v_{\text{ОДЗА}}$ – окружная скорость приводного механизма ОДЗА, м/с; η – КПД привода.

Мощность, расходуемая на преодоление обмолачивающих сил трения на начальном этапе обмолота, определяется с учетом конструкции деки:

$$N_{\text{мр}\Sigma 2} = 10^{-3} \cdot Z_{\text{ПВД}} \cdot F_{\text{ПВД}}^T \cdot f_{\delta 3} \cdot v_{\text{ОП}}, \quad (14)$$

где $Z_{\text{ПВД}}$ – количество подвижных подпружиненных участков деки с шипами, штук; $F_{\text{ПВД}}^T$ – нормальная составляющая сосредоточенной силы прижатия единичного початка со стороны подвижных подпружиненных участков деки с шипами, Н; $f_{\delta 3}$ – коэффициент трения скольжения зерна кукурузы по стали.

Мощность, расходуемая на преодоление обмолачивающих сил трения в рабочей камере СРД на основном этапе обмолота, выражается формулой:

$$N_{\text{мр}\Sigma 3} = 10^{-3} \cdot Z_{\text{осн}}^{\text{ши}} \cdot F_{\text{ППб}}^T \cdot \left(\frac{f_{\delta 3} + f_{\delta c}}{2} \right) \cdot v_{\text{ОП}}, \quad (15)$$

где $Z_{\text{осн}}^{\text{ши}}$ – количество одновременно задействованных независимых фасонных шипов пневматических подушек деки в зоне основного обмолота, штук; $F_{\text{ППб}}^T$ – сила прижатия единичного початка одним независимым фасонным шипом пневмоподушки в зоне основного обмолота, Н; $f_{\delta c}$ – коэффициент трения скольжения стержня початка кукурузы по стали.

Мощность, расходуемая на преодоление обмолачивающих сил трения в рабочей камере СРД на этапе домолота, выражается формулой:

$$N_{\text{мр}\Sigma 4} = 10^{-3} \cdot Z_{\text{дом}}^{\text{ши}} \cdot F_{\text{ППм}}^T \cdot f_{\delta c} \cdot v_{\text{ОП}}, \quad (16)$$

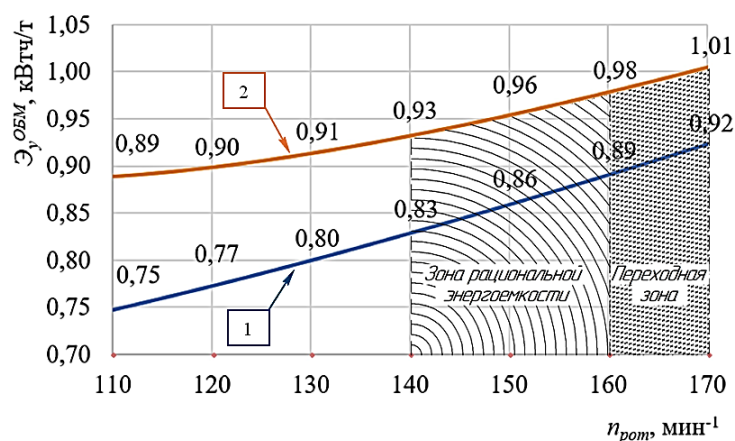
где $Z_{\text{дом}}^{\text{ши}}$ – количество одновременно задействованных независимых фасонных шипов пневматических подушек деки в зоне домолота, штук; $F_{\text{ППм}}^T$ – сила прижатия единичного початка одним независимым фасонным шипом пневмоподушки в зоне домолота, Н.

Мощность, расходуемая на необходимую для обмолота деформацию початка посредством ударного воздействия в рабочей камере СРД.

$$N_{\text{деф}\Sigma} = 10^{-3} \cdot Z_{\Sigma} \cdot \frac{\left(F_y^{n_1} \cdot [l_{\text{об}}] + F_y^{n_1} \cdot [h] + F_y^{r_1} \cdot l_3 \cdot \text{tg}[\varphi] \right)}{T_{\text{уд}}}, \quad (17)$$

где Z_{Σ} – количество этапов обмолота, осуществляемых в МСУ, шт.

На основании вышеизложенного, определена полная функция энергоемкости процесса с учетом и без учета первичного этапа обмолота, графическая интерпретация которой приведена на рисунке 13.



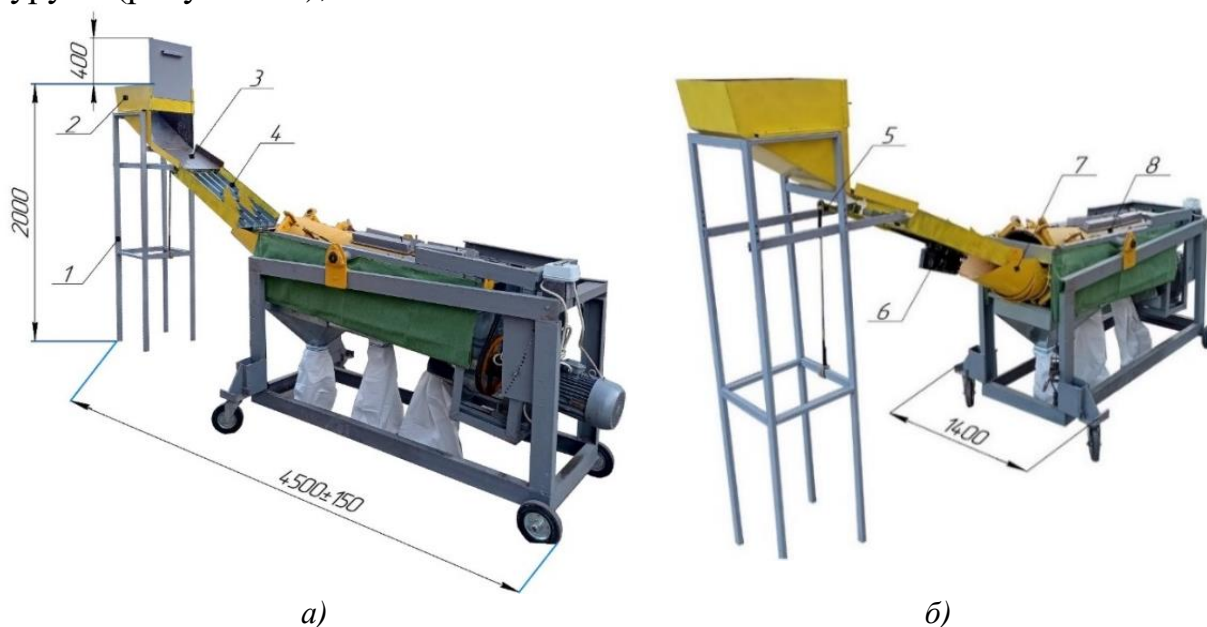
1 – без учета первичного этапа обмолота; 2 – с учетом первичного этапа обмолота

Рисунок 13 – Энергоёмкость процесса поэтапного обмолота початков семенной кукурузы

При частоте вращения ротора $140...160 \text{ мин}^{-1}$ расположена зона рациональной энергоёмкости, где производительность МСУ максимальна, а повреждения зерна сведены к минимуму. При частоте вращения ротора $160...170 \text{ мин}^{-1}$ начинает преодолеваться граница прочностных свойств защитной плодовой оболочки зерна кукурузы.

