

*На правах рукописи*



**Тимошинов Михаил Григорьевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ  
НАПОЛНЕННОСТИ БУНКЕРА ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА**

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ).

Научный руководитель доктор технических наук, доцент

**Пухов Евгений Васильевич**

Официальные оппоненты:

**Московский Максим Николаевич**, доктор технических наук, профессор РАН, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», заведующий отделом технологии и оборудования для селекционных работ

**Труфляк Евгений Владимирович**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», заведующий кафедрой эксплуатации машинно-тракторного парка

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева»

Защита состоится 27.12.2018 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Воронежского ГАУ и на сайте [www.vsau.ru](http://www.vsau.ru) («Информация о деятельности диссертационных советов» – «Защиты» – «Д 220.010.04»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=6595>.

Автореферат разослан 30 октября 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации определено, что продовольственная безопасность является необходимым условием повышения качества жизни российских граждан. При этом стратегической целью продовольственной безопасности является обеспечение населения страны продовольствием. Гарантией её достижения является наличие стабильно функционирующего внутреннего производства и необходимых резервов и запасов.

На себестоимость производства сельскохозяйственных культур оказывает влияние множество факторов. К их числу относятся и затраты на уборочно-транспортные процессы. По литературным источникам видно, что в общей себестоимости производства сельскохозяйственной продукции транспортные затраты составляют до 40-45 % от общих затрат производства культур. Сжатые сроки проведения уборочных работ диктуют необходимость сокращения простоев транспортных и технологических машин. Простои комбайнов в ожидании выгрузки составляют от 5 до 29 % от их общего времени работы на поле. Снижение технической оснащённости и низкая эффективность использования потенциала машин значительно увеличивает фактическую продолжительность уборочных работ по сравнению с нормативными показателями, и вызывает потери продукции до четверти урожая.

Согласно указу Президента РФ «О стратегии научно-технологического развития РФ в ближайшие 10-15 лет» одним из приоритетных направлений следует считать переход к передовым цифровым и интеллектуальным производственным технологиям. Одной из этих технологий является «умное» сельское хозяйство, заключающееся во взаимодействии и обмене информацией различными устройствами, машинами и системами (дистанционное управление сельхозтехникой и технологическими операциями, контроль различных процессов и состояний).

Таким образом, повышение эффективности уборочно-транспортных процессов за счет сокращения простоев транспортных и технологических машин с использованием интеллектуальных систем, является актуальной задачей для сельскохозяйственной отрасли страны.

Диссертация выполнена в рамках научно-исследовательской работы агроинженерного факультета «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации и электрификации сельскохозяйственного производства», утвержденной ученым советом ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (№ 01.200.1-003986).

**Степень разработанности темы.** В настоящее время зарубежными и отечественными учеными разрабатываются технологии и технические системы удаленного контроля за сельскохозяйственными процессами. В зарубежных странах активно развиваются информационные системы мониторинга, способствующие развитию цифровой экономики. Федеральной научно-технической программой развития сельского хозяйства на 2017–2025 годы поддерживается создание и внедрение отечественных конкурентно способных технологий при производстве сельскохозяйственной продукции.

В области информатизации и автоматизации производственных процессов сельскохозяйственных предприятий известны работы ученых ведущих научных и образовательных организаций РФ. Так, в работах Завражнова А.И. рассмотрены проблемы неэффективного использования техники в сельском хозяйстве. В.Ф. Федоренко исследовал и обосновал тенденции информационного развития сельскохозяйственного производства. В трудах Завалишина Ф.С., Жалнина Э.В., Савченко А.Н. и Бурьянова А.М. изложены основы технологии уборки зерновых культур. В работах Окунева Г.А. и Шепелева С.Д. рассмотрена эффективность совместной работы транспортных средств с технологическими машинами. Маслов Г.Г. и Московский М.Н. исследовали вопросы оптимизации комплекса уборочных и послеуборочных работ. В своих статьях Измаилов А.Ю. и Родригес Р.Ю. описывали управление сельскохозяйственными мобильными агрегатами с использованием навигационной системы ГЛОНАСС/GPS. Труфляк Е.В. провел исследования по определению возможных потерь зерна в технологических процессах сельскохозяйственного производства. В работах Смирнова И.Г. и Личмана Г.И., Балабанова В.И. изучены проблемы и перспективы научно-технического обеспечения агропромышленного комплекса инновационными технологиями, включая цифровые.

Однако, в трудах ученых недостаточно внимания уделено вопросам сокращения потерь времени при выполнении уборочно-транспортных процессов, включая вопросы формирования структуры системы учета времени на транспортных операциях, разработки технологии и средств непрерывного мониторинга количества зернового материала в бункере комбайна, являющихся отправной точкой процесса перемещения зерна с поля на ток.

В то же время в уборочно-транспортном процессе получение данных о наполненности бункера комбайна, месте нахождения транспортного средства, времени на ожидание своей очереди на загрузку (дозагрузку), выгрузку является одной из приоритетных задач, позволяющих оперативно направлять транспортные средства к уборочной технике и тем самым сократить простои и технологических и транспортных машин.

В этом случае потребуются разработка комплекса технологических и технических решений, обеспечивающих непрерывное формирование, передачу и обработку данных о наполненности бункера зерноуборочного комбайна на основе использования информационных технологий.

**Цель исследования:** повышение эффективности уборочно-транспортного процесса за счет разработки метода и средств оперативного контроля наполненности бункера зерноуборочного комбайна.

**Задачи исследования:**

1) изучить структуру затрат времени на выполнение транспортных процессов при уборке зерновых культур и обосновать требования к системе учета затрат времени;

2) теоретически обосновать методику определения затрат времени на выполнение этапов уборочно-транспортного процесса на основе мониторинга наполненности бункера зерноуборочного комбайна;

3) разработать методику мониторинга объема зернового материала в бун-

кере комбайна с использованием машинного зрения;

4) провести экспериментальные исследования влияния общего уровня яркости, цвета, места поступления зернового материала, перекрытия изображения зерновым материалом на точность определения его объема в бункере зерноуборочного комбайна.

**Объект исследования:** процесс учета наполнения бункера зерноуборочного комбайна.

**Предмет исследования:** закономерности влияния формы насыпной поверхности и физико-механических характеристик зернового материала на степень заполнения бункера зерноуборочного комбайна.

**Научная новизна:**

1) методика определения затрат времени на выполнение этапов уборочно-транспортного процесса, отличающаяся учетом наполненности бункера зерноуборочного комбайна;

2) методика определения объема зернового материала в бункере зерноуборочного комбайна, отличающаяся использованием машинного зрения и применением многорядного многоточечного шаблона и метода взаимодействующих движущихся точек;

3) критерий соответствия расчетной линии уровня зернового материала в бункере с фактической линией по яркости соседних точек цифрового изображения и алгоритм его определения, отличающиеся использованием многорядного многоточечного шаблона;

4) закономерности влияния общего уровня яркости, цвета, места поступления зернового материала, перекрытия изображения зерновым материалом на точность определения его объема в бункере зерноуборочного комбайна.

