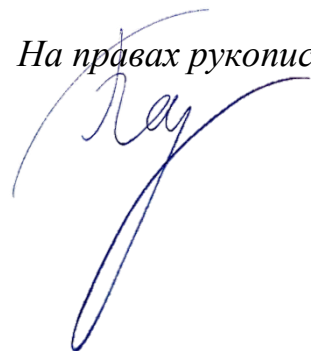


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный аграрный университет  
имени императора Петра I»

*На правах рукописи*



**БАРЫКИН Константин Вадимович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ВНЕСЕНИЯ ТВЕРДЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ И ДЕФЕКТА**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование  
для агропромышленного комплекса

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Колесников Николай Петрович

Воронеж – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                                                                     | 5  |
| 1 Обзор и анализ технических средств и технологий внесения твердых органических удобрений и дефеката.....                                                                                          | 13 |
| 1.1 Характеристики твердых органических удобрений и дефеката и особенности их применения.....                                                                                                      | 13 |
| 1.2 Обзор и анализ машин и агрегатов, используемых при внесении твердых органических удобрений и дефеката.....                                                                                     | 16 |
| 1.3 Обзор и анализ технологий внесения твердых органических удобрений и дефеката.....                                                                                                              | 25 |
| 1.3.1 Анализ прямоточной технологии внесения удобрений и дефеката .....                                                                                                                            | 26 |
| 1.3.2 Анализ перевалочной технологии внесения удобрений и дефеката .....                                                                                                                           | 29 |
| 1.3.3 Анализ перегрузочной технологии внесения твердых органических удобрений и дефеката .....                                                                                                     | 32 |
| 1.4 Перспективы совершенствования технологии внесения твердых органических удобрений и дефеката.....                                                                                               | 36 |
| 1.5 Выводы .....                                                                                                                                                                                   | 40 |
| 2 Теоретические исследования технологии внесения твердых органических удобрений и дефеката с использованием прицепов-перегрузчиков и обоснование рациональных параметров технических средств ..... | 43 |
| 2.1 Схема организации работы агрегатов по предлагаемой технологии .....                                                                                                                            | 43 |
| 2.2 Теоретические исследования параметров линии внесения твердых органических удобрений и дефеката с применением прицепов-перегрузчиков                                                            | 46 |
| 2.3 Анализ способов движения распределительных и транспортно-перегрузочных агрегатов при предлагаемом виде перегрузочной технологии .                                                              | 67 |
| 2.4 Оценка вероятности нахождения машин производственной линии в работе.....                                                                                                                       | 72 |
| 2.5 Методика определения параметров линии внесения твердых органических удобрений с учетом ожидания транспортно-перегрузочных и технологических агрегатов.....                                     | 76 |
| 2.6 Методика определения параметров разбрасывателя и прицепа-перегрузчика при внесении твердых органических удобрений и дефеката.....                                                              | 85 |

|                                                                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.6.1 Определение грузоподъемностей разбрасывателя и прицепа-перегрузчика при внесении твердых органических удобрений и дефеката .....                                                   | 85  |
| 2.6.2 Методика определения производительности выгрузного устройства прицепа-перегрузчика в зависимости от мощности гидросистемы агрегатируемого трактора и просыпаемости материала ..... | 91  |
| 2.7 Выводы .....                                                                                                                                                                         | 97  |
| 3 Программа и методика проведения хронометражных наблюдений, экспериментальных исследований и имитационного моделирования .....                                                          | 101 |
| 3.1 Программа проведения хронометражных наблюдений и экспериментальных исследований .....                                                                                                | 101 |
| 3.2 Методика проведения хронометражных наблюдений .....                                                                                                                                  | 102 |
| 3.3 Методика проведения экспериментальных исследований по определению мощности и просыпаемости материала при перегрузке ленточным транспортером .....                                    | 104 |
| 3.4 Методика обработки результатов хронометражных наблюдений и экспериментальных исследований .....                                                                                      | 110 |
| 3.4.1 Контроль и учет элементов рабочего цикла технологических и погрузочных машин .....                                                                                                 | 110 |
| 3.4.2 Обработка результатов экспериментальных исследований .....                                                                                                                         | 112 |
| 3.5 Программа и методика проведения имитационного моделирования линии внесения твердых органических удобрений и дефеката .....                                                           | 113 |
| 3.6 Выводы .....                                                                                                                                                                         | 118 |
| 4 Результаты хронометражных наблюдений, экспериментальных исследований и имитационного моделирования .....                                                                               | 119 |
| 4.1 Результаты хронометражных наблюдений .....                                                                                                                                           | 119 |
| 4.2 Результаты экспериментальных исследований .....                                                                                                                                      | 122 |
| 4.3 Результаты расчетов по определению параметров технологических и транспортно-перегрузочных агрегатов .....                                                                            | 126 |
| 4.3.1 Результаты расчета рациональной грузоподъемности разбрасывателя ...                                                                                                                | 126 |
| 4.3.2 Результаты расчета рациональной грузоподъемности прицепа-перегрузчика .....                                                                                                        | 129 |
| 4.4 Результаты имитационного моделирования .....                                                                                                                                         | 135 |
| 4.4.1 Проверка адекватности имитационной модели .....                                                                                                                                    | 135 |
| 4.4.2 Определение способа движения технологических агрегатов с учетом простоев и стохастического характера работы .....                                                                  | 139 |

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.3 Результаты определения рационального состава звеньев<br>производственной линии .....                                | 140 |
| 4.5 Выводы .....                                                                                                          | 148 |
| 5 Экономическая оценка внедрения предлагаемого вида перегрузочной<br>технологии с применением прицепов-перегрузчиков..... | 150 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                          | 155 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                                                                    | 159 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А .....                                                                                                        | 176 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....                                                                                                         | 177 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В .....                                                                                                        | 180 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....                                                                                                        | 190 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Обеспечение продовольственной безопасности страны является одним из приоритетных направлений государственной политики, закрепленных в Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации (Указ Президента Российской Федерации от 21.01.2020 № 20). Достижение этой цели неразрывно связано с повышением эффективности сельскохозяйственного производства, обеспечением устойчивого роста урожайности сельскохозяйственных культур и сохранением плодородия почв. Черноземы Центрально-Черноземного региона – уникальный природный ресурс, обеспечивающий производство значительной части зерна, сахарной свеклы и масличных культур в стране. Вместе с тем длительное интенсивное использование почв, сокращение объемов внесения органических удобрений и применение физиологически кислых форм минеральных удобрений привело к развитию деградационных процессов. По данным агрохимической службы, в Воронежской области кислые почвы занимают свыше 0,84 млн га, что создает угрозу снижения продуктивности сельскохозяйственных угодий [102]. Ежегодно в регионах с развитым животноводством и свеклосахарной промышленностью образуются сотни тысяч тонн подстилочного навоза и фекалов, которые накапливаются на территории сельскохозяйственных предприятий и полях фильтрации сахарных заводов. При этом существует значительный разрыв между фактическими объемами накопления и внесения этих материалов. Основная причина этого несоответствия – высокие затраты труда и средств на транспортировку и внесение, обусловленные неэффективным использованием машин, что делает данную операцию экономически невыгодной при удаленности полей от мест хранения, накопления твердых органических удобрений и фекалов.

Ключевая проблема заключается в малой эффективности использования разбрасывателей, для которых характерен низкий коэффициент использования времени смены, отражающий, в какую часть общей продолжительности смены

машина выполняет полезную работу. Следствием низкого коэффициента использования времени смены является невысокая эксплуатационная производительность. Таким образом, для выполнения необходимого объема работ по внесению твердых органических удобрений и дефеката требуется большой парк разбрасывателей или продолжительные сроки внесения. Чрезмерно увеличивать сроки внесения не всегда возможно ввиду необходимости выполнения других обязательных сельскохозяйственных работ.

Высокая стоимость современных разбрасывателей усугубляет ситуацию. Для многих сельхозпредприятий приобретение новой дорогостоящей узкоспециализированной техники в условиях сложной экономической обстановки не представляется возможным, что делает повышение эффективности использования уже имеющегося парка машин особенно актуальной задачей.

Следовательно, актуальность темы исследования обуславливается необходимостью повышения объемов внесения твердых органических удобрений и дефеката при общем снижении удельных затрат на внесение. В связи с этим, ключевыми направлениями исследований становятся: совершенствование технологии внесения твердых органических удобрений и дефеката, что позволит устранить неэффективное использование машин, а также разработка и внедрение ресурсосберегающих решений, для повышения эффективности использования главного звена линии внесения и сопутствующего процесса транспортировки и внесения материалов. Рост производительности труда и снижение эксплуатационных издержек позволят обеспечить применение дефеката для восстановления деградирующих черноземов.

Диссертационная работа выполнена в ходе реализации плана научно-исследовательской работы (НИР) агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации и электрификации сельскохозяйственного производства», раздел «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации производства продукции растение-

водства», которая утверждена ученым советом университета (номер государственной регистрации 01.200.1-003986).

**Степень разработанности темы.** Проблемам повышения эффективности внесения удобрений посвящены работы А.Ю. Брюханова, А.М. Бондаренко, А.П. Дьячкова, М.Г. Догановского, Н.П. Колесникова, Е.В. Козловского, А.Д. Бровченко, Н.М. Марченко, Г.И. Личмана и др. Однако их исследования касались не касались применения прицепов-перегрузчиков при внесении твердых органических удобрений и дефеката. Также ими не рассматривалось влияние последствия простоев на показатели производственной линии внесения, которое присуще многозвенным технологическим линиям, у которых присутствует жесткая технологическая связь.

Применением прицепов-перегрузчиков и совершенствованием многозвенных производственных линий с учётом последствий ожидания агрегатов занимались такие ученые как В.Е. Таркинский, А.Г. Левшин, А.В. Орлянский, Н.А. Майстренко и др. Однако применительно к перегрузочной технологии внесения твёрдых органических удобрений и дефеката подобные исследования не проводились.

Мировые лидеры по производству сельскохозяйственной техники и оборудования (KUNN, Kverneland, Bergman и др.) активно работают над совершенствованием техники для транспортировки и внесения органических удобрений. При этом все чаще прослеживается потребность расширения перечня выполняемых работ существующими сельскохозяйственными машинами.

**Объект исследования:** технологический процесс внесения твердых органических удобрений и дефеката.

**Предметом исследования** являются закономерности взаимодействия транспортно-перегрузочных и распределительных агрегатов в линии внесения твердых органических удобрений и дефеката.

**Цель работы:** повышение производительности агрегатов и снижение удельных эксплуатационных затрат при внесении твердых органических удобрений.

ний и дефеката по перегрузочной технологии за счет применения в линии внесения прицепов-перегрузчиков.

Поставленная цель может быть достигнута в случае реализации **гипотезы**, заключающейся в том, что применение прицепов-перегрузчиков в линии внесения твердых органических удобрений и дефеката позволит повысить производительность основного звена, что обеспечит снижение затрат на внесение твердых органических удобрений и дефеката.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**.

1. Разработать способ внесения твердых органических удобрений и дефеката, обеспечивающий повышение производительности разбрасывателей.

2. Выявить аналитические зависимости для определения временных циклов и параметров взаимодействия звеньев линии внесения твердых органических удобрений и дефеката, рациональной грузоподъемности разбрасывателя и прицепа-перегрузчика.

3. Разработать методики определения параметров линии внесения твердых органических удобрений и дефеката, обоснования рациональных параметров выгрузного устройства прицепа-перегрузчика по критерию максимальной производительности.

4. Разработать имитационную модель линии внесения твердых органических удобрений и дефеката для исследования взаимодействия различных составов звеньев с жесткой связью.

5. Экспериментально установить закономерности изменения потребляемой мощности выгрузным устройством, просыпаемости материала из выгрузного устройства в зависимости от секундной подачи при разных скоростях движения транспортерной ленты и различной плотности выгружаемого материала.

**Научная новизна** работы заключается в следующем.

1. Предложен способ внесения твердых органических удобрений и мелиорантов, отличающийся тем, что загружают вносимый материал из бурта, расположенного на краю поля, в прицеп, который снабжен ленточным выгрузным

устройством, перевозят вносимый материал и перегружают его в разбрасыватель, работающий на поле.

2. Получены аналитические зависимости для определения временных циклов и параметров взаимодействия звеньев линии внесения твердых органических удобрений и дефеката, рациональной грузоподъемности прицепа-перегрузчика, отличающиеся тем, что учитывают стохастический характер работы прицепов-перегрузчиков и разбрасывателей.

3. Разработаны методики определения параметров линии внесения твердых органических удобрений и дефеката, обоснования рациональных параметров выгрузного устройства прицепа-перегрузчика по критерию максимальной производительности, отличающиеся тем, что учитывают ожидания транспортно-перегрузочных и технологических агрегатов, энергетические ограничения и технологические особенности процесса перегрузки материала прицепами-перегрузчиками.

4. Предложена имитационная модель линии внесения твердых органических удобрений и дефеката, отличающаяся тем, что линия внесения представляется состоящей из взаимодействующих между собой автономных агентов с жесткой технологической связью.

5. Экспериментально установлены закономерности изменения потребляемой мощности выгрузным устройством, просыпаемости материала из выгрузного устройства в зависимости от секундной подачи при разных скоростях движения транспортерной ленты и различной плотности выгружаемого материала.

**Теоретическая значимость работы** заключается в получении аналитических зависимостей для определения временных циклов и параметров взаимодействия звеньев линии внесения твердых органических удобрений и дефеката, рациональной грузоподъемности прицепа-перегрузчика; разработке методики определения параметров линии внесения твердых органических удобрений и дефеката и обоснования рациональных параметров выгрузного устройства прицепа-перегрузчика по критерию максимальной производительности; разработке

имитационной модели линии внесения твердых органических удобрений и дефеката, которые дополняют теорию рабочих процессов машин для транспортировки и внесения твердых удобрений и мелиорантов.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что предлагаемый способ внесения твердых органических удобрений и мелиорантов (патент № 2832329 РФ) позволяет снизить затраты на внесение твердых органических удобрений и дефеката за счет увеличения производительности основного и погрузочного звеньев линии внесения; разработанная компьютерная программа (свидетельство № 2026616020 РФ) позволяет по совокупности параметров выбрать рациональные составы звеньев линии внесения по предлагаемому виду перегрузочной технологии, которые обеспечивают наименьшие удельные затраты по сравнению как с другими видами перегрузочной технологии, так и с аналогичными составами, применяемыми по прямоточной и перевалочной технологиям.

**Методология и методы исследования.** Исследования выполнены с применением теории массового обслуживания и имитационного моделирования. Для уточнения применяемых в расчетах значений проводились хронометражные наблюдения и экспериментальные исследования на основе апробированных методик. Измерения проводили сертифицированными и поверенными приборами. Полученные данные обрабатывались согласно стандартным методикам, результаты использовались в разработанной имитационной модели. При этом применялись следующие компьютерные программы: Microsoft Excel, Python-Compiler, AnyLogic.

**Положения, выносимые на защиту:**

1) способ внесения твердых органических удобрений и мелиорантов, позволяющий повысить производительность основных технологических агрегатов – разбрасывателей и уменьшить уплотнение почвы;

2) аналитические зависимости для определения временных циклов и параметров взаимодействия звеньев линии внесения твердых органических удобрений и дефеката, рациональной грузоподъемности прицепа-перегрузчика, позво-

ляющие оценить влияние многочисленных технических, производственных и организационных факторов на производительность линии внесения, а также коэффициенты использования циклового времени разбрасывателя и прицепа-перегрузчика и обеспечить сокращение простоев машин;

3) методики определения параметров линии внесения твердых органических удобрений и дефеката, обоснования рациональных параметров выгрузного устройства прицепа-перегрузчика по критерию максимальной производительности, позволяющие обеспечить повышение производительности линии внесения твердых органических удобрений и дефеката;

4) имитационная модель линии внесения твердых органических удобрений и дефеката, позволяющая исследовать взаимодействия различных составов звеньев с бесконечно большим числом повторностей;

5) закономерности изменения потребляемой мощности выгрузным устройством, просыпаемости материала из выгрузного устройства в зависимости от секундной подачи при разных скоростях движения транспортерной ленты и различной плотности выгружаемого материала, позволяющие установить рациональные параметры конструкции и режимы работы выгрузного устройства прицепа-перегрузчика, обосновать требования к агрегируемому трактору.

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

Результаты диссертационной работы используются в ООО «ЭкоНиваАгро», а также в учебном процессе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Агроинженерия», что подтверждено соответствующими актами внедрения (приложение Г).

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались в период с 2022 по 2026 год на ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, а также на международных, всероссийских и национальных научных конференциях (всего 20 докладов).

**Личный вклад соискателя** заключается в выборе методов, разработке методик исследований, выполнении математических преобразований, получении аналитических зависимостей, выполненных лично автором; разработке способа внесения твердых органических удобрений и мелиорантов, проведении хронометражных наблюдений и экспериментальных исследований, обработке полученных результатов, разработке имитационной модели и программы для ее реализации, проверке адекватности имитационной модели, формулировке выводов, выполненных при участии автора, подготовке публикаций по теме диссертации.

**Публикации.** Результаты проведенных исследований опубликованы в 25 научных работах, в том числе три статьи опубликованы в научных журналах, включенных в перечень ВАК. По результатам диссертационной работы получены патент Российской Федерации на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 133 наименований и четырех приложений [35]. Диссертация изложена на 202 страницах, включает 41 рисунок и 21 таблицу.

## 1 Обзор и анализ технических средств и технологий внесения твердых органических удобрений и фекалата

### 1.1 Характеристики твердых органических удобрений и фекалата и особенности их применения

Твердые органические удобрения, в частности подстилочный навоз, играют важную роль в поддержании плодородия почвы (гумуса) и обеспечении высокой урожайности сельскохозяйственных культур. Навоз, являясь продуктом жизнедеятельности сельскохозяйственных животных, содержит широкий спектр питательных веществ, необходимых для роста растений, включая азот, фосфор, калий и микроэлементы. Кроме того, навоз улучшает структуру почвы, повышает ее влагоемкость и аэрацию, стимулирует развитие полезной почвенной микрофлоры [56, 119, 133].

Перед применением навоза требуется точно определить дозу внесения, при которой будут удовлетворены потребности выращиваемой культуры, а также способ и режимы технологического процесса. Избыточное внесение навоза может привести к накоплению нитратов в почве, повышению кислотности и загрязнению грунтовых вод, что негативно сказывается на экологической обстановке [97].

Несмотря на положительные стороны использования твердых органических удобрений, их внесение связано с большими затратами труда и средств. По этой причине большое количество фермерских хозяйств, а также более крупных сельхозпредприятий различных форм собственности традиционно широко используют минеральные удобрения для поддержания высокой урожайности, не обращая внимания на текущее состояние почв. Однако сохранение благоприятной экологической обстановки на полях и прилегающих территориях является важной задачей агропромышленного комплекса [91, 132].

Грамотное внесение минеральных и органических удобрений, а также фекалата для различных видов почв улучшает их физико-химические свойства, что

в дальнейшем повышает плодородие при меньшей дозе внесения минеральных удобрений. На фоне описанной выше ситуации все больше сельхозпредприятий увеличивают использование органических удобрений и отходов перерабатывающих производств, одним из которых является фильтрационный осадок (дефекат) – отход свеклосахарной промышленности [3, 131].

В состав дефеката согласно ТУ9112-005-00008064-95 входит 40...60% карбоната кальция и магния, по 0,7% – общего азота, фосфора и калия, до 30% – органического вещества, остальное – землистая масса, которая поступает со смывными водами при первичной обработке корнеплодов сахарной свеклы. Сухой дефекат содержит 60...80% извести, до 15% – органического вещества, более 1% фосфора. При среднем выходе сахара 10...13% от массы переработанной свеклы образуются: свекловичный жом – 75%, дефекат – 14%, свекловичный бой – 11%, а также отсев известнякового камня и большой объем сточных вод [127]. В последние годы резко увеличилось производство сахарной свеклы, а соответственно, и количество отходов свеклосахарного производства, которые можно использовать в качестве мелиорантов. Исходя из данных по производству сахарной свеклы [37], количество дефеката составит не менее 600 тыс. т в год.

По данным министерства сельского хозяйства Воронежской области, за календарный год прибавляется до 1,5 млн т подстилочного навоза, производимого крупным рогатым скотом (КРС) [37]. Утилизация навоза, как и дефеката, является важной экологической задачей, поскольку неконтролируемое хранение и внесение материала может привести к загрязнению почвы, воды и воздуха [23, 89]. Одним из наиболее рациональных путей утилизации подстилочного навоза и дефеката является их применение в качестве твердых органических удобрений и мелиоранта соответственно.

Согласно нормативным документам, твердые органические удобрения должны содержать долю органического вещества не менее 50%, массовая доля питательных веществ в виде азота, фосфора и калия не менее 0,7% [34].

Важно отметить, что в контексте распределения по поверхности поля между навозом и дефекатом нет принципиальной разницы. Оба материала могут

быть эффективно использованы для улучшения плодородия почвы и повышения урожайности. Ключевым фактором является правильный расчет дозы внесения, учитывающий содержание действующих веществ и потребности в них сельскохозяйственной культуры [1, 13]. Основными показателями, влияющими на качественное внесение материала разбрасывателями органических удобрений, являются: насыпная плотность и физико-механический состав. Значения насыпной плотности необходимо также для точного пересчета объемных доз внесения ( $\text{м}^3/\text{га}$ ) в весовые ( $\text{т}/\text{га}$ ), а также для уточнения требуемого объема (массы) вносимого материала при известных соотношениях действующих веществ, таких как азот, фосфор, калий и др. Ошибки в определении насыпной плотности приведут к неправильной дозе внесения питательных веществ [16]. Физико-механический состав включает в себя такие характеристики, как влажность, гранулометрический состав (соотношение частиц разного размера), сыпучесть, связность и другие. Эти характеристики влияют на способность материала к равномерной подаче на рабочие органы разбрасывателя и на равномерное распределение его по поверхности поля [59, 63]. Основные характеристики различных видов навоза и дефеката представлены в таблице 1.1 [85].

Таблица 1.1 – Характеристики полуперепревшего навоза КРС, свиного навоза, конского навоза и дефеката

| Виды материала                            | Навоз КРС | Свиной навоз | Конский навоз | Дефекат |
|-------------------------------------------|-----------|--------------|---------------|---------|
| Насыпная плотность, $\text{т}/\text{м}^3$ | 0,9       | 0,9          | 0,85          | 1       |
| Влажность при внесении (не более), %      | 40        | 43           | 45            | 30      |

Из данных, приведенных в таблице 1.1, следует, что подстилочный навоз и дефекат не сильно отличаются по основным показателям, влияющим на качество внесения.

За последние несколько лет в Воронежской области накопилось довольно большое количество навоза и фекалий, которые необходимо утилизировать, так как они вредят как экологической обстановке вокруг места их хранения, так и почве, на которой они хранятся. При этом, данные материалы являются ценными удобрениями и мелиорантами, но их внесение связано с большими затратами труда и средств. Таким образом, возникает необходимость комплексного решения данной проблемы, сочетающего в себе экологическую безопасность и экономическую целесообразность.

## 1.2 Обзор и анализ машин и агрегатов, используемых при внесении твердых органических удобрений и фекалий

В странах ЕАЭС производством новых машин для внесения твердых органических удобрений занимаются ООО «Коблик-Групп», ООО «ЧКЗ-агро», ОАО «Амкодор», ОАО «Бобруйскагромаш», ООО «СоюзБелАгро», АО «ПК Ярославич» и др. [53, 92, 93, 94, 96, 113].

Технические характеристики разбрасывателей, выпускаемых вышеприведенными производителями, представлены в таблицах 1.2 – 1.4.

Таблица 1.2 – Технические характеристики разбрасывателей удобрений  
ОАО «Бобруйскагромаш»

| Параметры                    | Модель разбрасывателя |       |        |        |        |        |        |
|------------------------------|-----------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                              | ПРТ-7А                | МТТ-9 | МТТ-11 | МТУ-15 | МТУ-18 | МТУ-20 | МТУ-24 |
| Объем кузова, м <sup>3</sup> | 5,5                   | 7     | 9,4    | 15     | 18     | 20     | 24     |
| Грузоподъемность, т          | 7,5                   | 9,5   | 11     | 15     | 18     | 20     | 24     |
| Конструкционная масса, т     | 3,07                  | 3,35  | 3,8    | 5,8    | 6      | 6,8    | 7      |

| Параметры                                     | Модель разбрасывателя |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                               | ПРТ-7А                | МТТ-9   | МТТ-11  | МТУ-15  | МТУ-18  | МТУ-20  | МТУ-24  |
| Доза внесения, т/га                           | 10...60               | 10...60 | 10...60 | 10...60 | 10...60 | 10...60 | 10...60 |
| Объем кузова, м <sup>3</sup>                  | 5,5                   | 7       | 9,4     | 15      | 18      | 20      | 24      |
| Рабочая ширина захвата, м                     | 4...8                 | 8...10  | 8...12  | 10...12 | 10...12 | 10...12 | 10...12 |
| Длина, мм                                     | 6500                  | 6500    | 6500    | 8500    | 8500    | 10800   | 10800   |
| Ширина, мм                                    | 2500                  | 2500    | 2500    | 2500    | 2500    | 2750    | 2750    |
| Высота, мм                                    | 2750                  | 2750    | 2750    | 2750    | 2750    | 2750    | 2950    |
| Тяговый класс агрегируемого трактора, не ниже | 1,4                   | 2       | 2       | 3       | 3       | 5       | 5       |

Таблица 1.3 – Технические характеристики разбрасывателей удобрений компаний «СоюзБелАго» и «Коблик-Групп»

| Параметры                       | Модель разбрасывателя |         |         |         |
|---------------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|
|                                 | РОУМ-10               | РОУМ-20 | FS110   | FS320   |
| Объем кузова, м <sup>3</sup>    | 10                    | 20      | 10      | 20      |
| Грузоподъемность, т             | 10                    | 20      | 10      | 20      |
| Конструкционная масса машины, т | 6,3                   | 10      | 6,5     | 10,2    |
| Доза внесения, т/га             | 10...60               | 10...60 | 10...60 | 10...60 |
| Рабочая ширина захвата, м       | 10...12               | 10...12 | 10...12 | 10...12 |

| Параметры                                       | Модель разбрасывателя |         |       |       |
|-------------------------------------------------|-----------------------|---------|-------|-------|
|                                                 | РОУМ-10               | РОУМ-20 | FS110 | FS320 |
| Длина, мм                                       | 8510                  | 9200    | 8510  | 9250  |
| Ширина, мм                                      | 2800                  | 2560    | 2820  | 2530  |
| Высота, мм                                      | 3150                  | 3650    | 3150  | 3600  |
| Тяговый класс агрегатируемого трактора, не ниже | 2                     | 5       | 2     | 5     |

Таблица 1.4 – Технические характеристики универсальных саморазгружающихся прицепов с установленными на них адаптерами-распределителями

| Параметры                       | Модель прицепа |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                 | ТМ-230         | ТМ-320  | ПСП-20  | ПСП-15  | US213   | ПМФ-20  | ПТВ-271 |
| Объем кузова, м <sup>3</sup>    | 30             | 40      | 30      | 25      | 31      | 20      | 25      |
| Грузоподъемность, т             | 15             | 22      | 19      | 15      | 21      | 20      | 16      |
| Конструкционная масса машины, т | 8,6            | 10,5    | 8,5     | 6,37    | 10,8    | 6,3     | 10,250  |
| Доза внесения, т/га             | 10...60        | 10...60 | 10...60 | 10...60 | 10...60 | 10...60 | 10...60 |
| Рабочая ширина захвата, м       | 10...12        | 10...12 | 10...12 | 10...12 | 10...12 | 10...12 | 10...12 |
| Длина, мм                       | 8770           | 9800    | 9200    | 8260    | 10614   | 9500    | 7100    |
| Ширина, мм                      | 2550           | 2550    | 2550    | 2500    | 2802    | 3000    | 2380    |
| Высота, мм                      | 3410           | 3410    | 3340    | 3340    | 3500    | 3800    | 4680    |
| Высота платформы, мм            | 1150           | 1250    | 1210    | 1210    | 1180    | 1050    | 1220    |

Как видно из таблиц 1.2 – 1.4, большинство производителей разбрасывателей выпускают несколько моделей, которые отличаются разной грузоподъемностью и объемом кузова. Однако рабочая ширина захвата, как правило, остается неизменной. Рабочая ширина захвата в первую очередь зависит от применяемых на разбрасывателе рабочих органов. Ранее предпочтение отдавалось разбрасывателям, оснащенным горизонтальными разбрасывающими барабанами, так как они были проще в производстве и имели небольшие габариты, хотя и не обеспечивали большую рабочую ширину захвата. Из перечисленных разбрасывателей в настоящее время такие рабочие органы имеет только ПРТ-7А. Это обуславливается его нишей на рынке сельскохозяйственной техники, так как ПРТ-7А представляется предприятием как «фермерский» разбрасыватель. В то же время для разбрасывателей большой грузоподъемности возникает необходимость увеличения рабочей ширины захвата. За счет больших габаритов и соответственно объемов самих разбрасывателей и повышенных требований к производительности на них предпочтительней устанавливать рабочие органы с вертикальными или горизонтальными измельчающими роторами и горизонтальными разбрасывающими дисками [120]. Такие рабочие органы благодаря равномерному измельчению подаваемого материала обеспечивают более качественное распределение по сравнению с горизонтальными разбрасывающими барабанами. Как правило, такие рабочие органы комплектуются защитными кожухами и разбрасывающими дисками (рисунок 1.1), которые позволяют вносить материал относительно малыми дозами, при этом имея большую ширину захвата и более высокую равномерность распределения [125]. Таким образом, распределительное устройство разбрасывателей органических удобрений функционирует по принципу распределительного устройства, применяемого на разбрасывателях минеральных удобрений, но с гораздо большей подачей на распределяющие диски.

В таблице 1.4 представлены универсальные прицепы, которые могут выполнять различные операции, в том числе и внесение твердых органических удобрений и дефеката при установке на них соответствующего оборудования.

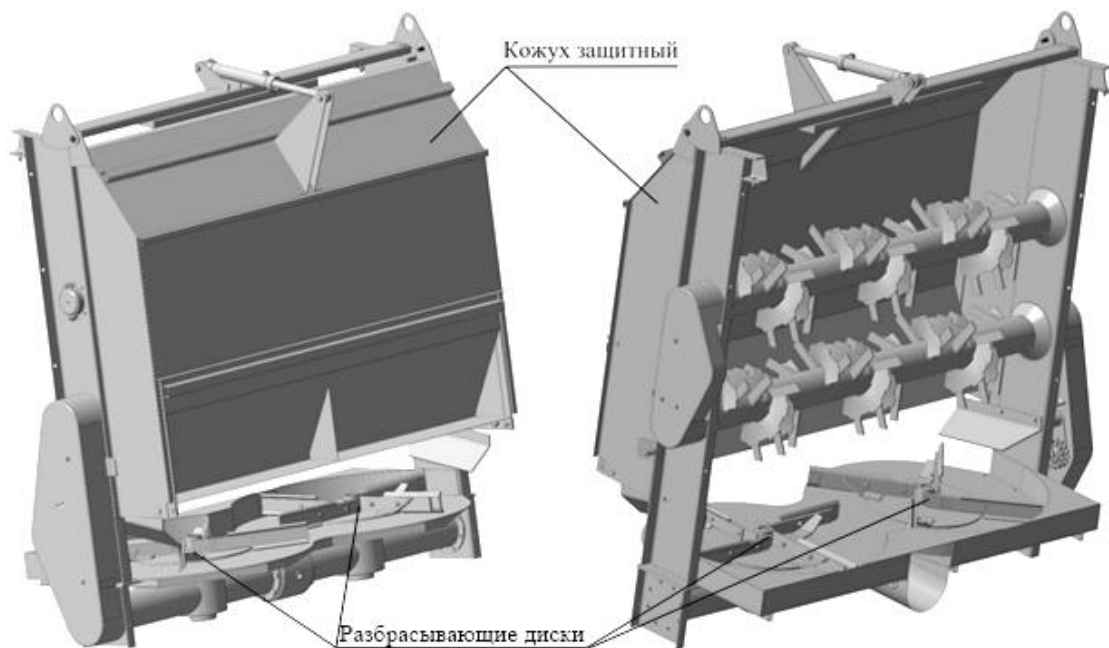


Рисунок 1.1 – Защитный кожух и разбрасывающие диски распределительного устройства [93]

В настоящее время не существует устоявшегося термина, обозначающего дополнительное сменное оборудование для универсальных прицепов. Многими производителями используется термин «адаптеры» для обозначения всего перечня навесного оборудования для универсальных прицепов, поэтому далее используется этот термин.

Согласно исследованиям [69, 70], у прицепов, оснащенных толкающей стенкой, существует проблема неравномерной подачи материала на рабочие органы из-за подпрессовки вносимого материала. Такая проблема проявляется чаще всего при внесении твердых органических удобрений с малой плотностью ( $0,6 \dots 0,8 \text{ т/м}^3$ ), например конского и свиного навоза, а также торфа. Вследствие этого часто возникают трудности с соблюдением агротехнических требований по равномерности внесения по ширине захвата и длине прохода агрегата. Таким образом, равномерное распределение вносимого материала еще больше зависит от качественно проведенной подготовки вносимого материала и его физико-механических характеристик.

Обзор выпускающихся разбрасывателей показывает, что существует тенденция увеличения грузоподъемности разбрасывателей твердых органических

удобрений. В свою очередь, увеличение грузоподъемности является одним из путей повышения производительности разбрасывателей [123]. Грузооборот является важным показателем для оценки эффективности работы транспортных машин, с его помощью проводят анализ затрат на транспортные работы и определяют эффективность использования различных агрегатов. Известно, что грузооборот машин при внесении удобрений прямо пропорционален массе агрегата и обратно пропорционален его рабочей ширине захвата. Следовательно, увеличение грузоподъемности разбрасывателей без существенного увеличения рабочей ширины захвата приводит к возрастанию грузооборота машин, а следовательно, и к увеличению затрат энергии на распределение [44]. Если взять разбрасыватели РОУМ-10 и РОУМ-20, то удельная масса агрегата БТЗ-253К и РОУМ-20 в два раза больше, чем МТЗ-2022 и РОУМ-10, а следовательно, и затраты энергии на внесение будут выше. Причем большая часть этой энергии будет расходоваться на разрушение структуры почвы и ее уплотнение [60]. Для полноты данных приведем характеристики еще некоторых распределительных агрегатов с разбрасывателями разной грузоподъемности и тракторами разной мощности. Зависимость соотношения удельной массы агрегата к его рабочей ширине захвата от грузоподъемности представлена на рисунке 1.2.

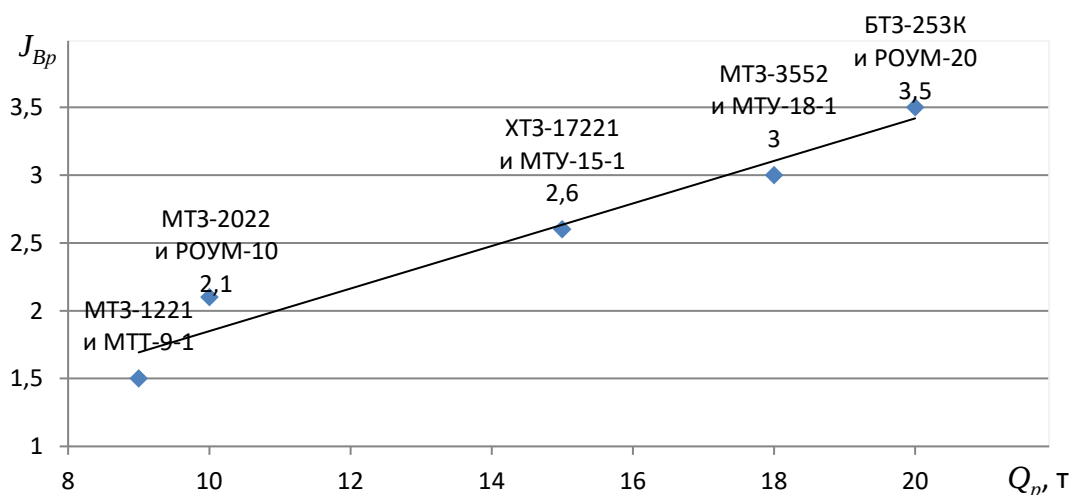


Рисунок 1.2 – График зависимости отношения удельной массы агрегата к рабочей ширине захвата  $J_{Bp}$  от его грузоподъемности  $Q_p$

Из графика рисунка 1.2 видно, что с увеличением грузоподъемности растет

удельная масса распределительного агрегата на метр рабочей ширины захвата. Несмотря на потенциальные негативные факторы, вызываемые ростом грузоподъемности, а соответственно, и эксплуатационной массой сельскохозяйственных машин, наблюдается устойчивая тенденция к увеличению грузоподъемности разбрасывателей удобрений. Этот тренд обусловлен двумя ключевыми факторами, тесно связанными с современными реалиями сельскохозяйственного производства: сокращением численности квалифицированных механизаторов и необходимостью соблюдения жестких агротехнических сроков внесения удобрений и мелиорантов.

Для того, чтобы уложиться в агротехнические сроки внесения твердых органических удобрений и мелиорантов, требуется повысить производительность процесса внесения. Этого можно достичь путем увеличения числа разбрасывателей в основном звене производственной линии внесения или за счет увеличения производительности разбрасывателей. Увеличение же грузоподъемности сопряжено с риском переуплотнения почвы, что негативно сказывается на ее структуре и агрофизических свойствах [52, 88].

Грузоподъемность большинства современных разбрасывателей превышает 18 т. Для эффективной работы таких разбрасывателей требуется агрегировать их с тракторами большой мощности, которые также имеют высокую эксплуатационную массу [95]. Вследствие этого повышается эксплуатационная масса агрегата, а соответственно, и уплотнение почвы. С этим пытаются бороться применением шин низкого давления и увеличением количества осей технологических машин, но несмотря на меры, уменьшающие удельное давление на почву, множество разбрасывателей не соответствует агротехническому требованию по удельному давлению в 150 кПа [126]. Несмотря на большую грузоподъемность, рабочая ширина захвата разбрасывателей остается неизменной из-за применения однотипных распределяющих рабочих органов, что сохраняет площадь воздействия на почву, как у агрегатов меньшей грузоподъемности, но повышает риск ее переуплотнения.

Переуплотнение почвы, вызываемое применением разбрасывателей большой грузоподъемности, негативно влияет на последующую урожайность. Такие ученые, как И.Н. Шило, Н.Н. Мащенко, А.Н. Орда, а также многие др. доказали, что наибольшее уплотнение почвы создает первый проход сельскохозяйственной техники, а влияние каждого последующего уменьшается в сравнении с предыдущим [29, 77, 126].

Для транспортировки твердых органических удобрений и донного осадка могут использоваться как сами разбрасыватели, так и транспортные средства общего назначения. Применение разбрасывателей для транспортировки на большие расстояния не рекомендуется из-за увеличения холостых пробегов во времени цикла, которое будет рассмотрено позже.

Транспортные средства общего назначения представляют собой автомобили-самосвалы и тракторные прицепы. Ввиду огромного разнообразия применяемых транспортных средств нет смысла останавливаться на каком-то конкретном из них, но можно отметить общие принципы, им присущие. Автомобили и тракторные транспортные агрегаты (далее – транспортные средства) предназначены для перевозки различных видов грузов, а следовательно, имеют меньший грузооборот по сравнению с разбрасывателями, так как у них нет балласта в виде разбрасывающих органов и других систем, увеличивающих эксплуатационную массу [38, 65]. Транспортные средства, как правило, имеют более высокую скорость движения, что уменьшает их время оборота и соответственно повышает производительность на транспортных работах [100]. Их годовая загрузка ввиду универсальности значительно выше, чем у разбрасывателей, а значит, час их работы обходится дешевле, поэтому затраты на доставку вносимого материала транспортом общего назначения значительно ниже, чем при использовании разбрасывающих агрегатов в качестве транспортных средств [21]. Учитывая, что перевозка органических удобрений и донного осадка на предприятиях с развитым животноводством и большими площадями кислых почв занимает существенную долю во внутреннем объеме сельскохозяйственных грузоперевозок, то рацию-

нальная организация транспортных работ играет ключевую роль в снижении затрат на внесение [64, 113].

Для загрузки материала в разбрасыватели или транспортные средства используются различные погрузочные средства, наиболее распространенными из которых являются фронтальные погрузчики [50]. Фронтальные погрузчики – незаменимые машины в современном сельском хозяйстве, обеспечивающие эффективное выполнение широкого спектра задач от погрузки и транспортировки зерна, кормов и удобрений до уборки территории и выполнения строительных работ. В линии внесения твердых органических удобрений и дефеката производительность погрузчика становится критически важным параметром, напрямую влияющим на производительность всей линии внесения [20]. Повышение производительности погрузочных работ позволяет сократить время простоя разбрасывателей, снизить трудозатраты и повысить общую производительность внесения.

На российском рынке сельскохозяйственной техники широко представлены как отечественные, так и иностранные производители фронтальных погрузчиков. Среди отечественных предприятий можно выделить несколько крупных компаний, чья продукция пользуется стабильным спросом: ОАО «Амкодор»; ОАО «Орловский завод погрузчиков»; АО «Петербургский тракторный завод» и др. [86, 87]. Наряду с отечественными машинами, на предприятиях широко представлены фронтальные погрузчики зарубежного производства, отличающиеся высоким уровнем технической оснащенности, надежностью и производительностью. Среди наиболее популярных марок можно выделить JCB, SDLG и LuiGong [22].

Анализ технических средств, задействованных в процессе внесения, позволяет сделать утверждение, что наблюдается тенденция увеличения грузоподъемности транспортно-технологических машин и производительности погрузочных средств. Данный путь развития технических средств имеет свои преимущества и недостатки. Такая тенденция в первую очередь продиктована уменьшением числа механизаторов. Повышение технических характеристик используе-

мой при внесении техники позволяет сохранить достаточно высокую производительность при сокращении числа механизаторов, но при этом и повышается уплотнение почвы, негативный эффект от которого будет проявляться в течение длительного времени.

### 1.3 Обзор и анализ технологий внесения твердых органических удобрений и дефеката

Как уже отмечалось выше, внесение твердых органических удобрений и дефеката характеризуется высокими затратами средств и труда, что обуславливает необходимость применения специализированной техники, и как следствие, требует четкой организации технологического процесса. Поэтому, для снижения производственных издержек при внесении твердых органических удобрений и дефеката ключевое значение имеет выбор рациональной технологии внесения. Для внесения таких материалов чаще всего используются три технологии: прямоточная, перегрузочная и перевалочная. Каждая из них имеет свои положительные и отрицательные стороны. Отличия технологий характеризуются различными организационными схемами (рисунок 1.3).

Как видно из рисунка 1.3, прямоточная и перевалочная технологии характеризуются ограниченным числом вариантов применения. Несмотря на возможные незначительные нюансы в практической реализации, они не оказывают существенного влияния на общий процесс внесения удобрений. В отличие от них перегрузочная технология предоставляет значительно большее разнообразие вариантов применения.

Существуют различия между видами перегрузочной технологии, которые обусловлены применяемыми техническими средствами и методами перегрузки вносимого материала. К категории перегрузочных средств можно отнести отечественный автономный перегрузчик ПНД-250 (он же МПК-Ф-1). Разработка и выпуск этих машин пришлось на момент экономической нестабильности и разделения производственных цепочек. Первоначальная ненадежность и изначально заложенные в конструкцию устаревшие технические решения не позволили

наладить массовое производство автономного перегрузчика. Несмотря на высокую производительность, он так и не стал массово использоваться в хозяйствах, поэтому в роли автономных перегрузчиков обычно выступают более распространенные фронтальные или грейферные погрузчики.

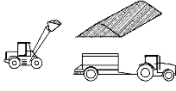
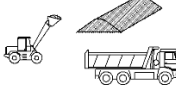
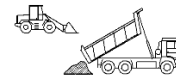
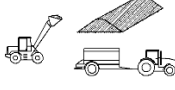
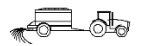
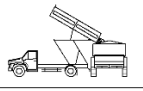
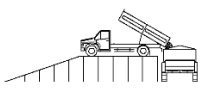
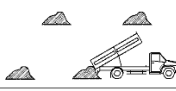
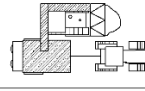
| Название схемы | Варианты | Наименование операций                                                             |                                                                                   |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                     |
|----------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                |          | Погрузка на заводе                                                                | Транспортировка                                                                   | Выгрузка и формирование бурта                                                       | Погрузка из бурта, перегрузка                                                        | Распределение                                                                       |
| Прямоточная    | 1        |  |  |                                                                                     |                                                                                      |  |
| Перебальная    | 2        |  |  |   |   |  |
| Перегрузочная  | 3        |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |   |  |
|                | 4        |  |  |                                                                                     |   |  |
|                | 5        |                                                                                   |                                                                                   |  |  |  |

Рисунок 1.3 – Технологические схемы внесения твердых органических удобрений и донных осадков

Далее проведем подробный анализ наиболее распространенных технологических схем, применяемых при внесении твердых органических удобрений и донных осадков.

### 1.3.1 Анализ прямоточной технологии внесения удобрений и донных осадков

Прямоточная технология является наиболее простой за счет использования только двух типов машин: погрузочных и технологических [63]. Погрузчики работают в месте накопления вносимого материала (навозохранилище или поля фильтрации сахарных заводов). Применение погрузчика на территории фермы или в непосредственной близости от нее облегчает доступ механизатора к объектам инфраструктуры, что улучшает качество его работы и дает возможность оперативной смены деятельности при возникновении больших простоев [112]. В свою очередь, при осуществлении этой технологии разбрасыватель вынужден

выполнять сразу две функции – транспортную и технологическую.

В прямоточной технологии применяются только два вида машин: погрузчики и разбрасыватели. Внесение происходит по указанной схеме (рисунок 1.3). Разбрасыватели после загрузки вносимым материалом транспортируют его до места внесения, а после этого приступают к процессу распределения материала. После опорожнения кузова, они возвращаются к месту загрузки и повторяют цикл. Такая организация позволяет исключить временной интервал между операциями доставки и внесения, а также уменьшить потери материала при перегрузке. Также отпадает необходимость в использовании дополнительных погрузчиков на поле и формировании рядов куч на поле или буртов на краю поля. Такие авторы как М.Н. Марченко, Н.П. Колесников и Г.И. Личман в своих работах указывали, что разбрасыватели, предназначенные для внесения, нерационально использовать для транспортировки вносимого материала на большие расстояния [51, 63, 71]. Их большая эксплуатационная масса и балласт в виде рабочих органов повышает сопротивление перекачиванию, а увеличение дальности перевозки прямо пропорционально уменьшает долю времени в рабочем цикле, отведенную на технологический процесс распределения (рисунок 1.4).

Это ведет к значительному падению производительности и повышению удельных затрат труда и средств на внесение. В свою очередь, большое время рабочего цикла разбрасывателей увеличивает простои погрузчика. При увеличении расстояния транспортировки все перечисленное выше приводит к высоким затратам труда и средств по всей технологической линии внесения [63, 118]. Из представленных на рисунке 1.4 диаграмм видно, что при работе разбрасывателей большая часть времени цикла приходится на загрузку, транспортировку груза и возвращение под загрузку (холостой ход). Малая доля рабочего хода в цикле говорит о низкой эксплуатационной производительности разбрасывателя. Как известно, коэффициент использования времени смены оказывает большое влияние на эксплуатационную производительность, а она, в свою очередь, на прямые затраты труда и средств. Помимо коэффициента использования времени смены, который зависит от организации технологического процесса и имеет некоторые предельные значения, следующим фактором, влияющим на производительность, будет время рабочего цикла разбрасывателя [117].

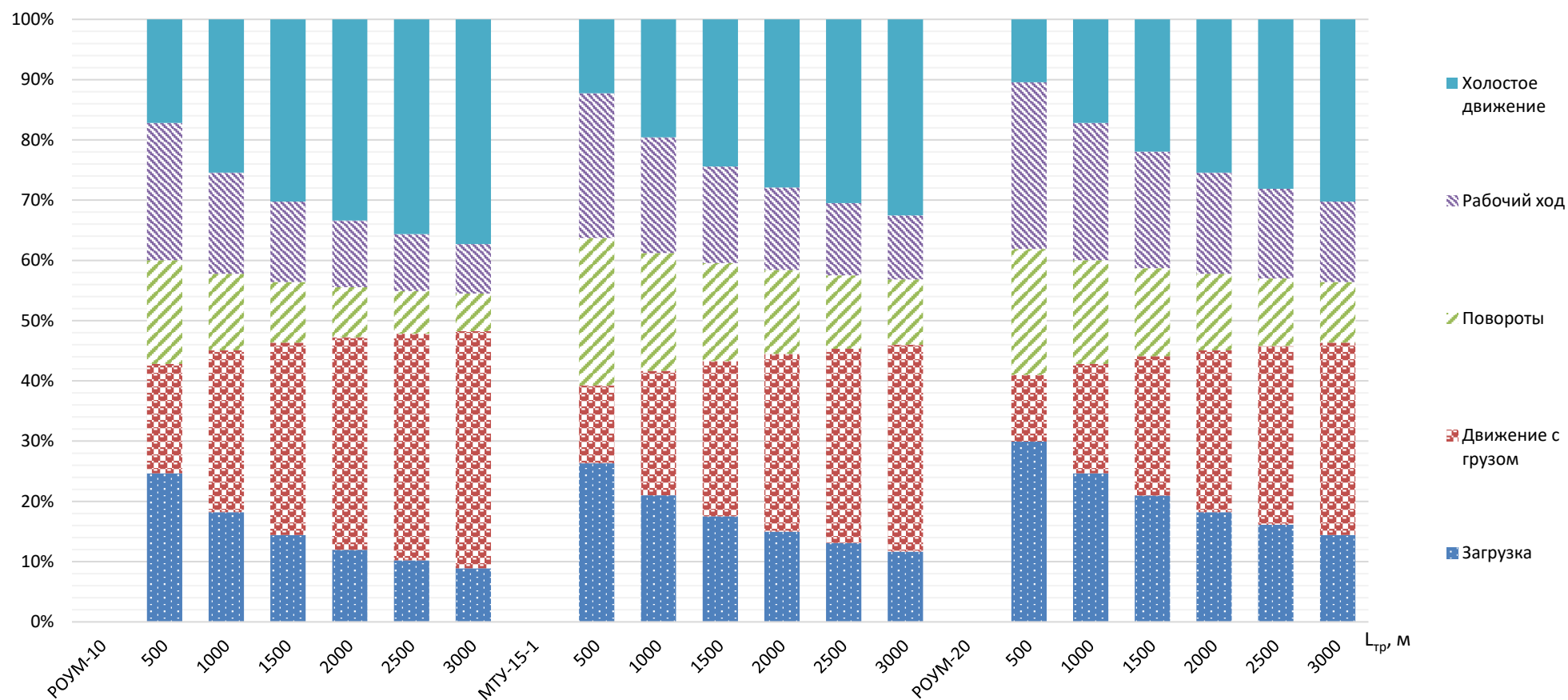


Рисунок 1.4 – Диаграммы изменения составляющих рабочего цикла разбрасывателей разной грузоподъемности в зависимости от расстояния транспортировки  $L_{тр}$

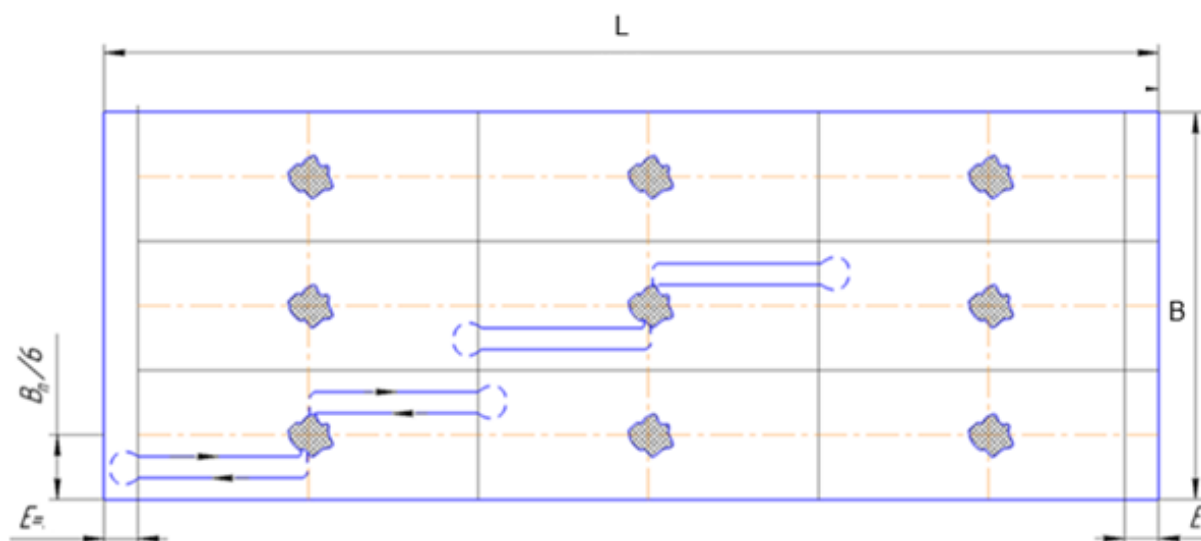
Основными переменными времени цикла, постоянно изменяющимися в течение смены разбрасывателя, выступают время движения с грузом  $t_{д.г}$  и без груза  $t_{х.х}$ , которое в большой степени зависит от расстояния транспортировки, что позволяет представить этот параметр как один из важнейших при определении эксплуатационной производительности разбрасывателей, а соответственно, и всей линии внесения. Многие исследователи отмечают, что увеличение расстояния транспортировки прямо пропорционально снижает производительность линии внесения [39, 40, 46, 130]. Увеличение числа разбрасывателей может повысить производительность производственной линии внесения, но при этом возникает ситуация, когда разбрасыватели будут простаивать в очереди на погрузку, что, в свою очередь, снижает эффективность их работы. Такая ситуация обуславливает применение прямоточной технологии с малым числом разбрасывателей только при небольшом расстоянии транспортировки вносимого материала до обрабатываемого поля, или применение большого количества разбрасывателей при большом расстоянии транспортировки для исключения значительных простоев погрузочных машин и увеличения производительности производственной линии внесения.

Исследованиями установлено, что специализация функций позволяет улучшить основные показатели производственной линии внесения [84]. Специализация функций присуща перевалочной и перегрузочной технологиям.

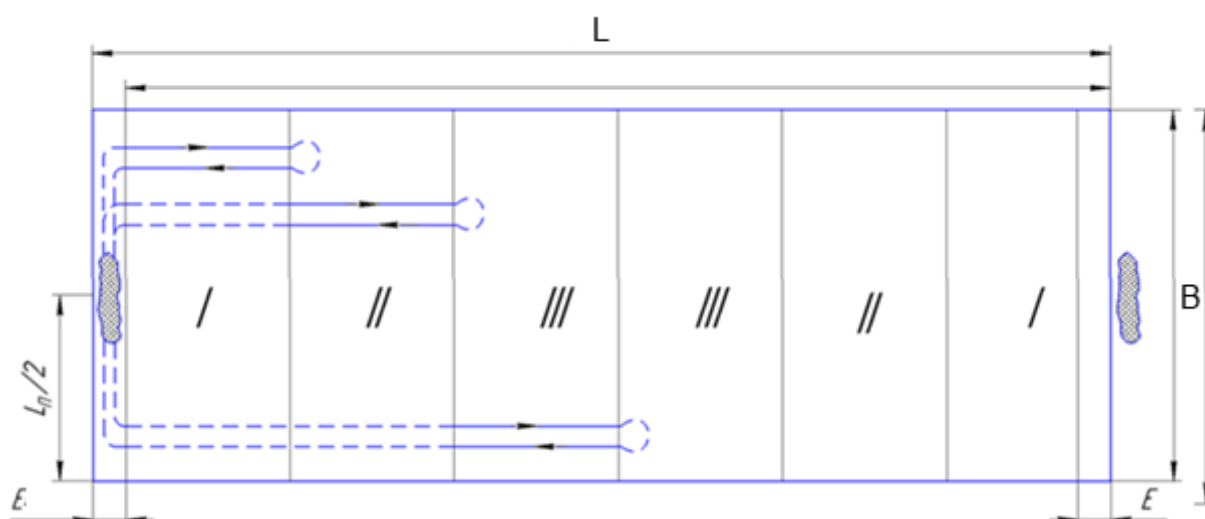
### 1.3.2 Анализ перевалочной технологии внесения удобрений и дефеката

Перевалочная технология включает три звена: погрузочное, транспортное и технологическое. Н.И. Марченко, а также А.Ю. Брюханов, в своих работах отмечали, что схема работы предполагает погрузку вносимого материала из места хранения в транспортное средство, доставку и выгрузку материала на поле или его край, формирование бурта, загрузку в разбрасыватель и распределение по полю (рисунок 1.5) [19, 51].

Перевалочная технология допускает вывоз вносимого материала и формирование буртов заранее, в менее напряженные периоды сельскохозяйственных работ, но из-за этого добавляются дополнительные операции, такие как формирование бурта и загрузка материала в разбрасыватели на поле.



а)



б)

Рисунок 1.5 – Схемы движения разбрасывателей при расположении буртов на поле (а) и на краю поля (б) [62]

Формирование бурта производится с целью уменьшения занимаемой площади вносимым материалом и снижения потерь азота, содержащегося в органических удобрениях. Для формирования бурта требуется погрузчик или бульдозер,

что дополнительно увеличивает затраты труда и средств на внесение. Помимо дополнительных затрат происходит потеря азота в наружном слое бурта, из-за чего, для минимизации наружного слоя, необходимо формировать большие бурты, массой не менее 100 т [75].

Для компенсации потерь азота приходится вносить материал повышенной дозой, что приводит к перерасходу материала и дополнительному объему погрузочных, транспортных и технологических работ. Перевалочная технология характеризуется высокими затратами труда при транспортировке и погрузке вносимого материала, а также требует большой свободной площади для формирования бурта. Из положительных сторон можно отметить отсутствие жесткой связи транспортных и технологических машин. Производительность технологических машин не зависит от производительности транспортных машин, что устраняет простои одних машин из-за недостаточной производительности других.

В описываемой технологии основные затраты труда и средств приходятся на транспортировку материала при большом плече доставки и на формирование бурта и дополнительные погрузочные действия при малом плече. По мнению многих исследователей, перевалочную технологию следует применять при расстоянии транспортировки свыше 3...4 км [44, 66, 74].

Специализация функций предполагает снижение холостых пробегов разбрасывателей за счет уменьшения расстояния транспортировки вносимого материала разбрасывателями. При формировании бурта на краю поля разбрасыватели работают на малом плече доставки, что уменьшает долю транспортных работ и уменьшает время цикла, а при формировании буртов непосредственно на поле, на заранее отведенных участках холостые пробеги сокращаются еще больше.

С.Ш. Велиев указывает, что значительная доля рабочего цикла разбрасывателей приходится на загрузку и рабочий ход [24]. Уменьшение времени цикла позволяет увеличить их количество в течение смены, что потенциально повышает сменную выработку основного звена. Однако следует учитывать, что время чистой работы зависит от исходных условий (доза внесения, грузоподъемность разбрасывателя, рабочая ширина захвата и рабочая скорость), которые практически

не меняются в течение смены. В то же время длительность транспортировки вносимого материала и холостые пробеги агрегата увеличиваются пропорционально расстоянию транспортировки. В своей работе С.Ш. Велиев также упоминал, что увеличение сменной выработки, в частности за счет сокращения времени загрузки и транспортировки, позволяет уменьшить количество задействованных разбрасывателей для обработки требуемой площади в заданные агросроки и, как следствие, увеличить годовую загрузку разбрасывателей, что снижает прямые затраты на их эксплуатацию. Следует отметить, что этот эффект достигается при условии рациональной организации процесса внесения и согласованной работы погрузочных, технологических и транспортных машин. Также известно, что независимо от расстояния транспортировки вносимого материала от места хранения до обрабатываемого поля, производительность разбрасывателей будет практически неизменна, так как они движутся только в пределах обрабатываемого участка поля, а затраты труда и средств на внесение будут различаться из-за того, что меняется объем работ транспортного звена.

