

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральный государственный бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Рязанский государственный агротехнологический университет  
имени П.А. Костычева»

*На правах рукописи*



**СМИРНОВ АЛЕКСЕЙ ИГОРЕВИЧ**

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ХОДОВОЙ СИСТЕМЫ  
ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ «КУБАНЬ-ЛК1»**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского  
хозяйства

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор,

Заслуженный деятель науки РФ

Рязанцев Анатолий Иванович

Рязань, 2021

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	10
1.1. Обзор перспектив развития орошения дождеванием и характеристики многоопорной дождевальнoй машины ДМ «Кубань-ЛК1».....	10
1.2. Характеристика энергетических затрат на передвижение ДМ «Кубань-ЛК1»	19
1.3. Существующие подходы при проведении мероприятий по обеспечению опорной проходимости многоопорных дождевальных машин.....	24
1.3.1. Снижение давления ходовых систем дождевальных машин на почву .....	24
1.3.2. Повышение несущей способности почвы в зоне движения ходовых систем многоопорных широкозахватных дождевальных машин .....	32
1.4. Постановка цели и задач исследований.....	44
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ХОДОВОЙ СИСТЕМЫ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ «КУБАНЬ-ЛК1» .....	46
2.1. Технологические особенности полива и показатели эффективности при колееобразовании ходовой системой ДМ «Кубань-ЛК1» .....	46
2.2. Теоретическая оценка энергетических затрат при движении тележек ДМ «Кубань-ЛК1».....	47
2.3. Оценка деформативных характеристик почвы при взаимодействии с ходовыми системами ДМ «Кубань-ЛК1» .....	50
2.4. Обоснование параметров ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» .....	68
2.4.1. Устройство для заравнивания колеи от дождевальной машины .....	68
2.4.2. Оценка угла атаки дисков заравнивающего устройства в зависимости от параметров ходовой системы многоопорной ДМ кругового действия, при различной глубине колееобразования.....	70
2.4.3. Колесный движитель дождевальной машины .....	75
2.5. Выводы по 2 разделу.....	79

3.	ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	80
3.1.	Методика регистрации параметров деформации почвы и энергетических характеристик передвижения ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» в лабораторных условиях .....	81
3.2.	Определение условий проведения лабораторно-полевых и производственных исследований .....	86
3.3.	Методика регистрации параметров колееобразования и энергетических характеристик передвижения ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» в лабораторно-полевых условиях.....	90
3.4.	Методика обработки результатов, полученных в ходе исследований.....	96
3.4.1.	Аппроксимация данных, полученных в ходе исследований при построении регрессионных зависимостей.....	96
3.4.2.	Методика получения уравнений регрессии при построении многофакторных графических зависимостей.....	97
3.5.	Методика планирования эксперимента .....	98
3.5.1.	Методика активного эксперимента при исследовании влияния несущей способности почвы и ширины профиля пневмошины ДМ «Кубань-ЛК1» на коэффициент сопротивления передвижению её тележек по орошаемой площади	98
3.5.2.	Методика активного эксперимента по исследованию влияния коэффициента сопротивления качению и веса пневматических шин, на сопротивление передвижению ходовой системы дождевальной тележки ДМ «Кубань-ЛК1» .....	99
3.5.3.	Методика активного эксперимента по исследованию влияния сопротивления качению, и коэффициента полезного действия привода тележки ДМ «Кубань-ЛК1», на величину потребляемой электрической мощности.....	100
3.6.	Оборудование и приборы, используемые для регистрации экспериментальных данных .....	101
4.	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ХОДОВОЙ СИСТЕМЫ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ «КУБАНЬ-ЛК1».....	103

4.2. Результаты регистрации параметров колееобразования и энергетических характеристик передвижения ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» в лабораторных, лабораторно – полевых и производственных условиях.....	106
4.3. Результаты исследований опорной проходимости экспериментальных образцов ходовой системы ДМ «Кубань – ЛК1».....	109
4.3.1. Оценка параметров заравнивающих устройств ходовой системы ДМ.....	109
4.3.2 Результаты активного эксперимента при исследовании влияния несущей способности почвы и ширины профиля пневмошины ДМ «Кубань-ЛК1» на коэффициент сопротивления передвижению её тележек по орошаемой площади .....	109
4.3.3 Результаты активного эксперимента по исследованию влияния коэффициента сопротивления качению и веса пневматических шин, на сопротивление передвижению ходовой системы дождевальной тележки ДМ «Кубань-ЛК1».....	111
4.3.4. Результаты активного эксперимента по исследованию влияния сопротивления качению и коэффициента полезного действия привода тележки ДМ «Кубань-ЛК1», на величину потребляемой электрической мощности.....	113
4.4. Эксплуатационно-технологическая оценка работы усовершенствованной ДМ «Кубань-ЛК1».....	115
4.5. Определение площади воздействия ходовых систем дождевальной машины на сельскохозяйственные растения.....	117
4.6. Выводы по 4 разделу.....	118
5. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ ДМ «КУБАНЬ-ЛК1» НА ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИНАХ 11.2R44 С УСТРОЙСТВАМИ ДЛЯ ЗАРАВНИВАНИЯ КОЛЕИ.....	120
5.1. Выводы по 5 разделу.....	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	122
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	124
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	139

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Сложившаяся многоукладность форм хозяйствования в сельском хозяйстве РФ определяет наличие больших, средних и мелких фермерских хозяйств. В течение последних десятилетий отмечено сокращение производимой продукции, выращенной на орошаемых площадях. Дождевальные машины (ДМ), используемые для полива в настоящее время, при несовершенстве конструкции имеют большие сроки эксплуатации, превышающие 10 лет. При существующем ухудшении качества полива наблюдается снижение урожайности и деградация почвенной структуры. В условиях различных укладов хозяйствования в РФ, для улучшения ситуации в орошаемом земледелии необходимы меры по своевременному ремонту и поддержанию в работоспособном состоянии дождевальной техники [74] с учётом последних научных разработок при её технической модернизации [35,36,37,38,39,77]. Эти меры связаны с уменьшением потерь, улучшением энергетических показателей и экологической ситуации в районе работы дождевателей [41,75,76]. Указанные мероприятия способны увеличить срок службы данной техники на срок от пяти до восьми лет.

Тема совершенствования является важной для многоопорных дождевальных машин ДМ «Кубань-ЛК1», распространенных во многих регионах нашей страны, за счёт простоты конструкции, технологичности и надёжности применения. Указанная техника имеет ряд особенностей, затрудняющих её применение относительно других типов дождевальной техники. Значительной массой движущейся конструкции обусловлено образование глубоких концентрических колеи различного радиуса, негативно влияющей на процесс уборки урожая, и на работоспособность сельскохозяйственной техники. При проведении эффективного дождевания на площади орошаемого участка около 72 га требуется обеспечение тягово-сцепных свойств в местах контакта колёсных движителей с почвой [44,45,55]. Это вызвано различными прочностными характеристиками почвы при контакте подвижных опор с поверхностью земли и

неоднородностями рельефа местности, определяющими направление исследований по совершенствованию ходовой системы дождевальной машины, исходя из снижения энергетических и материальных затрат при её движении. В силу этого, возникает необходимость изучения почвенных условий, с учётом особенностей рельефа местности и возможных методов обеспечения требуемой проходимости колёсных движителей [19,42,43,46]. Размеры сечения образующейся колеи, а также имеющаяся плотность почвы влияют на распределение при поливе и, как следствие, на эффективность работы дождевальной машины [62,63,72,73], определяемую энергетическими и материальными затратами [87,88,89,90,91,92,121,122] при обеспечении совместной и бесперебойной работой колёсных движителей ДМ. Для уменьшения колееобразования в местах контакта ходовой системы с опорной поверхностью применяются технические решения, осуществляющие снижение удельного давления ходовых систем на почву [86], или повышающие прочность поверхности передвижения [8,16,20,93,94,95,96,104]. Последний вариант включает мероприятия, призванные обеспечить необходимую несущую способность почвы [98,70,71].

Одним из наименее затратных способов улучшения проходимости ДМ «Кубань-ЛК1» является метод засыпки колеи посредством заравнивающих устройств [21,22,23,24,25], различной конструкции во взаимосвязи с режимом полива. В настоящий момент отсутствует обоснование технологического процесса заравнивания колеи от ДМ и соответствующая ему комплексная оптимизация параметров колёсных движителей и заравнивающих устройств. Это обуславливает необходимость исследований, направленных на дальнейшее совершенствование ходовой системы дождевальной машины, исходя из обеспечения наименьших энергетических и материальных затрат при её качении.

**Степень разработанности темы.** В разработку и усовершенствование различных систем, предназначенных для ДМ «Кубань-ЛК1», значительный вклад внесли следующие ученые: Н.В. Винникова, А.И. Рязанцев, А.А. Гаврилица, С.Х. Гусейн-заде, Б.М. Лебедев, Н.Ф. Рыжко, Л.В. Кравченко, Д.А.Колганов,

А.О. Антипов и другие.

Исследования показали, что для снижения энергетических затрат на качение и материалоемкости ДМ, необходима разработка технических и технологических решений по повышению опорной проходимости в зоне передвижения её ходовых систем. Для повышения проходимости и тягово-сцепных свойств самоходных тележек существует множество решений, снижающих значение удельного давления ходовых систем на почву до значений, соответствующих имеющимся почвенным условиям. Как правило, отмеченное направление базируется на энергетических и материалозатратных решениях, из-за сложности их конструкций и низкого технологического уровня.

Исходя из этих положений, следует отметить необходимость проведения исследований, направленных на поиск и разработку решений, обеспечивающих повышение несущей способности поверхности передвижения, что в настоящее время является общемировой тенденцией при разработке ходовых систем широкозахватных многоопорных дождевальными машин кругового действия.

**Цель работы.** Улучшение показателей работы дождевальной машины ДМ «Кубань – ЛК1» обоснованием параметров ходовой системы.

**Задачи исследования.**

1. Анализ условий функционирования многоопорных ДМ кругового действия с учетом режима полива при заравнивании колеи.
- 2 Теоретическое обоснование параметров ходовой системы многоопорной ДМ кругового действия на основании предельного значения несущей способности почвы в колее при повторных проходах.
3. Проведение экспериментальных исследований ходовой системы многоопорной ДМ кругового действия.
4. Оценка экономического эффекта от использования многоопорной ДМ кругового действия, оснащённой усовершенствованной ходовой системой с обоснованными параметрами.

**Объект исследования.** Процесс деформации почвы ходовой системой ДМ кругового действия, в зависимости от режима полива при заравнивании колеи.

**Предмет исследования.** Закономерности процесса деформации почвы ходовой системой многоопорной ДМ кругового действия в зависимости от режима полива при заравнивании колеи.

**Научную новизну работы** составляют:

1. Аналитическая зависимость увеличения несущей способности почвы в зависимости от режима полива многоопорной ДМ кругового действия при повторных проходах.

2. Теоретическое и экспериментальное обоснование параметров ходовых систем многоопорной ДМ кругового действия с учетом предельной несущей способности почвы в колее.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке подходов к обоснованию параметров ходовой системы многоопорной ДМ кругового действия при заравнивании колеи.

**Практическая значимость работы** заключается в получении обоснованных параметров ходовой системы дождевальная машины ДМ «Кубань – ЛК1», улучшающих показатели её работы.

**Методология и методика исследований.** При проведении лабораторных, лабораторно-полевых и производственных исследований использовались экспериментальные и опытные образцы ходовой системы ДМ. Регистрация исследуемых параметров производилась в соответствии с разработанной оригинальной методикой проведения экспериментов. При обработке данных определялись основные статистические характеристики, а также достоверность полученных результатов и качество решения задачи исследования. В ходе проведения полевых исследований применялось планирование активного эксперимента.

**Степень достоверности и апробация работы.** Обработка результатов полученных в ходе исследований, подтвердила качество решения поставленной задачи, при величине доверительного интервала не более 0,95. Результаты работы были рассмотрены на конференциях:

1. Научно-практическая конференция, посвящённая 80 - летию со дня



рождения профессора Анатолия Михайловича Лопатина (г. Рязань, 12-13 ноября 2019 г., ФГБОУ ВО РГАТУ им. П.А. Костычева).

2. Современное состояние, приоритетные задачи и перспективы развития аграрной науки на мелиорированных землях (г. Тверь, 25 сентября 2020г, ВНИИМЗ).

3. Перспективные технологии в современном АПК России: традиции и инновации (г. Рязань, 20 апреля 2021 г., ФГБОУ ВО РГАТУ им. П.А. Костычева).

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты анализа условий функционирования многоопорных ДМ кругового действия с учетом режима полива при выравнивании колеи.

2. Результаты теоретического обоснования параметров ходовой системы многоопорной ДМ кругового действия на основании предельного значения несущей способности почвы в колее при повторных проходах.

3. Результаты экспериментальных исследований ходовой системы многоопорной ДМ кругового действия.

4. Оценка экономического эффекта от использования многоопорной ДМ кругового действия, оснащённой усовершенствованной ходовой системой с обоснованными параметрами.

#### **Публикация работ по теме диссертации:**

По теме работы было опубликовано 7 статей, из которых одна в издании Web of Science, 3 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК: «Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева», «Аграрный научный журнал» Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова.

#### **Структура и объём представленной работы.**

Работа содержит введение, состоит из 5 разделов, итоговых выводов, приложений и списка использованной литературы, включающего 123 наименования. Общее содержание работы составляет 158 страниц, из которых основной текст занимает 138 страниц машинописного текста, и содержит 63 рисунка и 29 таблиц, включая приложения.

# **1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

## **1.1. Обзор перспектив развития орошения дождеванием и характеристики многоопорной дождевальная машины ДМ «Кубань-ЛК1»**

Производство сельхозпродукции в странах с высоким уровнем развития применяет орошение, как важнейший способ ослабления влияния неблагоприятных климатических условий на процесс производства продукции.

Более половины производимой сельскохозяйственной продукции выращивается на орошаемых участках и площадях, которые занимают менее 20% от общего количества используемых земель [60].

Более трёх четвертей всех сельскохозяйственных площадей в Российской Федерации находятся в областях, подверженных воздействию засухи в летний период, поэтому производство сельхозпродукции требует применения процессов орошения в сочетании с выпадением природных осадков в виде дождя.

За последние годы произошло снижение орошаемых площадей и сократилось производство оросительных систем.

По состоянию на 2016 год, как следует из данных Минсельхоза РФ, дополнительное количество площадей, на которых возможно земледелие с применением орошения, составляет порядка 2,37 млн. га.

Фонд работоспособных систем в орошении составляет 69,1% от общего количества. Причиной, ограничивающей применение орошения для возделывания сельхозугодий, является размер финансовых вложений в восстановление, производство и создание новых мелиоративных систем, при этом существующие системы эксплуатируются несколько десятилетий без проведения капитального ремонта.

Данные Минсельхоза РФ на 2016 г. об общей площади и количестве используемых орошаемых земель, по различным регионам РФ отображены в

таблице 1.1.

Таблица 1.1. Общая площадь и количество используемых орошаемых земель по различным регионам РФ на 01.01.2016 г.

№ п/п	Федеральные округа РФ	Общая площадь орошаемых земель, тыс. га	В том числе, тыс. га	
			Из них поливалось	Потребность в реконструкции
1	Центральный	480,05	66,79	359,5
2	Южный	1111,06	394,66	484,60
3	Приволжский	895,54	388,43	361,60
4	Уральский	120,18	23,31	64,70
5	Сибирский	499,80	191,90	207,10
6	Дальневосточный	113,29	19,41	43,80
7	Северо-Западный	17,66	0,30	14,10
8	Северо-Кавказский	1023,17	380,12	365,00
9	В целом по РФ	4260,75	1847,9	2373,4

На начало 2019 года общее количество единиц техники дождевальная техника составило 13,5 тыс. Из них было зарегистрировано: 1) «Фрегат» – 5300 шт., 2) ДДА-100, 100МА – 2700 шт., 3) «Волжанка» – 2400 шт., 4) ДДН-70, 100 – 1800 шт., 5) «Кубань-ЛК1» – 500 шт., «Днепр» – 200 шт., зарубежные образцы – 700 шт.

По данным различных источников, весь парк состоит из машин, на 80% отработавших срок эксплуатации. Ранее выпущенные дождевальные машины «Днепр» и «Фрегат» морально и материально устарели. Это вызывает необходимость их восстановления с поддержанием в работоспособном состоянии, учитывая последние научные разработки при проведении модернизации [34,60], а также разработку и производство эффективных образцов дождевальной техники с использованием современной элементной базы для снижения материалоемкости и энергетических затрат [89] при её производстве и эксплуатации.

В основном для проведения орошения в РФ применяется дождевание – на 94% орошаемых земель, поверхностный полив осуществляется на 4% площадей, что говорит о преимуществах первого способа, заключающихся в более высокой эффективности в различных почвенных, рельефных и климатических условиях, встречающихся на территории РФ [60]. Это обусловлено следующими

преимуществами первого способа над вторым:

1. При поливе участков со сложным рельефом исключена планировка земель для дальнейшего осуществления орошения.
2. Уменьшение засоления и заболачивания орошаемых площадей.
3. Более эффективное использование водных ресурсов за счёт регулирования требуемого расхода воды в соответствии с нормами полива для конкретных условий.
4. Как следствие, появление возможности наращивания запасов воды, что особенно важно для засушливых погодных условий.
5. Возрастание производительности труда при проведении полива за счёт автоматизации и механизации, и сокращения времени его производства.
6. Воспроизведение микроклимата при поливе (влажности и температуры), способствующего ускоренному росту растений.
7. Осуществление равномерного полива при образовании дождя на большой площади орошения.
8. Наличие возможности для внесения минеральных и органических удобрений [91], средств химической защиты растений совместно с применяемой водой.

За время с начала 90-х годов XX века многие заводы, выпускающие дождевальную технику, перепрофилировались на выпуск другой продукции, но в последние годы активно развиваются следующие предприятия:

ООО «Агрополив СПб» г. Санкт-Петербург, Волгоградский тракторный завод, ООО «Мелиоративные машины» г. Саратов, «Мелиотехмаш» г. Котельников, ПО «Кропоткинский машиностроительный завод «Радуга» г. Кропоткин, ООО «Агроижиниринг» г. Москва, Казанский завод оросительной техники г. Москва, ООО «САБОНагро» г. Гулькевичи, Волгоградский завод оросительной техники, ООО «БСГ» г. Тольятти.

За период с 2008 г. по 2019 г. было произведено 360 единиц дождевальной техники, что недостаточно при существующих условиях. По данным Минсельхоза РФ, для сохранения существующих площадей орошения

необходимо дополнительно около 29 тыс. многоопорных дождевальных машин кругового действия.

Использование широкозахватной дождевальной техники является наиболее приоритетным при осуществлении мелиоративных мероприятий [93,94,95,96,97] по причинам высокого качества и равномерности формируемого дождя, интенсивность которого можно регулировать в широких пределах при высокой точности дозировки внесённых удобрений и химикатов. Полив может быть осуществлён с требуемой частотой, при поддержании определенной температуры и влажности в приповерхностном слое почвы, в условиях неоднородного рельефа, и при повышенных углах наклона местности [15]. Высокая степень автоматизации полива позволяет одному оператору осуществлять контроль за несколькими работающими в одном месте дождевальными машинами (ДМ) [37,38].

В источниках описано применение многоопорных широкозахватных машин для гидропосева семян кукурузы по пшенице образцами техники фирмы «Valmont Industries», и при уборке овощей и винограда – фирмы «Noble Linear» [22]. В таблице 1.2 размещены данные по затратам средств на полив для техники разных типов, распределённых по параметрам трудовых затрат и её энергоёмкости [22,25].

Как следует из приведённых данных, использование широкозахватных многоопорных дождевальных машин кругового действия наиболее предпочтительно по причинам низкой энергоёмкости и трудовых затрат при проведении полива.

Исследования, проводимые при орошении кукурузы [22,25], доказали большую эффективность многоопорных широкозахватных ДМ относительно сезонных трубопроводных переставных систем с точки зрения экономии затрат на 20–25 %, при удешевлении оплаты труда более чем на 60%.

Таблица 1.3 отображает данные по затратам средств и трудоёмкости при проведении полива широкозахватными ДМ, по сравнению с другими системами орошения (Германия и США) [22,25].

Таблица 1.2. Определение наибольшей эффективности различных типов оросительных систем по различным факторам проводимой оценки

Затраты средств на полив	Затраты труда на полив	Энергоемкость
Колесные трубопроводы	Многоопорные ДМ кругового действия	Многоопорные ДМ кругового действия
Многоопорные ДМ кругового действия	Стационарные системы	Колесные трубопроводы
Разборные установки	Колесные трубопроводы	Разборные установки
Шланговые машины с подтягиванием за трос	Шланговые машины с подтягиванием за трос	Стационарные системы
Стационарные системы	Разборные установки	Шланговые машины с подтягиванием за трос

Таблица 1.3. Затраты при проведении дождевания различными средствами орошения

Дождевальная техника	Относительные затраты средств	Относительные затраты труда на полив
Шлейф	1,5	0,4
Колесные трубопроводы	1,9	0,4
Позиционные многоопорные машины со шлейфами	2,0	0,35
Машины с вращающейся фермой	1,2	0,75
Шланговые машины с подтягиванием за трос	1,7	0,30
Многоопорные машины с поливом в движении	1,8	0,15
Фронтальные многоопорные машины с поливом в движении	2,0	0,25
Стационарные и сезонно-стационарные системы	5,0 и более	менее 0,20

Приведённые данные подтверждают наибольшую экономическую эффективность применения многоопорных дождевальных машин.

Патент на первую дождевальную машину кругового действия был получен в США в 1952 г. На основании приобретённой лицензии фирма Valmont Industries организовала выпуск дождевальных машин Valley, изначально снабжённых гидроприводом. Были произведены модификации для различных условий

применения. Широкий ряд существующих преимуществ вызвал рост производства дождевальных машин подобного типа. В 1971 году в США находилось более 20 фирм-производителей, выпускавших свыше 30 моделей машин. Различия между ними заключались в типе привода (электрический или гидравлический) и в геометрических размерах оросительных секций. В лидеры рынка дождевальной техники выдвинулась Valmont Industries с машинами типа «Valley» (рисунок 1.1) [13]. В европейских странах выпускались модели Irri France (рисунок 1.2), «PP», Bauer, Jeffry Eng. Co, «DКК», Intersigma [22,25].

С целью повышения урожайности сельскохозяйственных культур Советским Союзом в Соединённых Штатах приобретена конструкторская документация для производства широкозахватных дождевальных машин кругового действия (ДМ) типа «Фрегат» [22,25], аналога модели Valley 1060 (1076), которые были оборудованы поршневыми гидравлическими двигателями. Достоинством моделей явились надёжность и простота, низкая энергоёмкость, автоматизация полива при удобстве эксплуатации.

В дальнейшем компанией Valmont Industries создавались модели, оснащённые электроприводом, что является основным направлением развития современной дождевальной техники. В моделях Valmont 2060 и 2070 применялся электропривод, состоящий из электродвигателя, карданных передач и редукторов, которые устанавливались на каждую из опорных подвижных тележек.

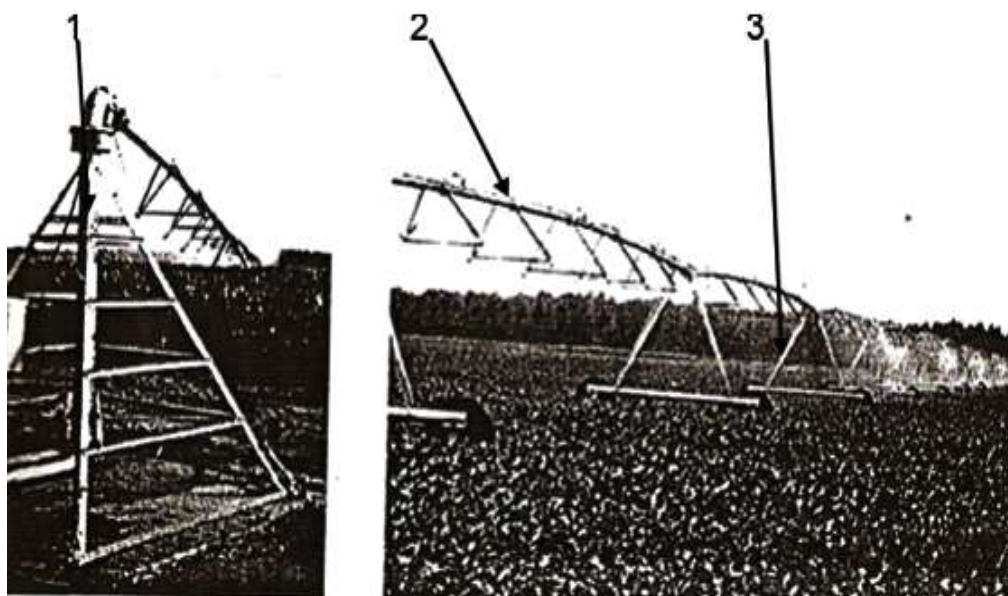
Аналогично осуществлялось развитие фирмы Lindsay Manufacturing с машинами «Zimmatic». На сегодняшний день фирмой выпускаются модели с шириной захвата до 800 метров, что обуславливает различный диаметр трубопроводов, применяемых для подачи воды.

В ДМ применяются следующие размеры трубопроводов: 254 мм для внутренних пролётов, 203 мм для систем длиной более 249 м, 168 мм для систем 396 метровой длины с расходом 63 л/с, 141 мм для систем с малым расходом воды.

К числу известных производителей дождевальной техники относится Reinke Manufacturing Company, выпускающая популярные модели:



Рисунок 1.1. Широкозахватная дождевальная машина Valley 1060 производства фирмы Valmont Industries



1 – центральная опора; 2 – трубопровод; 3 - тележка ходовой системы

Рисунок 1.2. Широкозахватная дождевальная машина производства фирмы IriFrance



1) Модель Reinke Alligator – поливная система из алюминиевых конструкций, предназначенная для дерновых почв, исключая образование колеи.

2) Модель под названием Reinke Minigator применяется для полей неправильной формы, а также различных углов уклона местности.

В 1987 году закончились государственные испытания, и в серийное производство поступила разработанная СКБ «Дождь» совместно с ВНПО «Радуга», электрифицированная дождевальная машина кругового действия «Кубань-ЛК1», созданная на базе электрифицированных машин фронтального действия «Кубань-ЛК» и «Бригантина».

Электрический привод машины аналогичен зарубежным образцам. Он содержит центральный мотор-редуктор с червячной передачей, двухколёсных червячных редукторов и карданных передач.

ДМ «Кубань-ЛК1» по своим техническим характеристикам соответствует показателям мирового уровня [111]. Различные модификации ДМ «Кубань-ЛК1» с максимальным значением рабочей длины 614 м обеспечивают работу при различных условиях: 1) спокойного уклона – до 0,01; 2) среднего – от 0,02 до 0,05, 3) большого – от 0,05 до 0,07.

Всего существует 132 модификации, отличающиеся рабочей длиной машины и расходом воды в секунду на гектар орошаемой площади. Сечение основного трубопровода имеет размеры: 203x2,65 мм, консолей – 152,4x1,9 мм и 102x2,5 мм.

Максимальная площадь орошения составляет около 120 га, при расходе воды до 90 л/с. Пиковое значение мощности, потребляемой от электрической сети, составляет 9,6 кВт. Нормы полива регулируются от 89 до 890 кубометров на гектар площади. При наличии свойственных многоопорной дождевальной машине ДМ «Кубань-ЛК1» преимуществ [122], существует необходимость её дальнейшего совершенствования с целью использования экологически безопасных и энерго и ресурсо сберегающих технологий при наименьшей материалоемкости и максимальной производительности.



а



б

1 – центральная опора ДМ; 2 – трубопровод; 3 – тележка ходовой системы ДМ

Рисунок 1.3. Дождевальная машины «Кубань-ЛК1» на картофельном поле  
а – вид со стороны неподвижной опоры; б – вид со стороны консольной части

## 1.2. Характеристика энергетических затрат на передвижение ДМ «Кубань-ЛК1»

Из общих энергетических затрат на производство полива ДМ «Кубань-ЛК1», значительная часть приходится на процесс передвижения, определяемого конструкцией привода и типом ходовых систем её тележек [6]. Энергетические затраты на передвижение машины в свою очередь определяются потерями в приводе и сопротивлением перекачиванию по образующейся колее колёсных движителей ходовых систем ДМ. Для повышения КПД привода электрифицированных дождевальных машин зарубежных фирм применяют моторы-редукторы различной конструкции с использованием дифференциальных механизмов.

Компания TL Irrigation Company впервые применила вместо цепных карданные передачи с одним двигателем. Для снижения энергетических затрат были использованы двигатели с приводом на планетарной передаче для каждого колеса тележки. Указанные мероприятия позволили увеличить КПД с 50 до 90%.

В ДМ «Кубань-ЛК1» значительная часть энергии затрачивается на преодоление сопротивления передвижению тележек, при использовании материалоемких широкопрофильных шин  $21.3R24$  или  $18.3R24$ , и сравнительно мощных мотор-редукторов (не менее 1,1 кВт). Суммарная мощность всех приводов машины складывается из мощностей, потребляемых всеми её тележками (около 10, 0 кВт).

Исходя из этого, снижение затрат на сопротивление передвижению машины, определяемое уменьшением колесобразования (повышением проходимости), снижением материалоемкости при обеспечении высокой надёжности ходовой системы, является важнейшей задачей по совершенствованию и росту технического уровня ходовых систем.

Широкозахватная многоопорная ДМ «Кубань-ЛК1» функционирует в усложнённых условиях при высокой влажности почвы, значительной рабочей длине машины до 600 м, различными прочностными и рельефными

характеристиками поверхности орошения на площади до 120 га.

Подвижные опоры дождевальная машины кругового действия за время длительности поливного сезона, осуществляют многократные передвижения по фиксированным траекториям со скоростями до 2,5 м/мин. Из-за большого количества подвижных колёсных опор, при различных прочностных и рельефных характеристиках поверхности орошения площадью до 120 га, наблюдаются значительные искривления конструкции многоопорной ДМ кругового действия. В условиях склоновых участков со сложным рельефом возможно скатывание тележек, приводящее к срабатыванию аварийной защиты, что негативно сказывается на обеспечении бесперебойности проведения дождевания.

Изучение вопросов, связанных с параметрами колееобразования и степенью уплотняемости почвы [103,110] имеет большое значение. Образование колеи глубиной более 0,30 м вызывает множество отрицательных факторов. Наряду с увеличением потребляемой мощности при проведении кругового полива, происходит снижение производительности уборочной и другой сельскохозяйственной техники на орошаемых площадях, ухудшение качества полива при повышении водной эрозии почвы, приводящей к её деградации и снижению урожайности.

Повышение опорной проходимости ДМ «Кубань-ЛК1», за счёт снижения сопротивления качению при уменьшении колееобразования ДМ, определяет необходимость уменьшения давления на неё ходовых систем, или увеличения несущих свойств почвенной поверхности передвижения. Такие показатели почвы, как механический состав, влажность, водопроницаемость, объёмный и удельный вес являются основными параметрами, определяющими её несущую способность.

Прочностные и несущие свойства почвы, в первую очередь зависят от влажности. Изменение её от 20 до 30 % приводит к снижению сопротивления сдвигу в несколько раз [22,25,57]. Ухудшение прочностных свойств приводит к увеличению потерь на перекатывание колёс и снижению тяговых характеристик. Это явление особенно проявляется при работе ДМ с нормами полива, превышающими 400 кубометров на гектар, при увлажнении почвы на глубинах

200-300 мм до предела текучести. При движении колеса происходит выдавливание почвы из колеи, с образованием почвенных призм выпирания (рисунок 1.4) [22,25].