В четвертой главе «Программа и методология экспериментальных исследований» разработана программа экспериментальных исследований, осуществляемая в соответствии со следующими этапами:

- разработка и изготовление полномасштабного экспериментального комплекта технических средств для поэтапного обмолота початков семенной кукурузы (рисунок 14);



а) – вид сбоку; *б*) – вид спереди; 1 – платформа; 2 – защитный контейнер с выгрузным окном и заслонкой; 3 – откидной лоток защитного контейнера; 4 – ОДЗА; 5 – механизм изменения наклона ОДЗА; 6 – вибрационный привод ОДЗА; 7 – загрузочная горловина МСУ; 8 – аксиально-роторное МСУ с пневмоадаптивной декой

Рисунок 14 – Экспериментальный комплект технических средств для поэтапного обмолота початков семенной кукурузы

- подбор комплекта контрольно-измерительного оборудования;
- проведение лабораторных поисковых однофакторных экспериментов с последующим анализом и статистической обработкой результатов;
- проведение лабораторных многофакторных экспериментов с последующим анализом и статистической обработкой результатов;
- проверка в условиях сертифицированной семенной лаборатории показателя всхожести зерна, обмолоченного в экспериментальном комплекте технических средств поэтапного обмолота початков семенной кукурузы на оптимальных режимах работы ОДЗА и МСУ.

В пятой главе «Результаты экспериментальных исследований» приведены результаты: реализации поисковых однофакторных экспериментов и интервалы рациональных значений конструктивно-технологических параметров комплекта технических средств для поэтапного обмолота, многофакторных экспериментов и оптимальные значения наиболее значимых параметров МСУ.

Поисковыми однофакторными экспериментами установлены интервалы рациональных значений: подачи початков на обмолот – 0,9...1,1 кг/с; частоты вращения ротора – 150...170 мин⁻¹; количества фасонных шипов в зоне основного этапа обмолота – 124...136 шт.; избыточного давления в пневмоподушках деки – 0,4...0,5 атм. при рациональной толщине резиновой подошвы пневмоподушек – 3 мм.

На основании аналитических исследований и наблюдений при поисковых экспериментах был установлен ряд факторов на фиксированном рациональном уровне: угол наклона СРД относительно горизонта – 12°; жесткость пружин шипованных участков деки в зоне начального этапа обмолота – 3,76 Н/мм; предварительное натяжение пружин – 10 мм; количество шипов каждого из четырех участков деки в зоне начального этапа обмолота – 15 шт.; суммарное количество продольных пневмоподушек на верхней части деки в зонах основного этапа обмолота и домолота – 8 шт.; суммарное количество поперечных пневмоподушек на нижней части деки в зонах основного этапа обмолота и домолота – 7 шт.; количество фасонных шипов, прижатых подошвой одной продольной и поперечной пневмоподушки – 8...16 шт. и 12...23 шт., соответственно.

Изменение зазора между ротором с диаметром 320 мм и декой от входа в зоны начального, основного этапа обмолота и домолота к выходу из них – 80...45 мм, 45...30 мм и 30...17 мм, соответственно.

Ширина прорезей деки для отвода обмолоченного зерна – 17...22 мм. Результаты поискового исследования количества отделенного зерна от початков на разных этапах обмолота выражены диаграммой (рисунок 15).

При вышеприведенных рациональных значениях факторов определены показатели дробления, недомолота и схода свободным зерном на уровне рекомендуемых ограничений (рисунок 16).



Рисунок 15 – Количество отделенного зерна от початков на разных этапах обмолота

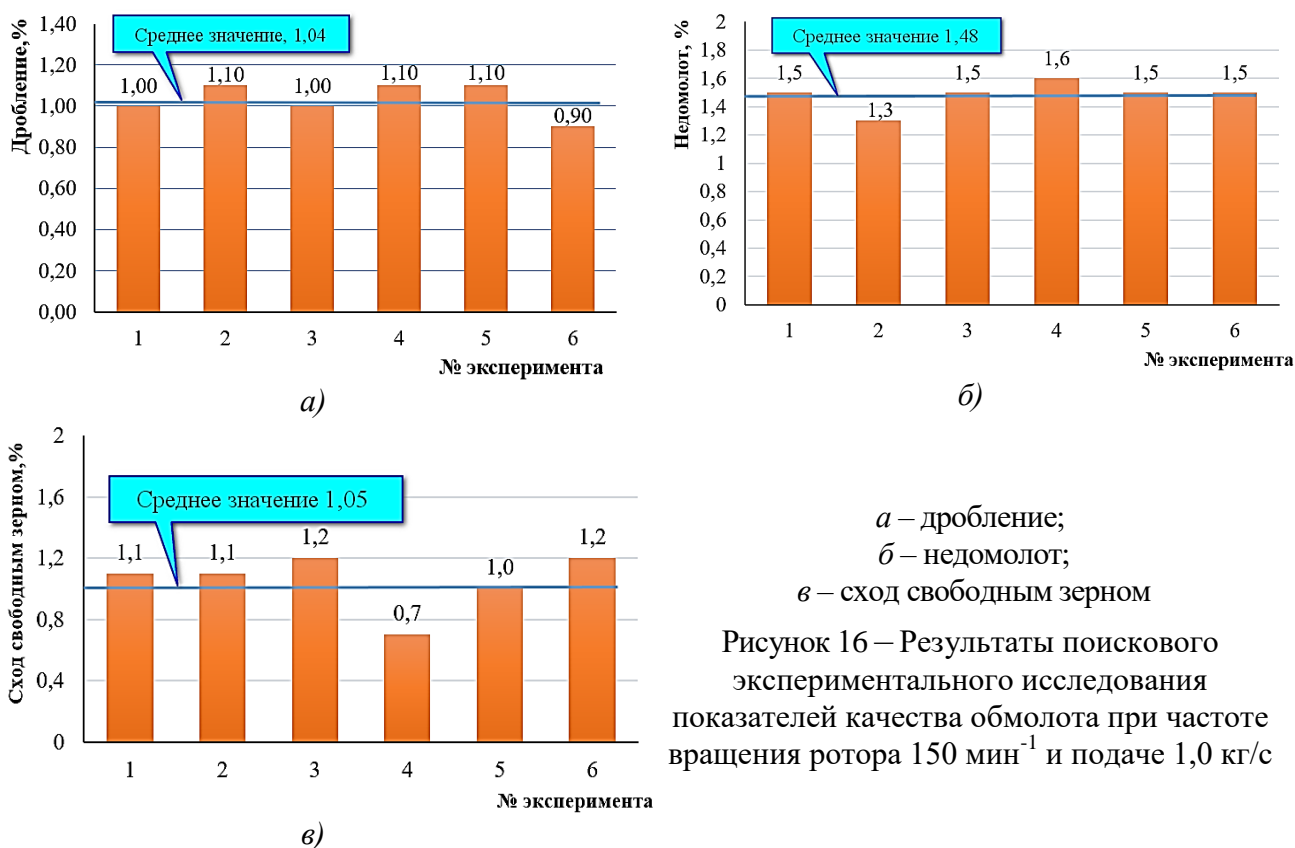


Рисунок 16 – Результаты поискового экспериментального исследования показателей качества обмолота при частоте вращения ротора 150 мин^{-1} и подаче $1,0 \text{ кг/с}$