### 1.3.3 Анализ перегрузочной технологии внесения твердых органических удобрений и дефекаата

Значительный вклад в совершенствование перегрузочной технологии внес А.П. Дьячков [40, 41, 44]. В отличие от прямоточной и перевалочной технологий перегрузочная технология имеет несколько видов (рисунок 1.3). Часть из них уже не используется ввиду малочисленности или отсутствия технических средств, позволяющих реализовать эти виды данной технологии. Однако для проведения разностороннего анализа стоит рассмотреть и их. Перегрузочная технология занимает промежуточное положение между прямоточной и перевалочной технологиями. Доставка вносимого материала до поля осуществляется самосвальными транспортными средствами, как и в перевалочной технологии. Важным отличием является отсутствие разрыва по времени между доставкой и внесением материала.

Такая организация работ снижает потери азота из твердых органических удобрений и позволяет не занимать обрабатываемое поле на длительный срок перед внесением [41]. Перегрузочную технологию часто осуществляют по схеме: склад – транспортное средство – перегрузчик – разбрасыватель – поле [4].

Анализ перегрузочной технологии начнем с рассмотрения ситуации, при которой перегрузчик на поле отсутствует. В данном виде, обозначенном на рисунке 1.3 под номером 3, для доставки и перегрузки вносимого материала применяются только самосвалы. Для этого чаще всего использовались автомобили-самосвалы с предварительным подъемом кузова марки ГАЗ небольшой грузоподъемности (3,2 т). Возможность прямой перегрузки материала из кузова автомобиля в разбрасыватель позволяет назвать его транспортно-перегрузочным агрегатом. В этом виде технологическая схема будет иметь вид: склад – транспортно-перегрузочное средство – разбрасыватель – поле. Такая схема позволяет исключить перегрузчик, работающий на поле, и снизить потери азота при перевалке органических удобрений. Автомобили за счет своей высокой скорости лучше подходят для перевозки грузов, что удешевляет процесс доставки и уменьшает время оборота транспортного средства. Также возможность перегрузки материала непосредственно в разбрасыватель позволит увеличить практически до максимально возможного значения коэффициент рабочих ходов технологических агрегатов, так как им не придется возвращаться к борту или ряду куч для загрузки. Особенно важно для данного вида перегрузочной технологии определить способ движения разбрасывающих и транспортно-перегрузочных агрегатов, которые зависят от дозы внесения, грузоподъемностей разбрасывателей, места хранения вносимого материала и многих других факторов. Неверно выбранный способ движения агрегатов не позволит производственной линии работать с наибольшей производительностью, спровоцирует простои распределительных и транспортно-перегрузочных агрегатов. Из недостатков этого вида технологии можно отметить наличие жесткой связи между транспортно-перегрузочными машинами и разбрасывателями. Жесткая связь предполагает наличие простоев транспортно-перегрузочных средств и разбрасы-

вателей в ожидании перегрузки. Наличие жесткой связи требует высокой производительности транспортного звена, что не всегда возможно совместить с рациональными параметрами транспортной линии и из-за этого возрастают затраты на транспортировку.

Невысокая грузоподъемность автомобилей-самосвалов с предварительным подъемом кузова в большинстве случаев не позволяет полностью загрузить даже небольшой разбрасыватель грузоподъемностью 6 т, поэтому приходится ждать загрузки от нескольких автомобилей или работать с неполным кузовом. Даже небольшая масса груза в кузове приводит к тому, что подъем кузова перед разгрузкой повышает центр тяжести, и масса перегружаемого материала может привести к опрокидыванию транспортного средства. Кроме того, такие автомобили обычно плохо приспособлены для движения по полю, из-за чего сильно уплотняют почву и имеют невысокую проходимость. Влажная почва может стать серьезным ограничивающим фактором для применения этого вида доставки и загрузки материала в разбрасыватель.

Следующим видом перегрузочной технологии является способ с применением эстакады (рисунок 1.3, вариант 4). Вносимый материал из хранилища доставляют автомобилями-самосвалами и перегружают в разбрасыватели посредством заезда на специальную эстакаду. В данном виде технологии уже можно применять обычные самосвалы, которые имеют гораздо большее распространение, нежели самосвалы с предварительным подъемом кузова. Применение эстакады позволило использовать самосвалы типа ЗИЛ-ММЗ-4502 с объемом кузова 6 м<sup>3</sup> и полностью загружать шеститонный разбрасыватель одним самосвалом, что значительно сократило время перегрузки [41]. Проблемы, характерные для предыдущего вида технологии, в значительной степени присущи и для описываемой схемы. Несмотря на меньшее время загрузки, наличие жесткой связи также требует высокой производительности транспортной линии для сокращения простоев разбрасывателей в ожидании загрузки. Применение эстакады усложняет организацию работ, поскольку требует разбиения поля на отдельные участки, в центре

которых устанавливается эстакада. Это, в свою очередь, приводит к возникновению холостых пробегов разбрасывателей при движении к эстакаде для загрузки и от нее до обрабатываемого участка. После обработки участка требовалось переместить эстакаду на следующий участок посредством трактора. Помимо сложностей, связанных с определением оптимального размера участков на поле и трудоемкостью перемещения эстакады, существенным недостатком является высокая опасность заезда на нее транспортных средств. Для разгрузки водителю самосвала требуется заехать на нее задним ходом, дождаться подъезда разбрасывателя и разгрузить содержимое кузова в разбрасыватель. В этот момент высока вероятность опрокидывания самосвала.

Следующий вид перегрузочной технологии (рисунок 1.3, вариант 5) предполагает применение автономного перегрузчика при перегрузке на поле [44, 63]. При этом работа машин осуществляется по схеме: склад – транспортное средство – ряд куч – перегрузчик – разбрасыватель – поле. Данный вид перегрузочной технологии предусматривает загрузку транспортных средств в месте хранения вносимого материала, последующую доставку на поле и его укладку в ряды куч. Укладка рядов куч возможна как на поле, так и за его пределами, что позволяет гибко подходить к организации работы производственной линии внесения. При расположении ряда куч на поле можно снизить до минимума холостые переезды разбрасывателей, но существует риск переуплотнения почвы транспортными средствами и автономными перегрузчиками. Недостатками этого вида является добавление еще одного звена погрузочных машин и укладка вносимого материала в относительно малые кучи. При возникновении длительных простоев линии внесения неизбежны потери азота при внесении навоза, связанные с большой площадью поверхности куч. Также работа погрузчиков с относительно небольшими объемами вносимого материала добавляет большое количество сопутствующих операций, таких как подгребание, переезды и зачистка куч [63]. Главное преимущество данного вида перегрузочной технологии перед другими заключается в отсутствии жесткой связи между транспортным и технологическим звеньями. Ряды куч выступают в качестве буфера, позволяя транспортным средствам выгружаться

без необходимости ожидания разбрасывателей. Более того, отказ от эстакады дает возможность использовать любые виды транспортных средств, независимо от их грузоподъемности и типа, включая самосвальные автопоезда и тракторные прицепы. Именно в этом виде рассматривалось применение высокопроизводительного погрузчика ПНД-250 (МПК-Ф-1) в качестве автономного перегрузчика. Суть его работы заключалась в перегрузке уложенных рядов куч в кузов разбрасывателя с предварительным измельчением. Дополнительное измельчение повышает качество распределения материала по поверхности поля и снижает энергозатраты технологических агрегатов на привод рабочих органов. Применение высокопроизводительного погрузчика позволило уменьшить время загрузки разбрасывателей и, соответственно, увеличить долю времени их чистой работы. Как уже отмечалось ранее, несмотря на высокую производительность (200...250 т/ч), эксплуатация осложнена низкой надежностью рабочих органов и невозможностью подбора небольшой массы материала с земли и зачистки куч.

Анализ показателей, присущих для перегрузочной технологии, показал сходство характеров их изменения с изменением параметров перевалочной технологии, так как многие параметры, например, время загрузки вносимого материала в разбрасыватели на поле (для вида технологии с применением автономного перегрузчика), имеют практически одинаковые значения. При этом затраты на транспортные работы могут значительно отличаться, так как в перегрузочной технологии требуется обеспечить производительность транспортной линии не ниже, чем у основного звена. Это сопряжено с увеличением грузоподъемности и количества транспортных средств.

#### 1.4 Перспективы совершенствования технологии внесения твердых органических удобрений и дефеката

В рассмотренных первых двух видах перегрузочной технологии существенное влияние на производительность производственной линии оказывает жесткая связь между технологическими и транспортными машинами, провоцирующая их

взаимные простои. При этом сократить затраты на транспортные работы не представляется возможным из-за технических ограничений подъемных механизмов, установленных на транспортных средствах, и эстакады. Закономерным результатом стремления к оптимизации транспортных процессов стало появление новых технических решений, среди которых особого внимания заслуживает прицеп-перегрузчик, который позволяет объединить положительные стороны рассмотренных технологий и одновременно исключить ряд присущих им недостатков.

Следует отметить, что транспортно-перегрузочные агрегаты уже получили широкое распространение при выполнении сборочно-распределительных операций, таких как: уборка и посев зерновых, уборка кукурузы на силос и трав на сенаж, уборка свеклы, посадка и уборка картофеля [10, 50, 54, 57, 58, 72, 119, 122]. Многие исследователи, такие как В.Е. Таркинский и А.Ю. Измайлов отмечают, что основное преимущество применения прицепа-перегрузчика в технологии внесения твердых органических удобрений и донного осадка заключается в возможности совмещения высокопроизводительной загрузки разбрасывателей с отсутствием необходимости формировать ряды куч на поле и использовать отдельное погрузочное звено. Появление выгрузных адаптеров позволяет использовать универсальные прицепы не только как разбрасыватели, но и как прицепы-перегрузчики, совмещающие транспортную и перегрузочную функции. Такие прицепы доставляют материал к разбрасывателям и загружают их непосредственно на поле. Исходя из физико-механических характеристик навоза и донного осадка, можно предположить, что наиболее подходящими выгрузными устройствами для их перегрузки являются ленточные транспортеры. При этом ленточные транспортеры, устанавливаемые на универсальные прицепы, не проектировались для перегрузки таких специфических материалов, как твердые органические удобрения и донный осадок. Данные материалы характеризуются повышенной влажностью (до 45%), неоднородным гранулометрическим составом и наличием волокнистых включений, что в процессе перегрузки приводит к налипанию материала на механизмы натяжения и приводной барабан транспортерной ленты, а также к его просыпанию через не-

герметичные сопряжения. Это снижает надежность работы, уменьшает производительность и увеличивает потери материала. Следовательно, для обеспечения эффективной работы прицепа-перегрузчика в составе предлагаемой технологической линии требуется конструктивная доработка его выгрузного устройства, направленная на исключение контакта перегружаемого материала с вращающимися элементами и минимизацию потерь материала при перегрузке.

Усилия производителей универсальных прицепов направлены на постоянное расширение функционала выпускаемой техники, что позволяет увеличить годовую загрузку таких прицепов. В настоящее время существует потребность в расширении использования универсальных прицепов в позднесенний и ранневесенний периоды, когда уже выполнены основные полевые работы. Показанная на рисунке 1.6 гистограмма машиноиспользования подтверждает потребность в дополнительной загрузке универсальных прицепов.

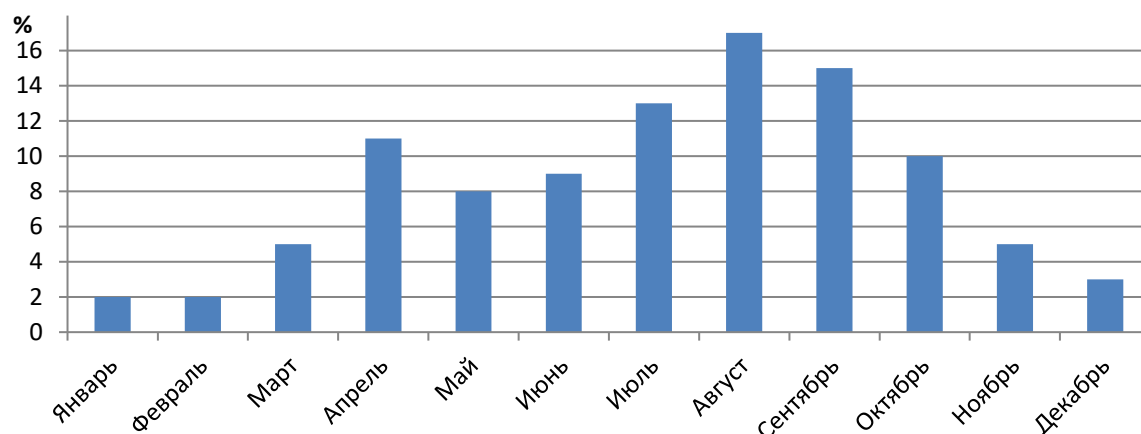


Рисунок 1.6 – Гистограмма машиноиспользования универсальных прицепов в течение года [94]

С учетом вышеизложенного, в качестве «базовой» машины, применяемой при их внесении, далее будут рассматриваться универсальные прицепы с доработанным выгрузным устройством ленточного типа. Такой выбор обусловлен тем, что они оснащаются толкающей стенкой, способной полностью выгружать содержимое кузова, и представлены широким модельным рядом с разной грузоподъемностью. Однако важно учитывать, что использование прицепа-перегрузчика не

исключает жесткую связь, характерную для перегрузочной технологии, вследствие чего могут возникать взаимные простои транспортно-перегрузочных и технологических агрегатов. Влияние простоев на выполнение сборочно-распределительных операций исследовано многими авторами [39, 74, 106, 107, 111], однако единая методика определения составов производственной линии с учетом простоев отсутствует. Нередко исследователи применяют теорию массового обслуживания для определения рациональных составов рабочих звеньев [44, 62, 63], позволяющую учесть стохастический характер работы машин при условии отсутствия последействия, когда выполненный цикл одной машины не влияет на цикл другой, но жесткая связь между технологическими и транспортно-перегрузочными машинами накладывает определенные ограничения на применение этого математического аппарата. В настоящее время расчет таких технологических линий выполняется преимущественно по детерминированным параметрам без учета особенностей линии и простоев машин. Отсутствует система математических моделей, связывающих в единую модель грузоподъемность машин, производительность выгрузного устройства, физико-механические свойства материала и расстояние транспортировки. Также не исследованы факторы, влияющие на определение способов движения распределяющих и транспортно-перегрузочных агрегатов в условиях, при которых разбрасыватели не совершают холостых пробегов [44].

С учетом выявленных ограничений существующих методик и конструктивных особенностей прицепов-перегрузчиков можно выделить два ключевых направления, требующих отдельного рассмотрения [48]. Первое направление связано с недостаточной изученностью выгрузного устройства ленточного типа при работе с твердыми органическими удобрениями и дефекатом. Существующие исследования посвящены преимущественно перегрузке менее плотных и сыпучих материалов (зеленой массы, щепы, овощей). С точки зрения классических методик тягового расчета ленточных конвейеров принципиальная работоспособность выгрузного устройства не нарушается, однако производительность перегрузки при работе с материалами высокой насыпной плотности может существенно снизиться [49, 114]. При этом экспериментальные данные по энергозатратам и просыпаемости при перегрузке дефеката и подстилочного навоза отсутствуют, что

обуславливает необходимость их получения. Второе направление относится к выбору адекватного математического аппарата для описания функционирования производственной линии с жесткой связью машин. Для рассматриваемой технологии с использованием прицепа-перегрузчика интенсивный и сложный характер взаимодействия технологических и транспортно-перегрузочных агрегатов не позволяет пренебречь последствием, так как оно будет существенно влиять на результат расчетов. В этом случае наиболее перспективным подходом является построение имитационной модели, которая позволит учесть стохастический характер элементов рабочего цикла применяемых агрегатов, а также последствие каждого выполненного рабочего цикла [69].

Имитационное моделирование все чаще применяют при расчете технологических процессов в сельском хозяйстве. Данным направлением активно занимаются П.А. Михайленко, А.В. Орлянский, А.С. Иванов и другие [47, 52, 73, 78]. В их работах предлагаются модели, рассматривающие процессы функционирования уборочно-транспортных комплексов и подбора травяной массы с её прессованием, где ключевым является отражение жесткой связи машин через пошаговое воспроизведение циклов, характерных для описываемых операций. Имитационные модели позволяют учитывать последствие, при котором простои агрегатов влияют на время последующих циклов, а также оценивать влияние стохастического характера работы на производительность линии и расчет оптимального количества транспортных средств. Таким образом, для эффективного внедрения прицепов-перегрузчиков в технологию внесения твердых органических удобрений и дефеката необходимо решить комплекс взаимосвязанных задач: экспериментально обосновать работоспособность ленточного выгрузного устройства при работе с данными материалами и разработать имитационную модель, адекватно описывающую взаимодействие машин в производственной линии с учетом последствия и позволяющую определить их рациональные параметры.

## 1.5 Выводы

Подстилочный навоз и дефекат рационально утилизировать путем внесения в качестве твердого органического удобрения и мелиоранта соответственно.

Ввиду схожести физико-механических показателей этих двух материалов для их внесения могут применяться разбрасыватели твердых органических удобрений, при этом основное отличие будет заключаться в дозе внесения. Подстилочный навоз обычно вносят сравнительно большими дозами – 20...60 т/га, а в редких случаях и больше, дефекат же обычно вносят дозами от 5 до 25 т/га.

Благодаря массовому применению рабочих органов разбрасывателей с вертикальными роторами появилась возможность внесения материала в большем диапазоне, чего нельзя было достичь с горизонтальными барабанами. Несмотря на увеличение рабочей ширины захвата до 10...12 м, дальнейшего расширения этого показателя в настоящее время не наблюдается. Таким образом, большинство производителей разбрасывателей для повышения производительности увеличивают их грузоподъемность. Повышение грузоподъемности негативно влияет на почву, вызывая ее переуплотнение. С ростом эксплуатационной массы разбрасывателя увеличивается и масса агрегируемого трактора, а рабочая ширина захвата остается неизменной.

Перспективным является вариант перегрузочной технологии с применением прицепов-перегрузчиков. Наиболее подходящими для перегрузки твердых органических удобрений и дефеката представляются универсальные прицепы – направление сельскохозяйственной техники, которое сейчас активно развивается в нашей стране. Также существуют выгрузочные устройства, способные перегружать вносимый материал в разбрасыватели. Эти устройства, как правило, представляют собой ленточные конвейеры, которые требуют минимальной доработки для их использования при перегрузке твердых органических удобрений и дефеката.

В научных работах, посвященных совершенствованию технологий внесения твердых органических удобрений и дефеката, не рассматривается применение прицепов-перегрузчиков, которые позволяют объединить положительные стороны разных видов перегрузочной технологии и тем самым повысить производительность линии внесения и уменьшить удельные затраты на внесение твердых органических удобрений и дефеката. Отсутствуют аналитические зависимости для определения параметров технических средств и производственной линии вне-

сения с применением прицепов-перегрузчиков, пока еще не изучены способы движения распределяющих и транспортно-перегрузочных агрегатов, обеспечивающие наибольшую эффективность работы производственной линии внесения с использованием прицепов-перегрузчиков.

В настоящее время существует необходимость разработать методику определения рациональных параметров комплекса машин для внесения твердых органических удобрений и дефеката по перегрузочной технологии.

## 2 Теоретические исследования технологии внесения твердых органических удобрений и дефеката с использованием прицепов-перегрузчиков и обоснование рациональных параметров технических средств

### 2.1 Схема организации работы агрегатов по предлагаемой технологии

На основании выводов по результатам обзора технологий и машин, изложенных в предыдущем разделе, было установлено, что наиболее перспективным является вариант перегрузочной технологии с применением прицепов-перегрузчиков. На соответствующий способ получен патент № 2832329 РФ. Предполагается, что внесение твердых органических удобрений или дефеката с использованием прицепа-перегрузчика осуществляют следующим образом. Прицеп-перегрузчик загружается погрузчиком у места хранения вносимого материала (бурт или навозохранилище) и движется к разбрасывателям  $P_1$  и  $P_2$ , работающим на поле (рисунок 2.1). В данном случае предположим, что на поле работают два разбрасывателя. Прицеп-перегрузчик движется к полю по полевым дорогам, а по полю – только по магистрально-поворотным полосам для снижения переуплотненной площади поля.

При использовании предлагаемой технологии разбрасывателям предпочтительнее осуществлять движение по полю челночным способом, согласно схеме, приведенной на рисунке 2.1. При этом способе движения после распределения половины кузова разбрасыватель разворачивается и разбрасывает оставшуюся половину кузова, таким образом, упрощается организация взаимодействия разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков. Следует отметить, что если загружать разбрасыватели после полного опорожнения (на другой магистрально-поворотной полосе), то гораздо сложнее организовать процесс доставки и перегрузки вносимого материала. Повышается вероятность простоев разбрасывателей ввиду несогласованных действий с прицепами-перегрузчиками.

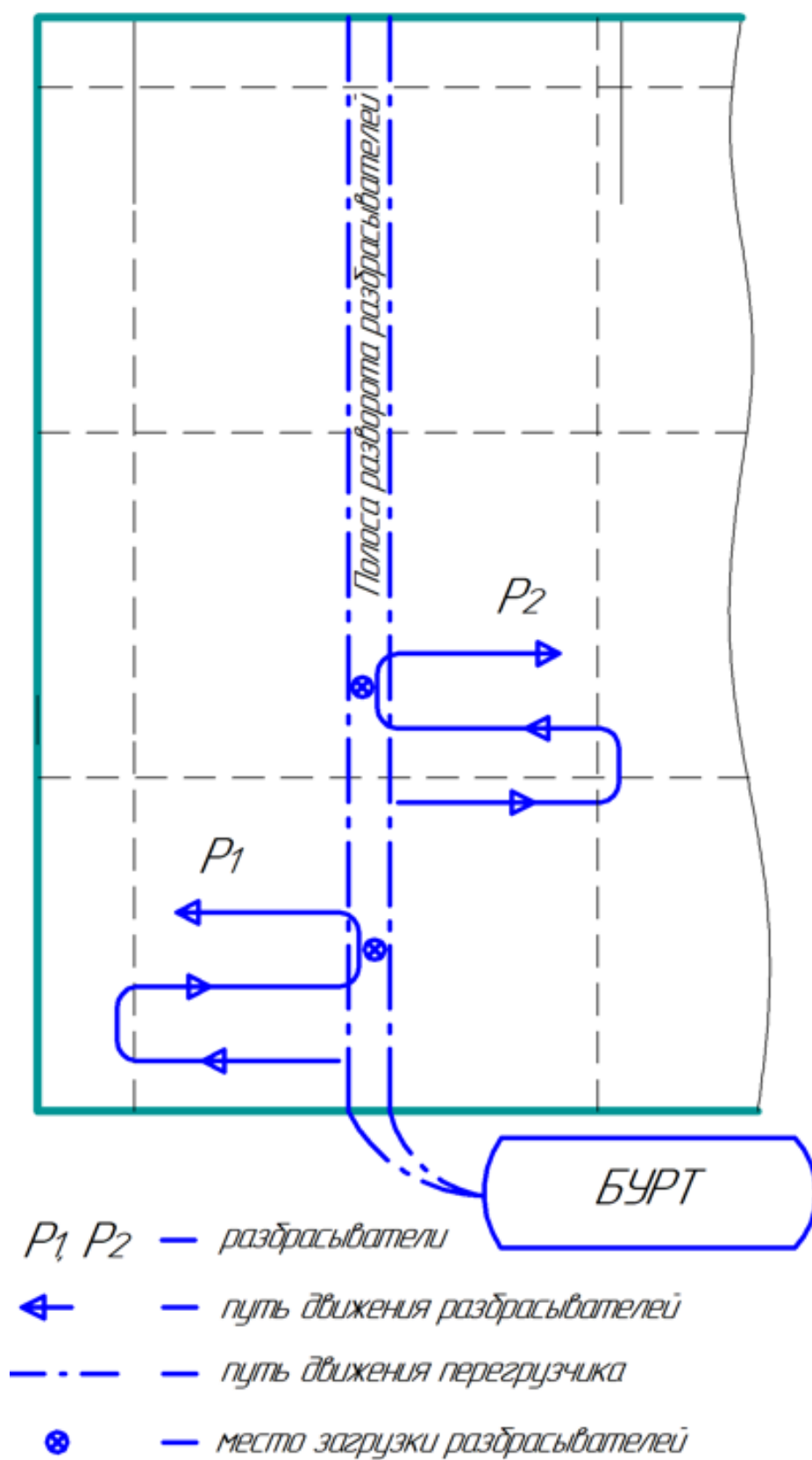


Рисунок 2.1 – Схема работы агрегатов на поле по предлагаемой технологии при внесении твердых органических удобрений и дефеката с применением прицепа-перегрузчика

Перегрузка вносимого материала производится на поле по принципу «из кузова в кузов». Место перегрузки определяется рабочей шириной захвата, а также радиусами поворотов и разворотов технологических и транспортно-перегрузочных агрегатов. Нет необходимости закреплять место перегрузки за конкретными точками на поле, так как оно перемещается с каждым циклом разбрасывателя на расстояние, равное двум величинам рабочей ширины захвата разбрасывателя ( $2B_p$ ).

Если прицеп-перегрузчик прибыл к месту перегрузки раньше разбрасывателя, то он дожидается завершения рабочего хода разбрасывателя и выезда разбрасывателя на магистрально-поворотную полосу для осуществления перегрузки. В ситуации, когда разбрасыватель прибыл к месту перегрузки раньше прицепа-перегрузчика, разбрасыватель остается на магистрально-поворотной полосе в ожидании подъезда прицепа-перегрузчика.

Для перегрузки вносимого материала прицепу-перегрузчику требуется расположиться параллельно разбрасывателю, перевести выгрузное устройство в рабочее положение и запустить выгрузное устройство. Если с прицепом-перегрузчиком работает один разбрасыватель (равной грузоподъемности с прицепом-перегрузчиком), то прицеп-перегрузчик сразу после перегрузки возвращается на загрузку, а в случае работы с несколькими разбрасывателями транспортно-перегрузочный агрегат совершает переезд до следующего места перегрузки и повторяет вышеописанные действия [98].

Как показывает опыт эксплуатации, при совместной работе нескольких разбрасывателей необходимо соблюдать интервал между ними, который должен составлять не менее 50 м, в противном случае возрастает риск повреждения рядом работающего агрегата из-за попадания в него разбрасываемого материала.

Предложенный вид перегрузочной технологии (рисунок 2.1) отличается от других технологий тем, что в нем применяются прицепы-перегрузчики. При этом разбрасыватели перемещаются по участку челночным способом, а прицепы-перегрузчики движутся по полю только по магистрально-поворотным полосам. Это создает жесткую технологическую связь между агрегатами, при которой время

ожидания перегрузки становится значимым фактором, ограничивающим производительность технологической линии внесения. Данная схема (рисунок 2.1) служит основой для построения математической модели, где формализованы временные циклы и состояния всех агрегатов, применяемых в технологической линии внесения.

## 2.2 Теоретические исследования параметров линии внесения твердых органических удобрений и дефеката с применением прицепов-перегрузчиков

Применение погрузочных, транспортно-перегрузочных и технологических машин при внесении твердых органических удобрений и дефеката характеризуется множеством показателей, которые в конечном счете влияют на эффективность функционирования линии внесения. Все эти показатели, в свою очередь, можно свести в комплекс взаимосвязанных факторов, которые могут быть классифицированы следующим образом:

- технические факторы, которые зависят от конструктивных параметров технологических машин (рабочая ширина захвата, рабочая скорость, грузоподъемность, время поворотов и разворотов и т.д.) и применяемой технологии (время, затрачиваемое на второстепенные операции, связанные с перевозкой вносимого материала, формированием бурта и т.д.), а также связанных с надежностью узлов и механизмов технологических машин;
- производственные факторы, зависящие от необходимого объема вносимого материала, величины обрабатываемых площадей, времени загрузки и простоя технологических машин, обеспеченности требуемой техникой, индивидуального или общественного уровня производства, типичности условий обрабатываемого поля и т.д.;
- нормообразующие факторы, зависящие от воздействия природно-хозяйственных условий (размеры и форма поля, расстояние транспортировки вносимого материала, длина гона, вид покрытия дорожной сети и т.д.);
- агротехнические факторы, которые зависят от дозы внесения материала,

неравномерности распределения, величины зоны перекрытия;

- организационные факторы, определяемые качеством управления (соотношение погрузочных, транспортных и технологических средств при внесении материала, своевременность принятия решений и т.д.);

- квалификация механизаторов – трудно измеряемый фактор, характеризующий качество и скорость выполнения операций.

Каждый из перечисленных факторов применения технологических машин, участвующих в процессе внесения, описывается множеством показателей, изменяющихся в известных пределах. Взаимосвязь перечисленных факторов заключается в том, что многие показатели могут быть описаны в общем виде только вероятностными методами, но в конкретных ситуациях показатели будут иметь только дискретные значения [24], например грузоподъемность транспортно-перегрузочных и технологических машин – величина постоянная, но фактический вес перевозимого груза зависит от насыпной массы груза, его физико-механических свойств и других факторов, то есть масса перевозимого груза будет каждый раз отличаться. То же самое касается и других показателей: рабочей ширины захвата, транспортной и рабочей скоростей, величины зоны перекрытия, качества распределения материала, коэффициента использования времени смены, расстояния транспортировки и т.д. [24].

Производительность технологических машин – ключевой показатель линии внесения, от достоверности определения которого зависят результаты оптимизации параметров всей технологической линии внесения материала.

Производительность технологических машин, как правило, выражается в гектарах обработанной площади за час работы, но производительность технических средств в линии внесения твердых органических удобрений и дефеката удобнее выражать в тоннах за час работы. Выражение производительности технологических машин в линии внесения в таких единицах измерения позволяет сравнивать производительность всех технических средств, таких как погрузочные, транспортно-перегрузочные и технологические агрегаты, участвующих в производственном процессе [24].

Подробно и достоверно спрогнозировать производительность технологических машин аналитическим способом позволяет построение математической модели. Для этого следует выявить характер взаимосвязи вышеперечисленных параметров, описывающих условия эксплуатации комплекса технических средств и параметров технологической линии внесения.

Процесс внесения твердых органических удобрений и дефеката представляет собой последовательность повторяющихся рабочих циклов. Определение времени рабочего цикла разбрасывателя по предлагаемой технологии будет отличаться от известных методик из-за того, что разбрасывателю не требуется совершать холостые переезды для загрузки кузова. При этом возникает время ожидания перегрузки, зависящее от двух факторов: частоты прибытия прицепов-перегрузчиков в зону перегрузки и продолжительности маневрирования разбрасывателя при подъезде к выгрузному устройству прицепа-перегрузчика. Таким образом, время цикла разбрасывателя, осуществляющего движение челночным способом по предлагаемой технологии, будет включать в себя следующие элементы:

- время перегрузки  $t_{п.р}$ , с;
- время разворотов и поворотов  $t_{пов90}$  и  $t_{пов180}$ , с;
- время чистой работы (непосредственно разбрасывания, основное время)  $t_r$ , с;
- время маневрирования  $t_{маневр}$ , с;
- время ожидания разбрасывателем начала перегрузки  $t_{ож}^{р-пп}$ , с.

Процесс перегрузки удобрений представляет собой согласованное взаимодействие между прицепом-перегрузчиком и разбрасывателем при подъезде прицепа-перегрузчика к разбрасывателю (или наоборот). Взаимным маневрированием машины располагаются параллельно друг другу для беспрепятственной перегрузки материала из прицепа-перегрузчика в разбрасыватель. После завершения перегрузки, о которой, например, может свидетельствовать звуковой сигнал от прицепа-перегрузчика, механизатор начинает поворот в сторону загона.

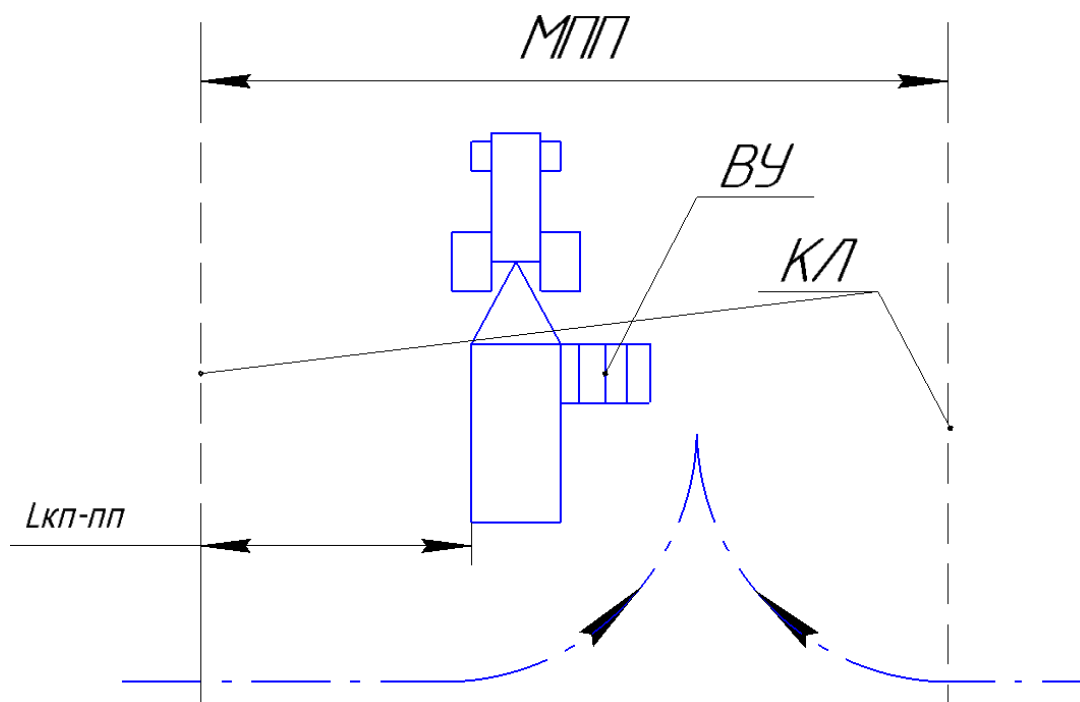
Время, затрачиваемое на развороты и повороты, существенно зависит от

конструктивных особенностей сельскохозяйственной техники. Так, например, тракторы тягового класса 1,4 имеют меньший радиус поворота, чем тракторы тягового класса 3, а они, в свою очередь, меньший, чем тракторы тягового класса 5. Это обуславливается меньшей колесной базой и другими конструктивными особенностями [117]. Рабочая ширина захвата агрегатов напрямую влияет на пространство, необходимое для выполнения маневра, чем больше рабочая ширина захвата и длина агрегата, тем больший путь проходит агрегат при развороте. После совершения разворота или поворота технологический агрегат приступает к работе.

Время работы (оно же основное время) определяется фундаментальными принципами работы сельскохозяйственной техники. В первую очередь определяется длина рабочего пути, которая зависит от дозы внесения материала, рабочей ширины захвата и грузоподъемности разбрасывателя [130]. После определения длины рабочего пути устанавливается рабочая скорость технологического агрегата, позволяющая распределить вносимый материал с требуемой равномерностью. При работе челночным способом половина кузова распределяется при движении в одну сторону, а вторая половина – при движении в обратную сторону.

После окончания распределения и выезда на магистрально-поворотную полосу начинается этап маневрирования. Маневрирование заключается в точном расположении кузова разбрасывателя под выгрузным устройством. Маневрирование – обоюдный процесс, в котором может принимать участие как транспортно-перегрузочный, так и технологический агрегат, суть этого процесса заключается в таком расположении технических средств по отношению друг к другу, которое позволяет совершить процесс перегрузки. Маневрирование технологического агрегата начинается обычно тогда, когда прицеп-перегрузчик уже дожидается его для совершения перегрузки, при этом выгрузное устройство уже приведено в рабочее положение. При взаимном расположении машин механизатору технологического агрегата необходимо расположить кузов разбрасывателя точно под выгрузным устройством прицепа-перегрузчика, соблюдая необходимый интервал и дистанцию до транспортно-перегрузочного агрегата. Как правило, выгрузное

устройство на большинстве сельскохозяйственных машин расположено с одной стороны, например, если выгрузное устройство располагается справа по ходу движения, то схема подъезда разбрасывателей к транспортно-технологическому агрегату будет соответствовать рисунку 2.2.



ВУ – выгрузное устройство прицепа-перегрузчика; КЛ – контрольная линия, МПП – магистрально-поворотная полоса;  $L_{кп-пп}$  – расстояние от контрольной полосы до прицепа-перегрузчика

Рисунок 2.2 – Схема подъезда разбрасывателей к транспортно-перегрузочному агрегату с разных сторон

Подъезжая к прицепу-перегрузчику слева (рисунок 2.2), технологический агрегат начнет поворот для подъезда под выгрузное устройство немного позже из-за дополнительного холостого хода, который равен сумме дистанции от контрольной линии до прицепа-перегрузчика  $L_{кп-пп}$  и ширины самого прицепа-перегрузчика с разложенным выгрузным устройством.

Если же после окончания работы разбрасывателя прицеп-перегрузчик еще не прибыл, то начинается время ожидания разбрасывателем начала перегрузки. Это может происходить по различным причинам, которые рассмотрим далее.

Кроме этого, можно отметить, что к ожиданию подъезда прицепа-перегрузчика можно добавить и ожидание отъезда прицепа-перегрузчика. Это связано с тем, что существует опасная зона у задней части разбрасывателя, в которой повышен риск повреждения трактора и прицепа-перегрузчика твердыми частицами вносимого материала при работе разбрасывателя. Время ожидания отъезда будет рассчитываться как разница времени отъезда прицепа-перегрузчика на безопасное расстояние и время поворота разбрасывателя на 90 градусов.

Учитывая все описанные составляющие, время рабочего цикла разбрасывателя определим следующим образом:

$$t_{\text{ц}}^{\text{р}} = t_{\text{п.р}} + 2t_{\text{пов90}} + t_{\text{пов180}} + t_{\text{р}} + t_{\text{маневр}} + t_{\text{ож}}^{\text{р-пп}}, \quad (2.1)$$

где  $t_{\text{п.р}}$  – продолжительность перегрузки, с;

$t_{\text{пов90}}$  – время поворота на 90 градусов, с;

$t_{\text{пов180}}$  – время разворота на 180 градусов, с;

$t_{\text{р}}$  – время чистой работы разбрасывателя, с;

$t_{\text{маневр}}$  – время на маневрирование разбрасывателя, с;

$t_{\text{ож}}^{\text{р-пп}}$  – время ожидания разбрасывателем начала перегрузки и отъезда прицепа-перегрузчика, с.

Можно заметить, что на время рабочего цикла разбрасывателя, а значит, и на его производительность, оказывает влияние интервал поступлений прицепов-перегрузчиков к разбрасывателю. Это отразится на времени ожидания разбрасывателем начала перегрузки  $t_{\text{ож}}^{\text{р-пп}}$ .

Далее рассмотрим время цикла транспортно-перегрузочного агрегата  $t_{\text{ц}}^{\text{пп}}$ , которое состоит из следующих элементов:

- время перегрузки материала в кузов разбрасывателя  $t_{\text{п.р}}$ , с;
- время переезда между местами перегрузки  $t_{\text{пер}}$ , умноженное на количество переездов  $(n-1)$ , зависящее от количества разбрасывателей, загружаемых одним прицепом-перегрузчиком  $n$ ;
- время холостого хода к месту погрузки  $t_{\text{х.х.}}$ , с;

- времени ожидания в очереди при погрузке  $t_{\text{оч}}^{\text{пп-п}}$ , с;
- время погрузки материала в кузов прицепа-перегрузчика  $t_{\text{п.пп}}$ , с;
- время движения с грузом к месту перегрузки  $t_{\text{д.г.}}$ , с [12];
- время ожидания прицепом-перегрузчиком начала перегрузки  $t_{\text{ож}}^{\text{пп-р}}$ , с.

Как уже говорилось выше, время перегрузки материала – это общее время для прицепа-перегрузчика и разбрасывателя, но с одним лишь исключением, что прицеп-перегрузчик может совершать несколько перегрузок за свой цикл. Количество перегрузок в рабочем цикле прицепа-перегрузчика пропорционально соотношению грузоподъемности прицепа-перегрузчика и разбрасывателя. Также от числа перегрузок зависит время, затрачиваемое на переезды. Время переездов – это время, приходящееся на переезды между разбрасывателями в процессе цикла прицепа-перегрузчика. Как уже отмечалось ранее, ввиду опасности повреждения трактора и прицепа-перегрузчика твердыми частицами вносимого материала в процессе его распределения, разбрасыватели работают на некотором удалении друг от друга (не менее 50 м), а значит, это расстояние следует преодолевать прицепу-перегрузчику для загрузки следующего разбрасывателя. Учитывая, что расстояние переезда относительно всего остального пути транспортировки невелико, то время переезда будет зависеть от мощности агрегируемого трактора и массы агрегата.

После полной разгрузки кузова прицеп-перегрузчик возвращается на погрузку. Время холостого хода начинается с разворота транспортно-перегрузочного агрегата и продолжается до остановки для погрузки.

Время погрузки материала в кузов прицепа-перегрузчика зависит от объема кузова  $V_{\text{пп}}$  и от грузоподъемности прицепа-перегрузчика  $Q_{\text{пп}}$ , а также от производительности погрузочной машины. Как правило, погрузочной машиной является фронтальный погрузчик. Это машина циклического действия, а для определения ее производительности нужно знать объем ковша  $V_{\text{ковш}}$  и грузоподъемность  $Q_{\text{п}}$  погрузчика, а также время его рабочего цикла. Время цикла погрузчика зависит как

от его конструктивных и технических особенностей, так и от параметров загружаемого им прицепа-перегрузчика. При прочих равных параметрах на время погрузки может значительно повлиять высота бортов прицепа-перегрузчика, организация работы, характеристики материала и т.д.

Помимо времени, затрачиваемого на погрузку материала, существует вероятность нахождения транспортно-перегрузочного агрегата в очереди на погрузку. Очередь может возникнуть при большом количестве прицепов-перегрузчиков в линии внесения либо при малом расстоянии транспортировки. Ожидание негативно сказывается на времени рабочего цикла прицепа-перегрузчика, а следовательно, и на его производительности.

Движение с грузом отличается от холостого хода значительно большей массой прицепа-перегрузчика, которая влияет на интенсивность разгона и торможения транспортно-перегрузочного агрегата. Кроме того, большая масса прицепа-перегрузчика может ограничивать максимальную скорость движения, определяемую техническими параметрами агрегатируемого трактора. Как правило, дорожные условия не позволяют развить максимальную скорость. Путь движения с грузом также может отличаться от холостого пути, например, если организовано круговое движение по параллельным дорогам во избежание разъездов в узких участках дорог или других возникающих сложностей при разъезде. Таким образом, кроме меньшей скорости транспортировки по сравнению с холостым ходом, следует учитывать фактический путь прицепа-перегрузчика к месту перегрузки.

Второй вид простоя прицепа-перегрузчика может случиться, когда он уже прибыл, а разбрасыватель еще не закончил свой цикл, что также негативно сказывается на рабочем цикле транспортно-перегрузочного агрегата.

Учитывая сказанное выше, время цикла прицепа-перегрузчика определим так

$$t_{\text{ц}}^{\text{мп}} = t_{\text{п.мп}} + t_{\text{д.г.}} + nt_{\text{п.р}} + (n-1)t_{\text{пер}} + t_{\text{х.х}} + t_{\text{ож}}^{\text{мп-р}} + t_{\text{оч}}^{\text{мп-п}}. \quad (2.2)$$

На основе вышеизложенного можно предположить, что время ожидания перегрузки прицепа-перегрузчика и время ожидания разбрасывателя – это взаимосвязанные части одного процесса. Суть в том, что прицеп-перегрузчик не может

ожидать, пока его ждет разбрасыватель и наоборот. Тенденцию изменения времени ожидания перегрузки можно отобразить следующим графиком (рисунок 2.3).

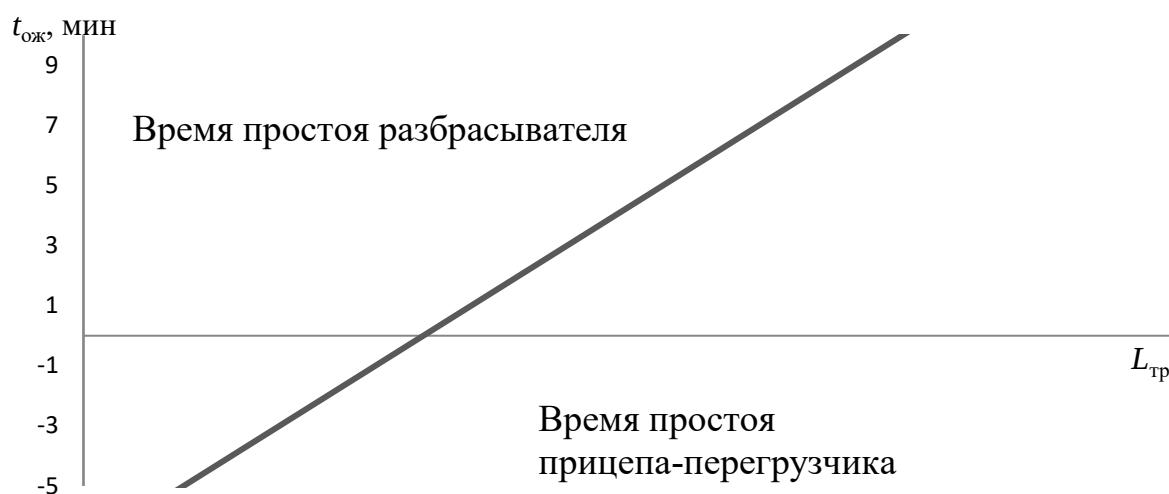


Рисунок 2.3 – Зависимость времени ожидания перегрузки  $t_{ож}$  между прицепами-перегрузчиками и разбрасывателями от расстояния транспортировки  $L_{тр}$

Часть графика (рисунок 2.3), расположенная под осью расстояния транспортировки, соответствует ожиданию прицепом-перегрузчиком перегрузки, а над осью – ожиданию перегрузки разбрасывателем. Эта зависимость показывает, как время ожидания «перетекает» от транспортно-перегрузочных машин к технологическим. В свою очередь, время ожидания прицепов-перегрузчиков в очереди на погрузку наиболее вероятно при крупногрупповой работе, когда работают несколько прицепов-перегрузчиков. Также время ожидания в очереди будет зависеть от времени цикла погрузчика и расстояния транспортировки вносимого материала, как основной переменной, влияющей на интенсивность прибытия прицепов-перегрузчиков под погрузку.

Время цикла работы погрузочного средства  $t_{ц}^{п}$  будет включать:

- время погрузки  $t_{п}$ , с;
- время ожидания погрузки  $t_{ож}^{п-пп}$ , с;
- время технологического обслуживания  $t_{тех}^{п}$ , с.

Время погрузки описано в цикле работы прицепа-перегрузчика, поэтому не будем подробно останавливаться на нем. Время ожидания погрузки  $t_{ож}^{п-пп}$  – это время между прибытиями прицепов-перегрузчиков под погрузку, которое зависит от нескольких факторов: количества прицепов-перегрузчиков, работающих в линии внесения, и их грузоподъемности, а также от расстояния транспортировки вносимого материала – чем больше прицепов-перегрузчиков и чем меньше расстояние транспортировки, тем меньше будет время ожидания погрузчиком прицепа-перегрузчика.

Время технологического обслуживания  $t_{тех}^{п}$  заключается в сгребании оставшегося материала после загрузки прицепа-перегрузчика в «общую кучу» и очистку ковша от налипшего материала. Эта операция может происходить во время ожидания прицепов-перегрузчиков, а значит, она может не учитываться в цикловом времени. Однако при высокой загрузке погрузчика технологическое обслуживание будет попадать в цикловое время погрузчика, тем самым снижая его производительность, поэтому будем считать, что это время находится во времени цикла. Таким образом, время цикла погрузчика составляет

$$t_{ц}^{п} = t_{п.пп} + t_{ож}^{п-пп} + t_{тех}^{п} . \quad (2.3)$$

Основываясь на этом, работу погрузочных, транспортно-перегрузочных и технологических машин можно описать с помощью формул (2.1) – (2.3) в виде циклограмм процесса внесения – рисунки 2.4 – 2.6.

Совместная работа при наличии жесткой связи погрузочных, транспортно-перегрузочных и технологических машин предполагает несколько видов ожидания:

- простой разбрасывателя в ожидании прицепа-перегрузчика  $t_{ож}^{р-пп}$ , с;
- простой прицепа-перегрузчика в ожидании разбрасывателя  $t_{ож}^{пп-р}$ , с;
- простой погрузчика в ожидании прицепа-перегрузчика  $t_{ож}^{п-пп}$ , с;
- простой прицепа-перегрузчика в ожидании освобождения погрузчика  $t_{оч}^{п-пп}$ , с.

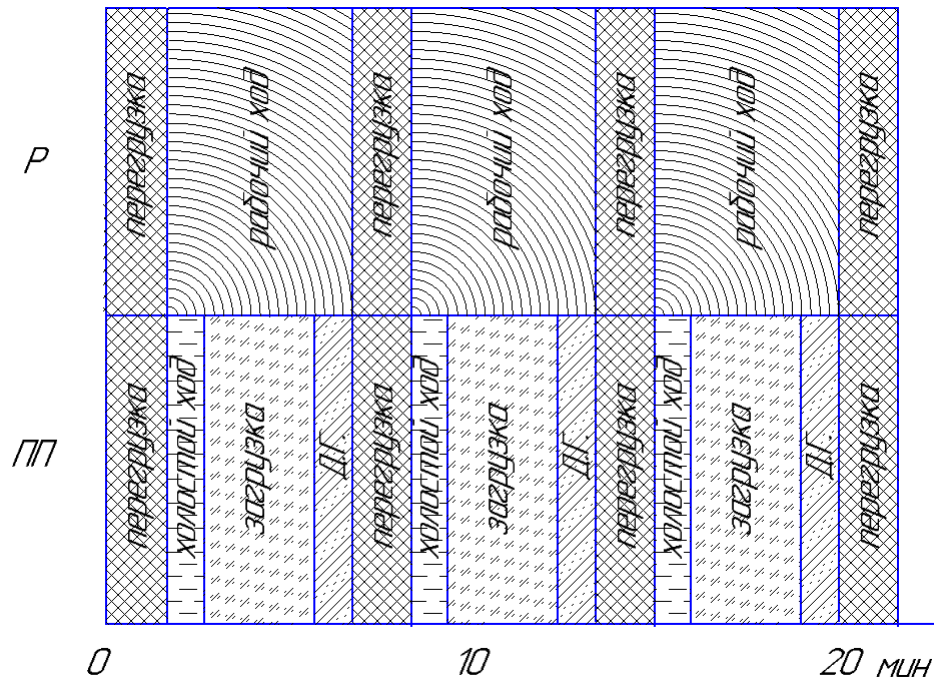


Рисунок 2.4 – Циклограмма процесса взаимодействия прицепа-перегрузчика и разбрасывателя при равном времени рабочего цикла

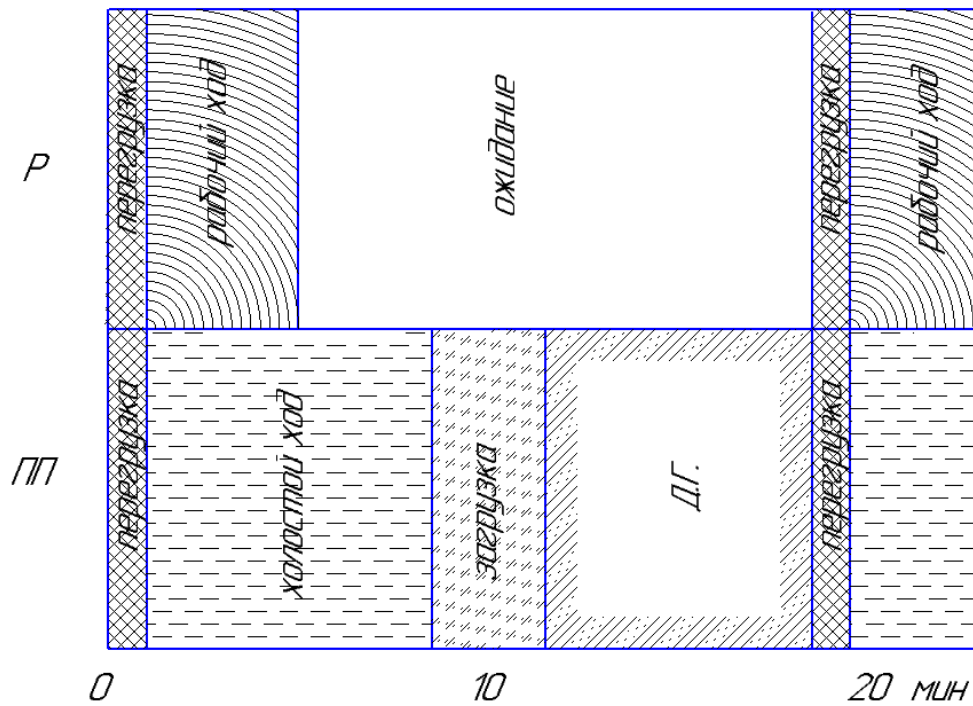


Рисунок 2.5 – Циклограмма процесса взаимодействия прицепа-перегрузчика и разбрасывателя при времени рабочего цикла прицепа-перегрузчика большем, чем время рабочего цикла разбрасывателя

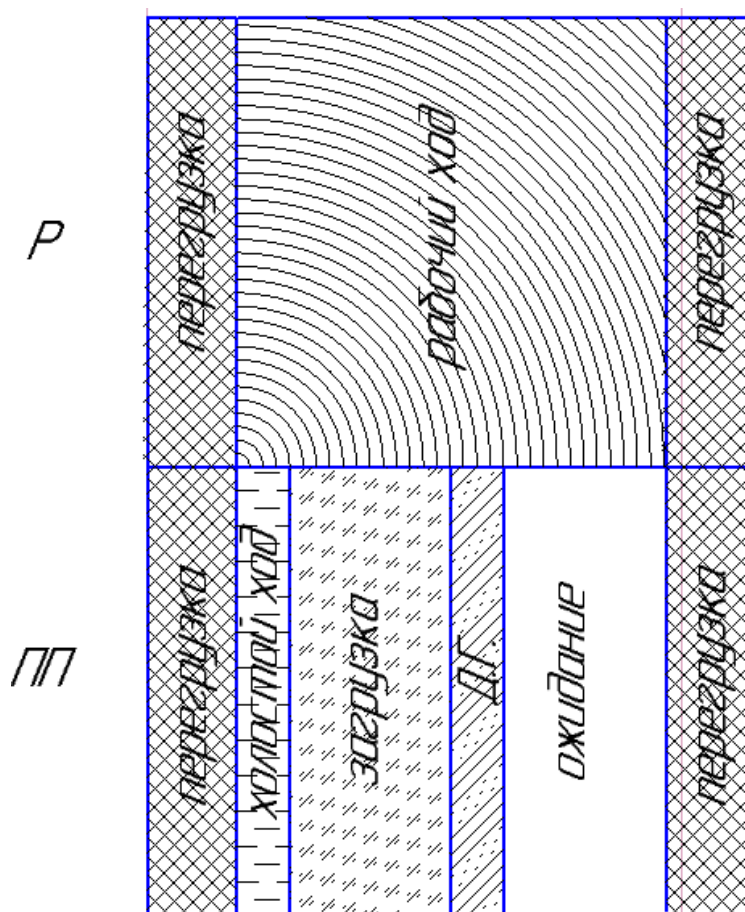


Рисунок 2.6 – Циклограмма процесса взаимодействия прицепа-перегрузчика и разбрасывателя при времени рабочего цикла прицепа-перегрузчика меньшем, чем у разбрасывателя

В процессе внесения материала с применением прицепа-перегрузчика основной переменной будет являться расстояние транспортировки вносимого материала, которое складывается из движения с грузом к разбрасывателю и холостого хода к погрузчику. В зависимости от расстояния транспортировки будет меняться соотношение времени рабочих циклов разбрасывателя и прицепа-перегрузчика.

Рассмотрим ситуацию, при которой время цикла прицепа-перегрузчика равно времени цикла разбрасывателя ( $t_{\text{ц}}^{\text{м}} = t_{\text{ц}}^{\text{р}}$ ). В этом случае вероятность ожидания друг друга будет минимальной (рисунок 2.4). При времени цикла прицепа-перегрузчика больше, чем время цикла разбрасывателя ( $t_{\text{ц}}^{\text{м}} > t_{\text{ц}}^{\text{р}}$ ), будет простаивать разбрасыватель (рисунок 2.5) и наоборот (рисунок 2.6).

В простейшем случае время ожидания разбрасывателя равно

$$t_{\text{ож}}^{\text{p-пп}} = t_{\text{ц}}^{\text{пп}} - t_{\text{ц}}^{\text{p}}. \quad (2.4)$$

При времени рабочего цикла прицепа-перегрузчика меньшем, чем время цикла разбрасывателя ( $t_{\text{ц}}^{\text{пп}} < t_{\text{ц}}^{\text{p}}$ ) будет ожидать прицеп-перегрузчик (рисунок 2.6), причем время ожидания начала перегрузки прицепом-перегрузчиком составит

$$t_{\text{ож}}^{\text{пп-р}} = t_{\text{ц}}^{\text{p}} - t_{\text{ц}}^{\text{пп}}. \quad (2.5)$$

При всех описанных вариантах погрузчик должен будет ожидать прибытия прицепа-перегрузчика. Время ожидания погрузчиком прибытия прицепа-перегрузчика зависит от составляющих времени цикла прицепа-перегрузчика, но в любом случае время ожидания прибытия прицепа-перегрузчика к погрузчику не будет равно нулю.

Время ожидания погрузчика определяется по следующему выражению:

$$t_{\text{ож}}^{\text{п-пп}} = t_{\text{ц}}^{\text{пп}} - t_{\text{п.пп}}. \quad (2.6)$$

Теперь рассмотрим, как будет изменяться время ожидания при более сложных составах производственных звеньев. В первую очередь увеличим количество прицепов-перегрузчиков. При анализе взаимодействия погрузочных, транспортно-перегрузочных и технологических машин в процессе внесения материала требуется учитывать специфику технологического процесса, характеризующегося цикличностью и поточностью. При увеличении числа прицепов-перегрузчиков изменится интервал их поступления под перегрузку и погрузку. При работе одного прицепа-перегрузчика интервал поступления к разбрасывателю  $P_{\text{от}}^{\text{p}}$  будет равен времени цикла  $t_{\text{ц}}^{\text{пп}}$  прицепа-перегрузчика. При этом сколько бы прицепов-перегрузчиков ни работало в одной линии, они не смогут подъезжать к разбрасывателю чаще, чем время загрузки прицепа-перегрузчика и время ожидания погрузчиком прибытия прицепа-перегрузчика:

$$P_{\text{от}}^{\text{p}} = t_{\text{п.пп}} + t_{\text{ож}}^{\text{п-пп}}. \quad (2.7)$$

При этом интервал поступления прицепов-перегрузчиков под загрузку

$P_{от}^{\Pi}$  будет равен сумме времени перегрузки, переездов между разбрасывателями и времени ожидания начала перегрузки прицепом-перегрузчиком:

$$P_{от}^{\Pi} = n_p t_{п.п} + (n_p - 1) t_{пер} + t_{ож}^{\Pi-P} + t_{х.х.} . \quad (2.8)$$

В звене из двух и более прицепов-перегрузчиков время ожидания прицепа-перегрузчика разбрасывателем, разбрасывателя прицепом-перегрузчиком и погрузчиком прицепа-перегрузчика рассчитывается с учетом интервалов поступлений под погрузку и перегрузку  $P_{от}^{\Pi}$  и  $P_{от}^P$ .