Повышенную интенсивность образования колеи при снижении сцепных свойств с общим уменьшением проходимости ходовых систем вызывает вода, не впитавшаяся при поливе в колее. Явление переполива наблюдается при работе ДМ из-за особенностей конструкции водопроводящего трубопровода, и схем расстановки дождеобразующих устройств. Опыт эксплуатации ДМ кругового действия показал, что наибольшее значение глубины колеи наблюдается в начале и в конце вращающейся конструкции ДМ из-за увеличенного слоя осадков вследствие повышенной интенсивности дождя (рисунок 1.5).

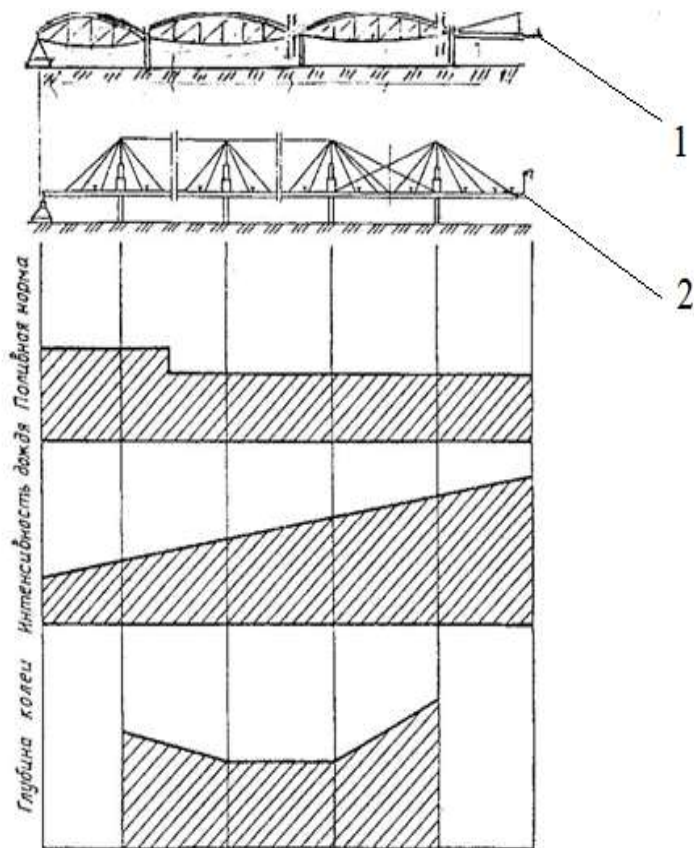
В условиях сложного рельефа [44], особенно в замкнутых котлованах и низинах с глинистыми почвами, создаются тяжёлые условия для работы ДМ, связанные с не впитавшейся в них водой. Происходит перенасыщение почвы влагой, и вода застаивается над поверхностью. В таких случаях наблюдается уменьшение эффективности применения ДМ из-за значительных параметров колееобразования и снижения технологических характеристик процесса полива. Аналогичные явления могут возникать при поливе увеличенными нормами, из-за неоднородного распределения физико-механических свойств почвенной поверхности [22,25].

Основными параметрами [49], определяющими значение давления ходовых систем дождевальных машин на почву, при имеющихся её несущих свойствах [57], являются энергетические затраты на передвижение, определяемые параметрами почвенной деформации при образовании стока, условия работы МТА [26], а также повреждаемость растений. В качестве обобщённого критерия оценки может быть использована глубина полученной колеи. Агротехническими требованиями на дождевальную электрифицированную машину кругового действия от 11.08.1985г.[1], определено значение глубины колеи  $0,05 \pm 0,02$  м.

Однако, существующие параметры колееобразования при многократных круговых поливах определяют увеличенные энергетические затраты [89] на



Рисунок 1.4. Колееобразование тележки ДМ «Кубань-ЛК1»



1 – «Кубань-ЛК1»; 2 – «Фрегат»

Рисунок 1.5. Распределение качества полива и колееобразования по длине ДМ кругового действия

передвижение, совместно с другими отрицательными последствиями [93,94,95].

Указанное значение глубины колеи хорошо сочетается с положениями ГОСТ Р 58655-2019. «Техника сельскохозяйственная мобильная – Норма воздействия движителей на почву» [18], согласно которому допустимое давление сельскохозяйственной техники на суглинистую почву не должно превышать 80 кПа. В указанных пределах при допустимой глубине колеи (0,05-0,07м) [1], находится значение давления существующей ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1». С учётом отмеченного, и на основании мирового опыта по повышению проходимости машин, конструирование ходовой системы для дождевальных машин, в частности, для «Кубань-ЛК1», может осуществляться по двум направлениям, характеризующимся следующими концепциями [11,81,100]:

– «верх-низ»: параметры ходовой системы машины, определяющие их воздействие на почву, обосновываются, исходя из действительных значений несущей способности поверхности передвижения [16,95].

Достоинство: обеспечивается снижение сопротивления передвижению машины, недостаток: увеличение материалоемкости ходовых систем и повреждаемости растений за счёт повышения опорной площади.

– «низ-верх»: под ходовые системы с имеющимися параметрами подготавливается поверхность передвижения с необходимыми значениями несущей способности почвы.

Достоинство: при снижении материалоемкости ходовых систем, уменьшается сопротивление передвижению, и повреждаемость растений.

Второе направление по конструированию ходовых систем получило наибольшее распространение во всём мире [11]. Оно наиболее приемлемо для многоопорной дождевальной техники типа ДМ «Кубань-ЛК1», учитывая движение опорных тележек по одним и тем же траекториям орошаемой площади в течение поливного периода, и соответственно более объективное прогнозирование изменения показателей прочности почвы в зоне движения опор ДМ при образовании колеи.

В следующем разделе приведён краткий анализ технических и



технологических решений по уменьшению колееобразования многоопорными дождевальными машинами, на основе указанных выше направлений по конструированию ходовых систем.

### **1.3. Существующие подходы при проведении мероприятий по обеспечению опорной проходимости многоопорных дождевальных машин**

#### **1.3.1. Снижение давления ходовых систем дождевальных машин на почву**

Для уменьшения давления на почву и снижения колееобразования дождевальных машин используют различные виды уширителей ходовых систем [94,96].

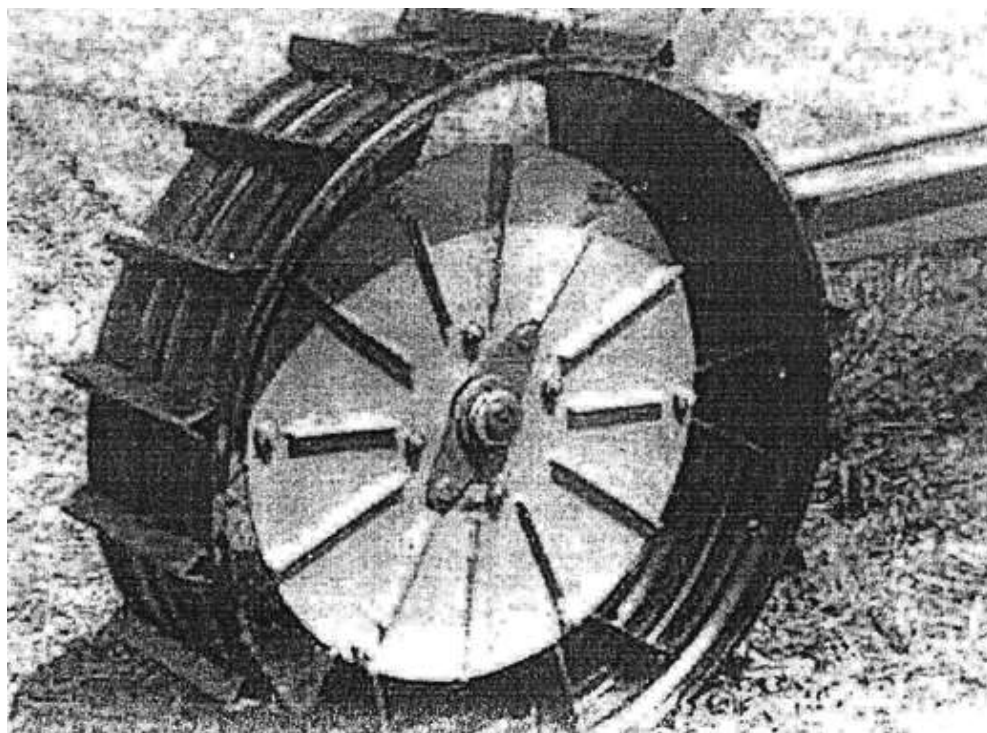
Общий вид дождевальной машины «Коломенка» и дождевальной машины ДМ «Фрегат», оснащённых уширителями колёс, представлены на рисунке 1.6 и 1.8 соответственно. Общий вид дождевальной машины ДКШ-64 «Волжанка», оснащённой дополнительными жёсткими колёсами представлен на рисунке 1.7.

В условиях затопляемых площадей рисовых плантаций с целью обеспечения необходимой опорной проходимости дождевальной машины фронтального действия «Кубань-Л», самоходные тележки дополнительно дооборудовались жёсткими уширителями колёс (рисунок 1.9).

За счёт увеличения ширины профиля колеса, указанные мероприятия характеризуются повышенной материалоемкостью и повреждаемостью растений, поэтому не обладают высокой эффективностью при относительной простоте реализации.

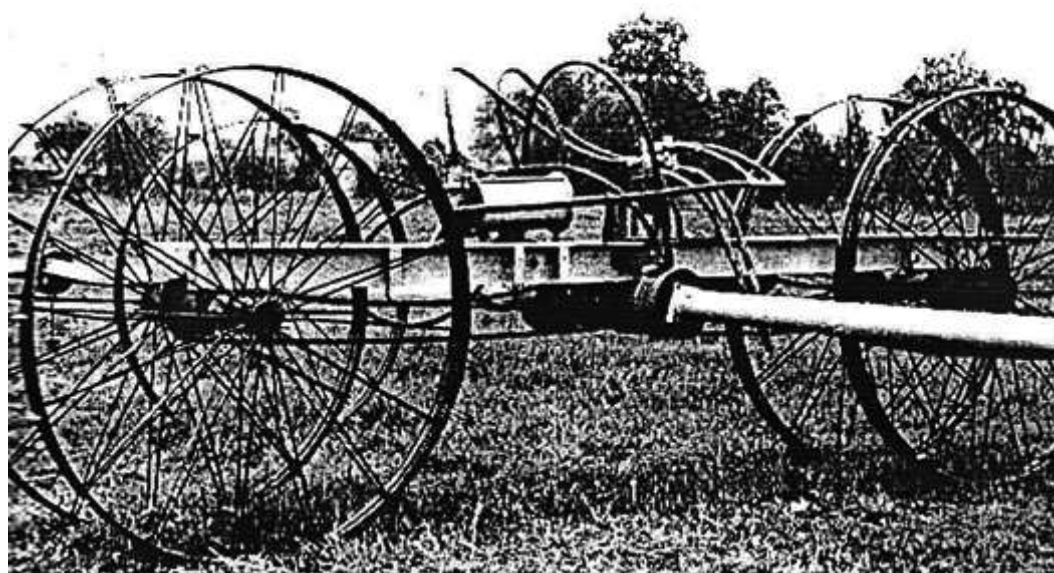
Для снижения глубины колееобразования от ходовых систем дождевальных машин в Великобритании применяются надеваемые на колесо цилиндрические клетки с почвозацепами, которые распределены равномерно по всему ободу. Угол расположения почвозацепов относительно линии приложения касательного усилия составляет  $30^{\circ}$  или  $60^{\circ}$ . Указанные меры имеют высокую эффективность





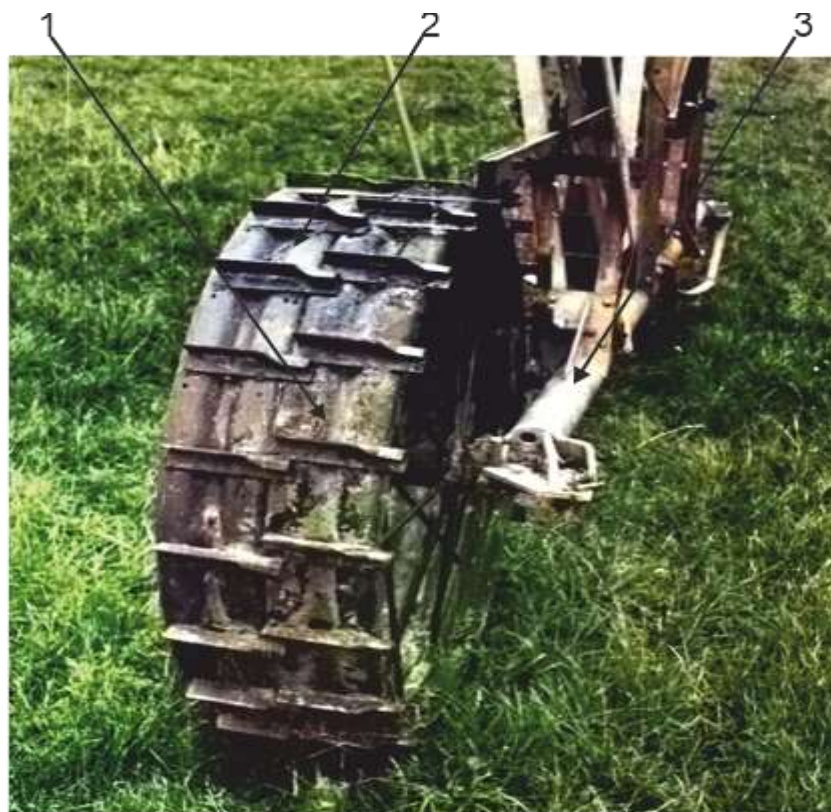
1 – рама тележки; 2 – уширитель; 3 – ходовое колесо

Рисунок 1.6. Колесо с уширенным колесом ДМ "Коломенка"

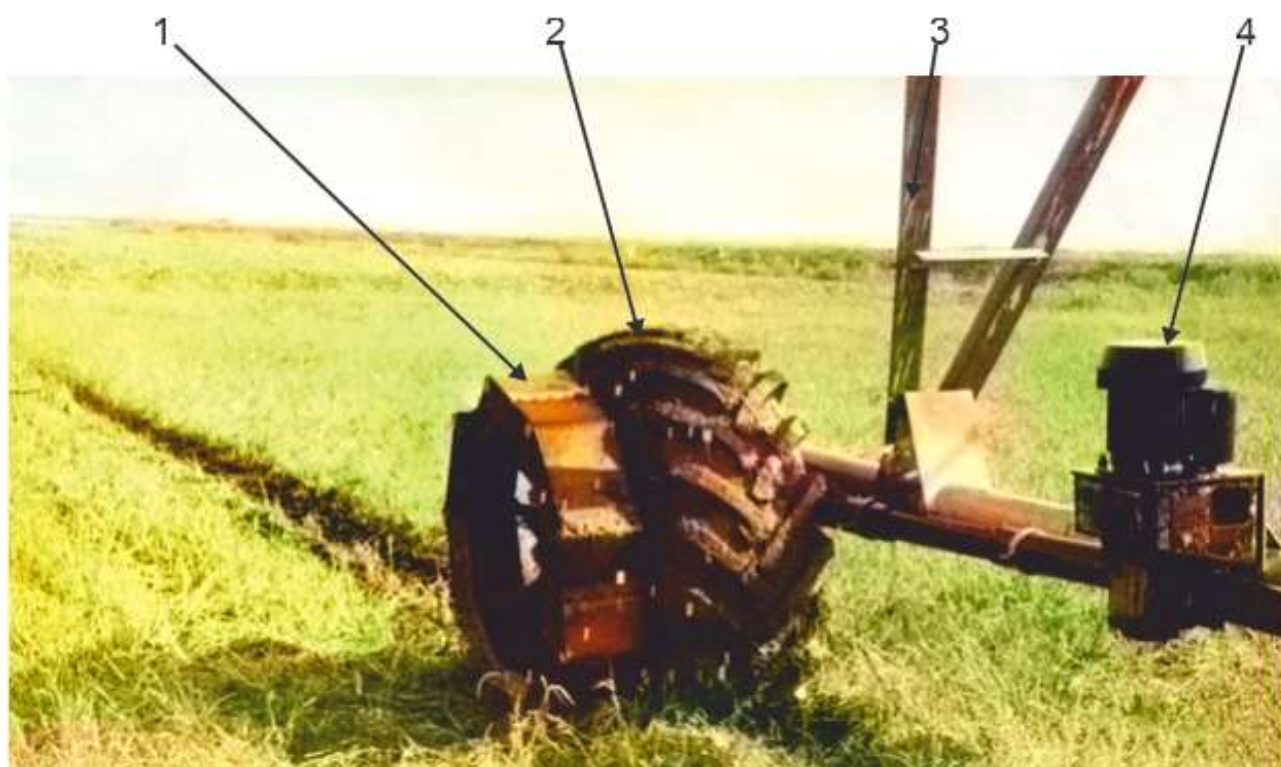


1 – ходовые колеса центральной тележки; 2 – привод; 3 – водопроводящий пояс

Рисунок 1.7. ДКШ-64 «Волжанка» с дополнительными колесами



1 – серийное ходовое колесо; 2 – уширитель; 3 – рама тележки  
 Рисунок 1.8. Тележка ДМ «Фрегат» с уширенными колесами



1 – уширитель колеса; 2 – пневматическое ходовое колесо; 3 – рама тележки;  
 4 – электродвигатель

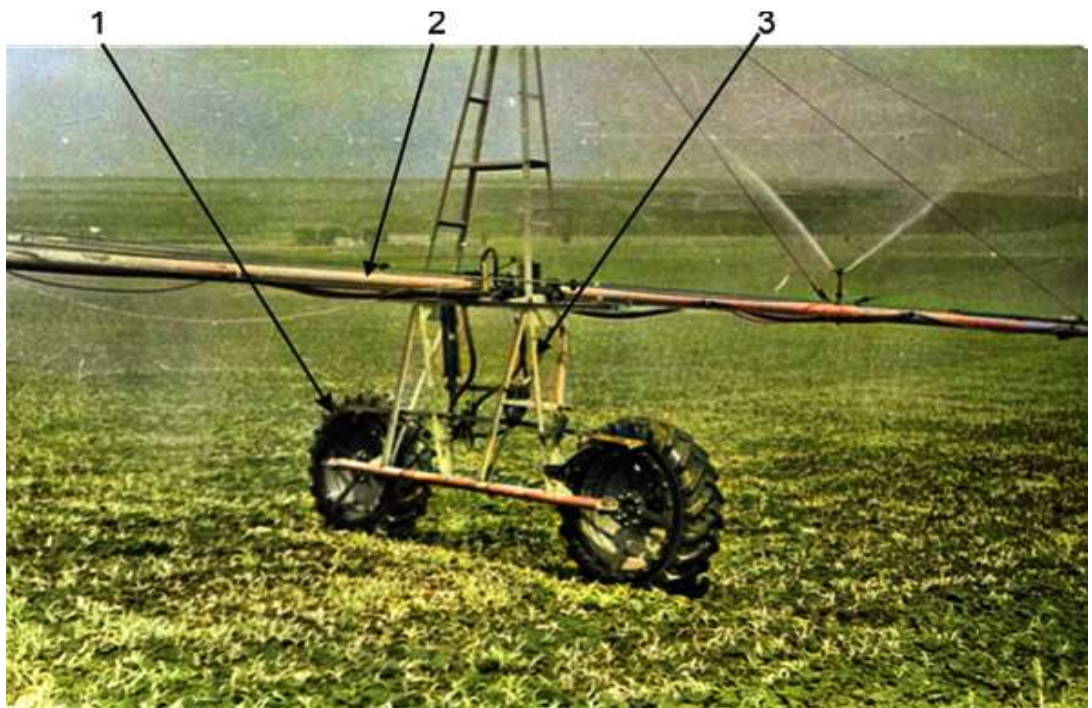
Рисунок 1.9. Уширенное колесо ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1»

[22,25], уменьшая глубину колееобразования до значений практически в два раза меньших, относительно значений, полученных для пневматического колеса, при одинаковой ширине профиля. Возможно комбинированное использование обычных колёс и колёс, оснащённых цилиндрической клеткой, как при увеличении общей ширины профиля колеса, так и при их тандемном соединении, с целью повышения проходимости ходовой системы за счёт увеличения площади контакта колёсных движителей с почвой. Однако, подобные мероприятия характеризуются значительным увеличением материалоемкости и стоимости ходовой системы.

Также, с целью снижения удельного давления ходовых систем на почву применяется дополнительное дооборудование пневматическими шинами. В частности, ДМ «Фрегат» оборудованная шинами *15.5R38*, представлена на рисунке 1.10 [97]. Произведённая доработка заключается в установке ступицы и цилиндрической конструкции с зацепами, одеваемой и фиксируемой поверх серийного ходового жёсткого колеса. Длину малого плеча рычага гидропривода тележек с целью обеспечения требуемых скоростных характеристик необходимо уменьшить [27] с 290 до 200 мм [22,25]. Переход на пневматические шины позволил значительно улучшить параметры проходимости, при снижении энергетических затрат на передвижение ходовой системы дождевальная машины ДМ «Фрегат» [69].

Для обеспечения достаточных тягово-сцепных характеристик и опорных свойств серийно выпускаемые ДМ «Кубань - ЛК1» оснащают пневматическими шинами *21.3R24 (18.4R24)* (рисунок 1.11). При этом стоимость комплекта пневматических колёс для базовой модификации (10 тележек) составляет более 25% от стоимости машины. Возможное снижение колееобразования посредством применения олигомерных шин низкого давления [44] ещё более усугубляет ситуацию. Это вызывает необходимость заводу-изготовителю (г. Тольятти) производить модификацию «Кубань-ЛК1» на жестких колесах, которая наряду со сниженной стоимостью, имеет очень узкий диапазон применения в условиях твёрдых почв.





1 – пневматическая шина, 2 – водопроводящий пояс; 3 – рама тележки

Рисунок 1.10. Ходовая система ДМ «Фрегат» на пневматических шинах 15,5x38



1 – пневматическая шина; 2 – рама тележки

Рисунок 1.11 - Ходовая система ДМ«Кубань-ЛК1» на пневматических шинах  
21.3R24 (18.4R24)

На рисунке 1.12. представлен общий вид гусеничных движителей, разработанных в ВНПО «Радуга», и представляющих собой резиновые ленты, передвигаемые грунтозацепами жёсткого колеса. Применение дополнительных колёс обеспечивает контакт ленты с почвой, и снижает удельное давление ходовой системы ДМ на неё [93,96].

Разработанный тип движителя характеризуется высокой проходимостью при различном профиле рельефа орошаемой поверхности. Кроме этого, за счёт значительного снижения удельного давления на почву обеспечивается уменьшение глубины почвенной деформации и энергетических затрат на передвижение.

Несмотря на преимущества, широкого распространения указанный движитель из-за сложности реализации и повышенной материалоемкости, связанной с установкой дополнительных колёс, не получил.

В ОКБ «Титан» были разработаны гусеничный и шагающий движители для ДМ «Кубань-ЛК1» [97] (рисунок 1.13 и 1.14). В ходе проведённых испытаний, была определена высокая надёжность работы ДМ при снижении параметров колееобразования, однако значительное увеличение материалоемкости, технологические сложности при реализации движителей, а также значительное увеличение стоимости ДМ в целом, привели к прекращению дальнейших исследовательских работ в этом направлении снижения удельного давления ходовой системы на почвенную поверхность передвижения. Аналогичные конструкции были реализованы в ДМ «Rainman» американского производства, германской ДМ «RFA-600», и «Plant-5NB» австрийского производства [22,25]. Указанные модели применяются в условиях высокой влажности почвенной поверхности передвижения.

Другим направлением снижения удельного давления на почву является применение в конструкции ДМ облегчённых материалов. Компания «Irrifrance» использует алюминиевую ферму со сниженной массой, что вызывает значительное уменьшение глубины почвенной деформации при работе ДМ [22,25].





а



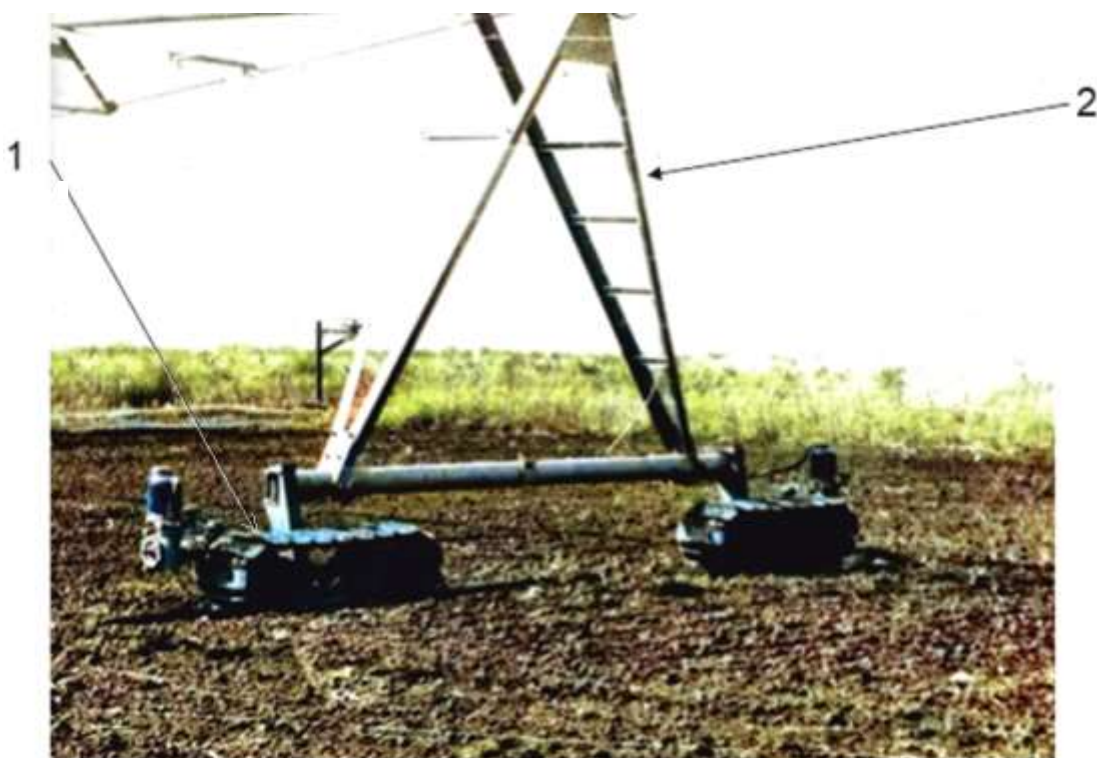
б

1 – гусеничный движитель; 2 – рама тележки

Рисунок 1.12. Ходовая система ДМ «Фрегат» на гусеничном движителе

а – двухпозиционным, б – для работы на одной позиции.





1 – гусеничный движитель; 2 – рама тележки

Рисунок 1.13. Общий вид тележки ДМ «Кубань-ЛК1» на гусеничном движителе



1 – шагающий движитель; 2 – рама тележки;

Рисунок 1.14. Общий вид тележки ДМ «Кубань-ЛК1» на шагающем движителе

### **1.3.2. Повышение несущей способности почвы в зоне движения ходовых систем многоопорных широкозахватных дождевальных машин**

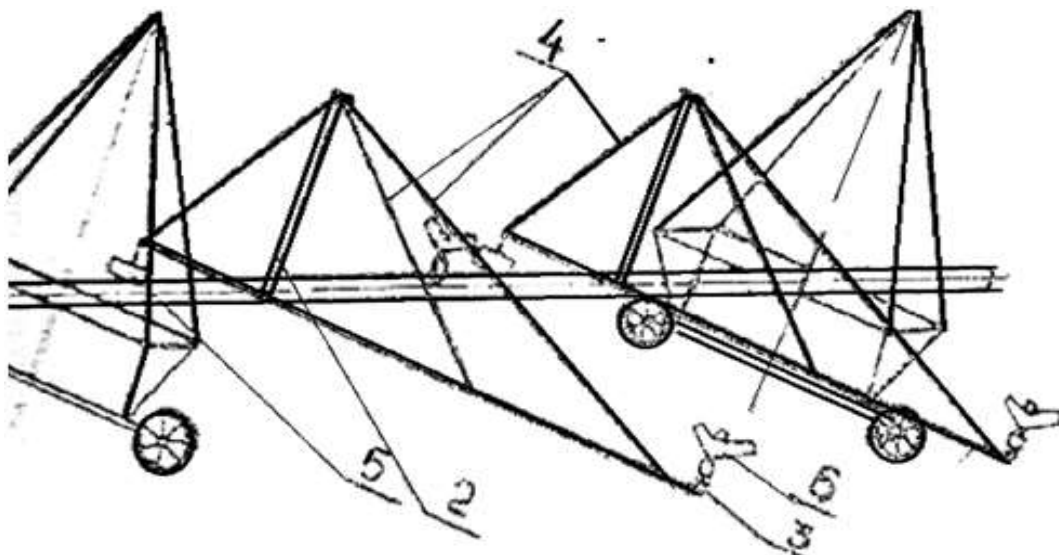
Ранее известные технические решения по повышению несущих свойств почвы, строились посредством отвода оросительной воды от зоны качения ходовых систем дождевальных машин. Для ДМ «Фрегат», с целью снижения влияния оросительной воды на параметры колееобразования, И.С. Кокурин предложил вынос дождеобразующих устройств за пределы указанной зоны (рисунок 1.15). Однако предложенное решение является недостаточно эффективным при существующем влиянии ветра на распределение дождя, и обладает повышенной материалоемкостью.

Для отвода воды из зоны колееобразования ДМ «Фрегат» разработаны оригинальные конструкции сливных устройств (рисунок 1.16).

Кроме этого, с целью уменьшения интенсивности влияния дождя на процесс деформации почвы ходовыми системами дождевальных машин в зоне их движения, на водопроводящем трубопроводе устанавливаются дождеобразующие устройства, которые обеспечивают более высокую равномерность дождя [37,41, 75,76,77] или уменьшение расхода [38,59,64,80]. Также применяются щитовые ограждения приводных узлов тележек. В качестве меры, позволяющей добиться повышения несущей способности, применялось бетонирование или асфальтирование поверхности передвижения колёсных опор. В Германии, Канаде и США [22,25], этот метод применялся в тяжёлых почвенных условиях, показал свою эффективность, но широкого распространения не приобрёл. Это объясняется сложностями, возникающими при работе пропашных агрегатов, а также высокой стоимостью работ при реализации указанного метода.

Более простым и дешёвым вариантом уменьшения колееобразования при работе широкозахватных многоопорных дождевальных машин кругового действия, является применение метода кольцевой вспашки с формированием опорного гребня в местах качения колёсных движителей ходовых систем.