На основании результатов поисковых исследований реализованы два трехфакторных эксперимента по плану Бокса-Бенкина. В качестве критериев оптимизации выбраны энергоёмкость процесса обмолота Y_{opt1} и показатель макро- и микроповреждений Y_{opt2} . Для Y_{opt1} факторы варьировались в следующих пределах: частота вращения ротора $X_1 = 150, 160, 170 \text{ мин}^{-1}$; подача $X_2 = 0,9, 1,0, 1,1 \text{ кг/с}$; количество фасонных шипов в зоне основного этапа обмолота $X_3 = 124, 130, 136 \text{ шт.}$. Для Y_{opt2} факторы варьировались в следующих пределах: предварительное натяжение пружин в участках деки на начальном этапе обмолота $X_4 = 5, 10, 15 \text{ мм}$; избыточное давление в пневмоподушках деки на этапах основного обмолота и домолота $X_5 = 0,3, 0,4, 0,5 \text{ атм.}$; угол наклона СРД относительно горизонта $X_6 = 9, 12, 15^\circ$.

В результате получены уравнения регрессии в раскодированном виде:

$$Y_{opt1} = 32,59 - 0,21 \cdot n_{рот} + 0,001 \cdot n_{рот}^2 - 2,40 \cdot q_{Э2}^n + 2,26 \cdot (q_{Э2}^n)^2 - 0,22 \cdot Z_{осн}^u + 0,001 \cdot (Z_{осн}^u)^2 + 0,013 \cdot n_{рот} \cdot q_{Э2}^n + 0,001 \cdot n_{рот} \cdot Z_{осн}^u - 0,03 \cdot q_{Э2}^n \cdot Z_{осн}^u, \quad (18)$$

$$Y_{opt2} = 110,92 - 3,46 \cdot L_{нач}^{np} + 0,25 \cdot (L_{нач}^{np})^2 - 255,83 \cdot p_{пн}^{атм} + 304,17 \cdot (p_{пн}^{атм})^2 - 6,82 \cdot \gamma_{СРД} + 0,20 \cdot \gamma_{СРД}^2 - 1,00 \cdot L_{нач}^{np} \cdot p_{пн}^{атм} + 0,017 \cdot L_{нач}^{np} \cdot \gamma_{СРД} + 3,34 \cdot p_{пн}^{атм} \cdot \gamma_{СРД}. \quad (19)$$

Анализ значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента и проверка моделей по критерию Фишера подтверждает адекватность уравнений регрессии для описания изучаемых процессов. Графоаналитический анализ двумерных сечений поверхностей отклика (рисунки 17 и 18) позволил получить значения оптимальных конструктивно-технологических параметров (таблица 2).

Таблица 2 – Оптимальные значения конструктивно-технологических параметров комплекта технических средств для поэтапного обмолота

Наименование	Условное обозначение	Единица измерения	Значение
Частота вращения ротора МСУ	$n_{рот}$	мин ⁻¹	159
Подача початков ОДЗА	$q_{Э2}^n$	кг/с	0,954
Количество фасонных шипов в зоне основного этапа обмолота	$Z_{осн}^u$	шт.	130
Предварительное натяжение пружин в участках деки на начальном этапе обмолота	$L_{нач}^{np}$	мм	7
Избыточное давление в пневмоподушках деки на этапах основного обмолота и домолота	$p_{пн}^{атм}$	атм.	0,4
Угол наклона СРД относительно горизонта	$\gamma_{СРД}$	град	14