**Теоретическая значимость работы.** Методика определения объема зернового материала в бункере зерноуборочного комбайна, позволяющая оценить степень заполнения бункера с погрешностью не более 8 %, и критерий соответствия расчетной линии уровня зернового материала в бункере с фактической линией по яркости соседних точек цифрового изображения и алгоритм его определения, позволяющий получить форму поверхности зернового материала в бункере, дополняют теоретические положения расчета степени заполнения бункера.

**Практическая значимость работы.** Методика определения затрат времени на выполнение этапов уборочно-транспортного процесса позволяет выявить потери времени. Программно-аппаратный комплекс (свидетельство о регистрации программы № 2018614033) по определению объема зернового материала в бункере зерноуборочного комбайна позволяет осуществлять оперативный контроль наполненности бункера.

**Методология и методы исследования.** Решение поставленных задач проводилось на основе теоретических и экспериментальных исследований. При проведении лабораторных исследований использовались апробированные методики, сертифицированные измерительные приборы и средства вычислительной техники.

При выполнении теоретических исследований применялись методы математического анализа, взаимодействующих движущихся точек, случайного

перебора вариантов (Монте-Карло), специально разработанные программы на языке программирования Object Pascal в среде Borland Delphi 7, также для реализации случайных величин использован генератор случайных чисел random из системы программирования Borland Delphi. Вычисления выполнялись на современном персональном компьютере.

**Положения, выносимые на защиту:**

1) методика определения затрат времени на выполнение этапов уборочно-транспортного процесса, позволяющая выявить потери времени;

2) методика определения объема зернового материала в бункере зерноуборочного комбайна, позволяющая оценить степень наполненности бункера в режиме реального времени;

3) критерий соответствия расчетной линии уровня зернового материала в бункере с фактической линией по яркости соседних точек цифрового изображения и алгоритм его определения, позволяющие получить форму поверхности зернового материала в бункере для уточнения расчета объема зернового материала в бункере;

4) закономерности влияния общего уровня яркости, цвета, места поступления зернового материала, перекрытия изображения зерновым материалом на точность определения его объема в бункере зерноуборочного комбайна, позволяющие оценить эффективность применения программно-аппаратного комплекса по определению объема зернового материала в бункере зерноуборочного комбайна.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена: численной реализацией аналитических зависимостей, использованием апробированных методов исследования, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, применением сертифицированного оборудования, современных компьютеров и программного обеспечения, результатами внедрения в производство.

Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международной заочной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов в 2016 г., г. Воронеж; национальной научной конференции «Наука вчера, сегодня, завтра» в 2016 г., г. Воронеж; научной и учебно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов «Теория и практика инновационных технологий в АПК» в 2017 г., г. Воронеж; VIII-й международной научно-практической конференции «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях» в 2018 г., г. Курск; 9-ой международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Агроинженерные инновации в сельском хозяйстве» в 2018 г., г. Москва, а также на ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ в 2015–2018 годах.

Результаты исследования внедрены на предприятиях ОАО «МАЯК» и ООО «Агрокультура» Воронежской области и используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, что подтверждено соответствующими актами.

**Личный вклад соискателя.** Личный вклад соискателя заключается в постановке задач исследования, выборе методов, разработке методики исследований, выполнении математических преобразований, получении и реализации на ЭВМ аналитических зависимостей, разработке программно-аппаратного комплекса по определению объема зернового материала в бункере зерноуборочного комбайна, проведении экспериментов, формулировке выводов, предложений, рекомендаций, подготовке публикаций по теме диссертации.

**Публикация результатов исследования.** По материалам диссертации опубликовано семь статей, в том числе три статьи – в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций; получено одно свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 197 наименований и четырех приложений. Диссертация изложена на 153 страницах, включает 39 рисунков и пять таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований, изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Анализ технологии и технических средств контроля уборочно-транспортных процессов в сельском хозяйстве» проанализированы технологии сбора и транспортировки сельскохозяйственной продукции, виды потерь урожая при выполнении уборочных работ, развитие процессов автоматизации и информатизации сельского хозяйства, методы контроля сельскохозяйственных процессов на основе спутникового мониторинга, технические средства для контроля перевозимого зерна во время уборки урожая.

Показано, что существующая технология определения подачи транспортного средства к зерноуборочному комбайну предусматривает срабатывание штатного сигнализатора уровня (при заполнении бункера на 75 %), при этом водитель транспортного средства видит мигающий индикатор и движется к комбайну. Неровность поля, дальность нахождения, плохая видимость, человеческий фактор часто приводят к рассогласованной работе водителей транспортных и технологических машин, что приводит к простоям техники. Создание комплексной системы, способной определять степень наполненности зерновым материалом бункера комбайна позволит прогнозировать место и время его полного заполнения. Тем самым появится возможность более точной подачи транспортного средства для выгрузки из комбайна, что позволит сократить потери рабочего времени машин.

**Во второй главе** «Теоретические основы повышения эффективности управления уборочно-транспортным процессом на основе сокращения простоев комбайнов и транспортных средств» предложена структура системы учета затрат времени на выполнение транспортных процессов при уборке сельскохозяйственной продукции с использованием мониторинга наполненности бункера

зерновым материалом (рисунок 2.1).

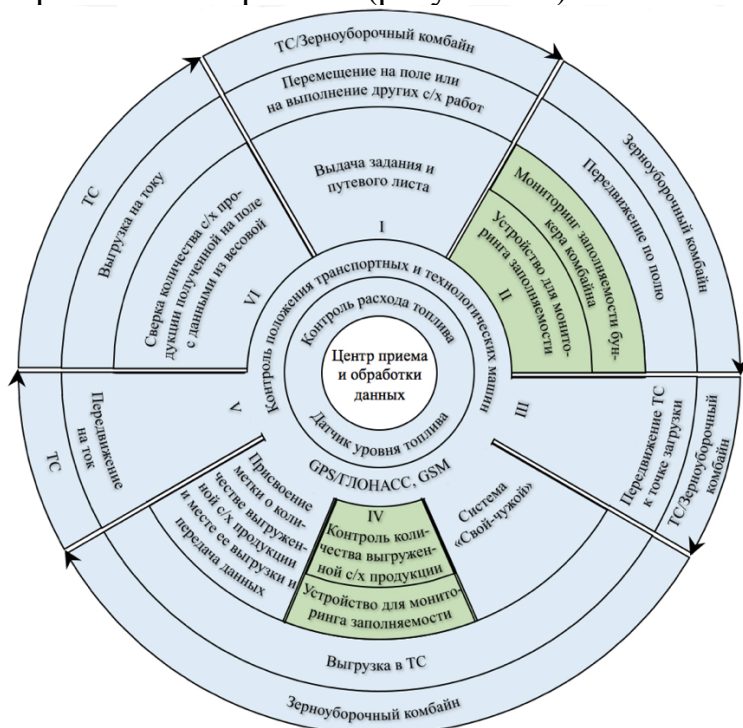


Рисунок 2.1 – Структура системы учета затрат времени на выполнение транспортных процессов при уборке сельскохозяйственной продукции с использованием мониторинга наполненности бункера комбайна

Согласно представленной структуре транспортное средство (ТС) (автомобиль, трактор с прицепом, бункер-перегрузчик и др.) и зерноуборочный комбайн получают задание (с оформлением соответствующего документа) в соответствии с которым перемещаются на поле (позиция I). Далее зерноуборочный комбайн начинает сбор урожая (позиция II). На этой стадии предложено использовать устройство для мониторинга наполненности бункера комбайна. Его применение позволит планировать время и место полной загрузки комбайна на поле, что определит точку (область выгрузки комбайна) загрузки ТС. В этом случае ТС уже будет владеть информацией и поменяет свое местоположение с возможностью сокращения затрат времени на ожидание комбайном (позиция III). Помимо этого появляется возможность определения потребности в ТС на конкретном поле.