2 – вертикальная опора; 3 – открьлок; 4 – растяжки; 5 – водопроводящий пояс; 6 –дождевальньй аппарат

Рисунок 1.15. Схема выноса дождевальньх аппаратов на ДМ «Фрегат»



1 – сливные насадки; 2 – водопроводящий пояс; 3 – тележка

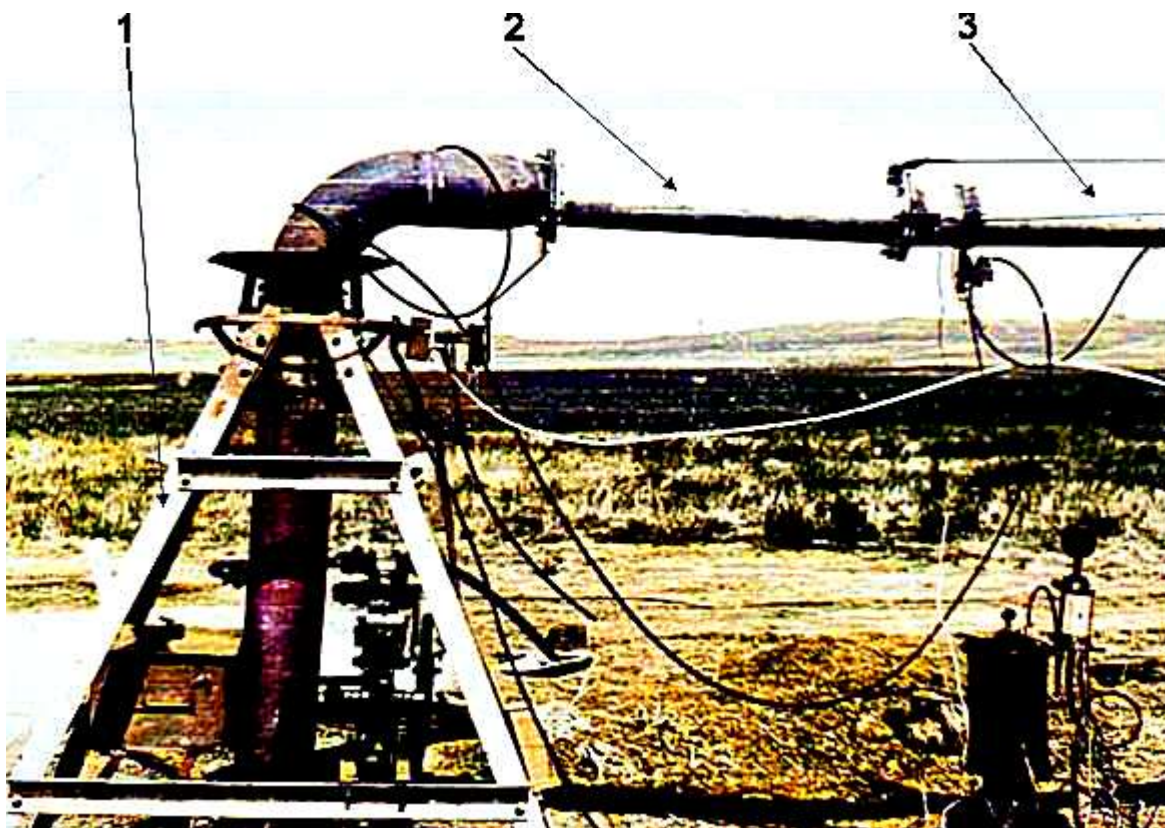
Рисунок 1.16. Слив воды из гидропривода модернизированной системой ДМ «Фрегат»

Подобные мероприятия осуществлялись в колхозе «Орлянский» (Украина), и в Колорадо (США) [22,25], с использованием круговой схемы работы МТА перед началом поливного сезона, и при уборке урожая. При этом был отмечен рост потерь в местах качения ходовых систем ДМ. Это объясняется повышением высоты среза растений с целью исключения поломки ножей об имеющиеся почвенные призмы выпирания, полученные в ходе деформации ходовой системой. Также отмечалось снижение производительности на 20-25%, и практическая невозможность выращивания пропашных культур на орошаемых площадях.

Существует метод повышения опорной проходимости ДМ машины «Фрегат», связанный с установкой в месте нахождения неподвижной опоры трубчатой вставки [70]. Длина вставки должна составлять более 1,6 ширины колёсного движителя, для исключения возможности движения по прежней колее (рисунок 1.17). Процесс требует дополнительных временных и материальных затрат, приводит к нарушению непрерывности процесса дождевания, и повышению заминаемости растений. Из-за образования дополнительных следов от ходовых систем ДМ, усиливается процесс эрозии, ведущий к почвенной деградации и снижению урожайности.

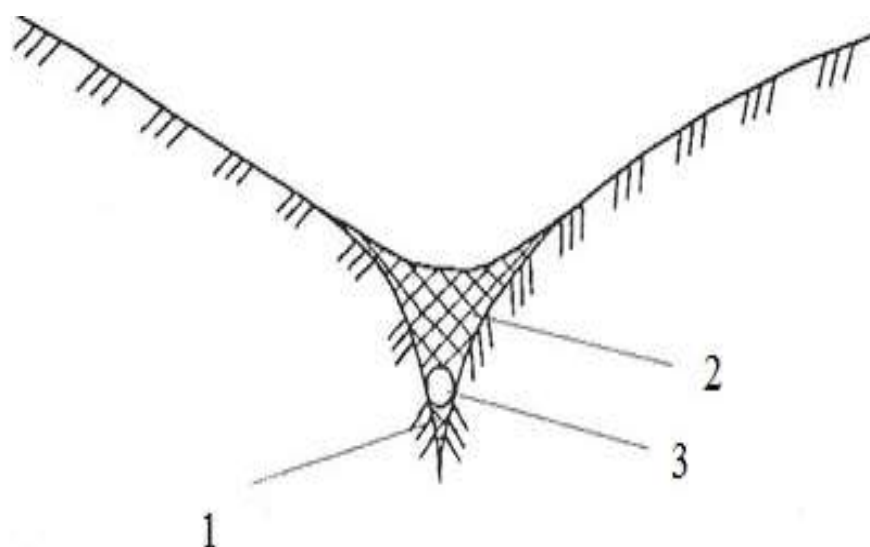
Специальная подготовка поверхности передвижения колёсных опор проводилась в колхозе «Орлянский» (Украина) [22,25]. В местах пересечения следов от ДМ с понижениями рельефа, насыпались земляные подушки которые в дальнейшем выравнивались при сопряжении поверхностей подушек с местностью. Для отведения ливневых и талых вод из области качения ходовых систем, в тальвегах глубиной (0,8-1,0м) подготавливались посредством бетонирования, специальные водоотводящие каналы с трубчатым водовыпуском (рисунок 1.18).

Следует отметить, что указанная методика подготовки поверхности передвижения ходовых систем ДМ, является энергоёмкой и характеризуется высокими трудозататами, при этом не всегда оказывается эффективной.



1 – неподвижная опора; 2 – вставка; 3 – водопроводящий пояс первого пролета

Рисунок 1.17. Установка трубчатой вставки между неподвижной опорой и первым пролётом ДМ

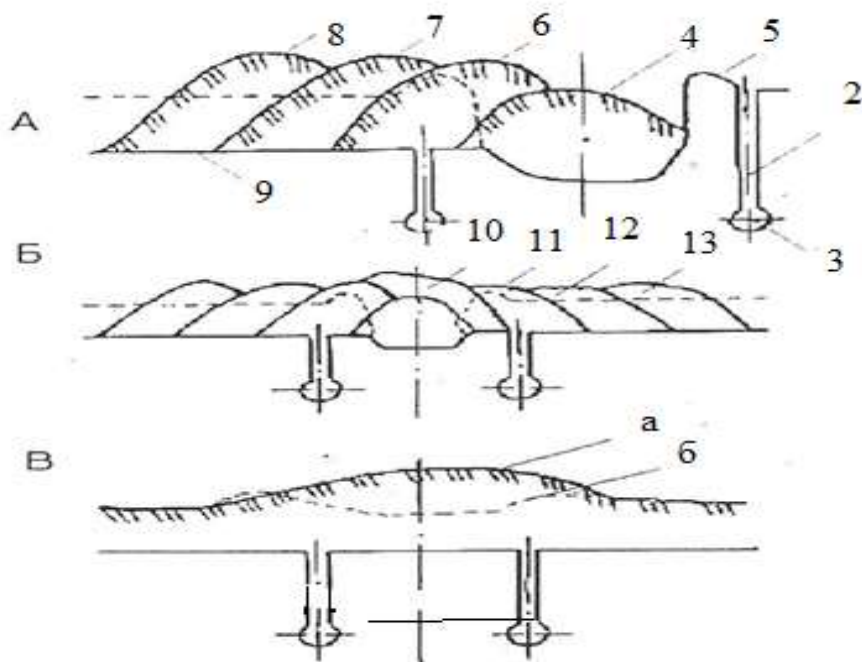


1 – бетонное основание; 2 – насыпной грунт; 3 – трубчатый водовыпуск  
Рисунок 1.18. Поперечный профиль водоотводящего канала в зоне движения тележек ходовой системы дождевальной машины

Основываясь на использовании отведения воды из зоны качения ходовых систем ДМ для повышения опорной проходимости, во Всероссийском НИИ орошаемого земледелия была разработана следующая методика обработки земли [22,25,98] (рисунок 1.19).

Трактор класса 3, при оснащении его щелевателем 1, методом седлания колеи нарезает щели 2. Отведение воды из колеи достигается за счёт кротодрен 3, полученных посредством закрепления специальных дренов на стойках щелевателя. Далее производится двукратное запахивание плугом полученной колеи от дождевальной машины. При первом проходе плуг должен обеспечить срезание пласта 4 с переворачиванием в колею. Пласты с номерами 6, 7 и 8 переворачиваются и укладываются на дно колеи 9. При втором проходе плуг срезает пласт 10 и укладывает поверх пластов 4 и 6. Вследствие этого, из перевёрнутых поверхностей пластов 6, 4 и 10 формируется опорный гребень, формирующий поверхность передвижения ходовой системы. Вода через нарезанные щели с кротодренами отводится в нижние почвенные горизонты, что обеспечивает исключение образования поверхностного стока. Данный метод является энергозатратным, так как его осуществление требует нескольких проходов пахотного агрегата, что может вызывать переуплотнение почвы.

Для повышения эффективности водоотведения пространство щелей заполняют различными наполнителями (рисунок 1.20) [22,25,98]. Посредством дискового рабочего органа 4, в почвенном массиве формируется водопоглощающая щель 3 под фиксированным углом наклона относительно дна колеи 2. Грунт 5 из прорезанной щели 3 отвалом 6 удаляется за границы полученной при колееобразовании призмы выпирания 7. В дальнейшем, весь полученный объём засыпается наполнителем 8, и утрамбовываются. Дальнейшее двукратное запахивание производится в соответствии с методикой, отображенной на рисунке 1.19. Для пространственного заполнения применяются всевозможные древесные отходы (мелкая щепка, опилки) [22,25], что ещё более увеличивает затраты на проведение мероприятий по повышению несущей способности почвы, которые не всегда оказываются эффективными.



А – нарезка щелей и дрен, Б – запашка колеи, В – уплотнение свального гребня  
 Рисунок 1.19. Методика формирования опорного гребня под колёсами ходовой системы ДМ.

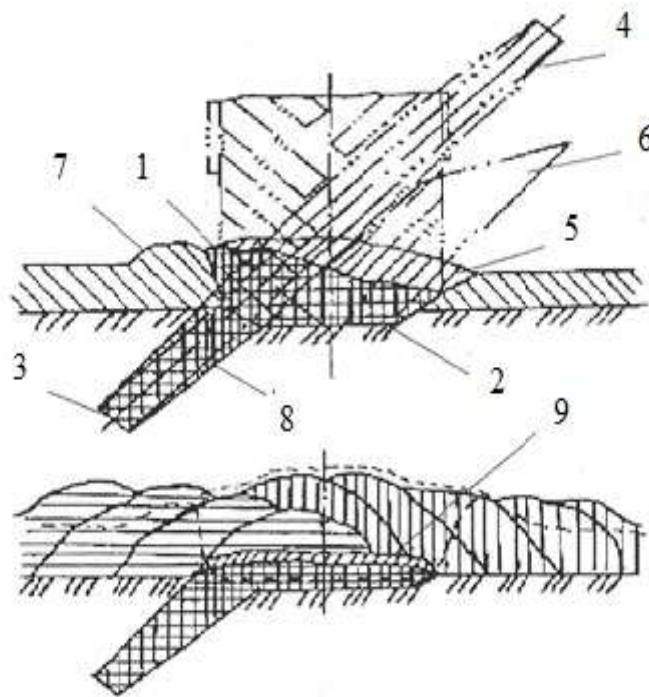


Рисунок 1.20. Формирование почвы рабочим органом (4) под колёсами (9) опорных тележек ДМ с применением наполнителя (8) в водоотводящих щелях



Одним из методов структурного упрочнения поверхности передвижения ходовых систем, является внесение различных химмелиорантов в виде гранул повышенной влагопроницаемости. Указанная методика отличается высокой эффективностью [22,25,71].

В соответствии с данными, приведённым в таблице 1.5 [22,25], для ДМ «Фрегат» внесение 100 г полиакриламида К4, на один квадратный метр поверхности, уменьшает глубину колеи на 50%, с увеличением влагопроницаемости на 90%.

Однако, из-за не полностью изученного влияния на человеческий организм химических реактивов, а также в силу их значительной стоимости, указанный метод широкого распространения не получил.

В некоторых хозяйствах для заравнивания колеи применяется её запахивание трактором, посредством бороны или плуга. Осуществление этого метода является энергозатратным, так как требует дополнительных проходов МТА. Кроме этого, повторность проведения указанной операции усиливает эрозионные процессы, приводящие к почвенной деградации при низком качестве заполнения колеи.

Следует отметить, что рассмотренные выше способы снижения колееобразования не обеспечивают решения указанной проблемы, которая является крайне важной при поливе многолетних трав, требующих большого числа круговых поливов (более 30) в течение поливного сезона.

Таблица 1.4 – Влияние нормы внесения полиакриламида на водопроницаемость и колееобразование дождевальнoй машиной

Количество внесённого полиакриламида, г/м <sup>2</sup>	Глубина колеи после первого прохода, см	Водопроницаемость почвы, мм/мин
0	8	1,2
20	6	1,5
40	5	1,7
100	4	2,3
200	3	3,1

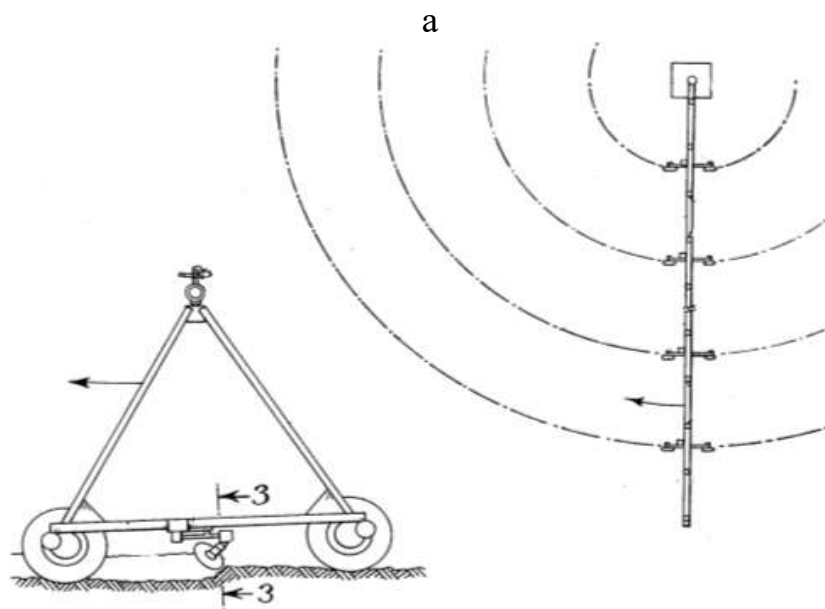
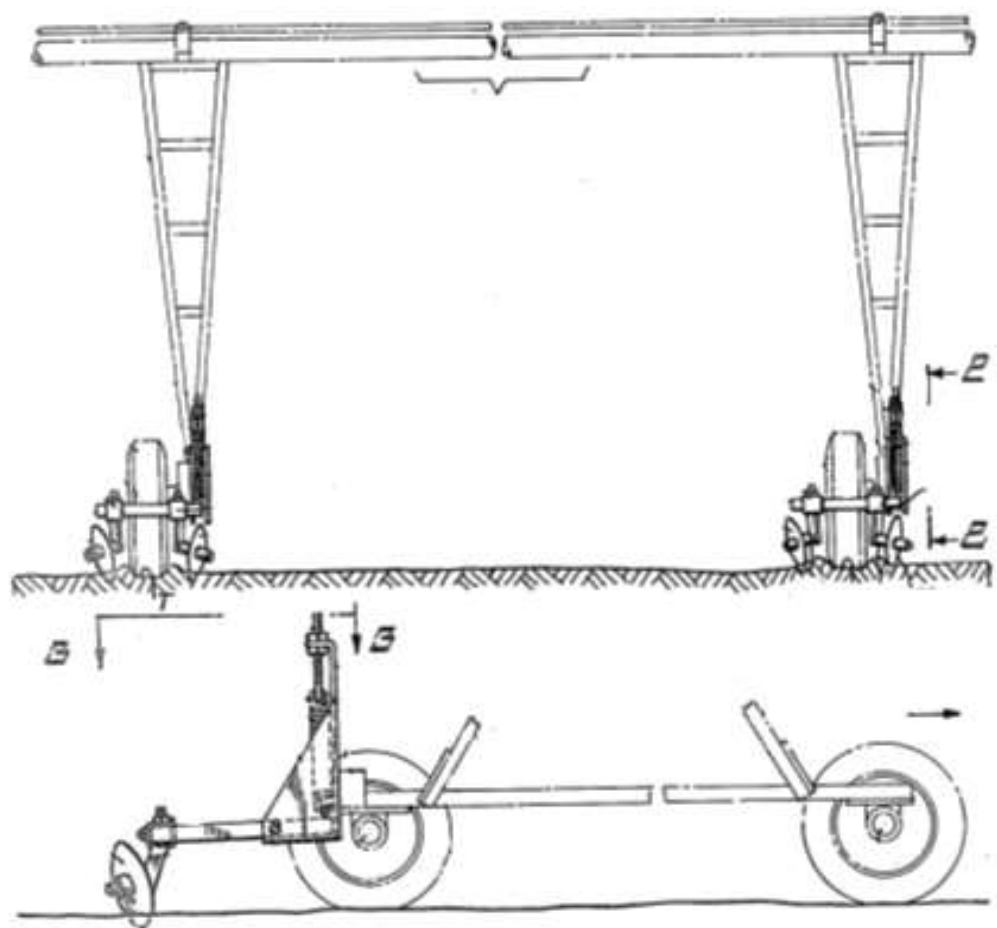
Широко применяются различные следозаделыватели, предназначенные для устранения последствий колееобразования колёсами МТА [67]. В целях устранения последствий колееобразования ходовыми системами многоопорных дождевальными машин кругового действия, возможно применение различных следозаделывателей, отличающихся по конструкции, определяемой глубиной почвенной деформации.

В общем случае, если заделываемая глубина не превышает глубины внесения семян, то для восстановления структурных свойств почвы целесообразно применение рыхлящих следозаделывателей, так как дополнительного нагартывания почвы при этом не требуется. В случае значительной глубины колееобразования применяется загартывание почвой, расположенной по бокам колеи. Для повышения качества заполнения колеи в этом случае применяются рыхляще - загартывающие следозаделыватели, с различными по конструкции рабочими органами. В качестве рабочих органов применяются уголки граблины, диски [68,78,79,107], а также разнообразные по форме шипы и зубья [22,25].

Из существующих типов рыхляще-загартывающих следозаделывателей, наиболее эффективными являются заравниватели с дисковыми рабочими органами. Преимущества относительно других конструкций следозаделывателей определяются характером деформации - резанием почвы при заравнивании колеи. Вследствие этого, дисковые заравниватели колеи отличаются сниженными энергетическими затратами, а также отсутствием забивания рабочих органов, что является важным в условиях высокой влажности почвы для обеспечения качественного заполнения колеи [21,22,23,24,25]. В силу своей конструкции дисковое заравнивающее устройство обладает возможностью оперативной регулировки качества обработки почвы.

Специально для заравнивания колеи от ходовых систем многоопорной дождевальной машины, в 1981 году фирмой «КМР manufacturing Co.Ink» было разработано заравнивающее устройство с дисковыми рабочими органами [22,25].

Два дисковых рабочих органа заравнивающего устройства размещены на



б

а – при навеске за задним колесом тележки; б – при навеске между колесами  
 Рисунок 1.21. Устройства заравнивания колеи от многоопорных дождевальных машин

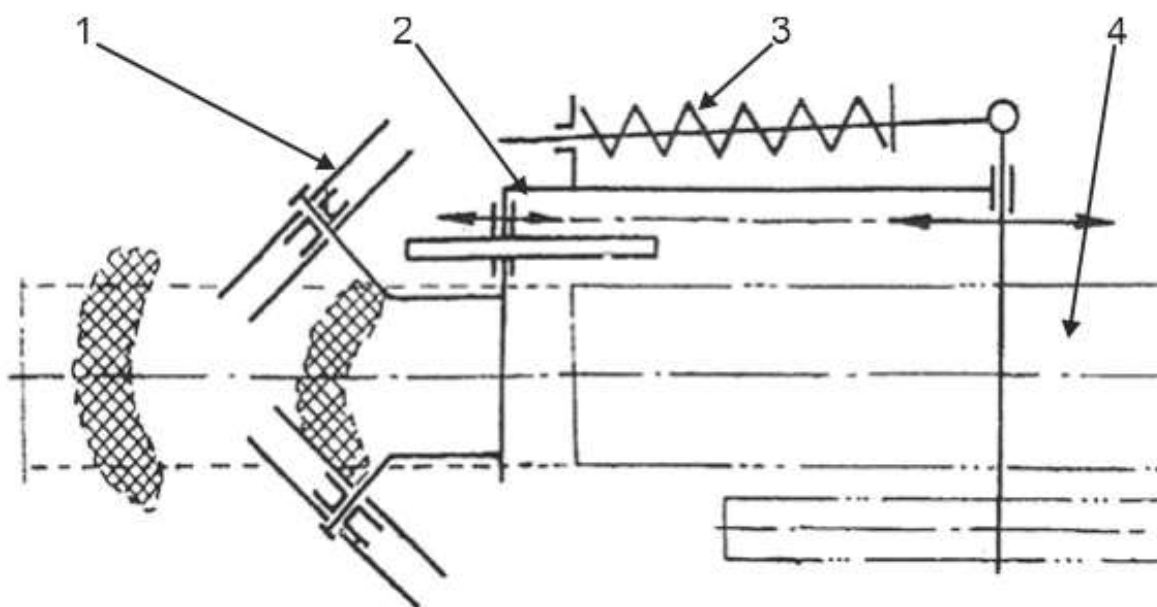


несущей раме, располагающейся за тележкой ходовой системы ДМ. Перевод заравнивающего устройства в реверсивный режим работы ДМ, с изменением угла атаки дисков на обратный, осуществляется вручную, что является недостатком указанной конструкции. Также, не предусмотрен автоматический перевод устройства в транспортное положение [22,25].

Существующие данные о заравнивающих устройствах (рисунок 1.21) не позволяют судить об эффективности предложенных технических решений из-за отсутствия основных параметров, определяющих качество решения поставленной задачи заравнивания колеи от многоопорной дождевальная машины [22,25,101]. Российским учёными Бородачёвой Е.В., Бородачёвым В.В., Салдаевым А.М. и Колгановым А.В., разработано устройство с дисковыми рабочими органами для заравнивания колеи от дождевальных машин, в котором применяются двойные диски, удалённые на разное расстояние от оси колёсного движителя ходовой системы ДМ (рисунок 1.22) [68]. Особенностью конструкции является наличие смежного диска, обеспечивающего равномерность воздействия на бермы заравниваемой колеи, с целью исключения налипания почвы на рабочих поверхностях дисковых органов. Однако при этом, нет информации об основных параметрах, определяющих качество заполнения колеи. Вместе с тем, как показывают многочисленные исследования, при использовании смежного диска возникает вероятность забивания почвой пространства между дисками, с последующим нарушением работоспособности устройства. Кроме этого, применение дополнительных дисков приводит к увеличению стоимости и материалоемкости заравнивающего устройства.

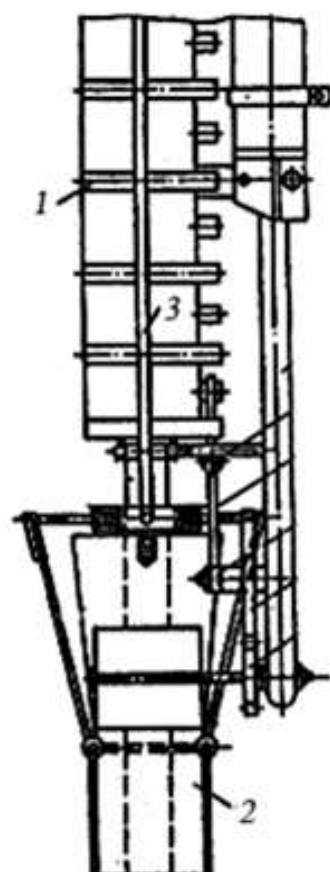
Известно заравнивающее устройство для тележки ДМ с гидроприводом, качество заравнивания которого определяется изменением посредством гидравлической тяги, положения её рабочих органов в зависимости от глубины колеи (рисунок 1.23) [66]. Устройство достаточно сложное по конструкции и не может применяться на дождевальных машинах с электроприводом.

Имеется, разработанная ВНПО «Радуга» и Ставропольским СХИ совместно, конструкция дискового заравнивающего устройства для многоопорной



1 – диски; 2 – рама; 3 – пружина; 4 – ходовое колесо

Рисунок 1.22. Заравнитель колеи многоопорной дождевальная машины



1 – ходовое колесо; 2 – заравнитель; 3 – гидравлическая тяга

Рисунок 1.23. Заравнивающее устройство тележки ДМ с гидроприводом



1 – заравнитель колеи; 2 – тележка

Рисунок 1.24. общий вид заравнителя колеи ДМ «Фрегат»



1 – заравнитель колеи; 2 – тележка

Рисунок 1.25. Общий вид заравнителя колеи ДМ «Кубань-ЛК1»

дождевальная машины кругового действия «Фрегат» (рисунок 1.24) [78,79,115]. В дальнейшем, с целью качественного заполнения колеи от дождевальной машины «Кубань-ЛК1», в ВНПО «Радуга» была разработана конструкция заравнивающего устройства с дисковыми рабочими органами (рисунок 1.25) [2, 65,113].

В ходе проведённых исследований и производственных испытаний была определена высокая эффективность разработанного устройства, определяемая качеством решения задачи, в условиях пониженной материалоемкости и улучшения энергетических показателей. При проведении заравнивания колеи от ходовых систем дождевальной машины, её глубина соответствует агротехническим требованиям [1] в течение всего поливного периода.

Необходимо отметить, что оценка значения несущей способности засыпанной в колею почвы, и её влияние при последующих проходах на колесобразование ходовых систем дождевальной машины с анализом энергетических и ходовых характеристик в зависимости от режима полива, ранее не осуществлялась [101], что и определило цель исследований.

#### **1.4. Постановка цели и задач исследований**

##### **Цель исследований**

Улучшение показателей работы дождевальной машины ДМ «Кубань – ЛК1» обоснованием параметров ходовой системы, определившая

##### **Задачи исследования**

1. Анализ условий функционирования многоопорных ДМ кругового действия с учетом режима полива при заравнивании колеи.
- 2 Теоретическое обоснование параметров ходовой системы многоопорной ДМ кругового действия на основании предельного значения несущей способности почвы в колее при повторных проходах.
3. Проведение экспериментальных исследований ходовой системы многоопорной ДМ кругового действия.

4. Оценка экономического эффекта от использования многоопорной ДМ кругового действия, оснащённой усовершенствованной ходовой системой с обоснованными параметрами.

### **Выводы по 1 разделу**

1. Выявлено, что наиболее перспективной, отвечающей мировому уровню, является электрифицированная ДМ четвёртого поколения «Кубань-ЛК1» [111], как наиболее совершенная, современная и технологичная, обеспечивающая при удобстве и простоте эксплуатации наибольшую степень автоматизации проведения дождевания.

2. Определено, что наиболее эффективным направлением снижения материалоемкости и энергетических затрат на качение ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1», является повышение несущей способности почвы в зоне её передвижения.

3. Установлено, что наиболее оптимальным способом повышения прочностных свойств почвенной поверхности передвижения ходовых систем ДМ, является заравнивание колеи при соблюдении режима полива.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ХОДОВОЙ СИСТЕМЫ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ «КУБАНЬ-ЛК1»**

### **2.1. Технологические особенности полива и показатели эффективности при колееобразовании ходовой системой ДМ «Кубань-ЛК1»**

Снижение материалоемкости и энергоёмкости при производстве полива, в частности для ДМ «Кубань-ЛК1», является важным направлением повышения экономической эффективности агропромышленного комплекса, поскольку экономное расходование энергетических и материальных ресурсов [7,33] обеспечивает увеличение объёма производства и снижает себестоимость проведения орошения [122], при увеличении урожайности сельскохозяйственных культур [103].

Сложные почвенные работы ДМ, определяемые высокой влажностью, и неоднородностью рельефа на площади орошения ДМ свыше 70 га, приводят к появлению участков с недостаточной прочностью поверхности передвижения, на которых, при нарушении условия опорной проходимости наблюдается резкое возрастание почвенной деформации, которое в сочетании с низкими сцепными свойствами ходовой системы ДМ при преодолении уклонов местности, приводит к нарушению процесса дождевания, что отрицательно сказывается на показателях эффективности работы ДМ, вызванных уменьшением коэффициента использования рабочего времени смены ( $K_{см}$ ). При этом технологическая надёжность проведения дождевания снижается вследствие срабатываний устройства защиты, которые вызываются повышенным потреблением электроэнергии или аварийным искривлением водоподводящего трубопровода в местах пробуксовки и скатывания тележек. Уменьшение частоты срабатываний защиты за счёт увеличения прочности конструкции ДМ неизбежно приводит к повышению массы, увеличивая материалоемкость и энергоёмкость изделия при эксплуатации. К этим же результатам приводит улучшение показателей

надёжности полива за счёт снижения удельного давления ходовых систем ДМ на почву. В существующих условиях применения ДМ «Кубань-ЛК1», вследствие повышенного колееобразования, вызывающего увеличение энергетических затрат на передвижение, и значительной материалоемкости ходовых систем, надёжные и эффективные показатели полива не достигаются в полной мере. Эффективность ДМ «Кубань-ЛК1» оценивается удельными значениями материалоемкости, энергоёмкости и обобщённого показателя ( $N_{nm}$ ) [28,117]. Удельная материалоемкость ( $m_{y\partial}$ ) и энергоёмкость ( $N_{y\partial}$ ) характеризуют материальные ( $m$ ) и энергетические ( $N$ ) затраты, отнесённые к максимальной производительности ДМ ( $W_q$ ). Значение обобщённого показателя определяется выражением:

$$N_{nm} = \frac{N \cdot m}{W_q^2}, \text{ кВт} \quad (2.1)$$

Совершенствование ходовой системы ДМ связано с уменьшением значения обобщённого показателя  $N_{nm}$  [103].

## 2.2. Теоретическая оценка энергетических затрат при движении тележек ДМ «Кубань-ЛК1»

Мощность, потребляемая многоопорной дождевальная машиной при проведении полива, расходуется на преодоление сопротивления движению  $N_{\partial e}$ , и определяется зависимостью (2.2):

$$N_{\partial e} = \sum_{i=1}^{i=m} N_{ei}, \text{ кВт} \quad (2.2)$$

где:  $N_{ei}$  – электрическая мощность, потребляемая электродвигателем одной тележки, кВт.

$m$  – число тележек подвижных колёсных опор, шт.;

Баланс мощности потребления [15,28,58,106] тележки ДМ машины имеет следующий вид:

$$N_e = N_{тр} + N_f + N_p + N_{\delta}, \text{ кВт} \quad (2.3)$$

где  $N_e$  – мощность, потребляемая электродвигателем,  $N_e = \frac{P_k \cdot V}{60 \cdot \eta}$ ;

$P_k$  - касательное усилие, Н;

$V$  - скорость движения тележки, м/мин;  $\eta$ -КПД привода;

$N_{mp}$  – внутренние потери приводной передачи, кВт,  $N_{mp}=N_e(1-\eta)$ ;

$N_f$  – мощность, затрачиваемая на передвижение тележки по образующейся колее, кВт;  $N_f = \frac{P_f \cdot V}{60}$ ;

$P_f$ – сила сопротивления качению, Н;  $P_f=Gf$ ,

$G$  – сила тяжести ходовой системы,Н;

$f$ – коэффициент сопротивления качению;

$N_p$  – мощность, расходуемая на резание почвы устройством заравнивания колес, кВт;  $N_p = \frac{P_p \cdot V}{60}$ ;

$P_p$  – сила сопротивления резанию;

$N_i$ – затраты мощности на преодоление уклонов местности, кВт,  $N_i = \frac{P_i \cdot V}{60}$ ;

$P_i$ – сила сопротивления преодолению уклонов,Н;

$N_\delta$  – потери мощности при буксовании, кВт;  $N_\delta = \frac{P_k(Vm-V)}{60}$ ;

$Vm$  – теоретическая скорость тележки, м\мин.