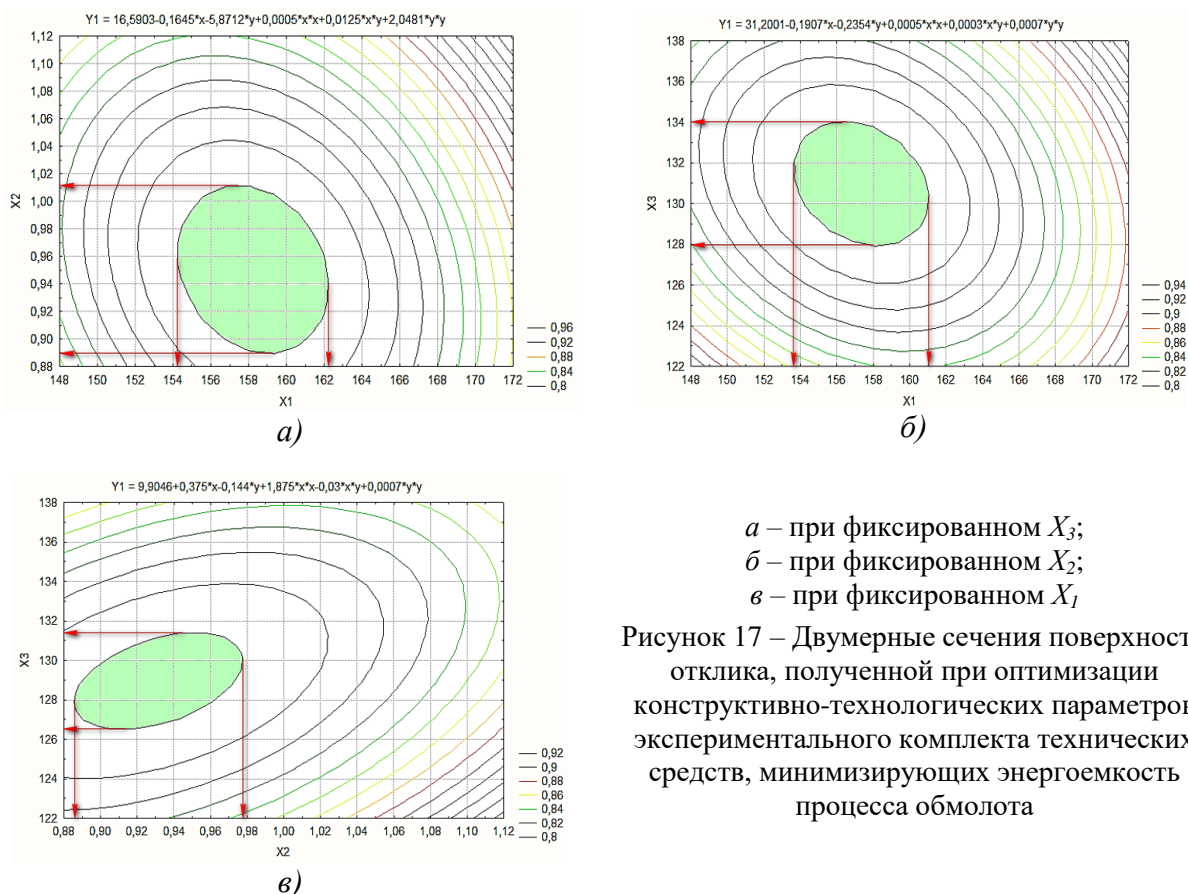


Рисунок 17 – Двумерные сечения поверхности отклика, полученной при оптимизации конструктивно-технологических параметров экспериментального комплекта технических средств, минимизирующих энергоёмкость процесса обмолота

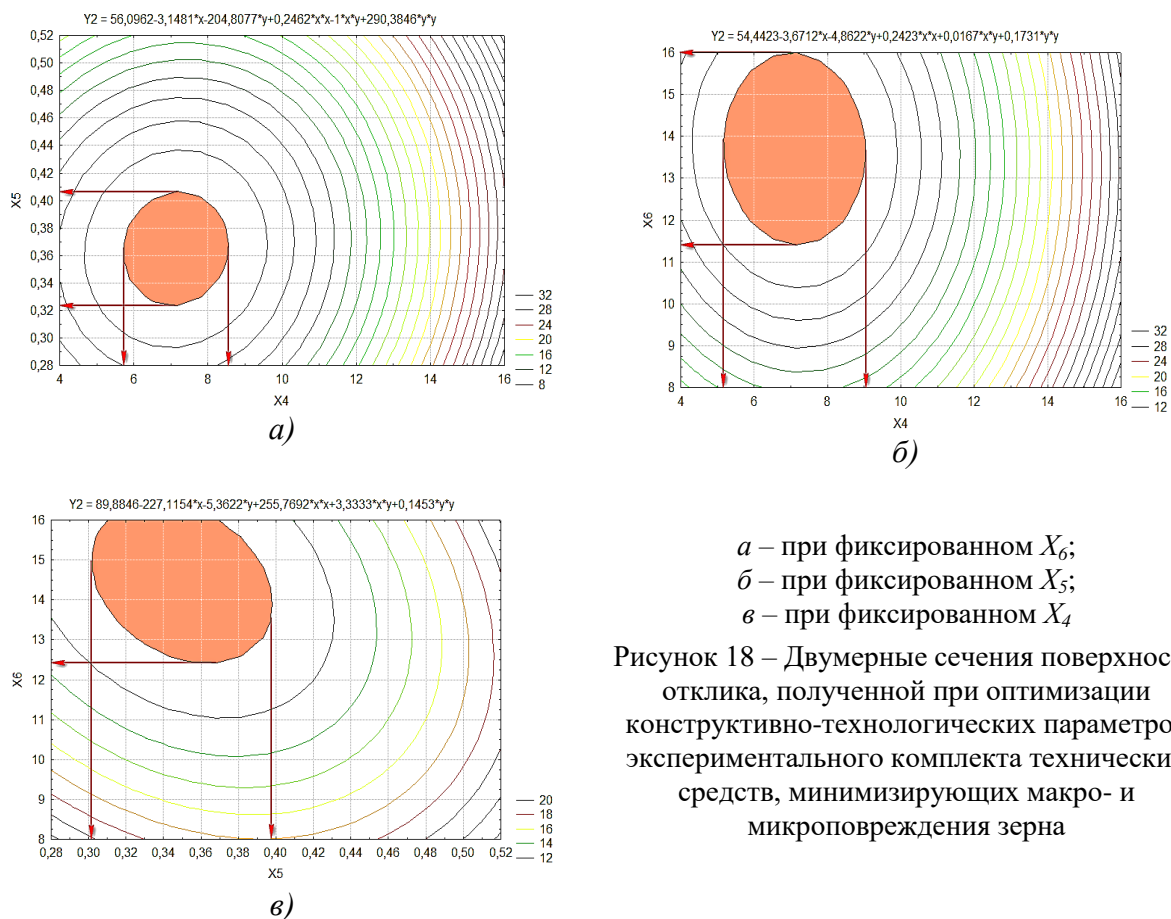


Рисунок 18 – Двумерные сечения поверхности отклика, полученной при оптимизации конструктивно-технологических параметров экспериментального комплекта технических средств, минимизирующих макро- и микроповреждения зерна

Экспериментально установлено, что наиболее характерные макро- и микроповреждения зерна, полученные в предложенном комплекте технических средств для поэтапного обмолота в процентном соотношении, составляют: открытые макротрещины, уходящие вглубь эндосперма – 0,3%; микроповреждение участка защитной плодовой оболочки зерна – 7,8%; макроповреждение участка защитной плодовой оболочки зерна – 0,6%; микроповреждение тканей зерна в области зародыша – 0,2%; макроповреждение тканей зерна в области зародыша – 0,1%; скрытые (внутренние) трещины, уходящие вглубь эндосперма – отсутствуют.

Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что при оптимальном сочетании факторов достигается минимальная энергоемкость процесса обмолота 0,765 кВт/т, при этом количество макро- и микроповреждений зерна при обмолоте не превышает 9%, показатель дробления зерна – 1,5%, недомолот – 1,5%, а сход свободным зерном – 1%. Результаты экспериментальных исследований энергоемкости процесса подтверждают данные, полученные теоретически.

Для поддержания давления в пневмоподушках МСУ на заданном оптимальном уровне была разработана, сконструирована и испытана система цифрового управления, а также разработан программный код контроллера и таблица рекомендуемых давлений для разных подвидов кукурузы.

В условиях сертифицированной лаборатории отдела семенного надзора и контроля №7 «Перевальская лаборатория» изучена всхожесть и энергия прорастания семенного зерна, обмолоченного в разработанном комплекте

технических средств. Установлено, что энергия прорастания обмолоченного, не инкрустированного зерна 90%, а всхожесть – 92%, это указывает на обеспечение целостности зародыша и тканей зерна вблизи его расположения, что сохраняет весь потенциал урожайности кукурузы.