Затем, происходит выгрузка из комбайна в ТС, во время которой система «Свой-чужой» контролирует принадлежность транспортного средства хозяйству (позиция IV). На этой стадии предложено контролировать количество выгруженной сельскохозяйственной продукции с соблюдением нормативной загрузки ТС, с присвоением метки о количестве выгруженной сельскохозяйственной продукции и месте ее выгрузки для формирования базы данных о производительности комбайна. Далее ТС передвигается на ток (позиция V), где происходит выгрузка (позиция VI), во время которой осуществляется сверка количества сельскохозяйственной продукции, полученной на поле, с данными из весового контроля (весовой). На протяжении всех процессов контролируется положение ТС и комбайнов (GPS/ГЛОНАСС и/или GSM), также расход топлива (датчик уровня топлива). Управление всей предложенной системой осуществляется центром приема и обработки данных.

Для выявления основных потерь времени на простои транспортных и технологических машин при уборочно-транспортном процессе, учитывались теоретические аспекты учета потерь времени. В результате сформирована



структура затрат времени на основные операции уборочно-транспортного процесса (рисунок 2.2), позволяющая показать перспективность использования мониторинга наполненности бункера.

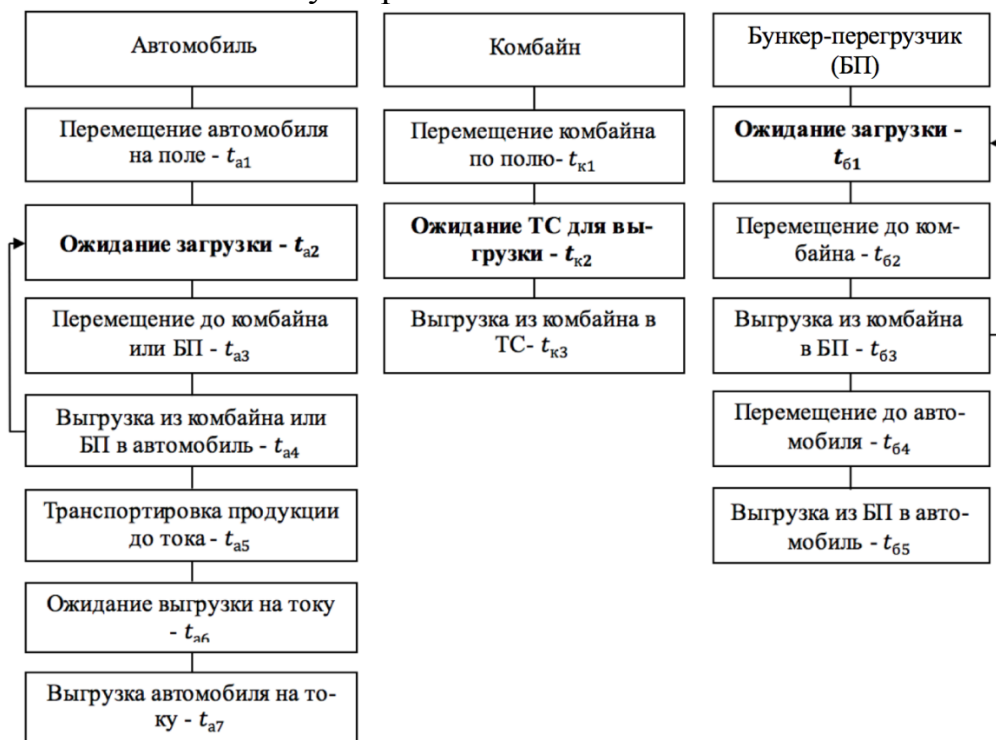


Рисунок 2.2 - Структура затрат времени на этапах выполнения уборочно-транспортного процесса

Согласно предложенной структуре общий объем затрат времени  $T_{общ}$  на выполнение транспортно-технологических операций во время уборки образуется в результате суммирования интервалов времени на выполнение основных этапов уборочного процесса и этапов, связанных с ожиданием транспортных и технологических машин, мин (ч):

$$T_{общ} = \sum_{i=1}^{12} t_i + \sum_{j=1}^3 t_j \quad (1)$$

где  $t_i$ - затраты времени на выполнение этапов уборочно-транспортного процесса, мин (ч);  $t_j$  - затраты времени на простои техники, связанные с ожиданием транспортных или технологических машин на поле, мин (ч).

Тогда, основные затраты  $C_i$  на всех этапах транспортных работ составят, руб.:

$$C_i = C_{Tn} \times \left( \sum_{i=1}^{12} t_i + \sum_{j=1}^3 t_j \right) \quad (2)$$

где  $C_{Tn}$  – тариф оплаты работы транспортных и технологических машин (транспортные затраты), руб. в час.

В этом случае потери прибыли для предприятий агропромышленного комплекса составят, руб.

$$П_{пр} = C_{Tn} \times \sum t_{a2,к2,б1} \quad (3)$$

где  $\Pi_{\text{пр}}$  - потери прибыли предприятия от простоев транспортных и технологических машин;  $t_{a2}$  – время ожидания автомобилем загрузки, мин (ч);  $t_{к2}$  – время ожидания комбайном ТС для выгрузки, мин (ч);  $t_{б1}$  - время ожидания БП загрузки, мин (ч).

Математическая модель оценки эффективности функционирования уборочно-транспортного процесса, с учетом потерь времени на ожидание загрузки транспортными средствами и ожидание комбайном транспортного средства для выгрузки, позволяющая определить эффективность подачи транспортного средства по принципу в нужное место и вовремя, может быть представлена целевой функцией вида:

$$F_{T(k \text{ общ})} = f(\Pi_{\text{пр}}) \rightarrow \min \quad (4)$$

где  $F_{T(k \text{ общ})}$  - функция минимальных затрат времени.