Преобразуем выражения (2.4) – (2.6), используя выражения (2.7) и (2.8) и получим:

$$t_{ож}^{P-\Pi\Pi} = P_{от}^P - (2t_{пов90} + t_{пов180} + t_p) ; \quad (2.9)$$

$$t_{ож}^{n-nn} = t_{ц}^P - P_{от}^P ; \quad (2.10)$$

$$t_{ож}^{\Pi-\Pi\Pi} = P_{от}^{\Pi} - t_{п.п.п} . \quad (2.11)$$

В таком случае становится возможна очередь прицепов-перегрузчиков у погрузчика. Ожидание прицепов-перегрузчиков в очереди  $t_{оч}^{\Pi\Pi-\Pi}$  составляет

$$t_{оч}^{\Pi\Pi-\Pi} = t_{п.п.п} - P_{от}^{\Pi} . \quad (2.12)$$

Время ожидания в очереди возможно только при условии, когда интервал прибытия прицепов-перегрузчиков на погрузку  $P_{от}^{\Pi}$  меньше, чем время их загрузки  $t_{п.п.п}$ . В обратном случае значение, полученное через выражение (2.12), будет временем погрузчика в ожидании прицепов-перегрузчиков  $t_{оч}^{\Pi\Pi-\Pi}$ .

Подставим выражения (2.9) – (2.12) в зависимости для времени циклов разбрасывателя, прицепа-перегрузчика и погрузчика (2.1) – (2.3), тогда получаем:

$$t_{ц}^P = P_{от}^P - (2t_{пов90} + t_{пов180} + t_p) + t_{н.р} + 2t_{пов90} + t_{пов180} + t_p + t_{маневр} ; \quad (2.13)$$

$$t_{ц}^{\Pi\Pi} = P_{от}^P + t_{д.г.} + t_{х.х.} + P_{от}^{\Pi} ; \quad (2.14)$$

$$t_{ц}^{\Pi} = t_{н.п.п} + P_{от}^{\Pi} + t_{мех.п} . \quad (2.15)$$

Можно предположить, что ожидание начала перегрузки как разбрасывателями  $t_{ож}^{р-пп}$ , так и прицепами-перегрузчиками  $t_{ож}^{пп-п}$ , а также нахождение прицепов-перегрузчиков в очереди на загрузку  $t_{оч}^{пп-п}$  снижает производительность линии внесения, из-за этого увеличивается время циклов и, как следствие, возрастут затраты труда и средств на внесение.

Время простоя разбрасывателей в технологическом цикле внесения материала отражает коэффициент использования циклового времени смены  $\tau_p^ц$ , который определяется по формуле

$$\tau_p^ц = \frac{T_p^р}{T_{цик}^р}, \quad (2.16)$$

где  $T_p^р$  – общее время чистой работы разбрасывателя за цикловое время смены, с;

$T_{цик}^р$  – цикловое время смены разбрасывателя, с.

Так как прицеп-перегрузчик является транспортно-технологической машиной, то определим его коэффициент использования циклового времени смены. В качестве рабочего времени примем время перегрузки материала в разбрасыватели. Объясняется это тем, что без операции перегрузки прицеп-перегрузчик не выполнит свою основную задачу – загрузку разбрасывателя, все остальные операции лишь способствуют этой операции.

Коэффициент использования циклового времени смены прицепов-перегрузчиков определяется как отношение общего времени процесса перегрузки к цикловому времени смены прицепа-перегрузчика:

$$\tau_{пп}^ц = \frac{T_{п.р}}{T_{цик}^{пп}}, \quad (2.17)$$

где  $T_{п.р}$  – общее время перегрузки, с;

$T_{цик}^{пп}$  – цикловое время смены прицепа-перегрузчика, с.

Доля чистой работы погрузчика определяется соотношением общего времени погрузки  $T_{п.пп}$  и циклового времени смены погрузчика

$$\tau_{п}^{\pi} = \frac{T_{п.пп}}{T_{цик}^{\pi}}, \quad (2.18)$$

где  $T_{цик}^{\pi}$  – цикловое время смены погрузчика, с.

Таким образом, коэффициенты использования времени цикла разбрасывателя, прицепа-перегрузчика и погрузчика будут равны:

$$\tau_{р}^{\pi} = \frac{t_{ц}^p}{P_{от}^p - (2t_{пов90} + t_{пов180} + t_p) + t_{п.р} + 2t_p + t_{маневр}}; \quad (2.19)$$

$$\tau_{пп}^{\pi} = \frac{t_{п.р}}{P_{от}^p + t_{д.г.} + t_{х.х.} + P_{от}^{\pi}}; \quad (2.20)$$

$$\tau_{п}^{\pi} = \frac{t_{п.пп}}{t_{п.пп.} + P_{от}^{\pi} + t_{техн.п}}. \quad (2.21)$$

Коэффициенты использования времени цикла разбрасывателя, прицепа-перегрузчика и погрузчика, определяемые по формулам (2.19), (2.20) и (2.21), характеризуют сбалансированность звеньев в производственной линии внесения и позволяют определить «слабое место» в производственной линии внесения твердых органических удобрений и дефеката [24].

Наряду с влиянием очередей и возможных простоев на время цикла технических средств важным фактором является расстояние транспортировки вносимого материала  $L_{тр}$ . Это расстояние увеличивается с каждым циклом разбрасывателя на величину  $2B_p$ , так как разбрасыватели последовательно обрабатывают поле, удаляясь от места начала обработки.

Время загрузки прицепа-перегрузчика  $t_{п.пп}$  и загрузки разбрасывателя  $t_{п.р}$ , используемые в формулах (2.2) и (2.3), можно определить, используя следующие выражения:

$$t_{п.пш} = 3600 \frac{Q_{пш} \eta}{\omega_{п}}; \quad (2.22)$$

$$t_{п.р} = 3600 \frac{Q_{р} \eta}{\omega_{пш}}. \quad (2.23)$$

где  $Q_{пш}$  и  $Q_{р}$  – грузоподъемности соответственно прицепа-перегрузчика и разбрасывателя, т;

$\eta$  – коэффициент использования объема кузова;

$\omega_{пш}$  и  $\omega_{п}$  – производительности выгрузного устройства прицепа-перегрузчика и погрузчика, т/ч.

Время движения транспортно-перегрузочной машины с грузом  $t_{д.г.}$  от места загрузки до места перегрузки и время холостого хода  $t_{х.х.}$  к месту загрузки из выражения (2.3) определяются по известной методике [9]. В свою очередь, они зависят от расстояния транспортировки  $L_{тр}$  и скорости движения транспортно-перегрузочного агрегата. Таким же образом рассчитывается время переезда между местами перегрузки: расстояние переезда  $L_{пер}$  с учетом количества переездов  $(n-1)$  делится на скорость переезда  $v_{пер}$ :

$$t_{пер} = (n-1) \frac{L_{пер}}{v_{пер}}. \quad (2.24)$$

Как известно [18, 24, 44, 63], скорость движения не является постоянной величиной, она меняется в зависимости от ряда факторов, таких как: характеристики и параметры агрегатируемого трактора, коэффициент сцепления, коэффициент, учитывающий сопротивление качению, уклон местности и т.д. Обычно с целью упрощения расчетов времени движения используют среднее значение времени движения с грузом и без груза, считая их равнозначными. При рассматриваемой организации взаимодействия транспортно-перегрузочных и технологических машин не следует делать подобные допущения относительно времени движения из-за того, что интервалы поступления  $P_{от}$  сильно зависят от этого времени. На этом основании время движения с грузом  $t_{д.г.}$  и холостого хода  $t_{х.х.}$  будут определяться отдельно по зависимостям:

$$t_{д.г} = \frac{L_{тр}}{v_{дг}}; \quad (2.25)$$

$$t_{х.х} = \frac{L_{тр}}{v_{хх}}. \quad (2.26)$$

Продолжительность времени рабочего цикла прицепа-перегрузчика  $t_{ц}^{мп}$  можно получить, преобразовав уравнение (2.2) и подставив в него формулы (2.10), (2.12), (2.22) – (2.25) и (2.26). После преобразования выражение для определения  $t_{ц}^{мп}$  будет иметь вид

$$t_{ц}^{мп} = \frac{Q_{мп}\gamma}{\omega_{п}} + \frac{L_{тр}}{v_{дг}} + \frac{L_{тр}}{v_{хх}} + n \frac{Q_{мп}\gamma}{\omega_{п}} + (n-1) \frac{L_{пер}}{v_{пер}} t_{ц}^p + t_{ож}^{мп-р} + t_{оч}^{мп-п}. \quad (2.27)$$

Продолжительность рабочего хода разбрасывателя  $t_p^p$ , входящая в выражение (2.1) в работах, посвященных эксплуатации транспортных и технологических машин, обычно выражается в виде отношения длины рабочего хода машины  $L_p$  к рабочей скорости  $v_p$  распределяющего агрегата [9]. При этом длина рабочего хода разбрасывателя при внесении зависит от грузоподъемности  $Q_p$ , дозы внесения материала  $d_0$  и рабочей ширины захвата  $B_p$ .

В выражении для определения времени рабочего цикла технологической машины (2.2) участвуют повороты на 90 градусов, а также могут добавляться развороты на 180 градусов. Как правило, это обычные беспетлевые повороты и развороты, но в зависимости от кинематических параметров технологических и транспортно-перегрузочных агрегатов для удовлетворения требований по равномерности внесения (обеспечение требуемого перекрытия) могут применяться и другие виды поворотов. Также для определения пути технологического агрегата в повороте и развороте необходимо учитывать длину выезда и радиус поворота. Длина выезда агрегата определяется по известной методике, в то же время радиус поворота зависит от скорости агрегата в повороте [130].

Преобразуем формулу (2.1) и получим время цикла рабочего разбрасывателя с учетом простоев в ожидании прицепа-перегрузчика [74]

$$t_{\text{ц}}^{\text{р}} = \frac{Q_{\text{р}} \gamma}{\omega_{\text{пп}}} + \frac{2L_{\text{пов90}}}{v_{\text{пов}}} + \frac{Q_{\text{р}} \gamma}{B_{\text{р}} d_0 v_{\text{р}}} + t_{\text{р}} + t_{\text{ож}}^{\text{р-пп}}. \quad (2.28)$$

Заменяя время ожидания  $t_{\text{ож}}^{\text{р-пп}}$  на коэффициент использования циклового времени смены, получим

$$t_{\text{ц}}^{\text{р}} = \left( \frac{Q_{\text{р}} \gamma}{\omega_{\text{пп}}} + \frac{2L_{\text{пов90}}}{v_{\text{пов}}} + \frac{Q_{\text{р}} \gamma}{B_{\text{р}} d_0 v_{\text{р}}} \right) \tau_{\text{р}}^{\text{ц}}. \quad (2.29)$$

Коэффициент использования циклового времени смены  $\tau_{\text{р}}^{\text{ц}}$  – это ключевой показатель, влияющий на время цикла технологической машины, который во многом зависит от времени ожидания разбрасывателем прицепа-перегрузчика  $t_{\text{ож}}^{\text{р-пп}}$  [40]. Для наиболее достоверного определения времени цикла разбрасывателя по предлагаемой технологии необходимо провести дополнительные исследования изменения времени ожидания в зависимости от организационных и технологических факторов.

В технологическом процессе разбрасыватель последовательно может находиться в нескольких состояниях, их число и сущность могут отличаться в зависимости от организации работы на поле, например в зависимости от способа движения, расположения мест перегрузки и т.д. Далее опишем состояния разбрасывателя в зависимости от различных схем работы на поле при внесении. В этом случае путь движения разбрасывателя без учета рабочего пути будет равен:

а) до погрузки вносимого материала

$$L_{\text{дх}} = (1,6...1,8)R_0 + 2e_{\text{агр}} + L_{\text{маневр}} + 1,42R_0 + (B_{\text{р}} - 2R_0) + 2e_{\text{агр}}; \quad (2.30)$$

где  $e_{\text{агр}}$  – длина выезда агрегата, м;

$L_{\text{маневр}}$  – путь маневрирования, м;

$B_{\text{р}}$  – рабочая ширина захвата, м;

$R_0$  – радиус поворота агрегата, м.

б) после погрузки вносимого материала

$$L_{\text{дг}} = (1,6...1,8)R_0 + 2e_{\text{агр}} + (B_{\text{р}} - L_{\text{маневр}} - R_0). \quad (2.31)$$

При этом длина пути прицепа-перегрузчика будет состоять из расстояний:

а) движения к месту перегрузки

$$L_{\text{дг}} = L_{\text{тр}} + L_{\text{маневр}} + 2B_p; \quad (2.32)$$

б) переезда между первым и последним местом перегрузки:

$$\sum L_{\text{пер}} = (n-1)(L_{\text{пер}} + L_{\text{маневр}}) + 2B_p; \quad (2.33)$$

в) возврата на погрузку

$$L_{\text{хх}} = (3, 2 \dots 4)R_0 + 2e_{\text{агр}} + L_{\text{тр}}. \quad (2.34)$$

Как видно из уравнений (2.30) и (2.31), длина пути разбрасывателя без учета рабочего пути может изменяться под влиянием ряда параметров, часть из них обусловлена конструкционными особенностями технологических и транспортно-перегрузочных агрегатов и агротехническими требованиями. Например, такие параметры, как кинематическая длина и ширина, минимальный радиус поворота, длина выезда агрегата и доза внесения [14] считаются постоянными, а такой параметр, как путь маневрирования является случайным и напрямую зависит от квалификации механизаторов.

Как уже отмечалось ранее, при применении челночного способа движения расстояние транспортировки вносимого материала транспортно-перегрузочным агрегатом с каждым циклом разбрасывателя будет увеличиваться из-за смещения обрабатываемого загона на величину  $2B_p$ . Смещение является постоянным. Таким образом, увеличение длины транспортировки вносимого материала описывается законом арифметической прогрессии.

Одним из важных параметров, влияющих на время рабочего цикла прицепа-перегрузчика, является количество загружаемых им разбрасывателей за один цикл. Это должно быть целым числом, которое зависит от отношения грузоподъемности разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков  $Q_{\text{пп}}/Q_p$ .

С точки зрения снижения энергозатрат на транспортировку тонны груза более высокой эффективности перевозок можно достичь применением прицепа-перегрузчика большой грузоподъемности. Однако при этом возрастет время загрузки кузова прицепа-перегрузчика, что увеличит время цикла. Стоит учесть, что

если время цикла прицепа-перегрузчика  $t_{\text{ц}}^{\text{пп}}$  больше, чем время цикла разбрасывателя  $t_{\text{ц}}^{\text{р}}$ , то увеличится вероятность простоев разбрасывателя. Для минимизации простоев можно увеличить количество прицепов-перегрузчиков в линии внесения, что позволит уменьшить интервал прибытия прицепов-перегрузчиков под перегрузку  $P_{\text{от}}^{\text{п}}$ , но тогда пропорционально возрастет вероятность нахождения их в очереди на загрузку  $t_{\text{ож}}^{\text{пп-п}}$  и увеличится время ожидания начала перегрузки прицепами-перегрузчиками  $t_{\text{ож}}^{\text{пп-п}}$ , что снизит производительность каждого прицепа-перегрузчика и, вероятно, повысит удельные затраты линии внесения.

Уменьшение грузоподъемности прицепа-перегрузчика до грузоподъемности разбрасывателя снизит эффективность транспортировки вносимого материала ввиду увеличения удельных затрат энергии на перемещение материала. При этом для сохранения высокой производительности разбрасывателей придется дополнительно увеличить количество прицепов-перегрузчиков в линии внесения, что также спровоцирует вышеописанные негативные факторы, возникающие при увеличении количества транспортно-перегрузочных агрегатов.

Основным научным результатом данного раздела является математическая формализация отличительных состояний агрегатов в рамках предлагаемой технологии внесения (рисунок 2.1). Выявлены и формализованы отличительные состояния агрегатов в рамках предлагаемой технологии внесения (рисунок 2.1), такие как время ожидания перегрузки разбрасывателем  $t_{\text{ож}}^{\text{р-пп}}$  и прицепом-перегрузчиком  $t_{\text{ож}}^{\text{пп-р}}$ , продолжительность очереди на погрузку  $t_{\text{оч}}^{\text{пп-р}}$ , которые непосредственно влияют на производительность всей производственной линии внесения.

Отличительной особенностью исследований является формирование математической модели, описывающей временные циклы и параметры взаимодействия всех звеньев технологической линии внесения: погрузочного, транспортно-перегрузочного и распределяющего. Выражения (2.19) – (2.21) позволяют оценить влияние многочисленных технических, производственных и организационных

факторов на производительность линии внесения. Определены ключевые показатели, в частности коэффициенты использования циклового времени разбрасывателя  $\tau_p^u$  и прицепа-перегрузчика  $\tau_{пп}^u$ , и установлены взаимосвязи между ними, на основе которых можно утверждать, что эффективность конкретной производственной линии внесения зависит от согласованности циклов работы технологических и транспортно-перегрузочных агрегатов, а также продолжительности их простоев в ожидании друг друга.

### 2.3 Анализ способов движения распределительных и транспортно-перегрузочных агрегатов при предлагаемом виде перегрузочной технологии

Эффективность производственной линии внесения твердых органических удобрений и дефеката при использовании прицепов-перегрузчиков в значительной степени определяется схемой движения распределяющих агрегатов и организацией их взаимодействия с транспортно-перегрузочным звеном. Выбор наиболее рационального способа движения агрегатов производственной линии позволяет наиболее эффективно использовать применяемую при внесении технику за счет снижения взаимных простоев разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков.

Проведем сравнение принципиально различных способов движения. В качестве критерия сравнения примем коэффициент использования циклового времени смены технологической линии  $\tau_{\text{л}}$ , определяемый как среднее значение коэффициентов использования времени разбрасывателей  $\tau_p$  и прицепов-перегрузчиков  $\tau_{пп}$ , рассчитываемых по выражениям (2.19) и (2.20).

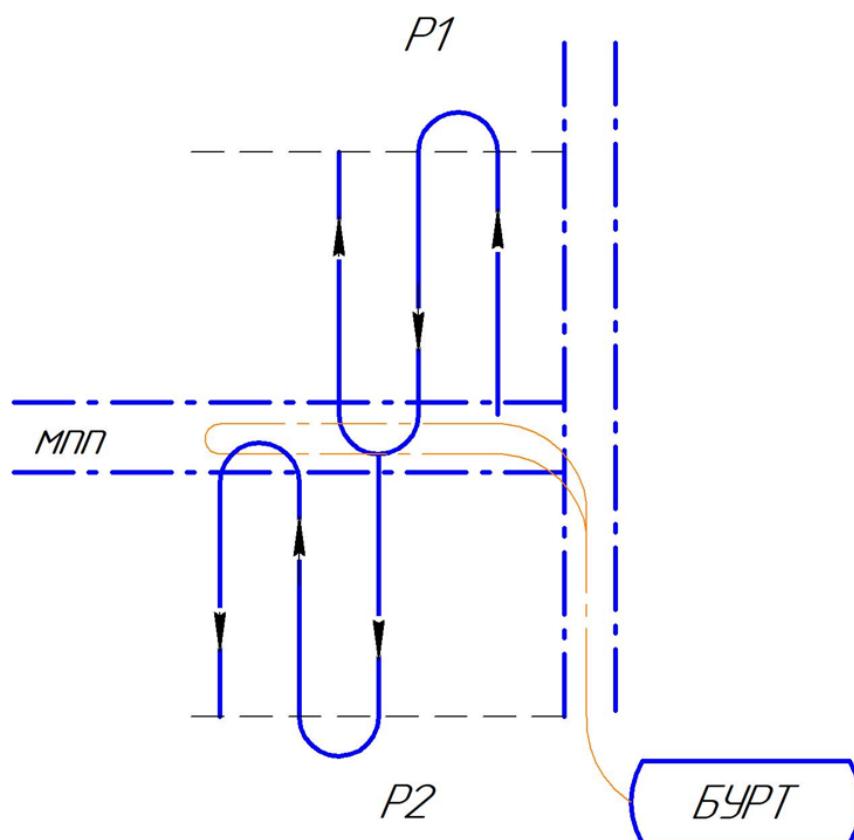
Важной особенностью процесса внесения органических удобрений и дефеката является систематическое увеличение расстояния транспортировки при обработке поля разбрасывателями. Поскольку это увеличение носит прогрессирующий характер, а коэффициент использования времени технологической линии  $\tau_{\text{л}}$

является функцией времени, зависящего от расстояния транспортировки, то сравнение способов по средним значениям может дать ошибочный результат. Поэтому корректное сравнение возможно только при расчете работы агрегатов в течение всего циклового времени смены. При этом за цикловое время смены примем шестичасовой интервал времени.

На основе анализа взаимодействия распределительных и транспортно-перегрузочных агрегатов выбраны два способа организации их движения, отличающиеся местоположением точек загрузки и характером работы агрегатов.

Способ 1 (загрузка на одной стороне обрабатываемых участков). При этом способе движения (рисунок 2.7) разбрасыватели после загрузки распределяют половину кузова в одном направлении, выполняют разворот и распределяют оставшуюся часть материала в обратном направлении, тем самым возвращаясь на магистрально-поворотную полосу, где ожидают загрузки. Таким образом, все операции перегрузки производятся на одной магистрально-поворотной полосе. Прицеп-перегрузчик совершает движение вдоль этой полосы, последовательно подъезжая к разбрасывателям.

Способ 2 (загрузка на двух сторонах обрабатываемого участка). Принцип данного способа (рисунок 2.8) заключается в попеременной загрузке разбрасывателей на противоположных краях обрабатываемого участка. После загрузки разбрасыватели распределяют весь кузов в одном направлении, после чего останавливаются и ожидают следующую загрузку. После загрузки в этой точке они движутся в обратном направлении, распределяя материал. Таким образом, точки загрузки циклически чередуются между ближним и дальним краем обрабатываемого участка. Данная схема предполагает переменное расстояние транспортировки вносимого материала для загрузки разбрасывателей, что является ее принципиальным отличием. Кроме того, увеличивается расстояние переезда прицепа-перегрузчика между разбрасывателями, так как они вынуждены работать с большим интервалом, чтобы не попадать в опасную зону разлета вносимого материала.



МПП – магистрально-поворотная полоса;

$P1$  – разбрасыватель 1;  $P2$  – разбрасыватель 2

Рисунок 2.7 – Схема движения разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков и их взаимодействия на обрабатываемом участке с загрузкой разбрасывателей на одной стороне участка (способ 1)

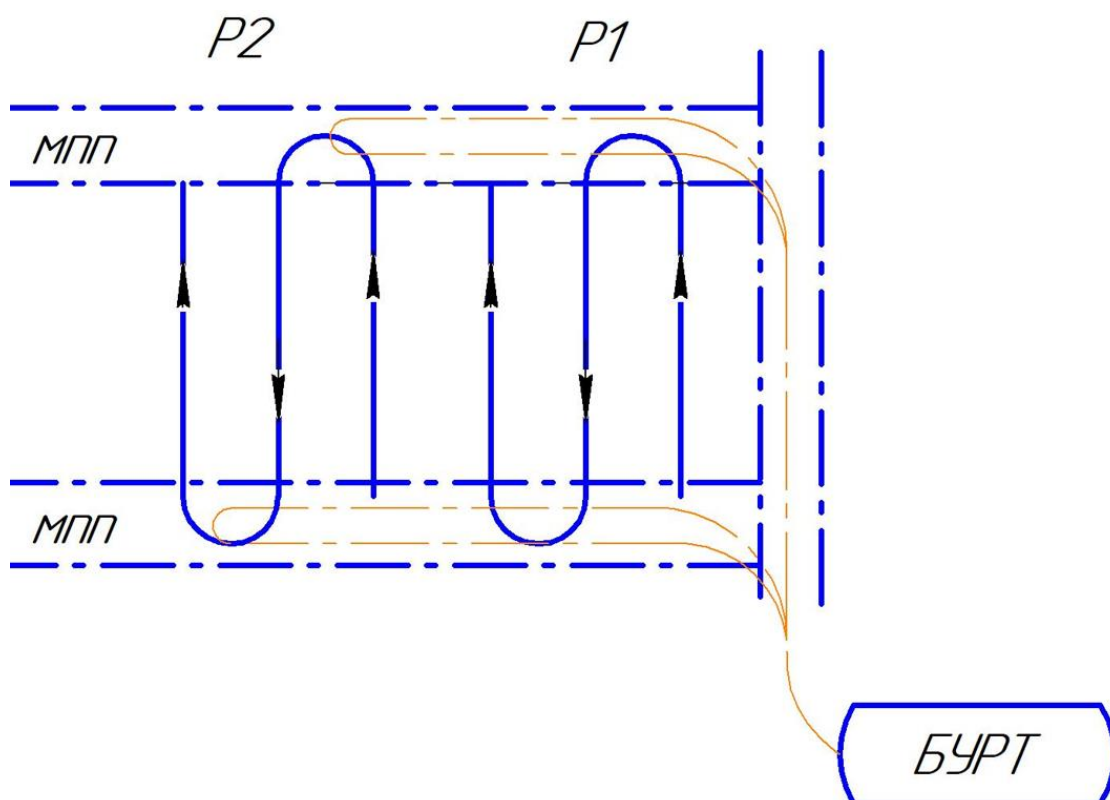
Ключевое различие указанных способов организации движения заключается в характере изменения расстояния транспортировки вносимого материала прицепом-перегрузчиком в течение смены, из-за этого изменяется время ожидания разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков.

В способе 1 увеличение расстояния от места погрузки до места перегрузки происходит по арифметической прогрессии:

$$L_{\text{тр}1}(k) = L_{\text{тр}} + L_{\text{пер}} + B_p k, \quad (2.35)$$

где  $k$  – количество рабочих циклов разбрасывателя за смену.

Это линейный рост определяется только шириной захвата и не зависит от других агротехнических параметров.



МПП – магистрально-поворотная полоса;

$P1$  – разбрасыватель 1;  $P2$  – разбрасыватель 2

Рисунок 2.8 – Схема движения разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков и их взаимодействия на обрабатываемом участке с загрузкой разбрасывателей на двух сторонах обрабатываемого участка (способ 2)

В способе 2 более сложное взаимодействие разбрасывающих и транспортно-перегрузочных агрегатов. При движении к ближнему краю обрабатываемого участка расстояние изменяется аналогично способу 1 – зависимость (2.35). Однако при движении к дальнему краю участка для загрузки разбрасывателя после его рабочего хода к этому расстоянию добавляется длина рабочего пути разбрасывателя  $L_p$

$$L_{\text{тр}2}(\kappa) = L_{\text{тр}} + L_{\text{пер}} + B_p k + L_p, \quad (2.36)$$

где  $L_p$  – длина рабочего хода разбрасывателя, м.

Таким образом, расстояние транспортировки для прицепа-перегрузчика становится величиной, колеблющейся между двумя указанными значениями.

В условиях крупногрупповой работы, когда в производственной линии внесения задействовано два и более прицепов-перегрузчиков, неравномерность расстояния транспортировки при способе 2 может выражаться в увеличивающихся простоях разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков. При работе двух прицепов-перегрузчиков происходит такая ситуация, что один обслуживает разбрасыватели на ближнем краю обрабатываемого участка, а другой – на дальнем. Это приводит к тому, что рабочие циклы прицепов-перегрузчиков будут неодинаковыми по продолжительности. Один прицеп-перегрузчик будет иметь либо более длительное время цикла по сравнению с другим прицепом-перегрузчиком, либо они будут чередоваться. Таким образом, повышается вероятность возникновения простоев агрегатов.

Рассогласование циклов разбрасывателя и прицепа-перегрузчика при использовании способа 1 накапливается по линейному закону. При исследовании способе 2 из-за описанной неравномерности и сильной зависимости от рабочего пути разбрасывателя характер накопления является нелинейным и менее предсказуемым, что увеличивает суммарное время простоев за смену.

Способ 1 обеспечивает более равномерный и предсказуемый рост транспортного плеча, не зависящий от агротехнических параметров. Так как с каждым последующим циклом у прицепов-перегрузчиков линейно увеличивается расстояние транспортировки, то вероятность возникновения очередей на погрузку в течение смены снижается.

Способ 2 характеризуется неравномерным изменением расстояния транспортировки в течение циклового времени смены, которое увеличивается при работе двух и более транспортно-перегрузочных агрегатов и становится критичным при большом  $L_p$ . Это приводит к увеличению времени ожидания разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков, а также к образованию очереди на погрузке у бурта из-за разного времени цикла у прицепов-перегрузчиков.

Ввиду значительного влияния жесткой связи на коэффициент использования циклового времени смены можно утверждать, что нельзя определить точное значение выбранного критерия эффективности без учета стохастического характера работы технологических и транспортно-перегрузочных средств.

## 2.4 Оценка вероятности нахождения машин производственной линии в работе

Для определения рационального состава звеньев производственной линии внесения по критерию минимальных простоев основного звена можно использовать метод определения вероятности нахождения системы в работе. Этот метод позволяет оценить вероятность нахождения технического средства в состоянии непосредственного выполнения своей технологической функции, например разбрасывание материала или его перегрузка. Данная вероятность заведомо не равна 100%, так как в ходе рабочего цикла технические средства последовательно проходят через различные состояния, из них некоторые являются вспомогательными (холостой ход, повороты и т.д.) или аварийными, например, устранение отказов. Таким образом, под «вероятностью нахождения в работе» понимается вероятность пребывания агрегата в целевом рабочем состоянии [8].

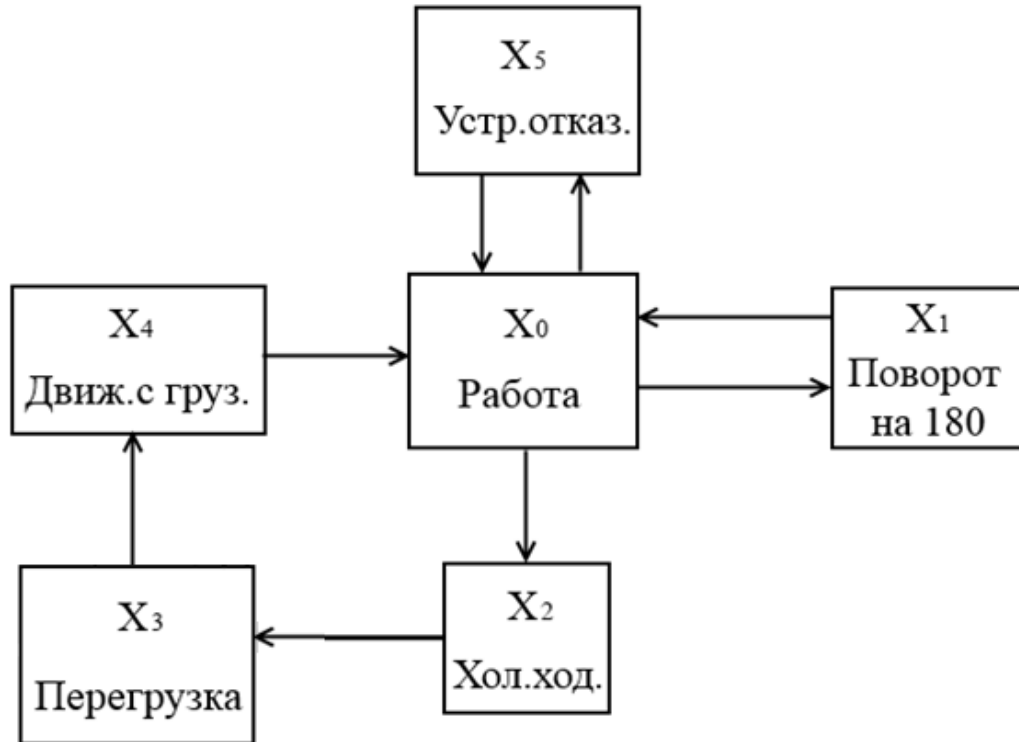
Интенсивность перехода представляет собой вероятностный показатель, характеризующий среднее число событий (переходов из состояния в состояние) за единицу времени. Поскольку длительность каждого элемента рабочего цикла технологической операции является величиной, обратной её частоте, интенсивность определяется как  $\lambda = 1 / t$ , где  $t$  — среднее время пребывания агрегата в рассматриваемом состоянии.

В технологическом процессе разбрасыватель последовательно может находиться в нескольких состояниях, их число и сущность могут отличаться в зависимости от организации работы на поле, например от способа движения, расположения мест перегрузки и т.д. Далее приведем описание состояний разбрасывателя в зависимости от различных организационных схем процесса внесения.

Работа разбрасывателя с расположением мест перегрузки на одном краю обрабатываемого участка, способ движения – челночный (рисунки 2.1 и 2.7). В этом случае, длина гона равна  $L_p/2$ . Интенсивности переходов из состояния в состояние (рисунок 2.9) определяются из следующих выражений:

$$\lambda_{01} = \lambda_{02} = \frac{V_p}{L_p} = \frac{B_p v_p d_0}{Q_p}; \lambda_{10} = \frac{v_{пов}}{L_{пов180}}; \lambda_{23} = \lambda_{40} = \frac{v_{пов}}{L_{пов90}};$$

$$\lambda_{34} = \frac{\omega_{\text{пп}}}{Q_p}; \lambda_{05} = \frac{1}{t_{\text{нн}}}; \lambda_{50} = \frac{1}{t_{\text{устр}}}.$$



$X_0$  – работа;  $X_1$  – поворот на 180 градусов;  $X_2$  – холостой ход;  $X_3$  – перегрузка;  
 $X_4$  – движение с грузом;  $X_5$  – время устранения внезапных отказов

Рисунок 2.9 – Схема изменения состояний разбрасывателя

Вероятность нахождения разбрасывателя в состоянии перегрузки определится из следующих выражений:

$$P_0^p = \frac{1}{1 + \lambda_0 \left( \frac{1}{\lambda_{10}} + \frac{1}{\lambda_{23}} + \frac{1}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{40}} \right) + \frac{\lambda_{05}}{\lambda_{50}}}; \quad (2.37)$$

$$P_0^p = \frac{1}{1 + \frac{B_p v_p d_0}{Q_p} \left( \frac{2L_{\text{пов}180} + 6L_{\text{пов}90}}{v_p} + \frac{Q_p}{\omega_{\text{пп}}} \right) + \frac{t_{\text{устр}}}{t_{\text{нн}}}}, \quad (2.38)$$

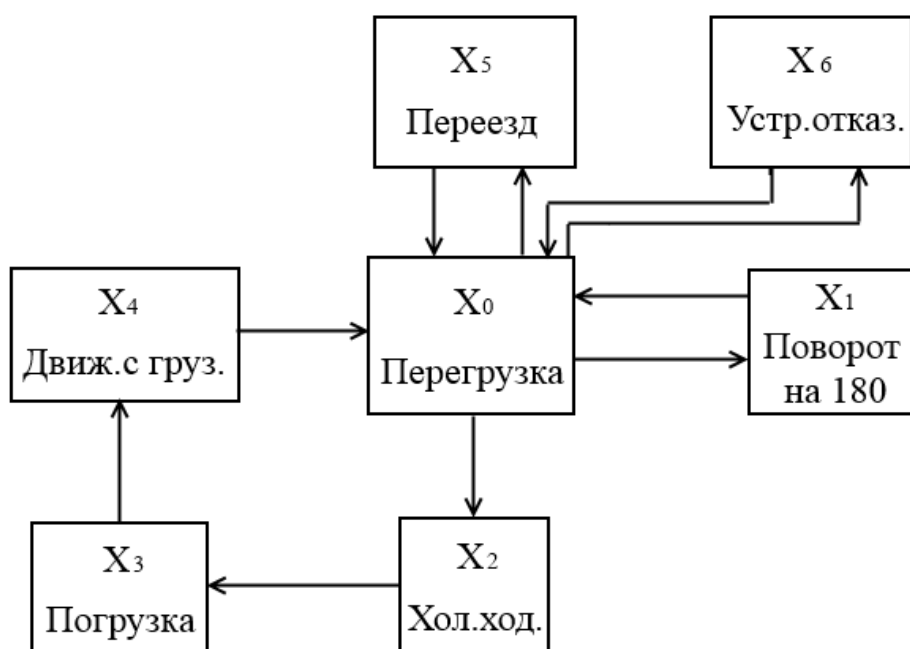
где  $t_{\text{устр}}$  – время устранения неисправности, с;

$t_{\text{нн}}$  – нормативная наработка на отказ, с.

Рассмотрим работу прицепа-перегрузчика при такой же организации производственного процесса. Интенсивности переходов из состояния в состояние (рисунок 2.10) определяются из следующих выражений:

$$\lambda_{01} = \lambda_{05} = \frac{\omega_{пп}}{10Q_p}; \lambda_{23} = \lambda_{32} = \frac{V_{тр}}{L_{тр}}; \lambda_{12} = \frac{V_{пов}}{L_{пов180}};$$

$$\lambda_{34} = \frac{\omega_{п}}{Q_{п}}; \lambda_{60} = \frac{1}{t_{устр}}; \lambda_{06} = \frac{1}{t_{ин}}.$$



$X_0$  – перегрузка;  $X_1$  – разворот на 180 градусов;  $X_2$  – холостой ход на загрузку;  $X_3$  – загрузка;  $X_4$  – движение с грузом к месту перегрузки;  $X_5$  – переезд между разбрасывателями;  $X_6$  – время устранения внезапных отказов

Рисунок 2.10 – Схема изменения состояний транспортно-перегрузочного агрегата

Вероятность нахождения прицепа-перегрузчика в состоянии перегрузки будет составит

$$P_0^{пп} = \frac{1}{1 + \lambda_0 \left( \frac{1}{\lambda_{40}} + \frac{1}{\lambda_{12}} + \frac{1}{\lambda_{23}} + \frac{1}{\lambda_{24}} + \frac{1}{\lambda_{50}} \right) + \frac{\lambda_{06}}{\lambda_{60}}}. \quad (2.39)$$

После подстановки выражений интенсивностей получим

$$P_0^{\text{пп}} = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{\text{пп}}}{Q_p} \left( \frac{2L_{\text{тр}} + L_{\text{пов180}}}{v_{\text{тр}}} + \frac{\omega_{\text{п}}}{Q_{\text{пп}}} \right) + \frac{t_{\text{устр}}}{t_{\text{нн}}}}. \quad (2.40)$$

Выведенные зависимости, определяющие вероятность нахождения разбрасывателя и прицепа-перегрузчика в состоянии перегрузки, позволяют выразить их производительности через основные производственные и эксплуатационные параметры агрегатов, такие как расстояние транспортировки, производительности выгрузного устройства и погрузчика, грузоподъемности разбрасывателя и прицепа-перегрузчика и т.д.

Анализ зависимости (2.38) показывает, что снижение грузоподъемности и рабочего времени разбрасывателя приводит к повышению вероятности перехода в состояние «перегрузки», что может потребовать увеличения транспортной скорости и снижения грузоподъемности разбрасывателей для уменьшения времени загрузки. Исходя из этого можно сказать, что при сохранении других параметров неизменными, уменьшение грузоподъемности разбрасывателей при увеличении их количества способствует повышению производительности производственной линии внесения, работающей по перегрузочной технологии с применением прицепов-перегрузчиков.

Анализируя уравнение (2.40) можно заметить, что чем выше средняя скорость транспортно-перегрузочного агрегата, производительности погрузочной машины и ниже производительность выгрузного устройства прицепа-перегрузчика, тем выше вероятность нахождения прицепа-перегрузчика в состоянии перегрузки.

Время циклов технических средств зависит от производственных условий, нормообразующих факторов, агротехнических требований и организационных факторов, таких как организация рабочего процесса, расстояние транспортировки вносимого материала, длина рабочего пути разбрасывателя, доза внесения и т.д. Исследования технологического процесса показали, что в реальных производственных условиях на работу техники оказывает влияние ряд случайных, трудно

прогнозируемых факторов, связанных с квалификацией механизатора и технической готовностью техники. Эти случайные события затрудняют расчет показателей линии внесения. В результате технологический процесс внесения приобретает вероятностный характер, что ограничивает возможность применения постоянных значений времени для расчета основных показателей линии внесения и свидетельствует о необходимости применения более сложных математических аппаратов, позволяющих учесть эти не детерминированные факторы.

## 2.5 Методика определения параметров линии внесения твердых органических удобрений с учетом ожидания транспортно-перегрузочных и технологических агрегатов

Вероятностный характер процесса внесения твердых органических удобрений и дефеката обуславливает непредсказуемость и неравномерность загрузки производственных линий, что приводит к нерациональному использованию техники. Как следствие, на практике нередко наблюдаются ситуации избыточности или недостаточности тех или иных агрегатов в звеньях производственных линий, что негативно сказывается на общей эффективности процесса внесения. Особенно остро данная проблема проявляется при специализации функций, когда процесс внесения состоит из последовательных операций, взаимозависимых друг от друга. В таких условиях одним из ключевых факторов снижения простоев техники и повышения общей эффективности процесса является определение рационального количества агрегатов в отдельных звеньях производственной линии. Для решения данной задачи представляется возможным применение одного из методов: расчет по средним величинам, статистических испытаний, а также теории массового обслуживания [25]. Метод расчета по средним величинам сравнительно прост в вычислениях, но он не учитывает варьирование случайных величин и поэтому дает только приблизительное решение. Метод статистических испытаний – универсальный метод. Этим методом можно решить задачу подобного типа, но решение

по нему справедливо только для строго заданных условий, и как только они изменятся, будут нужны новые решения [5]. Теория массового обслуживания применима преимущественно тогда, когда закон поступления заявок не противоречит пуассоновскому, а время обслуживания заявок – показательному закону распределения [62, 101].

Предлагаемый вид перегрузочной технологии представляет собой многофазную систему массового обслуживания замкнутого типа, представленную в приложении А. Первая фаза состоит из погрузчиков и прицепов-перегрузчиков. Приборами в этой фазе выступают погрузчики (а), а заявками – прицепы-перегрузчики. Вторая фаза состоит из прицепов-перегрузчиков, выгрузного устройства прицепа-перегрузчика (б) и разбрасывателей. Прибором в этой фазе является выгрузное устройство прицепа-перегрузчика, а заявками – прицепы-перегрузчики и разбрасыватели. Для такого взаимодействия приборов и заявок будет присутствовать последствие, которое можно учесть применением имитационной модели производственной линии внесения твердых органических удобрений и дефеката. Также потребуется определить соответствие двум условиям применения теории массового обслуживания: стационарности и ординарности.

Чтобы определить рациональное количество агрегатов в звеньях производственного процесса, требуется использовать тот или иной критерий эффективности. Выбор подходящего критерия для оценки технологии осложняется одной ключевой проблемой: производительность нельзя использовать как основной и единственный показатель эффективности производственной линии внесения. Сроки внесения твердых органических удобрений напрямую влияют на урожайность, но этот параметр не отражает экономическую эффективность внесения. Таким образом, нужен комплексный критерий, учитывающий не только производительность, но и экономическую целесообразность технологии. В данном случае за основной критерий эффективности стоит взять прямые затраты средств –  $U_{\text{пр}}$ , а за дополнительный – производительность линии внесения –  $\omega_{\text{л}}$ .

Следующим этапом является аналитическое описание поставленной задачи

с последующим исследованием взаимодействия погрузочных, транспортно-перегрузочных и технологических агрегатов. На основании этого можно будет определить рациональное количество технических средств, обеспечивающее наивысшую эффективность в заданных условиях [27, 28].

Математическая постановка задачи заключается в нахождении экстремума функции

$$U_{\text{пр}} = f(n_{\text{п}}, n_{\text{пп}}, n_{\text{р}}), \quad (2.41)$$

где  $n_{\text{п}}$  – количество погрузочных средств;

$n_{\text{пп}}$  – количество прицепов-перегрузчиков;

$n_{\text{р}}$  – количество разбрасывателей.

Для определения рационального количества каждой группы машин в звеньях производственного процесса транспортировки и внесения дефекта распишем детально функцию (2.41):

$$U_{\text{пр}} = \frac{1}{\omega_{\text{л}}} \left( \frac{n_{\text{п}} E_{\text{ч}}^{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}} + \frac{n_{\text{пп}} E_{\text{ч}}^{\text{пп}}}{\rho_{\text{пп}}} + \frac{n_{\text{р}} E_{\text{ч}}^{\text{р}}}{\rho_{\text{р}}} \right), \quad (2.42)$$

где  $E_{\text{ч}}^{\text{п}}, E_{\text{ч}}^{\text{пп}}, E_{\text{ч}}^{\text{р}}$  – соответственно затраты на погрузочные, транспортно-перегрузочные и технологические агрегаты, руб./ч;

$\omega_{\text{л}}$  – производительность линии внесения в данных условиях, т/ч;

$\rho_{\text{п}}, \rho_{\text{пп}}, \rho_{\text{р}}$  – соответственно коэффициенты загрузки погрузчиков, прицепов-перегрузчиков и разбрасывателей.

Производительность линии всегда определяется по звену с наименьшей производительностью

$$\omega_{\text{л}} = \min(\omega_{\text{п}}, \omega_{\text{пп}}, \omega_{\text{р}}). \quad (2.43)$$

Затраты за час работы технических средств можно рассчитать по известной методике [63]. Определение прямых затрат линии  $U_{\text{пр}}$  предполагает вычисление коэффициентов  $\rho_{\text{п}}, \rho_{\text{пп}}, \rho_{\text{р}}$ , которые изменяются в зависимости от параметров линии внесения, таких как количество погрузчиков, прицепов-перегрузчиков и раз-

брасывателей, и от условий внесения (расстояние транспортировки, доза, сопротивление передвижению агрегата и т.д.). Надо отметить, что  $\rho_{\text{пп}}$  ввиду сложных взаимодействий погрузочных, транспортно-перегрузочных и технологических машин будет равен произведению двух других коэффициентов загрузки –  $\rho_{\text{пп}}^{\text{п}}$  и  $\rho_{\text{пп}}^{\text{р}}$

$$\rho_{\text{пп}} = \rho_{\text{пп}}^{\text{п}} \rho_{\text{пп}}^{\text{р}}, \quad (2.44)$$

где  $\rho_{\text{пп}}^{\text{п}}$  – коэффициент загрузки прицепа-перегрузчика в зависимости от нахождения в очереди на загрузку,

$\rho_{\text{пп}}^{\text{р}}$  – коэффициент загрузки прицепа-перегрузчика в зависимости от нахождения в ожидании прибытия разбрасывателя под перегрузку.

Ввиду большого объема расчетов из-за сложных взаимосвязей технических средств, примем упрощение – сначала определим  $\rho_{\text{пп}}^{\text{п}}$  без учета простоя прицепов-перегрузчиков в ожидании разбрасывателей. При этом после определения  $\rho_{\text{пп}}^{\text{п}}$  найдем  $\rho_{\text{пп}}^{\text{р}}$  с учетом ожидания при погрузке. Такая последовательность позволит учесть влияние нахождения в очереди на погрузку на ожидание разбрасывателя. В данном случае прицепы-перегрузчики выступают в роли заявок, а погрузчик – в роли прибора. Каждый источник заявок порождает поток заявок с плотностью

$$\lambda = \frac{1}{t_{\text{п}}^{\text{пп}}}.$$

При этом плотность потока обслуживания одного канала

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{п.пп}}}.$$

Для определения вероятности  $p_0$ , что погрузчик свободен, применим следующее выражение

$$p_0 = \frac{1}{\frac{\tilde{B}(n_{\text{пп}}; n_{\text{п}}; p)}{n_{\text{пп}}} + \frac{p(n_{\text{пп}}; n_{\text{п}})R(n_{\text{пп}} - n_{\text{п}} - 1; \chi)}{P(0; n_{\text{п}})R(n_{\text{пп}}; \chi)}}, \quad (2.45)$$

где  $\tilde{B}(n_{\text{пп}}; n_{\text{п}}; p)$  – функция, связанная с биномиальным распределением;

$R(n_{\text{пп}} - n_{\text{п}} - 1; \chi)$  – табулированная функция [26].

Функция, связанная с биномиальным распределением, может быть использована для моделирования различных случайных событий, таких как поступление заявок или успешное обслуживание. В системах, где заявки поступают по случайному закону, можно использовать биномиальное распределение для описания вероятности того, что определенное количество заявок будет обработано успешно за определенный период времени.

Критерий  $\chi$  используется для анализа и оценки производительности систем массового обслуживания. Когда  $\chi$  меньше единицы, система способна обслуживать заявки быстрее, чем они поступают, и ожидания заявок будут минимальными. Если  $\chi$  больше единицы, то система перегружена, и ожидания могут расти [83].

Среднее число прицепов-перегрузчиков, находящихся под загрузкой и в очереди у погрузчиков, определяем по выражению

$$\bar{k}_{\text{пп}} = \frac{p_0}{n_{\text{пп}}} \sum_{k=0}^{n_{\text{п}}} k B(n_{\text{пп}}; k; p) + \frac{n_{\text{п}} p_0 P(n_{\text{п}}; n_{\text{п}}) R(n_{\text{пп}} - n_{\text{п}} - 1; \chi)}{P(0; n_{\text{п}}) P(n_{\text{пп}}; \chi)}. \quad (2.46)$$

Среднее число прицепов-перегрузчиков, находящихся в очереди у погрузчиков, будет равно

$$\bar{S}_{\text{пп}} = \frac{P(n_{\text{пп}}; n_{\text{п}}) p_0}{P(0; n_{\text{п}}) P(n_{\text{пп}}; \chi)} \left[ (n_{\text{пп}} - n_{\text{п}}) R(n_{\text{пп}} - n_{\text{п}}; \chi) - \chi R(n_{\text{пп}} - n_{\text{п}} - 1; \chi) \right]. \quad (2.47)$$

Вероятность нахождения прицепа-перегрузчика у погрузчика (под погрузкой и в очереди)

$$P_{\text{п+ож}}^{\text{пп}} = \frac{\bar{S}_{\text{пп}} + \bar{k}_{\text{пп}}}{n_{\text{пп}}}. \quad (2.48)$$

Среднее время ожидания прицепа-перегрузчика в очереди на погрузку

$$t_{\text{оч}}^{\text{пп}} = \frac{1}{\lambda} \frac{P_{\text{п+ож}}^{\text{пп}}}{1 - P_{\text{п+ож}}^{\text{пп}}}. \quad (2.49)$$

При этом среднее время простоя погрузчика составит

$$t_{\text{ож}}^{\Pi} = \frac{1}{\mu_{\Pi}} \frac{1 - P_{\Pi+\text{ож}}^{\text{III}}}{P_{\Pi+\text{ож}}^{\text{III}}}, \quad (2.50)$$

где  $P_{\Pi+\text{ож}}^{\text{III}}$  – вероятность простоя погрузчика в ожидании прицепов-перегрузчиков.

$$P_{\text{ож}}^{\Pi} = \frac{\bar{k}_{\text{III}}}{n_{\text{III}}}. \quad (2.51)$$

Таким образом, коэффициенты загрузки погрузчика и прицепа-перегрузчика будут зависимы друг от друга и определяться по следующим выражениям:

$$\rho_{\Pi} = \frac{t_{\Pi}^{\Pi}}{n_{\text{III}}}; \quad (2.52)$$

$$\rho_{\text{III}}^{\Pi} = \frac{t_{\text{III}}^{\Pi}}{t_{\text{III}}^{\Pi} + t_{\text{оч}}^{\text{III}}}. \quad (2.53)$$

Далее определим  $\rho_{\text{III}}^{\text{P}}$  с учетом ожидания в очереди у погрузчика, используя сменную производительность прицепов-перегрузчиков:

$$\omega_{\text{см оч}}^{\text{III}} = \omega_{\text{см без оч}}^{\text{III}} n_{\text{III}} \rho_{\text{III}}^{\Pi}; \quad (2.54)$$

$$\omega_{\text{см пот}}^{\text{III}} = \frac{\omega_{\text{см оч}}^{\text{III}}}{n_{\text{III}}}. \quad (2.55)$$

Соотношение между  $\omega_{\text{см пот}}^{\text{III}}$  и  $\omega_{\text{см пот}}^{\text{P}}$  определяется по формуле

$$\rho_{\text{III}}^{\text{P}} = \frac{\omega_{\text{см пот}}^{\text{III}} - \omega_{\text{см пот}}^{\text{P}}}{\omega_{\text{см пот}}^{\text{P}}}. \quad (2.56)$$

Суммарное значение этих величин

$$\rho_{\text{III}} = \rho_{\text{III}}^{\text{P}} - (1 - \rho_{\text{III}}^{\Pi}). \quad (2.57)$$

Определим  $\rho_{\text{P}}$ , используя  $\rho_{\text{III}}^{\Pi}$ , для этого найдем интенсивность поступления разбрасывателей под перегрузку и интенсивность (частоту) прибытия прицепов-перегрузчиков к разбрасывателям с учетом очереди на погрузку:

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{ц}}^{\text{р}}}; \quad (2.58)$$

$$\lambda_{\text{оч}}^{\text{пп}} = \frac{n_{\text{пп}} - \rho_{\text{пп}}^{\text{п}}}{t_{\text{пп без ож}}^{\text{ц}}}. \quad (2.59)$$

При этом коэффициент загрузки разбрасывателей  $\rho_{\text{р}}$  равен

$$\rho_{\text{р}} = \frac{\lambda_{\text{оч}}^{\text{пп}}}{\mu}. \quad (2.60)$$

Время ожидания прицепа-перегрузчика разбрасывателем составляет

$$t_{\text{ож}}^{\text{р}} = \frac{1 - \rho_{\text{р}}}{\lambda_{\text{оч}}^{\text{пп}}}. \quad (2.61)$$

Так как  $\rho_{\text{р}}$  не может быть больше единицы, то при  $\rho_{\text{р}} > 1$  нет ожидания прицепа-перегрузчика.

Рассмотрим, как будут изменяться коэффициенты  $\rho_{\text{пп}}^{\text{п}}$ ,  $\rho_{\text{пп}}^{\text{р}}$ ,  $\rho_{\text{р}}$  в зависимости от расстояния транспортировки (рисунок 2.11). Из графиков видно, что при увеличении расстояния транспортировки  $L_{\text{тр}}$  коэффициенты  $\rho_{\text{пп}}^{\text{п}}$  и  $\rho_{\text{пп}}^{\text{р}}$  стремятся к единице, а  $\rho_{\text{р}}$  – к нулю. При условии корреляции этих коэффициентов можно будет сказать, что коэффициенты загрузки изменяются закономерно и это соответствует двум условиям применения теории массового обслуживания, а именно ординарности и стационарности потока заявок.

Проверить наличие корреляции можно несколькими способами, самым распространенным из которых является метод корреляции Пирсона, но в условии его применения заложено то, что проверяемые показатели должны распределяться по нормальному закону, а в исследуемом случае они распределяются по закону, схожему с пуассоновским. Для определения корреляции в таком случае можно использовать метод Спирмена [87]. Корреляция Спирмена измеряет силу и направление монотонных корреляций между переменными с учетом ранжирования этих переменных. Монотонная зависимость – это когда две переменные последовательно изменяются в одном направлении. Она рассчитывается аналогично корре-

ляции Пирсона, но с учетом порядковых рангов переменных [87]. Для определения корреляции по методу Спирмена требуется провести серию расчетов и определить значения коэффициентов загрузки прицепов-перегрузчиков и разбрасывателей.

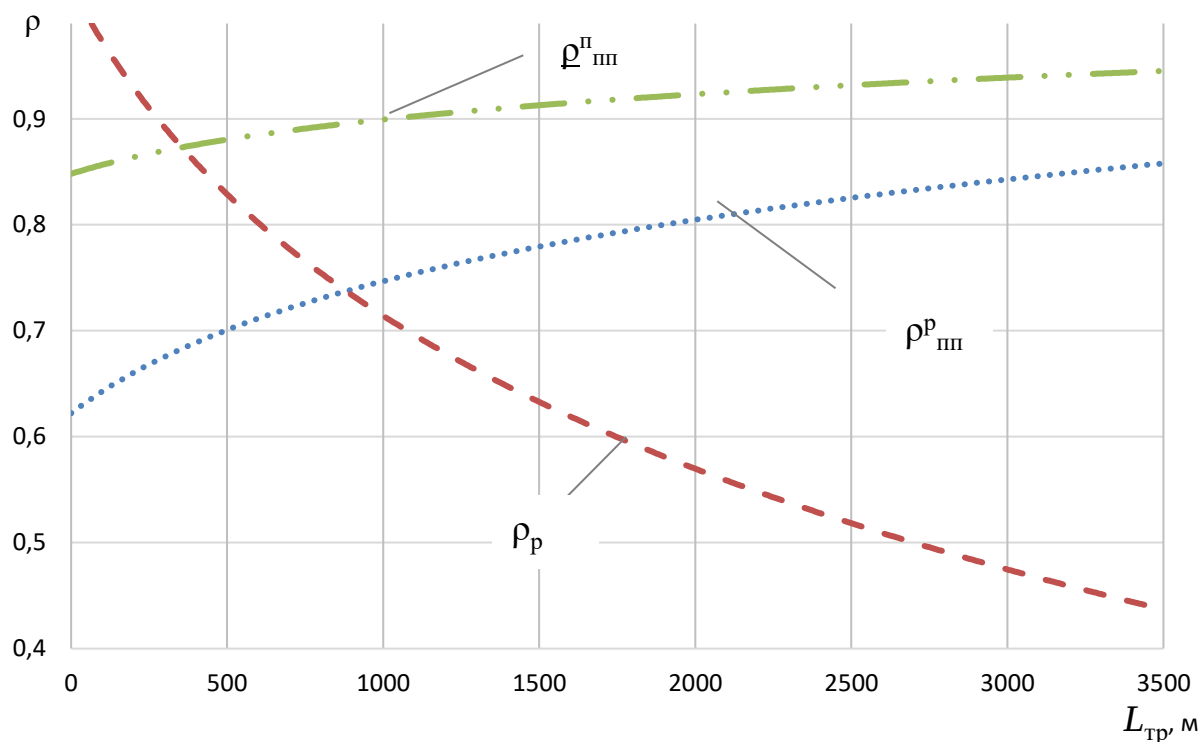


Рисунок 2.11 – Графики зависимости коэффициентов загрузки техники от расстояния транспортировки

Пользуясь формулами (2.55) и (2.59), определили значения  $\rho_{пп}$  и  $\rho_r$  при указанных выше условиях для расстояний от 0 до 3500 м с шагом в 500 м. Результаты приведены в таблице 2.1.

Присвоим ранги полученным значениям и рассчитаем разницу между ними. Результаты приведены в таблице 2.2.

Сумма квадратов разностей составляет

$$\sum d^2 = 49 + 25 + 9 + 1 + 1 + 9 + 25 + 49 + 168.$$

Подставим полученные значения в формулу Спирмена [87]

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)} = 1 - \frac{6 \sum 168}{8(64 - 1)} = -0,84.$$

Полученное значение указывает на сильную монотонную отрицательную корреляцию между  $\rho_{пп}^p$  и  $\rho_p$ , то есть при увеличении  $\rho_{пп}^p$   $\rho_p$  будет уменьшаться и наоборот.