В шестой главе «Предложения производству и технико-экономический анализ технологии и комплекта технических средств для обмолота початков семенной кукурузы» предложен вариативный ряд рекомендуемых марок машин для комплектации завода по переработке початков кукурузы на семенное зерно и перечень мероприятий по минимизации макро- и микроповреждений семенного зерна (рисунок 19): 1, 2 – уборка, транспортировка и взвешивание початков в листовой обертке; 3 – разгрузка в приемник-дозатор с обрезиненными бортами; 4 и 6 – загрузка (разгрузка) сапетки ленточным конвейером с обрезиненными бортами и гибкими перегородками; 5 – кратковременное вентилируемое хранение початков в листовой обертке; 7 – двухстадийная очистка от листовой обертки; 8 – автоматизированная сортировка початков; 9 – щадящая загрузка вентилируемых защитных контейнеров; 10 – двухстадийная сушка початков в контейнерах; 11 – перемещение початков в сушилку и на обмолот в контейнерах; 12, 13 – щадящий забор початков из контейнеров и их поэтапный обмолот с разделением зерна на фракции из носка, середины и комля; 14 – пневмозагрузка трех групп передвижных контейнеров; 15 – аспирация с забором зерна из передвижных контейнеров; 16 – перегрузочная операция щадящей норией; 17 – очистка зерна с разделением на легковесную и кондиционную фракцию посредством рельефных полимерных решет; 18 – загрузка сменных контейнеров для легковесного и кондиционного зерна; 19 – щадящая инкрустация зерна; 20 – загрузка контейнеров для зерна готового к посеву; 21 – затаривание зерна в эластичный Big-bag.

Разработана методика проектирования комплектов технических средств для поэтапного обмолота початков семенной кукурузы, включающая: накопление информации и формирование вариативных рядов данных при изучении механико-технологических свойств кукурузы различных подвидов и анализе эмпирических зависимостей; согласованное принципами поточности проектирование конструктивных схем защитного контейнера, многоручьевого ОДЗА и аксиально-роторного МСУ; разработку эскизов технических средств и компоновку их в единый комплект в САПР; обоснование средствами САПР типоразмерных рядов и определение масштабного преобразования комплектов; создание рабочей схемы для последующего 3D-моделирования.

Для технико-экономического анализа предложенного комплекта технических средств в качестве объекта сравнения принята перспективная линия компании Serbia Product, которая для работы с одним модулем сушилки укомплектована питателем-дозатором ДК-4.000 и двумя конвейерами ТГ.1.000, подающими початки в накопительный бункер МСУ марки MSH-25. Предложенный комплект (рисунок 11) анализировался в трехканальном варианте с учетом стоимости 60 защитных контейнеров для загрузки одного модуля сушилки и самоходного погрузчика малого класса.

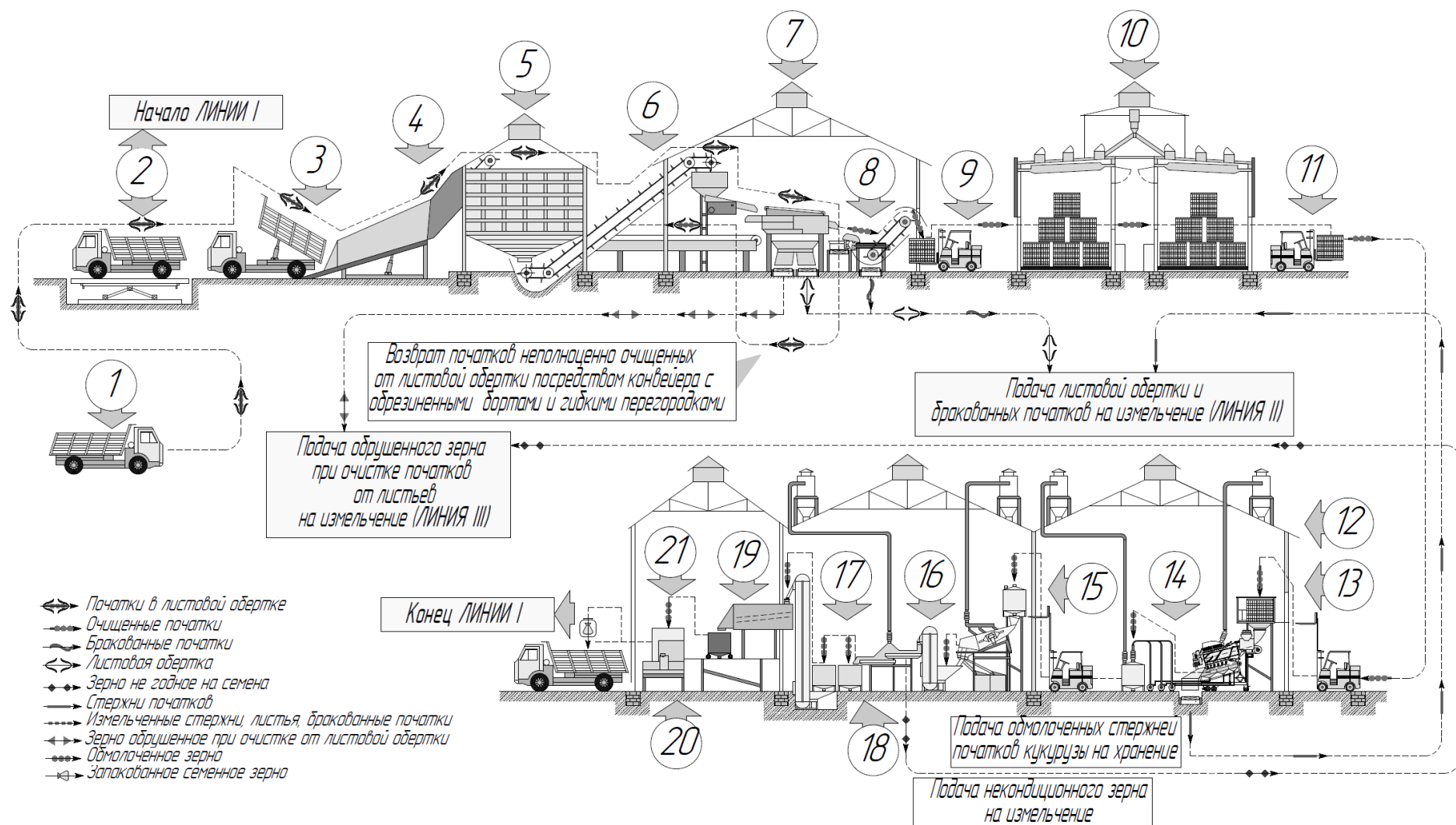


Рисунок 19 – Схема технологической линии и рекомендуемые мероприятия, минимизирующие макро- и микроповреждения зерна при послеуборочной обработке початков и зерна семенной кукурузы

Дополнительными исходными данными являлся объем переработки початков – 5500 тонн; стоимость линии Serbia Product – 5,2 млн. руб.; предложенного комплекта – 3,6 млн. руб.; энергоемкость процесса перемещения початков из сушилки и последующего обмолота составляет для линии Serbia Product – 2,0 кВтч/т, для предложенного комплекта – 1,46 кВтч/т. Экономический эффект достигается за счет снижения удельных затрат денежных средств и дополнительной прибыли от снижения потерь семенного материала при транспортировке початков в контейнерах. Экономический эффект составляет 1,77 млн. руб., а срок окупаемости 2,0 года.