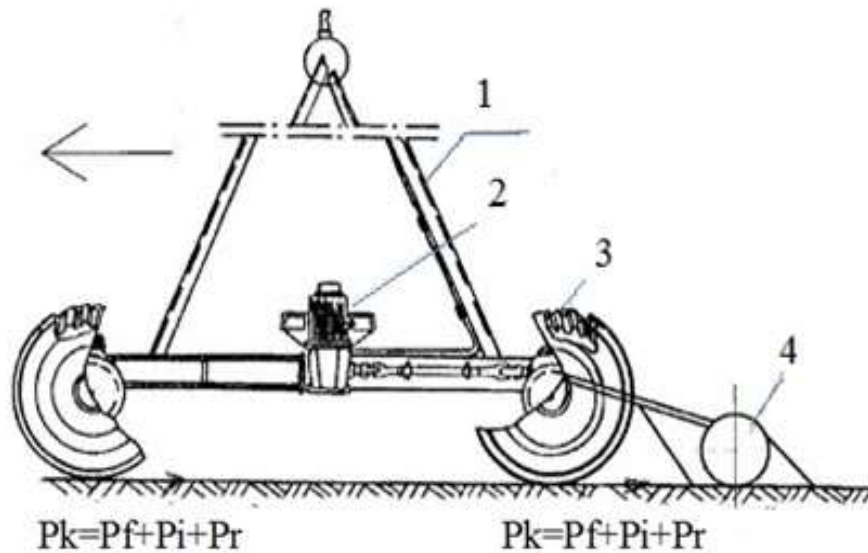
Тяговый баланс для касательного усилия  $P_k$ , состоит из суммы сопротивлений качению  $P_f$ , Н, резанию  $P_p$ , Н, преодоления уклонов местности  $P_i$ , Н, (рисунок 2.1) и определяются зависимостью:

$$P_k = P_f + P_p + P_i, \text{ Н} \quad (2.4)$$

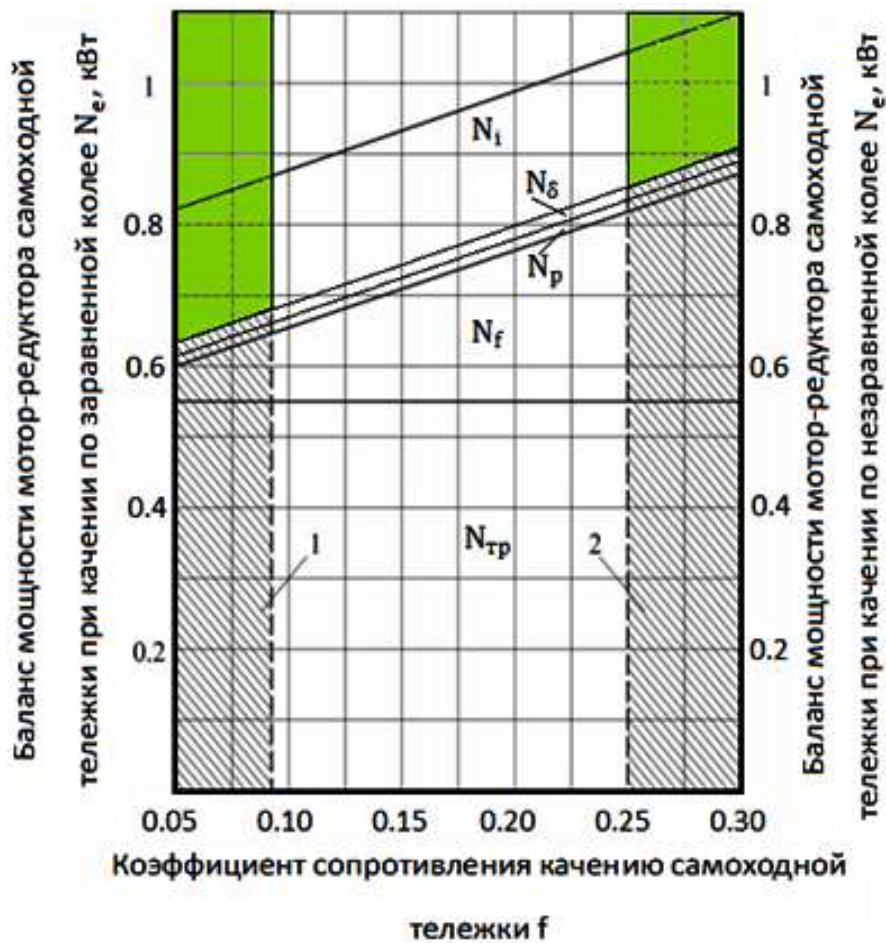
Как следует из баланса мощности серийного привода для наиболее скоростной десятой тележки ( $V=2,5$  м/мин), построенного по данным технических характеристик и нашим поисковым исследованиям (рисунок 2.1, 2.2), примерно 50% из них ( $N_{mp}$ ) расходуется на внутренние потери ( $\eta=0,50$ ).

Около 30%, учитывая сложные условия по колееобразованию (до 0,30 метра и более), характеризуемые коэффициентом сопротивления качению  $f \geq 0,30$ , на передвижение  $N_f$ , и остающиеся примерно 20% приходятся на преодоление уклонов ( $N_i$ ), буксование ( $N_\delta$ ) и сопротивление резанию почвы при заравнивании колес ( $N_p$ ). По данным исследований подобных заравнивающих устройств было установлено, что составляющая баланса мощностей ( $N_p$ ) не превышает 2,5%.





1 - рама тележки; 2 - мотор-редуктор; 3 - ходовое колесо; 4 -завравниватель колеса  
 Рисунок 2.1. Схема сил, действующих при движении тележки ДМ «Кубань-ЛК1»



1 - диапазон значений при завравнивании колеи, 2- без завравнивания  
 Рисунок 2.2. Энергетический баланс привода тележки ДМ «Кубань-ЛК1»

Одним из путей снижения энергетических затрат при движении тележек ДМ «Кубань-ЛК1», как технически менее сложный вариант заключается в снижении силы сопротивления качению  $P_f$  (рисунок 1.2), зависящей от глубины погружения ходовой системы и достигающей до 0,32-0,35 м при пятом проходе ДМ. Этим определяется необходимость проведения мероприятий по упрочнению поверхности передвижения, например, с применением заравнивателей колеи. Однако это предполагает обоснования параметров ходовой системы ДМ, исходя из снижения материальных и энергетических затрат, а также повреждаемости растений.

При снижении сопротивления качению  $P_f$  с уменьшением коэффициента  $f$ , от значений 0,30-0,35 до 0,05-0,10, энергетические затраты на передвижение ( $N_f$ ) снижаются с 0,32 до 0,05 кВт, что составляет около 26% от общих энергетических затрат ( $N_e = 1,1$  кВт).

### **2.3. Оценка деформативных характеристик почвы при взаимодействии с ходовыми системами ДМ «Кубань-ЛК1»**

В ходе большого количества проведённых ранее исследований процессов почвенной деформации как функции приложенных напряжений, было установлено, что начальный участок зависимости имеет линейный характер, и характеризуется прямо пропорциональной связью с величиной нагрузки. Для незначительной величины нагрузок, существующие виды почв представляют собой линейно-деформируемую среду, характеризуемую различными углами наклона относительно оси приложенных напряжений, в зависимости от своих почвенных характеристик (влажности, плотности, вязкости, структурности и других физико - механических свойств). При этом величина нормально приложенного напряжения  $p$  (Н/м<sup>2</sup>) связана с глубиной погружения (осадкой штампа)  $h$  (м) прямо пропорциональной зависимостью [3]:

$$p = kh, \text{ кПа} \quad (2.5)$$

где  $k$  – коэффициент объёмного смятия почвы, Н/м<sup>3</sup>.

Однако, при дальнейшем возрастании нагрузок характер зависимости всё

более будет отличаться от линейного [30,118].

В.В. Кацыгин предложил функциональную зависимость, наиболее полно и точно характеризующую процесс почвенной деформации колёсными движителями ходовой системы ДМ [30,118] :

$$p = \rho_0 t h \frac{k}{\rho_0} h, \text{ кПа}, \quad (2.6)$$

где  $\rho_0$  – максимальная величина приложенного напряжения, при превышении которого почвенный массив разрушается и переходит в текучее состояние, кПа;

$h$  – глубина погружения, м.

Полученная при нагружениях в диапазоне между минимальным и максимальным прочностным значением величина почвенной деформации, связана с нагрузкой функцией гиперболического тангенса, на которой можно условно выделить три различных диапазона [30,118].

Начальный диапазон почвенной деформации (I) отображается прямо пропорциональной зависимостью от приложенных напряжений (рисунок 2.3) и характеризуется уплотнением почвы под воздействием нагрузки. При дальнейшем увеличении нагрузки зависимость переходит в диапазон II, в котором её характер отличается от линейного, с непропорциональным приращению нагрузки, увеличением почвенной деформации. При увеличении нагрузок, соответствующих участку II зависимости, внутри почвенного массива начинают возникать локальные области, в которых всё более проявляется влияние деформации сдвига, возникающей при превышении значения нагрузки над силами сцепления и трения между отдельными частицами. Следующий диапазон III характеризуется постепенным уменьшением влияния деформации уплотнения почвы до нуля, и переходом всего почвенного массива в текучее состояние, характеризующее деформацией сдвига.

При оценке параметров рабочих органов сельскохозяйственных машин обычно используются показатели деформации почвы диапазона I зависимости (рисунок 2.3), которые являются характерными в большей степени для условий

неорошаемого земледелия. Однако, при оценке параметров почвенной деформации в условиях орошаемого земледелия, необходимо учитывать влияние повышенной влажности, вследствие этого процесс колееобразования ходовой системой ДМ отображается участком III приведённой зависимости.

На основании имеющихся данных, изменение абсолютной влажности почвы от 20% до 30%, приводит к уменьшению сопротивления сжатию и сдвигу, в несколько раз [10,29,116]. Снижение прочности почвенной поверхности передвижения при увеличенной влажности, приводит к ухудшению тягово-сцепных свойств, увеличению глубины колееобразования и возрастанию энергетических затрат на качение ходовых систем ДМ.

При работе ДМ в засушливых условиях и максимальных нормах полива, влияние влажности на процесс почвенной деформации является наиболее значительным. В этом случае прочность поверхности передвижения ходовых систем ДМ является минимальной, что приводит к увеличению глубины колееобразования. Образование естественных понижений приводит к появлению стоков в колее, что дополнительно увеличивает глубину почвенной деформации ходовой системой ДМ при последующих круговых поливах.

Ходовые системы дождевальной машины работают в сложных почвенных условиях, практически постоянно оказывая статическое давление и деформируют опорную поверхность, в том числе из-за старт-стопного режима движения. Исходя из этого считаем, что при обосновании параметров ходовой системы целесообразно учитывать предельное по прочности состояние почвы, то есть её несущую способность, характеризуемую типовыми кривыми вдавливания штампа (участок III рисунок 2.3) для колёсного движителя ДМ, при его периодическом воздействии на почву [30,118] (зона *a* рисунок 2.3). При этом оценку среднего значения  $P_0$  несущей способности почвы после полива дождеванием, целесообразно учитывать по следующей зависимости [93,96]:

$$P_{0nn} = P_{0дн} - (1,4m_{дост}^{0,65} + 8 \cdot 1,01^{m_{ст}}), \quad (2.7)$$

где  $P_{0nn}$  – несущая способность почвы после полива, кПа;

$P_{0дн}$  – несущая способность почвы до полива, кПа;

$m_{доств}$  – величина до стоковой поливной нормы, м<sup>3</sup>/га;

$m_{см}$  – величина образующегося стока, м<sup>3</sup>/га.

В условиях Нечернозёмной зоны РФ при поливе дождеванием овощных культур рекомендуется поливать во избежание образования поверхностных стоков поливными нормами не более 300-500 м<sup>3</sup>/га. При этом расчётные значения предельных напряжений (несущей способности) для суглинистых почв под ходовыми системами ДМ, определяемых выше приведенными значениями норм полива, на момент взаимодействия с орошаемой поверхностью изменяются от 100-110 кПа, при  $m=300$  м<sup>3</sup>/га, до 75-80 кПа при  $m=500$  м<sup>3</sup>/га (величина стока  $m_{см}$  составляет около 10 м<sup>3</sup>/га).

Для лучшего представления о закономерностях деформации почвы, полученные значения несущей способности почвы, и соответствующие показатели глубины погружения штампа в колею от ходовой системы перед первым проходом ДМ, полученные в ходе поисковых исследований, приведены на шкалах графиков вдавливания (рисунок 2.3, 2.4) [30].

Следует отметить, что для рекомендованных значений поливных норм, при выполнении условия опорной проходимости:

$$q \leq P_0, \text{ кПа} \quad (2.8)$$

где  $q$  – удельное давление ходовой системы ДМ на почву, кПа;  $P_0$  – несущая способность почвы, кПа, с учётом многократности проходов по одному следу, глубина колеи достигает значения 0,30 м и более.

Это наблюдается при эксплуатации ДМ «Кубань-ЛК1» на шинах с существующими значениями ширины профиля для типоразмеров 18.4R24 (21.3R24), которые наряду с недостаточной эффективностью по снижению энергетических затрат на качение имеют повышенную материалоемкость. На основании изложенного, для снижения затрат на качение ДМ и материалоемкости её ходовых систем необходимо проведение оптимизации параметров с учётом поиска возможных решений по повышению несущих свойств почвенной поверхности передвижения.

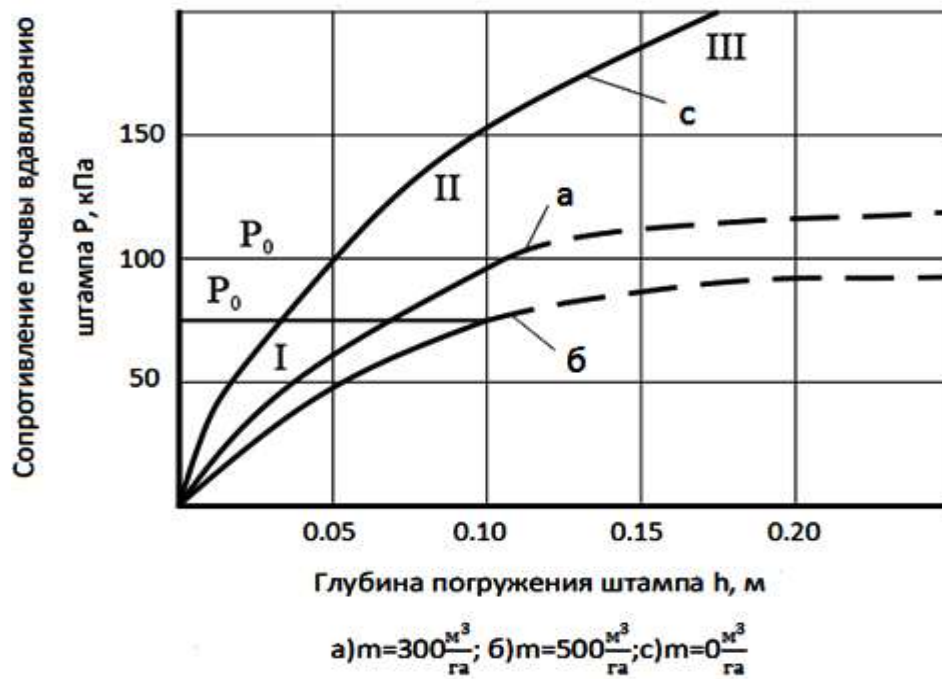


Рисунок 2.3. Типовые графики деформации почвы штампом при разных режимах орошения

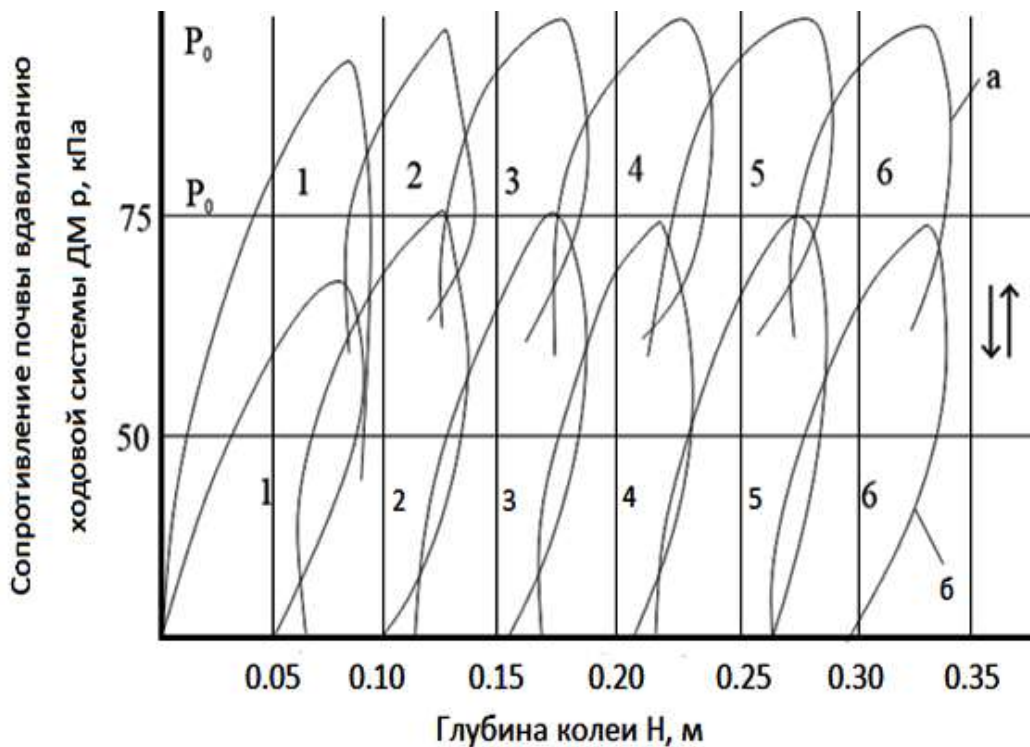


Рисунок 2.4. Типовые графики деформации почвы ходовой системой ДМ при многократных проходах и режимах орошения 1-6 , номер прохода

а -  $P_0 = 100$  кПа, б -  $P_0 = 75$  кПа

Один из способов повышения несущей способности почвы может быть осуществлён посредством засыпки колеи от ходовых систем ДМ специальными заравнивающими устройствами, начиная с первого её прохода. Высохшая за неполивной период почвенная насыпь на уплотнённом после первого прохода ДМ дне колеи образует твёрдый почвенный слой (почвенную корку) (рисунок 2.5 б). Таким образом, после каждого прохода ДМ осуществляется послойная засыпка колеи, прочность поверхности которой определяется следующими особенностями.

Имеющиеся исследования [85,123] показывают, что толщина почвенной корки и соответственно, её твердость зависят от величины слоя осадков (нормы полива), и для  $m = 300 \dots 500 \text{ м}^3/\text{га}$  она составляет от 30 и более мм. То есть при межполивном периоде, равном 8 – 10 дней ( $m=500 \text{ м}^3/\text{га}$ ), почва имеет наименьшее значение усваиваемой влаги растениями ( $W = 15\text{-}20\%$  абсолютно сухой почвы), определяющее необходимость очередного полива. При этом за вышеуказанное время в следе колеи наблюдается образование твёрдого почвенного слоя при его более интенсивном высыхании [123].

Рассмотрим некоторые особенности изменения твёрдости (несущей способности) почвы при поливе дождеванием в поверхностном слое, как вне колеи, так и в ней.

Наибольшее влияние на прочностные свойства почвы, как показывают многочисленные исследования [9,54], оказывает её влажность ( $W$ ), которая связана с твёрдостью, нисходящей прямолинейной зависимостью:

$$P_0 = a W + b, \text{ кПа} \quad (2.9)$$

где  $a, b$  - коэффициенты уравнения [54], характеризующие физико – механические свойства почвы (механический состав, структурность, пористость, качество крошения и другие).

Как отмечалось, влажность почвы в значительной степени определяется режимом полива, в частности, величиной поливной нормы  $m_m, \frac{\text{м}^3}{\text{га}}$ , которая для тех или иных почвенных условий ограничивается достоковым значением  $m_d, \frac{\text{м}^3}{\text{га}}$ ,





а



б

Рисунок 2.5. Вид колеи при проходах тележек ДМ  
а – после первого прохода без заравнивания колеи, б – после пятого при заравнивании колеи



определяемым выражением [56]:

$$m_{\partial} = \frac{P_{\text{в}}}{\sqrt{\rho} e^{0.5 d_k}}, \frac{\text{м}^3}{\text{га}}, \quad (2.10)$$

где  $P_{\text{в}}$  – характеристика почвы по водопроницаемости, мм,

$\rho$  – интенсивность дождя, мм/мин,

$d_k$  – средний диаметр капли дождя, мм.

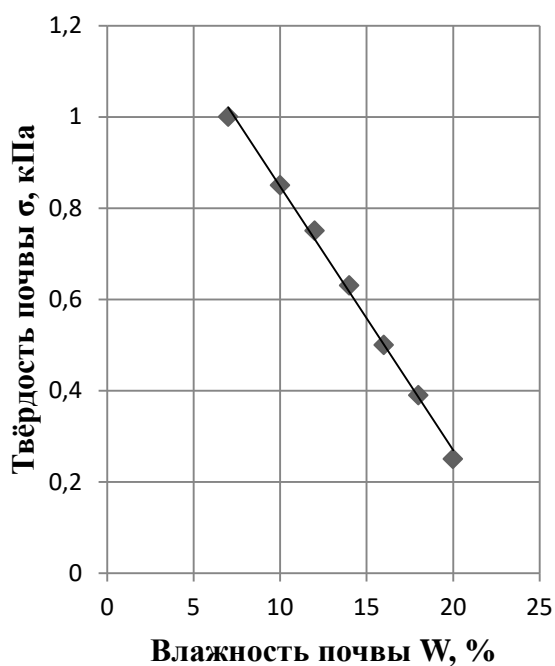
Для средних по водопроницаемости почв ( $P_{\text{в}} = 60 - 70$  мм) вне колеи при характеристиках дождя ДМ «Кубань-ЛК1», равных соответственно,  $\rho = 0,7$  мм/мин. и  $d_k = 1,0$  мм, величина достоковой поливной нормы составит в пределах 480-510 м<sup>3</sup>/га. То есть при заданном режиме ( $m_{\text{м}}=500$  м<sup>3</sup>/га) обеспечивается полив без образования стоков. При этом вода, не нарушая структуру почвы, её пористости и разделяя почвенные частицы водной плёнкой, свободно поглощается и перемещается к корневой системе растений [123].

После межполивного периода (5-7 дней), когда влажность почвы за счёт её высыхания достигает 15-20%, приступают к очередному поливу. При указанной влажности для хорошо структурированной почвы, как показывают многочисленные исследования, в частности, приведённые на рисунках 2.6 а [9] и 2.6 б [54], изменения твёрдости составляют 1,5-2,0 раза.

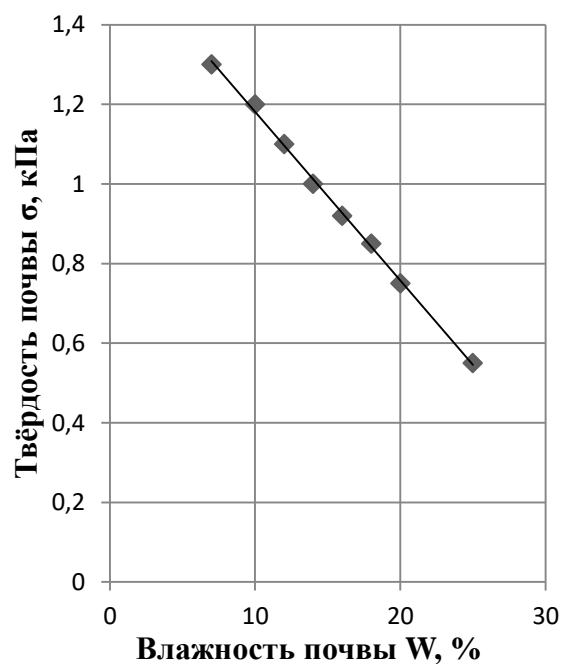
Значение же водопроницаемости  $P_{\text{в}}$  в колее от ходовой системы ДМ за счёт её уплотнения не превышает 25 мм. Это обуславливает, при вышеуказанных показателях качества дождя (зависимость 2.10) величину достоковой нормы полива  $m_{\partial}$  в уплотнённом следе колеи не более 130 м<sup>3</sup>/ га. Для ( $m_{\text{м}}=500$  м<sup>3</sup>/га), 370 м<sup>3</sup>/га расходуется на сток. То есть засыпанная в колею заравнивающим устройством с растительными остатками почва с учётом воздействия искусственного дождя переходит в максимально водонасыщенное состояние. Что, по данным исследований, вызывает заполнение всех пустот между крупными частицами почвы, более мелкими, в виде ила, что нарушает её структурность после высыхания и «цементирует», превращая в прочную опорную поверхность [123]. На рисунке 2.7а [61] и 2.7б [40] приведены зависимости упрочнения бесструктурных образцов слитного сложения почвы и грунта при их высыхании.

При значениях влажности почвогрунтов, характерных для начала полива, повышение твёрдости составляет (5,0 - 7,0) раз относительно значений во время полива. Как следует из приведённых данных для структурированной почвы (рис.2.6 б), наличие примеси суглинков в чернозёмной почве приводит к уменьшению степени влияния влажности на прочность, что отображается уменьшением угла наклона графической зависимости, относительно (рис.2.6 а), характеризующего прочность чернозёма, а также увеличением прочности почвы в высохшем состоянии. В соответствии с зависимостями (рис. 2.7 а, б) для бесструктурных образцов глинистых почвогрунтов при высыхании до значений абсолютной влажности  $W= 15-20\%$ , характерной для начала полива орошаемой культуры, прочностные показатели достигают значений 500-700 кПа. Структурированная почва при высыхании характеризуется уменьшенными значениями, что определяется снижением плотности скелета грунта (увеличением его пористости) при механической обработке.

Процесс почвенной деформации ходовой системой многоопорной дождевальная машины (ДМ) кругового действия, при проведении первого кругового полива, сопровождается образованием уплотнённого почвенного жёлоба, поверхность которого имеет пониженную воздухо- и влагопроницаемость. Указанные свойства поверхности обуславливают различие между прочностными характеристиками почвы, находящейся в заравненной колее, и вне её (агрофон), при последующем высыхании за время межполивного периода. Почва, перемещённая заравнивающим устройством в объём образующейся колеи, находится во влагонасыщенном состоянии, без изменения своей первоначальной структуры. Однако, за счёт образования стоков в объёме колеи, перемещённый почвенный слой испытывает сильное переувлажнение, в ходе которого происходит заиливание существующих пор и капилляров, приводящее к изменению почвенной структуры. За счёт уменьшения объёма пористости, происходит уплотнение почвы, что при высыхании приводит к повышению её прочностных свойств, относительно структурированной почвы агрофона. Разница

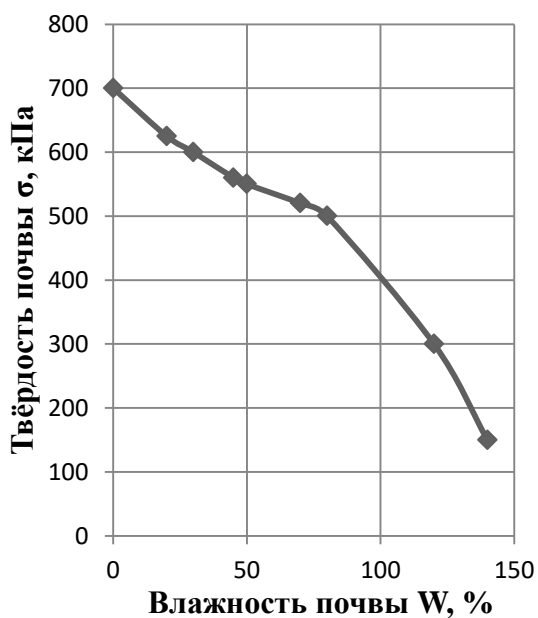


а

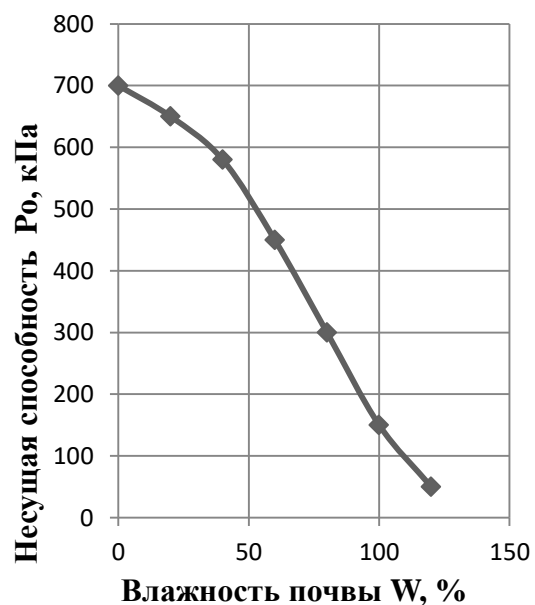


б

Рисунок 2.6. Зависимость прочностных показателей структурных чернозёмов типичного (а) и среднесуглинистого (б) на сжатие от влажности.



а



б

Рисунок 2.7. Зависимость прочностных показателей тяжёлой суглинистой почвы (а) и глины (б) на сжатие от влажности.

между двумя состояниями почвы (в колее и вне её) определяется значениями коэффициентов  $a$  и  $b$  линейной зависимости (2.13). Проведём оценку упрочнения почвенной поверхности с учётом структурных изменений в зависимости от режима полива.

Согласно существующих положений (Цытович Н.А., Качинский Н. А.) [31], коэффициент пористости  $e$  - это отношение объема пор грунта  $n$  к объему его скелета  $m$ , и вычисляется по формуле:

$$e = n/m \quad (2.11)$$

Единичный объем грунта складывается из объёмов пор и скелета:

$$n+m = 1 \quad (2.12)$$

Предположим, что в почве произошли структурные изменения, связанные с заиливанием и заполнением пор при переувлажнении и уменьшении порового объёма, считаем, что первоначальные значения параметров почвы  $n_0, m_0, e_0$  сменились на  $n_1, m_1, e_1$ . Проведём оценку упрочнения почвенной поверхности, вызванного увеличением плотности сухого вещества в единице объёма при структурных изменениях, характеризующихся изменением пористости:

$$m_0 = 1 - n_0 = 1 - e_0 m_0 \quad (2.13)$$

$$m_0 = \frac{1}{1+e_0} \quad (2.14)$$

$$m_1 = \frac{1}{1+e_1} \quad (2.15)$$

Коэффициент упрочнения (увеличения объёма сухого вещества за счёт уменьшения порового объёма при структурных изменениях):

$$k_{уп} = \frac{m_1}{m_0} = \frac{1+e_0}{1+e_1} \quad (2.16)$$

Основываясь на известных положениях, значение предельного состояния по прочности  $P_0$  слоя регулярной высохшей структуры определяется через плотность материала структуры и её толщину по следующей зависимости:

$$P_0 = \rho_0 s, \quad (2.17)$$

где  $P_0$  - несущая способность структуры,  $\frac{H}{M^2}$ ;

$\rho_0$  - плотность материала несущего слоя,  $\frac{H}{M^3}$ ;

$s$  - высота слоистой структуры, м.