Мониторинг заполняемости бункера позволит определить (спланировать) место выгрузки комбайна, тем самым обеспечив свободное транспортное средство информацией (например навигационной меткой), куда ему будет необходимо прибыть в определенное время, что приведет к уменьшению простоев транспортных и технологических машин. Информационные потоки между центром приема и обработки данных технологическими машинами и транспортными средствами представлены на рисунке 2.3.

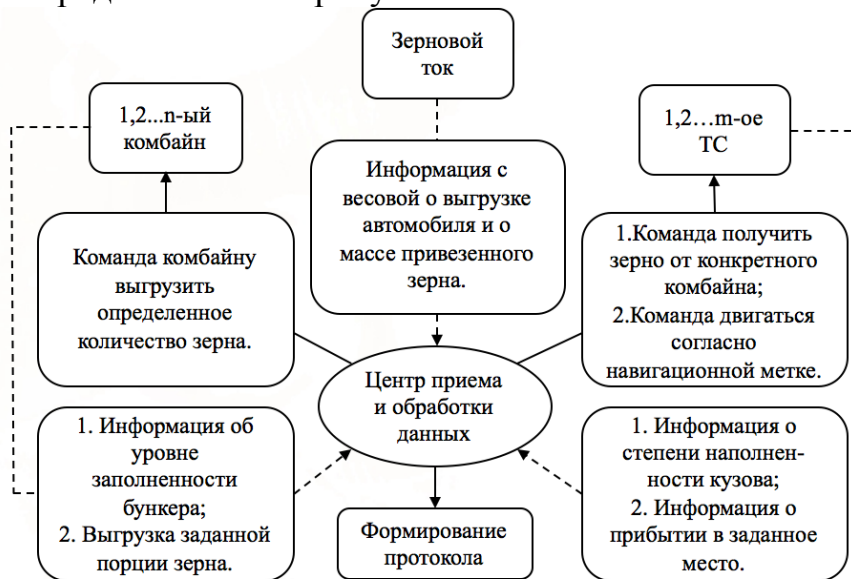


Рисунок 2.3 – Структура информационных потоков контроля и управления уборочно-транспортными процессами

Для получения первичной информации о наполненности бункера предлагается использовать метод оптического распознавания уровня. Работа этого метода осуществляется следующим образом: прежде всего, производится преобразование изображения, полученного при помощи видеокамеры, к разрешению 640 x 480 пикселей путем масштабирования и обрезки не попадающих в данный формат частей изображения по бокам, либо сверху и снизу. Изображение преобразуется в формат BMP, в котором цвет каждого пиксела задается тремя

числами – яркостью красного, зеленого и синего составляющих цвета.

С математической точки зрения изображение представляет собой три матрицы яркости  $I_{ij}^R, I_{ij}^G, I_{ij}^B$ , где R, G, B – индекс цветового канала (красный, зеленый, синий соответственно), i и j – номера пикселей по горизонтали (начиная слева) и вертикали (начиная сверху).

Для поиска линии уровня зернового материала используется либо выделение по цвету (зерновой материал имеет высокую составляющую желтого цвета), либо яркостное выделение.

В последнем случае производится цветовое усреднение: три цветовых канала преобразуются в изображение в оттенках серого цвета:

$$I_{ij} = \frac{I_{ij}^R + I_{ij}^G + I_{ij}^B}{3} \quad (5)$$

где  $I_{ij}$  – матрица изображения в оттенках серого.

Для поиска линии уровня зернового материала на изображении  $I_{ij}$  используется многоточечный многорядный шаблон (рисунок 2.4).

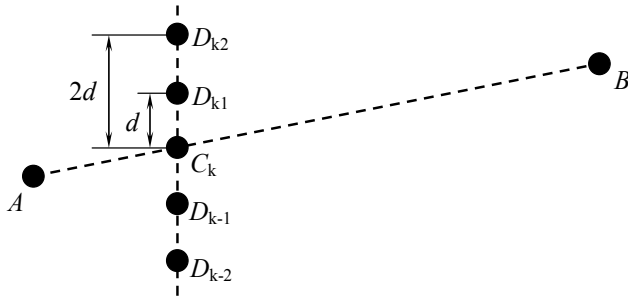


Рисунок 2.4 – Шаблон, используемый для поиска на изображении линии уровня зернового материала

Линия уровня зернового материала ищется в виде набора отрезков АВ, выше и ниже которых расположены по 5 рядов точек, по 30 точек в ряду. Расстояние между соседними рядами точек одинаково и равно  $d = 5 \dots 10$  пикселей. Между симметричными относительно  $C_k$  точками определяется разность яркости изображения, далее такие разности суммируются в общий критерий К, по величине которого можно судить о совпадении отрезка АВ с линией уровня зернового материала.

Поиск наилучшего расположения отрезка АВ производится методом Монте-Карло – методом случайного перебора вариантов расположения концов отрезка. Для каждого случайного отрезка АВ производится расчет положения точек  $D_{km}$ , в которых определяется яркость изображения. Прежде всего, определяются координаты центральной точки  $C_k$ :

$$x_{C_k} = x_A + \frac{k}{30}(x_B - x_A); \quad y_{C_k} = y_A + \frac{k}{30}(y_B - y_A), \quad (6)$$

где  $x_{C_k}, y_{C_k}$  – координаты точки  $C_k$ ; k – номер вертикального набора точек (может принимать значения от 0 до 30).

Далее определяются координаты точек  $D_{km}$ :

$$x_{D_{km}} = x_{C_k} = x_A + \frac{k}{30}(x_B - x_A); \quad y_{D_{km}} = y_{C_k} - d \cdot m = y_A + \frac{k}{30}(y_B - y_A) - d \cdot m; \quad (7)$$

Где  $x_{D_{km}}, y_{D_{km}}$  – координаты точки  $D_{km}$ , m – номер ряда точек, параллельного отрезку АВ; d – расстояние между соседними рядами точек.

Для того, чтобы в точке  $D_{km}$  определить интенсивность, необходимо преобразовать нецелочисленные значения координат  $x_{D_{km}}$ ,  $y_{D_{km}}$  в целочисленные (выделить целую часть числа), таким образом привязав точку  $D_{km}$  к ячейке матрицы  $I_{ij}$ . Математически это записывается следующим выражением:

$$I_{[x_{D_{km}}][y_{D_{km}}]}, \quad (8)$$

где [...] операция выделения целой части числа.