Осуществлен анализ экономической эффективности предложенных технологических решений в Белгородской области. В качестве расчетного периода принят 2019 и 2020 год. Минимизация макро- и микроповреждений семенного зерна при поэтапном обмолоте в предложенной технологии позволяет получить прирост урожайности кукурузы не менее 5 ц/га (по данным И.Г. Строна, А.Э. Панфилова, А.М. Гречанюка и др.). Стоимостная оценка результатов осуществления мероприятий, повышающих эффективность технологии за расчетный период, выраженная через дополнительную прибыль от прироста урожайности, составляет минимум 2,05 млрд. рублей. Стоимостная оценка затрат на осуществление предложенных мероприятий за расчетный период, выраженная через издержки при производстве и обработке семенного зерна, составляет 12,8 млн. рублей. Разница стоимостных оценок показывает экономический эффект от применения предложенных технологических решений и составляет 2,041 млрд рублей за расчетный период или 1,020 млрд рублей в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально исследованы механико-технологические свойства и установлено: усредненное значение динамического коэффициента трения скольжения зерна различных подвидов кукурузы по стали – $f_{\partial z} = 0,31$ и стержня початка без зерна – $f_{\partial z} = 0,36$; угол естественного откоса початков кукурузы – $\varphi_{EO} = 31,2^\circ$; коэффициент Пуассона защитной плодовой оболочки зерна – $\nu = 0,356$; модуль Юнга зубовидной кукурузы – 78...127 МПа, кремнистой – 98...125 МПа, сахарной – 97...124 МПа, лопающейся – 127...169 МПа; усредненное значение усилие разрыва зерновой ножки в области носка, середины и комля початков для различных подвидов кукурузы – 11,67; 19,71 и 6,81 Н.

2. Технология переработки початков кукурузы на семенное зерно состоит из обработки початков и обработки обмолоченного зерна. Обмолот — точка перехода от одной фазы переработки к другой, в котором повреждается до 30% зерна. Минимизация макро- и микроповреждений зерна при обмолоте обеспечивается перемещением початков в защитных вентилируемых контейнерах, разгрузкой контейнеров без опрокидывания, ориентированием початков и их дозированной подачей многоручьевым ОДЗА, адаптивным силовым воздействием аксиально-роторного МСУ с многосекционной декой. Данные технологические решения позволяют снизить количество поврежденного зерна при обмолоте в 2...3 раза.

3. Минимизация макро- и микроповреждений зерна реализуется способом поэтапного обмолота, который включает этап первичного, начального, основного обмолота и домолота. Первичный этап осуществляется в процессе разгрузки початков из защитного вентилируемого контейнера, перемещения по откидному лотку, движения по рабочему органу многоручьевого ОДЗА, а также подачи параллельно оси ротора в приемный лоток МСУ. Начальный этап реализуется в первой секции аксиально-роторного МСУ при взаимодействии с разрезным шипованным конусом деки, выполненным в виде четырех подвижных подпружиненных участков. Основной этап обмолота протекает во второй удлиненной секции МСУ под действием двухзаходной навивки ротора и шипованной пневматической деки. Домолот реализуется в третьей укороченной секции МСУ под действием четырехзаходной навивки ротора и шипованной пневматической деки. На первичном этапе обмолота отделяется до 3%, на начальном – до 17%, на основном – до 69,5% и при домолоте до 8% зерна. Способ поэтапного обмолота осуществляется комплектом технических средств, состоящим из защитного контейнера, многоручьевого ОДЗА и аксиально-роторного МСУ.

4. Теоретически обоснованы основные конструктивные параметры технических средств комплекта. Для защитного вентилируемого контейнера: длина, ширина и высота находится в пределах $A_K = 800 \dots 1600$, $B_K = 400 \dots 800$, $H_K = 600 \dots 1000$ мм; угол наклона днища – $27 \dots 35^\circ$; высота выгрузного окна – $250 \dots 300$ мм; длина откидного лотка не менее 600 мм, его максимальный угол установки – 35° ; диаметр перфораций в стенках контейнера – $4,0 \dots 5,0$ мм. Для многоручьевого ОДЗА, предназначенного для работы с контейнером вышеописанных размеров: количество ручьев – $5 \dots 9$; ширина ручья – $80 \dots 100$ мм и его глубина 60 мм; длина ручья не менее 1600 мм; количество поворотных мысов – не менее 4; угол наклона – $20 \dots 35^\circ$. Для аксиально-роторного МСУ: длина секции деки в зонах начального, основного этапа обмолота и домолота – $470 \times 650 \times 300$ мм, при максимальном диаметре навивки ротора не более 400 мм.; ширина прорезей деки для отвода обмолоченного зерна – $17 \dots 22$ мм; изменение зазора между ротором и декой от входа к выходу – $80 \dots 17$ мм; высота рабочей поверхности шипов – $8 \dots 12$ мм; базовый диаметр профиля шипов – $14 \dots 17$ мм. Разработанный комплект объединяется в МТСО с очередью не более трех контейнеров.

5. Определены оптимальные конструктивно-технологические параметры МСУ с адаптивными рабочими органами: частота вращения ротора – 159 мин^{-1} , подача – $0,95 \pm 0,01$ кг/с, количество фасонных шипов в зоне основного этапа обмолота – 130 шт., предварительное натяжение пружин в участках деки на начальном этапе обмолота – 7 ± 1 мм, избыточное давление в пневмоподушках деки на этапах основного обмолота и домолота – 0,4 атм., угол наклона СРД относительно горизонта – 14° , обеспечивающие минимальные значения энергоемкости процесса обмолота и количества макро- и микроповреждений зерна.

6. Установлено, что энергоемкость процесса обмолота составляет 0,765 кВтч/т, а показатель макро- и микроповреждений не более 9% от массы обмолоченного зерна, при этом показатель дробления зерна – до 1,5%, недомолот – до 1,5%, а сход свободным зерном – до 1%. Зерно, обмолоченное в экспериментальном комплексе, обладает лабораторной всхожестью не ниже 92%.

7. Разработана методика проектирования комплектов технических средств для поэтапного обмолота початков семенной кукурузы, согласно которой осуществляется формирование перечня исходных данных при изучении механико-технологических свойств початков и зерна кукурузы различных подвидов и анализе эмпирических зависимостей и математических моделей; формирование вариативных рядов исходных данных; последовательное проектирование конструкций защитного контейнера, многоручьевого ОДЗА и аксиально-роторного МСУ с учетом требований поточности и непрерывности процесса; разработка эскизов технических средств и компоновка их в единый комплект. Методика проектирования позволяет средствами САПР создавать типоразмерный ряд комплекта с различной производительностью.