Таблица 2.1 – Расчетные значения коэффициентов  $\rho_{пп}^p$  и  $\rho_p$  для диапазона расстояний транспортировки от 0 до 3500 м

| $L_{тр}, м$ | $\rho_{пп}^p$ | $\rho_p$ |
|-------------|---------------|----------|
| 0           | 0,65          | 0,95     |
| 500         | 0,69          | 0,86     |
| 1000        | 0,73          | 0,72     |
| 1500        | 0,75          | 0,65     |
| 2000        | 0,79          | 0,57     |
| 2500        | 0,82          | 0,51     |
| 3000        | 0,86          | 0,47     |
| 3500        | 0,89          | 0,40     |

Таблица 2.2 – Ранги для полученных значений коэффициентов  $\rho_{пп}^p$  и  $\rho_p$

| $L_{тр}, м$ | $\rho_{пп}^p$ | $\rho_p$ | Ранг $\rho_{пп}^p$<br>$R_1$ | Ранг $\rho_p$<br>$R_2$ | $d = R_1 - R_2$ | $d^2$ |
|-------------|---------------|----------|-----------------------------|------------------------|-----------------|-------|
| 0           | 0.65          | 0.95     | 1                           | 8                      | -7              | 49    |
| 500         | 0.69          | 0.86     | 2                           | 7                      | -5              | 25    |
| 1000        | 0.73          | 0.72     | 3                           | 6                      | -3              | 9     |
| 1500        | 0.75          | 0.65     | 4                           | 5                      | -1              | 1     |
| 2000        | 0.79          | 0.57     | 5                           | 4                      | 1               | 1     |
| 2500        | 0.82          | 0.51     | 6                           | 3                      | 3               | 9     |
| 3000        | 0.86          | 0.47     | 7                           | 2                      | 5               | 25    |
| 3500        | 0.89          | 0.40     | 8                           | 1                      | 7               | 49    |

Проверка значимости корреляции заключается в сравнении полученных

расчетных значений с табличным значением, которое позволяет определить значимость корреляции. В описанном случае число точек расчета равно восьми ( $n = 8$ ). Обычно для такого значения выбирается уровень значимости ( $\alpha = 0,05$ ). По таблице критических значений для установленных  $\alpha$  и  $n$  критическое значение составляет 0,738 [79]. Так как  $|r_s| = |-0,84| = 0,84 > 0,738$ , то между  $\rho_{\text{пп}}$  и  $\rho_p$  существует значимая отрицательная корреляция. Таким образом, для расчета показателей производственной линии внесения, в которой присутствует жесткая связь между технологическими машинами, удовлетворяются условия стационарности и ординарности потока заявок и можно использовать математические модели, основанные на принципах теории массового обслуживания. Полученные выражения (2.46 – 2.61) позволяют разработать и использовать наиболее подходящий инструмент для исследования многозвенных производственных линий – имитационное моделирование [85].

## 2.6 Методика определения параметров разбрасывателя

и прицепа-перегрузчика при внесении твердых органических удобрений и  
дефеката

### 2.6.1 Определение грузоподъемностей разбрасывателя и прицепа-перегрузчика при внесении твердых органических удобрений и дефеката

Выбору оптимальных параметров машин для внесения твердых органических удобрений посвящен ряд исследований. В работах [42, 47, 63, 106] критериями оптимизации выступали материалоемкость, энергоемкость, эксплуатационные затраты и др. показатели. Полученные в них зависимости устанавливают взаимосвязи между грузоподъемностью, мощностью трактора и производительностью агрегатов. Некоторые исследования проводились в период использования маломощных тракторов с разбрасывателями относительно малой грузоподъемно-

сти [43]. Существовавшие методики разрабатывались для машин, предназначенных для внесения конкретных видов удобрений с узкими диапазонами доз, и не учитывали современных технологических решений [90].

Научно-технический прогресс привел к появлению более совершенных и грузоподъемных моделей разбрасывателей. Активное распространение разбрасывающих дисков, работающих с измельченным материалом, обеспечило равномерность внесения в широком диапазоне доз, что способствовало универсализации техники [93, 94]. Кроме того, ранее разработанные методики базировались на иных схемах движения агрегатов, отличающихся от предлагаемой перегрузочной технологии [84]. В связи с этим установленные ранее зависимости требуют адаптации к современным условиям внесения твердых органических удобрений и дефекаата.

Эффективность перегрузочной технологии напрямую зависит от обоснованного выбора параметров всех технических средств. При жесткой технологической связи между машинами рациональные параметры прицепа-перегрузчика влияют на производительность линии не меньше, чем параметры самих разбрасывателей [11, 17]. В связи с этим возникает необходимость в определении рациональных значений грузоподъемности как разбрасывателя  $Q_p$ , так и прицепа-перегрузчика  $Q_{пп}$ . Кроме этого, для обеспечения производительной работы производственной линии внесения требуется обоснование производительности выгрузного устройства прицепа-перегрузчика  $\omega_{в.у}^{пп}$  как ключевого звена, связывающего транспортную и технологическую машины.

Для обоснования параметров машин необходимо выбрать критерии эффективности, отражающие их функциональное назначение. Для разбрасывателя как технологической машины, не выполняющей транспортной работы, основная задача – равномерное распределение материала по полю. Прицеп-перегрузчик в первую очередь – транспортное средство, его основной задачей является перемещение материала от места хранения к разбрасывателям. Критерием эффективности для обеих машин является удельная цикловая производительность на единицу эксплуатационной массы агрегата –  $\omega_p^{уд}$  и  $\omega_{ц.уд}^{пп}$  (га/(т·ч)) [84, 108]. Данный крите-

рий позволяет оценить эксплуатационную эффективность машины в совокупности с ее воздействием на почву и эффективность транспортировки вносимого материала в зависимости от грузоподъемности и массы:

$$\omega_p^{уд} = \frac{\omega_p^ц}{M_{тр} + M_p}; \quad (2.62)$$

$$\omega_{пп}^{уд} = \frac{\omega_{пп}^ц}{M_{тр} + M_{пп}}, \quad (2.63)$$

где  $\omega_p^ц$  – цикловая производительность технологического агрегата, га/ч;

$\omega_{пп}^ц$  – цикловая производительность транспортно-перегрузочного агрегата, га/ч;

$M_{тр}$  – масса агрегируемого трактора, т;

$M_p$  – масса разбрасывателя, т;

$M_{пп}$  – масса прицепа-перегрузчика, т.

Для раскрытия критериев необходима связь между грузоподъемностью и массой машин. Анализ статистических данных отечественных и зарубежных образцов подтвердил наличие линейной корреляции (рисунки 2.12 и 2.13):

$$M_p = kQ_p + n; \quad (2.64)$$

$$M_{пп} = aQ_{пп} + b, \quad (2.65)$$

где  $k, n, a, b$  – коэффициенты пропорциональности.

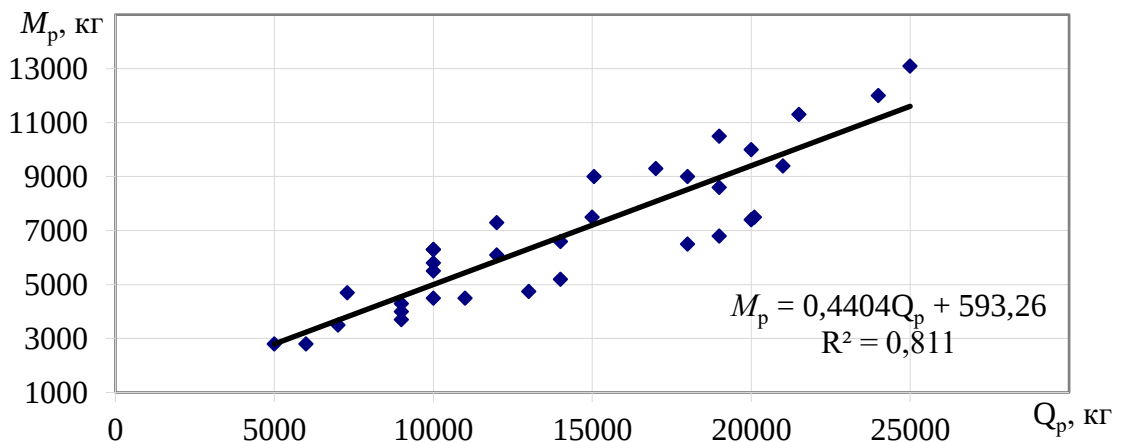


Рисунок 2.12 – График зависимости эксплуатационной массы  $M_p$  разбрасывателей твердых органических удобрений и дефека от их грузоподъемности  $Q_p$

Сравнительный анализ полученных коэффициентов пропорциональности демонстрирует близость значений, характеризующих прирост массы машин. Подтвержденная линейность зависимостей позволяет использовать полученные уравнения для практических расчетов при обосновании параметров машин в составе перегрузочной технологии.

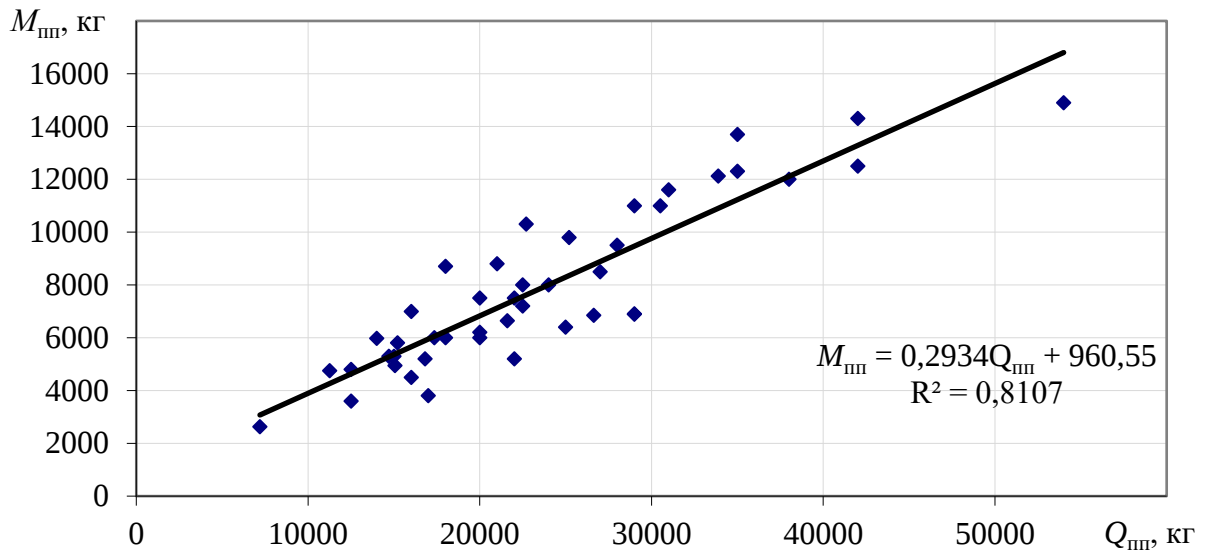


Рисунок 2.13 – График зависимости эксплуатационной массы  $M_{\text{оп}}$  прицепов-перегрузчиков от их грузоподъемности  $Q_{\text{оп}}$

Подставив время цикла работы разбрасывателя (2.28) и зависимости массы от грузоподъемности (2.64) в критерий эффективности (2.62), получаем функцию  $\omega_p^{\text{уд}} = f(Q_p)$ . Взяв производную по  $Q_p$  и приравняв ее к нулю, находим рациональную грузоподъемность:

$$Q_p^{\text{опт}} = \sqrt{\frac{2(K_{\text{пов}} R_0 + 2(L_{\text{тр}} + L_p)) (M_{\text{тр}} + k)}{1000K}} \cdot \sqrt[n]{\left( \frac{\gamma}{\omega_{\text{шт}}^{\text{вн}}} + \frac{0,8}{1000v_{\text{пов}}} + \frac{10\gamma}{Bpd_0 v_p} \right)}. \quad (2.66)$$

Данная грузоподъемность обеспечивает максимум удельной производительности, что гарантирует не только высокую эффективность использования, но и снижение нагрузки на почву.

Аналогично, подставив в критерий эффективности (2.63) зависимости для времени рабочего цикла прицепа-перегрузчика (2.27) и эксплуатационной массы (2.65) и взяв производную по  $Q_{\text{пп}}$ , получаем формулу для определения рациональной грузоподъемности перегрузчика как транспортного средства:

$$Q_{\text{пп}}^{\text{рац}} = \sqrt{\frac{(a + M_{\text{тр}}) \omega_{\text{п}} \omega_{\text{в.у}}^{\text{пп}} V_{\text{р}} \gamma_{\text{м}} (2v_{\text{тр}} L_{\text{тр}} A''(ag + M_{\text{тр}}) - A' L_{\text{пер}})}{b(v_{\text{пер}} V_{\text{р}} \gamma_{\text{м}} A' \omega_{\text{в}}^{\text{пп}} + L_{\text{тр}} g A''(1+b) \cdot \omega_{\text{п}} \omega_{\text{в.у}}^{\text{пп}} + L_{\text{тр}} g b A'' \cdot \omega_{\text{п}} \omega_{\text{в.у}}^{\text{пп}} + A' \cdot \omega_{\text{п}} \omega_{\text{в.у}}^{\text{пп}} L_{\text{пер}} \lambda_{\text{г}})} \quad (2.67)$$

где  $L_{\text{пер}}$  – расстояние переезда от одного разбрасывателя до другого, м;

$\lambda_{\text{г}}$  – степень заполнения кузова прицепа-перегрузчика;

$V_{\text{р}}$  – объем кузова разбрасывателя;

$\gamma_{\text{м}}$  – плотность вносимого материала;

$\omega_{\text{в.у.}}^{\text{пп}}$  – производительность выгрузного устройства прицепа-перегрузчика, т/ч;

$L_{\text{тр}}$  – расстояние транспортировки вносимого материала, м;

$v_{\text{тр}}$  – средняя скорость движения транспортно-перегрузочного агрегата, м/с;

$A'$  – мощность агрегатируемого трактора с учетом потерь, кВт;

$A''$  – сумма коэффициентов сопротивления перекачивания.

Применение критерия удельной цикловой производительности на единицу массы позволяет обосновать рациональную грузоподъемность разбрасывателя, обеспечивающую не только высокую эксплуатационную эффективность, но и снижение негативного воздействия ходовых частей распределительных агрегатов на почву.

Для прицепа-перегрузчика анализ полученной формулы (2.67) показывает, что его рациональная грузоподъемность как транспортного средства в первую очередь зависит от характеристик агрегатируемого трактора и условий внесения (расстояния транспортировки, производительности погрузочного средства и т.д.). Таким образом, при формировании перегрузочной технологии в первую очередь следует определить грузоподъемность разбрасывателя и прицепа-перегрузчика исходя из самых распространенных условий внесения, а затем на основе этих па-

раметров подбирать агрегируемый с ними трактор. Такой подход поможет подобрать наиболее рациональный комплект машин, обеспечивающий высокую эффективность всей технологической линии внесения органических удобрений.

Применение прицепа-перегрузчика как транспортно-технологического средства предполагает несколько иные условия эксплуатации, чем для обычного транспортного средства. Так как технологические машины являются основным звеном, то именно ими определяется производительность всей производственной линии. Примем такое условие, что они должны работать без простоев в ожидании загрузки. Эта взаимосвязь обуславливает зависимость между производительностью основного звена  $\omega_p n_p$  и производительностью прицепа-перегрузчика  $\omega_{пп}$ . Исходя из этого, для определения грузоподъемности прицепа-перегрузчика как транспортно-технологической машины примем его минимально необходимую грузоподъемность  $Q_{пп}$ , обеспечивающую максимальную производительность основного звена  $\omega_p n_p$ , за критерий эффективности.

Как известно, производительность основного звена  $\omega_p n_p$  без учета ожидания не изменяется в течение смены, при этом производительность прицепа-перегрузчика  $\omega_{пп}$  будет изменяться в течение смены из-за меняющегося расстояния транспортировки вносимого материала [130]. Из этого вытекает условие, при котором производственная линия внесения имеет максимальную эффективность: производительность разбрасывателей меньше, чем производительность прицепа-перегрузчика –  $\omega_p n_p \leq \omega_{пп}$  и время цикла разбрасывателя больше, времени цикла прицепа-перегрузчика –  $t_{ц}^p \geq t_{ц}^{пп}$ . При соблюдении этих условий будет обеспечиваться наибольшая производительность основного звена.

Как уже говорилось выше, производительность основного звена будем рассчитывать без учета простоев разбрасывателей в ожидании прицепов-перегрузчиков, то есть производительность основного звена  $\omega_{оз}^{пот}$  можно назвать потенциальной, ее определим по известному выражению [130]

$$\omega_{оз}^{пот} = C_v B_p v_p \tau_p n_p. \quad (2.68)$$

Преобразовав данное выражение для определения производительности прицепа-перегрузчика с использованием выражений (2.1), (2.22), (2.25) и (2.67) получим выражение для потенциальной производительности прицепа-перегрузчика:

$$\omega_{\text{пп}}^{\text{пот}} = \frac{Q_{\text{пп}}}{\frac{Q_{\text{пп}}}{\omega_{\text{оз}}^{\text{пот}}} + t_{\text{п.р.}} + \frac{L_{\text{тр}}}{v_{\text{тр}}}}. \quad (2.69)$$

Время рабочего цикла разбрасывателей и прицепа-перегрузчика можно определить по выражениям (2.27) и (2.29).

Преобразовав формулу (2.69), получим выражение для определения минимально необходимой грузоподъемности прицепа-перегрузчика для обеспечения работы разбрасывателей без простоев в ожидании загрузки в зависимости от расстояния транспортировки:

$$Q_{\text{пп}}^{\text{min}} = \frac{\omega_{\text{р}} \omega_{\text{п}} (t_{\text{п.р.}} v_{\text{р}} + L_{\text{тр}})}{v_{\text{тр}} (\omega_{\text{п}} - \omega_{\text{р}})}. \quad (2.70)$$

Решая данное уравнение, можно определить минимальную грузоподъемность прицепа-перегрузчика, позволяющую основному звену работать без простоев в ожидании прицепов-перегрузчиков. При этом стоит учесть, что грузоподъемность прицепа-перегрузчика должна быть кратна грузоподъемности разбрасывателя. Таким образом, найденная грузоподъемность округляется в большую сторону до ближайшего значения, кратного грузоподъемности разбрасывателя.

#### 2.6.2 Методика определения производительности выгрузного устройства прицепа-перегрузчика в зависимости от мощности гидросистемы агрегируемого трактора и просыпаемости материала

Также важным параметром прицепа-перегрузчика является производительность выгрузного устройства, которая во многом определяет ритмичность и слаженность работы всей производственной линии внесения. Особенностью прицепа-перегрузчика является выполнение им двух принципиально разных функций: транспортной и перегрузочной. В рамках технологической линии он имеет

жесткую связь с разбрасывателями, что требует согласования параметров этих машин для обеспечения непрерывности и высокой производительности процесса внесения [6]. Наряду с взаимосвязью параметров машин производительность выгрузного устройства оказывает значительное влияние на выбор грузоподъемности прицепа-перегрузчика и эффективность всей технологической линии внесения. В свою очередь, производительность выгрузного устройства зависит от его конструктивных особенностей и характеристик агрегируемого с прицепом-перегрузчиком трактора [115, 116].

Важным элементом составляющей производительности выгрузного устройства является подача материала транспортной лентой. Исходя из работы [75], у каждой скорости движения транспортной ленты существует предельное значение величины подачи материала  $q_{\text{гр.пред}}$ , превышение которой приводит к нарастающему осыпанию (обратному течению материала по ленте), что резко снижает производительность и повышает удельные затраты на перегрузку одной тонны материала [80, 110]. Это означает, что реальная производительность выгрузного устройства ограничивается не только мощностью, передаваемой через гидросистему трактора, но и предельной подачей перегружаемого материала. Помимо осыпания на производительность выгрузного устройства влияет просыпание материала. При подаче, превышающей объемную емкость ленты, происходит просыпание материала через негерметичные сопряжения транспортера в момент попадания перегружаемого материала на транспортную ленту [114].

Для учета этих факторов при расчете производительности выгрузного устройства была выдвинута гипотеза о параболической зависимости предельной секундной подачи перегружаемого материала на выгрузное устройство  $q_{\text{гр.пред}}$  от скорости движения ленты  $v_{\text{тр}}$  и угла наклона транспортера  $\beta$ . Данная гипотеза основана на анализе физических процессов, происходящих при перегрузке материала [55, 121].

Предположим, что потеря эффективности перегрузки в зависимости от просыпаемости будет иметь вид параболы, что обусловлено нелинейным характером

взаимодействия частиц материала между собой и с транспортером. Функция просыпаемости, характеризующая количество теряемого материала в процессе перегрузки от вибрации и прочих факторов, является интегральной характеристикой, объединяющей несколько этапов взаимодействия материала и транспортной ленты. Первым ограничивающим фактором является мощность гидросистемы агрегатируемого трактора [109]. В свою очередь, мощность, потребляемая транспортером, складывается из двух составляющих: энергии, приходящейся на холостой ход транспортера  $N_{\text{хх}}$ , и на перемещение материала  $N_{\text{полезн}}$  [111]:

$$N_{\text{общ}} = N_{\text{хх}} + N_{\text{полезн}}. \quad (2.71)$$

Преобразовав данное выражение с использованием приведенных ранее зависимостей, получим

$$N_{\text{общ}} = [(q_{\text{л}} + q_{\text{р.р}})gk_{\text{тр}} \cos \beta + q_{\text{л}}gH]v_{\text{тр}} + q_{\text{гр}}g \cdot (H + k_{\text{тр}}L \cos \beta)v_{\text{тр}}, \quad (2.72)$$

где  $q_{\text{л}}$  – погонная масса транспортной ленты, кг/м;

$q_{\text{р.р}}$  – сопротивление вращению роликов, Н;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$k_{\text{тр}}$  – коэффициент условий работы транспортера;

$\beta$  – угол наклона транспортера, град.;

$H$  – высота подъема груза, м;

$v_{\text{тр}}$  – скорость транспортной ленты, м/с;

$q_{\text{гр}}$  – погонная масса груза, м/с.

Вторым фактором, ограничивающим производительность выгрузного устройства, является просыпаемость материала, которая представляет собой функцию от скорости транспортной ленты  $U$  при постоянной подаче перегружаемого материала на ленту. Производительность определяется балансом мощности и просыпаемости, которые можно представить в виде функций:

$$P = f(v_{\text{тр}}, q_{\text{гр}}, \beta); \quad (2.73)$$

$$U = g(v_{\text{тр}}, q_{\text{гр}}, \beta), \quad (2.74)$$

где  $P$  – энергия, затрачиваемая на привод транспортера, кДж.

При определении производительности выгрузного устройства исходными

данными будут мощность привода и угол наклона транспортера [2, 61].

Для определения рациональных параметров подачи и скорости транспортной ленты по критерию максимальной производительности использовался итеративный алгоритм [81, 90, 99]. Данный метод предполагает последовательное приближение к рациональному сочетанию скорости движения транспортной ленты и подачи материала, при котором достигается максимальная производительность при минимальном осыпании и полном использовании доступной мощности привода. Рассмотрим применение итеративного алгоритма при определении рациональных параметров выгрузного устройства (рисунки 2.14 и 2.15).

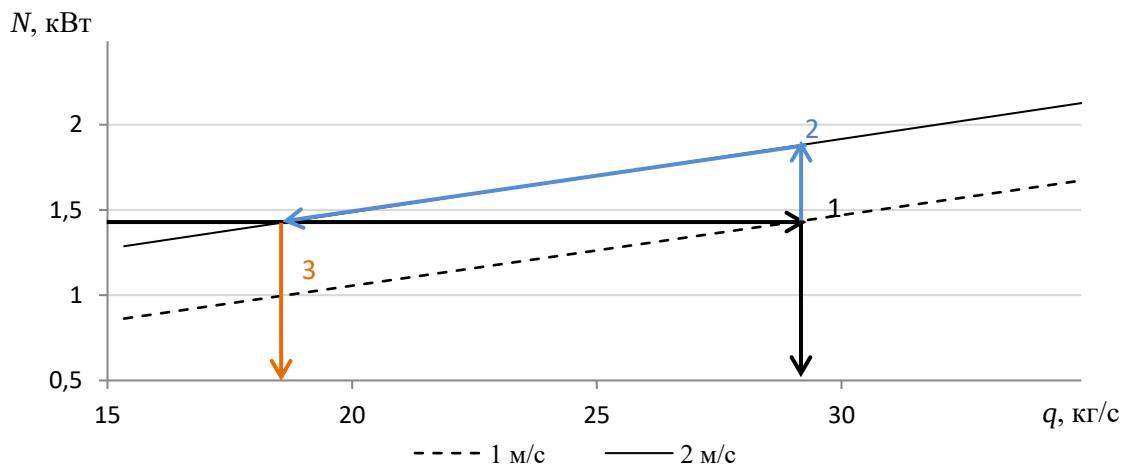


Рисунок 2.14 – Зависимость потребляемой мощности привода транспортера  $N$  от подачи материала при разной скорости транспортной ленты  $v_{тр}$

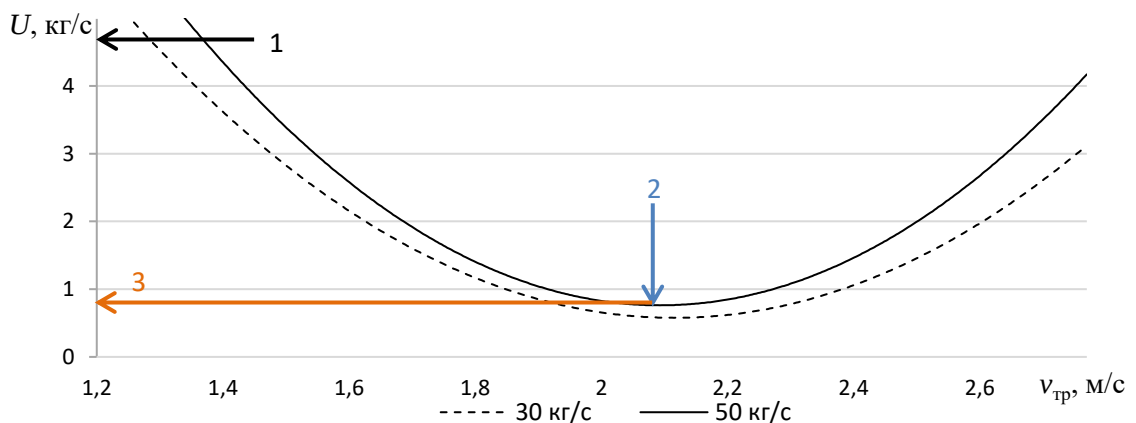


Рисунок 2.15 – Зависимость просыпаемости материала  $U$  от скорости транспортной ленты  $v_{тр}$  при разной подаче материала  $q_{гр}$

### 1. Инициализация начальных параметров:

$$v_{\text{тр}} = v_{\text{тр.min}}, q_0 = q_i. \quad (2.75)$$

Чтобы обеспечить максимальную производительность для располагаемой мощности начальные значения выбираем исходя из минимальной скорости транспортной ленты  $v_{\text{тр.min}}$ , так как при ней обеспечивается наибольшая эффективность с точки зрения удельных затрат энергии на перегрузку материала. В месте пересечения линии мощности и скорости опускаем вертикальную линию (рисунок 2.14), так определяем максимальную подачу материала  $q_0$ , которая обеспечивается при минимальной скорости, исходя из мощности привода.

2. Определение рациональной скорости транспортной ленты по критерию просыпаемости для текущей подачи (рисунок 2.15):

$$v_i = \arg \min g(v_{\text{тр}}, q_i). \quad (2.76)$$

Для определенного на первом шаге значения подачи находится такая скорость транспортной ленты, при которой просыпаемость материала минимальна. Проводится вертикальная линия до пересечения со скоростью, которой соответствует минимальная просыпаемость для найденной подачи, а затем опускаемся по линии скорости до пересечения с горизонтальной линией, обозначающей мощность привода выгрузного устройства (рисунок 2.14).

### 3. Коррекция по мощностному ограничению:

$$q_{i+1} = \max\{q : f(v_i, q) \leq N_{\text{пр}}\}. \quad (2.77)$$

От места пересечения линии скорости и мощности привода (рисунок 2.14) проводим вертикальную линию вниз и определяем максимальную подачу, при которой потребляемая мощность не превышает доступную мощность привода. Для подачи  $(q_{i+1})$  и скорости транспортной ленты  $(v_{i+1})$  определяем просыпаемость, проводя горизонтальную линию (рисунок 2.15).

### 4. Уточнение скорости для скорректированной подачи:

$$v_{i+1} = \arg \min g(v_i, q_{i+1}). \quad (2.78)$$

Для подачи  $(q_{i+1})$  находим скорость, при которой просыпаемость минимальна и проверяем, насколько изменились значения подачи и скорости по сравнению с предыдущей итерацией.

Если после проведения итерации (шаг 4) получается скорость, для которой параметры затрат мощности и осыпаемости неизвестны, то необходимо провести интерполяцию, если значения попадают внутрь диапазона исследованных параметров, или экстраполяцию, если значения не попадают внутрь диапазона исследованных параметров, но при условии, что они отклоняются не более 25% от крайней точки [64, 79]. Так как зависимость мощности от подачи и скорости носит линейный характер, то в этом случае можно ограничиться билинейной интерполяцией. Этот метод является довольно простым и достаточно точным. Интерполяцию следует проводить в несколько этапов. Для затрат мощности и осыпаемости при определенной скорости

$$f_{(v, q_j)} = f_{(v_i, q_j)} + \frac{f_{(v_{i+1}, q_j)} - f_{(v_i, q_j)}}{v_{i+1} - v_i} \cdot (v - v_i). \quad (2.79)$$

Если результаты, полученные после очередной итерации, не отличаются между собой больше, чем на величину доверительного интервала (обычно принимается значение не более 5%), то рациональные параметры скорости и подачи материала на него для установленного угла считаются найденными. Если отличие больше установленного процента, то повторяются действия, начиная с шага 3.

По окончании процесса итерации выявленные параметры выгрузного устройства описываются выражениями:

$$U_{\min} = g(v_{i+n}, q_{i+n}, \beta); \quad (2.80)$$

$$k_n = \frac{q_{i+n} - U_{\min}}{q_{i+n}}; \quad (2.81)$$

$$\omega_{\text{в.у.}} = q_{i+n} k_n, \quad (2.82)$$

где  $k_n$  – коэффициент просыпаемости при  $i$ -ых параметрах скорости транспортной ленты и секундной подачи.

Данная методика позволяет определить рациональные параметры выгрузного устройства по критерию максимальной производительности, который учитывает как энергетические ограничения, так и технологические особенности процесса перегрузки материала.

Для подтверждения адекватности результатов определения рациональной скорости ленточного транспортера и подачи материала на выгрузное устройство необходимо провести экспериментальные исследования для определения затрат мощности на перегрузку в разных условиях и значений просыпаемости для подстильного навоза и материалов типа дефеката, а также проверки соответствия расчетных и опытных данных по затратам мощности на перегрузку и просыпаемость материала.

## 2.7 Выводы

Предложенный способ внесения твердых органических удобрений и мелиорантов (патент № 2832329 РФ) заключается в том, что загружают вносимый материал из места хранения, в прицеп, в кузове которого установлено ленточное выгрузное устройство, перевозят вносимый материал и перегружают его в разбрасыватель, работающий на поле. Использование указанного способа обеспечивает повышение производительности основных технологических агрегатов – разбрасывателей, уменьшая уплотнение почвы и потери вносимого материала.

Полученные аналитические зависимости описывают временные циклы и параметры взаимодействия всех звеньев линии внесения: погрузочного, транспортно-перегрузочного и распределяющего, и позволяют оценить влияние многочисленных технических, производственных и организационных факторов на производительность линии внесения, а также определить ключевые показатели, в частности коэффициенты использования циклового времени разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков, и установить взаимосвязи между ними.

В результате анализа взаимодействия распределительных и транспортно-

перегрузочных агрегатов выбраны два способа организации их движения, отличающиеся местоположением точек загрузки и характером работы агрегатов. Способ 1 – загрузка на одной стороне обрабатываемого участка, а способ 2 – загрузка на двух сторонах обрабатываемого участка. Способ 1 обеспечивает более равномерный и предсказуемый рост транспортного плеча, не зависящий от агротехнических параметров, а так как с каждым последующим циклом у прицепов-перегрузчиков линейно увеличивается расстояние транспортировки, то вероятность возникновения очередей на погрузку в течение смены снижается. Способ 2 характеризуется неравномерным изменением расстояния транспортировки в течение циклового времени смены, которое увеличивается при работе двух и более транспортно-перегрузочных агрегатов и становится критичным при большом расстоянии перевозки материала, что приводит к увеличению времени ожидания разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков, а также к образованию очереди на погрузку у бурта из-за разного времени цикла у прицепов-перегрузчиков.

Снижение грузоподъемности и рабочего времени разбрасывателя приводит к повышению вероятности перехода в состояние «перегрузки», что может потребовать увеличения транспортной скорости прицепа-перегрузчика и снижения грузоподъемности разбрасывателей для уменьшения времени их загрузки. Из этого следует, что при сохранении других параметров неизменными, уменьшение грузоподъемности разбрасывателей при увеличении их количества способствует повышению производительности производственной линии внесения, работающей по перегрузочной технологии с применением прицепов-перегрузчиков. Чем выше средняя скорость транспортно-перегрузочного агрегата, производительности погрузочной машины и выгрузного устройства прицепа-перегрузчика, тем выше вероятность нахождения прицепа-перегрузчика в состоянии перегрузки.

Анализ параметров линии внесения с использованием прицепов-перегрузчиков показывает, что из-за наличия жесткой связи между машинами большое влияние на ее эффективность будет оказывать соотношение транспортно-перегру-

зочных и технологических машин, а также их параметров. Отличительной особенностью линии внесения с применением прицепов-перегрузчиков является время ожидания разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков, на длительность которого влияет множество технических и организационных параметров, таких как рабочая ширина захвата, транспортная и рабочие скорости, расстояние транспортировки, грузоподъемность разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков, доза внесения, производительность погрузчика и др. Некоторые из этих факторов являются постоянными для конкретных условий (доза внесения, рабочая ширина захвата и т.д.), но можно подобрать грузоподъемность машин в технологической линии для получения наиболее эффективного (сбалансированного) состава линии.

Проведенные теоретические исследования влияния состава звеньев в предлагаемом виде перегрузочной технологии на производительность внесения твердых органических удобрений и дефеката показывают, что простейший состав (один разбрасыватель, один прицеп-перегрузчик) недостаточно эффективен из-за длительного времени ожидания разбрасывателем прицепа-перегрузчика. Добавление прицепов-перегрузчиков в транспортно-перегрузочное звено уменьшает простои разбрасывателя, но повышает вероятность простоев прицепов-перегрузчиков. При определенных условиях внесения у предлагаемого вида перегрузочной технологии присутствует рациональное расстояние транспортировки, характеризующееся наименьшими взаимными простоями разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков в ожидании начала перегрузки, также этим условиям соответствуют наименьшие удельные затраты средств и наибольшая производительность линии внесения. Рациональное расстояние транспортировки при прочих равных параметрах зависит от количества прицепов-перегрузчиков. Относительно рационального расстояния рассчитывается диапазон расстояний применения предлагаемого вида перегрузочной технологии для заданной дозы внесения и параметров задействованных машин.

На появление простоев техники в ожидании сильное влияние оказывают вероятностные параметры, которые присущи процессу внесения твердых органиче-

ских удобрений и дефеката. Выполненная оценка интенсивности переходов из одного состояния в другое показала, что во многом простои зависят от параметров производственной линии внесения и условий взаимодействия машин. Показатели производственной линии внесения могут определяться по классическим методикам, применяемым при расчете параметров линии внесения, но они не учитывают накопительный эффект простоев в рабочем цикле транспортных и технологических машин.

Полученные выражения, определяющие коэффициенты загрузки для погрузчиков, прицепов-перегрузчиков и разбрасывателей, дают возможность с достаточной точностью определить показатели линии внесения и соответственно рациональный диапазон применения конкретного состава линии внесения, применяемого по предлагаемому виду перегрузочной технологии. Установить время ожидания машин при условии их сложного взаимодействия и взаимного влияния простоев друг на друга позволило применение теории массового обслуживания, при этом реализация вычислительных процедур осуществлялась посредством имитационного моделирования.

Рациональная грузоподъемность разбрасывателя устанавливается по максимальной удельной цикловой производительности на единицу эксплуатационной массы агрегата. Для прицепа-перегрузчика как транспортного средства рациональная грузоподъемность определяется по удельной производительности, а как технологического средства – обосновывается по рациональной грузоподъемности, исключаящей простои разбрасывателей, при этом грузоподъемность прицепа-перегрузчика должна быть кратной грузоподъемности разбрасывателя. Производительность выгрузного устройства прицепа-перегрузчика зависит от мощности гидросистемы агрегируемого трактора, скорости и ширины ленты, а также угла наклона транспортера.

### 3 Программа и методика проведения хронометражных наблюдений, экспериментальных исследований и имитационного моделирования

#### 3.1 Программа проведения хронометражных наблюдений и экспериментальных исследований

Для получения недостающих данных об элементах циклового и внециклового времени смены погрузочных и технологических машин, параметров выгрузного устройства были проведены хронометражные наблюдения и экспериментальные исследования.

Программа хронометражных наблюдений включала следующие задачи:

- определение времени элементов рабочего цикла разбрасывателей;
- определение времени элементов рабочего цикла погрузчиков.

Хронометражные наблюдения проводились на базе сельскохозяйственных предприятий: АО «Хреновской конный завод», ООО «ЭкоНиваАгро-Восточное» Бобровского района и АО «Павловская нива» Павловского района Воронежской области. Объектами исследования при определении элементов рабочего цикла являлись производственные линии внесения, которые отличались применением различных комплексов машин. Эти комплексы включали в себя погрузчики LiuGong-862, SDLG-941L и Manitou MLT-X-735 с ковшами разного объема, а также распределительные агрегаты, состоящие из разбрасывателей грузоподъемностью 25 т и агрегатируемых с ними тракторов John Deere восьмой серии.

Экспериментальные исследования проводились для установления зависимости производительности выгрузного устройства ленточного типа от мощности привода и величины просыпания перегружаемого материала при работе с твердыми органическими удобрениями и дефекатом. На основе полученных зависимостей предполагалось определить рациональные кинематические и конструктивные параметры выгрузного устройства, обеспечивающие его эффективную работу.

Программой экспериментальных исследований предусматривалось:

- проверить работоспособность выгрузного устройства с ленточным транспортером при перегрузке сыпучих материалов большой насыпной плотности при разных параметрах работы выгрузного устройства;
- установить зависимость изменения рабочих параметров выгрузного устройства от мощности привода;
- определить значения просыпаемости и осыпаемости, а также оценить влияние этих параметров на процесс перегрузки.

### 3.2 Методика проведения хронометражных наблюдений

Согласно ГОСТ 24055-2016 и ГОСТ 24059-2017 для достижения наиболее точных результатов хронометражные наблюдения необходимо проводить методом сплошной хронографии и поэлементного хронометража [30]. Наиболее удобным и практичным способом проведения хронометражных наблюдений является видеорегистрация рабочего процесса [103]. Применение видеосъемки позволяет получить полную запись всех элементов технологического процесса с возможностью последующего анализа полученных данных. Возможность многократного просмотра отдельных элементов технологических операций позволяет значительно повысить точность полученных данных.

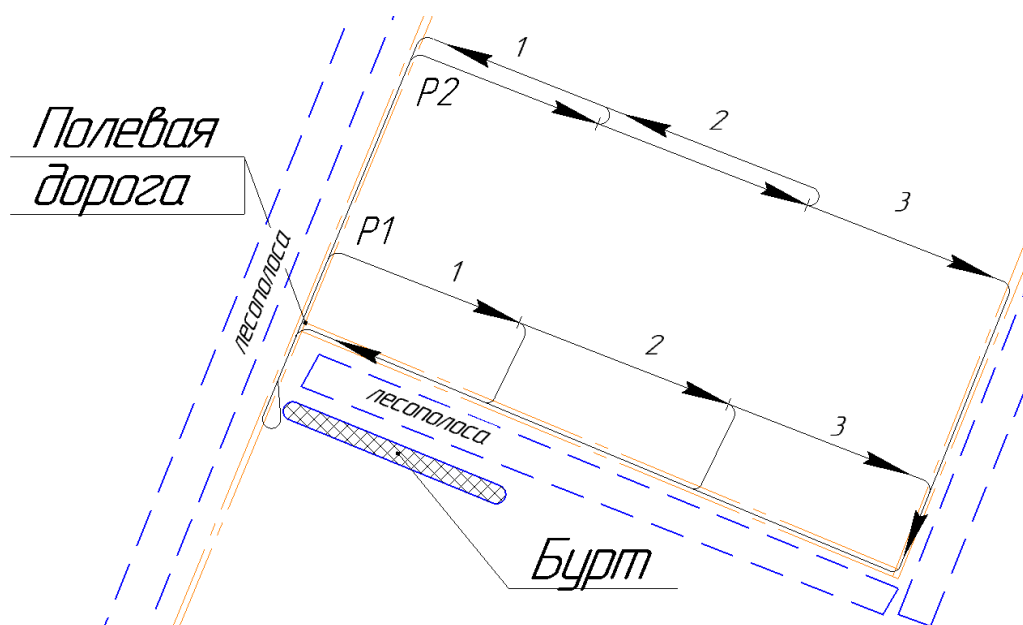
Запись видео происходила на устройство с расширенными мультимедийными возможностями Samsung A04. Хранение видеофайлов было организовано на внешнем носителе информации – USB-флеш-накопителе. Видеофиксация проводилась как на удалении от работающих разбрасывателей, так и в кабине агрегируемого трактора. Такой способ записи позволил точнее определить моменты начала поворотов, разворотов, включения и выключения рабочих органов.

Проведение хронометражных наблюдений проводилось на базе указанных сельхозпредприятий в разное время года. Применялись различные технологии внесения и работу осуществляли разные механизаторы, таким образом можно учесть различные внешние условия, влияющие на время выполнения элементов

рабочего цикла агрегатов. Далее в качестве примера описываются хронометражные наблюдения, проводившиеся в АО «Хреновской конный завод».

Вносимый материал вывозился на край поля двумя транспортными агрегатами, состоящими из саморазгружающихся прицепов Fliegl ASW 256 и Joskin Tornado 3 T7018/28BV и агрегатируемых с ними тракторов John Deere 8410. Среднее расстояние транспортирования навоза из хранилища до бурта составляло 3850 м. Общая масса вывезенного навоза превышала 4480 т, так как оставшимся материалом из этого бурта предполагалось обработать соседние поля.

Внесение твердых органических удобрений осуществлялось по стерне кукурузы. В качестве вносимого материала использовался навоз КРС. Навоз доставлялся из навозохранилища ближайшего животноводческого комплекса и складировался на краю поля, где формировался бурт высотой 2,5...3 м. Протяженность бурта составляла приблизительно 300 м. Следует отметить, что бурт располагался на соседнем поле, отделенном от обрабатываемого поля лесополосой. Такое расположение бурта увеличивало расстояние транспортировки вносимого материала разбрасывателями. Схема движения разбрасывателей при внесении показана на рисунке 3.1. Из данной схемы движения видно, что, несмотря на довольно большую грузоподъемность разбрасывателей, высокая доза внесения не позволяла обработать все поле за один проход. Для обработки всей длины поля требовалось выполнить три рабочих цикла. Каждый следующий рабочий цикл выполнялся на следующем участке, продолжая предыдущий проход. С каждым следующим циклом увеличивалось расстояние транспортировки от бурта до места внесения и уменьшалось при начале обработки следующего участка. При этом разбрасыватель № 1 обрабатывал северный участок поля, из-за этого расстояние транспортировки вносимого материала от бурта до места внесения было всегда больше, чем у разбрасывателя № 2 на величину интервала между ними. Способ перемещения разбрасывателя № 2 при первой обработке новой проходки по обрабатываемому участку – Г-образный, а при последующих – четырехугольный. Затем разбрасыватель № 1 обрабатывал южный участок поля. Таким образом, расстояние от бурта до места внесения было меньше, чем у разбрасывателя № 2. Помимо этого, отличие заключалось в способе движения, на загонах, близких к южному краю поля, применялся четырехугольный способ перемещения.



P1 – разбрасыватель № 1; P2 – разбрасыватель № 2;

1, 2, 3 – первая, вторая и третья деланки

Рисунок 3.1 – Схема движения распределительных агрегатов при внесении твердых органических удобрений

Вывоз вносимого материала к месту временного хранения проводился заблаговременно. Доза внесения равнялась 80 т/га. Плотность материала определялась расчетным методом путем взвешивания пустого и груженого технологического агрегата. Взвешивание проходили оба технологических агрегата в начале внесения. Средняя насыпная плотность материала составила порядка 880 кг/м<sup>3</sup>.

### 3.3 Методика проведения экспериментальных исследований по определению мощности и просыпаемости материала при перегрузке ленточным транспортером

Проведение натурных экспериментальных исследований с полноразмерным прицепом-перегрузчиком при перегрузке твердых органических удобрений и дефекта сопряжено со значительными материальными и временными затратами, необходимостью привлечения большегрузной техники и сложностью оперативного варьирования параметров выгрузного устройства в широком диапазоне. В связи с этим для изучения закономерностей процесса перегрузки и определения

его рациональных параметров использовался метод физического моделирования на уменьшенном прототипе выгрузного устройства.

Применение в рамках экспериментального исследования уменьшенного прототипа в качестве экспериментальной установки базируется на принципах физического моделирования с неполным геометрическим подобием и широко распространенном в транспортном машиностроении методе секционирования [43].

Суть данного подхода заключается в том, что объектом экспериментального исследования является не все устройство целиком, а его отдельный участок или секция. В отличие от классического масштабного моделирования, требующего строгого сохранения пропорций всех линейных размеров, метод секционирования допускает сознательное искажение геометрического масштаба по ширине рабочего органа при сохранении длины прототипа, близкой к полноразмерному устройству.

Отдельную сложность представляет широкий диапазон значений насыпной плотности и физико-механических свойств исследуемых материалов, который зависит от их состояния, способа хранения и других факторов [7, 51, 124]. Поэтому для максимально широкого охвата этого диапазона при проведении эксперимента были применены в том числе и материалы, схожие по свойствам с исследуемыми и имитирующие их различные состояния.

Эксперимент проводился на территории завода ООО «ОЛСАМ», расположенного в Новоусманском районе Воронежской области. При проведении опытов использовались материалы с характерными физико-механическими свойствами для подстилочного навоза и дефеката. Каждый из этих материалов имеет разную насыпную плотность, которая характерна для дефеката и подстилочного навоза в их разных состояниях, что позволяет определить эффективность работы выгрузного устройства при перегрузке материала в достаточно широком диапазоне насыпной плотности и сыпучести [85]. Определялись энергозатраты и другие параметры, присущие процессу перегрузки, а также разрабатывалась методика определения рабочих параметров выгрузного устройства прицепа-перегрузчика на основе полученных результатов.

Испытания проводились в соответствии с утвержденной методикой проведения испытаний [32]. Во время подготовки к эксперименту было решено проводить его по методике полнофакторного эксперимента (ПФЭ). Результаты, полученные посредством ПФЭ, позволяют учесть взаимное влияние различных факторов и построить номограмму, отражающую зависимость энергозатрат и просыпаемости от подачи материала и скорости транспортной ленты для значений, находящихся в исследуемом диапазоне, но не совпадающих с заданными уровнями факторов.

В качестве уменьшенного прототипа выгрузного устройства выступал перегрузчик Р6-КШП-6 (рисунок 3.2). Данный перегрузчик имеет шнековое загрузочное устройство с рабочей шириной 1,8 м, состоящее из подающего шнека 1 и ковшового элеватора 2, а также ленточный транспортер с планками 3 длиной 4,8 м и шириной 0,5 м. Применение данного перегрузчика в качестве уменьшенного прототипа обосновано следующими факторами:

- плоскопараллельный характер течения материала, характерный для ленточных транспортеров, работающих в установившемся режиме, при котором движение частиц перегружаемого материала является практически однородным за исключением места подачи и схода материала с транспортера. Таким образом, уменьшение ширины транспортной ленты не оказывает значимого влияния на поведение перегружаемого материала и показатели работы уменьшенного прототипа;

- ленточные выгрузные устройства оснащаются транспортерами, состоящими из нескольких параллельных секций или имеющими ширину, кратную ширине уменьшенного прототипа [18, 50, 83, 107]. В данном случае можно рассматривать транспортёрную ленту Р6-КШП-6 как одну из секций полноразмерного выгрузного устройства.

- при исследовании процессов, связанных с сыпучими материалами в качестве ключевого критерия кинематического подобия, обычно рассматривается число Фруда. При этом для ленточных транспортеров в рабочем диапазоне скоростей ленты установлено существование области, близкой к автомобильной по

критерию Фруда [70]. В этой области качественная картина течения материала практически перестаёт зависеть от геометрических параметров транспортера. Автомодельность допускает сознательное искажение геометрических размеров транспортерной ленты без значимого влияния на характер исследуемых процессов. Благодаря этому применение уменьшенного прототипа возможно как для изучения закономерностей просыпания материала, так и для определения затрат мощности на привод транспортера.



1 – подающий шнек, 2 – ковшовый элеватор, 3 – ленточный транспортер

Рисунок 3.2 – Погрузчик Р6-КШП-6

Для регулировки скорости транспортерной ленты и секундной подачи в электрическую систему погрузчика были интегрированы два частотных преобразователя ATV31HU30N4, обеспечивающие плавное изменение частоты вращения приводных двигателей [66, 105, 129].

Установленные частотные преобразователи также использовались для измерения активной мощности, передаваемой на приводной электродвигатель ленточного транспортера, что необходимо для определения затрачиваемой энергии

на перегрузку материала при различных параметрах работы выгрузного транспортера. Согласно паспорту частотного преобразователя, точность измерений соответствует первому классу точности по ГОСТ 7217-87 с относительной погрешностью измерения не более 0,5% [33]. Секундная подача материала при изменении частоты вращения определялась хронометрированием цикла работы загрузочного устройства и взвешиванием порций перегруженного материала на автомобильных весах ВА СХТ 20-100-20-30 с погрешностью 20 кг. В связи с тем, что при проведении опытов использовались разные материалы, то секундная подача материала на ленточный транспортер варьировалась в широком диапазоне – от 15 до 60 кг/с, что соответствует производительности выгрузного устройства соответственно от 54 до 216 т/ч. Учитывая размер используемого прототипа, такая производительность соответствует диапазону значений полноразмерного выгрузного устройства от 216 до 864 т/ч. Угол установки ленточного транспортера изменялся посредством винтового домкрата. Во время эксперимента транспортеру задавались углы в диапазоне от 25 до 35 градусов, так как установка углов внутри указанного диапазона наиболее вероятная при перегрузке материала из прицепа-перегрузчика в разбрасыватель.

Опыты проводились следующим образом: погрузчик устанавливался на ровную твердую поверхность, перед ним формировался валок перегружаемого материала длиной не менее 10 м, шириной 1...1,2 м и высотой до 0,7 м (рисунок 3.3). Рабочим органам придавались параметры, соответствующие проводимому опыту и прототип подавался вперед; при движении он захватывал расположенный перед собой валок и высыпал его непосредственно за собой. Во время опыта фиксировались значения мощности на привод пустого транспортера и транспортера с материалом. Также определялась масса материала, просыпавшегося в ходе опыта. После полной перегрузки валка прототип разворачивался и проводился следующий опыт.



Рисунок 3.3 – Подготовка погрузчика и валка к проведению опытов

В ходе эксперимента подтвердилось, что исследуемые материалы изменяют свою структуру в ходе перегрузки, поэтому их насыпная плотность измерялась несколько раз в течение всего эксперимента [76]. Измерение насыпной плотности проводилось следующим образом: мерная емкость объемом 20,4 литра заполнялась материалом с разных мест валка и взвешивалась на напольных весах, погрешность измерений которых не превышала 0,1 кг.

Для сглаживания влияния неоднородности перегружаемого материала и других неучтенных факторов, опыты проводились в случайном порядке [46]. В случайном порядке выставлялись скорость ленточного транспортера и секундная подача материала на транспортер, но последовательно увеличивался угол наклона транспортера из-за его длительной и трудоёмкой переустановки.

Просыпаемость перегружаемого материала с наклонного транспортера определялась путем взвешивания просыпавшегося материала в негерметичную часть транспортера (нижний край транспортной ленты) по окончании опыта, а начало обратного течения материала – визуально по потоку осыпавшегося материала непосредственно на самом транспортере.

На первом этапе эксперимента опытным путем измерялась удерживающая

способность ленты. Определение этого параметра проводилось при неподвижной транспортной ленте с постепенно увеличивающейся подачей материала. В момент начала интенсивного осыпания материала фиксировалось значение секундной подачи, которое и является предельным для статичной ленты.

На втором этапе устанавливалась зависимость предельной подачи от скорости транспортной ленты  $q_{гр.пред} = f(v_{тр})$ . Для этого проводилась серия опытов с повышением скорости движения транспортной ленты и фиксировались значения, при которых происходило интенсивное осыпание [30, 124]. Таким образом, для каждой скорости определялось предельное значение подачи, предшествующее началу интенсивного осыпания. Помимо определения осыпаемости, во время опытов по определению энергозатрат замерялась общая масса просыпавшегося в течение опыта материала. Полученные опытные данные скорости и подачи служили основой для последующей математической обработки.

### 3.4 Методика обработки результатов хронометражных наблюдений и экспериментальных исследований

#### 3.4.1 Контроль и учет элементов рабочего цикла технологических и погрузочных машин

Наблюдение и контроль работы велись способом видеорегистрации за всеми машинами производственной линии внесения. В процессе наблюдения не отмечались моменты начала и конца рабочих циклов или их элементов. Обработка результатов проводилась после наблюдений путем просмотра видеозаписи. Во время анализа отмечались лишь элементы времени циклов, а не циклы целиком. Количество циклов позже определялось путем анализа хронокарт. Определение времени, затрачиваемого на каждую операцию, проводилось посредством хронометражной шкалы видеопроектора. Таким образом, обеспечивается достаточная точность для определения времени каждого элемента рабочего цикла. Со-

гласно ГОСТ-24055-2016 если время измеряемого элемента равно или больше десяти секунд, то значит, допускаемая погрешность равняется одной секунде [30].

В качестве примера приведем часть таблицы хронометражных наблюдений, куда записывались продолжительности выполнения различных элементов рабочего цикла при его анализе (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Результаты хронометражных наблюдений

| № | Элемент времени рабочей смены          | Время<br>конца опе-<br>рации,<br>ч:мин | Продол-жи-<br>тель-ность,<br>мин. | Шифр<br>элемента<br>времени |
|---|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1 | Загрузка разбрасывателя<br>погрузчиком | 0:5,2                                  | 5,2                               | $t_{\Pi}$                   |
| 2 | Разворот на 180 градусов               | 0:5,7                                  | 0,5                               | $t_{\text{пов}180}$         |
| 3 | Поворот на 90 градусов                 | 0:5,9                                  | 0,25                              | $t_{\text{пов}90}$          |
| 4 | Движение с грузом                      | 0:8,3                                  | 2,3                               | $t_{\text{дг}}$             |
| 5 | Поворот на 90 градусов                 | 0:8,5                                  | 0,25                              | $t_{\text{пов } 90}$        |
| 6 | Рабочий ход                            | 0:16,5                                 | 8                                 | $t_p$                       |
| 7 | Разворот на 180 градусов               | 0:17,05                                | 0,55                              | $t_{\text{пов}180}$         |

В таблице 3.1 каждый элемент рабочего цикла нумеровался последовательно, при этом время конца операции отмечалось на общем хронометраже рабочей смены. Продолжительность операции рассчитывалась как разница времени предыдущей и следующей операций.

В первые дни внесения у разбрасывателей возникали простои по техническим причинам, из-за чего часть циклов пришлось отбросить и не учитывать их в общей структуре наблюдений [103].

Помимо технических отказов периодически возникала необходимость очистки рабочих органов от остатков шпатов, которыми связывали тюки солом. Эти остатки наматывались на рабочие органы, что требовало остановки и

очистки рабочих органов подручным инструментом несколько раз за смену. Из-за этих простоев некоторые циклы были исключены из общего анализа наблюдений. Эти промахи удалялись по методу Ирвина. Выбор данной методики обусловлен циклично меняющимся временем рабочего цикла разбрасывающих агрегатов. Выявить распределение временных интервалов каждого элемента рабочего цикла в течение рабочей смены, отбрасывая ошибки с помощью доверительных интервалов, не представляется возможным, так как работа разбрасывателей и погрузчиков представляет собой циклический процесс с постоянно изменяющимися условиями.

Время операций может циклически изменяться в течение смены вследствие множества факторов: несогласованность действий механизаторов, человеческий фактор, циклическое изменение расстояния транспортировки, изменение схемы движения в зависимости от расположения загона и т.д. Эти изменения времени элементов цикла характерны для нормального рабочего процесса и не являются внештатными ситуациями или ошибками измерений [31].

### 3.4.2 Обработка результатов экспериментальных исследований

Итогом проведения экспериментальных исследований стала обработка полученного массива данных с целью создания общей картины изменения исследуемых показателей (удельных энергозатрат и величины просыпаемости материала) в зависимости от изменения параметров выгрузного устройства (скорости ленты и угла ее наклона) и секундной подачи материала. Первичные данные, зафиксированные в бланках испытаний, представляли собой массив значений мощности и величину просыпавшегося материала для каждого сочетания параметров используемого прототипа. Записанные значения из бланков опытов переносились в таблицу Excel для облегчения составления графиков и структурирования информации. Полученные данные заносились в таблицу в последовательном порядке, группировались по увеличению скорости транспортной ленты при одинаковой подаче для упрощения построения тенденций и поиска промахов при проведении опытов. Для каждого опыта на основе замеров активной мощности при работе и на холостом ходу рассчитывалась мощность, затрачиваемая непосредственно на

перемещение груза. Фрагмент записи данных, полученных в результате опытов представлен на рисунке 3.4.

| № опыта | ТР гц | ТР м/с | К гц | К кг/с | К т/ч | Р хх, кВт | Р, кВт | разн, кВт | т/ч/кВт | Просыпае | %   |
|---------|-------|--------|------|--------|-------|-----------|--------|-----------|---------|----------|-----|
| 24      | 20    | 1,2    | 30   | 23,3   | 83,7  | 0,15      | 1,26   | 1,11      | 75,4    | 6,6      | 28% |
| 25      | 25    | 1,51   | 30   | 23,3   | 83,7  | 0,31      | 1,36   | 1,05      | 79,7    | 2,7      | 11% |
| 26      | 30    | 1,83   | 30   | 23,3   | 83,7  | 0,38      | 1,45   | 1,07      | 78,2    | 0,4      | 2%  |
| 27      | 35    | 2,13   | 30   | 23,3   | 83,7  | 0,55      | 1,66   | 1,11      | 75,4    | 0,4      | 2%  |
| 28      | 40    | 2,42   | 30   | 23,3   | 83,7  | 0,6       | 1,74   | 1,14      | 73,4    | 1,3      | 5%  |
| 29      | 45    | 2,77   | 30   | 23,3   | 83,7  | 0,72      | 1,85   | 1,13      | 74,1    | 3,2      | 14% |

Рисунок 3.4 – Фрагмент записи данных в таблице Excel

В ходе первичной обработки полученных результатов опытов были построены графики зависимостей искомых параметров от значения секундной подачи материала на транспортер, скорости движения ленты и угла ее наклона. Для каждого исследуемого материала графический анализ позволил визуализировать тенденции, выявить рациональные диапазоны параметров для работы транспортера и установить математические зависимости между параметрами для последующего использования их в математической модели перегрузки материала. Данные по просыпаемости, полученные путем взвешивания просыпавшегося материала, также вносились в общую таблицу и определялись как в абсолютных, так и в относительных величинах (в процентах от общей массы). Такая методика позволяет определять зависимость мощности и просыпания от секундной подачи и скорости движения транспортерной ленты, а также спрогнозировать промежуточные значения исследуемых параметров.

### 3.5 Программа и методика проведения имитационного моделирования линии внесения твердых органических удобрений и дефеката

Для определения времени ожидания транспортно-перегрузочных и технологических машин в зависимости от расстояния транспортировки и состава линии внесения с учетом вероятностных параметров были разработаны имитационная модель линии внесения и компьютерная программа для ее реализации (свидетель-

ство № 2026616020 РФ). Применение имитационной модели обусловлено большими трудностями проведения натурного эксперимента, для которого требуется большое число транспортно-перегрузочных и технологических машин различной грузоподъемности, применяемых длительное время для обеспечения достаточной выборки. Имитационная модель может позволить исследовать взаимодействия различных составов звеньев с бесконечно большим числом повторности.