Критерий  $K$ , определяющий, насколько хорошо отрезок АВ совпадает с линией уровня зернового материала, рассчитывается путем суммирования разностей в парных точках:

$$K = \sum_{k=1}^{30} \sum_{m=1}^5 \left( I_{[x_{D_{km}}][y_{D_{km}}]} - I_{[x_{D_{k-m}}][y_{D_{k-m}}]} \right) \quad (9)$$

Выражая  $K$  как функцию координат отрезка АВ, получим:

$$K(x_A, y_A, x_B, y_B) = \sum_{k=1}^{30} \sum_{m=1}^5 \left( I_{[x_A + \frac{k}{30}(x_B - x_A)][y_A + \frac{k}{30}(y_B - y_A) - d \cdot m]} - I_{[x_A + \frac{k}{30}(x_B - x_A)][y_A + \frac{k}{30}(y_B - y_A) + d \cdot m]} \right). \quad (10)$$

В ходе перебора вариантов расположения отрезка АВ производится сравнение критериев  $K$  для каждого отрезка и выбирается отрезок с наибольшим значением  $K$ , то есть решалась следующая задача оптимизации:

$$K(x_A, y_A, x_B, y_B) \rightarrow \max \Rightarrow x_A^{opt}, y_A^{opt}, x_B^{opt}, y_B^{opt}, \quad (11)$$

где  $x_A^{opt}$ ,  $y_A^{opt}$ ,  $x_B^{opt}$ ,  $y_B^{opt}$  – координаты отрезка, лучше всего совпадающего с линией уровня зернового материала.

При таком методе поиска линии уровня зернового материала используется предположение, что изображение над линией уровня зернового материала темнее изображения под линией уровня, что чаще всего бывает в реальности. За счет использования множества точек ( $30 \times 10 = 300$ ) данный метод оптического распознавания обладает высокой устойчивостью к различным помехам: наличию различных посторонних объектов на изображении, перекрывающих линию уровня зернового материала; запылению изображения; существенной не прямолинейности линии уровня зернового материала.

Как показала многократная проверка, разработанный оптический метод поиска уровня зернового материала в бункере является точным и эффективным, поэтому может использоваться в реальных системах определения объема зернового материала в бункере комбайна.

Для определения объема зернового материала в бункере необходимо учитывать не только уровень, но и характер выпуклости свободной поверхности зернового материала, которая формируется в результате двух физических процессов: поступления потока зернового материала и его ссыпания. Поэтому далее был разработан метод получения функции свободной поверхности зернового материала  $f_3(x, y)$ , на основе оптически определенной границы  $\Gamma(x, y, z)$  между стенками бункера и свободной поверхностью зернового материала. В рамках предлагаемого метода используется концепция угла естественного откоса, который для пшеницы и ржи составляет  $23 \dots 38^\circ$ .

В рамках данного метода геометрический объект разбивается на множе-

ство материальных точек, имеющих условную массу и взаимодействующих между собой условными силами, которые определяются исходя из условия задачи. Для решения геометрической задачи моделируется механическое движение материальных точек под действием сил взаимодействия, и система переходит в некоторое состояние равновесия, которое и служит решением задачи.

Свободная поверхность зернового материала была представлена совокупностью  $N_x \times N_y$  материальных точек, с индексами  $ij$ , координаты  $x_{ij}$  и  $y_{ij}$  которых зафиксированы в узлах квадратной сетки (рисунок 2.5):

$$x_{ij} = i \cdot d; \quad y_{ij} = j \cdot d, \quad (12)$$

где  $d$  – шаг квадратной сетки.

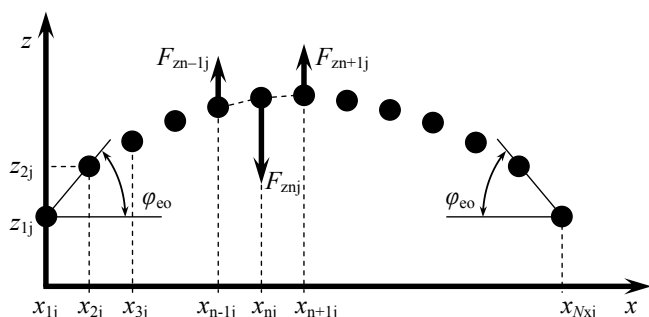


Рисунок 2.5 – Представление свободной поверхности как совокупности взаимодействующих материальных точек

Координата  $z_{ij}$  может изменяться при движении точки. Движение точек описывается дифференциальным уравнением второго порядка, составленным на основе второго закона Ньютона для материальных точек:

$$m \frac{d^2 z_{ij}}{dt^2} = \sum_{k=1}^{N_c} F_{z_{ij}}^k(z_{ij}, t), \quad (13)$$

где  $m$  – условная масса материальной точки (далее принято значение 1);  $t$  – условное время;  $N_c$  – количество условных сил  $F_{z_{ij}}$ , действующих на материальную точку.

Для восстановления конфигурации свободной поверхности в начальный момент времени точки, образующие поверхность, располагаются произвольным образом (например, в горизонтальной плоскости), за исключением граничных точек ( $i = 1, i = N_x, j = 1, j = N_y$ ), которые располагаются таким образом, чтобы они образовывали с соседними точками угол заданного естественного откоса для зерна  $\varphi_{eo}$ .

Для того, чтобы точки сформировали в пространстве плавную поверхность, имеющую угол  $\varphi_{eo}$  с боковыми стенками бункера, добавляются силы, действующие на точки, и стремящиеся «выровнять» поверхность, каждую тройку последовательных точек на одну прямую. С учетом этого уравнение движения принимает следующий вид.

$$m \frac{d^2 z_{ij}}{dt^2} = -c((z_{i+1,j} - z_{ij}) - (z_{ij} - z_{i-1,j})) - c((z_{i,j+1} - z_{ij}) - (z_{ij} - z_{i,j-1})) - \alpha \frac{dz_{ij}}{dt}, \quad (14)$$

где  $c$  – коэффициент условной жесткости поверхности;  $\alpha$  – коэффициент условного вязкого трения при движении точек, позволяющий исключить резкие изменения координат и скоростей точек из-за произвольности начальных условий.

Для численного интегрирования уравнений движения материальных точек используется модифицированный метод Эйлера-Коши. Данный метод обеспечивает второй порядок точности по отношению к координате и первый порядок точности по отношению к скорости.

$$z_{ij}^{\tau+1} = z_{ij}^{\tau} + v_{zij}^{\tau} \cdot \Delta t + \frac{F_{zij}^{\tau}}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \quad v_{zij}^{\tau+1} = v_{zij}^{\tau} + \frac{F_{zij}^{\tau}}{m} \cdot \Delta t; \quad (15)$$

где  $\tau$  – номер шага по времени;  $\Delta t$  – величина шага по времени;  $v_{zij}^{\tau}$ ,  $v_{zij}^{\tau+1}$  – компоненты скорости материальной точки  $ij$ .

Начальные условия. В начальный момент времени точки имеют произвольную координату  $z$ , за исключением граничных точек, которые должны составлять угол  $\varphi_{e0}$  с соседними точками. Начальная скорость точек равна нулю  $v_{zij} = 0$ .

Получив функцию свободной поверхности зернового материала  $f_3(x, y)$  на основе предварительного оптического распознавания границы, появляется возможность рассчитать объем  $V$  зернового материала в бункере. Аналитически, в приближении непрерывных функций, объем зернового материала вычисляется с помощью двойного интеграла.

$$V = \iint_{D(\text{Пр. XY } \Gamma)} (f_3(x, y) - z_6(x, y)) \cdot dx \cdot dy, \quad (16)$$

где  $z_6(x, y)$  – функция двух переменных, описывающая форму нижней части бункера;  $D$  – область в пространстве  $(x, y)$ , в пределах которой производится интегрирование, представляющая собой проекцию на горизонтальную плоскость  $XY$  границы  $\Gamma$  между стенками бункера и свободной поверхности зернового материала, определенной с помощью оптического распознавания.