Проведём оценку этого показателя в зависимости от существующего режима полива. Предположим, что для почвы агрофона существует значение  $\rho_0$  сухой плотности ( $W=0\%$ ) при коэффициенте пористости  $e_0$ . При заравнивании колеи и переувлажнении почвы в ней, для полученного уплотнения при уменьшенном значении коэффициента пористости  $e_1$ , при последующем высыхании, выражение (2.17) приобретает вид:

$$P_0 = k_{yn}\rho_0s = \frac{1+e_0}{1+e_1}\rho_0s \quad (2.18)$$

Величина коэффициента пористости  $e$ , определяет значение абсолютной влажности  $W$  в состоянии максимального увлажнения для единичного объёма почвы, в обычном и уплотнённом состояниях почвы. При испарении воды в колее, происходит её замещение скелетом грунта в почвенной структуре вплоть до значения абсолютной влажности высыхания  $W_0$ . Следовательно, величина диапазона изменения влажности почвы в колее при её высыхании составляет  $D = (e_1 - W_0)$ , а уменьшение абсолютной влажности почвы в этом диапазоне является функцией времени. Полагая, что высыхание до значения  $W_0$  происходит за время межполивного периода  $t_n$ , можно определить её значение для произвольного времени  $t$  внутри временного интервала  $t_n$ :

$$W(t) = (e_1 - W_0) \frac{t}{t_n} \quad (2.19)$$

В общем случае, выражение для плотности почвы, находящейся в колее при её высыхании в зависимости от времени, в течение межполивного периода с учётом уплотнения при начальной плотности почвы агрофона  $\rho_0$ , примет вид:

$$\rho = \rho_0 k_{yn}(t) = \rho_0 \frac{1+e_0}{1+(e_1-W_0)\frac{t}{t_n}} \quad (2.20)$$

Оценим влияние величины поливной нормы (слоя осадков  $h$ ), на толщину полученного структурно уплотнённого почвенного слоя, исходя из начальной абсолютной влажности агрофона  $W_1$ . Толщина почвенного слоя, охваченного переувлажнением в состоянии минимальной полевой влагоёмкости при значении

абсолютной влажности  $W_{max}$  будет определяться как  $h \left( \frac{W_1 + 100\%}{W_{max}} \right)$ . Исходя из того, что уплотнение почвы происходит по трём координатам, линейные размеры объёма почвы (усадка) связаны с его плотностью, степенной зависимостью с показателем  $\frac{1}{3}$ . Для уплотнённой почвенной структуры её толщина  $s$  связана с высотой слоя осадков  $m = h$  следующей зависимостью:

$$s = \frac{h \left( \frac{W_1 + 100\%}{W_{max}} \right)}{\sqrt[3]{\frac{1+e_0}{1+(e_1 - W_0) \frac{t}{t_n}}}} \quad (2.21)$$

Тогда выражение (2.18) для несущей способности структурного слоя  $P_0$  в зависимости от режима полива ( $h, t_n$ ) приобретёт вид :

$$P_0 = \rho_0 h \left( \frac{W_1 + 100\%}{W_{max}} \right) \frac{\frac{1+e_0}{1+(e_1 - W_0) \frac{t}{t_n}}}{\sqrt[3]{\frac{1+e_0}{1+(e_1 - W_0) \frac{t}{t_n}}}} = \rho_0 h \left( \frac{W_1 + 100\%}{W_{max}} \right) \left( \frac{1+e_0}{1+(e_1 - W_0) \frac{t}{t_n}} \right)^{2/3} \quad (2.22)$$

Значения коэффициентов  $e_0$  и  $e_1$  можно определить экспериментально по изменению массы при высушивании взятых образцов почвы агрофона, и заравненной колеи, в состоянии максимального увлажнения. Учитывая, что  $e_0 = \frac{n_0}{m_0} = \frac{n_0}{1-n_0}$ ,  $e_1 = \frac{n_1}{m_1} = \frac{n_1}{1-n_1}$ , и подставляя эти выражения в формулу (2.20), получим следующее выражение :

$$k_{уп} = \frac{1 + \frac{n_0}{1-n_0}}{1 + \frac{n_1}{1-n_1}} = \frac{1-n_1}{1-n_0} \quad (2.23)$$

В состоянии максимальной влагоёмкости объёмная доля воды в единице почвенного объёма агрофона  $n_0$ , численно равна количеству содержащейся воды, отнесённому к общему объёму. Другими словами, объём пор при полном заполнении их водой определяется количеством воды, содержащимся в единице объёма, и численно равняется ему, для единичного объёма получим выражение для коэффициента уплотнения:

$$k_{уп} = \frac{1-n_1}{1-n_0} = \frac{1-m_{в1}}{1-m_{в0}} \quad (2.24)$$

В ходе проведения лабораторных исследований, при воспроизведении нормы полива  $500 \frac{\text{м}^3}{\text{га}}$  в условиях средне-суглинистой почвы ЗАО «Озёры», для измеренной массы взятого образца почвы агрофона в состоянии максимальной влагоёмкости с общей массой  $m$  и объёмом 10 литров, было получено значение 15,25 кг. В высушенном состоянии масса почвы агрофона  $m_c$  имела значение 7,15 кг, при количестве испарившейся воды  $m_{\text{в0}} = m - m_c = 15,25 - 7,15 = 8,10$  кг.

Для почвы колеи масса образца составила 18,55 кг при сухой массе 12,45 кг,  $m_{\text{в1}} = 6,1$  кг. Коэффициент упрочнения (уплотнения) поверхности:

$$k_{\text{уп}} = \frac{1-n_1}{1-n_0} = \frac{10-m_{\text{в1}}}{10-m_{\text{в0}}} = \frac{10-6,1}{10-8,1} = \frac{3,9}{1,9} = 2,052.$$

Подставляя величину слоя осадков  $h=0,05$  м, соответствующую норме полива  $500 \frac{\text{м}^3}{\text{га}}$ , совместно с определёнными в ходе лабораторных исследований значениями ( $W_1=29\%$ ,  $W_{\text{max}}=74\%$ ),  $\rho_0=gm_c=7150 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$  в выражение (2.26), получим оценку значения несущей способности:

$$P_0 = 7150 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3} \times 0,05 \text{ м} \left( \frac{129\%}{74\%} \right)^{2/3} = 1006,3 \text{ кПа.}$$

Оценка значения несущей способности  $P_0$  высохшей упрочнённой почвенной структуры в колее при норме полива  $500 \frac{\text{м}^3}{\text{га}}$ , проведённая на основании структурных изменений почвы при её уплотнении, составила около 1000 кПа.

Наиболее полно процесс упрочнения засыпанной в колею от ходовой системы ДМ почвы, за счёт её высыхания, моделируется технологией производства и сушки самана, близкого к почвенной массе в колее по составу, структуре, плотности и влажности (9-11%) [4].

Некоторое снижение влажности почвы в колее (9-11%) против значений вне её (15-20%), объясняется тем, что при уплотнении почвенного слоя, подстилаемого ещё более плотной «подошвой», происходит более интенсивное испарение влаги. При указанной влажности самана, для его средней и повышенной по содержанию глины консистенции, сопротивление сжатию, по данным исследований (уравнение 2.9 с коэффициентами  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$ ),



составляет, соответственно, 900-1100 кПа и 1200-1500 кПа (рисунок 2.8) [105]. Это в 10–15 раз больше несущих свойств почвы вне колеи при поливе.

По данным теоретическо-поисковых исследований, для типовых режимов орошения, в условиях суглинистых почв Нечернозёмной зоны РФ (на примере ЗАО «Озёры» при  $m=300-500\text{ м}^3/\text{га}$ ), изменение показателей несущей способности  $P_{оннз}$  опорной поверхности, при поливе ДМ кругового действия «Кубань-ЛК1», оснащённой устройством для заравнивания колеи, ориентировочно можно представить графической зависимостью, представленной на рисунке 2.9.

Оценку значения несущей способности почвы  $P_0$ , при поливе дождеванием для ДМ кругового действия, возможно осуществлять по зависимости, предложенной д.т.н., проф. Рязанцевым А.И. (авт. свид. №1706467):

$$P_{онн1} = P_{одн1} - (1,4m_{дост1}^{0,65} + 8 \cdot 1,01^{m_{ст1}}) \quad (2.25)$$

где  $P_{онн1}$  - несущая способность почвы после полива при первом проходе ДМ, кПа;  $P_{одн1}$  - несущая способность почвы до полива, кПа;  $m_{дост1}$ ,  $m_{ст1}$  - величины соответственно до стоковой нормы полива и стока при первом проходе ДМ,  $\text{м}^3/\text{га}$ .

За межполивной период за счёт уменьшения влажности суглинистой почвы  $W$ , с 50 до 10% происходит высыхание почвы в засыпанной заравнивателем в колее. Поэтому перед началом второго прохода ДМ, по данным поисковых исследований (рисунок 2.10), несущая способность почвы  $P_{одн2}$  определяется по зависимости (средняя линия опытов 2 рисунок 2.10):

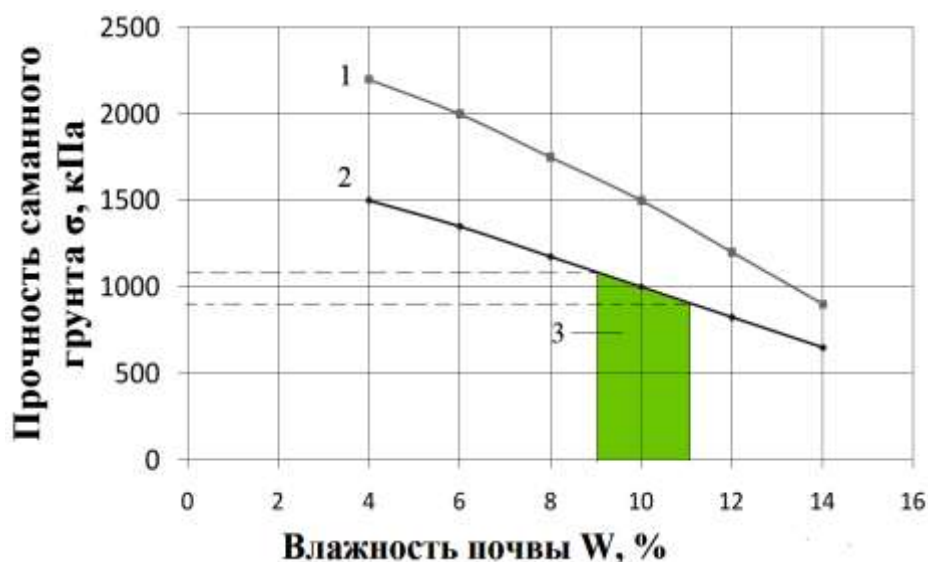
$$P_{одн2} = aW + b, \text{ кПа}, \quad (2.26)$$

в которой  $a$  и  $b$  - эмпирические коэффициенты ( $a=-26,3$ ,  $b=1261$ ), и имеет значение около 1000 кПа (линия 2 рисунок 2.10).

С учетом того, что при втором проходе ДМ несущая способность почвы  $P_{одп2}$ , снижается от экспериментально определённого автором величины, до значения  $P_{онп2}$  (линия 3 рисунок 4) согласно выражению (2.27):

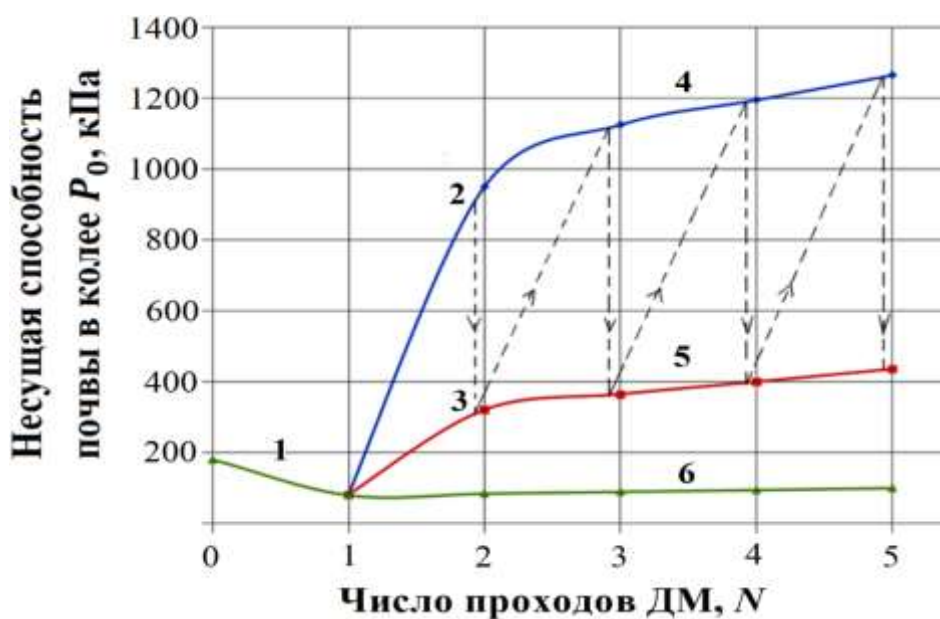
$$P_{онп2} = [P_{одп2} - (1,4m_{дост2}^{0,65} + 8 \cdot 1,01^{m_{ст2}})], \text{ кПа}, \quad (2.27)$$

где  $m_{дост2}$ ,  $m_{ст2}$  - величины, соответственно, до стоковой нормы полива и стока при заравнивании колеи, при втором и последующих проходах ДМ,  $\text{м}^3/\text{га}$ .



1-среднесуглинистый саман, 2 - тяжёлосуглинистый саман, 3-диапазон почвенных условий при высыхании в колее от ходовой системы ДМ.

Рисунок 2.8. Зависимость прочностных показателей самана влажности.



1 - при поливе при первом проходе ДМ, 2 - при заравнивании колеей почвой и ее высыхании перед вторым проходом ДМ, 3 - при заравнивании колеей почвой и ее поливе нормой ( $m = 300-500 \text{ м}^3/\text{га}$ ) при втором проходе ДМ, 4 - при заравнивании колеей почвой, её высыхании и упрочнении при проходах ДМ, 5 - при заравнивании колеей почвой, ее поливе нормой ( $m = 300-500 \text{ м}^3/\text{га}$ ) и упрочнении при проходах ДМ, 6 - без заравнивания колеей почвой, ее поливе нормой ( $m = 300-500 \text{ м}^3/\text{га}$ ) и упрочнении при проходах ДМ, стрелками указаны увеличение и уменьшение несущей способности почвы.

Рисунок 2.9. Изменение несущей способности почвы в колее тележки ДМ от количества ее проходов

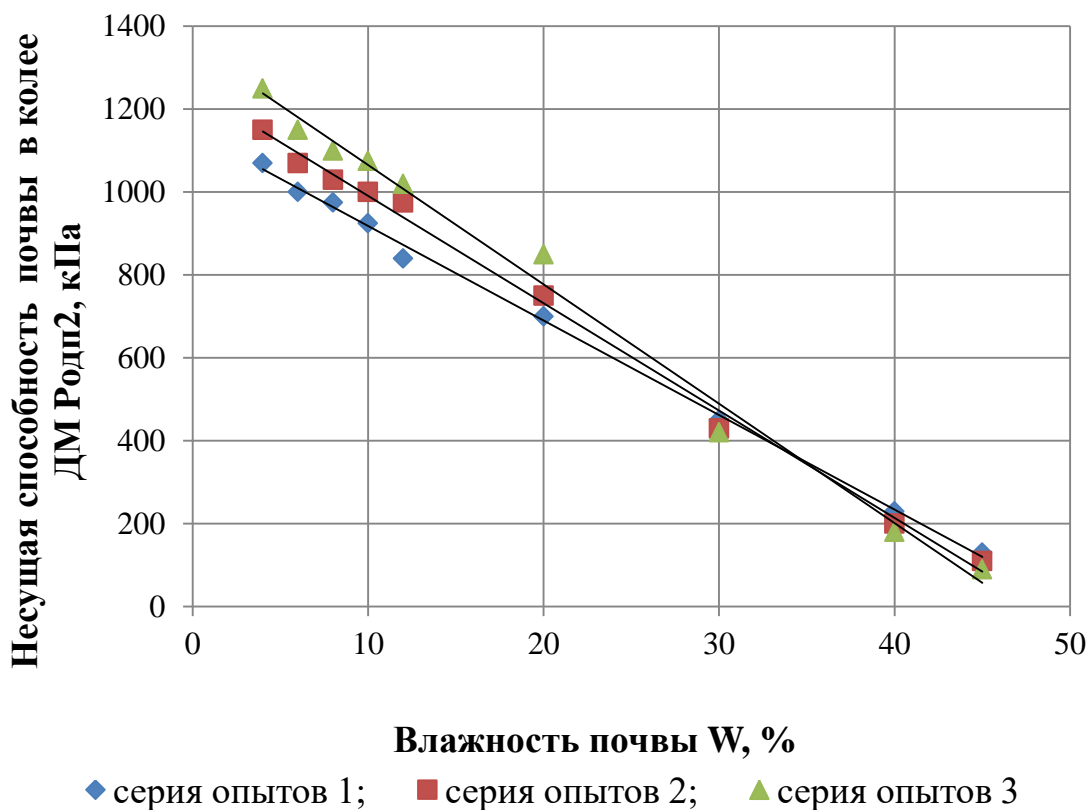


Рисунок 2.10 - Изменение несущей способности средне-суглинистой почвы в колее ДМ от её абсолютной влажности (ЗАО «Озёры» Московской обл.)

Показатели несущих свойств почвы  $P_{0dn2}$ ,  $P_{0nn2}$  растут при увеличении числа проходов ДМ по одной колее, в соответствии с полученной зависимостью:

$$P_{0nn2} = [P_{0dn2} - (1,4m_{досм2}^{0,65} + 8 \cdot 1,01^{m_{см2}})]\gamma^N, \text{ кПа}, \quad (2.28)$$

где  $N$  - количество проходов ДМ;  $\gamma$  – коэффициент интенсивности упрочнения почвы,  $\gamma=1,09 - 1,11$  (по данным исследований проф. А.И. Рязанцева (в т.ч. с участием автора) [102] и других исследователей [92,110]).

На графике (рисунок 2.9) в качестве примера приведены расчётные, с учётом выражений (2.25, 2.26, 2.27, 2.28), изменения показателей несущей способности в процессе полива ДМ «Кубань-ЛК1», при заравнивании её колее. Высыхание почвы в колее перед очередным поливом увеличивает несущую способность опорной поверхности передвижения. На основании условия проходимости:

$$q \leq P_0, \text{ кПа}, \quad (2.8)$$

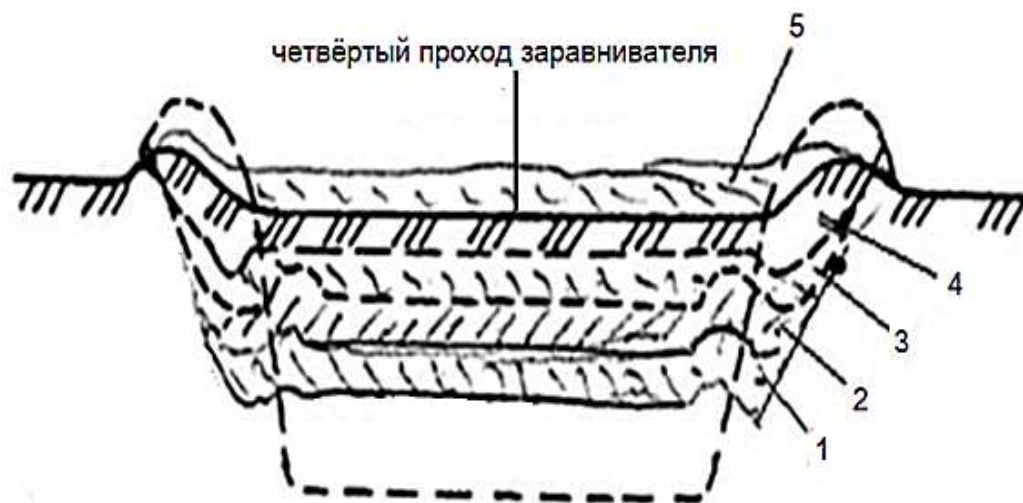
которое указывает на возрастание удельного давления ходовой системы на почву и исходя из соотношения  $\frac{P_{0mn2}}{P_{0mn1}} = k_\epsilon$ , где  $k_\epsilon$  – коэффициент интенсивности высыхания почвы, это значение больше в три раза ( $k_\epsilon = 3,6 - 3,9$ ), (линия 5, против линии 6). С учетом выше изложенного, при заравнивании колеи ДМ начиная со второго прохода, получены следующие выражения для практической оценки несущей способности почвы:

$$P_{0mn2} = k_\epsilon [P_{0дп2} - (1,4m_{дост1}^{0,65} + 8 \cdot 1,01^{m_{ст1}})] \gamma^N, \quad (2.29)$$

и допустимого давления на него ходовой системы:

$$q \leq k_\epsilon [q_{дп} - (1,4m_{дост1}^{0,65} + 8 \cdot 1,01^{m_{ст1}})] \gamma^N \quad (2.30)$$

Использование заравнивающего устройства обеспечивает лучшее качество ходовой системы по высохшей за время межполивного периода опорной слоистой почвенной поверхности, уплотняющейся при каждом проходе ДМ, начиная со второго. Это связано с упрочнением при многократных проходах [110,114,116], почвенных слоёв в следе колеи, что обеспечивает дополнительное повышение их несущей способности и снижает сопротивление передвижению (рисунок 2.11).



1 - 5 порядковый номер кругового полива

Рисунок 2.11. Формирование слоистой уплотнённой почвенной структуры в колее при её заравнивании при увеличении количества круговых поливов ДМ

Анализ полученных выражений (2.29, 2.30) позволяет сделать вывод о том, что за счёт повышения несущей способности почвы возможно уменьшение ширины профиля колёсных движителей ДМ.

## **2.4. Обоснование параметров ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1»**

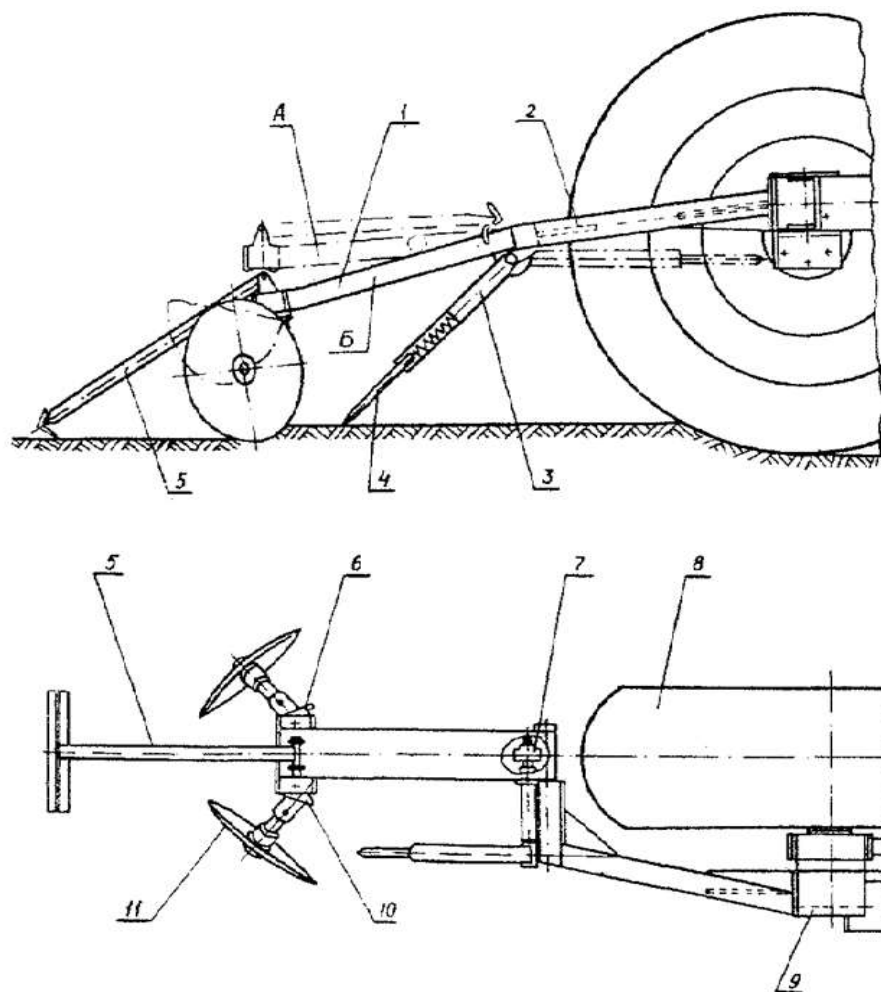
### **2.4.1. Устройство для заравнивания колеи от дождевальная машины**

Наряду с соблюдением режима полива, важнейшим условием максимального повышения несущей способности почвы при заравнивании колеи от ДМ, является качество, определяемое отсутствием выпуклостей и разъёмов по ширине [94], и заполняемостью по глубине [85,123].

Для заравнивания колеи от ДМ «Кубань-ЛК1» в работе применялось устройство, разработанное ранее [65,113] с проведением уточнения его параметров для уменьшенного значения ширины колеи от опытной ходовой системы.

Конструктивные особенности заравнивающего устройства приведены на рисунке 2.12. Устройство включает балку 2, раму 1 и механизм реверса, состоящий из рычага 3, штыря 4 и кулачка 7. На раме размещаются кронштейны со ступицами и сферическими дисками и разравниватель 5. Разравниватель крепится консольно к цапфе колеса дождевальной машины посредством четырех болтов.

При заполнении колеи производится подрезание почвы сферическими дисками 11, перемещение ее к центру колеи и сглаживание разравнивателем 5. Заглубление дисков в почву осуществляется за счёт собственной массы разравнивателя, при этом предусмотрено ограничение глубины хода рабочих органов. Перевод разравнивателя в транспортное положение может осуществляться как в автоматическом режиме с помощью механизма реверса при изменении направления движения машины, так и вручную.



- А-транспортное положение; Б - рабочее положение;  
 1 - рама; 2 - балка; 3 - рычаг; 4 – штырь; 5 –разравниватель;  
 6 и 10 – кронштейн левый и правый; 7 – кулачок; 8 – колесо тележки;  
 9 – цапфа колеса; 11 – сферический диск

Рисунок 2.12. Заравнивающее устройство, разработанное для дождевальной машины ДМ «Кубань–ЛК1»

Основными параметрами, определяющими взаимодействие дисков с почвой являются: диаметр диска  $D_{\delta}$  ( $D_{\delta} = 450$  мм), радиус кривизны  $R_{\delta}$  ( $R_{\delta} = 1000$  мм); угол атаки  $\alpha$  ( $\alpha = 23-25^{\circ}$ ); угол наклона плоскости вращения лезвия к горизонтали  $\beta$  ( $\beta = 90^{\circ}$ ), и расстояние между дисками по горизонтальной оси  $B_{\delta}$  ( $B_{\delta} = B_{\kappa} + (150 - 180\text{мм})$ ), где  $B_{\kappa}$ - ширина заравниваемой колеи [84, 93,115].

Эффективность применяемого в работе дискового заравнивающего устройства, обеспечивающего качественное заполнение колеи, с высокой степенью её выравненности, подтверждается включением данного



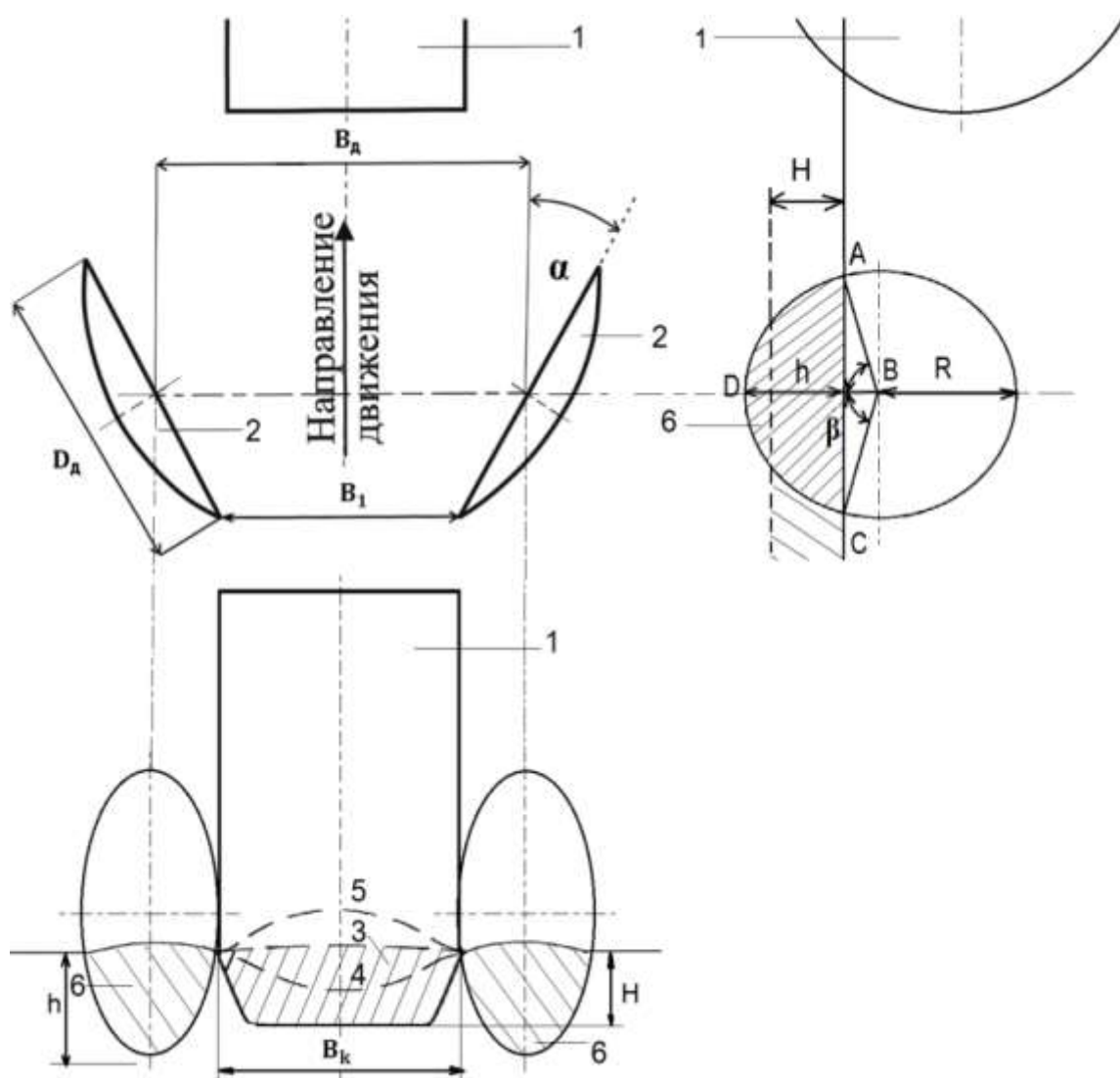
заравнивающего устройства в «Федеральный Регистр базовых и зональных технологий и технических средств для проведения мелиоративных работ в сельскохозяйственном производстве» [113].

#### **2.4.2. Оценка угла атаки дисков заравнивающего устройства в зависимости от параметров ходовой системы многоопорной ДМ кругового действия, при различной глубине колееобразования.**

Установлено, что при водонасыщении слоем осадков равном 0,05 м ( $m = 500$  м<sup>3</sup>/га), и равенстве глубины колеи и толщины заполняющего её слоя, начиная с 0,05 м, исходя из водопроницаемости уплотнённой опорной поверхности менее 25 мм, около 40 мм не впитывается и превращается в сток [56,85,123]. За время межполивного периода, вследствие интенсивного испарения образовавшегося стока воды и высыхания засыпанного переувлажнённого почвенного слоя, вся его толщина превращается в прочную почвенную корку при максимальном значении глубины колеи около 0,08 м [123].