Имитационная модель выполнена на базе программы AnyLogic Professional 8.9.0. AnyLogic представляет собой мультиметодологическую платформу для имитационного моделирования. Ключевой особенностью AnyLogic является поддержка трех основных подходов к моделированию: системно-динамического; дискретно-событийного; агентного. Эти методы можно комбинировать в одной модели. Каждый из перечисленных методов моделирования имеет свою задачу и область применения. Системная динамика наиболее часто применяется для решения задач стратегического уровня, которые требуют проведения исследований для долгосрочного планирования. Дискретно-событийное моделирование применяется для исследования работы систем среднего и низкого уровня, основываясь на методе имитации, в котором состояние системы меняется не непрерывно, а лишь в четко определенные моменты времени, именуемые событиями. Агентное моделирование – это метод имитационного моделирования, в котором исследуемая модель представляется как множество «агентов», взаимодействующих друг с другом и с другими объектами по заданным правилам и условиям. В результате взаимодействия множества агентов образуется сложная система взаимосвязей, которая оказывает взаимное влияние одних агентов на других. Эту взаимосвязь нельзя определить с достаточной точностью, используя стандартный математический аппарат теории массового обслуживания.

Для исследования линии внесения с использованием прицепов-перегрузчиков из-за наличия жесткой связи между транспортно-перегрузочными и технологическими агрегатами наиболее подходящим является метод агентного моделирования.

Модель представляет собой линию внесения твердых органических удобрений и дефеката, состоящую из взаимодействующих между собой агентов, каждый из которых обладает собственными характеристиками. Основными агентами модели являются прицепы-перегрузчики и разбрасыватели:

- прицеп-перегрузчик выступает в роли заявки и характеризуется потребностью в обслуживании, интенсивностью поступления под погрузку и перегрузку, может находиться в очереди на погрузку и перегрузку, а также в ожидании начала перегрузки; взаимодействие с разбрасывателями осуществляется через выгрузное устройства прицепа-перегрузчика, которое в данной схеме взаимодействия является прибором;

- разбрасыватель является заявкой, характеризуется потребностью в обслуживании, интенсивностью поступления под перегрузку и временем рабочего хода, может находиться как в ожидании начала перегрузки, так и в очереди на нее.

Также к агентам можно отнести погрузчик, но он является прибором и имеет лишь два времени: загрузки и ожидания начала загрузки. Отсутствие технологического обслуживания является допущением имитационной модели, так как технологическое обслуживание погрузчика не происходит каждый цикл, не требует немедленного выполнения и может проводиться во время «ожидания» погрузчика. Другим допущением имитационной модели является отсутствие непредвиденных отказов технических средств.

Алгоритмы работы агентов определяется схемами, показанными на рисунках 2.9 и 2.10. Отличительной особенностью модели является случайное время нахождения в различных операциях рабочего цикла. Законы распределения времени в различных операциях определены по результатам хронометражных наблюдений, представленным в подразделе 3.4.

Основными переменными имитационной модели являются:

- количество прицепов-перегрузчиков и разбрасывателей;
- время транспортировки вносимого материала;
- грузоподъемности прицепов-перегрузчиков и разбрасывателей;

- время загрузки вносимого материала в прицеп-перегрузчик и время перегрузки материала в разбрасыватель;
- время рабочего хода разбрасывателей;
- количество разбрасывателей, загружаемых одним прицепом-перегрузчиком.

На рисунке 3.5 представлены алгоритмы работы агентов и интерфейс имитационной модели внесения, состоящий из блоков-состояний. Блоки разделены на три группы: без ограничения по количеству пребывания заявок, с ограничением по количеству пребывания заявок и блок-очередь. К блокам, не имеющим ограничения по количеству заявок внутри, относятся блоки движения, работы в поле, поворотов и т.д. Блоки с ограничением представлены лишь в виде трех блоков: место загрузки прицепов-перегрузчиков, место перегрузки прицепа-перегрузчика, место перегрузки разбрасывателя. Все они имеют вместимость, равную одной заявке, и могут перейти к следующему состоянию (блоку) только после выполнения условия, которым является завершение загрузки или перегрузки. Перед блоками с ограничением количества заявок внутри находится блок-очередь. Очередь будет возникать при условии, если интервал поступления заявок меньше времени обслуживания в блоке с ограничением.

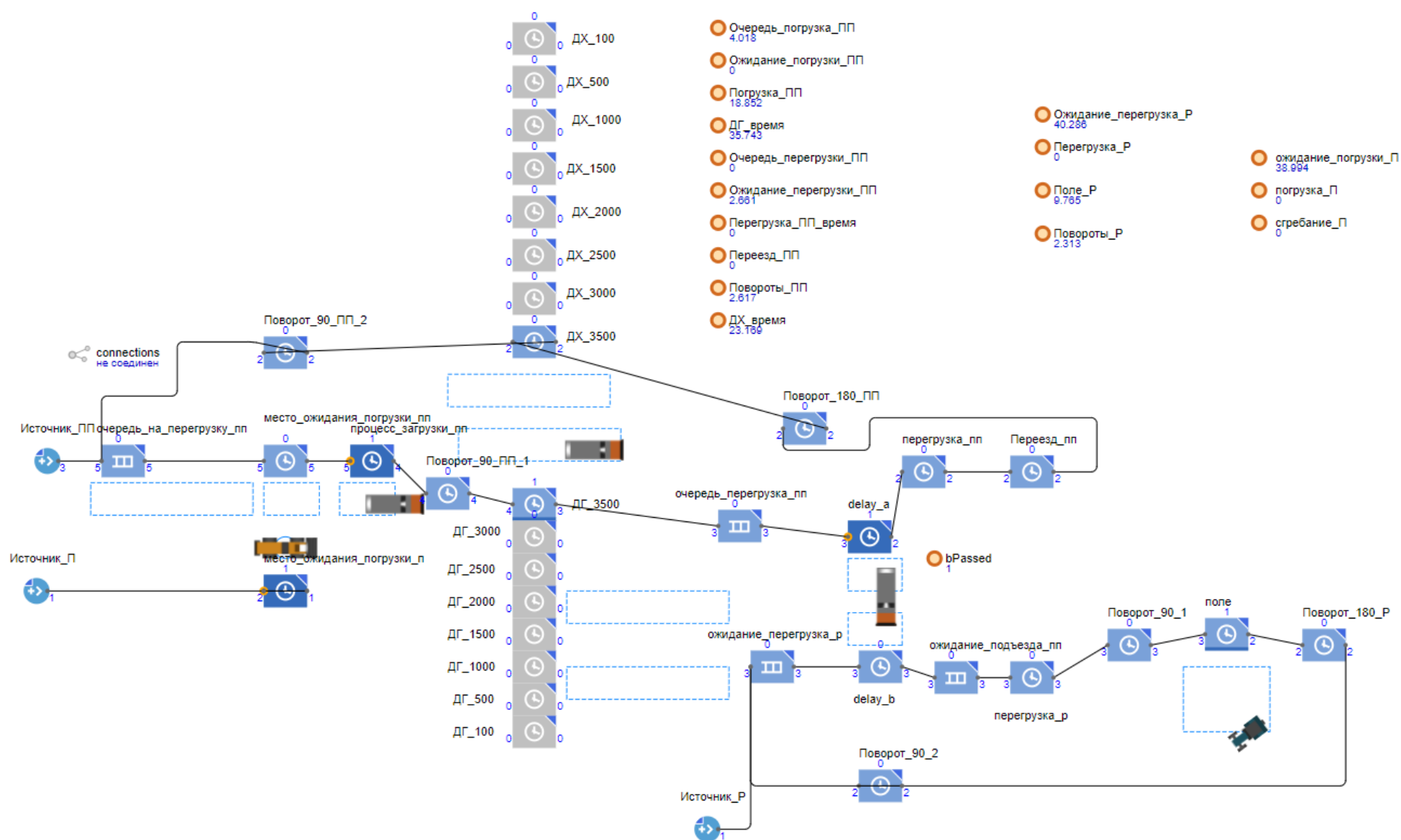


Рисунок 3.5 – Интерфейс имитационной модели производственной линии внесения

### 3.6 Выводы

Хронометражные наблюдения, направленные на получение эмпирических данных об элементах рабочего цикла технологических и погрузочных машин, позволяют определить продолжительность отдельных элементов рабочего цикла разбрасывателя при воздействии случайных факторов. В ходе хронометражных наблюдений определяются продолжительности: разворота на 180 градусов, поворота на 90 градусов, внесения удобрений, движения с грузом, а также время, затрачиваемое на холостой ход и загрузку разбрасывателя. Хронометражные наблюдения за работой погрузчика направлены на установление продолжительности отдельных элементов рабочего цикла погрузчика с учетом случайных факторов, и в частности, на уточнение времени, затрачиваемого на подъезд к бурту, забор материала, перемещение к разбрасывателю, загрузку разбрасывателя и возвращение к бурту.

Представленные методики проведения экспериментов позволяют с достаточной точностью определить энергозатраты и просыпаемость при перегрузке разных материалов в диапазоне рабочих параметров выгрузного устройства прицепа-перегрузчика.

Разработанная имитационная модель линии внесения твердых органических удобрений и дефеката необходима для определения времени ожидания каждой машины в линии внесения в зависимости от количества разбрасывателей и количества прицепов-перегрузчиков, а также их параметров. Время ожидания технологических и транспортно-перегрузочных агрегатов можно использовать при расчете основных параметров производственной линии внесения твердых органических удобрений и дефеката. Реализация имитационной модели осуществляется посредством специально разработанной компьютерной программы (свидетельство № 2026616020 РФ).

## 4 Результаты хронометражных наблюдений, экспериментальных исследований и имитационного моделирования

### 4.1 Результаты хронометражных наблюдений

Результаты хронометражных наблюдений, программа и методика которых описана в разделе 3, представлены в виде гистограмм в приложении Б на рисунках Б.1 – Б.6. Анализ полученных данных показал, что время нахождения распределяющего агрегата в каждом элементе рабочего цикла значительно изменяется в течение смены. Для интерпретации этих данных и их использования в имитационной модели производственной линии внесения органических удобрений и дефеката необходимо выбрать адекватный закон распределения продолжительности нахождения агрегатов в том или ином состоянии рабочего цикла. Наиболее простым в применении является треугольное распределение. Данный выбор продиктован двумя практическими соображениями: во-первых, его параметры (минимум, мода, максимум) напрямую извлекаются из результатов хронометража без проведения трудоемких статистических оценок, а во-вторых, в отличие от нормального распределения треугольное способно воспроизводить наблюдаемую на практике асимметрию. Поскольку полученные гистограммы также визуально схожи с распределением Эрланга, было принято решение сравнить эти два распределения для выявления наиболее точного описания исходных данных.

Вероятность попадания времени окончания операции в интервал, определенный при хронометражных наблюдениях, определили на основании формулы Эрланга [46]:

$$f(x, k, \lambda) = \frac{\lambda^k x^{k-1} e^{(-\lambda \cdot x)}}{k-1!}. \quad (4.1)$$

Параметры распределения Эрланга  $\lambda$  и  $k$  подбирались таким образом, чтобы обеспечить наилучшее соответствие эмпирическим данным, для чего ми-

минимизировалась статистика  $\chi^2$  критерия согласия Пирсона. Минимизация проводилась путем последовательного перебора значений параметров в заданном диапазоне. Расчет методом подбора наилучших значений выполнялся в программе Python-Compiler. Итогом расчета является тепловая карта, которая визуализирует зависимости  $\chi^2$  от интенсивности изменения  $\lambda$  и формы распределения  $k$  и представлена на рисунке 4.1, она позволяет определить значения, при которых  $\chi^2$  минимален. Затем определили ожидаемую частоту попадания в интервал и отклонение от наблюдаемых значений.

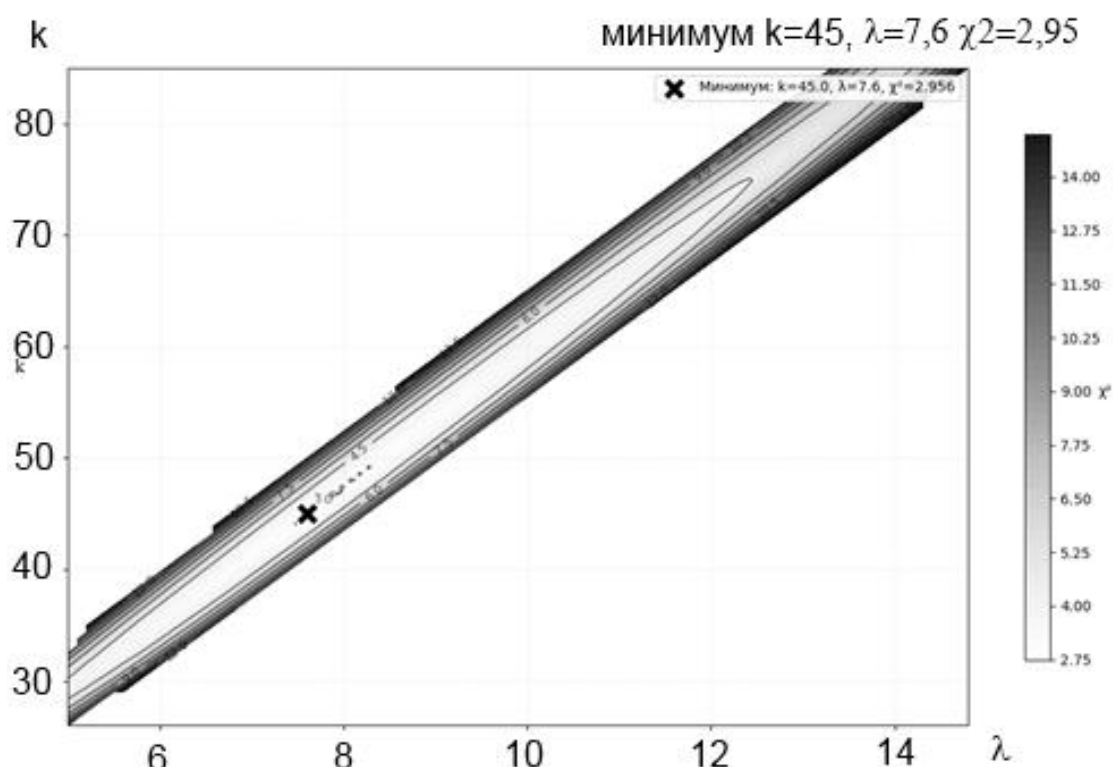


Рисунок 4.1 – Тепловая карта выбора параметров распределения Эрланга для достижения наименьшего  $\chi^2$

Для проверки адекватности треугольного распределения и распределения Эрланга данным, полученным в ходе хронометражных наблюдений, был проведен статистический анализ по критерию согласия Пирсона. В качестве примера рассмотрим операцию «Загрузка разбрасывателя».

Параметры треугольного распределения:

- минимальное время – 5,0 мин.;

- медианное время – 5,5 мин.;
- максимальное время – 8,0 мин.

Параметры распределения Эрланга:

- математическое ожидание – 6,04;
- дисперсия – 0,56;
- параметр интенсивности  $\lambda$  – 7,6;
- форма распределения  $k$  – 45.

Для сравнения представим гистограмму с отмеченным распределением (рисунок 4.2) и данные в табличном виде (таблица 4.1).

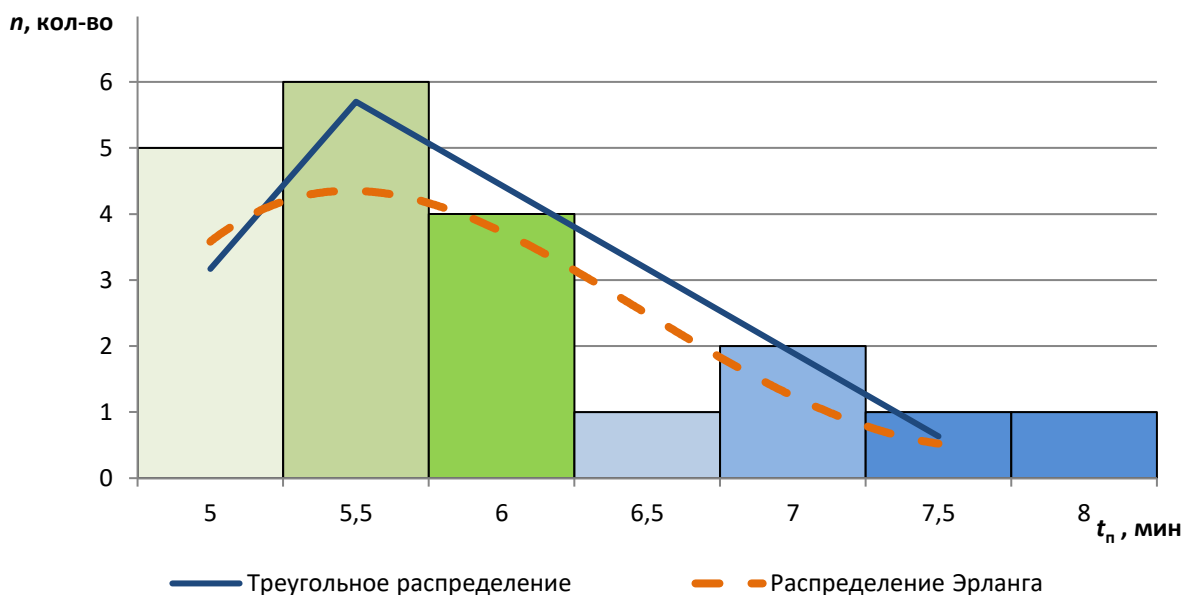


Рисунок 4.2 – Гистограмма наблюдаемых и теоретических распределений для операции «Загрузка разбрасывателя»

Так как есть шесть временных интервалов (таблица 4.1) и используем три значения временных интервалов (минимальное, наиболее вероятное и максимальное), то число степеней свободы определяли следующим образом:

$$df = k' - 1 - p, \quad (4.2)$$

где  $k'$  – число временных интервалов;

$p$  – число используемых значений.

Таким образом, число степеней свободы равно двум.

Проверка статистической значимости показала, что при степенях свободы, равных двум, уровень значимости (p-value) для треугольного распределения имеет значение 0,26, а для Эрланга – 0,18. Это выше, чем принимаемое значение для инженерных расчетов, равное 0,05. Хи-квадрат треугольного распределения равен 2,82, а Эрланга – 2,96 при критическом значении Хи-квадрата 5,99.

Таблица 4.1 – Сравнение наблюдаемых и теоретических частот для операции «Загрузка разбрасывателя»

| Времен-<br>ной ин-<br>тервал,<br>мин. | Наблю-<br>даемая<br>частота | Ожидаемое        |         | Отклонение       |         | Сумма<br>$\chi^2$ |      |
|---------------------------------------|-----------------------------|------------------|---------|------------------|---------|-------------------|------|
|                                       |                             | Треуголь-<br>ное | Эрланга | Треуголь-<br>ное | Эрланга |                   |      |
| 5,0...5,5                             | 5                           | 3,17             | 3,58    | 1,83             | 1,42    | 2,82              | 2,96 |
| 5,5...6,0                             | 6                           | 5,70             | 4,34    | 0,30             | 1,66    |                   |      |
| 6,0...6,5                             | 4                           | 4,43             | 3,76    | –0,43            | 0,24    |                   |      |
| 6,5...7,0                             | 1                           | 3,17             | 2,46    | –2,17            | –1,46   |                   |      |
| 7,0...7,5                             | 2                           | 1,90             | 1,26    | 0,10             | 0,74    |                   |      |
| 7,5...8,0                             | 1                           | 0,63             | 0,52    | 0,37             | 0,48    |                   |      |

Так как оба распределения удовлетворяют критерию Пирсона ( $\chi^2 < \chi^2_{\text{крит}}$ , p-value > 0,05), но треугольное демонстрирует лучшее соответствие опытными данным, что подтверждено аналогичными проверками для других элементов рабочего цикла. . Таким образом, треугольное распределение обеспечивает достаточную точность моделирования при простоте математического аппарата.

#### 4.2 Результаты экспериментальных исследований

Результаты обработки данных по потребляемой мощности приводом транспортера при разных параметрах его работы представлены в приложении В на рисунках В.1 и В.2. Для наглядности представим результаты в виде графиков

зависимости затрат мощности на привод транспортера от секундной подачи материала при разных скоростях движения транспортерной ленты и при постоянном угле наклона транспортера (рисунок 4.3).

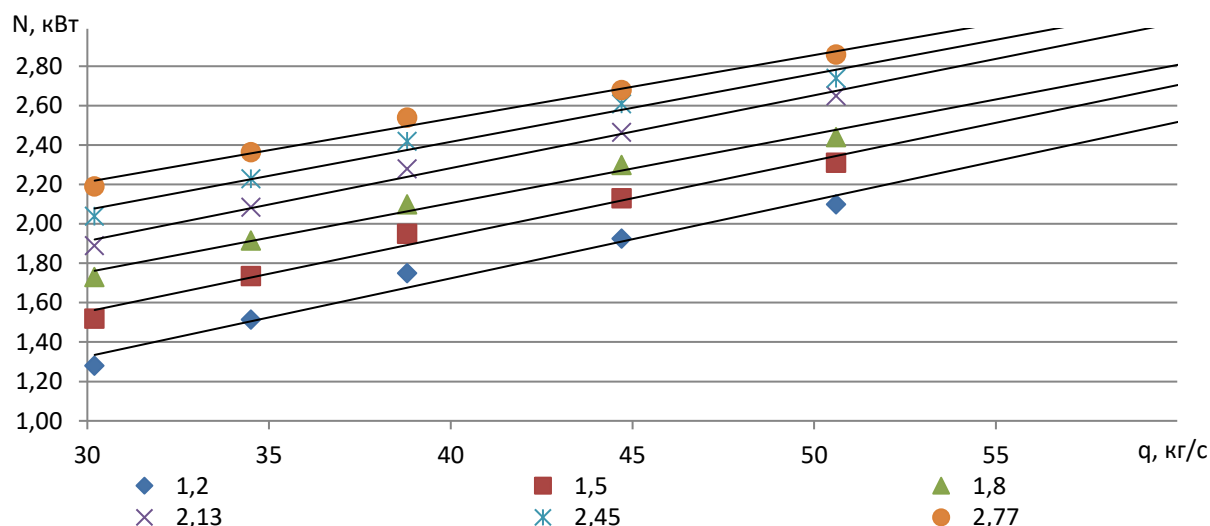


Рисунок 4.3 – Графики зависимости затрат мощности  $N$  от секундной подачи  $q$  при разных скоростях движения транспортерной ленты  $v_{тр}$  для материала плотностью  $1100 \text{ кг/м}^3$  при угле наклона транспортера  $25^\circ$

Полученные зависимости являются основой для определения рациональных режимов работы выгрузного устройства прицепа-перегрузчика, обеспечивающих минимальные энергозатраты и потери материала. Результаты показывают, что потребляемая мощность на привод транспортера увеличивается линейно в зависимости от секундной подачи и скорости транспортной ленты. Такое изменение параметров позволяет с высокой точностью проводить интерполяцию внутри диапазона полученных данных во время экспериментальных исследований, а также экстраполировать предполагаемые значения за пределами изученных диапазонов, но, согласно работам [64, 68, 79], не более чем на 25%.

Помимо затрат мощности были получены зависимости просыпаемости для разных подач при разной скорости транспортной ленты. Результаты опытов по определению просыпаемости перегружаемого материала представлены в виде графиков на рисунке 4.4, а также в приложении В (рисунки В.3 и В.4). Обработанные результаты сведены в таблицу 4.2.

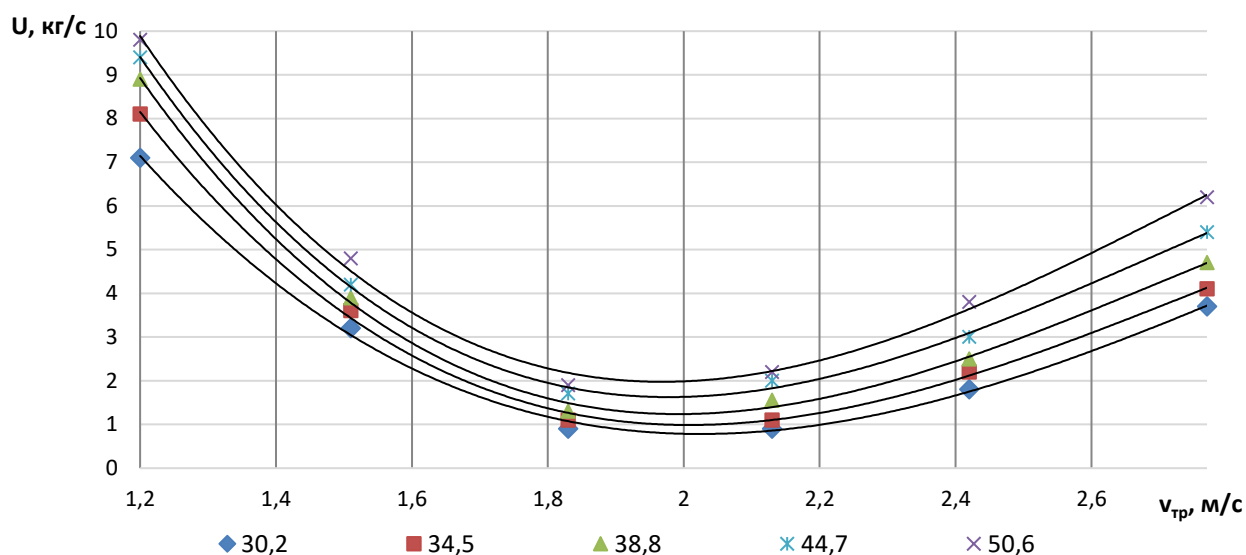


Рисунок 4.4 – Графики зависимости просыпаемости  $U$  для разных подач  $q_{гр}$  от изменения скорости транспортной ленты  $v_{тр}$  при угле транспортера  $25^\circ$  для материала плотностью  $1100 \text{ кг/м}^3$

Таблица 4.2 – Просыпаемость материала и производительность прототипа выгрузного устройства, определенные расчетным и опытным путем

| Угол                         | 25   | 30   | 35   |
|------------------------------|------|------|------|
| Просыпаемость, кг/с          |      |      |      |
| Расчетная                    | 1,21 | 1,57 | 1,87 |
| Опытная                      | 1,1  | 1,4  | 1,8  |
| Погрешность абсолютная       | 0,11 | 0,12 | 0,07 |
| Производительность, т/ч      |      |      |      |
| Расчетная                    | 48,7 | 45,2 | 42,9 |
| Опытная                      | 50,5 | 47,5 | 44   |
| Погрешность абсолютная       | 1,8  | 2,3  | 1,01 |
| Погрешность относительная, % | 3,56 | 4,84 | 2,30 |

Из графиков (рисунки 4.4, В.3, В.4) видно, что просыпаемость имеет четко выраженный минимум при скорости ленты  $2,0 \pm 0,2$  м/с. Данный диапазон является рациональным для выгрузного устройства, поскольку обеспечивает минимальные потери материала независимо от подачи и его физико-механических свойств. Равноудаленность экспериментальных точек позволяет с высокой точностью интерполировать значения мощности и просыпаемости внутри этого интервала.

Для сравнения были проведены расчеты для исследуемых углов установки транспортера 25 и 35 градусов, а также для среднего угла 30 градусов. Значения для этого угла являются контрольными, так как они не использовались для построения математической модели и для него фиксировались только просыпаемость и производительность.

Как видно из таблицы 4.2, погрешность расчетных и опытных значений не превышает 5%, поэтому можно считать методику определения производительности выгрузного устройства адекватной данным, полученным опытным путем [7, 36, 45, 63]. Так как исследования проводились на прототипе, который меньше чем предполагаемое выгрузное устройство, следует масштабировать исходные данные для определения производительности полноразмерного выгрузного устройства.

Полученные экспериментальные зависимости позволили предложить несколько конструктивных усовершенствований выгрузного устройства. Для снижения просыпания материала через боковые зазоры рекомендуется установить вдоль боковых стенок транспортера защитные кожухи, перекрывающие доступ частиц к роlikоопорам и приводному барабану. Для предотвращения налипания и обеспечения стабильной работы натяжителя целесообразно смонтировать чистящее устройство (скребок) в верхней части транспортера.

Ширина и длина ленты прототипа составляли соответственно 500 мм и 4800 мм. Геометрические параметры полноразмерных выгрузных устройств подобного типа обычно составляют: ширина 2000 мм и длина 5500 мм. Воспользуемся методом геометрического подобия и определим значения, на которые необходимо умножить параметры прототипа [7, 69, 128]:  $2000 / 500 = 4$ ;  $5500 / 4800 = 1,14$ .

Увеличим длину транспортера в 1,14 раза, а ширину и соответственно погрузку в 4 раза. Определим по представленной методике производительность выгрузного устройства при агрегатировании с тракторами, которые предполагается применять с прицепами-перегрузчиками разной грузоподъемности, результаты сведем в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Расчетная производительность выгрузного устройства при агрегатировании прицепа-перегрузчика с тракторами различной мощности двигателя и гидросистемы

| Модель трактора | Мощность двигателя, кВт | Мощность гидросистемы, кВт | Производительность выгрузного устройства, т/ч |
|-----------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|
| К-744Р2         | 250                     | 38                         | 875                                           |
| БТЗ-253К        | 180                     | 35                         | 845                                           |
| John Deere 8410 | 225                     | 32                         | 820                                           |

Из таблицы 4.3 видно, что на производительность выгрузного устройства основное влияние оказывает мощность гидросистемы агрегируемого трактора, которая не зависит от мощности его двигателя. Согласно техническим характеристикам, предоставляемым заводами-изготовителями тракторов, мощность гидросистемы не зависит от мощности двигателя и находится в пределах от 30 до 40 кВт. Исходя из этого, производительность выгрузного устройства при агрегатировании с большинством тракторов ожидается в пределах 820...875 т/ч.

#### 4.3 Результаты расчетов по определению параметров технологических и транспортно-перегрузочных агрегатов

##### 4.3.1 Результаты расчета рациональной грузоподъемности разбрасывателя

Расчеты по обоснованию рациональной грузоподъемности разбрасывателей твердых органических удобрений и дефеката проводились на примере ряда моделей тракторов разной мощности и массы. Условия для расчета выбирались

наиболее характерные для Центрального Черноземья: стерня зерновых нормальной влажности с коэффициентом сопротивления качению 0,1 для трактора и 0,07 для разбрасывателя (из-за того, что разбрасыватель частично движется по колее трактора), уклон поля 0,03. Результаты расчетов представлены в приложении В (таблица В.1). Для визуализации зависимости изменения рациональной грузоподъемности разбрасывателя от дозы внесения результаты представлены на рисунке 4.5.

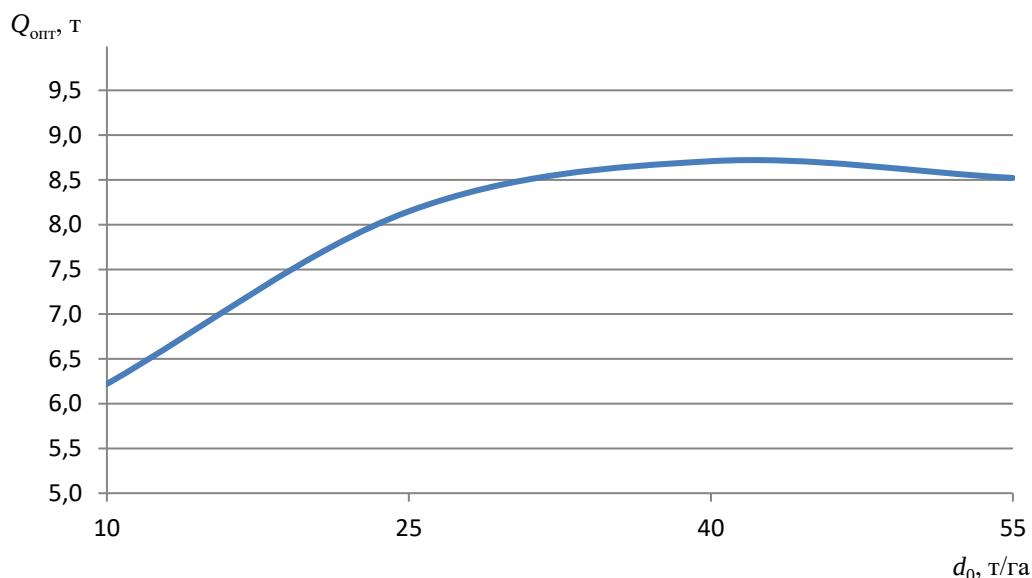


Рисунок 4.5 – График зависимости изменения рациональной грузоподъемности разбрасывателя  $Q_{\text{опт}}$  от дозы внесения  $d_0$  при агрегатировании с трактором Беларус-1523

Из графика представленного на рисунке 4.5 видно, что рациональная грузоподъемность разбрасывателя при агрегатировании с трактором Беларус-1523 в зависимости от дозы внесения находится в диапазоне от 6,2 до 8,8 т.

Зависимости удельной производительности и цикловой производительности от грузоподъемности разбрасывателя для разных доз внесения при агрегатировании с трактором Беларус-1523 приведены в виде графиков на рисунке 4.6. Из данных графиков видно, что при дальнейшем увеличении грузоподъемности разбрасывателя удельная производительность уменьшается незначительно, а цикловая производительность продолжает уверенно расти. Согласно методу уступок, можно увеличить грузоподъемность разбрасывателя для увеличения

второстепенного критерия на величину от 3,1 до 17,9%. При этом удельная производительность уменьшится только в диапазоне от 0,7 до 4,7%.

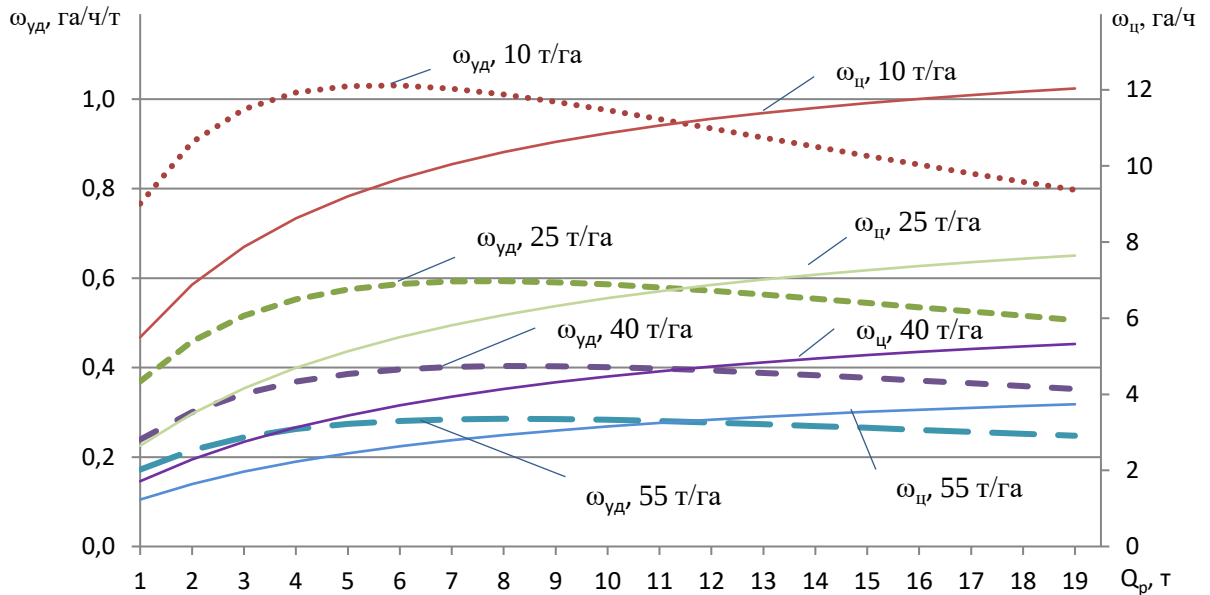


Рисунок 4.6 – Графики зависимостей удельной производительности  $\omega_{уд}$  и цикловой производительности  $\omega_{ц}$  от грузоподъемности разбрасывателя для разных доз внесения при агрегатировании с трактором Беларус-1523

Если учесть, что при увеличении грузоподъемности эксплуатационная производительность будет возрастать, то можно сделать уступку в ключевом критерии и округлить грузоподъемность до 10 т. Таким образом, повысится эксплуатационная производительность при некритичном повышении отношения массы агрегата к обработанной площади поля. Из приложения В (таблица В.1) видно, что рациональная грузоподъемность по вышеуказанному критерию наиболее зависима от мощности и массы трактора – чем выше мощность, тем больше удельная производительность и рациональная грузоподъемность в отношении к массе агрегируемого трактора. При современном соотношении грузоподъемности и массы разбрасывателя рациональная грузоподъемность для большинства доз находится в диапазоне от 8 до 12 т. Из этого можно сделать вывод, что такая грузоподъемность обеспечивает наилучшее соотношение массы агрегата и обрабатываемой площади и позволит снизить уплотнение почвы при сохранении относительно высокой производительности агрегата.

#### 4.3.2 Результаты расчета рациональной грузоподъемности прицепа-перегрузчика

Рациональная грузоподъемность прицепа-перегрузчика определялась для диапазона расстояний, находящегося между расстояниями рационального применения прямоточной и перевалочной технологий. Как уже описывалось выше, этот диапазон составляет от 1500 до 2500 м (принято среднее значение – 2000 м). В расчете использовалось четыре дозы внесения материала, а именно: 10, 25, 40 и 55 т/га. Приняты те же условия, что и для разбрасывателей.

Для обеспечения загрузки разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков в производственную линию внесения материала включен погрузчик с ковшем объемом 3,5 м<sup>3</sup> и производительностью до 252 т/ч. Значение производительности является усредненным и получено в результате хронометражных наблюдений. В первую очередь была рассчитана производительность основного звена (разбрасывателей). На основании анализа, проведенного в первом разделе, для расчета взяли разбрасыватели грузоподъемностью 10, 15 и 20 т, так как они наиболее часто используются при внесении твердых органических удобрений и дефеката. Ввиду возможности одновременной работы нескольких разбрасывателей на одном поле расчеты проводились для трех вариантов составов звеньев, включающих один, два и три разбрасывателя. Применение четырех и более разбрасывателей, а также других машин на одном поле случается крайне редко, вследствие более сложной организации работы, что позволяет пренебречь данными вариантами при проведении дальнейших расчетов.

Производительность основного звена  $\omega_{\text{оз}}^{\text{пот}}$  линии внесения при применении перегрузочной технологии (без учета простоев разбрасывателей в ожидании прицепов-перегрузчиков) определяли по формуле (2.53). Результаты представлены в таблице 4.4. Из полученных результатов видно, что большинство значений производительности основного звена (особенно при больших дозах внесения) превышают производительность погрузчика (252 т/ч), эта ситуация приведет к неизбежным простоям основного звена. По этой причине будем определять

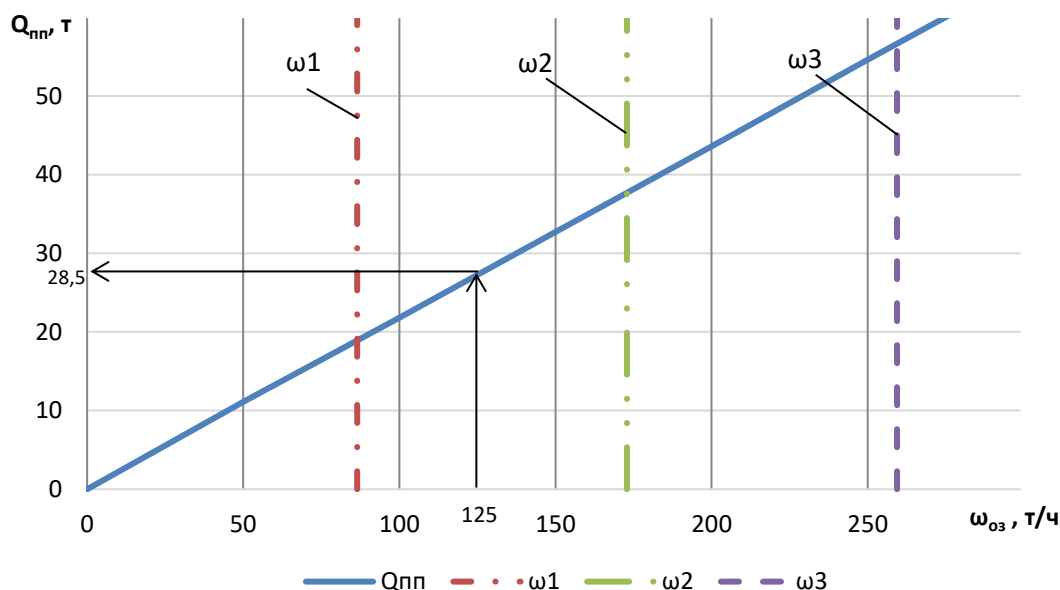
грузоподъемность прицепов-перегрузчиков исходя из производительности погрузчика.

Таблица 4.4 – Производительность основного звена производственной линии внесения  $\omega_{\text{оз}}$  (т/ч), применяемого по перегрузочной технологии при разных дозах внесения в зависимости от грузоподъемности и количества разбрасывателей

| Количество разбрасывателей в основном звене | Грузоподъемность разбрасывателя, т |       |       |
|---------------------------------------------|------------------------------------|-------|-------|
|                                             | 10                                 | 15    | 20    |
| При дозе внесения 10 т/га                   |                                    |       |       |
| 1                                           | 86,5                               | 89,8  | 91,2  |
| 2                                           | 172,9                              | 179,6 | 182,4 |
| 3                                           | 259,4                              | 269,3 | 273,6 |
| При дозе внесения 25 т/га                   |                                    |       |       |
| 1                                           | 142,5                              | 152,5 | 157,7 |
| 2                                           | 285,0                              | 305,0 | 315,4 |
| 3                                           | 427,0                              | 457,4 | 473,1 |
| При дозе внесения 40 т/га                   |                                    |       |       |
| 1                                           | 156,8                              | 172,4 | 180,5 |
| 2                                           | 313,5                              | 344,9 | 361,0 |
| 3                                           | 470,3                              | 517,3 | 541,5 |
| При дозе внесения 55 т/га                   |                                    |       |       |
| 1                                           | 145,4                              | 163,9 | 174,8 |
| 2                                           | 290,7                              | 327,8 | 349,6 |
| 3                                           | 436,1                              | 491,6 | 524,4 |

Для наглядности на рисунке 4.7 приведен график изменения минимально необходимой грузоподъемности прицепа-перегрузчика при работе с десятитонными разбрасывателями и дозе внесения 10 т/га. В качестве примера представим,

что производительность основного звена равна 133 т/ч, от этого значения проводится вертикальная линия до пересечения с линией, показывающей рост грузоподъемности прицепа-перегрузчика в зависимости от производительности основного звена, а после пересечения проводится горизонтальная линия, которая покажет минимально необходимую грузоподъемность прицепа-перегрузчика, позволяющую работать разбрасывателям с максимальной эффективностью.



$Q_{пп}$  – грузоподъемность прицепа-перегрузчика,  $\omega_1$  – производительность основного звена с одним разбрасывателем,  $\omega_2$  – производительность основного звена с двумя разбрасывателями,  $\omega_3$  – производительность основного звена с тремя разбрасывателями

Рисунок 4.7 – Номограмма для выбора минимально необходимой грузоподъемности прицепа-перегрузчика  $Q_{пп}$  при расстоянии транспортировки 2000 м в зависимости от производительности различных составов основного звена  $\omega_{оз}$

Из рисунка 4.7 видно, что минимально необходимая грузоподъемность прицепа-перегрузчика  $Q_{пп}^{\min}$  возрастает при увеличении производительности основного звена. Также можно утверждать, что при равенстве грузоподъемности

прицепа-перегрузчика и грузоподъемности разбрасывателей, производительность прицепа-перегрузчика  $\omega_{\text{пп}}$  несколько ниже, чем у основного звена  $\omega_{\text{оз}}$ . Данная несогласованность обязательно спровоцирует ожидание начала перегрузки разбрасывателем, что не позволит линии внесения работать с максимальной эффективностью. При этом принимать грузоподъемность прицепов-перегрузчиков  $Q_{\text{пп}}$  чуть больше, чем грузоподъемность разбрасывателей  $Q_{\text{р}}$ , нецелесообразно из-за требований к кратности их грузоподъемностей. Таким образом, требуется округлять грузоподъемность прицепов-перегрузчиков в большую сторону до значения кратного грузоподъемности разбрасывателей. Повысить эффективность линии внесения можно путем определения рационального состава звеньев. По результатам расчета определена минимально необходимая грузоподъемность прицепа-перегрузчика, округленная до ближайшего большего значения, кратного грузоподъемности разбрасывателя (таблица 4.5).

Из таблицы 4.5 видно, что наиболее часто встречаются три грузоподъемности прицепов-перегрузчиков: 40, 30 и 20 т. Следует подчеркнуть, что определяемая таким образом грузоподъемность прицепа-перегрузчика не всегда является рациональной для всей линии внесения, поскольку рациональные параметры отдельного звена не обязательно обеспечивают наилучшие параметры всей технологической линии. Для обеспечения наибольшей эффективности применения транспортно-перегрузочного агрегата в качестве транспортного средства необходимо определить характеристики наиболее подходящих тракторов для работы с прицепами-перегрузчиками, грузоподъемность которых равна 40, 30 и 20 т. По методике, представленной в разделе 2, были определены значения рациональной грузоподъемности прицепа-перегрузчика как транспортного средства для тракторов с диапазоном мощности от 100 до 250 кВт, в зависимости от расстояния транспортировки. Результаты представлены в виде графиков на рисунке 4.8. Для анализа методом подбора определены модели тракторов, обеспечивающие наиболее близкие значения по выбранному критерию эффективности к определенным ранее грузоподъемностям (таблица 4.2). Наиболее подходящими тракторами являются: для 20-тонного прицепа – БТЗ-245К; для 30-тонного – John Deere 8410 и для 40-тонного – К-744Р2.

Таблица 4.5 – Минимально необходимая грузоподъемность  
прицепов-перегрузчиков, позволяющая обеспечить наивысшую  
производительность основного звена линии внесения

| Количество<br>разбрасывателей<br>в основном звене | Грузоподъемность разбрасывателя, т |    |    |
|---------------------------------------------------|------------------------------------|----|----|
|                                                   | 10                                 | 15 | 20 |
| При дозе внесения 10 т/га                         |                                    |    |    |
| 1                                                 | 20                                 | 30 | 20 |
| 2                                                 | 20                                 | 30 | 40 |
| 3                                                 | 30                                 | 30 | 40 |
| При дозе внесения 25 т/га                         |                                    |    |    |
| 1                                                 | 40                                 | 30 | 20 |
| 2                                                 | 40                                 | 30 | 40 |
| 3                                                 | 40                                 | 30 | 40 |
| При дозе внесения 40 т/га                         |                                    |    |    |
| 1                                                 | 20                                 | 30 | 40 |
| 2                                                 | 40                                 | 30 | 40 |
| 3                                                 | 40                                 | 30 | 40 |
| При дозе внесения 55 т/га                         |                                    |    |    |
| 1                                                 | 20                                 | 30 | 40 |
| 2                                                 | 40                                 | 30 | 40 |
| 3                                                 | 40                                 | 30 | 40 |

Из графиков рисунка 4.8 видно, что зависимость, характеризующая рациональную грузоподъемность прицепа-перегрузчика при агрегатировании с трактором БТЗ-245К, наиболее близка к искомому значению в 20 т по сравнению с аналогичными значениями для других моделей тракторов.

Результаты расчета рациональной грузоподъемности в зависимости от производительности выгрузного устройства прицепа-перегрузчика для

БТЗ-245К представлены в виде поверхностей (рисунок 4.9, и в приложение В на рисунках В.5 и В.6).

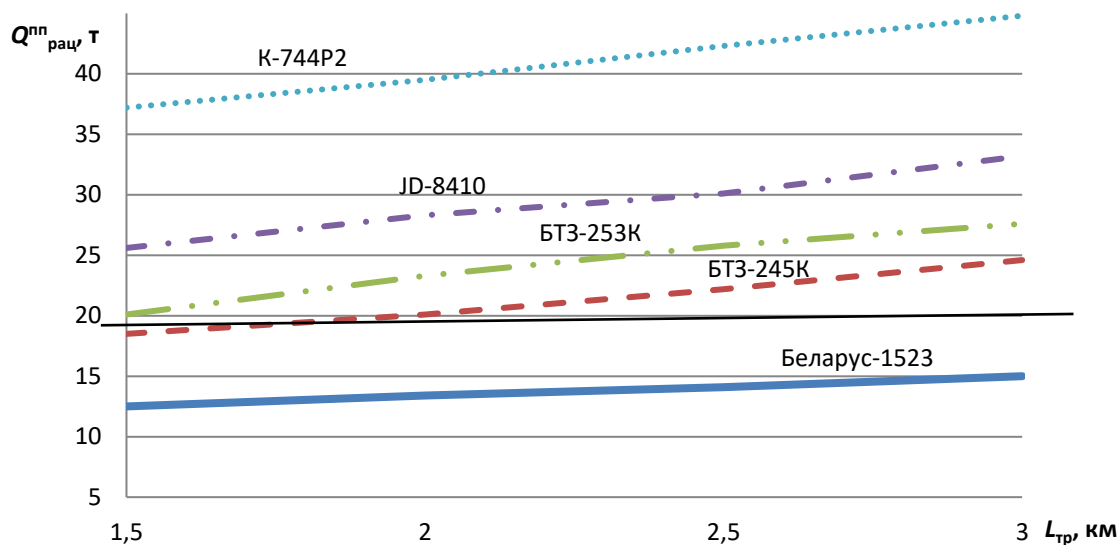


Рисунок 4.8 – Графики зависимости рациональной грузоподъемности прицепа-перегрузчика  $Q_{\text{рац}}^{\text{пп}}$  для разных тракторов от расстояния транспортировки  $L_{\text{тр}}$

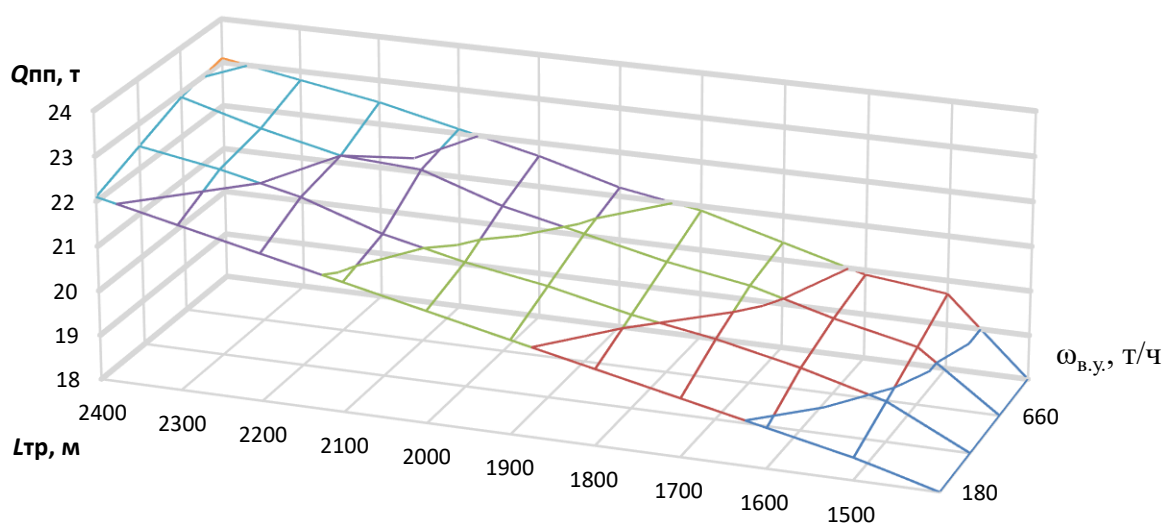


Рисунок 4.9 – Изменение рациональной грузоподъемности прицепа-перегрузчика  $Q_{\text{пп}}$  в зависимости от расстояния транспортировки  $L_{\text{тр}}$  и производительности выгрузного устройства  $\omega_{\text{в.у.}}$  при использовании трактора БТЗ-245К

По рисунку 4.9 видно, что при увеличении расстояния транспортировки плавно увеличивается рациональная грузоподъемность прицепа-перегрузчика,

также замечен рост грузоподъемности при увеличении производительности выгрузного устройства. Таким образом, направление исследований следует сосредоточить на разработке более производительных выгрузных устройств для прицепов-перегрузчиков. Повышенная производительность снизит время загрузки разбрасывателя, что сократит продолжительность его цикла, увеличив производительность всей линии внесения.

#### 4.4 Результаты имитационного моделирования

##### 4.4.1 Проверка адекватности имитационной модели

Для подтверждения достоверности данных, получаемых посредством разработанной имитационной модели линии внесения, проведена проверка ее адекватности, которая включала: анализ соответствия модели реальному технологическому процессу, проверку логики взаимодействия агентов путем сравнения с данными хронометражных наблюдений, а также оценку устойчивости имитационной модели при изменении исходных параметров моделирования. Распределение времени операций было определено на основе результатов хронометражных наблюдений, представленных в подразделе 4.1. Это позволило учесть непостоянство времени выполнения различных операций в рабочем цикле агрегатов, характерное для процесса внесения удобрений и максимально приблизить условия взаимодействия агрегатов к реальным условиям эксплуатации. Логика работы модели проверялась путем анализа алгоритмов принятия решений агентами. Особое внимание уделялось корректности переходов между состояниями, включая образование очередей, процессам загрузки и перегрузки материала. Подтверждение адекватности имитационной модели проводилось путем сравнения времени выполнения различных операций разбрасывателем в ходе имитационного моделирования с полученными данными в результате хронометражных наблюдений (рисунок 4.10).

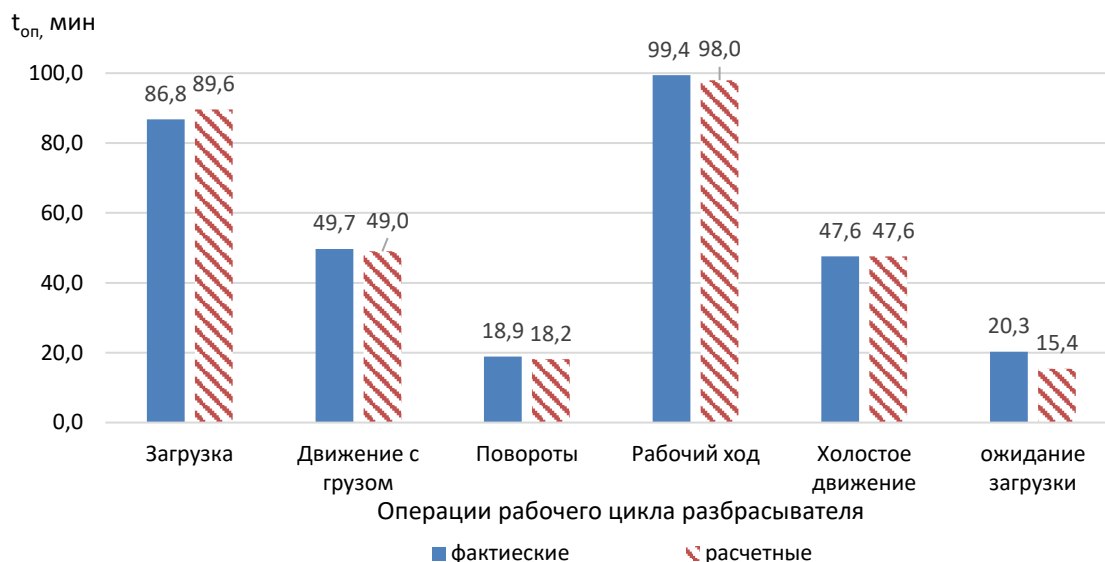


Рисунок 4.10 – Сравнение времени выполнения различных элементов рабочего цикла разбрасывателем в ходе имитационного моделирования с данными, полученными при хронометражных наблюдениях

Сравнивалось время выполнения операций, определенное при имитационном моделировании (расчетные), и в результате хронометражных наблюдений (фактические), при одинаковых исходных параметрах производственной линии внесения. Гистограмма (рисунок 4.10) показывает, что модель достаточно точно отражает время выполнения различных операций в течение рабочего цикла разбрасывателя, среднее расхождение параметров не превышает 4,7%, что является удовлетворительным показателем, позволяющим утверждать об адекватности имитационной модели.

Для оценки того, насколько точно имитационная модель воспроизводит не только средние значения, но и степень изменчивости реального процесса, проведена проверка однородности дисперсий по критерию Фишера [46]. Для каждого элемента рабочего цикла разбрасывателя рассчитывались дисперсии по данным хронометражных наблюдений и по результатам моделирования. Сравнение дисперсий выполнялось по формуле

$$F - \text{критерий} = \frac{D_{\text{большая}}}{D_{\text{меньшая}}}, \quad (4.3)$$

где  $D_{\text{большая}}$  – большая из дисперсий,

$D_{\text{меньшая}}$  – меньшая из дисперсий.

Результаты расчета по формуле (4.3) представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Проверка результатов имитационного моделирования и хронометражных наблюдений по F-критерию

| Элемент цикла     | Выборка, циклы | Имитационная модель | Хронометражные наблюдения | Fрасч | Fкрит |
|-------------------|----------------|---------------------|---------------------------|-------|-------|
| Загрузка          | 15             | 0,25                | 0,28                      | 1,12  | 2,12  |
| Повороты          | 15             | 0,08                | 0,09                      | 1,13  | 2,12  |
| Движение с грузом | 15             | 0,12                | 0,11                      | 1,09  | 2,12  |
| Рабочий ход       | 15             | 1,45                | 1,52                      | 1,05  | 2,12  |
| Холостое движение | 15             | 0,18                | 0,20                      | 1,11  | 2,12  |
| Ожидание загрузки | 15             | 0,38                | 0,32                      | 1,35  | 2,12  |

Во всех случаях расчетное значение F-критерия не превышало критического ( $F_{\text{крит}} = 2,12$  при уровне значимости 0,05). Это подтверждает, что модель адекватно воспроизводит вариабельность технологического процесса.

Для оценки устойчивости модели было выполнено моделирование с изменением в течение смены основной переменной – расстояния транспортировки  $L_{\text{тр}}$ . Данные, полученные в результате имитационного моделирования, сравнивались со значениями, полученными в ходе хронометражных наблюдений (рисунок 4.11).