В ряде случаев бункер может иметь геометрически сложную форму (например, многосвязную), тогда объем зернового материала рассчитывается по более сложной формуле, учитывающей дополнительные геометрические особенности.

Для повышения геометрической адекватности функцию  $f_3$  целесообразно представить не в виде аналитической функции, а использовать табличное задание функции (матрицу  $f_{zij}$  размером  $N_x \times N_y$ ). Тогда для бункера прямоугольного сечения, который используется в качестве базового в данной работе, объем зернового материала рассчитывается следующим образом:

$$V = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (f_{zij} - z_{6ij}), \quad (17)$$

где  $z_{6ij}$  – таблично заданная функция нижней поверхности бункера (для бункера простой геометрической формы, данная функция может быть простой, например, для бункера с плоским дном  $z_{6ij} = \text{const}$ ).

Разработанная методика восстановления поверхности зернового материала является достаточно универсальной, чтобы воспроизводить режимы насыпания и удаления зернового материала в различных точках поверхности. Так, если зерновой материал удаляется в центре бункера, формируется углубление, к си-

стеме уравнений, описывающих сетку поверхности, необходимо добавить граничные условия:

$$Z_{[Nx/2+1],[Ny/2]} = Z_{[Nx/2-1],[Ny/2]} = Z_{[Nx/2],[Ny/2+1]} = Z_{[Nx/2],[Ny/2-1]} = h_{ц} + d \cdot \tan \varphi_{eo} \quad (18)$$

где [...] обозначен оператор выделения целой части числа с округлением;  $h_{ц}$  – высота поверхности зернового материала в центре бункера;  $d$  – шаг сетки;  $\varphi_{eo}$  – угол естественного откоса зерна.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований по оптическому распознаванию уровня зернового материала в бункере» изложены программа и методика исследований, дано описание экспериментальной установки.

Первичная проверка работоспособности разработанной методики произведена на серии фотографий, полученных в процессе засыпания зернового материала в лабораторный бункер (рисунок 3.1).

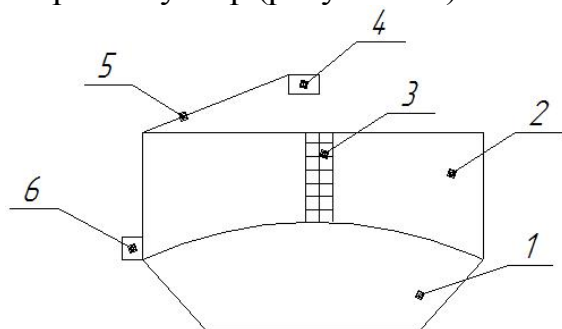


Рисунок 3.1 – Схема лабораторного бункера 1- зерновой материал; 2- бункер; 3 – измерительная шкала; 4 – видеокамера; 5 – кронштейн; 6 – блок управления

Для контроля степени заполнения бункера на стенках были нанесены шкалы с шагом 2,5 см. Форма бункера характеризуется прямоугольными горизонтальными сечениями. Верхняя половина бункера представляет собой практически прямоугольный параллелепипед, нижняя часть – сужающуюся к низу призму.

Лабораторные измерения проводились в режиме неподвижной камеры (рисунок 3.2).

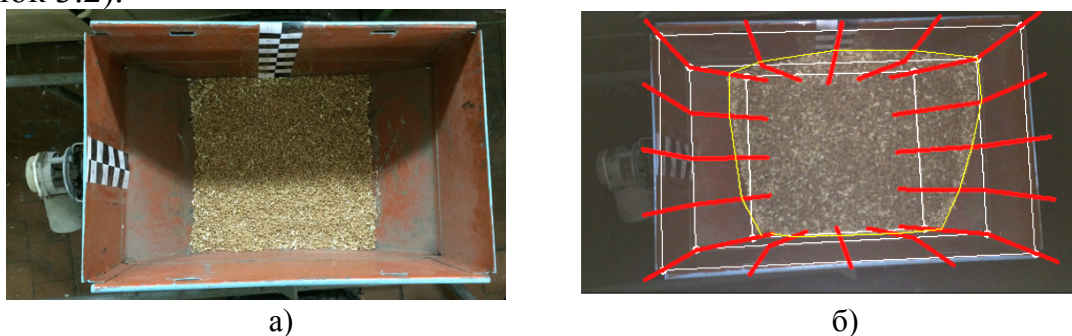


Рисунок 3.2 – модель бункера зерноуборочного комбайна  
а) до применения программы; б) после применения программы

На этапе предварительной калибровки определялись координаты на изображении ключевых точек бункера, по которым потом восстанавливались 16 направляющих линий, вдоль которых производился поиск концов отрезков границы. Заполнение производили как непрерывным потоком зернового материала, так и порционно. Опытно-производственная проверка проводилась на предприятии ОАО «Маяк». В качестве техники для испытания был выбран зерноубороч-



ный комбайн ACROS 580 (базовой комплектации). Комбайн использовал загонный способ движения. Для транспортировки и сбора использовался прямой способ с использованием в качестве автотранспорта самосвала ГАЗ-САЗ-35071 с надставными бортами. Наблюдения проводились при помощи фотографии рабочего времени, для замеров применялся хронограф. Задачей исследования было определить на сколько минут уменьшится время ожидания транспортного средства комбайном для погрузочно-разгрузочных работ с использованием предлагаемого программно-аппаратного комплекса, а также определить зависимость объема зернового материала в бункере от высоты поверхности зерна.

**В четвертой главе** «Результаты исследований точности определения объема зернового материала в бункере методом оптического распознавания» представлены результаты исследований по определению объема зернового материала на основе оптического распознавания уровня и насыпной поверхности пшеницы в бункере. Обнаружено, что для слишком темных и слишком светлых изображений увеличивается время, необходимое для надежного поиска границ изображения (рисунок 4.1, а) из-за увеличения количества шагов поиска на изображении оптимального местоположения отрезков границы. При слишком ярких и слишком темных изображениях увеличивается погрешность определения объема зернового материала до 6 ... 8 %, тогда как при средних значениях яркости погрешность составляет около 3 % (рисунок 4.1, б).