8. Технико-экономический анализ предложенных технических решений поэтапного обмолота початков семенной кукурузы в объеме 5500 тонн в сравнении с перспективным комплектом MSH-25 «Serbia Product» позволяет получить годовой экономический эффект 1,77 млн. руб., при сроке окупаемости капитальных вложений 2 года. Расчетное значение экономического эффекта от применения предложенных технологических решений по минимизации макро- и микроповреждений зерна при послеуборочной обработке данного объема початков семенной кукурузы для Белгородской области составляет не менее 1,020 млрд рублей в год.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Производителям сельскохозяйственной техники использовать разработанные конструкции технических средств системы ориентированной загрузки (RU196681, RU180093; UA85886; UA85889) и трехступенчатого аксиально-роторного МСУ (RU171115; RU207989; UA30366; UA18265), а также обоснованные рациональные параметры рабочих органов и режимы поэтапного обмолота. Производителям семенного зерна использовать предлагаемую компоновку и комплектацию завода для стационарной обработки початков и зерна семенной кукурузы и мероприятия по минимизации макро- и микроповреждений зерна.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дальнейшее развитие исследования в направлении разработки технологических и технических решений по минимизации макро- и микроповреждений семенного зерна кукурузы в поэтапных процессах послеуборочной обработки, в совокупности с селекционными мероприятиями, обеспечит достижение полного сохранения потенциала урожайности, находящегося на уровне 400 ц/га.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях,

рекомендованных перечнем ВАК при Минобрнауки России:

1. Бахарев, Д.Н. Теоретическое исследование контакта фасонного шипа и зерна кукурузы в молотильной камере / А.Г. Пастухов, Д.Н. Бахарев // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2018. – Вып.5. – С. 20-24.
2. Бахарев, Д.Н. Моделирование процесса работы ориентирующе-дозировочного устройства для початков сортовой и гибридной кукурузы / Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – Вып.4. – С. 6-13.
3. Бахарев, Д.Н. Пневматическая система дифференцированного обмолота кукурузы / А.Г. Пастухов, Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – Т. 13. №4. – С. 42-47.
4. Бахарев, Д.Н. Молотильно-сепарирующее устройство для початков сортовой и гибридной кукурузы / А.Г. Пастухов, Д.Н. Бахарев // Сельский механизатор. – 2019. – № 12. – С. 4-5.
5. Бахарев, Д.Н. Обобщенная задача и концепция теории обмолота сортовой и гибридной кукурузы / Д.Н. Бахарев // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2019. – № 3 (23). – С. 23-29.
6. Бахарев, Д.Н. Молотильно-сепарирующее устройство для первичного семеноводства кукурузы / А.Г. Пастухов, Д.Н. Бахарев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2020. – Т. 14. №1. – С. 34-39.
7. Бахарев, Д.Н. Результаты экспериментальных исследований качества отделения зерна от стержня при обмолоте сортовой и гибридной кукурузы аксиально-роторной молотилкой / Д.Н. Бахарев // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2020. – № 1 (25). – С. 38-44.
8. Бахарев, Д.Н. Прикладные аспекты волновой теории удара в теоретических исследованиях обмолота початков кукурузы / Д.Н. Бахарев // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2020. – № 2 (26). – С. 9-15.
9. Бахарев, Д.Н. Обоснование перспективной контейнерной технологии поточной обработки початков семенной кукурузы при стационарной механизации / Д.Н. Бахарев // Инновации в АПК: проблемы и перспективы, 2021. – № 1 (29). – С. 62-73.
10. Бахарев, Д.Н. Обобщенная оценка основных факторов при проектировании техники и технологий в агроинженерии / А.Г. Пастухов, Е.П. Тимашов, Д.Н. Бахарев // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2021. – № 1 (29). – С. 17-26.
11. Бахарев, Д.Н. Методика инженерного расчета комплекта технических средств для поэтапного обмолота початков семенной кукурузы / А.Г. Пастухов, Д.Н. Бахарев // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2021. – № 4 (32). – С. 61-72.

***В изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах
SCOPUS и Web of Science:***

12. Dmitriy Bakharev. The substantiation of deck parameters of the rotary threshing device / Dmitriy Bakharev, Alexander Pastukhov, Sergey Volvak, Olga Sharaya // Proceedings of 18th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development 2019» – Jelgava. Latvia, volume 18. – 2019 – pp. 481-486.
13. Bakharev, DN Differentiated threshing of seed corn with minimal grain crushing / AG Pastukhov, DN Bakharev, TV Parnikova // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 659 (2021) 012095.
14. Dmitriy Bakharev. Study of seed corn threshing process / Dmitriy Bakharev, Alexander Pastukhov, Sergey Volvak, Sergey Kovalev // Proceedings of 19th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development 2020» – Jelgava. Latvia, volume 19. – 2020 – pp. 1036-1041.
15. Dmitriy Bakharev. Methodology and results of experimental determination of corn grain elasticity modulus / Dmitriy Bakharev, Alexander Pastukhov, Sergey Volvak, Alexander Dobrickiy // Proceedings of 20th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development 2021» – Jelgava. Latvia, volume 20. – 2021 – pp. 92-97.

В монографиях:

16. Бахарев, Д.Н. Сортовая технология кукурузы: монография / С.И. Капустин, Н.В. Ковтун, Д.Н. Бахарев [и др.]. – Луганск: ЛНАУ, 2013. –196 с.
17. Бахарев, Д.Н. Бионические основы конструирования молотильно-сепарирующих систем для початков кукурузы: монография / Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак, А.Г. Пастухов. – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2018. – 168 с.
18. Бахарев, Д.Н. Проектирование и исследование технологических процессов животноводческих предприятий: монография / С.Ф. Вольвак, Д.Н. Бахарев, А.А. Добрицкий [и др.]. – Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2021. – 475 с.
19. Бахарев, Д.Н. Научные основы совершенствования технологии поточной обработки кукурузы в початках: монография / Д.Н. Бахарев, А.Г.Пастухов, С.Ф.Вольвак [и др.]. – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2021. – 188 с.
20. Бахарев, Д.Н. Разработка ресурсосберегающей технологии заводской обработки початков и зерна семенной кукурузы: научно-методические рекомендации / А.Г. Пастухов, Д.Н. Бахарев. – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2021. – 35 с.

***В патентах на полезные модели и свидетельства о государственной
регистрации программы для ЭВМ***

21. Аксиально-роторна молотарка качанів кукурудзи: пат. № 30366 Україна: МПК А01F11/00 (2006) / С.Ф. Вольвак, Д.М. Бахарев; заявник і патентовласник Луганський національний аграрний університет. – № u200111686; заявл. 22.10.2007; опубл. 25.02.2008. Бюл. № 11.- 6 с.