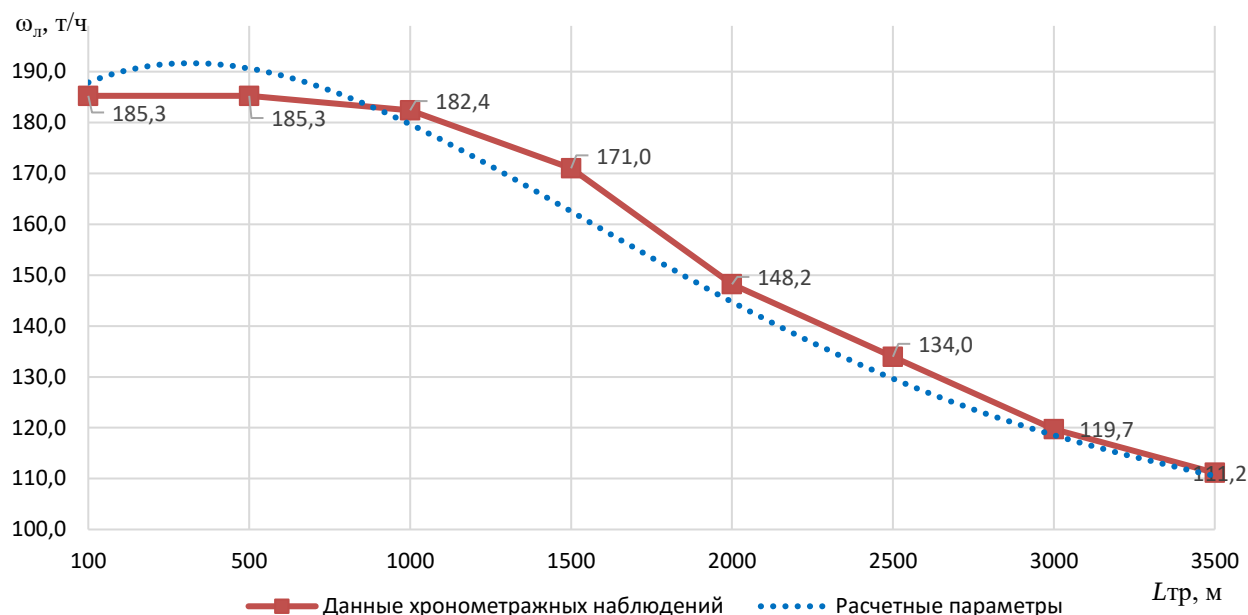


Рисунок 4.11 – Сравнение полученных результатов по производительности линии внесения  $\omega_{л}$  при имитационном моделировании и в ходе хронометражных наблюдений в зависимости от расстояния транспортировки  $L_{тр}$

Подтверждается хорошее совпадение результатов – расхождение не превышает 4,9% (рисунок 4.11). Для статистической проверки отсутствия систематической ошибки был применен парный  $t$ -критерий Стьюдента. Сравнение проводилось для восьми значений расстояния транспортировки. Расчетное значение  $t$ -критерия составило  $t_{расч} = 2,05$ , что меньше критического  $t_{крит} = 2,365$  при уровне значимости 0,05. Это подтверждает, что различия между расчетными значениями и результатами хронометражных наблюдений статистически незначимы [91].

Таким образом, имитационная модель адекватно реагирует на изменение исходных параметров производственной линии внесения. Расхождение основного технологического параметра производственной линии внесения – производительности – не превышает 4,7%, что также доказывает устойчивость имитационной модели при изменении параметров производственной линии внесения в исследуемом диапазоне расстояний транспортировки.

В имитационной модели были приняты допущения, связанные с отсутствием внезапных отказов техники. Отказы не являются неотъемлемой составляющей рабочего цикла технических средств и зависят от технического состояния используемых машин и целого ряда других факторов, а следовательно, внезапные отказы не являются определяющими для исследуемых параметров.

На основе вышесказанного можно утверждать, что разработанная имитационная модель адекватно описывает работу линии внесения твердых органических удобрений и дефеката и может быть использована для анализа эффективности предлагаемой технологии при различных составах звеньев и условиях эксплуатации.

#### 4.4.2 Определение способа движения технологических агрегатов с учетом простоев и стохастического характера работы

В подразделе 2.2 было указано, что большое влияние на выбор способа движения технологического агрегата будут оказывать внешние факторы, такие как расстояние транспортировки вносимого материала, время перегрузки материала из прицепа-перегрузчика в разбрасыватель и многие другие факторы. В таком случае можно использовать имитационную модель производственной линии внесения для определения наибольшего коэффициента использования циклового времени смены технологических и транспортно-перегрузочных средств для учета стохастического характера элементов рабочего цикла и влияния простоев. Результаты сравнения способов движения 1 и 2 (см. подраздел 2.2) для трех расстояний транспортировки (500, 1000 и 1500 м) приведены в таблице 4.7. Сравнение проводилось при цикловом времени смены, равном 6 ч, при этом принято, что все это время процесс внесения непрерывен.

Таблица 4.7 – Коэффициент использования циклового времени  
производственной линии внесения  $\tau_{л}$  при различных способах движения  
и составах звеньев

| Состав звена                                 | $\tau_{л}$ ,<br>(способ 1) | $\tau_{л}$ ,<br>(способ 2) | Преимущество<br>способа 1, % |
|----------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 разбрасыватель +<br>1 прицеп-перегрузчик   | 0,245                      | 0,221                      | +10,7                        |
| 2 разбрасывателя +<br>1 прицеп-перегрузчик   | 0,255                      | 0,230                      | +10,8                        |
| 2 разбрасывателя +<br>2 прицепа-перегрузчика | 0,335                      | 0,305                      | +9,8                         |

Способ движения 1 (таблица 4.7) обеспечивает большую производительность производственной линии внесения, так как характеризуется меньшими простоями разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков.

#### 4.4.3 Результаты определения рационального состава звеньев производственной линии

На основе результатов выполненных расчетов для имитационного моделирования выбраны следующие модели техники. В качестве технологических агрегатов грузоподъемностью 10, 15 и 20 т приняты: МТЗ-1523 с разбрасывателем SF110, БТЗ-245К с МТУ-15-1, а также БТЗ-253К с РОУМ-20. Данные модели широко распространены в сельхозпредприятиях Воронежской области и соответствуют требованиям по тяговому классу и мощности. Для прицепов-перегрузчиков соответствующей грузоподъемности можно использовать тракторы меньшей мощности, чем для разбрасывателей той же грузоподъемности, что обусловлено отсутствием затрат мощности на привод рабочих органов во время движения агрегата. В качестве погрузчика принят высокопроизводительный погрузчик

LiuGong 862 с объемом ковша 3,5 м<sup>3</sup>, что позволяет оценить взаимодействие звеньев с минимальным влиянием фактора погрузки.

Используя имитационную модель, оценили изменение основных параметров производственной линии внесения (производительность, удельные затраты) для каждого состава производственной линии. Полученные результаты представлены в приложении В (рисунки В.7 – В.10), по ним видно, что с увеличением количества прицепов-перегрузчиков снижаются затраты труда и денежных средств, а также повышается производительность. Увеличение количества разбрасывателей также повышает производительность линии и снижает затраты на внесение при относительно небольшом повышении затрат труда на внесенную тонну. При этом увеличение количества разбрасывателей оправдано лишь при сохранении высокой производительности транспортно-перегрузочного звена, это хорошо заметно для составов звеньев (2 разбрасывателя + 3 перегрузчика 20 т и 3 разбрасывателя + 3 перегрузчика 20 т). В данных вариантах производительность линии ограничена транспортно-перегрузочным звеном и добавление еще одного разбрасывателя никак не влияет на производительность всей линии. Напротив, у основного звена возрастают простои в ожидании загрузки, повышая удельные затраты средств и труда. Это хорошо заметно на рисунках В.7 – В.10.

Анализируя результаты, также можно отметить, что наименьшие затраты присущи линии с тремя разбрасывателями и несколькими прицепами-перегрузчиками грузоподъемностью 20 т. Однако этот вариант показывает относительно невысокую производительность и средние затраты труда. При этом наименьшие затраты труда и почти самую высокую производительность демонстрирует состав из двух разбрасывателей и трех 40-тонных прицепов-перегрузчиков, но ему также соответствуют наибольшие удельные затраты.

Подробно проанализировав результаты, можно отметить, что состав линии внесения из двух 15-тонных разбрасывателей и трех 30-тонных прицепов-перегрузчиков является наиболее рациональным с точки зрения сбалансированности основных параметров линии внесения. Удельные затраты труда и денежных средств на его применение одни из самых низких, при этом производительность

линии является наивысшей из представленных составов. Такой результат объясняется рациональным соотношением числа разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков при данном расстоянии транспортировки. Для этого состава характерно наименьшее время простоя прицепов-перегрузчиков и разбрасывателей в ожидании друг друга и наименьшее время нахождения прицепов-перегрузчиков в очереди на загрузку и перегрузку.

Для разных доз внесения и грузоподъемностей разбрасывателей наиболее рациональные составы показаны в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Рациональные составы звеньев производственной линии, применяемых по перегрузочной технологии, в зависимости от дозы внесения и грузоподъемности разбрасывателей

| Доза внесения,<br>т/га | Грузоподъемность разбрасывателей, т          |                                              |                                              |
|------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                        | 10                                           | 15                                           | 20                                           |
| 10                     | 2 разбрасывателя<br>+ 3 перегрузчика<br>20 т | 2 разбрасывателя<br>+ 2 перегрузчика<br>30 т | 2 разбрасывателя<br>+ 2 перегрузчика<br>40 т |
| 25                     | 2 разбрасывателя<br>+ 3 перегрузчика<br>20 т | 2 разбрасывателя<br>+ 2 перегрузчика<br>30 т | 2 разбрасывателя<br>+ 3 перегрузчика<br>30 т |
| 40                     | 1 разбрасыватель<br>+ 3 перегрузчика<br>20 т | 2 разбрасывателя<br>+ 3 перегрузчика<br>30 т | 2 разбрасывателя<br>+ 3 перегрузчика<br>30 т |
| 55                     | 1 разбрасыватель<br>+ 3 перегрузчика<br>20 т | 2 разбрасывателя<br>+ 2 перегрузчика<br>40 т | 1 разбрасыватель<br>+ 2 перегрузчика<br>40 т |

Из данных таблицы 4.8 видно, что для дозы внесения 10 и 25 т/га чаще всего рациональнее применять прицепы-перегрузчики грузоподъемностью 20 и 30 т, а для разбрасывателей грузоподъемностью 15 и 20 т при дозах 40 и 55 т/га рациональны перегрузчики 30 и 40 т.

Сравнение эффективности перегрузочной технологии с прямоточной и перевалочной проведено для двух характерных доз внесения – 10 и 40 т/га. Для корректности сравнения грузоподъемность разбрасывателей и перегрузчиков принята равной. Для перевалочной технологии линия доставки сформирована из автотранспортных средств КамАЗ-55102 с прицепом НефАЗ-8527 с оптимальным количеством транспортных средств для каждого расстояния. Результаты представлены в приложении В (рисунки В.11 – В.17). Для других составов звеньев и доз внесения рациональные расстояния применения перегрузочной технологии приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Рациональные расстояния применения перегрузочной технологии для выбранных составов звеньев в зависимости от дозы внесения и грузоподъемности разбрасывателей

| Доза внесения,<br>т/га | Рациональное расстояние (м) применения<br>при грузоподъемности разбрасывателей (т) |             |             |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|
|                        | 10                                                                                 | 15          | 20          |
| 10                     | 500...2300                                                                         | 1100...2200 | 1350...2150 |
| 25                     | 600...2350                                                                         | 300...1750  | 400...1650  |
| 40                     | 200...1800                                                                         | 250...1550  | 450...1450  |
| 55                     | 100...1600                                                                         | 100...1250  | 180...1100  |

Анализ результатов (рисунки В.11 – В.17, таблица 4.9) показывает, что при малой дозе (10 т/га) перегрузочная технология обеспечивает меньшие удельные затраты на расстоянии транспортировки до 2300 м (экономия 90...100 руб./т, или 20...25%), более высокую производительность в диапазоне 500...1210 м и затраты труда на уровне прямоточной технологии на отрезке 500...1500 м. При большой дозе (40 т/га) зона эффективности смещается: меньшие затраты наблюдаются при расстоянии транспортировки до 1000 м (далее остаются на уровне прямоточной), производительность уступает прямоточной технологии, но превышает производительность перевалочной технологии при расстоянии транспортировки до 2750 м, а затраты труда остаются ниже, чем у других технологий

до расстояния 2250 м. Таким образом, рациональный диапазон применения перегрузочной технологии для рассмотренных составов звеньев составляет от 500 до 2250...2300 м в зависимости от дозы внесения, что совпадает с зоной повышенных затрат прямоточной и перевалочной технологий и обуславливает применение прицепов-перегрузчиков на средних расстояниях транспортировки, которые характерны для Центрального Черноземья [3].

Результаты определения рациональных составов для разных доз и грузоподъемностей разбрасывателей представлены в виде графиках на рисунках 4.12 – 4.15. Из этих графиков следует, что линия, в которой применяются 10-тонные разбрасыватели, обладает наименьшими удельными затратами среди представленных составов. С точки зрения удельных затрат рациональное расстояние транспортировки для этого состава составляет около 1210 м, что больше, чем у других составов. Этому расстоянию транспортировки соответствует наибольшая производительность линии и наименьшие удельные затраты труда на внесенную тонну. Также видно, что при этом расстоянии наблюдается относительно небольшое суммарное время ожидания для всех машин в линии. Для дозы 10 т/га наиболее рационально применение состава, состоящего из трех десяти-тонных разбрасывателей и трех 30-тонных прицепов-перегрузчиков, так как для него характерна наибольшая производительность на рациональном расстоянии транспортировки, которое обеспечивает наибольшую разницу в удельных затратах по сравнению с другими технологиями. Для других доз внесения данные приведены в таблицах 4.10 – 4.13.

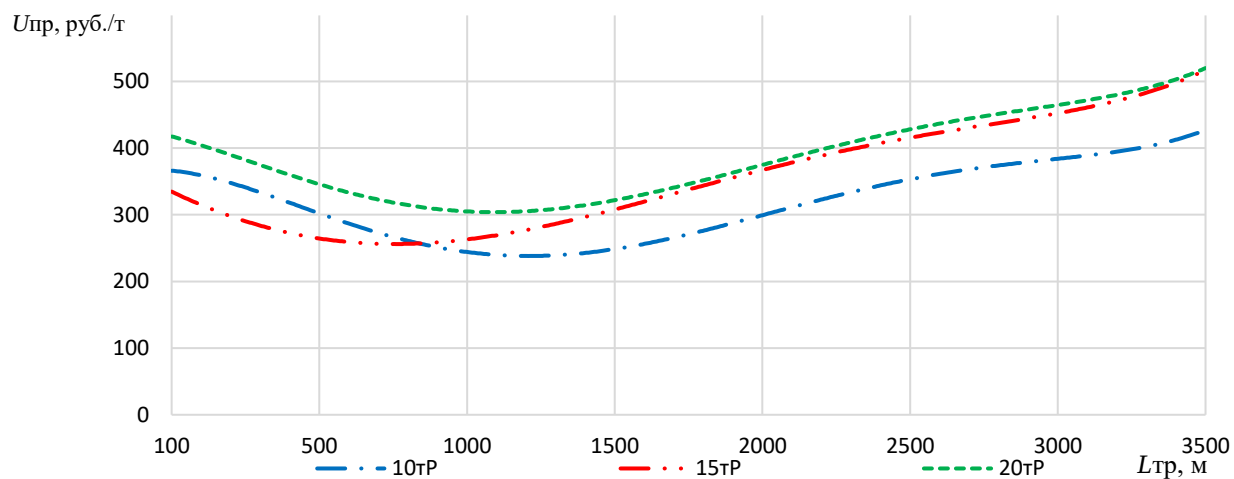


Рисунок 4.12 – Изменение удельных затрат  $U_{пр}$  при применении перегрузочной технологии с разбрасывателями разной грузоподъемности для дозы внесения 10 т/га

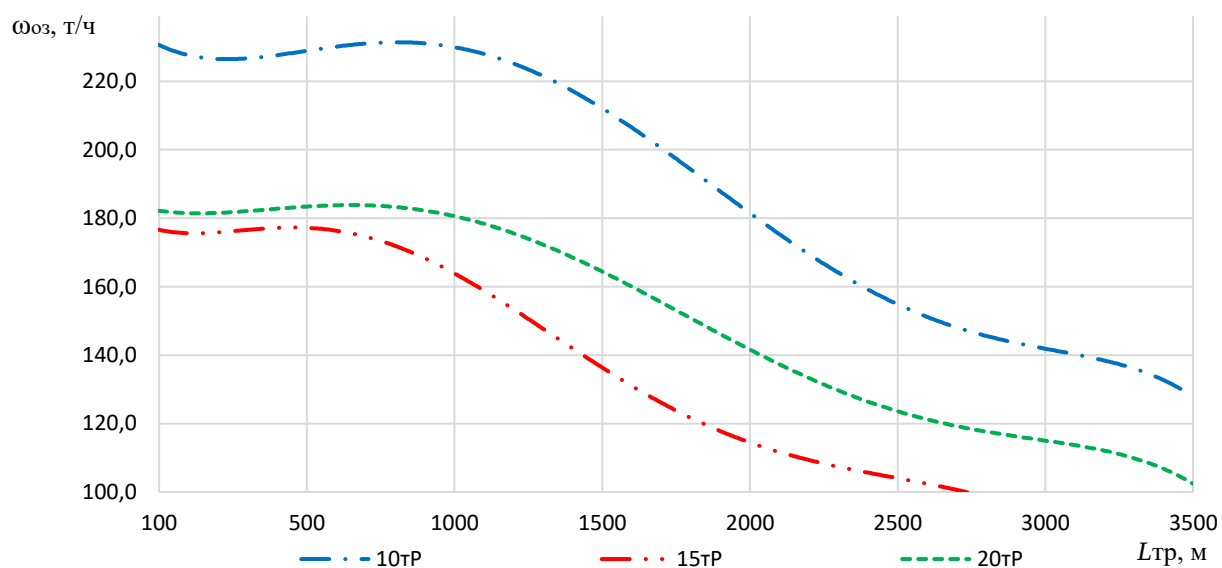


Рисунок 4.13 – Изменение производительности основного звена  $\omega_{оз}$  при применении перегрузочной технологии с разбрасывателями разной грузоподъемности для дозы внесения 10 т/га

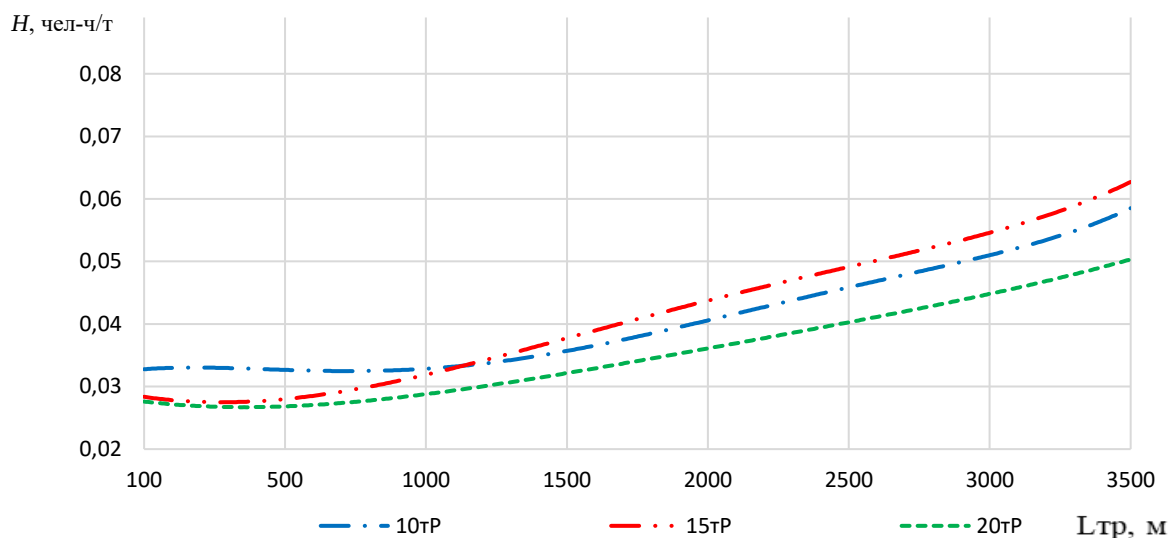


Рисунок 4.14 – Изменение удельных затрат труда  $H$  при применении перегрузочной технологии с разбрасывателями разной грузоподъемности для дозы внесения 10 т/га

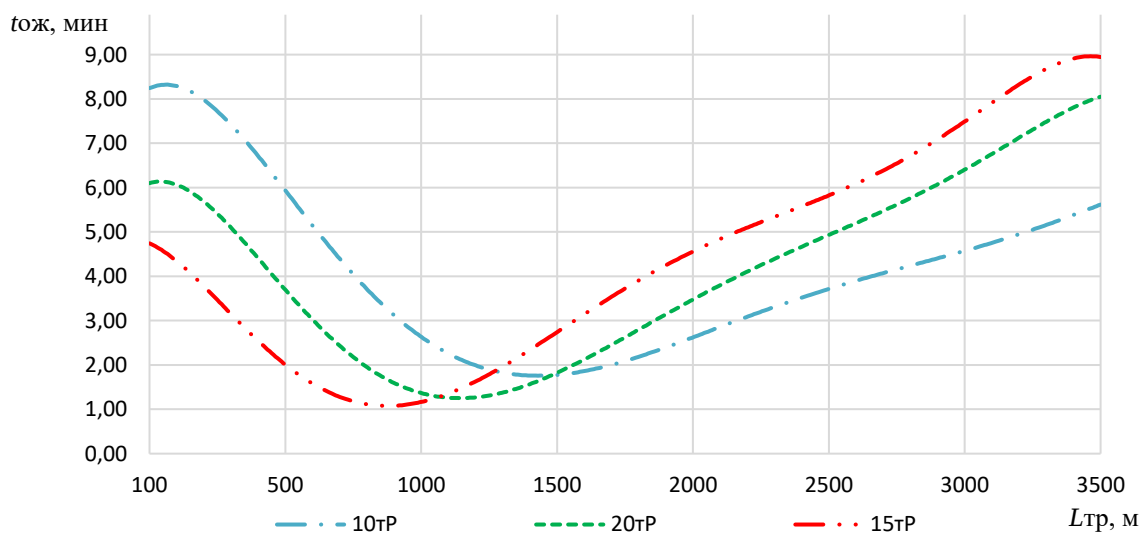


Рисунок 4.15 – Изменение суммарного времени ожидания  $t_{ож}$  при применении перегрузочной технологии с разбрасывателями разной грузоподъемности для дозы внесения 10 т/га

Таблица 4.10 – Параметры линии, характерные для рационального расстояния и дозы внесения 10 т/га, с разными грузоподъемностями разбрасывателей  $Q_p$

| $Q_p, т$ | $L_{тр}, м$ | $\omega, т/ч$ | $U_{пр}, руб./т$ | $H, чел-ч/т$ |
|----------|-------------|---------------|------------------|--------------|
| 10       | 1210        | 235           | 250              | 0,034        |
| 15       | 750         | 185           | 265              | 0,029        |
| 20       | 1000        | 175           | 305              | 0,031        |

Таблица 4.11 – Параметры линии, характерные для рационального расстояния и дозы внесения 25 т/га, с разными грузоподъемностями разбрасывателей  $Q_p$

| $Q_p$ , т | $L_{тр}$ , м | $\omega$ , т/ч | $U_{пр}$ , руб./т | $H$ , чел-ч/т |
|-----------|--------------|----------------|-------------------|---------------|
| 10        | 1100         | 238            | 230               | 0,03          |
| 15        | 350          | 205            | 200               | 0,024         |
| 20        | 650          | 225            | 275               | 0,025         |

Таблица 4.12 – Параметры линии, характерные для рационального расстояния и дозы внесения 40 т/га, с разными грузоподъемностями разбрасывателей  $Q_p$

| $Q_p$ , т | $L_{тр}$ , м | $\omega$ , т/ч | $U_{пр}$ , руб./т | $H$ , чел-ч/т |
|-----------|--------------|----------------|-------------------|---------------|
| 10        | 350          | 240            | 150               | 0,025         |
| 15        | 450          | 265            | 190               | 0,022         |
| 20        | 100          | 235            | 215               | 0,023         |

Таблица 4.13 – Параметры линии, характерные для рационального расстояния и дозы внесения 55 т/га, с разбрасывателями разной грузоподъемности  $Q_p$

| $Q_p$ , т | $L_{тр}$ , м | $\omega$ , т/ч | $U_{пр}$ , руб./т | $H$ , чел-ч/т |
|-----------|--------------|----------------|-------------------|---------------|
| 10        | 550          | 185            | 250               | 0,027         |
| 15        | 1000         | 178            | 295               | 0,029         |
| 20        | 1150         | 133            | 295               | 0,033         |

Из таблиц 4.10 – 4.13 видно, что для малых доз внесения (10 и 25 т/га) по совокупности параметров лучше применять разбрасыватели с грузоподъемностью 10 т, а для больших доз внесения (40 и 55 т/га) – разбрасыватели с грузоподъемностью 15 т. Эти составы обеспечивают наименьшие удельные затраты и наибольшую производительность на рациональном расстоянии транспортировки при относительно низких удельных затратах труда на вносимую тонну материала. Таким образом, при внесении материала малыми дозами (10 и 25 т/га) для снижения затрат лучше применять разбрасыватели грузоподъемностью 10 т, а при больших дозах внесения (40 и 55 т/га) – 15 т, и при всех дозах внесения грузоподъемность прицепа-перегрузчика должна быть 30 т.

#### 4.5 Выводы

Выполненные расчеты рациональной грузоподъемности прицепа-перегрузчика твердых органических удобрений и дефеката, применяемого по предлагаемому виду перегрузочной технологии, позволили установить модели агрегируемых тракторов, обеспечивающих наилучшие значения выбранного критерия эффективности транспортно-перегрузочного агрегата – удельной цикловой производительности на единицу массы. Для 20-тонного прицепа-перегрузчика наиболее подходящим является трактор БТЗ-245К, для 30-тонного – John Deere 8410, для 40-тонного – К-744Р2.

Установлено, что просыпаемость материала при перегрузке ленточными транспортерами достигает минимума в диапазоне скорости ленты  $2,0 \pm 0,2$  м/с. Данная закономерность сохраняется для всех исследованных подач и типов материалов. Таким образом, рекомендуется скорость ленты  $2,0 \pm 0,2$  м/с. При указанной скорости удельные энергозатраты на перегрузку равны 39...43 Вт·ч/т, а просыпаемость не превышает 1,8 кг/с.

Предложенные конструктивные усовершенствования выгрузного устройства для прицепов-перегрузчиков (установка защитных кожухов вдоль боковых стенок ленточного транспортера и чистящего устройства в верхней части транспортера) исключают просыпание материала и обеспечивают удаление остатков налипшего материала, не допуская его попадание к приводному устройству. При агрегатировании с тракторами, имеющими мощность гидросистемы 30...40 кВт, производительность выгрузного устройства составит 820...875 т/ч, что в 3...4 раза превышает производительность фронтальных погрузчиков.

Разработанная имитационная модель линии внесения твердых органических удобрений и дефеката является адекватной, что подтверждено сравнением результатов моделирования с данными, полученными посредством хронометражных наблюдений при внесении твердых органических удобрений на сельхозпредприятиях АО «Хреновской конный завод», ООО «ЭкоНиваАгро-Восточ-

ное» и АО «Павловская нива». Проверка однородности дисперсий по F-критерию Фишера показала, что для всех элементов рабочего цикла расчетные значения F-критерия (от 1,05 до 1,35) не превышают критического (2,12 при уровне значимости 0,05), что доказывает адекватное воспроизведение моделью вариабельности технологического процесса. Сравнение производительностей линии, полученных в ходе моделирования и хронометражных наблюдений посредством парного t-критерия Стьюдента, дало расчетное значение 2,05, что меньше критического, равного 2,365, и подтверждает отсутствие систематической ошибки.

Реализация разработанной имитационной модели позволяет по совокупности параметров выбрать рациональные составы звеньев линии внесения по предлагаемому виду перегрузочной технологии, которые обеспечивают наименьшие удельные затраты по сравнению как с другими видами перегрузочной технологии, так и с аналогичными составами, применяемыми по прямоточной и перевалочной технологиям.

В результате проведенного имитационного моделирования установлено, что использование предлагаемого вида перегрузочной технологии обеспечивает снижение удельных затрат (до 15%) при расстоянии транспортировки от 300 до 2500 м при сохранении высокой производительности и низких удельных затрат труда. Такой результат объясняется наименьшими простоями технических средств, способствующими эффективной работе технологических и транспортно-перегрузочных агрегатов.

При внесении материала малыми дозами (10 и 25 т/га) для снижения затрат следует применять разбрасыватели грузоподъемностью 10 т, а при больших дозах внесения (40 и 55 т/га) – 15 т, при всех дозах грузоподъемность прицепов-перегрузчиков должна быть 30 т. Такие составы звеньев обеспечивают наименьшие удельные затраты и наибольшую производительность на рациональном расстоянии транспортировки при относительно низких удельных затратах труда на вносимую тонну материала.

## 5 Экономическая оценка внедрения предлагаемого вида перегрузочной технологии с применением прицепов-перегрузчиков

Экономическая оценка производственных линий, состоящих из разных технических средств, работающих по разным технологическим схемам, проводилась путем сравнения группы технико-экономических показателей [63]. При оценке учитывали:

- производительность (га/ч);
- удельные прямые затраты на обработку одного гектара (руб./га);
- эффективность капитальных вложений в расчете на обработку одного гектара (руб./га);
- металлоемкость линии на обработку одного гектара (кг/га).

Для расчета годового экономического эффекта от возможного применения перегрузочной технологии с использованием прицепов-перегрузчиков применена методика, изложенная в работе [82]. Данные об удельных расходах топлива, часовые ставки механизаторов и объемная плотность вносимых материалов принимались из следующих источников [86, 111, 130].

При расчете часовой производительности линии внесения были приняты следующие условия. Учитывая, что обычно в Воронежской области расстояние транспортировки вносимого материала от места хранения до места внесения колеблется в пределах от нескольких сотен метров до нескольких километров, было решено принять среднее расстояние транспортировки – 1,5 км. Меньшее расстояние транспортировки не всегда есть возможность обеспечить из-за занятости поля. Поэтому часто сельхозпредприятия организуют временные хранилища твердых органических удобрений и дефеката на соседних полях или других свободных участках. В случаях, когда создание временных хранилищ для материала невозможно, возникает необходимость в его транспортировке на большие расстояния. Для такой доставки, очевидно, более эффективно использовать специализированный автомобильный транспорт, а не тракторные прицепы. Следовательно, при расстояниях свыше 3...4 км и применении рационального количества автомобилей большой грузоподъемности, перевалочная технология становится экономически выгоднее. Расчеты проводили для варианта, когда погрузка

вносимого материала осуществляется погрузчиком LiuGong 865 как наиболее подходящим для этих целей.

Сравнительный анализ выполнялся путем сопоставления двух производственных линий внесения твердых органических удобрений и дефеката: прямой технологии и перегрузочной с использованием прицепов-перегрузчиков. Экономия прямых эксплуатационных затрат денежных средств определена по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{эз}} = E_{\text{прям}} - E_{\text{перезр}}, \quad (5.1)$$

где  $E_{\text{прям}}, E_{\text{перезр}}$  – соответственно прямые эксплуатационные затраты прямой и перегрузочной производственных линий внесения, руб./ч.

При этом требуется определить удельные затраты на единицу обрабатываемой площади производственными линиями, которые представлены следующим выражением:

$$C = M + И + T + P, \quad (5.2)$$

где  $M$  – затраты на оплату труда механизаторов, руб./га;

$И$  – затраты на топливо и смазочные материалы, руб./га;

$T$  – затраты на ремонт и техническое обслуживание применяемой техники, руб./га;

$P$  – затраты на амортизацию применяемой техники, руб./га.

Затраты на оплату труда механизаторов определяются по выражению

$$M = \frac{n_{\text{мех}} k K}{\omega_{\text{см}}}, \quad (5.3)$$

где  $n_{\text{мех}}$  – число механизаторов в производственной линии, чел.;

$k$  – часовая ставка оплаты труда механизаторов, руб./чел-ч;

$K$  – коэффициент начислений на зарплату при различных формах налогообложения;

$\omega_{\text{см}}$  – сменная производительность производственной линии, га/ч.

Затраты на топливо и смазочные материалы

$$И = q_r O_{\text{т}} K_{\text{см}_\text{м}}, \quad (5.4)$$

где  $q_r$  – удельный расход топлива, кг/га;

$O_r$  – цена 1 кг топлива, руб./кг;

$K_{см\_м}$  – коэффициент учета стоимости смазочных материалов.

Затраты на ремонт и техническое обслуживание техники по нормам отчислений от цены машины

$$T = \frac{Ba_r}{\omega_{см} T_r}, \quad (5.5)$$

где  $B$  – рыночная стоимость новой машины, руб.;

$a_r$  – коэффициент отчислений на ремонт и техническое обслуживание машины;

$T_r$  – нормативная годовая загрузка машины, ч.

Затраты на амортизацию машины

$$P = \frac{Ba}{\omega_{см} T_r}, \quad (5.6)$$

где  $a$  – коэффициент отчислений на амортизацию машины.

На основе результатов расчета составов звеньев установлена часовая производительность линии внесения. Для прямоточной линии с тремя разбрасывателями грузоподъемностью 10 т и тремя разбрасывателями грузоподъемностью 30 т она при дозе внесения 10 т/га составила  $\omega_{л} = 16,8$  га/ч. Для перегрузочной линии с тремя прицепами-перегрузчиками грузоподъемностью 30 т и тремя разбрасывателями грузоподъемностью 10 т производительность составила  $\omega_{л} = 17,4$  га/ч.

Прямые удельные затраты производственной линии внесения рассчитывались согласно общепринятой методике [63], в основу которой положено выражение (2.43). Результаты расчета прямых удельных затрат по двум сравниваемым технологиям показывают, что применение предлагаемого вида перегрузочной технологии вместо прямоточной технологии при внесении материала дозой 10 т/га может дать экономию эксплуатационных затрат  $\mathcal{E}_{э}$  в сумме 253 руб./га. Годовой экономический эффект  $\mathcal{E}_r$  линии внесения при годовой загрузке  $T_r=350$  ч/год составит [85, 115, 133]

$$\mathcal{E}_\Gamma = \mathcal{E}_{\text{эз}} T_\Gamma \omega_\Gamma = 253 \cdot 350 \cdot 17,4 = 1\,540\,775 \text{ руб.}$$

Коэффициент эффективности капитальных вложений в этом случае

$$\mathcal{E}_\Gamma / K_\Gamma = 1\,540\,775 / 2\,250\,000 = 0,68,$$

где  $K_\Gamma$  – дополнительные капиталовложения, руб.

Срок окупаемости капитальных вложений  $T_{\text{ок}}$  будет

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{0,68} = 1,47 \text{ года.}$$

Также стоит учитывать металлоёмкость производственной линии на единицу выполненной работы. Так, при выбранной дозе внесения (10 т/га) и годовой загрузке 350 ч за период эксплуатации выработка линии из трех разбрасывателей грузоподъемностью 10 т и трех разбрасывателей грузоподъемностью 30 т будет 5880 га, а у линии с применением трех разбрасывателей грузоподъемностью 10 т и трех прицепов-перегрузчиков грузоподъемностью 30 т в тех же условиях – 6090 га. Таким образом, удельная металлоёмкость линии из разбрасывателей составит 18,7 кг/га, в то время как удельная металлоёмкость линии с перегрузчиками и разбрасывателями – 18,1 кг/га.

Таким же образом рассчитав значение для других доз внесения приведем общие значения в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сводная таблица результатов экономической оценки производственных линий внесения при разных дозах внесения

| Дозы внесения, т/га | Экономия эксплуатационных затрат, руб./га | Годовой экономический эффект, руб. | Коэффициент эффективности капитальных вложений | Срок окупаемости, год | Удельная металлоёмкость линии, кг/га |
|---------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| 10                  | 253                                       | 1 540 775                          | 0,68                                           | 1,47                  | 18,1                                 |
| 25                  | 304                                       | 740 544                            | 0,32                                           | 3,12                  | 45,3                                 |
| 40                  | 375                                       | 570 937                            | 0,25                                           | 4                     | 72,5                                 |
| 55                  | 434                                       | 480 556                            | 0,21                                           | 4,7                   | 100,3                                |

Помимо прочего, движение прицепов-перегрузчиков только в пределах магистрально-разворотных полос и меньшее удельное давление на почву распределительных агрегатов с небольшой грузоподъемностью позволит не только компенсировать отрицательное воздействие возросшей массы линии, но и снизить уплотнение почвы.

Расчет прямых удельных затрат показал, что использование предлагаемого вида перегрузочной технологии с применением прицепов-перегрузчиков более предпочтительно для малых доз внесения и может дать экономию эксплуатационных затрат в сумме 253 руб./га, а годовой экономический эффект в расчете на один агрегат при его загрузке 350 ч/год составит 1 540 775 руб., при этом инвестиции, вложенные в переоборудование трех универсальных прицепов грузоподъемностью 30 т, окупятся через 1,47 года.

Из результатов расчетов также видно, что при увеличении дозы внесения снижаются эксплуатационные затраты по сравнению с прямоточной технологией, но экономический эффект и эффективность капиталовложений заметно уменьшаются из-за низкой годовой загрузки прицепов-перегрузчиков и разбрасывателей. Данные показатели можно значительно улучшить, если применять перегрузочную технологию с прицепами-перегрузчиками в крупных холдингах и машинно-технологических станциях, специализирующихся на внесении твердых органических удобрений и дефеката. Таким образом, значительно возрастет годовая загрузка разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков, что позволит снизить сроки их окупаемости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обзор и анализ научных работ, посвященных совершенствованию технологий и технических средств внесения твердых органических удобрений и дефеката, показал, что наиболее перспективным является вариант перегрузочной технологии с применением прицепов-перегрузчиков. Использование прицепов-перегрузчиков, позволяющих объединить положительные стороны разных видов перегрузочной технологии и тем самым повысить производительность линии внесения и уменьшить удельные затраты на внесение твердых органических удобрений и дефеката, не исследовалось. Отсутствуют аналитические зависимости для определения параметров технических средств и производственной линии внесения с применением прицепов-перегрузчиков, не изучены способы движения распределяющих и транспортно-перегрузочных агрегатов, обеспечивающие наибольшую эффективность работы производственной линии внесения с использованием прицепов-перегрузчиков. Это обуславливает необходимость разработки методики определения рациональных параметров комплекса машин для внесения твердых органических удобрений и дефеката по перегрузочной технологии.

2. В основу предложенного вида перегрузочной технологии внесения твердых органических удобрений и дефеката положен способ внесения твердых органических удобрений и мелиорантов (патент № 2832329 РФ). Использование указанного способа обеспечивает повышение производительности основных технологических агрегатов – разбрасывателей.

3. Выполненные теоретические исследования влияния состава звеньев в предлагаемом виде перегрузочной технологии на производительность линии внесения твердых органических удобрений и дефеката показывают, что простейший состав (один разбрасыватель, один прицеп-перегрузчик) мало эффективен из-за высокой продолжительности ожидания прибытия перегрузчика. Увеличение количества прицепов-перегрузчиков в транспортно-перегрузочном звене снижает простои разбрасывателя, но повышает вероятность простоев прицепов-

перегрузчиков. При сбалансированном составе производственной линии внесения у предлагаемого вида перегрузочной технологии присутствует рациональное расстояние транспортировки, характеризующееся наименьшими взаимными простоями разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков в ожидании начала перегрузки, также этим условиям соответствуют наименьшие удельные затраты и наибольшая производительность линии внесения. Рациональное расстояние транспортировки при прочих равных параметрах зависит от количества прицепов-перегрузчиков. Относительно рационального расстояния устанавливается диапазон расстояний применения предлагаемого вида перегрузочной технологии.

4. Установить время ожидания машин при условии их сложного взаимодействия и взаимного влияния простоев друг на друга позволяет применение теории массового обслуживания. Определить показатели линии внесения и соответственно рациональный диапазон применения конкретного состава такой линии, применяемого по предлагаемому виду перегрузочной технологии, дают возможность коэффициенты загрузки для погрузчиков, прицепов-перегрузчиков и разбрасывателей.

5. Рациональная грузоподъемность разбрасывателя устанавливается по максимальной удельной цикловой производительности на единицу эксплуатационной массы агрегата. Для прицепа-перегрузчика как транспортного средства рациональная грузоподъемность определяется по удельной производительности, а как технологического средства обосновывается по минимально необходимой грузоподъемности, исключающей простои разбрасывателей, при этом грузоподъемность прицепа-перегрузчика должна быть кратной грузоподъемности разбрасывателя. Производительность выгрузного устройства прицепа-перегрузчика зависит от мощности гидросистемы агрегируемого трактора, скорости ленты и угла наклона транспортера, а также подачи материала.

6. Реализация разработанной имитационной модели линии внесения твердых органических удобрений и дефеката посредством специально разработанной

компьютерной программы (свидетельство № 2026616020 РФ) позволяет по совокупности параметров выбрать рациональные составы звеньев линии внесения по предлагаемому виду перегрузочной технологии, которые обеспечивают наименьшие удельные затраты по сравнению как с другими видами перегрузочной технологии, так и с аналогичными составами, применяемыми по прямоточной и перевалочной технологиям. Результаты моделирования показали, что использование предлагаемого вида перегрузочной технологии обеспечивает снижение удельных затрат (до 15%) при расстоянии транспортировки от 300 до 2500 м при сохранении высокой производительности и низких удельных затрат труда, что объясняется наименьшими простоями технических средств. Адекватность предложенной имитационной модели подтверждена сравнением результатов моделирования с данными, полученными посредством хронометражных наблюдений при внесении твердых органических удобрений на сельхозпредприятиях АО «Хреновской конный завод», ООО «ЭкоНиваАгро-Восточное» и АО «Павловская нива».

7. Использование предлагаемого вида перегрузочной технологии на внесении материала дозой 10 т/га обеспечивает экономию эксплуатационных затрат 253 руб./га, при этом годовой экономический эффект в расчете на один агрегат при его загрузке 350 ч/год составит 1 540 775 руб. Инвестиции, вложенные в переоборудование трех прицепов грузоподъемностью 30 т, при внесении с дозой 10 т/га окупятся через 1,47 года. Если применять прицепы-перегрузчики в специализированных организациях с высокой годовой загрузкой можно значительно снизить сроки окупаемости и при больших дозах внесения.

8. Сельхозпроизводителям рекомендуется применение предлагаемого вида перегрузочной технологии (патент № 2832329 РФ) для внесения твердых органических удобрений и дефеката. При реализации предложенного вида перегрузочной технологии целесообразно эксплуатировать выгрузное устройство прицепа-перегрузчика со скоростью ленты  $2,0 \pm 0,2$  м/с. Рекомендуемые модели агрегируемых тракторов: для 20-тонного прицепа-перегрузчика БТЗ-245К, для

30-тонного – John Deere 8410, для 40-тонного – К-744Р2. При внесении материала малыми дозами (10 и 25 т/га) для снижения затрат следует применять разбрасыватели грузоподъемностью 10 т, а при больших дозах внесения (40 и 55 т/га) – 15 т, при всех дозах грузоподъемность прицепов-перегрузчиков – 30 т. Изготовителям прицепов-перегрузчиков для повышения эффективности линии внесения рекомендуется увеличить высоту скребка (планки) на транспортере, что позволит повысить производительность выгрузного устройства, а также увеличит эффективность использования мощности, передаваемой на транспортер.

9. Перспективы дальнейшей разработки темы: собрать и обработать данные по отказам разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков, и на основе этого усовершенствовать имитационную модель линии внесения твердых органических удобрений и донных осадков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агротехнологии зерновых и технических культур в Центральном Черноземье / В.А. Федотов, А.К. Свиридов, С.В. Федотов [и др.]. – Воронеж: ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2006. – 180 с.
2. Баженов А.А. Тяговый расчет конвейеров с перегородками / А.А. Баженов // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов IV международной научно-практической конференции, г. Санкт-Петербург, 28–29 апреля 2016 г. – С-Пб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. – Том I. – С. 155–156.
3. Барыкин К.В. Актуальность использования дефеката в сельском хозяйстве Воронежской области / К.В. Барыкин, Н.П. Колесников // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы международной научно-практической конференции, г. Воронеж, 25 ноября 2022 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 218–223.
4. Барыкин К.В. Анализ основных технологических схем транспортно-распределительного процесса внесения дефеката / К.В. Барыкин, Н.П. Колесников // Достижения и перспективы развития АПК России: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, посвященной памяти Р.Г. Гареева, г. Казань, 30–31 марта 2023 г. – Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2023. – С. 537–540.
5. Барыкин К.В. Использование элементов теории массового обслуживания при проектировании технологии внесения дефеката / К.В. Барыкин, Н.П. Колесников // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения для АПК: материалы международной научно-практической конференции, г. Воронеж, 30 ноября 2023 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 228–233.
6. Барыкин К.В. К вопросу о технологии внесения дефеката с применением прицепа-перегрузчика / К.В. Барыкин, А.П. Дьячков, Н.П. Колесников // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной

научно-практической конференции, г. Воронеж, 01 апреля – 31 мая 2024 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 21–26.

7. Барыкин К.В. Методика и результаты экспериментальных исследований рабочих параметров прицепа-перегрузчика с использованием прототипа выгрузного устройства / К.В. Барыкин, Н.П. Колесников // Вестник НГИЭИ. – 2026. – № 3(178). – С. 19–30.

8. Барыкин К.В. Методика определения вероятности нахождения транспортно-перегрузочных и технологических агрегатов в состоянии работы для определения рационального состава линии внесения / К.В. Барыкин, Н.П. Колесников // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции, г. Воронеж, 20 июня 2025 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2025. – С. 132–137.

9. Барыкин К.В. Методика определения рационального состава основного и транспортного звена при внесении твердых органических удобрений и дефеката с применением универсальных прицепов-перегрузчиков / К.В. Барыкин // Константиновские чтения: сборник научных трудов III международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников, г. Кинель, 19 февраля 2025 года. – Кинель: ФГБОУ ВО Самарский ГАУ, 2025. – С. 193–197.

10. Барыкин К.В. Обзор и анализ прицепов перегрузчиков, используемых в сельскохозяйственном производстве / К.В. Барыкин, Н.П. Колесников, И.В. Лобов // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, г. Воронеж, 09–10 ноября 2023 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 12–17.

11. Барыкин К.В. Обзор и анализ технологий и технических средств, используемых при внесении дефеката / К.В. Барыкин, А.П. Дьячков, Н.П. Колесников // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научно-практической конференции, г. Воронеж, 01 марта – 28 апреля

- 2023 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – Часть V. – С. 272–280.
12. Барыкин К.В. Определение рациональных параметров применения прицепа-перегрузчика при внесении дефеката / К.В. Барыкин, А.П. Дьячков, Н.П. Колесников // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научно-практической конференции, г. Воронеж, 01 апреля – 31 мая 2024 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 27–31.
13. Барыкин К.В. Перспективы использования дефеката в качестве мелиоранта на примере Воронежской области / К.В. Барыкин, Н.П. Колесников, И.В. Лобов // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции, г. Воронеж, 06–07 июня 2023 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 88–93.
14. Барыкин К.В. Теоретические исследования взаимных простоев погрузочных, транспортно-перегрузочных и технологических машин при внесении твердых органических удобрений и дефеката по перегрузочной технологии / К.В. Барыкин, Н.П. Колесников, А.П. Дьячков // Вестник НГИЭИ. – 2025. – № 6(169). – С. 7–18.
15. Бобеев А.Б. Разгрузка транспортируемого груза через разгружаемый барабан ленточного конвейера / А.Б. Бобеев // Инженер: научное и периодическое издание Инженерной академии Кыргызской Республики. – 2010. – № 1. – С. 194–196.
16. Бондаренко А.М. Обоснование и разработка процессов производства и использования концентрированных органических удобрений: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.20.01 / Бондаренко Анатолий Михайлович. – зерноград, 2001. – 451 с.
17. Бондаренко А.М. Эффективность внесения концентрированных органических удобрений машиной с пневмоцентробежным распределяющим рабочим органом / А.М. Бондаренко, Л.С. Качанова, А.Ю. Попенко // Дальневосточный аграрный вестник. – 2023. – Т. 17, № 4. – С. 136–143.
18. Бровченко А.Д. Совершенствование процесса распределения твердого

навоза многолопастными рабочими органами роторного типа: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Бровченко Алексей Дмитриевич. – Воронеж, 2010. – 204 с.

19. Брюханов А.Ю. Повышение эффективности использования навоза путем автоматизированного проектирования вариантов технологий приготовления органических удобрений и их внесения в почву: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.20.01 / Брюханов Александр Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2009. – 193 с.

20. Быков В.С. Фронтальные погрузчики в современном сельском хозяйстве / В.С. Быков, А.С. Комоликов // Профессионализм инженера: сборник статей XIII Всероссийской молодежной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Победы в Великой отечественной войне, г. Орел, 17 апреля 2025 г. – Орел: ЗАО «Университетская книга», 2025. – С. 38–41.

21. Васильев Э.В. Транспортировка и внесение органических удобрений / Э.В. Васильев // Перспективы инновационного развития агропромышленного комплекса и сельских территорий: материалы международного конгресса, г. Санкт-Петербург, 25–29 августа 2014 г. – Санкт-Петербург: Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, 2014. – С. 188–190.

22. Васильчиков В.В. Актуальные проблемы повышения эффективности фронтальных погрузчиков сельскохозяйственных грузов / В.В. Васильчиков, С.А. Жигунов // Проблемы эксплуатации и ремонта автотракторной техники: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Г.П. Шаронова, г. Саратов, 16–17 ноября 2012 г. – Саратов: ООО Издательство «КУБиК», 2012. – С. 47–49.

23. Ващекин Е.П. Повышение полноценности кормления крупного рогатого скота / Е.П. Ващекин // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2009. – № 6. – С. 11–17.

24. Велиев С.Ш. Обоснование комплекса машин механизированных звеньев и технологий внесения органического удобрения: диссертация на соискание

ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Велиев Сиявуш Шамсадиногли. – Кировабад, 1984. – 202 с.

25. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е.С. Вентцель. – 3-е изд., стер. – М.: Дрофа, 2004. – 208 с.

26. Вентцель Е.С. Прикладные задачи теории вероятностей / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.

27. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – 8-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2002. – 575 с.

28. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1991. – 384 с.

29. Влияние многоосной ходовой системы машинно-тракторных агрегатов на плотность почвы / И.Н. Шилов, Н.Н. Романюк, А.Н. Орда и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – Т. 12, № 1. – С. 31–36.

30. Горная энциклопедия. В 5 т. Т. 5. / Редкол.: Е.А. Козловский и др. – М.: Советская энциклопедия, 1991. – 541 с.

31. ГОСТ 24055-2016. Машины сельскохозяйственные. Топливная экономичность. Методы испытаний. – Введ. 2017-01-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 15 с.

32. ГОСТ 24059-2017. Машины сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Требования безопасности и методы испытаний. – Введ. 2018-07-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 77 с.

33. ГОСТ 34631-2019. Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки. – Введ. 2021-03-15. – М.: Стандартинформ, 2020. – 13 с.

34. ГОСТ Р 53117-2008. Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия. – Введ. 2010-01-01. – М.: Стандартинформ, 2009. – 15 с.

35. ГОСТ Р 7.0.11-2011. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления. – Введ. 13.12.2011. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 12 с.

36. Гродзенский С.Я. Об одном способе сравнения эффективности параметрических и непараметрических критериев оценки показателей надежности / С.Я. Гродзенский, Т.А. Демина // Метрология. – 2008. – № 6. – С. 3–7.

37. Департамент аграрной политики Воронежской области [Электронный ресурс]. – URL: <https://apk.govvrn.ru/>.

38. Дидманидзе Р.Н. Повышение эффективности транспортных процессов в сельском хозяйстве / Р.Н. Дидманидзе, Н.А. Майстренко, Д.Ю. Фролова // Чтения академика В.Н. Болтинского: сборник статей, г. Москва, 22–23 января 2025 года. – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2025. – С. 170–181.

39. Догановский А.М. Механизация внесения удобрений / А.М. Догановский, В.И. Козловский. – 2-е изд. – Л.: Колос, 1976. – 320 с.

40. Дьячков А.П. Анализ факторов, влияющих на выбор состава линии внесения дефеката / А.П. Дьячков, Н.П. Колесников, К.В. Барыкин // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции, г. Воронеж, 20 июня 2025 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2025. – С. 237–241.

41. Дьячков А.П. К вопросу определения оптимальной грузоподъемности прицепа-перегрузчика при уборке корнеплодов сахарной свеклы / А.П. Дьячков, Н.П. Колесников, А.Д. Бровченко, Д.А. Нестеренко // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе: материалы международной научно-практической конференции, г. Воронеж, 23 мая 2023 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 78–84.

42. Дьячков А.П. Обоснование грузоподъемности разбрасывателя при внесении навоза по перегрузочной технологии / А.П. Дьячков, Е.А. Фонов, Н.А. Борзаков // Инженерное обеспечение качества и надежности технологических процессов в растениеводстве: сборник научных трудов / Воронежский СХИ. – Воронеж, 1989. – С.45–50.

43. Дьячков А.П. Определение оптимальной грузоподъемности прицепа-перегрузчика дефеката / А.П. Дьячков, Н.П. Колесников, К.В. Барыкин // Вестник НГИЭИ. – 2024. – № 7(158). – С. 18–27.

44. Дьячков А.П. Технология транспортно-распределительного процесса внесения навоза с использованием автономного перегрузчика: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Дьячков Анатолий Петрович. – Воронеж, 1984. – 227 с.

45. Житников В.П. Оценка достоверности численных результатов при наличии нескольких методов решения задачи / В.П. Житников, Н.М. Шерыхалина // Вычислительные технологии. – 1999. – Т. 4, № 6. – С. 77–87.

46. Завалишин Ф.С. Методы исследований по механизации сельскохозяйственного производства / Ф.С. Завалишин, М.Г. Мацнев. – М.: Колос, 1982. – 231 с.

47. Иванов А.С. Использование цифровых технологий при внесении удобрений / А.С. Иванов, А.А. Пахомкин, А.А. Сиднев // Перспективная техника и технологии в АПК: материалы международной научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов, посвященной 100-летию со дня рождения С.С. Селицкого, г. Минск, 11–20 апреля 2022 г. – Минск: Белорусский государственный аграрный технический университет, 2022. – С. 32–35.

48. Иванов В.Н. Состояние и перспективы развития АПК России на период до 2030 года / В.Н. Иванов, С.Н. Серегин // Сахарная свекла. – 2018. – № 8. – С. 2–7.

49. Ивченко В.Н. Беспросыпные ленточные конвейеры / В.Н. Ивченко, С.В. Куров // Горная промышленность. – 2005. – № 4(62). – С. 39–42.

50. Измайлов А.Ю. Развитие транспортной и погрузочно-разгрузочной техники в сельском хозяйстве / А.Ю. Измайлов, Н.Е. Евтюшенков, А.Ю. Васильев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2010. – № 2. – С. 14–18.

51. Измайлов А.Ю. Состояние и перспективы механизации применения органических удобрений / А.Ю. Измайлов, Н.М. Марченко, Г.И. Личман // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2008. – № 1. – С. 21–24.

52. Имитационная модель процесса подбора и прессования травяной массы в рулоны / И.А. Орлянская, А.В. Орлянский, А.Н. Петенев, В.Ю. Гальков // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: сборник научных

статей XII международной научно-практической конференции в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал-2016», г. Ставрополь, 30 марта – 01 июня 2016 г. – Ставрополь: Издательство «АГРУС», 2016. – С. 236–239.

53. Интернет-магазин сельхозтехники «Коблик» [Электронный ресурс]. – URL: <https://koblik.ru/>.

54. Использование бункеров-перегрузчиков при уборке зерновых культур / Е. Е. Подольская, Е. В. Бондаренко, В. Е. Таркинский, С. А. Свиридова // Техника и оборудование для села. – 2022. – № 10(304). – С. 18-20. – DOI 10.33267/2072-9642-2022-10-18-20.

55. Исследования угла естественного откоса компонентов зерносмеси / Н.П. Тишанинов, А.В. Анашкин, К.Н. Тишанинов, Х.Д. Альшинаинин // Наука в центральной России. – 2020. – № 5. – С. 31–41.

56. Капустин В.П. Органические удобрения и урожайность сельскохозяйственных культур / В.П. Капустин, А.В. Брусенков // Техника и технологии в животноводстве. – 2020. – № 2(38). – С. 86–89.

57. Каталог техники Гритан [Электронный ресурс]. – URL: <https://gritan.com/sveklovichnaya-tehnika>.

58. Каталог техники Лилиани [Электронный ресурс]. – URL: 64. <https://liliani.ru/catalog/bunkery-peregruzchiki>.

59. К вопросу о разработке комбинированного рабочего органа разбрасывателя СТТ-25 / Э.В. Дыба, В.В. Микульский, Л.И. Трофимович, А.И. Пунько // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 1. – С. 147–151.

60. К вопросу уплотнения поверхности поля разбрасывателями удобрений разной грузоподъемности / К.В. Барыкин, А.П. Дьячков, Н.П. Колесников, С.С. Мешкова // Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК: материалы XI национальной научно-практической конференции с международным участием, г. Иркутск, 03–04 октября 2024 г. – Иркутск: Иркутский ГАУ. – 2024. – С. 25–31.

61. Киселев Б.Р. Ленточный конвейер. Расчет и проектирование основных узлов / Б.Р. Киселев, М.Ю. Колобов. – Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2019. – 179 с.

62. Колесников Н.П. Определение рационального состава звеньев производственной линии внесения дефеката / Н.П. Колесников, А.П. Дьячков, В.И. Глазков // Новые разработки технологий и технических средств механизации сельского хозяйства: сборник научных трудов. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2004. – С. 216–222.

63. Колесников Н.П. Совершенствование технологии и технических средств внесения дефекта за счет выбора их рациональных параметров: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Колесников Николай Петрович. – Воронеж, 2004. – 239 с.

64. Колупаев С.В. Внутрихозяйственная логистика сельскохозяйственной продукции / С.В. Колупаев, А.С. Колотов, А.И. Ушанев // Современное состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса Российской Федерации: материалы международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Александра Алексеевича Сорокина, г. Рязань, 24 января 2024 г. – Рязань: РГАТУ, 2024. – С. 324–330.

65. Конструкция, теория и расчет рабочих органов сельскохозяйственных машин / К.Р. Казаров, А.П. Тарасенко, В.В. Василенко и др. – Воронеж : ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2008. – 80 с.

66. Леготин А.Б. Исследование асинхронного двигателя с питанием от преобразователя частоты мощностью 3,8 кВт / А.Б. Леготин, В.Н. Суворов // Общество. Наука. Инновации (НПК-2023): сборник материалов XXIII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, приуроченной к 60-летию ВятГУ, г. Киров, 12–22 июня 2023 года. – Киров: Вятский государственный университет, 2023. Том 2. – С. 35–39.

67. Ленточкин А.М. Этапы и методология научных исследований в агрономии / А.М. Ленточкин // Пермский аграрный вестник. – 2018. – № 2(22). – С. 65–70.

68. Литвин Д.Б. Интерполяция и аппроксимация данных в Matlab / Д.Б. Литвин, А.А. Яновский, З.Г. Донец // Информационные системы и технологии как фактор развития экономики региона: II международная научно-практическая конференция, г. Ставрополь, 12–13 декабря 2013 г. – Ставрополь: Издательство «АГРУС», 2013. – С. 97–99.

69. Личман Г.И. Дифференцированное внесение комплексных удобрений / Г.И. Личман, В.А. Батулин, А.Н. Марченко // Научные труды ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии. – 2011. – Т. 22, № 4(4). – С. 10–15.

70. Личман Г.И. Механика и технологические процессы применения органических удобрений / Г.И. Личман, Н.М. Марченко. – М., 2001. – 335 с.

71. Личман Г.И. Научно-технические решения проблемы повышения эффективности машинных технологий применения органических удобрений: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.20.01 / Личман Геннадий Иванович. – М., 1999. – 416 с.

72. Лунякин Н.В. Оптимизация уборочно-транспортного процесса уборки зерновых культур с использованием передвижного перегрузчика: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Н.В. Лунякин. – М., 2004. – 25 с.

73. Мартынов В.Г. Применение методов математического моделирования при анализе технологических процессов / В.Г. Мартынов // Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития: сборник материалов Всероссийской молодежной научной конференции, г. Саратов, 24–26 июня 2014 г. – Саратов: ИЦ «Наука», 2014. – С. 413–415.

74. Марченко Н.М. Механизация внесения удобрений / Н.М. Марченко, Г.И. Личман // ВИМ: история механизации (1930–2005 годы). – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 2005. – С. 207–221.