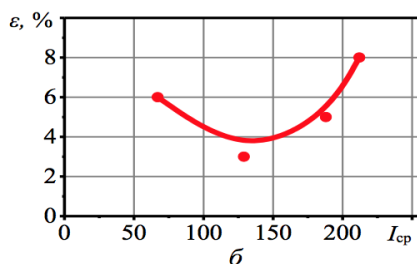
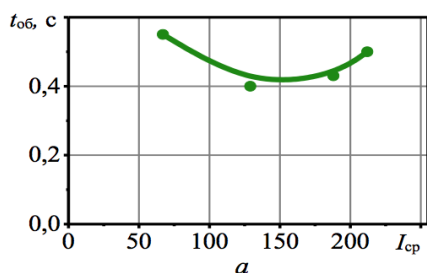


Рисунок 4.1 – Влияние средней яркости изображения (в формате от 0 до 255 ед.) на показатели эффективности: а – время  $t_{об}$  обработки одного кадра; б – погрешность  $\epsilon$  определения объема зернового материала в бункере

Одной из наиболее серьезных проблем реальной эксплуатации системы оптического измерения объема зернового материала является перекрытие изображения потоком зернового материала и элементами конструкции. Для изучения влияния уровня перекрытия изображения зерновым материалом обработана серия изображений, с разным уровнем перекрытия.

Степень перекрытия изображения  $P$  оценивалась количественно по условной шкале от 0 до 1 и для исследуемых изображений составила соответственно 0,00, 0,33, 0,67, 1,00. С увеличением уровня перекрытия изображения посторонними объектами несколько ухудшаются возможности оптической обработки, что проявляется в увеличении времени надежной обработки изображения с 0,4 до 0,8 с (рисунок 4.2, а), и увеличении погрешности с 3,0 % до 5,6 % (рисунок 4.2, б).

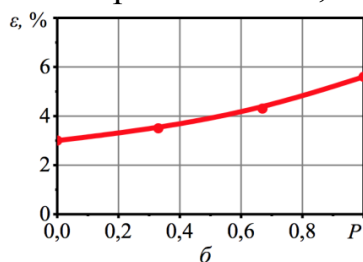
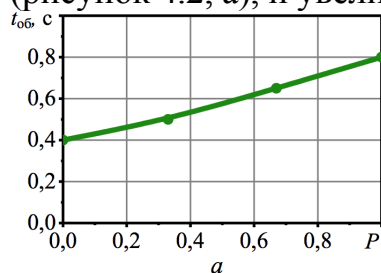


Рисунок 4.2 – Влияние степени перекрытия изображения  $P$  на показатели эффективности: а – время  $t_{об}$  обработки одного кадра; б – погрешность  $\epsilon$  определения объема зернового материала в бункере



Увеличение времени обработки связано с необходимостью увеличивать количество шагов в цикле поиска каждого элементарного отрезка границы, а погрешность увеличивается из-за сложности в принципе определения границы, из-за перекрытия изображения посторонними объектами.

От места поступления зернового материала в бункер зависит несимметричность горки зернового материала, что может оказывать влияние на точность определения объема зернового материала в бункере. Для исследования данного влияния проведена обработка серии изображений в которых при одном и том же наклонном потоке зернового материала место падения зерен изменялось от практически удара о стенку до падения в центр бункера. При этом координата  $y_T/B$  (где  $B$  – ширина бункера) составляла 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5.

Время надежной обработки практически не зависит от места поступления потока, так как определяется не столько геометрическими факторами, сколько оптическими условиями (рисунок 4.3, а). Погрешность незначительно убывает с удалением места падения зернового материала от стенки и приближением к центру бункера (рисунок 4.3, б).

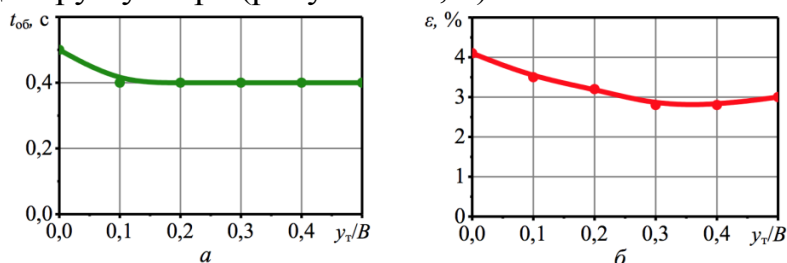


Рисунок 4.3 – Влияние положения места поступления зерна на показатели эффективности: а – время  $t_{об}$  обработки одного кадра; б – погрешность  $\epsilon$  определения объема зернового материала в бункере

Было определено, чем ближе поступает зерновой материал к стенке бункера, тем более несимметричной оказывается горка зернового материала, и тем сильнее перекрывается потоком граница между поверхностью зернового материала и стенками бункера, что влечет увеличение погрешности определения объема.

Перед полевыми испытаниями была проведена тарировка и установлена зависимость объема зернового материала в бункере от высоты поверхности зернового материала в центре (рисунок 4.4).

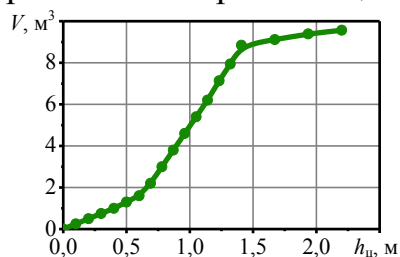


Рисунок 4.4 - зависимость объема зернового материала в бункере  $V$  от высоты поверхности зернового материала в центре  $h_{ц}$

Объем зернового материала в бункере нелинейно зависит от высоты поверхности зернового материала в центре бункера. Так, при начале формирования углубления в центре, с уменьшением  $h_{ц}$  в широком диапазоне от 2,2 до 1,4 м объем зернового материала уменьшается слабо: от 9,6 до 8,9 м<sup>3</sup>. Однако при дальнейшем уменьшении  $h_{ц}$  происходит «разворот» поверхности: поверхность зернового материала из преимущественно выпуклой становится преимущественно вогнутой.

При этом уменьшение  $h_{ц}$  с 1,4 до 0,5 м приводит к резкому уменьшению объема зернового материала: с 8,9 до 1,5 м<sup>3</sup>. При дальнейшем уменьшении  $h_{ц}$  зернового материала, оставшееся в призматической части бункера удаляется с меньшей скоростью. В дальнейшем была определена зависимость объема зерна в бункере от времени работы комбайна в поле (рисунок 4.5). Представленный график получен с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса.

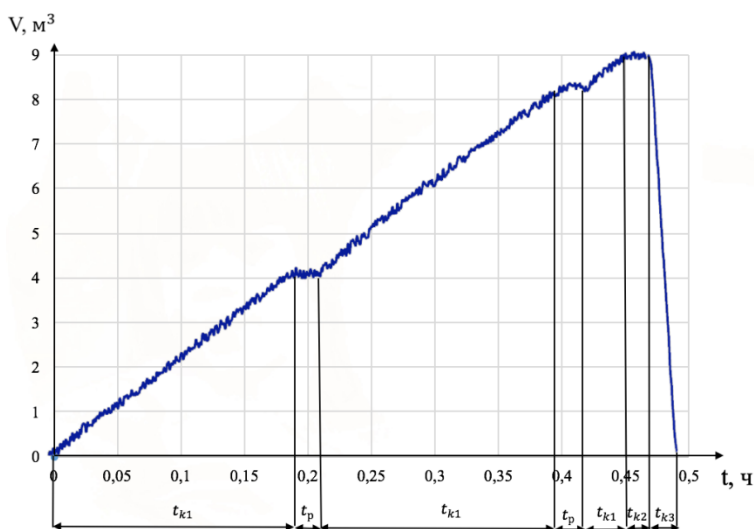


Рисунок 4.5 – Зависимость объема зернового материала в бункере  $V$  от времени  $t$  в процессе полевого эксперимента (один цикл наполнения и выгрузки комбайна)

Оптические измерения объема зернового материала проводились с интервалом 3 с. Случайная погрешность составила около 1,5 %, систематическая погрешность определения объемно-весовых характеристик зернового материала в бункере составила 4 %.