Для обеспечения равномерного и качественного заполнения колеи в следе от ДМ, рассмотрено применение разработанного ранее для серийной ходовой системы ДМ «Кубань – ЛК1», дискового заравнивающего устройства с уточнением ранее обоснованных параметров. Его применение способствует уменьшению ширины профиля колёсных движителей и исключению образования выпуклостей и разъёмов по ширине и глубине колеи. Для заполнения колеи необходимо равенство объёмов срезаемой и перемещаемой в колею почвы (рисунок 6). Таким образом из равенства половины площади поперечного сечения колеи  $S_1 = \frac{HB_k}{2}$  (зона 1 рисунок 2.13) и проекции площади сегмента при взаимодействии дискового рабочего органа с почвой  $S_{AFCD}$  (зона б рисунок 2.13) в плоскости, перпендикулярной к направлению движения рабочего органа, получаем:

$$S_{AFCD} \sin \alpha = \frac{R^2}{2}(2\beta - \sin(2\beta)) \sin \alpha = \frac{HB_k}{2} \quad (2.31)$$



1-колёсный движитель ходовой системы ДМ; 2-дисковые рабочие органы выравнивающего устройства ( $D_d$ -диаметр рабочих органов,  $B_1$ -минимальное расстояние между режущими почву кромками,  $B_d$ - расстояние между дисками); 3- объём заполняемой колеи ( $H$ -глубина колеи,  $B_k$ -её ширина); 4,5-образование разъёма и выпуклости соответственно; 6-сегмент взаимодействия рабочих органов выравнивающего устройства с почвой ( $h$ -глубина погружения дисков)

Рисунок 2.13. Схема взаимодействия с почвой дисковых рабочих органов выравнивающего устройства

где  $H$  – глубина колеи,  $B_k$  – её ширина,  $\alpha$  – угол атаки дисков. Отсюда получено выражение для определения оптимального значения  $\alpha$  при заполнении колеи:

$$\alpha = \arcsin \frac{HB_k}{(2\beta - \sin(2\beta))R^2} \quad (2.32)$$

Для заполнения колеи с учётом параметров погружения рабочего органа  $h$ , его радиуса  $R$ , (рисунок б), при определении значения угла атаки  $\alpha$ , необходимо в выражение (2.32) подставить величину  $\beta = \arccos \frac{R-h}{R} = \arccos(1 - \frac{h}{R})$  (рисунок 2.13).

Тогда получим следующее выражение:

$$\alpha = \arcsin \frac{HB_k}{((2\arccos(1 - \frac{h}{R}) - \sin(2\arccos(1 - \frac{h}{R})))R^2)} \quad (2.33)$$

Ранее обоснованные пределы изменения угла атаки ( $\alpha=23-25^\circ$ ) [107], требуют уточнения с учётом обеспечения наилучшего упрочнения высохшей поверхности передвижения. Для допустимой глубины погружения рабочего органа  $h = 0,10$  м,  $R = 225$  мм,  $B_k = 300$  мм,  $H = 0,075$  м (глубина колеи после первого прохода опытной ходовой системы на пневмошинах 11.2R44) величина угла атаки составляет  $\alpha = 25,67^\circ$ .

$$\alpha = \arcsin \frac{0,076 \times 0,300}{((2\arccos(1 - \frac{100}{225}) - \sin(2\arccos(1 - \frac{100}{225})))0,225^2)} = 25,67^\circ.$$

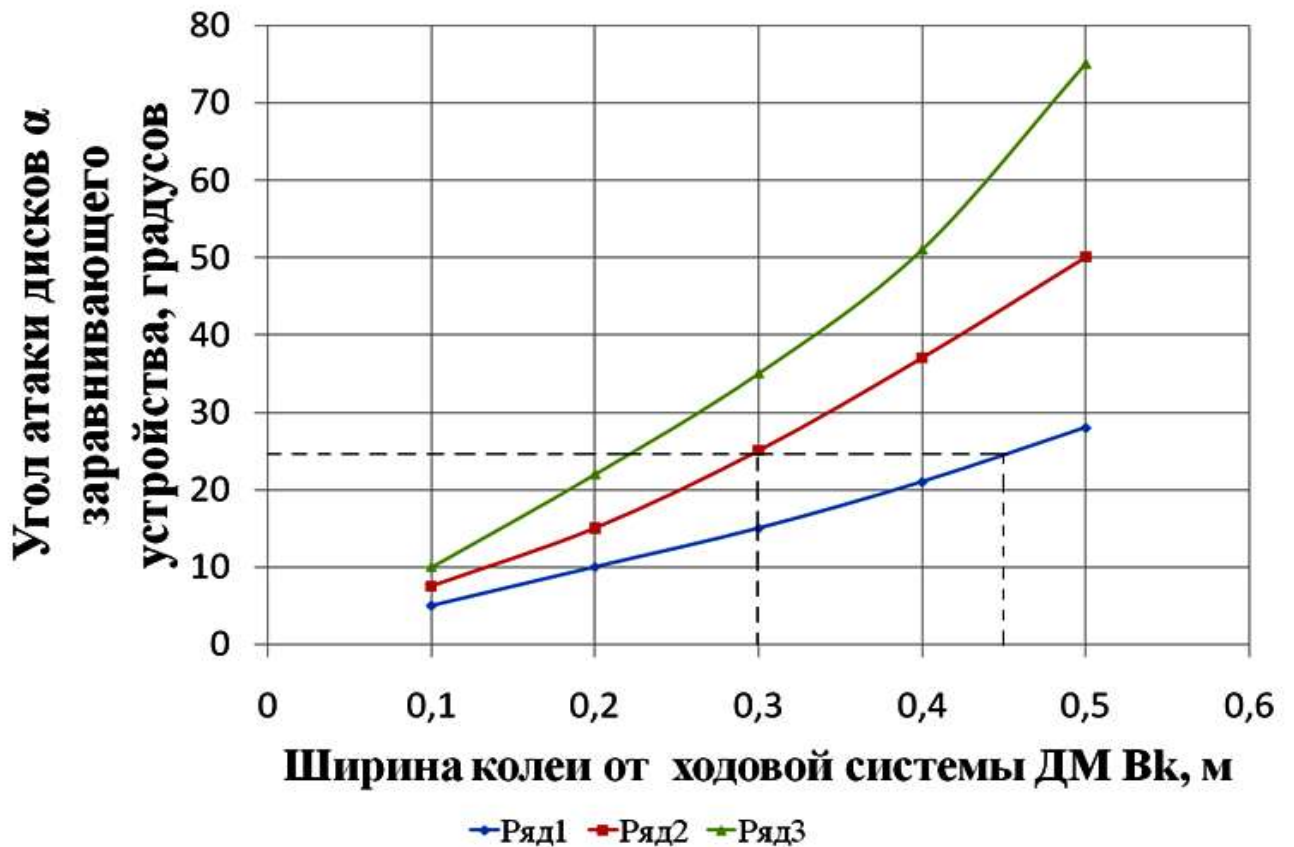
Оценка расстояния  $B_\delta$  производится по формуле (рисунок 2.13):

$$B_\delta = B_k + 2R \sin\beta \sin\alpha = B_k + 2R \sin \arccos(1 - \frac{h}{R}) \sin\alpha,$$

и для вышеуказанных значений составляет:  $B_\delta = B_k + 0,177$  м, или  $0,477$  м, что соответствует данным [107,82,31]. При значениях:  $R = 225$  мм,  $h = 0,10$  м,  $B_k = 460$  мм,  $H = 0,050$  м (глубина колеи после первого кругового полива серийной ходовой системы на пневмошинах 18.4R24), значение угла атаки дисковых рабочих органов заравнивателя составит:

$$\alpha = \arcsin \frac{0,050 \times 0,460}{((2\arccos(1 - \frac{100}{225}) - \sin(2\arccos(1 - \frac{100}{225})))0,225^2)} = 25,92^\circ.$$

На рисунке 2.14 представлены значения угла атаки  $\alpha$  рабочих органов заравнивающего устройства, в зависимости от ширины колеи при различных значениях её глубины  $H$  (0,05, 0,075 и 0,10 м).



Ряд 1 - глубина заравниваемой колеи  $H = 0.05$  м, Ряд 2 -  $H = 0.075$  м, Ряд 3 -  $H = 0.10$  м

Рисунок 2.14. Зависимость угла атаки дисков  $\alpha$  от ширины колеи  $B_k$  при различных значениях глубины хода  $H$

Исходя из уменьшенной ширины профиля опытных колёс (*11.2R44*) при расстоянии между дисками  $B_\delta = 0,45$  м, проведено уточнение обоснованного угла атаки дисков ( $\alpha = 23-25^\circ$ ) с учётом пропуска, без забивания, необходимого объёма почвенного слоя.

Определим минимальное расстояние между режущими кромками дисков (рисунок 2.13):

$$B_1 = B_\delta - 2R \sin \alpha, \quad (2.34)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{B_\delta - B_1}{D_\delta} \quad (2.35)$$

На основании этого, значение угла атаки дисков, исходя из допустимого значения  $B_1 = 0,25\text{ м}$ , составляет не более  $26^\circ$  (данные исследований Ю.Н. Егорова) [22,25].

На рисунке 2.15 отображена зависимость (2.35).

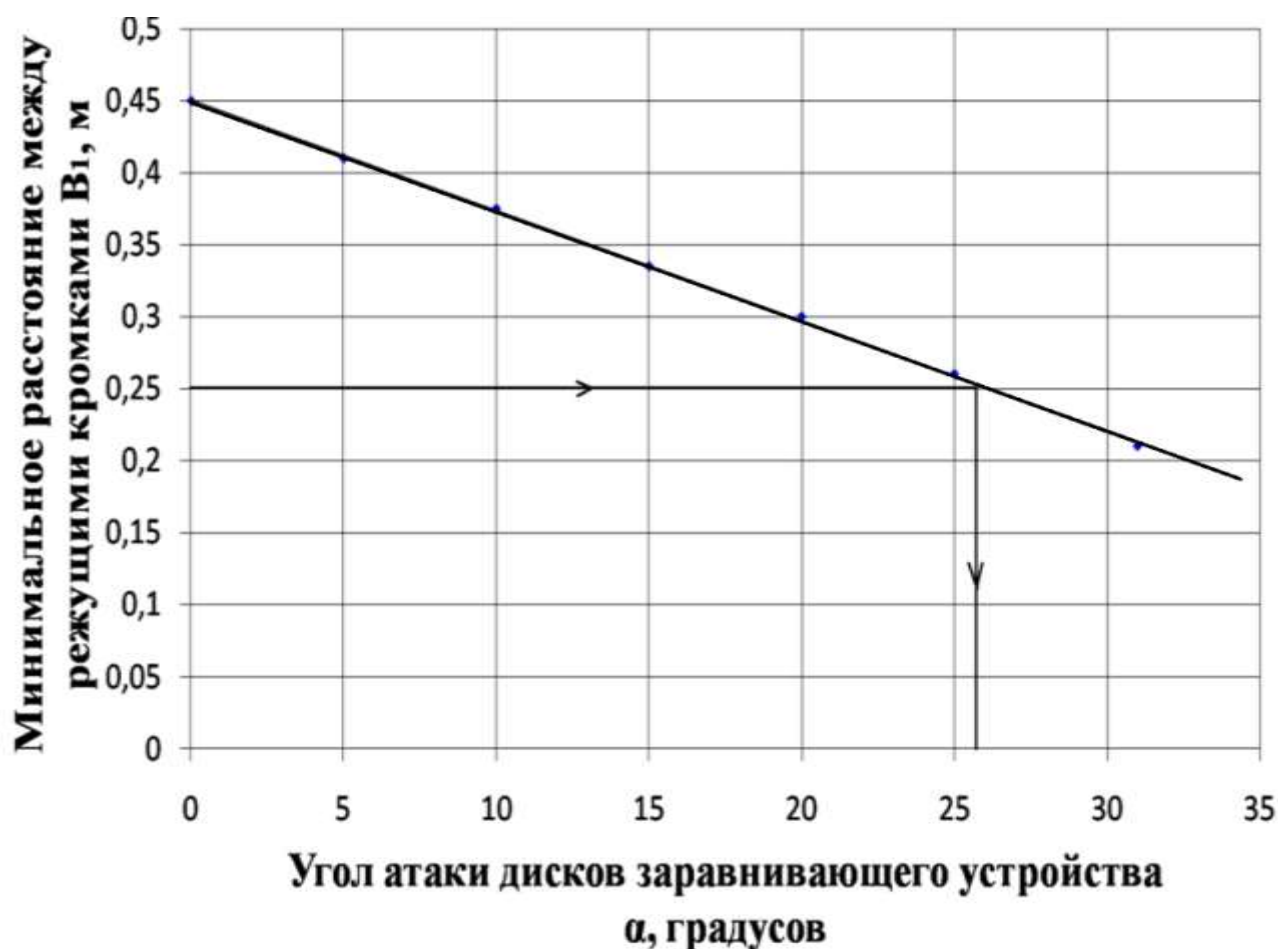


Рисунок 2.15. Зависимость по обоснованию допустимого угла атаки  $\alpha$  дисков заравнивающего устройства

Значения угла атаки дисков  $\alpha$ , обеспечивающие свободный проход почвенного слоя без забивания рабочих органов, составляют не более  $26^\circ$ . Уточнённые значения угла  $25,67^\circ$ , обеспечивающие полное заравнивание колеи от ходовых систем с пневмошинами *11.2R44*, располагаются внутри интервала значений, при которых обеспечивается надёжная и устойчивая работа заравнивающего устройства.

### 2.4.3. Колесный движитель дождевальнoй машины

Важнейшими факторами передвижения являются энергетические затраты и соответствие давления ходовой системы ДМ «Кубань – ЛК1» на почву значению её несущей способности. Энергетические затраты определяются сопротивлением качению тележек ( $P_f$ ), и связаны с глубиной колеи  $H$ , которая вычисляется по усовершенствованной зависимости (М.Е.Мацепуро, Ш.Ф.Марголин): [52,53].

$$H = \frac{1,2 \cdot G \gamma}{B \cdot P_0 \cdot \sqrt{D_{пр}}}, \quad (2.36)$$

где  $B$  – ширина профиля пневматической шины, м;

$P_0$  – несущая способность почвы, Н/м<sup>2</sup>,  $P_0 = 1,1 K_{см}$  (данные А.М. Баранского),  $K_{см}$  – коэффициент объемного смятия, Н/м<sup>3</sup>

$\gamma$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий увеличение глубины колеи за задним колесом тележки,  $\gamma=1,1 \dots 1,2$ ;

$D_{пр}$  – приведенный диаметр жесткого колеса, м,

$$D_{пр} = D_0 + \frac{h_{пр}}{H_{доп}} (D_0 - 2H_{доп} - h_{пр}),$$

$D_0$  – диаметр пневматического колеса, м;

$H_{доп}$  – допустимая глубина колеи ( $H_{доп} \approx 0,05$  м);

$G$  – действующая на тележку сила тяжести, Н

С учетом сопротивления качению тележек ( $P_f$ ), которая пропорционально увеличивается за задним колесом, глубина колеи  $H_N$  вычисляется по усовершенствованной зависимости (М.Е.Мацепуро, В.В. Кацыгин) [30,52,53,118]:

$$H_N = \frac{1,2 \cdot G \gamma}{B \cdot P_0 \cdot \sqrt{D_{пр}}} (1 + \beta \lg N); (N \leq 5), \quad (2.37)$$

где  $H_N$  – суммарная глубина после N-ого прохода тележки, м;

$\beta$  – коэффициент интенсивности увеличения глубины колеи (исходя из десятикратного воздействия ходового колеса ДМ за сезон на почву, по данным наших исследований,  $\beta=4,50$ );

$N$  – номер прохода тележки.

Коэффициент сопротивления качению  $f$ , который предопределяет



энергетические затраты на передвижение, определяется по выражению (2.38):

$$f = 0,8 \sqrt{\frac{H_N}{D_{пр}}} \quad (2.38)$$

На рисунке 2.16 представлены графические зависимости изменения глубины колеи  $H_N$  при движении тележки ДМ на серийных пневматических шинах 18.4R24 ( $B \approx 0,46$  м;  $D_0 \approx 1,40$  м) от числа её проходов до заравнивания колеи (кривые 1, 2) и после (кривая 3).

При заравнивании колеи ДМ, логарифмическое увеличение глубины сменяется ее уменьшением в следствии роста ее несущей способности в зоне движения. С учётом высыхания и уплотнения почвы от многократных проходов, нами получены следующая зависимость:

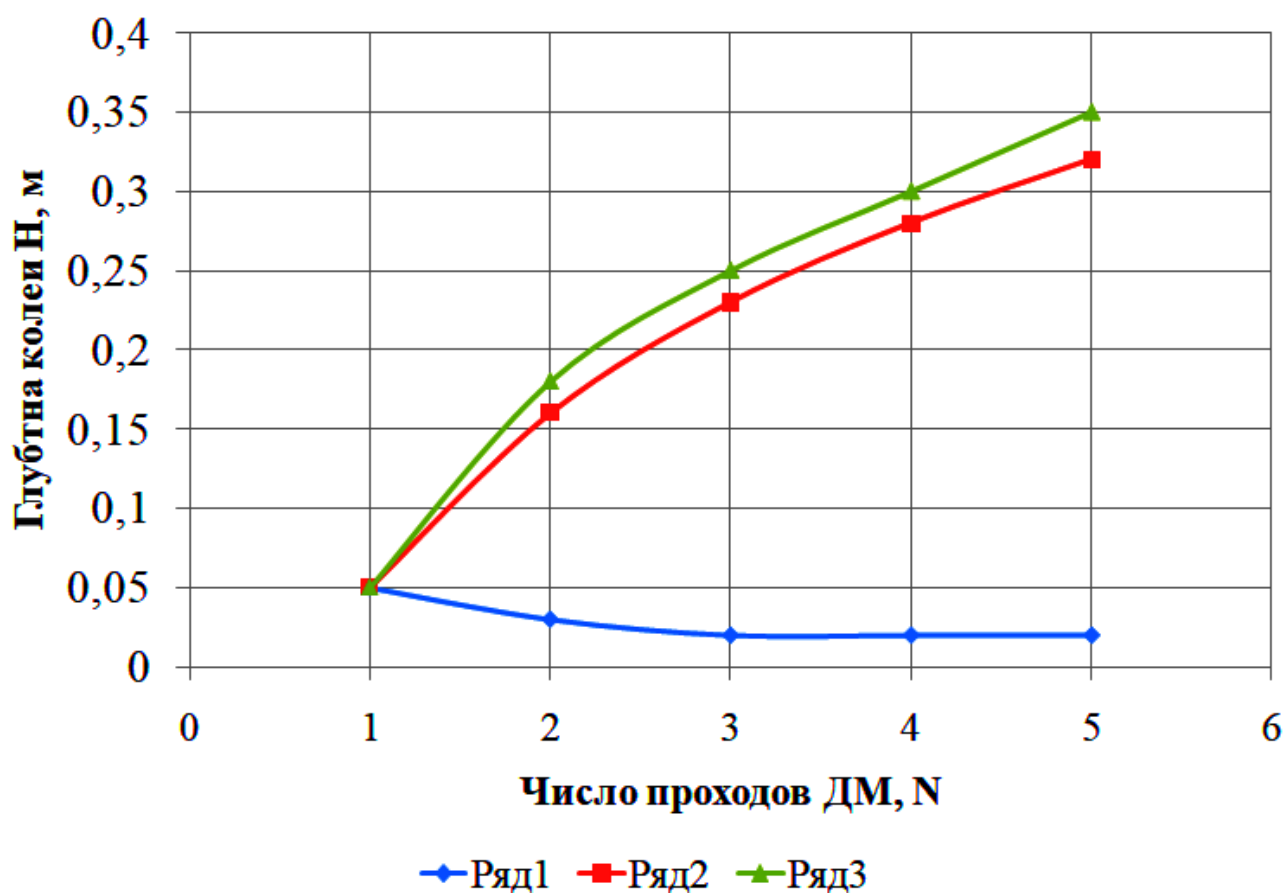
$$H_N = \frac{1,2G}{BP_0\sqrt{D_{пр}}} \left(1 - \frac{k_{вN}}{\beta} LgN\right), \text{ м} \quad (2.39)$$

где  $k_{вN}$  - коэффициент упрочнения несущей поверхности, для прохода ДМ с номером  $N$ .

Теоретически оценка колееобразования ДМ осуществлялась при типовом режиме орошения, определяемым поливными нормами  $m_m = 300-500$  м<sup>3</sup>/га. При этом усредненные значения несущей способности почвы ( $P_0$ ) в следе колеи при поливе (после межполивного периода) составляют 85-110 кПа, а при заравнивании - 320 и более кПа.

По выражениям (2.37,2.38,2.39) построены графики (рисунок 2.16, 2.17). Из графиков видно, что серийные шины (18.4R24) тележек ДМ, воздействуя на увлажненную почву ( $m=500$  м<sup>3</sup>/га) с несущей способностью  $P_0=75 \div 80$  кПа, в конце пятого прохода образуют колею более 0,32 м (кривая 3, рисунок 2.16).

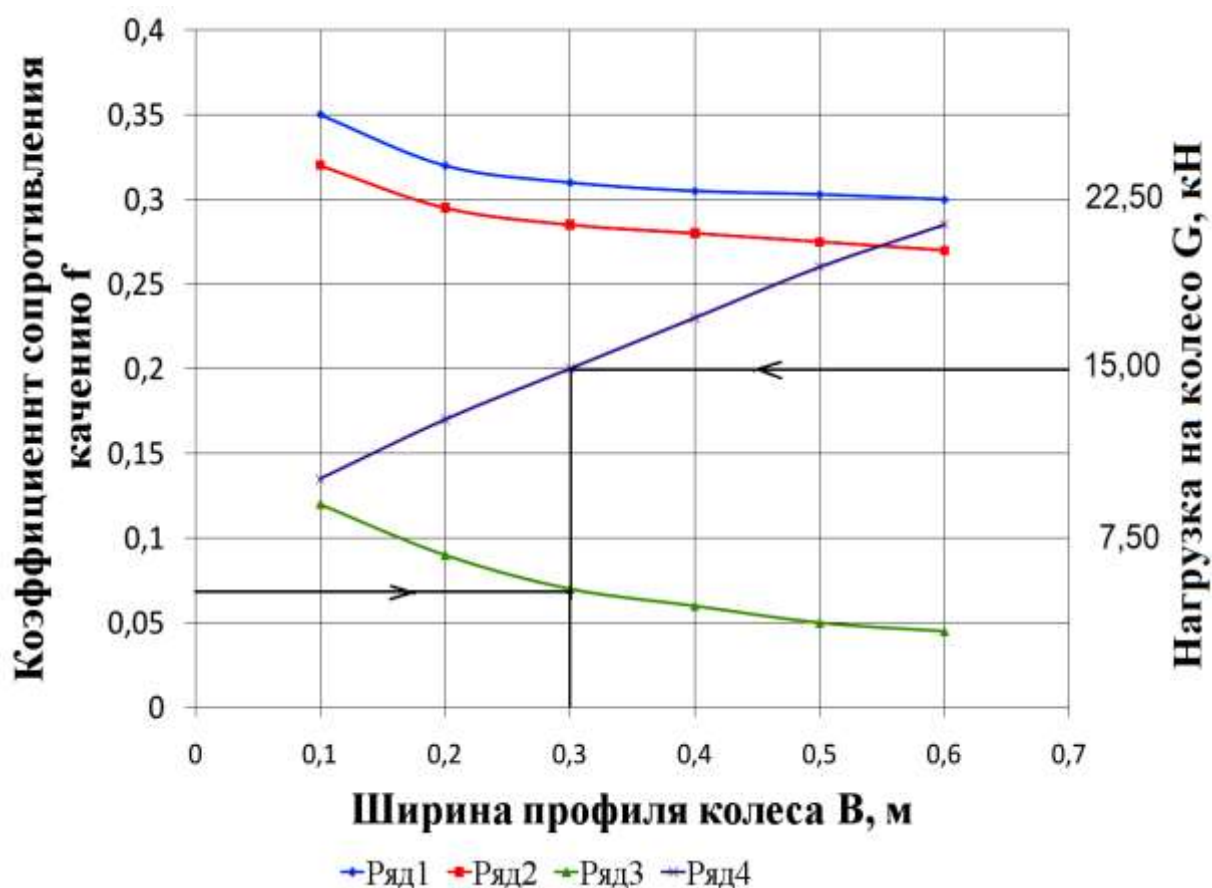
При этом после первого прохода ДМ глубина колеи не превышает 0,05 м, что соответствует агротехническими требованиям [63]. Для уменьшенных поливных норм до 300 м<sup>3</sup>/га, глубина колеи имеет меньшее значение (кривая 2, рисунок 2.16). При значениях несущей способности почвы 100-110 кПа, глубина колеи после пятого и первого проходов ДМ, соответственно, составляет около 0,28 и 0,03 м.



1 –  $P_0 = 75-80$  кПа ( $m=500$  м<sup>3</sup>/га); 2 –  $P_0 = 100-110$  кПа ( $m=300$  м<sup>3</sup>/га); 3 –  $P_0 = 320-350$  кПа ( $m=300 - 500$  м<sup>3</sup>/га)

Рисунок 2.16. Зависимость глубины колеи колесного движителя тележки ДМ «Кубань-ЛК1» от числа проходов

При послойной засыпке заравнивающими устройствами колеи от ДМ при каждом её проходе почвой и засыхании перед очередным поливом несущая способность засыпанной поверхности составляет 320 и более кПа. Оценка колееобразования ДМ после заравнивания следов от неё ( $P_0=320-350$ кПа) выявила, что глубина колеи для рассматриваемых пневматических шин в течение поливного сезона не превышает значения 0,05 м, и имеет тенденцию к уменьшению, с увеличением числа проходов ДМ. Значение коэффициента сопротивления качению (рисунок 2.17), на пятом проходе ДМ без заравнивателя ( $P_0=80-100$  кПа), составляет для исследуемой ширины профиля шины ( $B=0,46$  м) в пределах 0,28–0,30, что соответствует силе сопротивления качению  $P_f \approx 10$  кН.



1 –  $P_0 = 75$  кПа; 2 –  $P_0 = 100$  кПа; 3 –  $P_0 = 320$  кПа; 4 - нагрузка на колесо ходовой системы от ширины профиля движителя тележки ДМ «Кубань-ЛК1» от ширины профиля шин при заравнивании колеи (3) и без (1) (5-й проход ДМ)

Рисунок 2.17. Зависимость коэффициента сопротивления качению колесного движителя от ширины его профиля.

Сила сопротивления движению ДМ с устройством для заравнивания колеи (при коэффициенте сопротивления качению  $f = 0,07$ ) составляет  $P_f = 2,25$  кН, что обеспечивает снижение мощности на привод мотор-редуктора тележки на 26%. Поэтому для снижения материалоемкости и уменьшения затрат на передвижение ДМ с учётом существующей нагрузки на колеса, (при коэффициенте сопротивления качению не более 0,10), следует ее оснащать менее массивными и более дешёвыми шинами с уменьшенной шириной профиля *11.2R44*. Это позволяет, в сравнении с серийными колёсами *18.4R24*, уменьшить площадь повреждаемости растений ДМ на 0,35 га, при увеличении коэффициента земельного использования орошаемой площади с 0,98 до 0,99.

## 2.5. Выводы по 2 разделу

1. Из тягового баланса определено, что при снижении сопротивления качению  $P_f$  с уменьшением коэффициента  $f$ , от значений 0,30-0,35 до 0,05-0,10, энергетические затраты на передвижение ( $N_f$ ) уменьшаются с 0,32 до 0,05 кВт, что составляет около 26 % от общих энергетических затрат ( $N_e = 1,1$  кВт).

2. Выявлено, что повышение несущей способности почвы в зоне движения тележек ДМ «Кубань-ЛК1» за счет заравнивания колеи и режима полива (межполивного периода) и последующего увлажнения составляет, в среднем в 3,6-3,9 раза и характеризуется соответствующей эмпирической зависимостью.

3. Уточнены значения угла атаки и расстояние между дисковыми рабочими органами применяемого заравнивающего устройства, позволяющие обеспечить наилучшее упрочнение высохшей поверхности передвижения ДМ «Кубань-ЛК1», при её оснащении ходовой системой с уменьшенной шириной профиля.

4. При теоретическом обосновании параметров ходовой системы многоопорной ДМ кругового действия на основании предельного значения несущей способности почвы в колее установлено, что с учётом максимальной нагрузки 16,0 кН на колесо, ходовая система должна быть оснащена пневмошинами *11.2R44* с шириной профиля 0,27 м, диаметром 1,6 м.

### 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Программа проведения лабораторных, лабораторно-полевых и производственных исследований состояла из следующих мероприятий:

1. Определение прочностных показателей почвенной поверхности передвижения и величины почвенной деформации ходовой системой ДМ «Кубань-ЛК1».

2. Оценка соответствия теоретических и экспериментальных данных при определении параметров ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1».

3. Определение энергетических показателей ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1».

4. Оценка эксплуатационно-технологических характеристик ДМ «Кубань-ЛК1» с усовершенствованной ходовой системой.

Исследовательские работы проводились с учетом методических требований СТО АИСТ 11.1 – 2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей [108].

Была разработана оригинальная методика проведения лабораторных и лабораторно-полевых исследований ходовых систем ДМ «Кубань-ЛК1», которая изложена в соответствующих разделах отображающих последовательность, порядок и сущность измерений.

Перед началом проведения исследований была составлена программа испытаний с четкой последовательностью действий в процессе регистрации измеряемых параметров в соответствии с журналом измерений со следующим алгоритмом:

1) измерение несущей способности почвы [102], перед проходом ( $P_{0дп}$ ) и после прохода ходовой системы ( $P_{0пп}$ ) ДМ,

2) фиксация полученной величины почвенной деформации ( $H$ ),

3) определение величины энергетических затрат на передвижение:

тензометрированием в лабораторных исследованиях ( $f$ ), и посредством ваттметра в лабораторно-полевых ( $N$ ).

4) обработка полученных результатов с определением основных статистических характеристик, определение величины доверительного интервала, и степени соответствия теоретическим значениям.

При фиксации результатов одной серии экспериментов производилось двадцать измерений регистрируемого параметра, для общей последовательности из пяти проходов ходовой системы ДМ.

После завершения каждого полива, осуществлялось вычисление основных статистических характеристик, с определением расхождения между теоретическими и полученными данными. Начиная со второй серии экспериментов, после каждого полива производилось оценка соответствия величине доверительного интервала (0,95) при обеспечении качества решения задачи исследования с погрешностью менее 5%.

Схема проведения экспериментальных исследований ходовой системы широкозахватной многоопорной дождевальная машины кругового действия, в соответствии с разработанной методикой и программой исследований приведена на рисунке 3.1.

### **3.1. Методика регистрации параметров деформации почвы и энергетических характеристик передвижения ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» в лабораторных условиях**

Моделирование изменения несущей способности почвы при поливе дождеванием при нормах  $m=300$  и  $500$  м<sup>3</sup>/га, с учетом уплотнения при проходах ДМ и межполивного периода (5-7 дней), осуществлялось на лабораторной установке в почвенном канале (рисунок 3.2) с характеристиками, приведёнными в таблице 3.2. Определение показателей прочности почвы производилось автоматизированным, самопогружным почвомером-пенетрометром (рисунок 3.4).