75. Марченко Н.М. Технологические и научно-технические решения проблемы рационального применения органических удобрений в условиях интен-

сивного земледелия: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.20.01 / Н.М. Марченко. – М., 1991. – 67 с.

76. Матюк Н.С. Изменение агрофизических свойств почвы под действием приемов обработки и удобрений / Н.С. Матюк, В.Д. Полин, В.А. Николаев // Владимирский земледелец. – 2015. – № 2(72). – С. 12–14.

77. Мащенко А.А. О проблеме уплотнения почвы движителями современных тракторов / А.А. Мащенко, Ю.А. Мащенко, А.И. Бобровник // Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития: доклады международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения д-ра техн. наук, проф. Скотникова В.А., г. Минск, 11–14 февраля 2009 г. – Минск: БГАТУ, 2009. – С. 452–457.

78. Михайленко П.А. Общая имитационная модель технологического процесса уборки зерновых колосовых культур / П.А. Михайленко, А.В. Орлянский, И.А. Орлянская // Научно-технический прогресс в АПК: проблемы и перспективы: международная научно-практическая конференция, в рамках XVIII международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал-2016», г. Ставрополь, 30 марта – 01 июня 2016 г. – Ставрополь: Издательство «АГРУС», 2016. – С. 222–226.

79. Михайлов Е.М. Уточнения для формулы интерполяции данных, заданных средними значениями / Е.М. Михайлов // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XI международной научно-методической конференции, г. Воронеж, 10–11 февраля 2011 г. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2011. – Том 2. – С. 42–44.

80. Монастырский В.Ф. Особенности проектирования перегрузочных узлов ленточных конвейеров / В.Ф. Монастырский, Р.В. Кирия // Горный журнал. – 2003. – № 11. – С. 53–57.

81. Нечитайло Н.М. Задачи транспортного типа по критерию времени с учетом характеристик применяемых транспортных средств / Н.М. Нечитайло // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19, № 3(94). – С. 74–80.

82. Новиков В.И. Экономическая оценка результатов сравнительных испытаний рыхлителя РПР-1,5 / В.И. Новиков, Е.В. Злобин, Е.Е. Бичева // Кооперация, интеграция и управление в АПК: материалы научно-практической конференции. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2000. – С. 230–233.

83. Новиков О.А. Прикладные вопросы теории массового обслуживания / О.А. Новиков, С.И. Петухов; под редакцией академика АН УССР Б.В. Гнеденко. – М.: Советское радио, 1969. – 406 с.

84. Новое в операционной технологии внесения дефеката / А.П. Дьячков, Н.П. Колесников, К.В. Барыкин, Д.А. Нестеренко // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной научно-практической конференции, г. Воронеж, 12 февраля 2024 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 369–374.

85. Нормативно-справочные материалы по планированию механизированных работ в сельскохозяйственном производстве. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 316 с.

86. Нормы расхода топлива и смазочных материалов на автомобильном транспорте (Р3112299-0295-93). – М.: Ось-89, 1996. – 48 с.

87. Оборовская А.С. Основные ранговые коэффициенты корреляции в прикладных задачах / А.С. Оборовская // Труды семинара по геометрии и математическому моделированию. – 2023. – № 9. – С. 140–146.

88. Об уплотнении почвы сельскохозяйственными машинами при внесении дефеката / К.В. Барыкин, А.П. Дьячков, Н.П. Колесников, С.А. Фролов // Проблемы ресурсобеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы международной научно-практической конференции, г. Воронеж, 25 сентября 2024 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 67–72.

89. Об утверждении требований к обращению побочных продуктов животноводства: постановление Правительства РФ от 31 октября 2022 г. № 1940 // Собрание законодательства РФ. – 2022. – № 44 (часть I). – Ст. 7693.

90. Оптимизация работоспособности транспортной системы на основе

имитационного моделирования / С.В. Палочкин, В.С. Сыромятников, Х.М. Гарсия и др. // Автоматизация и современные технологии. – 2011. № 8. – С. 20–27.

91. Орлов А.И. Прикладной статистический анализ / А.И. Орлов. – М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. – 812 с.

92. Официальный сайт Амкодор-Центр [Электронный ресурс]. – URL: <https://amkodor-centr.ru/>.

93. Официальный сайт ОАО «Бобруйскагромаш» [Электронный ресурс]. – URL: <https://bobruiskagromach.com/>.

94. Официальный сайт ПК «ЯрАгро» [Электронный ресурс]. – URL: <https://pkyar.ru/>.

95. Официальный сайт ПТЗ [Электронный ресурс]. – URL: <https://kirovets-ptz.com/>.

96. Официальный сайт Союза «БелАгро» [Электронный ресурс]. – URL: <https://souzbelagro.ru/>.

97. Охрана окружающей среды в условиях интенсификации сельскохозяйственного производства / С.С. Позняк, Ч.А. Романовский, А.С. Калинович и др. // Экологический вестник. – 2009. – № 3. – С. 128–137.

98. Патент № 2832329 U1 Российская Федерация, МПК A01C 3/06, A01C 3/08, A01C 15/00. Способ внесения твердых органических удобрений и дефеката / К.В. Барыкин, А.П. Дьячков, Н.П. Колесников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2023123319, заявл. 25.09.2023, опубл. 23.12.2024; бюл. № 36. – 7 с.

99. Погребняк М.А. Оценка параметров в модели транспортного потока / М.А. Погребняк // Математическое моделирование. – 2024. – Т. 36, № 1. – С. 131–140.

100. Поливаев О.И. Тракторы и автомобили / О.И. Поливаев, В.П. Гребнев. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2000. – 164 с.

101. Попов А.А. Определение оптимального числа транспортных средств в уборочно-транспортном комплексе / А.А. Попов, И.В. Бумбар // Дальневосточный аграрный вестник. – 2021. – № 3(59). – С. 99–105.

102. Рекомендации по регулированию реакции среды черноземных почв в Воронежской области / Каменная Степь: ФГБНУ «НИИСХ ЦЧП», 2019. – 21 с.
103. Садомина С.Р. Хронометраж как метод исследования затрат рабочего времени / С.Р. Садомина // Молодой ученый. – 2024. – № 1(500). – С. 203–204.
104. Семакин М.С. Вертикальный ленточный конвейер для крупнокускового насыпного материала / М.С. Семакин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 11. – С. 168–170.
105. Середкин Д.Ю. Влияние частотного пуска асинхронного двигателя на падение напряжения и потери электроэнергии в системах собственных нужд электрических станций / Д.Ю. Середкин, А.А. Купчинов // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: материалы VIII международной научно-технической конференции, г. Самара, 02–06 октября 2017 г. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. – Том 3. – С. 292–295.
106. Скурятин Н.Ф. Методы эффективного использования транспортно-распределительных средств на внесении удобрений: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.20.01 / Скурятин Николай Филиппович. – Л., 1992. – 39 с.
107. Сметнев А.С. Методы интенсификации транспортно-технологических процессов в сельскохозяйственном производстве / А.С. Сметнев, А.В. Ферябков, Ю.Б. Юдин // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. – 2016. – № 22(27). – С. 25–31.
108. Совершенствование транспортно-технологического процесса внесения твердого навоза / А.П. Дьячков, Т.А. Трофимова, Н.П. Колесников и др. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2017. – № 4(55). – С. 133–133.
109. Спивак А.И. Гидравлика и гидропневмопривод мобильных машин / А.И. Спивак. – 3-е изд., перераб. и доп. – С-Пб.: Лань, 2022. – 320 с.
110. Спиваковский А.О. Транспортирующие машины / А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 503 с.
111. Справочник по планированию агропромышленного производства.

Часть 1 / А.С. Алексеенко, А.В. Саввин, Л.Г. Шустова; под ред. д.э.н., проф. К.С. Терновых. – Воронеж: Изд-во «Истоки», 2003. – 224 с.

112. Современные машины для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений / Е. В. Бондаренко, Е. Е. Подольская, В. Е. Таркинский, // АгроФорум. – 2022. – № 1. – С. 60-63. – DOI 10.24412/cl-34984-2022-1-60-63.

113. Страница ЧКЗ-Агро на сайте ОАО «Челябинский кузнечно-прессовый завод» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.chkz.ru/partnery/chkz-agro/>.

114. Тарасов С.И. Влияние интенсивного применения органических удобрений на плодородие почв в хозяйствах индустриального животноводства / С.И. Тарасов, И.А. Архипченко // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2017. – № 3(27). – С. 169–176.

115. Тарасов Ю.Д. Повышение тягового усилия ленточных конвейеров с увеличенными длинами, углами наклона и производительностью / Ю.Д. Тарасов // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 5. – С. 46–48.

116. Тарасов Ю.Д. Расчет и выбор параметров вертикального ленточного конвейера / Ю.Д. Тарасов // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 1. – С. 13–16.

117. Теоретическая траектория движения колесного трактора при повороте / А.Н. Беляев, В.И. Оробинский, Т.В. Тришина, И.А. Высоцкая // Наука в центральной России. – 2025. – № 3(75). – С. 102–111.

118. Техническое обеспечение производства продукции растениеводства / А.В. Новиков, И.Н. Шило, Т.А. Непарко и др.; под ред. А.В. Новикова. – Мн.; М.: Новое знание; ИНФРА-М, 2012. – 512 с.

119. Техническое описание перегрузчика модели CropShuttle [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cropshuttle.com/products/>.

120. Технология и технические средства для внесения органических удобрений / Н.М. Марченко и др. – М.: Росагропромиздат, 1991. – 190 с.

121. Тишанинов Н.П. Результаты исследований коэффициента силы трения покоя зерновых материалов / Н.П. Тишанинов, А.В. Анашкин // Инженерные

технологии для устойчивого развития и интеграции науки, производства и образования: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Ассоциации «Объединенный университет имени В.И. Вернадского» в 4-х т., г. Тамбов, 29–31 мая 2019 г. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – Том II. – С. 105–109.

122. Тонар [Электронный ресурс]. – URL: <https://tonar.info/news/traktornyy-pritsep-peregruzchik-dlya-korneplodov-t>.

123. Харлашин А.В. Комбинированная машина для внесения навоза / А.В. Харлашин, А.А. Шитенков // Перспективные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей международной научной конференции, г. Санкт-Петербург, 10 января 2023 г. – С-Пб.: ООО «Международный институт перспективных исследований имени М.В. Ломоносова», 2023. – С. 61–63.

124. Чебан А.Ю. Перегрузочный пункт для комбинированного транспорта / А.Ю. Чебан, А.А. Соболев, С.И. Корнеева // Механики XXI века. – 2017. – № 16. – С. 361–364.

125. Шебалкин А.Е. Подготовка и внесение твердых органических удобрений / А.Е. Шебалкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2000. – № 6. – С. 11–13.

126. Шило И.Н. Интенсификация процесса уплотнения почвы и выравнивания ее поверхности / И.Н. Шило, В.А. Агейчик, Н.Н. Романюк // Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития: доклады международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения д-ра техн. наук, проф. Скотникова В.А., г. Минск, 11–14 февраля 2009 г. – Минск: БГАТУ, 2009. – С. 425–428.

127. Шишкин А.Ф. Новые известковые удобрения: эффективность и безопасность применения / А.Ф. Шишкин. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2001. – 316 с.

128. Шкляев С.Э. Математическое моделирование технологических процессов / С.Э. Шкляев, Л.Н. Маркова // Тяжелое машиностроение. – 2009. – № 8.

– С. 20–23.

129. Шляхтин С.А. Сокращение потерь в электродвигатели при частотном регулировании за счет корректировки закона регулирования преобразователя / С.А. Шляхтин // Сервис в России и за рубежом. – 2009. – № 2(12). – С. 137–140.

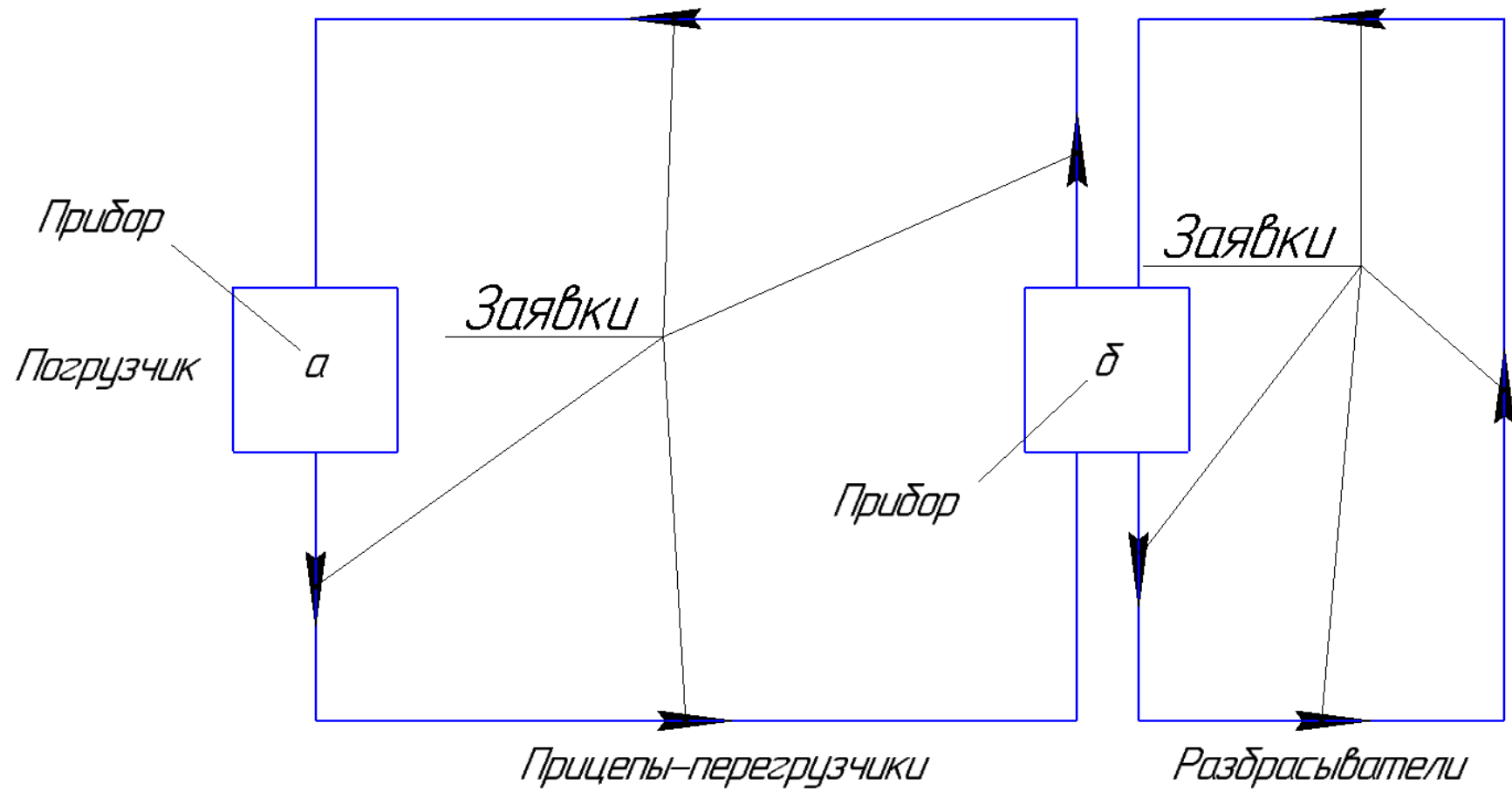
130. Эксплуатация машинно-тракторного парка / А.П. Ляхов и др.; под ред. Ю.В. Будько. – Минск: Ураджай, 1991. – 336 с.

131. Engel R. Soil Acidification: Remediation with Sugar Beet Lime / R. Engel, C. Jones, R. Wallander // Montana Fertilizer Effects. – Bozeman: Montana State University, 2020. – 3 p.

132. FAO Statistical Database: Fertilizer use by crop [Electronic resource]. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. – 2022. – Access mode: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/EF>.

133. Monitoring and predicting manure application rates using precision conservation technology / P.E. Cabot, F.J. Pierce, P. Nowak, K.G. Karthikeyan // Journal of Soil and Water Conservation. – 2006. – № 61(5). – P. 282–292.

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
Двухфазная система замкнутого типа



$a$  – погрузчик (прибор);  
 $б$  – выгрузное устройство прицепа-перегрузчика (прибор), прицепы-перегрузчики и разбрасыватели (заявки)

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Гистограммы распределения временных интервалов

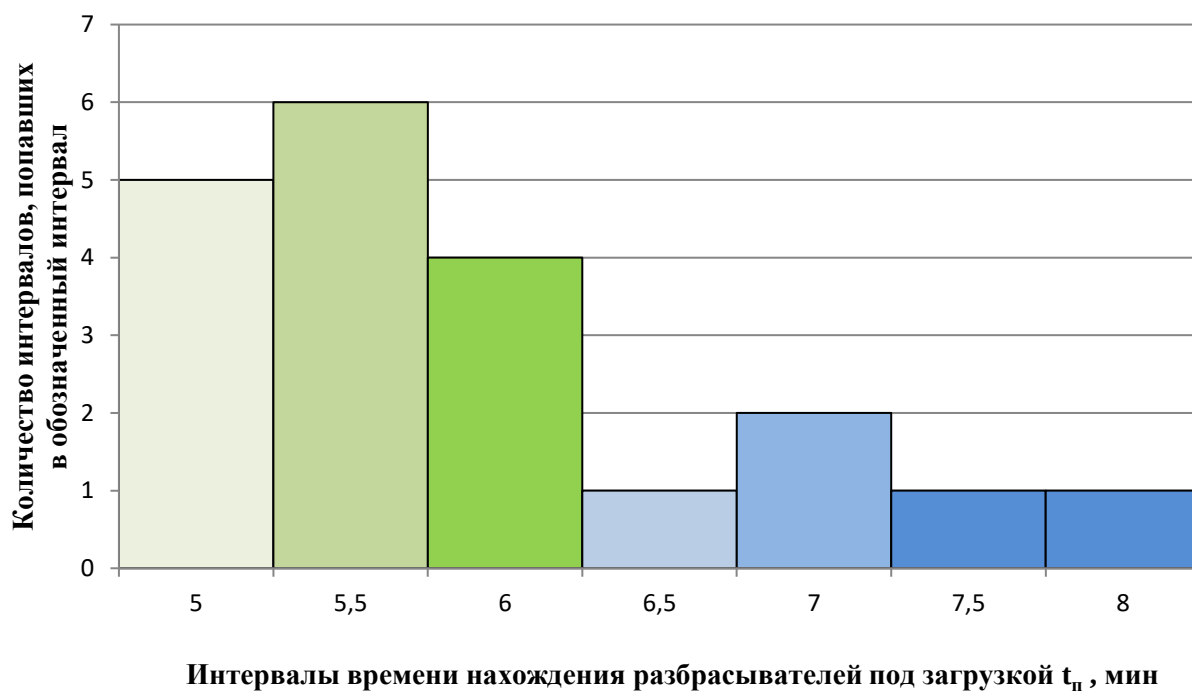


Рисунок Б.1 – Распределение временных интервалов нахождения разбрасывателей под загрузкой

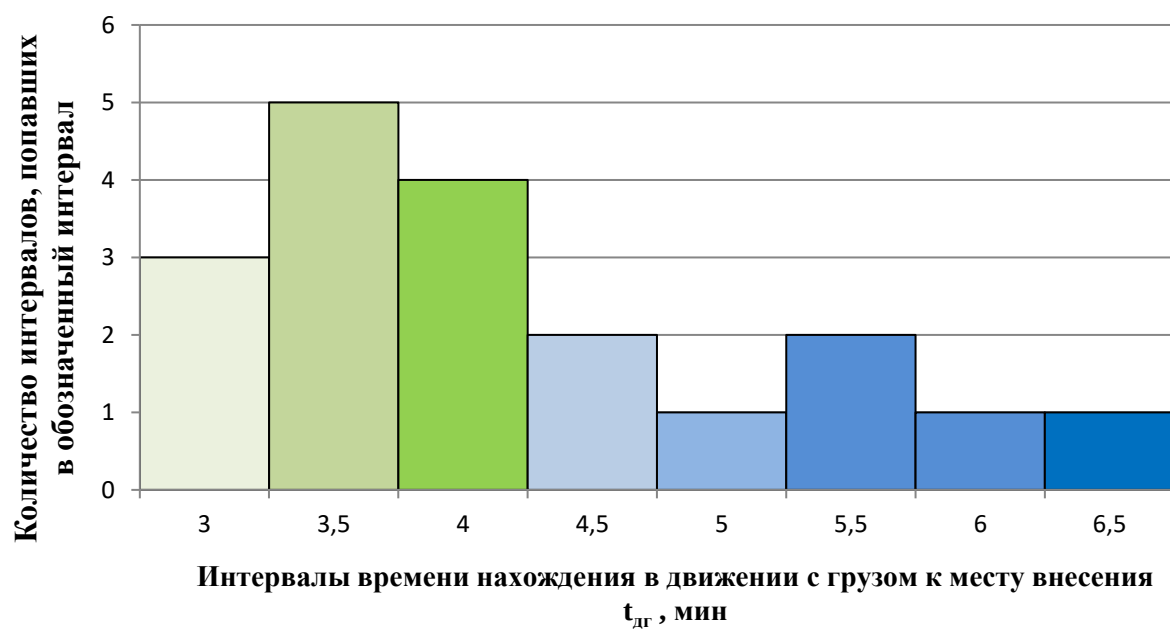


Рисунок Б.2 – Распределение временных интервалов нахождения разбрасывателей в движении с грузом к месту внесения

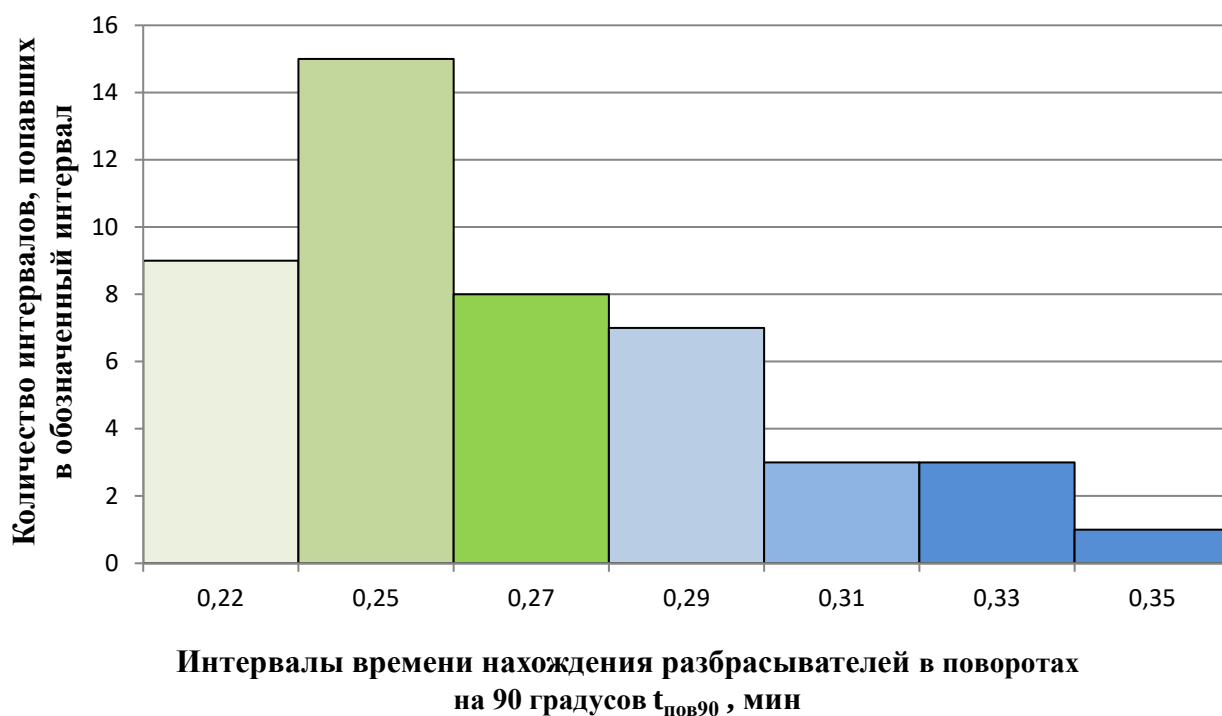


Рисунок Б.3 – Распределение временных интервалов нахождения разбрасывателей в поворотах на 90 градусов

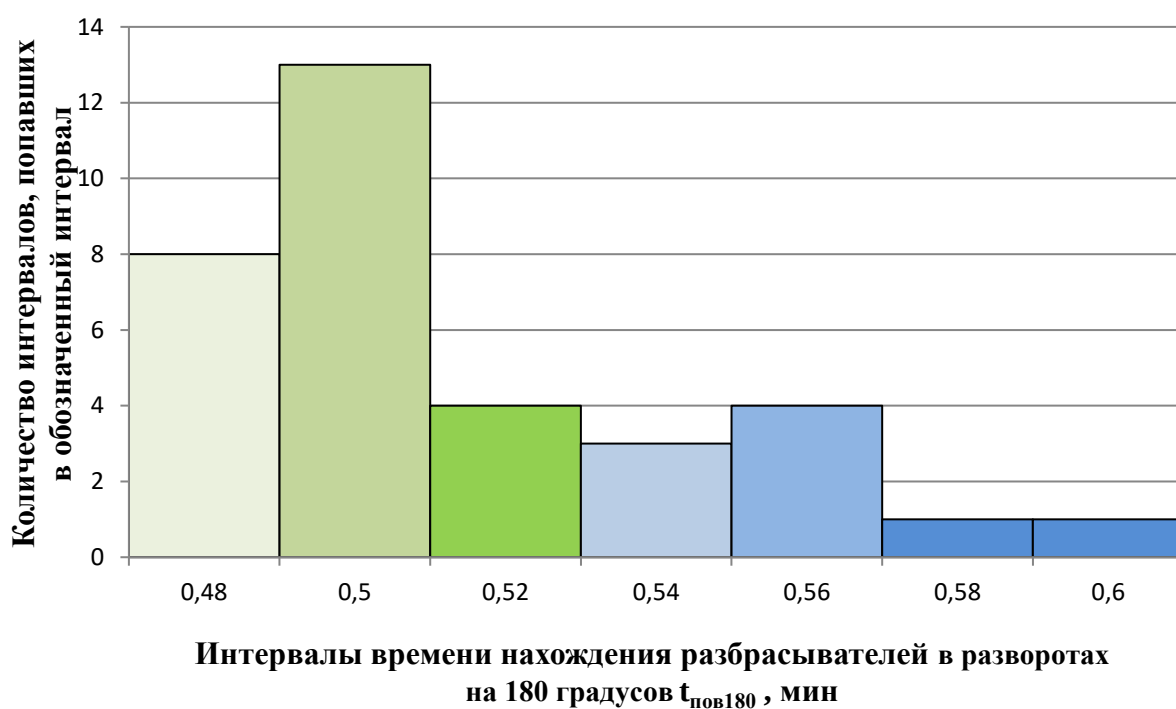


Рисунок Б.4 – Распределение временных интервалов нахождения разбрасывателей в разворотах на 180 градусов

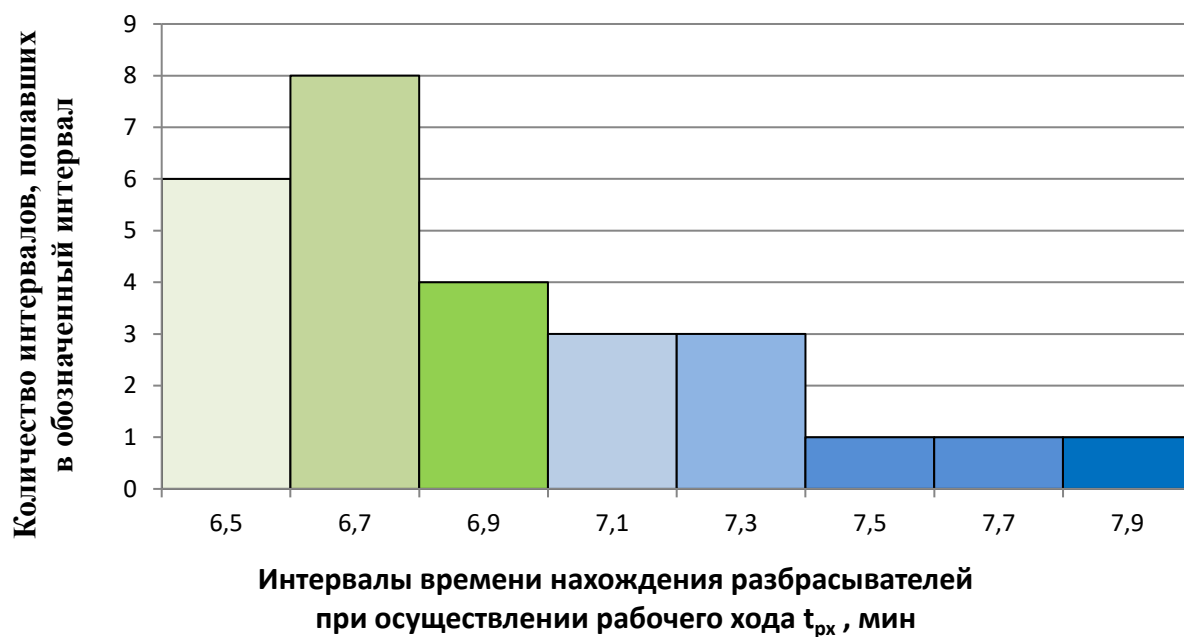


Рисунок Б.5 – Распределение временных интервалов нахождения разбрасывателей при осуществлении рабочего хода

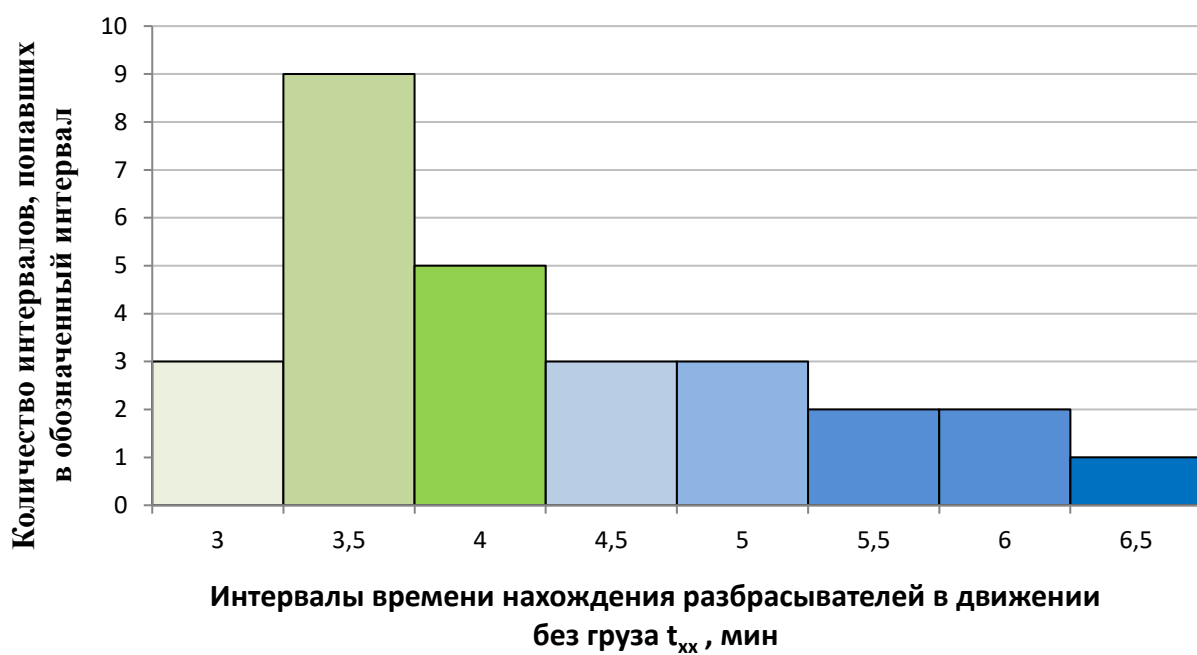


Рисунок Б.6 – Распределение временных интервалов нахождения разбрасывателей в движении без груза

ПРИЛОЖЕНИЕ В  
Результаты исследований

Таблица В.1 – Рациональная грузоподъемность  $\omega_{\text{опт}}$  и удельная производительность  $\omega_{\text{уд}}$  для разных моделей тракторов

| Модели тракторов          | Показатели                      |                                                           |
|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                           | $\omega_{\text{опт}}, \text{т}$ | $\omega_{\text{уд}}, \text{га}/(\text{т} \cdot \text{ч})$ |
| При дозе внесения 10 т/га |                                 |                                                           |
| Беларус-82.1              | 4,1                             | 1,41                                                      |
| Беларус-1523              | 6,2                             | 1,03                                                      |
| БТЗ-245К                  | 8,2                             | 0,76                                                      |
| БТЗ-254                   | 8,3                             | 0,75                                                      |
| John Deere-8410           | 7,2                             | 0,92                                                      |
| К-744Р2                   | 12,3                            | 0,48                                                      |
| При дозе внесения 25 т/га |                                 |                                                           |
| Беларус-82.1              | 6,1                             | 0,81                                                      |
| Беларус-1523              | 8,1                             | 0,59                                                      |
| БТЗ-245К                  | 10,7                            | 0,44                                                      |
| БТЗ-254                   | 10,8                            | 0,43                                                      |
| John Deere-8410           | 9,4                             | 0,51                                                      |
| К-744Р2                   | 16                              | 0,29                                                      |
| При дозе внесения 40 т/га |                                 |                                                           |
| Беларус-82.1              | 6,4                             | 0,55                                                      |
| Беларус-1523              | 8,7                             | 0,4                                                       |
| БТЗ-245К                  | 11,5                            | 0,3                                                       |
| БТЗ-254                   | 11,6                            | 0,3                                                       |
| John Deere-8410           | 10                              | 0,34                                                      |
| К-744Р2                   | 17,2                            | 0,2                                                       |
| При дозе внесения 55 т/га |                                 |                                                           |
| Беларус-82.1              | 6,3                             | 0,39                                                      |
| Беларус-1523              | 8,5                             | 0,28                                                      |
| БТЗ-245К                  | 11,2                            | 0,21                                                      |
| БТЗ-254                   | 11,3                            | 0,21                                                      |
| John Deere-8410           | 9,8                             | 0,24                                                      |
| К-744Р2                   | 16,8                            | 0,14                                                      |

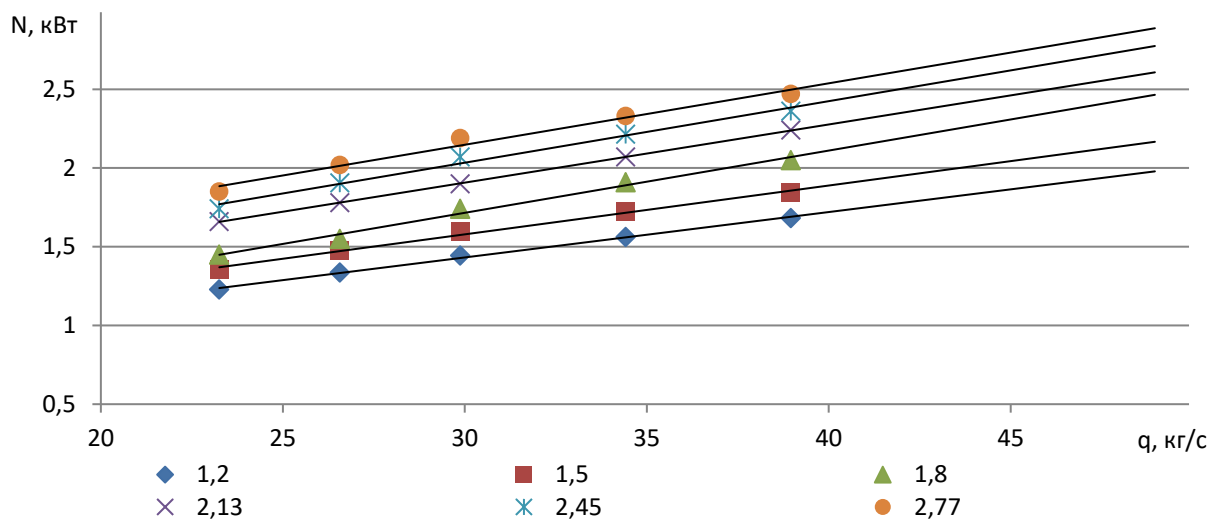


Рисунок В.1 – Графики зависимости затрат мощности  $N$  от секундной подачи  $q$  при разных скоростях движения транспортной ленты  $v_{тр}$  для материала плотностью 800 кг/м<sup>3</sup>

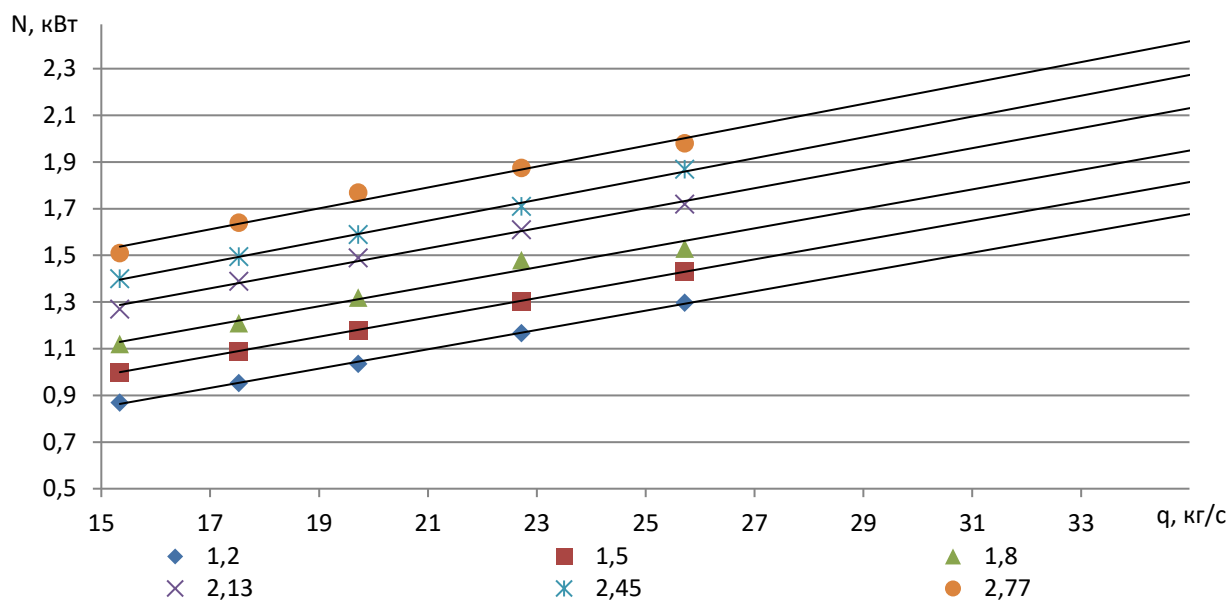


Рисунок В.2 – Графики зависимости затрат мощности  $N$  от секундной подачи  $q$  при разных скоростях движения транспортной ленты  $v_{тр}$  для материала плотностью 450 кг/м<sup>3</sup>

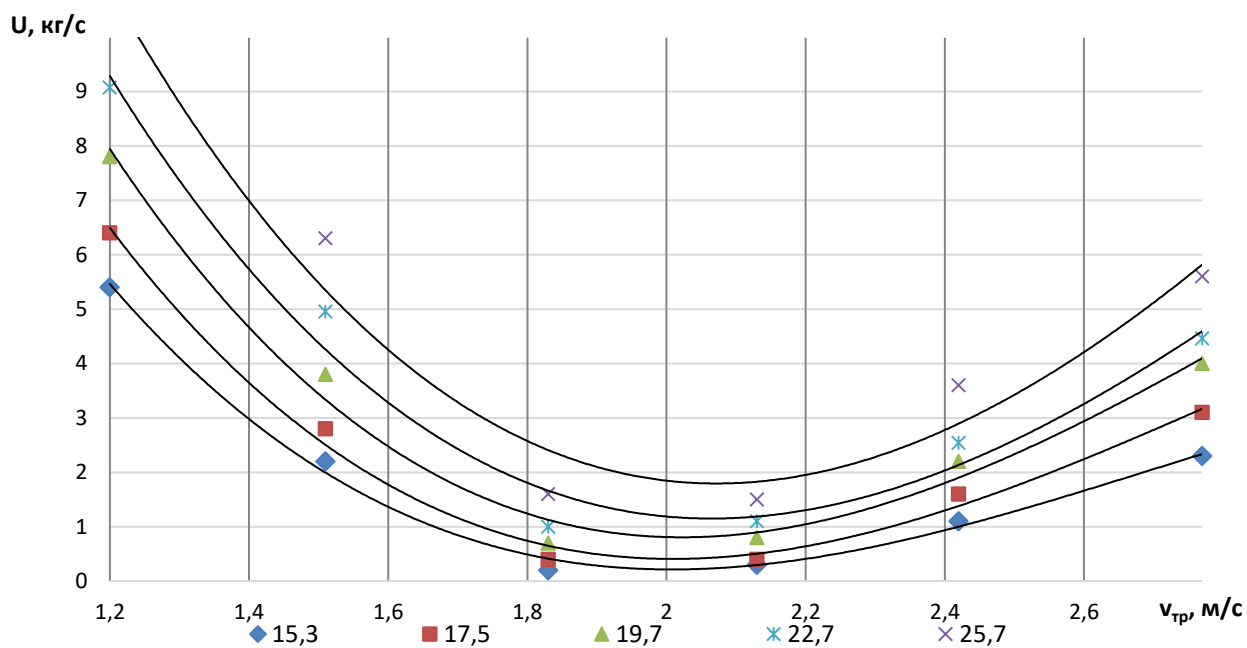


Рисунок В.3 – Графики зависимости просыпаемости  $U$  для разных подач  $q_{гр}$  от изменения скорости транспортной ленты  $v_{тр}$  при угле  $25$  градусов для материала плотностью  $450 \text{ кг/м}^3$

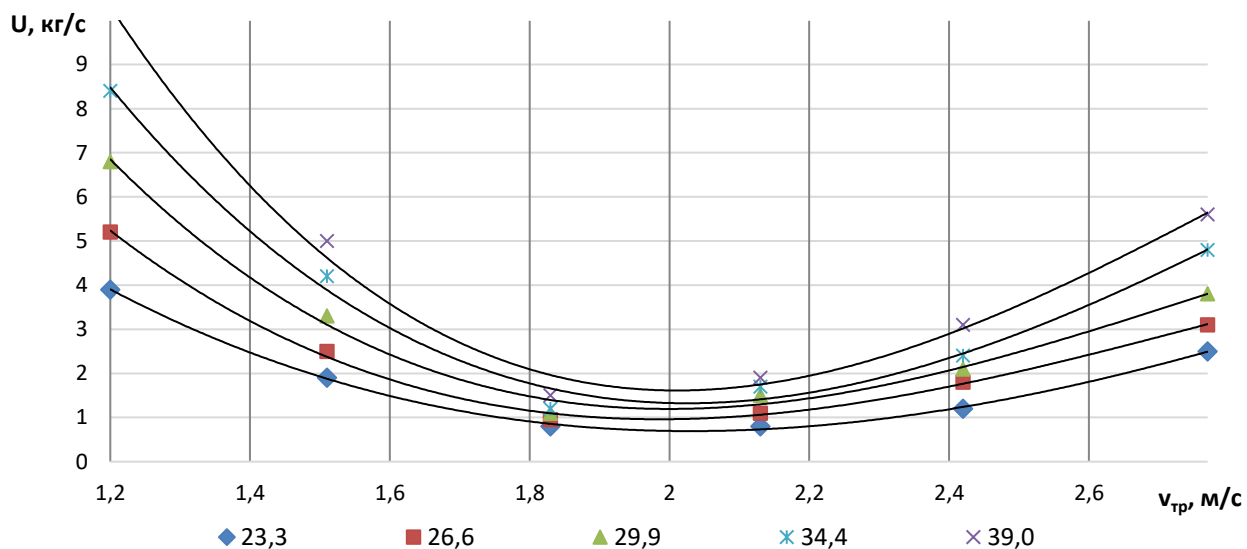


Рисунок В.4 – Графики зависимости просыпаемости  $U$  для разных подач  $q_{гр}$  от изменения скорости транспортной ленты  $v_{тр}$  при угле  $25$  градусов для материала плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$

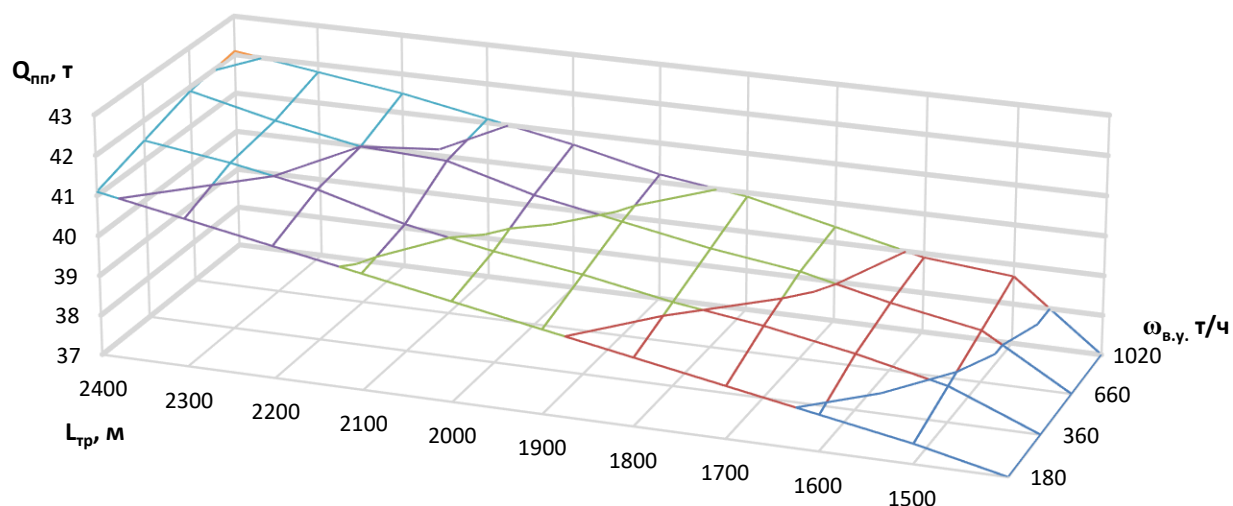


Рисунок В.5 – Поверхность рациональной грузоподъемности прицепа-перегрузчика  $Q_{пп}$  в зависимости от расстояния транспортировки  $L_{тр}$  и производительности выгрузного устройства  $\omega_{в.у.}$  при использовании трактора К-744Р2

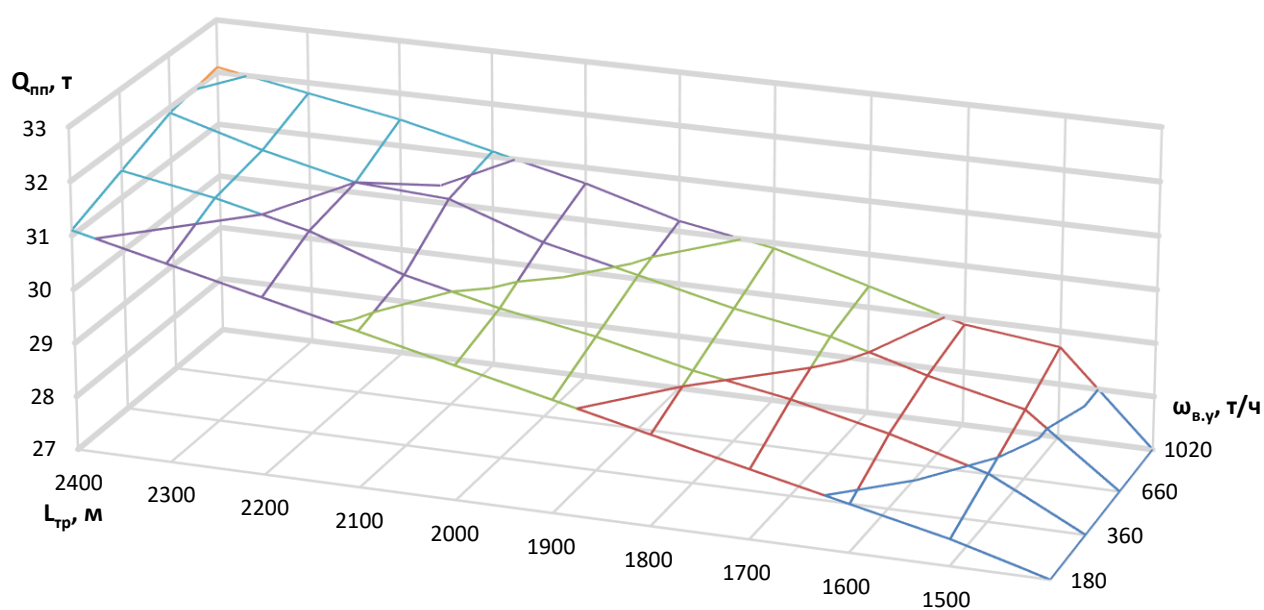


Рисунок В.6 – Поверхность рациональной грузоподъемности прицепа-перегрузчика  $Q_{пп}$  в зависимости от расстояния транспортировки  $L_{тр}$  и производительности выгрузного устройства  $\omega_{в.у.}$  при использовании трактора John Deer 8420

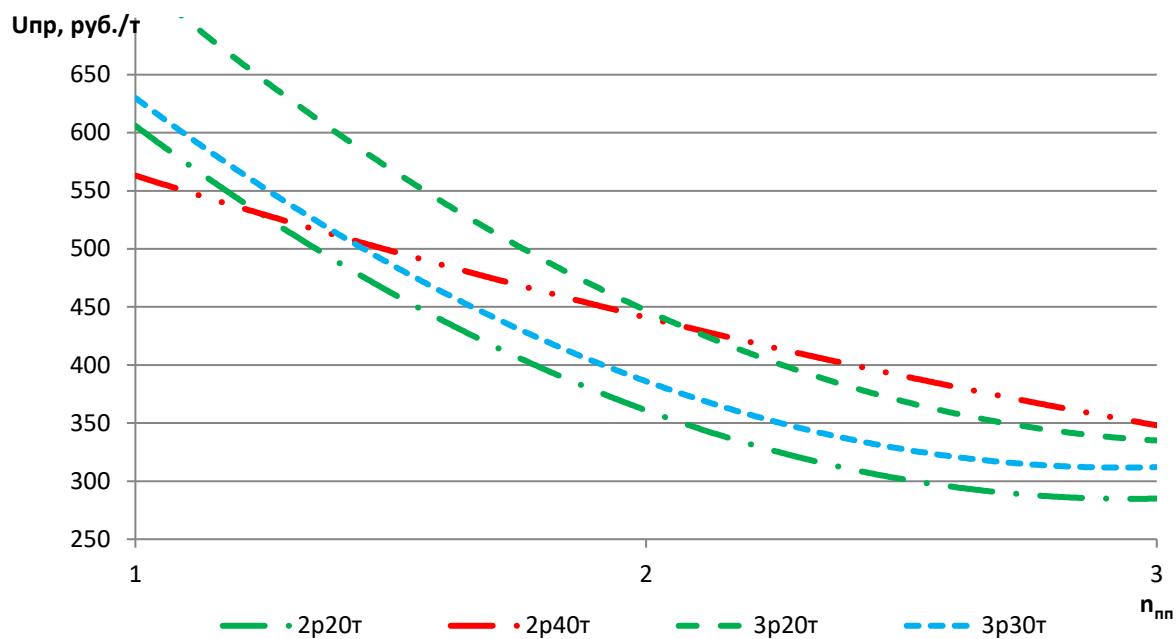


Рисунок В.7 – Графики зависимости удельных затрат на внесенную тонну материала  $U_{пр}$  при дозе внесения 10 т/га от количества разбрасывателей, количества и грузоподъемности прицепов-перегрузчиков в линии внесения

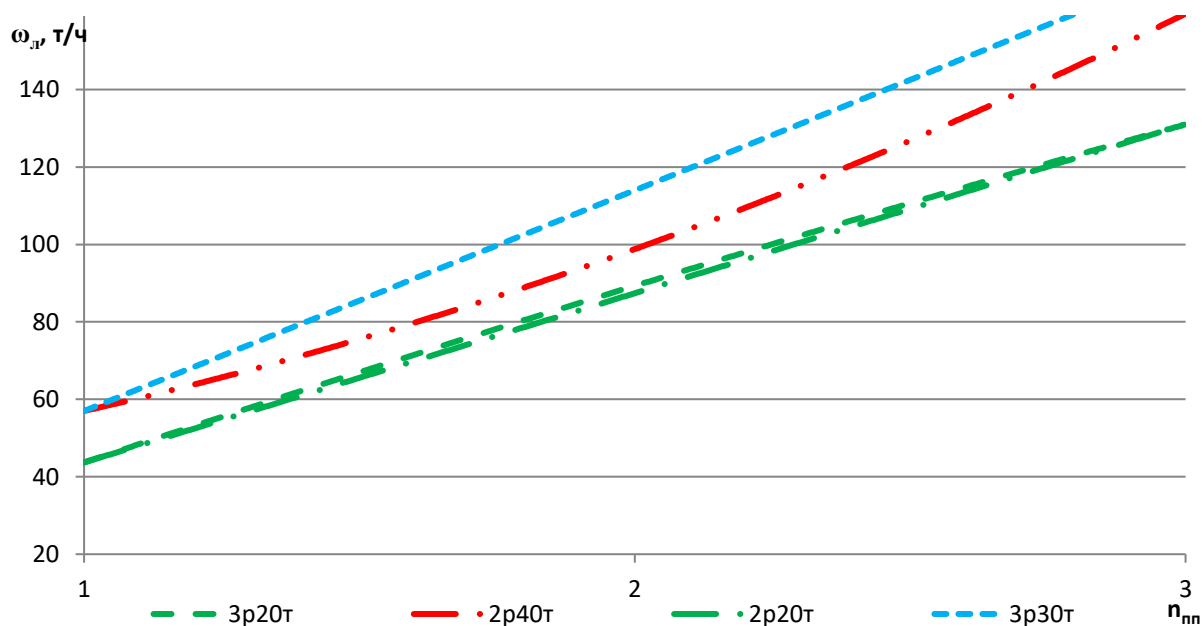


Рисунок В.8 – Графики зависимости производительности линии внесения  $\omega_{л}$  при дозе внесения 10 т/га от количества разбрасывателей, количества и грузоподъемности прицепов-перегрузчиков в линии внесения

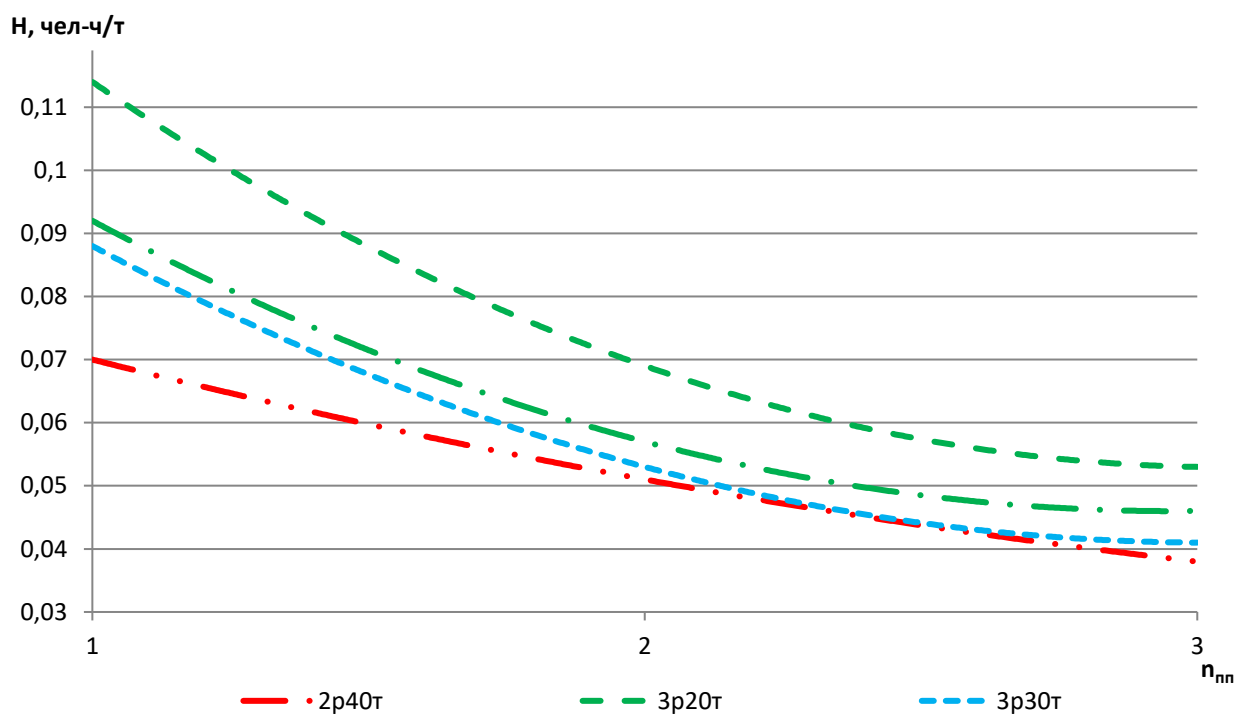


Рисунок В.9 – Графики зависимости удельных затрат труда на внесенную тонну материала  $H$  при дозе внесения 10 т/га от количества разбрасывателей, количества и грузоподъемности прицепов-перегрузчиков в линии внесения

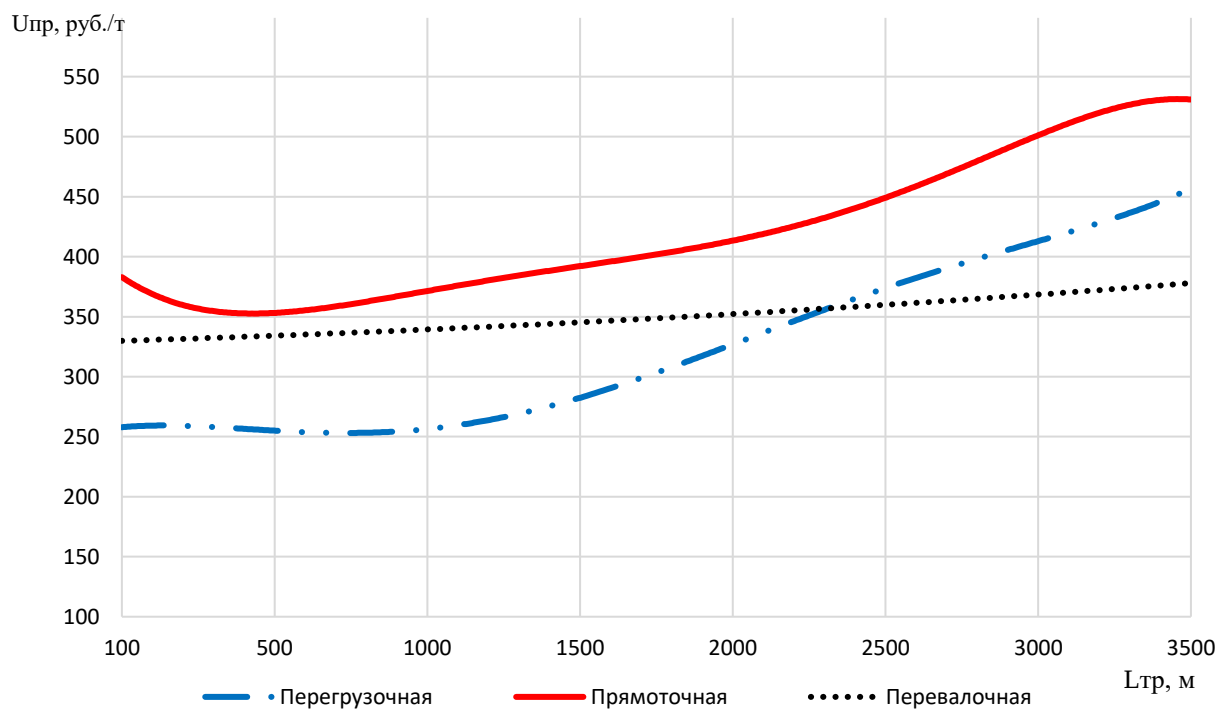


Рисунок В.10 – Графики зависимости удельных затрат для разных технологий внесения от расстояния транспортировки для дозы внесения 10 т/га