**В пятой главе** «Технико-экономическое обоснование предложенных решений». Расчет экономических показателей при использовании предложенного программно-аппаратного комплекса по определению объема зернового материала в бункере зерноуборочного комбайна показал (на примере ОАО «Маяк»), что дополнительная прибыль предприятия от сокращения простоев транспортных и технологических машин в ожидании погрузочных и разгрузочных операций при уборке пшеницы составила 196 004 руб.

### Заключение

1. Затраты времени на выполнение транспортных процессов при уборке зерновых культур складываются из следующих этапов: перемещения транспортных и технологических машин на поле; выполнения уборочных операций с заполнением бункера; ожидания комбайном транспортного средства; разгрузки бункера и транспортировки урожая на ток с последующей выгрузкой. Система учета затрат времени должна оперативно фиксировать затраты времени на каждом технологическом этапе и выявлять соответствующие нерациональные затраты времени уборочных и транспортных машин с использованием мониторинга объема зернового материала в бункере комбайна.

2. Предложенная математическая модель определения затрат времени на выполнение этапов уборочно-транспортного процесса на основе мониторинга наполненности бункера зерноуборочного комбайна позволяет проводить оценку эффективности этапов транспортного процесса и добиться увеличения времени полезной работы смены комбайна до 12%.

3. Разработанная методика мониторинга объема зернового материала в бункере комбайна с использованием машинного зрения обеспечивает распознавание границ и конфигурации насыпной поверхности зернового материала, построение ее цифровой модели и возможность обработки изображений с учетом общего уровня яркости, цвета, места и интенсивности поступления зернового материала, перекрывающих изображение элементов конструкции комбайна. Пред-

ложенная методика обеспечивает надежное измерение во всем диапазоне уровня заполнения бункера со средней погрешностью около 4 % и максимальной – 8 %.

4. Экспериментальными исследованиями установлено, что на изображениях с общей яркостью 67 и 212 единиц увеличивается погрешность определения объема зернового материала до 8 %, тогда как при средних значениях яркости погрешность составляет около 3 %. С увеличением уровня перекрытия изображения посторонними объектами увеличивается время обработки изображения с 0,4 до 0,8 с и погрешность с 3,0 % до 5,6 %. Выявлено, что насыщенность желтого цвета оказывает слабое влияние на эффективность оценки. Время обработки изображения в этом случае находится в диапазоне от 0,3 до 0,5 с. Установлено, что время обработки практически не зависит от места поступления потока, так как определяется не столько геометрическими факторами, сколько оптическими, и составляет 0,4 с. Погрешность незначительно убывает с удалением места падения зернового материала от стенки и с приближением к центру бункера от 4 % до 3%.

5. Предложенный программно-аппаратный комплекс (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018614033) для определения объема зернового материала в бункере зерноуборочного комбайна, включающий видеокамеру, кронштейн, блоки управления и передачи данных на сервер, а также программную часть, позволяет его использовать без внесения существенных конструктивных изменений в зерноуборочных комбайнах и другой сельскохозяйственной технике и получать информацию о наполненности бункера комбайна в реальном режиме времени. Расчет экономических показателей при использовании программно-аппаратного комплекса показал (на примере ОАО «Маяк»), что дополнительная прибыль предприятия от сокращения простоев транспортных и технологических машин в ожидании выгрузки при уборке пшеницы в объеме 1670 т составила 196 004 руб.

#### **Рекомендации производству**

Для сокращения простоев транспортных и технологических машин рекомендуется использовать разработанный программно-аппаратный комплекс для определения объема зернового материала в бункере зерноуборочного комбайна. Предложенный комплекс предлагается интегрировать в существующие системы контроля и управления сельскохозяйственными машинами и уборочно-транспортными комплексами.

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

Разработка информационной системы контроля и управления уборочно-транспортными процессами в сельскохозяйственном производстве.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ СОИСКАТЕЛЕМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций**

1. Тимошинов М.Г. Формирование требований к системам мониторинга рабочих процессов производства сельскохозяйственных культур / Е.В. Пухов, М.Г. Тимошинов, Н.А. Наквасин // Международный технико-экономический журнал. – 2017. – № 6. – С. 84–89.

2. Тимошинов М. Г. Совершенствование метода контроля веса зерна при уборочных работах / Е.В. Пухов, М.Г. Тимошинов // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 12 (79). – С. 77–86.

3. Тимошинов М. Г. Математическая модель определения уровня зерна в бункере комбайна / Е.В. Пухов, В.А. Следченко, М.Г. Тимошинов, С.С. Мешкова // Международный технико-экономический журнал. – 2018. – № 3. – С. 20–25.

#### **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ**

4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для оптического определения уровня зерна в бункере комбайна / Е.В. Пухов, М.Г. Тимошинов, В.А. Следченко; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I». – № 2018614033; заявл. 09.02.2018; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 27.03.2018.

#### **Статьи в научных журналах и материалах конференций**

5. Тимошинов М.Г. Исследование процесса контроля загрузки транспортных машин с использованием ультразвуковых волн / Е.В. Пухов, М.Г. Тимошинов, О.В. Боев // Инновационные технологии и технические средства для АПК: мат. междунар. научно-практ. конф. молодых ученых и специалистов., г. Воронеж, 16 ноября 2016 г.. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. – С. 105–109.

6. Тимошинов М.Г. Совершенствование организации контроля за эксплуатацией транспортных и технологических машин / Е.В. Пухов, М.Г. Тимошинов, Д.В. Овсянников, Е.А. Горбунов // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения: матер. междунар. научно-практ. конф., посвящ. 115-й годовщине со дня рождения профессора Харитончика Е.М., г. Воронеж, 6 апреля 2017 г. В 2-х ч. Ч. 1. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – С. 353–361.

7. Тимошинов М.Г. Повышение точности систем глобального позиционирования путем дифференциальной коррекции / М.Г. Тимошинов // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сбор. науч. труд. VIII междунар. научно-практ. конф., г. Курск, 1 июня 2018 г.: – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., 2018. – С. 378–381.

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 220.010.04 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, ученому секретарю. Телефон: (473) 224-39-39, 8-900-924-5638; e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Подписано в печать 26.10.2018г. Формат 60x80<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага кн.-журн.

П.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ №18464.

Типография ФГБОУ ВО ВГАУ 394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1.