При погружении конусного наконечника, полученные данные обрабатывались при помощи микроконтроллера с последующим корреляционным анализом по

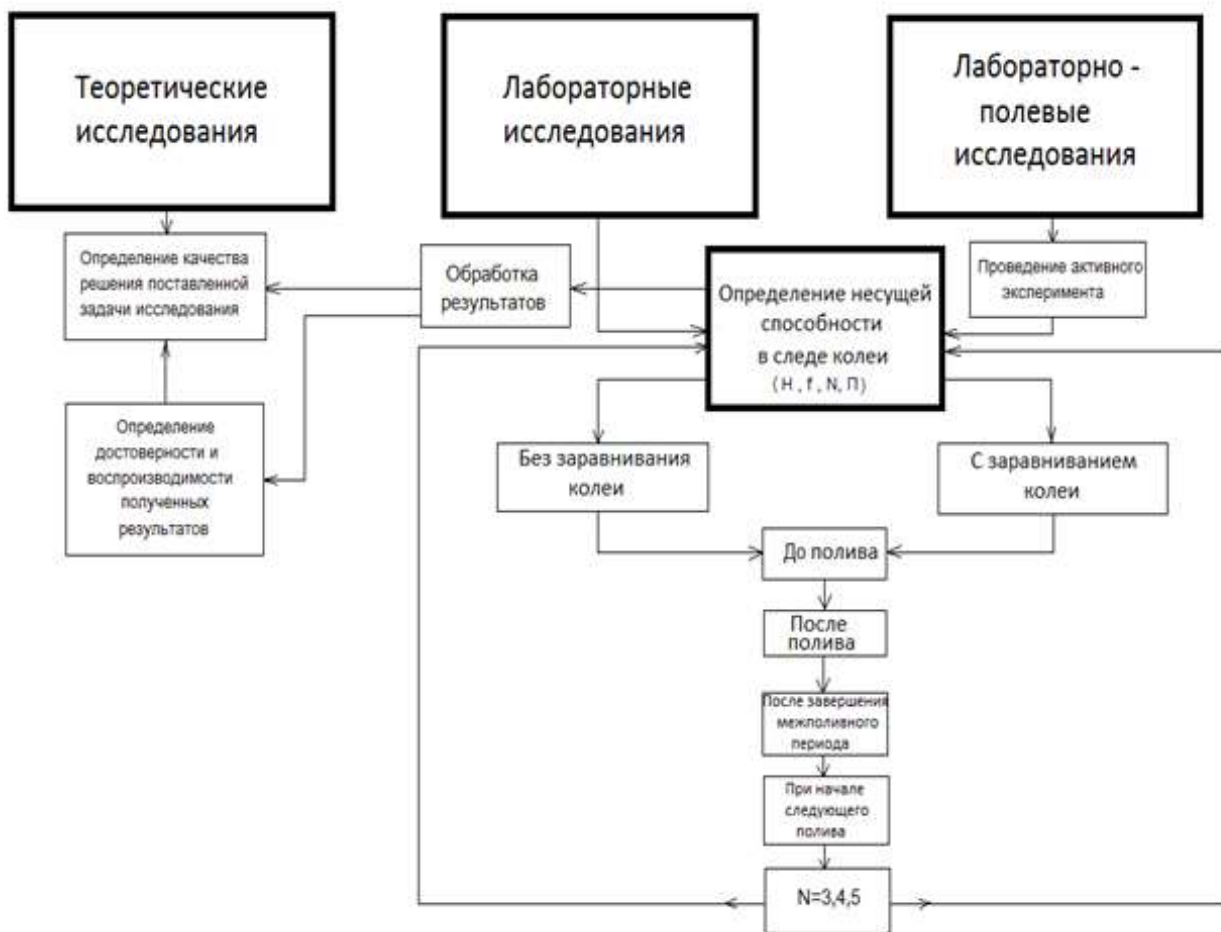


Рисунок 3.1. Схема проведения экспериментальных исследований ходовой системы многоопорной дождевальная машины кругового действия.

установленной методике (ГОСТ 34276-2017).

При этом основополагающими характеристиками являются сила тяжести, действующая на конус и площадь наконечника на глубине вдавливания.

В ходе передвижения макетных образцов ходовой системы на шинах 4x6 и 6x12, моделирующих по нагрузке и типоразмерам существующие пневмоколеса (11.2R44 и 18.4R24), по поверхности почвенного канала, оценивались глубина колееобразования и энергетические затраты на передвижение, с заравниванием колеи и без, с выдачей рекомендаций по уточнению соответствующих параметров



(рисунок 3.2).

Степень повторяемости и воспроизводимости экспериментов в почвенном

Таблица 3.2. Технические характеристики лабораторной установки

Характеристики	Показатели
Габариты почвенного канала, мм:	ширина 550, высота 450, длина 5500
Габариты телеги, мм:	ширина 450, высота 400, длина 1100
Тензодатчик	1
Количество шин, шт	2
Количество грузов, шт	3
Масса груза, кг	580
Почва	суглинок
Параметры шин	4x6,6x12



1 – основание; 2 – макетные образцы пневматических шин; 3 – груз;  
4 – измерительный комплекс

Рисунок 3.2. Общий вид лабораторной установки для проведения исследований макетных образцов ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1»

канале по оценке колееобразования и энергетических показателей с использованием массо-габаритных макетных образцов, имитирующих серийную и экспериментальную ходовую систему, была установлена проведением 5 серий измерений.

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 3.3.

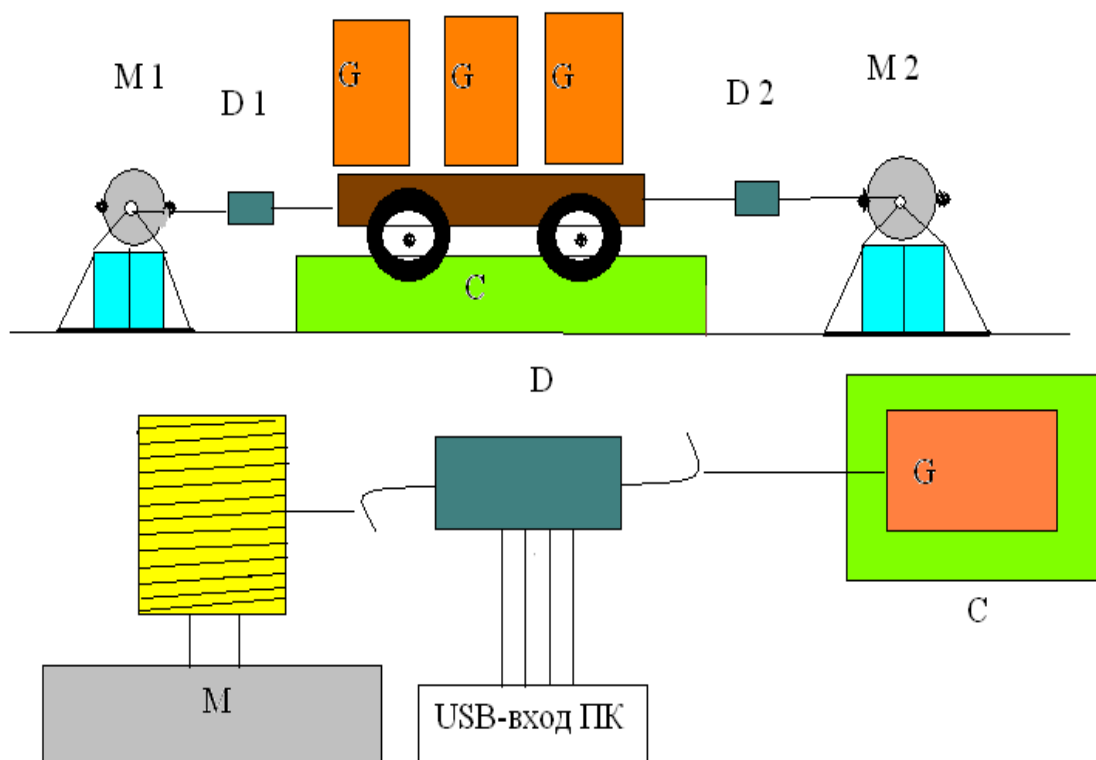
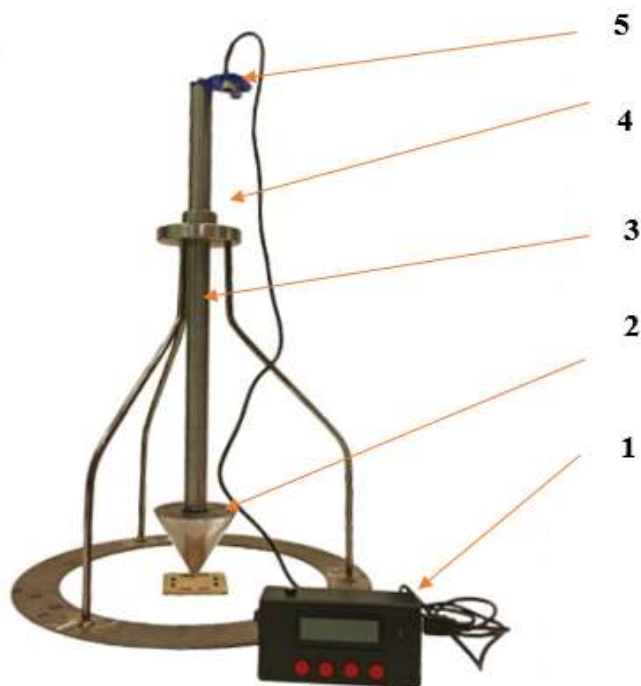


Рисунок 3.3. Схема проведения лабораторных испытаний.

G - груз; D1,D2 - тензометрические датчики ; M1, M2 - электродвигатели лебёдок; C- почвенный канал.

Перемещение макетных образцов по почвенному каналу производилось при помощи автомобильной лебёдки с усилием 12,500 кН и скоростью перемещения 2,5 м / мин. Показания тензометрического датчика (рисунок 3.5) через согласующее устройство поступали в компьютер (рисунок 3.5) и обрабатывались программными средствами, использующими распределение Стьюдента для 20 значений измеряемого параметра с определением основных статистических характеристик [12,14,112,119]. Режимы полива воспроизводились увлажнением почвы в канале при помощи лейки (300 и 500 куб. м./га, соответствовали расходу



1 – микроконтроллер обработки данных; 2 – погружной конус; 3 – ходовой вал (груз); 4 – направляющая втулка; 5 – ультразвуковой датчик HC-SR04.

Рисунок 3.4. Общий вид самопогружного почвомера-пенетromетра



1 – компьютер; 2 – тензометрическое звено ходовой системы

Рисунок 3.5. Общий вид оборудования по тензометрированию сопротивления качению макетных образцов ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1»

30 л и 50 л на квадратный метр). Промежуток времени между очередными проходами макетных образцов равнялся межполивному периоду и составлял 5 и 7 суток соответственно. Заравнивание колеи в почвенном канале производилось вручную. После завершения цикла измерения параметров для пяти проходов макетных образцов ходовой системы в почвенном канале, полученная колея заравнивалась и начиналась следующая серия экспериментов.

Зарегистрированные расхождения между полученными значениями матожидания в пяти сериях экспериментов составили менее 3,5%, при значениях среднеквадратичного отклонения 5 %, что соответствует установленным требованиям по величине доверительного интервала, не менее 0,95.

Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными не превысило значения 5%, что подтвердило качество решения поставленной задачи.

### **3.2. Определение условий проведения лабораторно-полевых и производственных исследований**

Исследования проводились в ЗАО «Озеры» Московской области на ДМ «Кубань-ЛК1» с десятью тележками (рисунок 3.6), на орошаемой культуре картофель, в условиях средне - суглинистой почвы. Уклон поля вдоль водопроводящего трубопровода и по ходу движения тележек не превышал  $\pm 0,01$  (рисунок 3.7). Для проведения исследований была произведена подготовка и оснащение ДМ «Кубань-ЛК1» устройствами для заравнивания колеи с предварительно определёнными нами в ходе теоретических исследований оптимальными параметрами.

Перед проведением исследований ДМ «Кубань-ЛК1» оснащалась серийными пневмошинами *18.4R24* и опытными *11.2R44* (на последней тележке) с навеской, за соответствующими колесными движителями заравнивателей колеи (рисунок 3.8). В таблице 3.2 приведены технические характеристики ДМ «Кубань-ЛК1» и её ходовой системы.



Рисунок 3.6. Общий вид «Кубань-ЛК1» в ЗАО «Озёры»



Рисунок 3.7. План орошаемого участка с ДМ «Кубань-ЛК1» в ЗАО «Озёры»





а



б

1 – рама тележки; 2 – ходовое колесо; 3 – граблина;

4 – дисковый рабочий орган

Рисунок 3.8. Общий вид тележки ДМ «Кубань-ЛК1» с заравнивателями колеи: а – на пневматических шинах 18.4R24; б – на пневматических шинах

11.2R44

Таблица 3.2. Техническая характеристика ДМ «Кубань-ЛК1» и её ходовой системы [111].

Показатели	Значение
<b>Дождевальная машина «Кубань-ЛК1» (МДЭК-474-70)</b>	
Давление на входе в машину, МПа(кгс/см*см)	0.35-0.40 (3.5-4.0)
Расход воды при общем нулевом уклоне, л/с	70
Орошаемая площадь, га	72
Рабочая длина захвата (радиус полива по крайним каплям), м	479
Минимальное время полного оборота машины, час	26
Средняя интенсивность дождя, мм/мин	0.63
Слой осадков за проход, мм	от 9.1 до 91.0
Максимально допустимый общий уклон поля вдоль водопроводящего трубопровода:	
для почв с низкой и средней водопроницаемостью	не более 0,01
для почв с высокой проницаемостью	от 0.01 до 0.015
Источник питания - внешняя трёхфазная сеть с глухо-заземлённой нейтралью	напряжением 380 В
Потребляемая средняя мощность, кВт	8.0
Обслуживающий персонал при групповом использовании	1 человек на группу из 8-10 машин
Срок службы машины	12 лет
Габариты, м:	ширина 6.75, высота 7.10, длина 473.20
Расстояние от поверхности земли до нижнего пояса металлоконструкции (клиренс), м	2.7
Масса сухая, кг	21000
<b>Устройство для заравнивания колес</b>	
Геометрические размеры устройства, мм:	
Длина	2250
Ширина	950
Высота	1050
Рабочий орган:	Диск
Марка	3-2-450x4-90 (ГОСТ 198-75)
Наружный диаметр, м	0.45
Толщина, мм	4
	Сферический
Уменьшение глубины колес(в среднем)%	80
Масса, кг	88
<b>Пневматическая шина 380/85R24 131A8/128B TL RD-01 (18.4R24)</b>	
Посадочный диаметр:	24
Типоразмер:	380/85R24
Исполнение:	Пневматическая
Нагрузка:	131A8/128B
Тип ТТ/ТЛ:	ТЛ
Ширина (мм):	460
Наружный диаметр (мм):	1245
Масса (кг):	69



Показатели	Значение
Объем (м <sup>3</sup> ):	0,62
Тип протектора:	RD-01
Конструкция каркаса:	Радиальная
<b>Шина Petlas 270/95R44 (11.2R44) 142A8/142B TL TA-120</b>	
Посадочный диаметр:	44
Типоразмер:	270/95R44
Исполнение:	Пневматическая
Нагрузка:	142A8/142B
Тип TT/TL:	TL
Ширина (мм):	275
Наружный диаметр (мм):	1632
Масса (кг):	82,5
Объем (м <sup>3</sup> ):	0,732
Тип протектора:	TA-120
Конструкция каркаса:	Радиальная
Идентичные типоразмеры:	<u>11.2R44, 270/95R44</u>

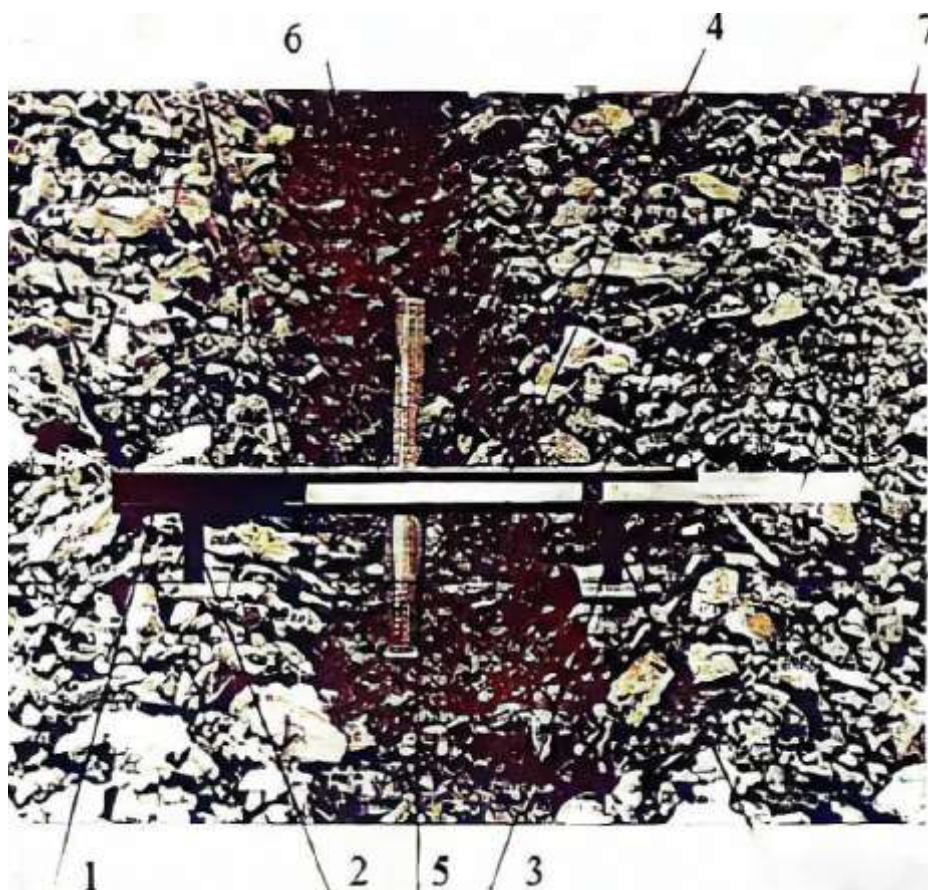
### **3.3. Методика регистрации параметров колееобразования и энергетических характеристик передвижения ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» в лабораторно-полевых условиях**

В ходе проводимых опытов для различных по параметрам колесных движителей производилось определение:

1. Параметров колееобразования и энергозатрат на передвижение ДМ при многократном проведении круговых поливов без заравнивания колеи.

2. Параметров колеи, степени ее выровненности и энергетических затрат на качение при многократных проходах ходовой системы ДМ с заравнивающими устройствами.

Глубина колеи фиксировалась посредством профилометра, с точностью измерений, составляющей 0,005 м. Перед проведением исследований для тележек с номерами 9 и 10 определялось местонахождение опытных участков длиной 15 метров, в пределах которых проводилась фиксация параметров колеи серией измерений состоящей из 20 замеров. Профилметр состоит из рамы 1, опорных стоек 2, 3 с направляющими 4, по которым производится перемещение глубиномера 5, а также измерительной линейки 6, и представлен на рисунке 3.9.



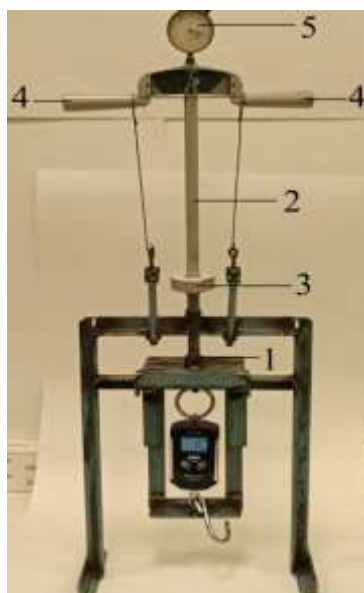
1 – рама; 2 – указатель; 3 – глубиномер; 4 – винт; 5 – ползун; 6 – линейка;  
7 - винт

Рисунок 3.9. Оценка параметров колеи от ДМ «Кубань–ЛК1»  
профилометром

При проведении измерений рама 1 посредством погружения опорных стоек 2,3 в почву устанавливалась в горизонтальном положении. После ослабления фиксирующего винта 7, ползун 5 устанавливался по центру колеи и опускался до упора с последующей фиксацией показаний измерительной линейки 6. Снятые показания глубины колеи фиксировались в журнале регистрации результатов измерений.

Измерение несущей способности почвы в колее проводилось ручным почвомером - пенетрометром [102] (рисунок 3.10).

Используемый прибор предназначен для измерения значений несущей способности почвы от 75,0 и выше кПа. Конструктивно состоит из динамометра 5 с ручками 4, пружины механизма 3, штока 2 и конусного наконечника 1.



1 – конусный - крыльчатый наконечник; 2 – шток; 3 - пружинный механизм; 4 – ручки; 5 – динамометр

Рисунок 3.10. Стенд для тарировки ручного почвомера – пенетрометра

Посредством измерения усилия, создаваемого конусным наконечником воздействующим на почву, отнесённого к площади его поперечного сечения, определялось значение несущей способности почвы. Перед началом замеров производилась тарировка измерительного прибора посредством калиброванных грузов, с последующей проверкой показаний пенетрометра при погружении конусного наконечника в почву.

Сопротивление передвижению тележек ДМ «Кубань-ЛК1» при различном исполнении ходовых систем определялось по мощности, развиваемой их электроприводами, которая измерялась при помощи двух ваттметров (рисунок 3.10), включенных по схеме на рисунке 3.11.

Значения активной мощности определялись по формуле:

$$N = N_{W_1} + N_{W_2}, \text{кВт} \quad (3.1)$$

где:  $N_{W_1} = U_{AC} \cdot I_A \cdot \cos \varphi_1$  – показания первого ваттметра АСМ-8003 (точность измерения 1%).

$N_{W_2} = U_{BC} \cdot I_B \cdot \cos \varphi_2$  – показания второго ваттметра.



Рисунок 3.11. Общий вид приборов при оценке затрат мощности на перекатывание мотор-редуктором тележки ДМ «Кубань-ЛК1»

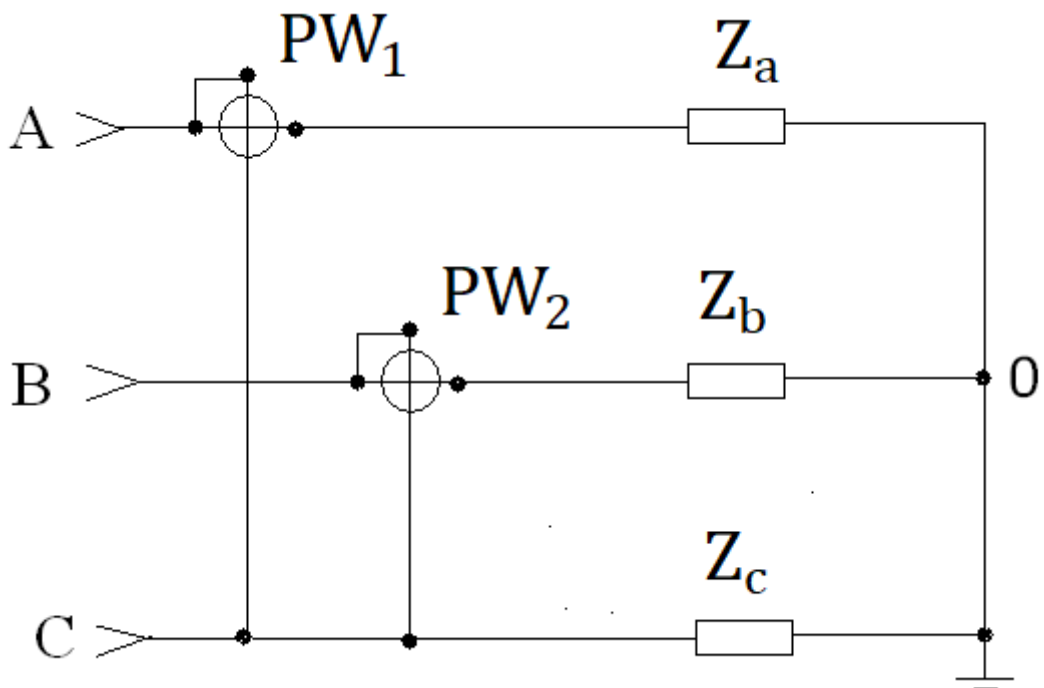


Рисунок 3.12. Схема включения ваттметров в трехфазную сеть при оценке мощности на перекатывание мотор-редуктором ДМ «Кубань-ЛК1»

Соппротивление передвижению тележки ДМ «Кубань-ЛК1» с заравнивающими устройствами оценивалось по зависимости:

$$P_f = \frac{N \cdot 60}{V}, \text{ Н} \quad (3.2)$$

где:  $V$  - скорость движения тележки ДМ, м/мин.

Скорость движения последней тележки замерялась при её непрерывном движении посредством мерной ленты и секундомера в пятикратной повторности. При этом фиксировалось количество полных оборотов.

Величина электрической мощности, расходуемой на заравнивание колеи определялась по выражению:

$$N_3 = N_f - N_{f_1}, \text{ кВт} \quad (3.3)$$

где  $N_f$  - мощность, потребляемая электродвигателем самоходной тележки, кВт;

$N_{f_1}$  - затраты на передвижение при переведении заравнивающего устройства в транспортное положение, кВт.

Посредством дождемеров, по отношению объёмов выпавшего дождя и не выпитавшихся осадков определялась норма образования стоков. Норма полива определялась на основании среднего значения, полученного дождемерами, установленными по углам измерительной рамки габаритами (1000x250 мм) (рисунок 3.13).

В ходе проведения оценки качества заполнения колеи, для установленного угла атаки дискового заравнивающего устройства  $\alpha=26^\circ$ , при отсутствии забиваемости дисковых рабочих органов почвой, и устойчивой работе ходовых систем, было установлено отклонение почвенной поверхности от горизонтали по всей ширине колеи не более 0,015 м, при расстоянии между дисками 0,18 м для серийной и 0,15 м для экспериментальной ходовой системы.

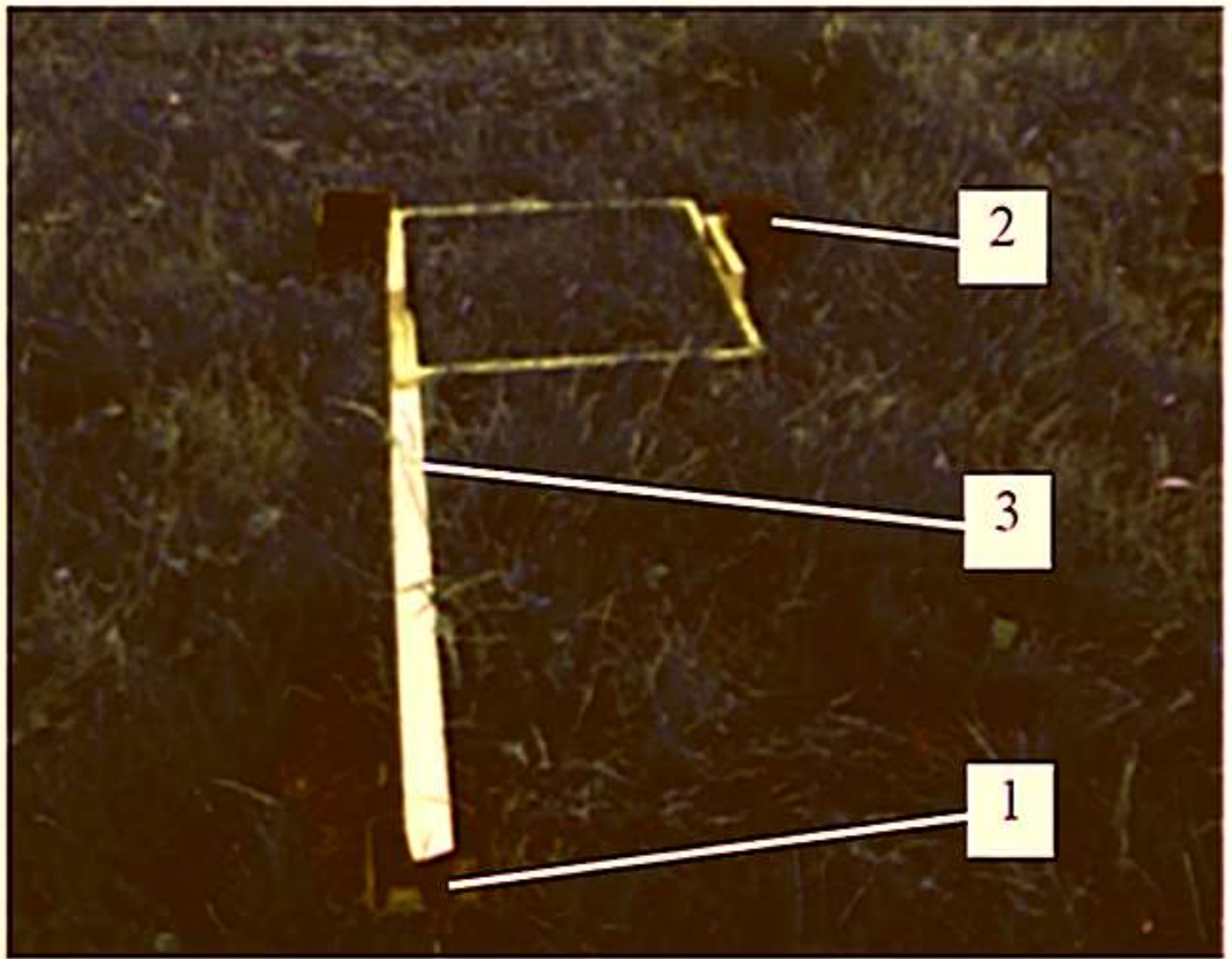
Оценка площади повреждения растений за счёт применения заравнивающего устройства  $S_{\Pi}$ , произведенная по формуле:

$$S_{\Pi} = (B_3 - B_{бз})L_k, \text{ м}^2 \quad (3.4)$$

где:  $S_{\Pi}$  – площадь повреждения растений,

$B_3$  – ширина колеи при установке заравнивающего устройства, м;





1 – водосборник для не впитавшейся воды; 2 – рамка стоковая ; 3 – трубка водосливная

Рисунок 3.13. Экспериментальное определение значения поливной нормы и нормы образования стоков

$B_{бз}$  – ширина колеи без устройства заравнивания, м;

$L_k$  – суммарная длина колеи от ходовых систем ДМ, м,

отнесённая к общей площади орошения 72 га, показала значение не превышающее 0,27% для серийной и 0,23% для экспериментальной ходовой системы.

Степень надёжности и устойчивости работы ДМ, оснащённой экспериментальной ходовой системой, определялась проведением фиксации измеряемых параметров с периодичностью 1 раз в неделю, с определением

эксплуатационных коэффициентов, определяющих надёжность и безотказность проведения круговых поливов. При определении данных показателей использовались положения СТО АИСТ 11.1 – 2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей [108].

### **3.4. Методика обработки результатов, полученных в ходе исследований**

Фиксируемые значения измеряемых параметров обрабатывались на персональном компьютере с определением основных статистических характеристик. При регистрации результатов в ходе проведения активного эксперимента использовались данные лабораторных исследований, а также различные расчёты и экспертные оценки [5,14,51,82,83,105,109].

При построении регрессионных зависимостей использовался метод аппроксимации данных, полученных в ходе статистической обработки [32,47,48, 50,99], с погрешностью менее 5%.

В ходе оценки повторяемости полученных результатов производился корреляционный анализ с определением коэффициента Пирсона [105].

#### **3.4.1. Аппроксимация данных, полученных в ходе исследований при построении регрессионных зависимостей**

Отображение полученных данных с помощью графических зависимостей и таблиц, не даёт полной картины о степени совместного влияния на исследуемый параметр различных факторов. Для большей наглядности и удобства представления результатов, используются многофакторные объёмные графические зависимости, при построении которых используется аппроксимация полученных значений с использованием метода наименьших квадратов (ортогональных полиномов Чебышева) [32,99,105].



Пакет программ для персонального компьютера Statistica 8 [109] имеет встроенные возможности для решения регрессионных уравнений с заданной точностью приближения.

В ходе проведения окончательной обработки результатов исследований, с последующей выдачей рекомендаций для дальнейшего повышения эффективности ходовой системы многоопорной дождевальная машины кругового действия, на основании подбора элементарных математических функций, был определён вид аппроксимирующего многочлена (полином Чебышева). Далее, для заданной погрешности аппроксимации менее 5%, было произведено определение коэффициентов аппроксимирующего многочлена.