22. Пристрій для орієнтованої подачі качанів кукурудзи в молотарку: пат. №85886 Україна: МПК А01F11/00 (2013.01) / М.В. Брагінець, Д.М. Бахарев, О.О. Романенко; заявник і патентовласник Луганський національний аграрний університет. – № u201304591; заявл. 12.04.2013; опубл. 10.12.2013. Бюл. № 23.- 4 с.

23. Домолочуючий апарат молотарки кукурудзи: пат. № 86546 Україна: МПК А01F11/00 (2013.01) / М.В. Брагінець, Д.М. Бахарев, А.Є. Бурнукін; заявник і патентовласник Луганський національний аграрний університет. – № u201304614; заявл. 12.04.2013; опубл. 10.01.2014. Бюл. № 11.- 6 с.

24. Двоступеневий очищувач качанів кукурудзи від листової обгортки: пат. № 85889 Україна: МПК А01F11/00 (2013.01) / М.В. Брагінець, Д.М. Бахарев, О.В. Тіняков; заявник і патентовласник Луганський національний аграрний університет. – № u201304609; заявл. 12.04.2013; опубл. 10.12.2013. Бюл. № 23.- 3 с.

25. Молотильно-сепарирующее устройство с системой ориентированной подачи початков кукурузы на обмолот: пат. 171115 Рос. Федерация: МПК А01F11/06(2006.01) / С.Ф. Вольвак, Д.Н. Бахарев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. – № 2016147797; заявл. 06.12.2016; опубл. 22.05.2017. Бюл. № 15. – 9 с.

26. Ориентирующе-дозировующее устройство для початков кукурузы: пат. 180093 U1 RU Рос. Федерация: МПК А01F11/06(2006.01) / С.Ф. Вольвак, Д.Н. Бахарев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина. – №2018104350; заявл. 02.02.2018; опубл. 04.06.2018. Бюл. № 16. – 7 с.

27. Устройство поэтапного обмолота початков семенной кукурузы: пат. 196681 U1 RU Рос. Федерация: МПК А01F11/06(2006.01) / Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак, А.Г. Пастухов, В.А. Сафонов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина. – №2019142582; заявл. 16.12.2019; опубл. 11.03.2020. Бюл. № 8. – 6 с.

28. Аксиально-роторное домолочивающее устройство: пат. 207989 U1 RU Рос. Федерация: МПК А01F11/06(2006.01) / Д.Н. Бахарев, А.Г. Пастухов, С.Ф. Вольвак, А.Е. Бурнукин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина. – №2021129005; заявл. 04.10.2021; опубл. 29.11.2021. Бюл. № 34. – 4 с.

29. Прошивка контроллера «Arduino» для управления давлением в пневматических подушках деки молотильно-сепарирующего устройства: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2022611654 Рос. Федерация / Д.Н. Бахарев, А.Г. Пастухов, С.Ф. Вольвак, Р.В. Черников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина. – № 2022610341; заявл. 12.01.2022; опубл. 28.01.2022. Бюл. № 2. – 1 с.

***В материалах международных и всероссийских
научных конференций:***

30. Бахарев, Д.Н. Аналитические исследования устройств, способных ориентировать початки кукурузы в пространстве / Н.В. Брагинец, А.Д. Буянов, Д.Н. Бахарев и др. // Научный вестник ЛНАУ. – Луганск: ЛНАУ, 2012. – № 41 – С. 23-31.

31. Бахарев, Д.Н. Обоснование толщины резиновой подошвы пневмоподушки активной деки домолачивающего аппарата для початков кукурузы / Брагинец Н.В., Бахарев Д.Н., Пазин В.В. и др. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2014. – № 144. – С. 217-227.

32. Бахарев, Д.Н. Бионические основы разработки и конструирования эффективных шипов молотильно-сепарирующих устройств для кукурузы / Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2017. – № 3 (15). – С. 3-13.

33. Бахарев, Д.Н. Обоснование конструкции рабочих органов ориентирующе-дозировочного устройства для початков кукурузы / Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2018. – № 1 (17). – С. 3–16.

34. Baharev, D.N. The concept of bionic design of devices for threshing cobs of maize varietal / D.N. Baharev, A.G.Pastukhov, S.F.Volvak // ISB-INMATEN Agricultural and mechanical engineering. Bucharest, 2018. – pp. 107–114.

35. Bakharev, D. Structural model of coarse-grained mass, consisting of corn cobs / Pastukhov A., Bakharev D. // Traktori i pogonske mašine Tractors and power machines. – Novi Sad, 2018. – Vol.23, № ½ – P. 36 - 42.

36. Бахарев, Д.Н. Теоретическое исследование технологического процесса подбора початков кукурузы барабанным питателем / Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы агроинженерии и пути их решения». – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2018. – С. 117 – 126.

37. Бахарев, Д.Н. Угол естественного откоса початков кукурузы как объекта послеуборочной механической обработки / Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке». – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2018. – С. 12–16.

38. Бахарев, Д.Н. Влияние жесткости пружин элементов деки молотилки початков кукурузы на энергозатраты при обмолоте / Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак // Материалы Национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы разработки, эксплуатации и технического сервиса машин в агропромышленном комплексе», посвященной 40-летию Белгородского ГАУ. – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2019. – С. 177-182.

39. Бахарев, Д.Н. Разделение зерноотверженной смеси в роторных молотильно-сепарирующих устройствах для кукурузы / Д.Н. Бахарев // Материалы Национальной (всероссийской) научно-практической конференции

с международным участием «Агроинженерия в XXI веке: проблемы и перспективы». – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2020. – С 92-97.

40. Бахарев, Д.Н. Элементы перспективной механизированной технологии переработки початков семенной кукурузы / А.Г. Пастухов, Д.Н. Бахарев // Материалы XII Международной научно-практической интернет-конференции «Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК». – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – С. 455–462.

41. Бахарев, Д.Н. Применение методов бионики в процессе совершенствования рабочих органов подборщиков-погрузчиков початков кукурузы / Д.Н. Бахарев, А.Г. Пастухов, С.Ф. Вольвак // Материалы XXIV Международной научно-производственной конференции «Инновационные решения в аграрной науке – взгляд в будущее», Том 1. – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2020. – С. 9-10.

42. Бахарев, Д.Н. Машинный состав эффективного пункта обработки початков кукурузы в потоке при передвижной механизации / Д.Н. Бахарев, А.Г. Пастухов, С.Ф. Вольвак и др. // Инновационные решения в агроинженерии в XXI веке: Материалы Национальной научно-практической конференции. – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2021. – С. 3-7.

Подписано в печать 31.05.2022
Усл.печ.л. 2,3 Тираж 100 экз. Заказ №12

Отпечатано с авторского оригинал-макета
в ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ
308503, п. Майский, Белгородская область.
Типография ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ