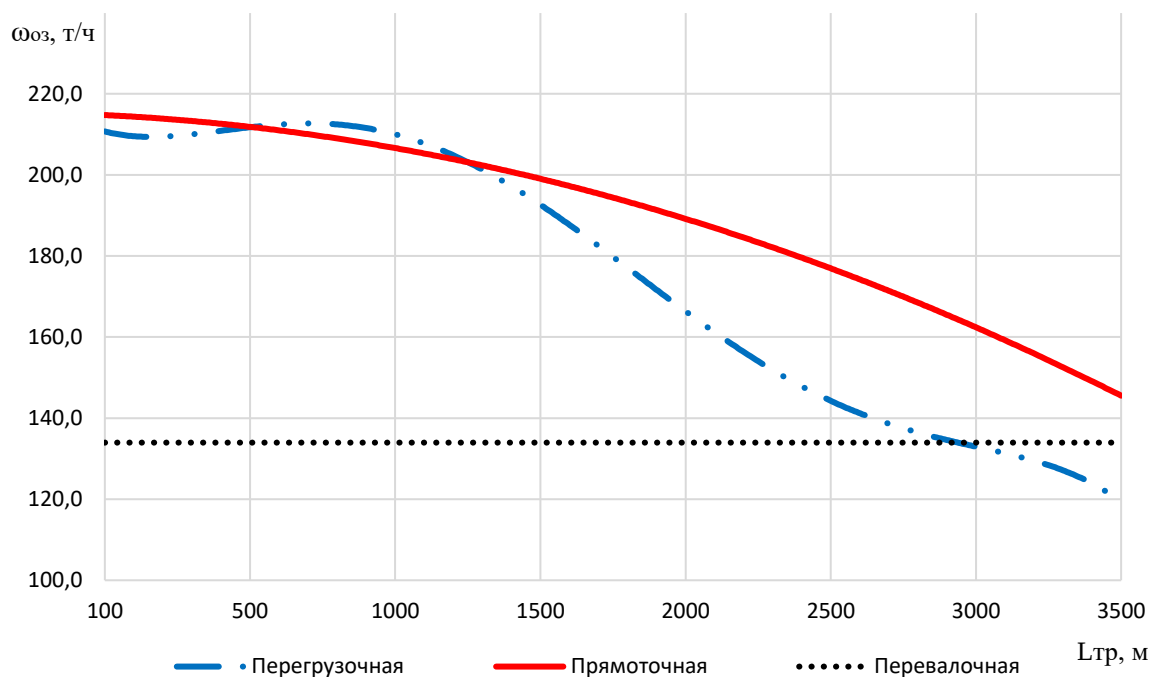


Рисунок В.11 – Графики зависимости производительности для разных технологий внесения от расстояния транспортировки для дозы внесения 10 т/га

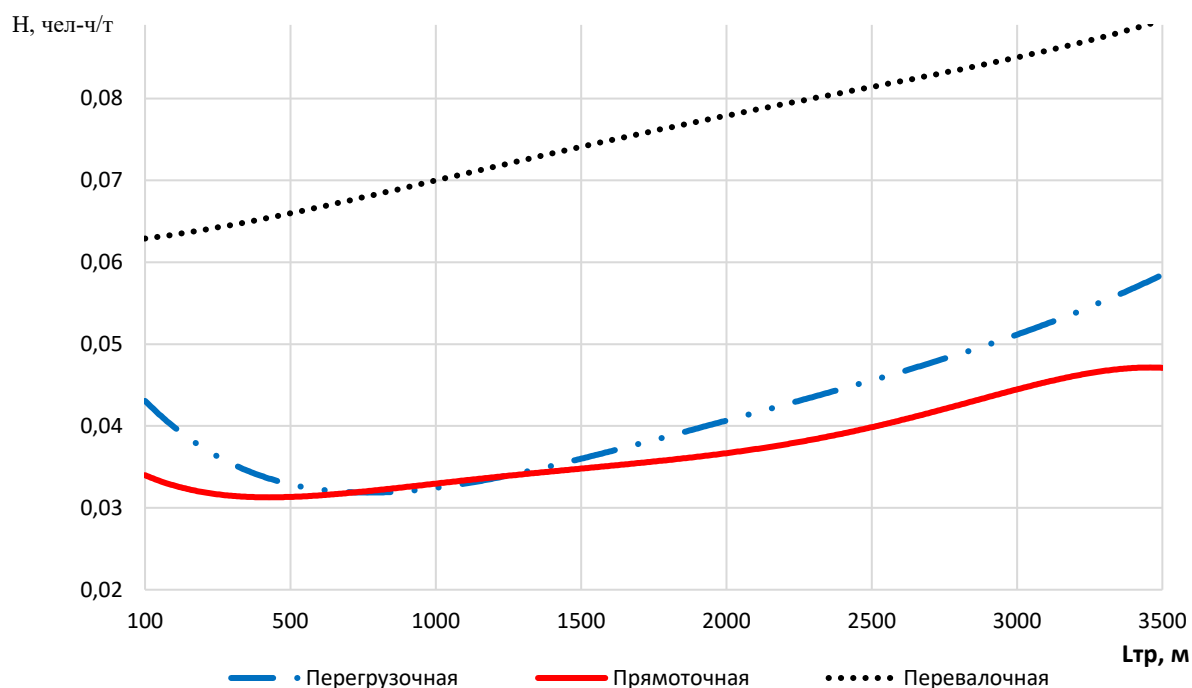


Рисунок В.12 – Графики зависимости удельных затрат труда для разных технологий внесения от расстояния транспортировки для дозы внесения 10 т/га

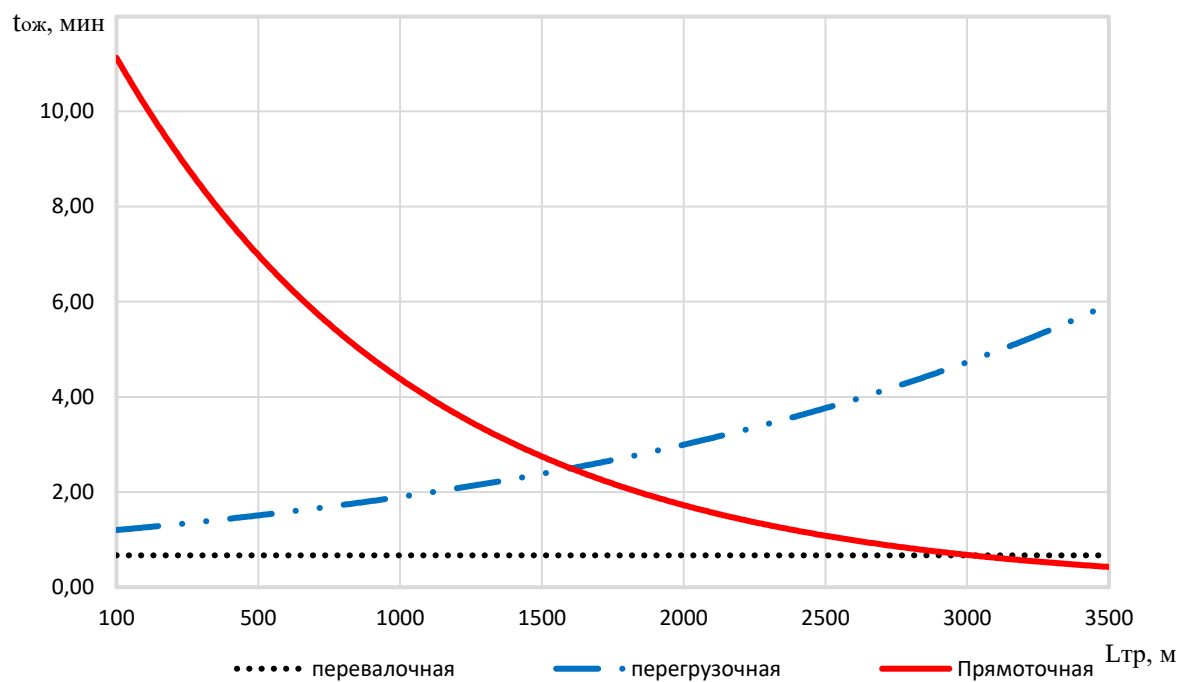


Рисунок В.13 – Графики зависимости суммарного времени ожидания транспортно-перегрузочных и технологических машин от расстояния транспортировки для дозы внесения 10 т/га

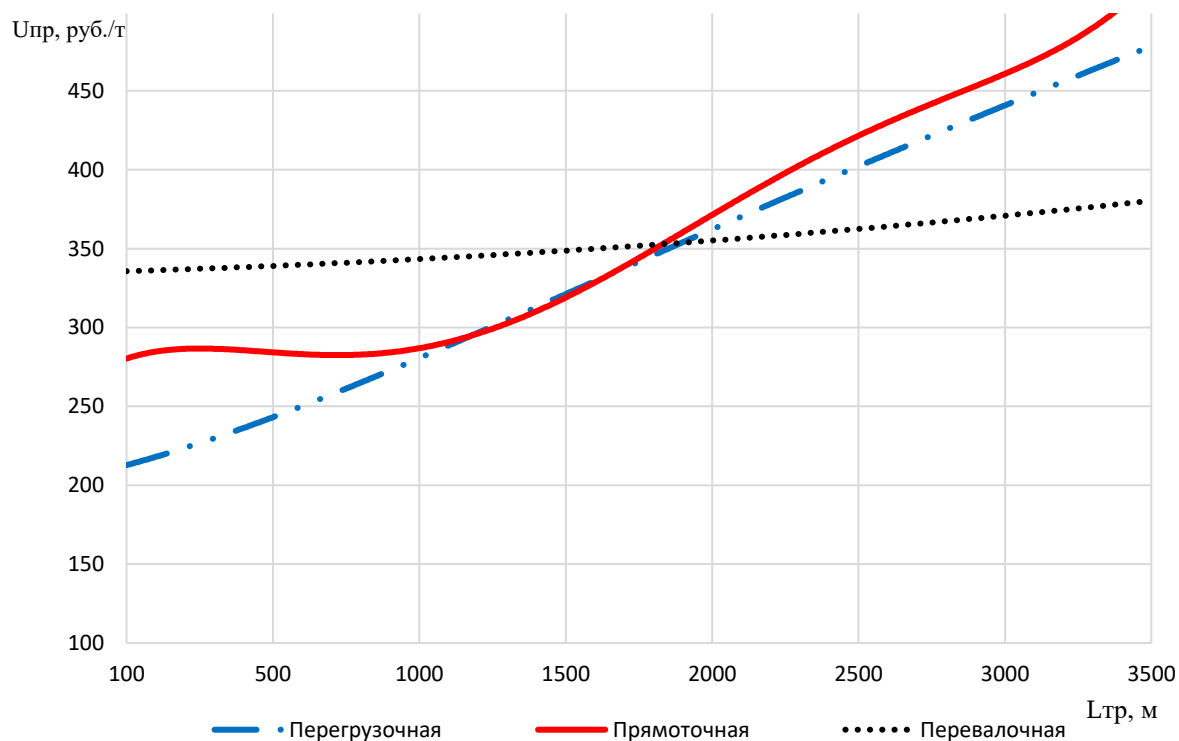


Рисунок В.14 – Графики зависимости удельных затрат для разных технологий внесения от расстояния транспортировки для дозы внесения 40 т/га

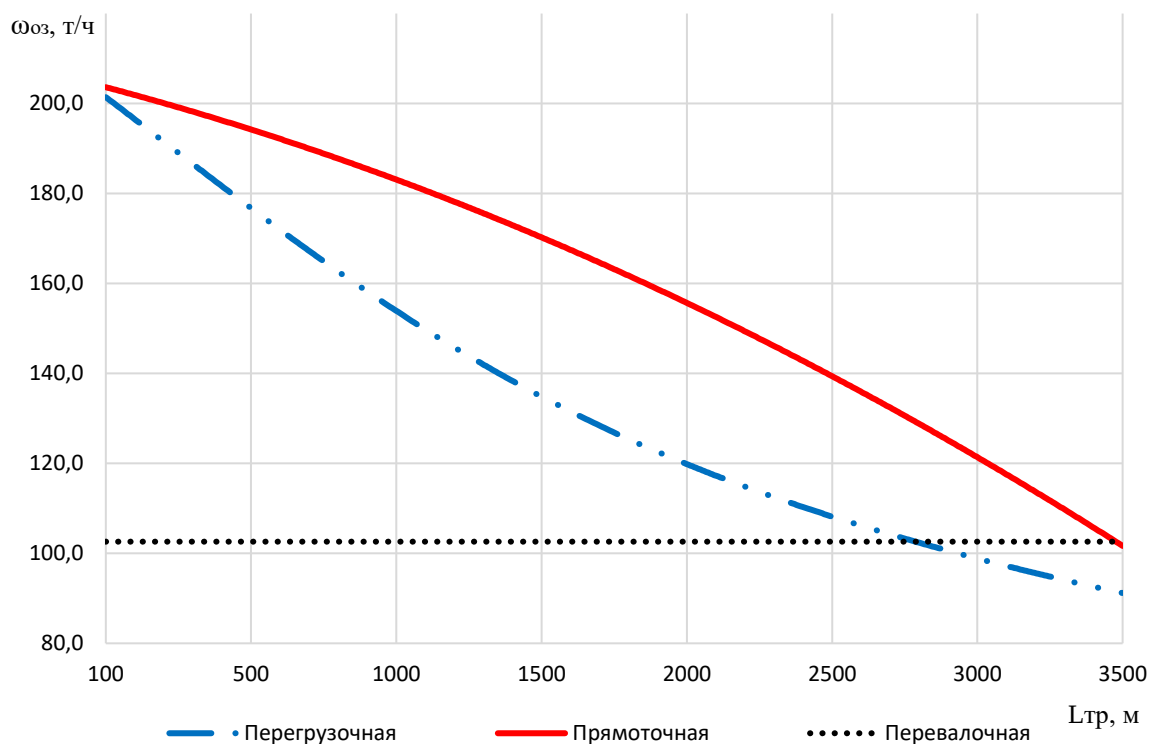


Рисунок В.15 – Графики зависимости производительности для разных технологий внесения от расстояния транспортировки для дозы внесения 40 т/га

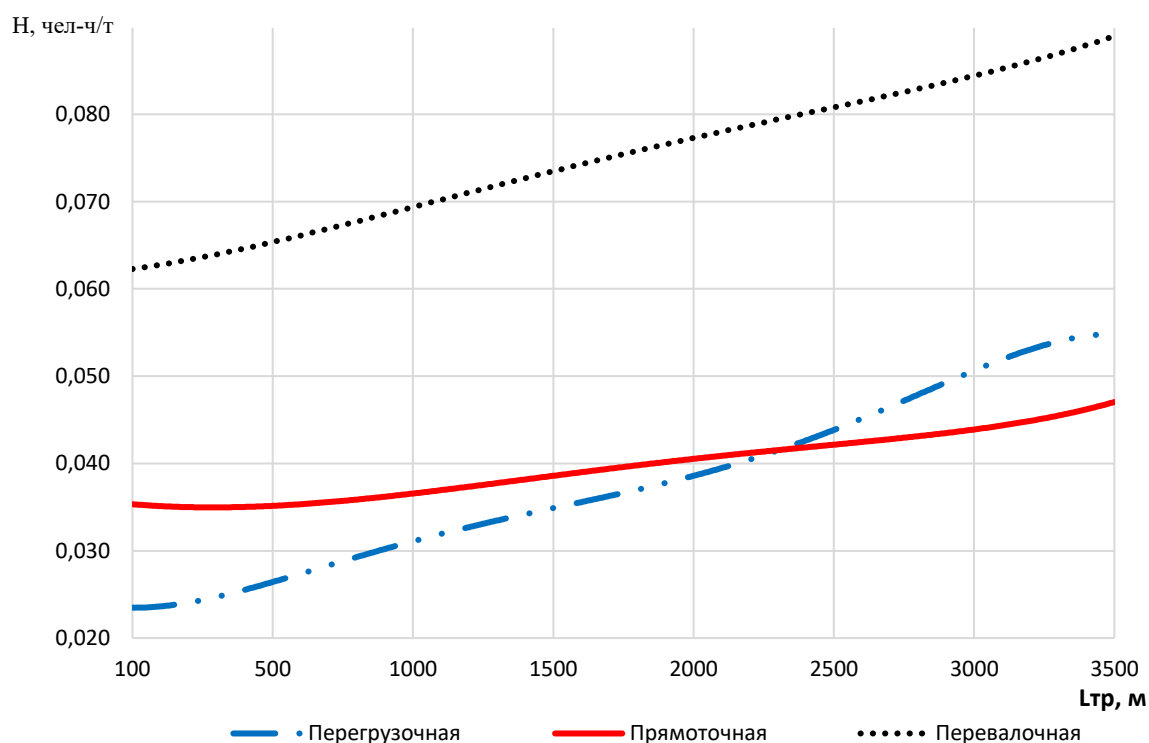


Рисунок В.16 – Графики зависимости удельных затрат труда для разных технологий внесения от расстояния транспортировки для дозы внесения 40 т/га

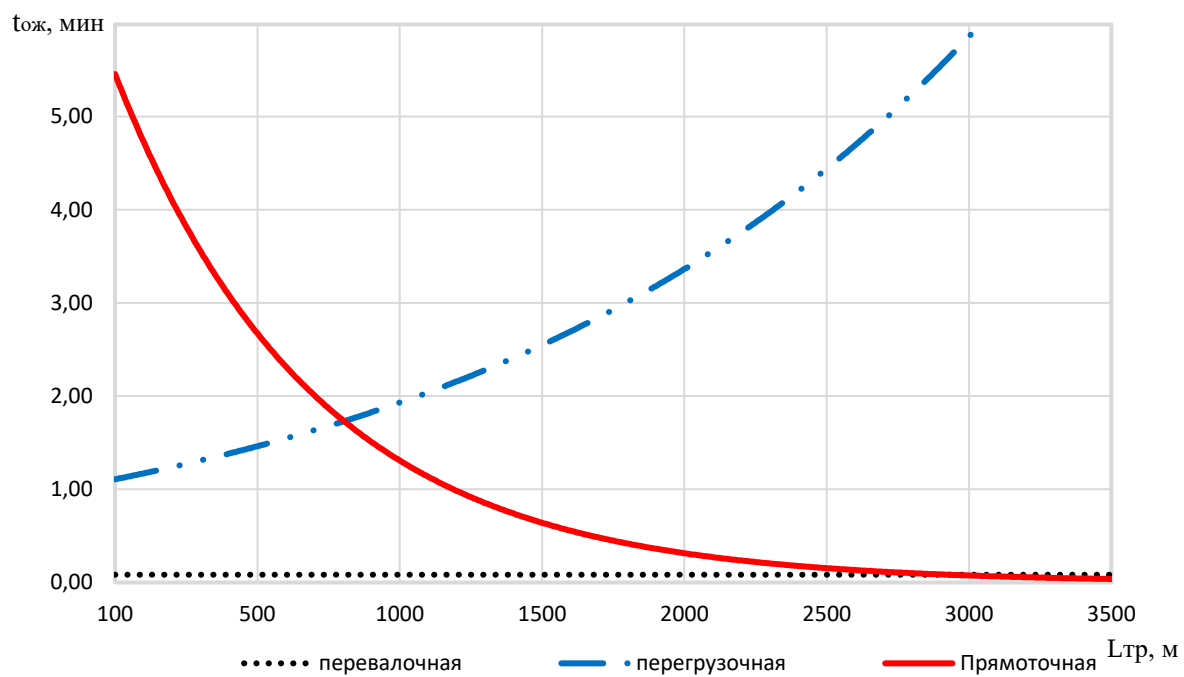


Рисунок В.17 – Графики зависимости суммарного времени ожидания транспортно-перегрузочных и технологических машин от расстояния транспортировки для дозы внесения 40 т/га

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Акт внедрения результатов работы и хронокарты

#### АКТ

передачи и внедрения результатов исследований по совершенствованию перегрузочной технологии внесения твердых органических удобрений и дефекаата

Компанией ООО «ЭкоНиваАгро» получены материалы исследований по совершенствованию перегрузочной технологии внесения твердых органических удобрений и дефекаата, проведенные на кафедре эксплуатации транспортных и технологических машин Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) аспирантом Барыкиным Константином Вадимовичем (руководитель доцент кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин, к.т.н., доцент Колесников Николай Петрович) и представленные им в подготовленной к защите диссертационной работе.

Полученные материалы содержат:

- вид перегрузочной технологии внесения твердых органических удобрений и дефекаата (патент №2832329) с применением прицепов-перегрузчиков.
- методику и математические модели для определения структуры времени рабочего цикла погрузочных, транспортно-перегрузочных и распределительных агрегатов при предложенном виде перегрузочной технологии внесения, отличающийся учетом простоев агрегатов в ожидании, образуемом жесткой технологической связью.
- методику определения рациональных параметров производственной линии внесения, включающую аналитические зависимости взаимодействия транспортно-перегрузочных и распределительных агрегатов, учитывающие стохастический характер рабочего процесса и позволяющие определить рациональное соотношение разбрасывателей и прицепов-перегрузчиков в зависимости от расстояния транспортировки и дозы внесения материала.
- программно-аппаратный комплекс (свидетельство о регистрации программы ЭВМ №2026616020) для определения показателей производственной линии внесения с применением прицепов-перегрузчиков при различных условиях внесения и параметрах производственной линии, позволяющий снизить удельные эксплуатационные затраты на внесение и повысить эффективность работы технологических агрегатов.

Переданные материалы исследования представляют несомненный практический интерес и используются компанией ООО «ЭкоНиваАгро» при комплектowaniu парка технических средств и при планировании проведения сельскохозяйственных работ.

Уполномоченный представитель компании  
ООО «ЭкоНиваАгро»

Доверенность от 18.11.2023 г.



От ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ:

аспирант  
кафедры ЭТТМ  Барыкин К.В.  
доцент

кафедры ЭТТМ  Колесников Н.П.

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
 УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
 «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
 ИМЕНИ ИМПЕРАТОРА ПЕТРА I»

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Врио проректора по учебной работе  
 д.т.н., профессор  
 Н.М. Дерканосова  
 « 16 » \_\_\_\_\_ 2026 год

**А К Т**

о внедрении в учебный процесс  
 на кафедре эксплуатации транспортных и технологических машин  
 ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет  
 имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ)  
 научных разработок по проблеме «Применение прицепов-перегрузчиков при вне-  
 сении твердых органических удобрений и дефеката»  
 по теме «Совершенствование перегрузочной технологии внесения твердых органи-  
 ческих удобрений и дефеката»

1. Работа выполнена кафедрой эксплуатации транспортных и технологиче-  
 ских машин Федерального государственного бюджетного образовательного учре-  
 ждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный универси-  
 тет имени императора Петра I».

2. Ответственный исполнитель - кандидат технических наук, доцент кафедры  
 эксплуатации транспортных и технологических машин Колесников  
 Николай Петрович.

3. Соисполнитель – аспирант кафедры эксплуатации транспортных и техноло-  
 гических машин Барыкин К.В.

4. Наименование разделов темы, выполненных соискателями:

Способ внесения твёрдых органических удобрений и дефеката с примени-  
 ем прицепа-перегрузчика; аналитические зависимости для определения временных  
 циклов, параметров взаимодействия звеньев линии внесения и рациональной гру-  
 зоподъёмности машин; методики определения параметров линии внесения и обос-  
 нования рациональных параметров выгрузного устройства прицепа-перегрузчика;  
 имитационная модель линии внесения твёрдых органических удобрений и дефека-  
 та; экспериментальные закономерности изменения потребляемой мощности и про-  
 сыпаемости материала при перегрузке ленточным транспортёром.

5. Краткое описание результатов внедрения, конечный результат.

Разработан способ перегрузочной технологии внесения, повышающий про-  
 изводительность разбрасывателей за счёт сокращения простоев.

Получены аналитические зависимости и методики расчёта параметров линии внесения.

Создана имитационная модель, позволяющая выбирать рациональные составы звеньев.

Экспериментально установлены рациональные параметры выгрузного устройства (скорость ленты  $2,0 \pm 0,2$  м/с), обеспечивающие минимальные энергозатраты и просыпаемость.

6. Внедрение по курсу дисциплин: полученные материалы используются при изучении дисциплины «Техническое обеспечение производства продукции растениеводства».

7. Решается актуальная задача повышения эффективности внесения твёрдых органических удобрений и дефеката за счёт совершенствования перегрузочной технологии с применением прицепов-перегрузчиков, что способствует формированию у специалистов компетенций в области оптимизации машинно-тракторных агрегатов.

8. Рекомендации — результаты исследований рекомендуется использовать в курсовом проектировании и выпускных квалификационных работах при подготовке специалистов соответствующих программ.

Зав. кафедрой  
эксплуатации транспортных  
и технологических машин, д. техн. наук,  
профессор



В.Г. Козлов

Протокол № 010120-10 от 04 июня 2026 г.

Ответственный исполнитель



Н.П. Колесников

Соисполнители:



К.В. Барыкин

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2832329

Способ внесения твердых органических удобрений и  
мелиорантов

Патентообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU)**

Авторы: **Дьячков Анатолий Петрович (RU), Колесников Николай Петрович (RU), Барыкин Константин Вадимович (RU)**

Заявка № 2023124545

Приоритет изобретения **25 сентября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **23 декабря 2024 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **25 сентября 2043 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью

Сертификат: 0692e761a6300b54240b70bcca2026

Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**

Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026616020

**Имитационная модель производственной линии  
внесения твердых органических удобрений и дефеката**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Воронежский государственный аграрный университет  
имени императора Петра I" (ФГБОУ ВО Воронежский  
ГАУ) (RU)*

Авторы: *Барыкин Константин Вадимович (RU), Колесников  
Николай Петрович (RU)*



Заявка № 2026615309

Дата поступления 04 марта 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 марта 2026 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 00a57064f7...d3b0531b4b8818a75d29506  
Владелец: **Зубов Юний Сергеевич**  
Действителен с 04.03.2025 по 28.11.2026

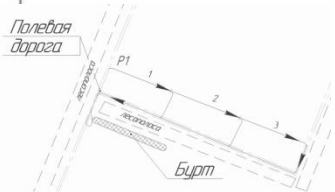
Ю.С. Зубов

## ХРОНОКАРТА №1

Состав агрегата: Трактор + разбрасыватель органических удобрений.

Марка: John Deere 8430 + Koblik РОУМ-25.

Наблюдатель: Барыкин К.В.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                  |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------|------|
| Область Воронежская район Бобровский.<br>Наименование хозяйства (заказчика):<br>АО «Хреновской конный завод», поле № 7.<br>Наименование организации (подрядчика):<br>ООО «ЦЧ АПК» филиал «МТС Воронеж».<br>Технологическая операция: внесение твердых органических удобрений.<br>Площадь поля: 70 га.<br>Способ движения агрегата: челночный.<br>Технология внесения твердых органических удобрений:<br>перевалочная технология, загрузка разбрасывателя<br>производилась фронтальным погрузчиком Liu gong 862.<br>Условия работы: доза внесения 80 т/га.<br>Почва: тяжелая.<br>Глубина снежного покрова: 145 мм.<br>Рельеф: ровный.<br>Погода: ясно | Дата: 19.02.2025 |      |      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Время наблюдения |      |      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                  | час. | мин. |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Начало           | 11   | 20   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Конец            | 17   | 36   |
| Продолжительность                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                  |      | 6 16 |
| Схема участка                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                  |      |      |

| №  | Элемент времени рабочей смены (техники и обслуживающего персонала) | Время конца операции, ч.мин | Продолжительность, мин | Шифр элемента времени |
|----|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1  | Загрузка разбрасывателя погрузчиком                                | 0:5,2                       | 5,2                    | $t_n$                 |
| 2  | Разворот на 180 градусов                                           | 0:5,7                       | 0,5                    | $t_{пов180}$          |
| 3  | Поворот на 90 градусов                                             | 0:5,9                       | 0,25                   | $t_{пов90}$           |
| 4  | Движение с грузом                                                  | 0:8,3                       | 2,3                    | $t_{дг}$              |
| 5  | Поворот на 90 градусов                                             | 0:8,5                       | 0,25                   | $t_{пов90}$           |
| 6  | Рабочий ход                                                        | 0:16,5                      | 8                      | $t_p$                 |
| 7  | Разворот на 180 градусов                                           | 0:17,05                     | 0,55                   | $t_{пов180}$          |
| 8  | Холостой ход                                                       | 0:20,05                     | 3                      | $t_{хх}$              |
| 9  | Поворот на 90 градусов                                             | 0:20,3                      | 0,25                   | $t_{пов90}$           |
| 10 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком                                | 0:25,6                      | 5,3                    | $t_n$                 |
| 11 | Разворот на 180 градусов                                           | 0:26,12                     | 0,52                   | $t_{пов180}$          |
| 12 | Поворот на 90 градусов                                             | 0:26,4                      | 0,23                   | $t_{пов90}$           |
| 13 | Движение с грузом                                                  | 0:29,55                     | 3,2                    | $t_{дг}$              |
| 14 | Поворот на 90 градусов                                             | 0:29,8                      | 0,25                   | $t_{пов90}$           |
| 15 | Рабочий ход                                                        | 0:36,5                      | 6,7                    | $t_p$                 |
| 16 | Разворот на 180 градусов                                           | 0:37,05                     | 0,55                   | $t_{пов180}$          |
| 17 | Холостой ход                                                       | 0:41,3                      | 4,2                    | $t_{хх}$              |
| 18 | Поворот на 90 градусов                                             | 0:41,5                      | 0,25                   | $t_{пов90}$           |
| 19 | Ожидание загрузки                                                  | 0:45                        | 3,5                    | $t_{ож}$              |
| 20 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком                                | 0:50,1                      | 5,1                    | $t_n$                 |
| 21 | Разворот на 180 градусов                                           | 0:50,6                      | 0,49                   | $t_{пов180}$          |
| 22 | Поворот на 90 градусов                                             | 0:50,8                      | 0,25                   | $t_{пов90}$           |
| 23 | Движение с грузом                                                  | 0:55,2                      | 4,4                    | $t_{дг}$              |
| 24 | Поворот на 90 градусов                                             | 0:55,5                      | 0,26                   | $t_{пов90}$           |
| 25 | Рабочий ход                                                        | 1:02,3                      | 6,8                    | $t_p$                 |
| 26 | Разворот на 180 градусов                                           | 1:02,82                     | 0,52                   | $t_{пов180}$          |
| 27 | Холостой ход                                                       | 1:07,92                     | 5,1                    | $t_{хх}$              |
| 28 | Поворот на 90 градусов                                             | 01:08,2                     | 0,24                   | $t_{пов90}$           |

|    |                                     |         |      |              |
|----|-------------------------------------|---------|------|--------------|
| 29 | Ожидание загрузки                   | 01:11,2 | 3    | $t_{ож}$     |
| 30 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 01:17,3 | 6,1  | $t_n$        |
| 31 | Разворот на 180 градусов            | 01:17,9 | 0,6  | $t_{пов180}$ |
| 32 | Поворот на 90 градусов              | 01:18,2 | 0,35 | $t_{пов90}$  |
| 33 | Движение с грузом                   | 01:20,7 | 2,5  | $t_{дг}$     |
| 34 | Поворот на 90 градусов              | 01:21,0 | 0,29 | $t_{пов90}$  |
| 35 | Рабочий ход                         | 01:28,4 | 7,4  | $t_p$        |
| 36 | Разворот на 180 градусов            | 01:28,9 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 37 | Холостой ход                        | 01:32,1 | 3,2  | $t_{хх}$     |
| 38 | Поворот на 90 градусов              | 01:32,4 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 39 | Ожидание загрузки                   | 01:32,4 | 0    | $t_{ож}$     |
| 40 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 01:37,8 | 5,4  | $t_n$        |
| 41 | Разворот на 180 градусов            | 01:38,3 | 0,55 | $t_{пов180}$ |
| 42 | Поворот на 90 градусов              | 01:38,6 | 0,28 | $t_{пов90}$  |
| 43 | Движение с грузом                   | 01:41,7 | 3,1  | $t_{дг}$     |
| 44 | Поворот на 90 градусов              | 01:41,9 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 45 | Рабочий ход                         | 01:48,8 | 6,9  | $t_p$        |
| 46 | Разворот на 180 градусов            | 01:49,3 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 47 | Холостой ход                        | 01:54,6 | 5,3  | $t_{хх}$     |
| 48 | Поворот на 90 градусов              | 01:55,1 | 0,5  | $t_{пов90}$  |
| 49 | Ожидание загрузки                   | 01:58,9 | 3,8  | $t_{ож}$     |
| 50 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 02:04,1 | 5,2  | $t_n$        |
| 51 | Разворот на 180 градусов            | 02:04,6 | 0,45 | $t_{пов180}$ |
| 52 | Поворот на 90 градусов              | 02:04,8 | 0,22 | $t_{пов90}$  |
| 53 | Движение с грузом                   | 02:09,6 | 4,8  | $t_{дг}$     |
| 54 | Поворот на 90 градусов              | 02:09,9 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 55 | Рабочий ход                         | 02:16,4 | 6,5  | $t_p$        |
| 56 | Разворот на 180 градусов            | 02:16,8 | 0,45 | $t_{пов180}$ |
| 57 | Холостой ход                        | 02:22,9 | 6,1  | $t_{хх}$     |
| 58 | Поворот на 90 градусов              | 02:23,2 | 0,27 | $t_{пов90}$  |
| 59 | Ожидание загрузки                   | 02:25,3 | 2,1  | $t_{ож}$     |
| 60 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 02:30,9 | 5,6  | $t_n$        |
| 61 | Разворот на 180 градусов            | 02:31,4 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 62 | Поворот на 90 градусов              | 02:31,6 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 63 | Движение с грузом                   | 02:34,2 | 2,6  | $t_{дг}$     |
| 64 | Поворот на 90 градусов              | 02:34,5 | 0,27 | $t_{пов90}$  |
| 65 | Рабочий ход                         | 02:41,8 | 7,3  | $t_p$        |
| 66 | Разворот на 180 градусов            | 02:42,3 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 67 | Холостой ход                        | 02:45,7 | 3,4  | $t_{хх}$     |
| 68 | Поворот на 90 градусов              | 02:45,9 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 69 | Ожидание загрузки                   | 02:50,9 | 5    | $t_{ож}$     |
| 70 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 02:57,1 | 6,2  | $t_n$        |
| 71 | Разворот на 180 градусов            | 02:57,8 | 0,65 | $t_{пов180}$ |
| 72 | Поворот на 90 градусов              | 02:58,0 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 73 | Движение с грузом                   | 03:01,1 | 3,1  | $t_{дг}$     |
| 74 | Поворот на 90 градусов              | 03:01,4 | 0,27 | $t_{пов90}$  |
| 75 | Рабочий ход                         | 03:07,9 | 6,5  | $t_p$        |
| 76 | Разворот на 180 градусов            | 03:08,5 | 0,55 | $t_{пов180}$ |
| 77 | Холостой ход                        | 03:12,9 | 4,4  | $t_{хх}$     |
| 78 | Поворот на 90 градусов              | 03:13,1 | 0,28 | $t_{пов90}$  |
| 79 | Ожидание загрузки                   | 03:13,1 | 0    | $t_{ож}$     |
| 80 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 03:18,9 | 5,8  | $t_n$        |
| 81 | Разворот на 180 градусов            | 03:19,4 | 0,45 | $t_{пов180}$ |
| 82 | Поворот на 90 градусов              | 03:19,6 | 0,22 | $t_{пов90}$  |
| 83 | Движение с грузом                   | 03:23,6 | 4    | $t_{дг}$     |

|     |                                     |         |      |              |
|-----|-------------------------------------|---------|------|--------------|
| 84  | Поворот на 90 градусов              | 03:23,9 | 0,3  | $t_{пов90}$  |
| 85  | Рабочий ход                         | 03:31,7 | 7,8  | $t_p$        |
| 86  | Разворот на 180 градусов            | 03:32,2 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 87  | Холостой ход                        | 03:37,8 | 5,6  | $t_{хх}$     |
| 88  | Поворот на 90 градусов              | 03:38,1 | 0,28 | $t_{пов90}$  |
| 89  | Ожидание загрузки                   | 03:38,1 | 0    | $t_{ож}$     |
| 90  | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 03:44,1 | 6    | $t_z$        |
| 91  | Разворот на 180 градусов            | 03:44,6 | 0,55 | $t_{пов180}$ |
| 92  | Поворот на 90 градусов              | 03:44,9 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 93  | Движение с грузом                   | 03:47,7 | 2,8  | $t_{дг}$     |
| 94  | Поворот на 90 градусов              | 03:47,9 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 95  | Рабочий ход                         | 03:55,1 | 7,2  | $t_p$        |
| 96  | Разворот на 180 градусов            | 03:55,6 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 97  | Холостой ход                        | 03:59,2 | 3,6  | $t_{хх}$     |
| 98  | Поворот на 90 градусов              | 03:59,5 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 99  | Ожидание загрузки                   | 04:01,5 | 2    | $t_{ож}$     |
| 100 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 04:07,4 | 5,9  | $t_z$        |
| 101 | Разворот на 180 градусов            | 04:07,9 | 0,48 | $t_{пов180}$ |
| 102 | Поворот на 90 градусов              | 04:08,1 | 0,27 | $t_{пов90}$  |
| 103 | Движение с грузом                   | 04:11,9 | 3,8  | $t_{дг}$     |
| 104 | Поворот на 90 градусов              | 04:12,2 | 0,26 | $t_{пов90}$  |
| 105 | Рабочий ход                         | 04:19,8 | 7,6  | $t_p$        |
| 106 | Разворот на 180 градусов            | 04:20,4 | 0,55 | $t_{пов180}$ |
| 107 | Холостой ход                        | 04:25,3 | 4,9  | $t_{хх}$     |
| 108 | Поворот на 90 градусов              | 04:25,5 | 0,29 | $t_{пов90}$  |
| 109 | Ожидание загрузки                   | 04:29,2 | 3,7  | $t_{ож}$     |
| 110 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 04:34,6 | 5,4  | $t_z$        |
| 111 | Разворот на 180 градусов            | 04:35,2 | 0,56 | $t_{пов180}$ |
| 112 | Поворот на 90 градусов              | 04:35,4 | 0,24 | $t_{пов90}$  |
| 113 | Движение с грузом                   | 04:40,4 | 5    | $t_{дг}$     |
| 114 | Поворот на 90 градусов              | 04:40,7 | 0,29 | $t_{пов90}$  |
| 115 | Рабочий ход                         | 04:48,8 | 8,1  | $t_p$        |
| 116 | Разворот на 180 градусов            | 04:49,4 | 0,52 | $t_{пов180}$ |
| 117 | Холостой ход                        | 04:55,5 | 6,1  | $t_{хх}$     |
| 118 | Поворот на 90 градусов              | 04:55,7 | 0,23 | $t_{пов90}$  |
| 119 | Ожидание загрузки                   | 04:55,7 | 0    | $t_{ож}$     |
| 120 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 05:01,5 | 5,8  | $t_z$        |
| 121 | Разворот на 180 градусов            | 05:02,0 | 0,54 | $t_{пов180}$ |
| 122 | Поворот на 90 градусов              | 05:02,3 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 123 | Движение с грузом                   | 05:05,4 | 3,1  | $t_{дг}$     |
| 124 | Поворот на 90 градусов              | 05:05,6 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 125 | Рабочий ход                         | 05:12,4 | 6,8  | $t_p$        |
| 126 | Разворот на 180 градусов            | 05:12,9 | 0,45 | $t_{пов180}$ |
| 127 | Холостой ход                        | 05:16,8 | 3,9  | $t_{хх}$     |
| 128 | Поворот на 90 градусов              | 05:17,1 | 0,29 | $t_{пов90}$  |
| 129 | Ожидание загрузки                   | 05:22,0 | 4,9  | $t_{ож}$     |
| 130 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 05:30,1 | 8,1  | $t_z$        |
| 131 | Разворот на 180 градусов            | 05:30,6 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 132 | Поворот на 90 градусов              | 05:30,8 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 133 | Движение с грузом                   | 05:34,9 | 4,1  | $t_{дг}$     |
| 134 | Поворот на 90 градусов              | 05:35,2 | 0,27 | $t_{пов90}$  |
| 135 | Рабочий ход                         | 05:42,1 | 6,9  | $t_p$        |
| 136 | Разворот на 180 градусов            | 05:42,7 | 0,58 | $t_{пов180}$ |
| 137 | Холостой ход                        | 05:48,3 | 5,6  | $t_{хх}$     |
| 138 | Поворот на 90 градусов              | 05:48,6 | 0,29 | $t_{пов90}$  |

|     |                                     |         |      |              |
|-----|-------------------------------------|---------|------|--------------|
| 139 | Ожидание загрузки                   | 05:48,6 | 0    | $t_{ож}$     |
| 140 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 05:54,0 | 5,4  | $t_{п}$      |
| 141 | Разворот на 180 градусов            | 05:54,6 | 0,6  | $t_{пов180}$ |
| 142 | Поворот на 90 градусов              | 05:54,8 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 143 | Движение с грузом                   | 06:00,8 | 6    | $t_{дг}$     |
| 144 | Поворот на 90 градусов              | 06:01,1 | 0,29 | $t_{пов90}$  |
| 145 | Рабочий ход                         | 06:08,5 | 7,4  | $t_{р}$      |
| 146 | Разворот на 180 градусов            | 06:09,0 | 0,55 | $t_{пов180}$ |
| 147 | Холостой ход                        | 06:16,2 | 7,2  | $t_{хх}$     |

Основное время (время работы), 1 ч. 47,4 мин.

Время движения с грузом, 0 ч. 54,8 мин.

Время холостого хода, 1 ч. 11,6 мин.

Время поворотов 0 ч. 27,2 мин.

Время ожидания 0 ч. 28 мин.

Средняя рабочая скорость, 2,8 км/ч.

Средняя скорость движения с грузом 17,6 км/ч.

Средняя скорость движения без груза, 19,7 км/ч.

Производительность за 1 ч основным временем, 2,3 га/ч

Удельный расход топлива 0,56 л/т

Наблюдатель

аспирант

(должность)

(подпись)

Барыкин К.В.

(фамилия, инициалы)

Заказчик

главный инженер

(должность)

(подпись)

Бесчетнов А.А.

(фамилия, инициалы)

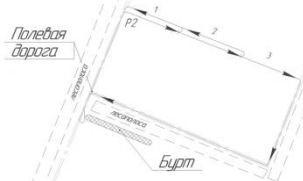


## ХРОНОКАРТА №2

Состав агрегата: Трактор + разбрасыватель органических удобрений.

Марка: John Deere 8420 + Koblik РОУМ-25.

Наблюдатель: Барыкин К.В.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                   |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|------|
| Область Воронежская район Бобровский.<br>Наименование хозяйства (заказчика):<br>АО «Хреновской конный завод» поле № 7.<br>Наименование организации (подрядчика):<br>ООО «ЦЧ АПК» филиал «МТС Воронеж».<br>Технологическая операция: внесение твердых органических удобрений.<br>Площадь поля: 70 га.<br>Способ движения агрегата: челночный.<br>Технология внесения твердых органических удобрений:<br>перевалочная технология, загрузка разбрасывателя<br>производилась фронтальным погрузчиком Liu gong 862.<br>Условия работы: доза внесения 80 т/га.<br>Почва: тяжелая.<br>Глубина снежного покрова: 145 мм.<br>Рельеф: ровный.<br>Погода: ясно | Дата: 19.02.2025  |      |      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Время наблюдения  |      |      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                   | час. | мин. |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Начало            | 11   | 26   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Конец             | 17   | 27   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Продолжительность | 6    | 1    |
| Схема участка<br>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                   |      |      |

| №  | Элемент времени рабочей смены (техники и обслуживающего персонала) | Время конца операции, ч.мин | Продолжительность, мин | Шифр элемента времени |
|----|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1  | Загрузка разбрасывателя погрузчиком                                | 0:06,4                      | 6,4                    | t <sub>п</sub>        |
| 2  | Разворот на 180 градусов                                           | 0:07,1                      | 0,65                   | t <sub>пов180</sub>   |
| 3  | Поворот на 90 градусов                                             | 0:07,4                      | 0,3                    | t <sub>пов90</sub>    |
| 4  | Движение с грузом                                                  | 0:09,4                      | 2                      | t <sub>дг</sub>       |
| 5  | Поворот на 90 градусов                                             | 0:09,7                      | 0,26                   | t <sub>пов90</sub>    |
| 6  | Рабочий ход                                                        | 0:17,2                      | 7,5                    | t <sub>р</sub>        |
| 7  | Разворот на 180 градусов                                           | 0:17,8                      | 0,6                    | t <sub>пов180</sub>   |
| 8  | Холостой ход                                                       | 0:21,0                      | 3,2                    | t <sub>хх</sub>       |
| 9  | Поворот на 90 градусов                                             | 0:21,2                      | 0,24                   | t <sub>пов90</sub>    |
| 10 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком                                | 0:27,0                      | 5,8                    | t <sub>п</sub>        |
| 11 | Разворот на 180 градусов                                           | 0:27,6                      | 0,58                   | t <sub>пов180</sub>   |
| 12 | Поворот на 90 градусов                                             | 0:27,9                      | 0,28                   | t <sub>пов90</sub>    |
| 13 | Движение с грузом                                                  | 0:31,6                      | 3,7                    | t <sub>дг</sub>       |
| 14 | Поворот на 90 градусов                                             | 0:31,9                      | 0,3                    | t <sub>пов90</sub>    |
| 15 | Рабочий ход                                                        | 0:39,0                      | 7,1                    | t <sub>р</sub>        |
| 16 | Разворот на 180 градусов                                           | 0:39,6                      | 0,6                    | t <sub>пов180</sub>   |
| 17 | Холостой ход                                                       | 0:44,4                      | 4,8                    | t <sub>хх</sub>       |
| 18 | Поворот на 90 градусов                                             | 0:44,7                      | 0,25                   | t <sub>пов90</sub>    |
| 19 | Ожидание загрузки                                                  | 0:44,7                      | 0                      | t <sub>ож</sub>       |
| 20 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком                                | 0:50,3                      | 5,6                    | t <sub>п</sub>        |
| 21 | Разворот на 180 градусов                                           | 0:50,8                      | 0,5                    | t <sub>пов180</sub>   |
| 22 | Поворот на 90 градусов                                             | 0:51,1                      | 0,28                   | t <sub>пов90</sub>    |
| 23 | Движение с грузом                                                  | 0:56,0                      | 4,9                    | t <sub>дг</sub>       |
| 24 | Поворот на 90 градусов                                             | 0:56,3                      | 0,32                   | t <sub>пов90</sub>    |
| 25 | Рабочий ход                                                        | 1:03,5                      | 7,2                    | t <sub>р</sub>        |
| 26 | Разворот на 180 градусов                                           | 1:04,0                      | 0,5                    | t <sub>пов180</sub>   |
| 27 | Холостой ход                                                       | 1:09,9                      | 5,9                    | t <sub>хх</sub>       |
| 28 | Поворот на 90 градусов                                             | 1:10,1                      | 0,2                    | t <sub>пов90</sub>    |

|    |                                     |        |      |              |
|----|-------------------------------------|--------|------|--------------|
| 29 | Ожидание загрузки                   | 1:10,1 | 0    | $t_{ож}$     |
| 30 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 1:15,8 | 5,7  | $t_n$        |
| 31 | Разворот на 180 градусов            | 1:16,4 | 0,6  | $t_{пов180}$ |
| 32 | Поворот на 90 градусов              | 1:16,7 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 33 | Движение с грузом                   | 1:18,4 | 1,7  | $t_{дг}$     |
| 34 | Поворот на 90 градусов              | 1:18,7 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 35 | Рабочий ход                         | 1:26,3 | 7,6  | $t_p$        |
| 36 | Разворот на 180 градусов            | 1:26,9 | 0,6  | $t_{пов180}$ |
| 37 | Холостой ход                        | 1:29,2 | 2,3  | $t_{хх}$     |
| 38 | Поворот на 90 градусов              | 1:29,5 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 39 | Ожидание загрузки                   | 1:29,5 | 0    | $t_{ож}$     |
| 40 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 1:35,2 | 5,7  | $t_n$        |
| 41 | Разворот на 180 градусов            | 1:35,7 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 42 | Поворот на 90 градусов              | 1:36,0 | 0,27 | $t_{пов90}$  |
| 43 | Движение с грузом                   | 1:39,0 | 3    | $t_{дг}$     |
| 44 | Поворот на 90 градусов              | 1:39,3 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 45 | Рабочий ход                         | 1:46,4 | 7,1  | $t_p$        |
| 46 | Разворот на 180 градусов            | 1:46,9 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 47 | Холостой ход                        | 1:51,0 | 4,1  | $t_{хх}$     |
| 48 | Поворот на 90 градусов              | 1:51,5 | 0,5  | $t_{пов90}$  |
| 49 | Ожидание загрузки                   | 1:51,5 | 0    | $t_{ож}$     |
| 50 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 1:56,6 | 5,1  | $t_n$        |
| 51 | Разворот на 180 градусов            | 1:57,1 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 52 | Поворот на 90 градусов              | 1:57,4 | 0,3  | $t_{пов90}$  |
| 53 | Движение с грузом                   | 2:01,5 | 4,1  | $t_{дг}$     |
| 54 | Поворот на 90 градусов              | 2:01,8 | 0,28 | $t_{пов90}$  |
| 55 | Рабочий ход                         | 2:08,5 | 6,7  | $t_p$        |
| 56 | Разворот на 180 градусов            | 2:09,0 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 57 | Холостой ход                        | 2:15,4 | 6,4  | $t_{хх}$     |
| 58 | Поворот на 90 градусов              | 2:15,7 | 0,3  | $t_{пов90}$  |
| 59 | Ожидание загрузки                   | 2:16,7 | 1    | $t_{ож}$     |
| 60 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 2:22,8 | 6,1  | $t_n$        |
| 61 | Разворот на 180 градусов            | 2:23,4 | 0,6  | $t_{пов180}$ |
| 62 | Поворот на 90 градусов              | 2:23,6 | 0,2  | $t_{пов90}$  |
| 63 | Движение с грузом                   | 2:25,5 | 1,9  | $t_{дг}$     |
| 64 | Поворот на 90 градусов              | 2:25,8 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 65 | Рабочий ход                         | 2:32,7 | 6,9  | $t_p$        |
| 66 | Разворот на 180 градусов            | 2:33,2 | 0,45 | $t_{пов180}$ |
| 67 | Холостой ход                        | 2:36,3 | 3,1  | $t_{хх}$     |
| 68 | Поворот на 90 градусов              | 2:36,6 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 69 | Ожидание загрузки                   | 2:36,6 | 0    | $t_{ож}$     |
| 70 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 2:42,5 | 5,9  | $t_n$        |
| 71 | Разворот на 180 градусов            | 2:43,1 | 0,55 | $t_{пов180}$ |
| 72 | Поворот на 90 градусов              | 2:43,4 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 73 | Движение с грузом                   | 2:45,8 | 2,4  | $t_{дг}$     |
| 74 | Поворот на 90 градусов              | 2:46,1 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 75 | Рабочий ход                         | 2:53,1 | 7    | $t_p$        |
| 76 | Разворот на 180 градусов            | 2:53,6 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 77 | Холостой ход                        | 2:57,0 | 3,4  | $t_{хх}$     |
| 78 | Поворот на 90 градусов              | 2:57,2 | 0,2  | $t_{пов90}$  |
| 79 | Ожидание загрузки                   | 2:59,5 | 2,3  | $t_{ож}$     |
| 80 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 3:05,0 | 5,5  | $t_n$        |
| 81 | Разворот на 180 градусов            | 3:05,5 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 82 | Поворот на 90 градусов              | 3:05,8 | 0,25 | $t_{пов90}$  |
| 83 | Движение с грузом                   | 3:08,9 | 3,1  | $t_{дг}$     |

|     |                                     |        |      |               |
|-----|-------------------------------------|--------|------|---------------|
| 84  | Поворот на 90 градусов              | 3:09,2 | 0,25 | $t_{пов\ 90}$ |
| 85  | Рабочий ход                         | 3:16,4 | 7,2  | $t_p$         |
| 86  | Разворот на 180 градусов            | 3:17,0 | 0,6  | $t_{пов180}$  |
| 87  | Холостой ход                        | 3:21,6 | 4,6  | $t_{хх}$      |
| 88  | Поворот на 90 градусов              | 3:21,9 | 0,28 | $t_{пов90}$   |
| 89  | Ожидание загрузки                   | 3:25,3 | 3,4  | $t_{ож}$      |
| 90  | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 3:33,4 | 8,1  | $t_n$         |
| 91  | Разворот на 180 градусов            | 3:34,0 | 0,6  | $t_{пов180}$  |
| 92  | Поворот на 90 градусов              | 3:34,4 | 0,35 | $t_{пов90}$   |
| 93  | Движение с грузом                   | 3:37,2 | 2,8  | $t_{дг}$      |
| 94  | Поворот на 90 градусов              | 3:37,5 | 0,25 | $t_{пов\ 90}$ |
| 95  | Рабочий ход                         | 3:44,7 | 7,2  | $t_p$         |
| 96  | Разворот на 180 градусов            | 3:45,2 | 0,5  | $t_{пов180}$  |
| 97  | Холостой ход                        | 3:49,4 | 4,2  | $t_{хх}$      |
| 98  | Поворот на 90 градусов              | 3:49,7 | 0,25 | $t_{пов90}$   |
| 99  | Ожидание загрузки                   | 3:49,7 | 0    | $t_{ож}$      |
| 100 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 3:55,1 | 5,4  | $t_n$         |
| 101 | Разворот на 180 градусов            | 3:55,6 | 0,5  | $t_{пов180}$  |
| 102 | Поворот на 90 градусов              | 3:55,9 | 0,25 | $t_{пов90}$   |
| 103 | Движение с грузом                   | 3:59,3 | 3,4  | $t_{дг}$      |
| 104 | Поворот на 90 градусов              | 3:59,6 | 0,28 | $t_{пов\ 90}$ |
| 105 | Рабочий ход                         | 4:07,6 | 8    | $t_p$         |
| 106 | Разворот на 180 градусов            | 4:08,1 | 0,5  | $t_{пов180}$  |
| 107 | Холостой ход                        | 4:13,0 | 4,9  | $t_{хх}$      |
| 108 | Поворот на 90 градусов              | 4:13,3 | 0,3  | $t_{пов90}$   |
| 109 | Ожидание загрузки                   | 4:15,1 | 1,8  | $t_{ож}$      |
| 110 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 4:20,3 | 5,2  | $t_n$         |
| 111 | Разворот на 180 градусов            | 4:20,9 | 0,62 | $t_{пов180}$  |
| 112 | Поворот на 90 градусов              | 4:21,2 | 0,25 | $t_{пов90}$   |
| 113 | Движение с грузом                   | 4:25,4 | 4,2  | $t_{дг}$      |
| 114 | Поворот на 90 градусов              | 4:25,7 | 0,25 | $t_{пов\ 90}$ |
| 115 | Рабочий ход                         | 4:32,2 | 6,5  | $t_p$         |
| 116 | Разворот на 180 градусов            | 4:32,7 | 0,5  | $t_{пов180}$  |
| 117 | Холостой ход                        | 4:37,8 | 5,1  | $t_{хх}$      |
| 118 | Поворот на 90 градусов              | 4:38,1 | 0,28 | $t_{пов90}$   |
| 119 | Ожидание загрузки                   | 4:39,2 | 1,1  | $t_{ож}$      |
| 120 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 4:45,6 | 6,4  | $t_n$         |
| 121 | Разворот на 180 градусов            | 4:46,1 | 0,5  | $t_{пов180}$  |
| 122 | Поворот на 90 градусов              | 4:46,4 | 0,25 | $t_{пов90}$   |
| 123 | Движение с грузом                   | 4:49,4 | 3    | $t_{дг}$      |
| 124 | Поворот на 90 градусов              | 4:49,7 | 0,28 | $t_{пов\ 90}$ |
| 125 | Рабочий ход                         | 4:56,7 | 7    | $t_p$         |
| 126 | Разворот на 180 градусов            | 4:57,2 | 0,5  | $t_{пов180}$  |
| 127 | Холостой ход                        | 5:01,1 | 3,9  | $t_{хх}$      |
| 128 | Поворот на 90 градусов              | 5:01,4 | 0,29 | $t_{пов90}$   |
| 129 | Ожидание загрузки                   | 5:01,4 | 0    | $t_{ож}$      |
| 130 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 5:09,5 | 8,1  | $t_n$         |
| 131 | Разворот на 180 градусов            | 5:10,0 | 0,5  | $t_{пов180}$  |
| 132 | Поворот на 90 градусов              | 5:10,3 | 0,25 | $t_{пов90}$   |
| 133 | Движение с грузом                   | 5:13,8 | 3,5  | $t_{дг}$      |
| 134 | Поворот на 90 градусов              | 5:14,1 | 0,25 | $t_{пов\ 90}$ |
| 135 | Рабочий ход                         | 5:22,0 | 7,9  | $t_p$         |
| 136 | Разворот на 180 градусов            | 5:22,6 | 0,6  | $t_{пов180}$  |
| 137 | Холостой ход                        | 5:29,2 | 6,6  | $t_{хх}$      |
| 138 | Поворот на 90 градусов              | 5:29,5 | 0,25 | $t_{пов90}$   |

|     |                                     |        |      |              |
|-----|-------------------------------------|--------|------|--------------|
| 139 | Ожидание загрузки                   | 5:34,0 | 4,5  | $t_{ож}$     |
| 140 | Загрузка разбрасывателя погрузчиком | 5:40,0 | 6    | $t_{п}$      |
| 141 | Разворот на 180 градусов            | 5:40,6 | 0,55 | $t_{пов180}$ |
| 142 | Поворот на 90 градусов              | 5:41,0 | 0,35 | $t_{пов90}$  |
| 143 | Движение с грузом                   | 5:46,2 | 5,2  | $t_{дг}$     |
| 144 | Поворот на 90 градусов              | 5:46,5 | 0,3  | $t_{пов90}$  |
| 145 | Рабочий ход                         | 5:53,7 | 7,2  | $t_{р}$      |
| 146 | Разворот на 180 градусов            | 5:54,2 | 0,5  | $t_{пов180}$ |
| 147 | Холостой ход                        | 6:00,8 | 6,6  | $t_{хх}$     |

Основное время (время работы), 1 ч. 47 мин.

Время движения с грузом, 0 ч. 55,6 мин.

Время холостого хода, 1 ч. 11 мин.

Время поворотов 0 ч. 27,2 мин.

Время ожидания 0 ч. 6,4 мин.

Средняя рабочая скорость, 2,9 км/ч.

Средняя скорость движения с грузом 17,2 км/ч.

Средняя скорость движения без груза, 18,8 км/ч.

Производительность за 1 ч основного временем, 2,4 га/ч

Удельный расход топлива 0,51 л/т.

Наблюдатель

*Александр*  
(должность)

(подпись)

*Барыкин К.В.*  
(фамилия, инициалы)

Заказчик

*М.В. Маслов*  
(должность)

(подпись)

*Бестетков А.А.*  
(фамилия, инициалы)