### **3.4.2. Методика получения уравнений регрессии при построении многофакторных графических зависимостей**

Проведение активного эксперимента предполагает изменение входных параметров (факторов), с числом равным 2, или более, для определения их совместного влияния на исследуемый параметр. При этом изменение входных параметров производится по заранее составленному плану, и в пределах, определённых на основании априорной информации, полученной в ходе проведения исследований, или с использованием различных экспертных оценок. Данные, полученные в ходе эксперимента, аппроксимируются с заданной точностью.

На основании полученной многофакторной графической зависимости производят оценку совместного влияния факторов на оптимизируемый параметр, и на конечном этапе планирования эксперимента [48,50,83], выдают рекомендации позволяющие решить поставленную задачу.

Кроме этого, на основе полученных графических зависимостей производится сравнительный анализ влияния отдельных факторов на исследуемый параметр, и определяется направление дальнейших исследований.

В ходе обработки полученных результатов использовались программные средства Excel и Statistica 8 [51,109].

### **3.5. Методика планирования эксперимента**

Важнейшей характеристикой эффективности ходовой системы многоопорной дождевальнoй машины круговoгo действия, являются энергетические затраты на передвижение. Исходя из этого, были определены основные параметры оптимизации, в сочетании с факторами оказывающими влияющими на них. В ходе последующей обработки полученных результатов, производилось определение вида аппроксимирующего многочлена, и для заданной погрешности приближения данных полученных опытно-экспериментальным путем, менее 5%, определялись коэффициенты аппроксимирующего полинома.

#### **3.5.1. Методика активного эксперимента при исследовании влияния несущей способности почвы и ширины профиля пневмошины ДМ «Кубань-ЛК1» на коэффициент сопротивления передвижению её тележек по орошаемой площади**

Одной из важнейших характеристик, влияющих на показатели энергетических затрат при передвижении ДМ «Кубань-ЛК1», является коэффициент сопротивления качению  $f$ , определяемый глубиной колееобразования, зависящей от несущей способностью почвы орошаемой площади, и ширины профиля шин тележек ДМ.

Используя методику планирования эксперимента [48,50,83], был спланирован и проведён двухфакторный активный эксперимент. Уровни и интервалы варьирования факторов при проведении активного эксперимента приведены в таблице 3.4.

Уровни и интервалы варьирования фактора несущая способность  $P_0$  определялись в ходе лабораторных исследований, при выполнении эксперимента они были обеспечены соблюдением режима полива. Границы диапазона варьирования фактора  $B$  (ширина профиля колеса), были определены исходя из ширины профиля экспериментального и серийного колеса.

Таблица 3.4. Факторы коэффициента сопротивления качению  $f$  с уровнями варьирования

Уровень и интервал варьирования факторов	Коэффициент сопротивления качению, $f$	
	Несущая способность почвы, кПа	Ширина профиля шин, мм
Верхний (+1)	400	460
Средний (0)	250	370
Нижний (-1)	100	280
Интервал варьирования	150	110

При проведении активного эксперимента был выбран симметричный двухуровневый план Бокса-Бенкена второго порядка.

### **3.5.2. Методика активного эксперимента по исследованию влияния коэффициента сопротивления качению и веса пневматических шин, на сопротивление передвижению ходовой системы дождевальная тележки ДМ «Кубань-ЛК1»**

Для параметра  $P_f$  (сопротивление передвижению тележки), определяющего энергетические показатели ходовой системы, был проведен двухфакторный эксперимент с целью определения взаимного влияния на него коэффициента сопротивления качению ходовой системы  $f$ , и силы тяжести тележки  $G$  с учётом веса пневматических колёс.

Уровни и интервал варьирования фактора  $f$  (коэффициент сопротивления качению), были установлены в ходе лабораторных исследований. Требуемый диапазон изменения фактора  $f$  в ходе активного эксперимента был обеспечен параметрами колееобразования при соблюдении режима полива. Имеющаяся разница между серийным и экспериментальным колёсами ходовой системы в сочетании с нагрузкой на ходовую систему, определила уровни и диапазон варьирования фактора  $G$  (сила тяжести тележки и пневмошин). При проведении использовалась методика планирования экспериментов [48,50].

Таблица 3.5. Факторы и уровни варьирования

Уровень и интервал варьирования	Сопротивление качению $P_f$	
	Коэффициент сопротивления качению	Сила тяжести пневмошин и тележки, кН
Верхний (+1)	0,3	4,0/32,0
Средний (0)	0,18	3,0/31,50
Нижний (-1)	0,06	2,0/31,0
Интервал варьирования	0,12	0,50/1,0

### 3.5.3. Методика активного эксперимента по исследованию влияния сопротивления качению, и коэффициента полезного действия привода тележки ДМ «Кубань-ЛК1», на величину потребляемой электрической мощности

Важнейшим энергетическим параметром является  $N$  (потребляемая электрическая мощность), для определения влияния на который, величины сопротивления качению движителей тележки  $P_f$ , при различных значениях

коэффициента полезного действия привода  $\eta$ , был проведен двухфакторный эксперимент. Уровни и интервал варьирования фактора  $\eta$  (КПД привода) определялись исходя из существующего значения червячной передачи  $\eta=0,5$ , и  $\eta=0,90$  характеризующего волновую передачу. Для определения уровней и интервала варьирования фактора  $P_f$  (сила сопротивления качению), использовались данные лабораторных исследований.

Изменение значения этого фактора в указанных пределах в ходе проведения активного эксперимента обеспечивалось соблюдением режима полива. Уровни и интервал варьирования факторов приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6. Факторы и уровни их варьирования

Уровень и интервал варьирования факторов	Потребляемая электрическая мощность, $N$	
	КПД привода	Величина силы сопротивления качению, Н
Верхний (+1)	1,0	960
Средний (0)	0,75	570
Нижний (-1)	0,50	180
Интервал варьирования	0,25	390

### 3.6. Оборудование и приборы, используемые для регистрации экспериментальных данных

В ходе лабораторных исследований проводилась оценка несущей способности почвы и энергетических показателей макетных образцов ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» в зависимости от режима полива. Указанные параметры были уточнены при проведении лабораторно-полевых и производственных исследований. Перечень оборудования используемого в

лабораторных и лабораторно - полевых исследованиях с макетными образцами ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» приведён в таблицах 3.7 -3.8.

Таблица 3.7. Перечень оборудования, используемого в лабораторных условиях в ходе проведения работ с макетными образцами ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1»

Наименование исследуемого показателя	Наименование прибора, оборудования	Количество
Показатели несущей способности почвы и энергетической оценки макетных образцов ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» от режима полива	Лабораторная установка для проведения исследований макетных образцов ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1»	1
	Дождеобразующие устройства	4
	Мерная емкость	4
	Дождемеры	4
	Почвомер-пенетромтр самопогружной	1
	Профилометр	1
	Тензодатчики	1
	Персональный компьютер с программным обеспечением	1

Таблица 3.8. Перечень оборудования, используемого при проведении лабораторно - полевых исследований ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1»

Наименование исследуемого показателя	Наименование прибора, оборудования	Количество
Показатели несущей способности к энергетической оценке опытных образцов ДМ «Кубань-ЛК1» от режима полива	Дождемеры	4
	Мерная ёмкость	1
	Стоковая рамка	1
	Приемная емкость	1
	Почвомер-пенетромтр ручной	1
	Ватметр	2
	Оборудование для определения влажности почвы	1
	Прибор для определения скорости ветра	1
	Электронный манометр CRYSTAL	1
	Цифровой фотоаппарат, альбом для зарисовок, журнал, готовальня, ручки, карандаши	6

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ХОДОВОЙ СИСТЕМЫ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ «КУБАНЬ-ЛК1»

##### 4.1. Результаты регистрации параметров деформации почвы ходовой системой ДМ «Кубань-ЛК1» в лабораторных, в лабораторно – полевых и производственных условиях

Прочностные свойства, определяющие параметры почвенной деформации в лабораторных условиях определялись в соответствии с методикой п. 3.1. Для оценки указанных показателей в лабораторно – полевых условиях использовалась методика, приведённая в п.3.3. Результаты, полученные в ходе лабораторных условиях, были подтверждены при проведении лабораторно – полевых исследований с погрешностью менее 5%. Для обработки полученных результатов по методике п.3.4, и определении итоговой зависимости несущей способности почвы от числа проходов ДМ, использовались обобщённые данные. Была получена итоговая эмпирическая зависимость оценки несущей способности почвы при поливе в следе колеи от ходовой системы тележки ДМ, состоящая из двух следующих выражений (4.1,4.2):

при заравнивании колеи ( $P_{n.n.з}$ );

$$P_{n.n.з} = 3,75 [P_{дп} - (1,4m^{0,65} + 8 \times 1,01^{m_{ст}})] + K_1 \lg 9,85^{(N-2)}; K_1=31,5 \text{ кПа}, \quad (4.1)$$

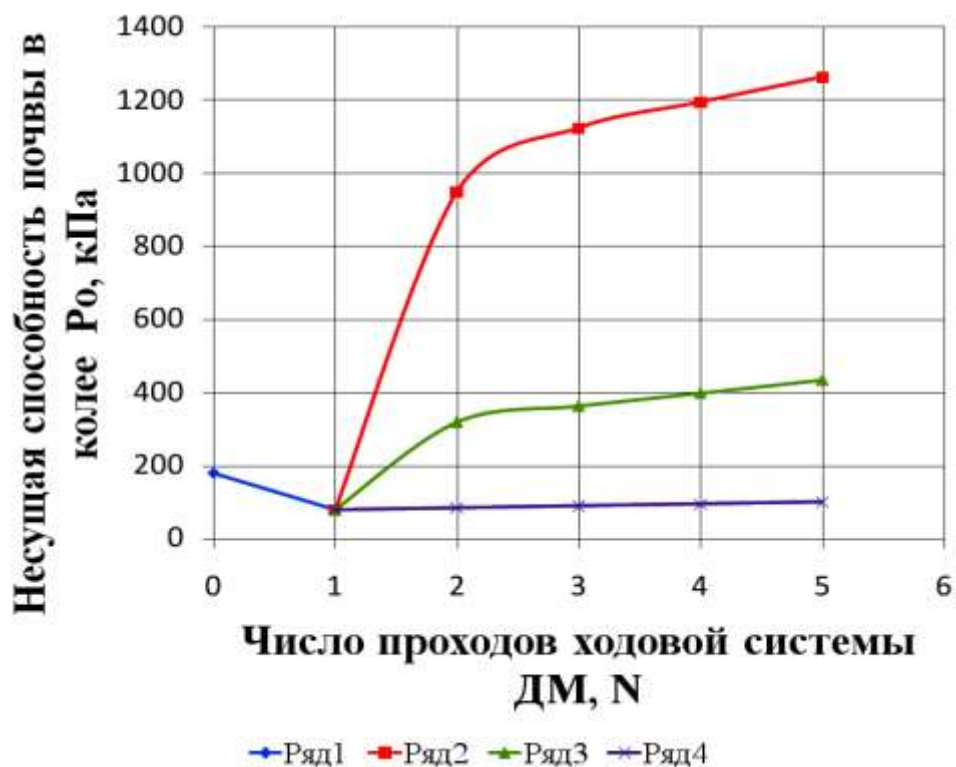
без заравнивания колеи ( $P_{n.n}$ );

$$P_{n.n} = [P_{дп} - (1,4m^{0,65} + 8 \times 1,01^{m_{ст}})] + K_2 \lg 9,85^{(N-2)}; K_2=8,2 \text{ кПа}, \quad (4.2)$$

В графическом виде указанная зависимость отображена на рисунке 4.1.

Как показали исследования, несущая способность почвы (моделирующий агрофон – поле, подготовленное под посев), в почвенной колее перед поливом составила около 170-180 кПа. После первого полива ( $m=500 \text{ м}^3/\text{га}$ ) прочность почвы несколько снижалась и имела значение в пределах около 80-100 кПа (рисунок 4.1). Через 7 суток (межполивной период), когда дождевальная машина





Ряд 1 – при первом проходе; Ряд 2 – перед началом соответствующего прохода при заравнивании колеи; Ряд 3 – после начала соответствующего прохода при заравнивании колеи; Ряд 4 – после начала соответствующего прохода без заравнивания колеи

Рисунок 4.1. Зависимость несущей способности почвы в зоне движения ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1»  $P_0$  от числа ее проходов  $N$

сделав полный оборот, возвращается на исходную позицию для производства очередного (второго) полива, несущая способность почвы в колее после ее заравнивания, вследствие высыхания (образования почвенной корки) (рисунок 4.2, а) достигает 900-1100 кПа. Однако после полива нормой  $m=500$  м<sup>3</sup>/га (моделируемой временем захвата факелом дождя ДМ и захода ее ходовых систем) показатели почвы (в заравненной колее) снижаются из-за напорного водонасыщения от поверхностного стока до 320-350 кПа.

При увеличении количества проходов ДМ за счет послойной засыпки заравнивающим устройством почвенных корок, образовавшихся от предыдущих оборотов (рисунок 4.2, б), почва в колее более упрочняется и в конце пятого



а



б

а – при образовании почвенной корки; б – в поперечном разрезе.

Рисунок 4.2. Общий вид колеи от ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» при ее  
заравнивании

прохода несущая способность почвенной поверхности составляет более 400 кПа. При качении тележек ДМ, без заравнивающих устройств, несущая способность почвы в ее следе за счет упрочнения от высыхания и многократности проходов не превышает 150-160 кПа, что почти в 3 раза меньше, чем при предварительной засыпке следа от ходовых систем.

В отличие от степенной зависимости с основанием 1,09, применяемой в ходе теоретической оценки повышения несущих свойств почвы при многократных проходах ДМ во второй главе, в ходе аппроксимации экспериментальных исследований была получена функциональная зависимость десятичного логарифма степенной функции с основанием 9,85 (выражения 4.1 и 4.2). Выражения (2.28-2.30), стр. 66-67, учитывают  $\gamma$  – коэффициент интенсивности упрочнения почвы, равный 1,09 – 1,11, где учитывается меньшее значение, как более неблагоприятный случай, возводимый в степень  $N$ , где  $N$  – количество проходов ДМ. Расхождение между теоретической оценкой и экспериментальными данными составило менее 5%.

Физический смысл полученной экспериментально зависимости заключается в том, что использование устройства для заравнивания колеи от ходовой системы ДМ, преобразует логарифмический закон увеличения глубины колеи, в

логарифмическую зависимость роста несущих свойств почвы, при уменьшении глубины колееобразования, которое установлено в ходе проведения многократных круговых поливов ДМ. Зависимость увеличения несущих свойств почвы без использования заравнивания колеи при многократности проходов ходовой системы ДМ характеризуется более чем в три раза меньшими показателями начальных значений и приращений несущей способности. Этим объясняется нарастание глубины колеи по логарифмическому закону при увеличении проходов ДМ.

Таким образом, показатели несущей способности свойств почвы в колее от тележек ДМ при ее заравнивании, более чем в три раза выше. Полученные данные позволяют оптимизировать параметры ходовой системы, исходя из снижения энергетических затрат на качение и весовых характеристик шин.

Обработка и анализ результатов проведённых исследований в соответствии с разработанной программой подтвердили необходимую достоверность и качество решения поставленной задачи.

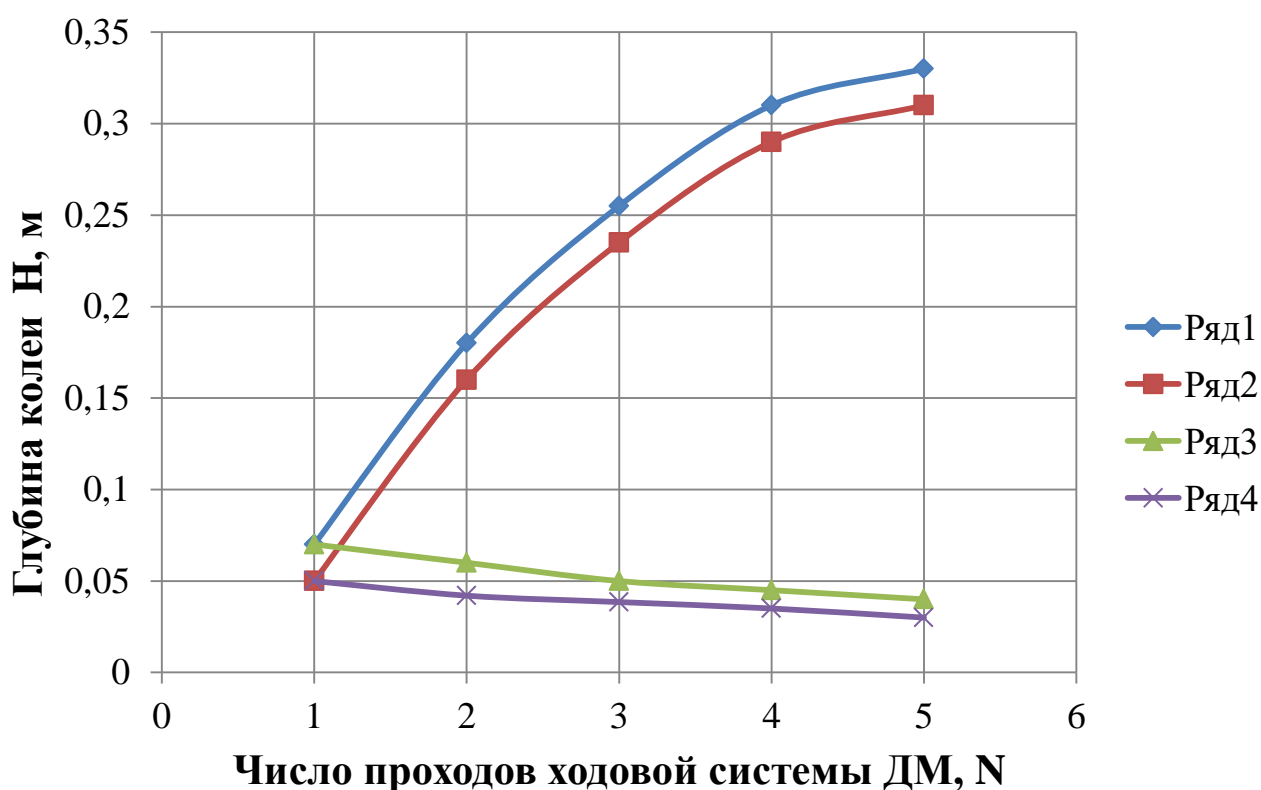
#### **4.2. Результаты регистрации параметров колееобразования и энергетических характеристик передвижения ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» в лабораторных, лабораторно – полевых и производственных условиях**

Энергетические характеристики передвижения ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1 в лабораторных условиях определялись в соответствии с методикой п. 3.1. Оценка этих показателей в лабораторно – полевых условиях проводилась с использованием методики, приведённая в п.3.3. В ходе исследования на экспериментальной установке были использованы пневматические шины, моделирующие работу ходовой системы ДМ.

Оценка параметров проходимости ходовой системы ДМ производилась по глубине погружения и сопротивлению передвижению в зависимости от числа проходов для различных значений несущих свойств почвы в почвенном канале при норме полива  $m=500$  м<sup>3</sup>/га. Отмеченные показатели и прочностные

характеристики почвы в канале исследуемых пневмоколес с заравниванием колеи и без него оценивались во время полива при первом и последующих через межполивной период проходах.

Исследования показали, что значение глубины колеи под моделями шин 18.4R24 и 11.2R44 после пятого прохода при несущей способности почвы  $P_0=80$  кПа имело значение в пределах 0,32-0,35 м (рисунок 4.3). При первом проходе глубина колеи под обеими шинами не превышает 0,05-0,07 м (большее значение соответствует узкопрофильной шине), что в целом находится в пределах агротехнических требований.



Ряд 1 – пневмошина 11.2R44, Ряд 2 – пневмошина 18.4R24, при несущей способности почвы  $P_0=80$ кПа; Ряд 3 – пневмошина 11.2R44, Ряд 4 – пневмошина 18.4R24, при несущей способности почвы  $P_0=320$ кПа

Рисунок 4.3. Зависимость глубины колеи ходовой системы ДМ Н от количества проходов N

При последующей засыпке колеи за колесом тележки опытной установки, начиная с ее первого прохода, несущая способность засохшей почвы в следе колеи (перед вторым проходом после межполивного периода 7 – 10 дней) составляет 950 кПа и более. Таким образом с начала полива несущая способность

почвы с 320-350 кПа последовательно увеличивается при проведении следующих круговых поливов.

Глубина колеи серийной ходовой системы (шины 18.4R24), при этом снижается от 0,05 до 0,03 м, а для узкопрофильной модели (шины 11.2R44) с 0,07 до 0,04 м.

Как следует из графической зависимости (рисунок 4.4), сопротивление перекатыванию тележки в колесе, определяемое коэффициентом  $f$ , в зависимости от значения глубины колеи достигает при пятом проходе ходовой системы, без засыпки колеи значений 0,30-0,32. Но вместе с тем, последовательная засыпка колеи после каждого прохода колес тележки обеспечивает значения параметра коэффициента сопротивления качению  $f$  менее 0,05 для серийного пневмоколеса, и 0,07 для экспериментального.

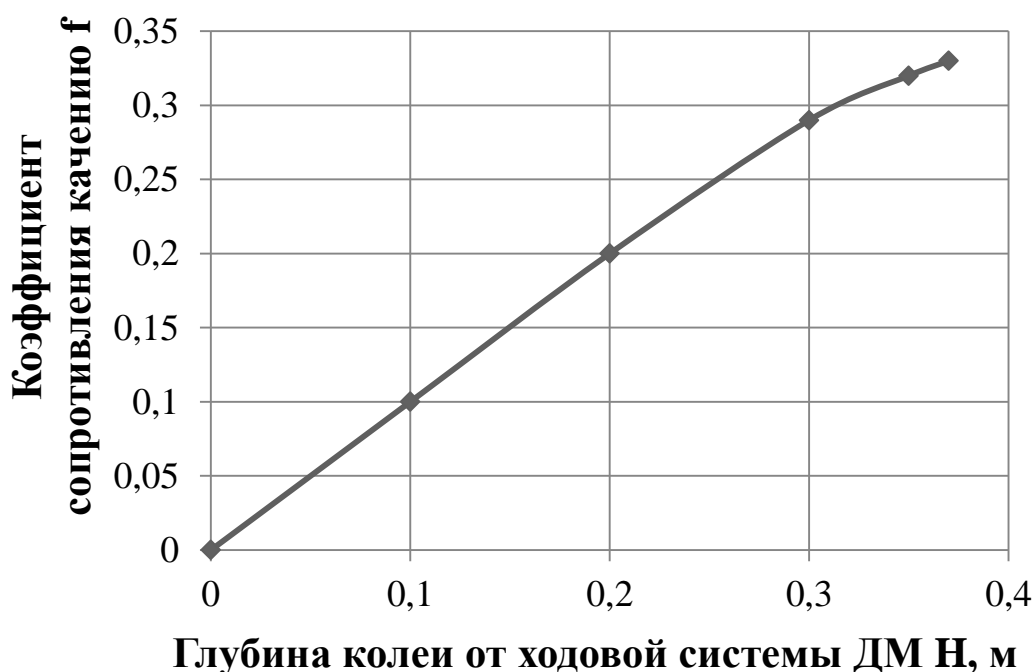


Рисунок 4.4. Зависимость коэффициента сопротивления качению ходовой системы ДМ  $f$  от глубины её погружения H

Сходимость полученных экспериментальных показателей с теоретическими значениями составляет не менее 95%.

Результаты, полученные в ходе лабораторных исследований, были подтверждены лабораторно - полевыми и производственными исследованиями. В

ходе обработки результатов по методике п. 3.4. получена итоговая зависимость глубины колеи  $H$  от числа проходов ДМ  $N$ , при различных значениях несущей способности  $P_0$  (рисунок 4.3), а также зависимость коэффициента сопротивления качению  $f$  от глубины колеи ходовой системы ДМ (рисунок 4.4).

### **4.3. Результаты исследований опорной проходимости экспериментальных образцов ходовой системы ДМ «Кубань – ЛК1»**

#### **4.3.1. Оценка параметров заравнивающих устройств ходовой системы ДМ**

Опытным путем подтверждены диапазоны значений угла установки дисков в горизонтальной плоскости в диапазоне 23-25 градусов. Для обеспечения максимального повышения несущей способности почвы в колее, а также исключения забивания рабочих органов почвой, было получено теоретическое значение угла атаки дисков  $\alpha = 25,67$  градусов [84]. Исходя из этого, для уменьшенной ширины колеи экспериментальной ходовой системы уточнено соотношение между шириной колеи  $B_k$  и расстояние между дисками  $B_0 = B_k + (0,15 \div 0,18 \text{ м})$  [84,115]. При уточнённых значениях угла атаки  $\alpha$  и расстояния между дисками  $B_0$ , применяемое заравнивающее устройство обеспечивает качественное и равномерное заполнение колеи без образования выпуклостей и разъёмов.

#### **4.3.2 Результаты активного эксперимента при исследовании влияния несущей способности почвы и ширины профиля пневмошины ДМ «Кубань-ЛК1» на коэффициент сопротивления передвижению её тележек по орошаемой площади**

При проведении указанного эксперимента использовалась методика п.3.5.1. В результате обработки данных, полученных в ходе лабораторных и лабораторно-полевых исследований по методикам п.3.4,3.4.1,3.4.2 и оценки энергетических

затрат на качение, для различных по ширине профиля шин тележек ДМ «Кубань-ЛК1» в зависимости от несущей способности почвы, была получена зависимость, описываемая регрессионным уравнением (4.3):

$$f = 0.6614 - 0.0004 \cdot B - 0.0035 \cdot P_0 + 2.4291E - 19 \cdot B^2 + 7.4074E - 7 \cdot B \cdot P_0 + 5.1111E - 6 \cdot P_0^2, \quad (4.3)$$

Коэффициенты многочлена в (4.3) определялись исходя из допускаемой погрешности аппроксимации полученных данных не более 5%.

Графическое отображение зависимости (4.3) приведено на рисунке 4.5.

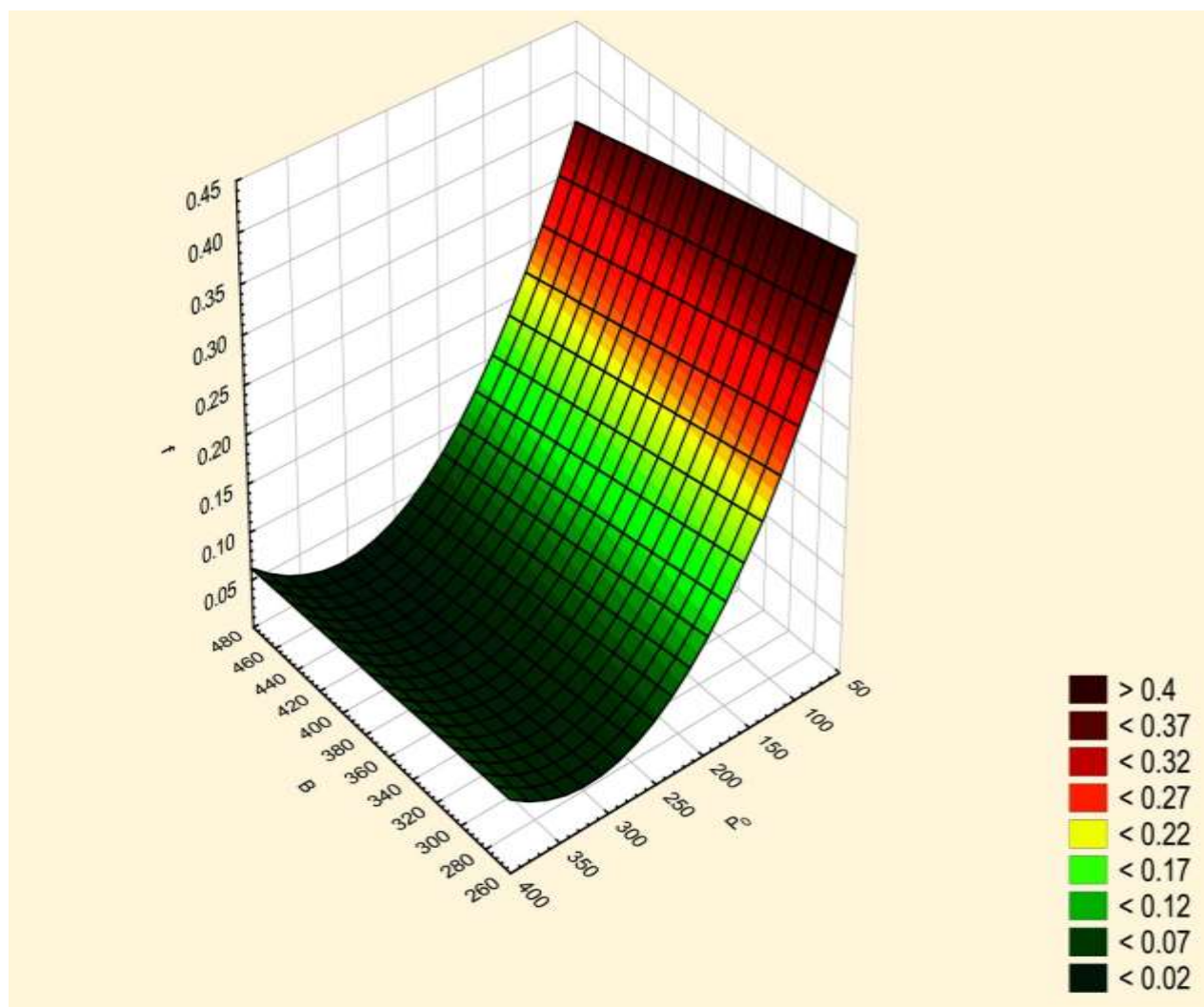


Рисунок 4.5. Зависимость коэффициента сопротивления качению  $f$  тележек ДМ «Кубань-ЛК1» от несущей способности почвы  $P_0$  и ширины профиля шин  $B$  (для пяти проходов)

Оценку энергозатрат при движении тележек ДМ устанавливали по коэффициенту сопротивления качению. За счет заравнивания колеи происходит повышение несущей способности почвы  $P_0=320-350$  кПа, против 70-80 кПа (без



засыпки колеи), что снижает сопротивление на перемещение ДМ. Коэффициент сопротивления качению  $f$  достигает показателей 0,28-0,32 на пятом проходе ДМ.

В результате повышения несущей способности почвы в зоне движения ходовой системы ДМ при заравнивании колеи, как видно из рисунка 4.6 происходит снижение энергозатрат на ее перемещение. Исходя из этого предложено оснащать тележки ДМ менее материалоемкими пневмошинами с шириной профиля  $B=300$  мм (модель 11.2R44) против серийных шин модели 18.4R24 с шириной профиля  $B=460$  мм.



а – шина 18.4R24; б – шина 11.2R44

Рисунок 4.6. Вид колеи после заравнивания при проходах тележки ДМ «Кубань-ЛК1» на пневматических шинах

#### **4.3.3 Результаты активного эксперимента по исследованию влияния коэффициента сопротивления качению и веса пневматических шин, на сопротивление передвижению ходовой системы дождевальной тележки ДМ «Кубань-ЛК1»**

При проведении данного эксперимента использовалась методика п.3.5.2. В результате обработки данных, полученных в ходе лабораторных и лабораторно-полевых исследований по методикам п. 3.4,3.4.1,3.4.2, и оценки сопротивления передвижению тележек ДМ «Кубань-ЛК1», для различных по ширине профиля шин, в зависимости от несущей способности почвы, была получена зависимость,

описываемая уравнением регрессии (4.4).

$$P_f = 1.6478E - 5 - 1.0789E - 8 \cdot G - 1.0463E - 8 \cdot f + 1.9847E - 11 \cdot G^2 + 11 \cdot G \cdot f + 1.6606E - 12 \cdot f^2 \quad (4.4)$$

Графическое отображение зависимости (рисунок 4.7) характеризуется практически равнозначным колесообразованием тележек ДМ «Кубань-ЛК1», оснащенных серийными шинами (18.4R24) и рекомендуемыми узкопрофильными 11.2R44, оснащаемых консольной навеской за задними колесами с заравнивающим устройством.

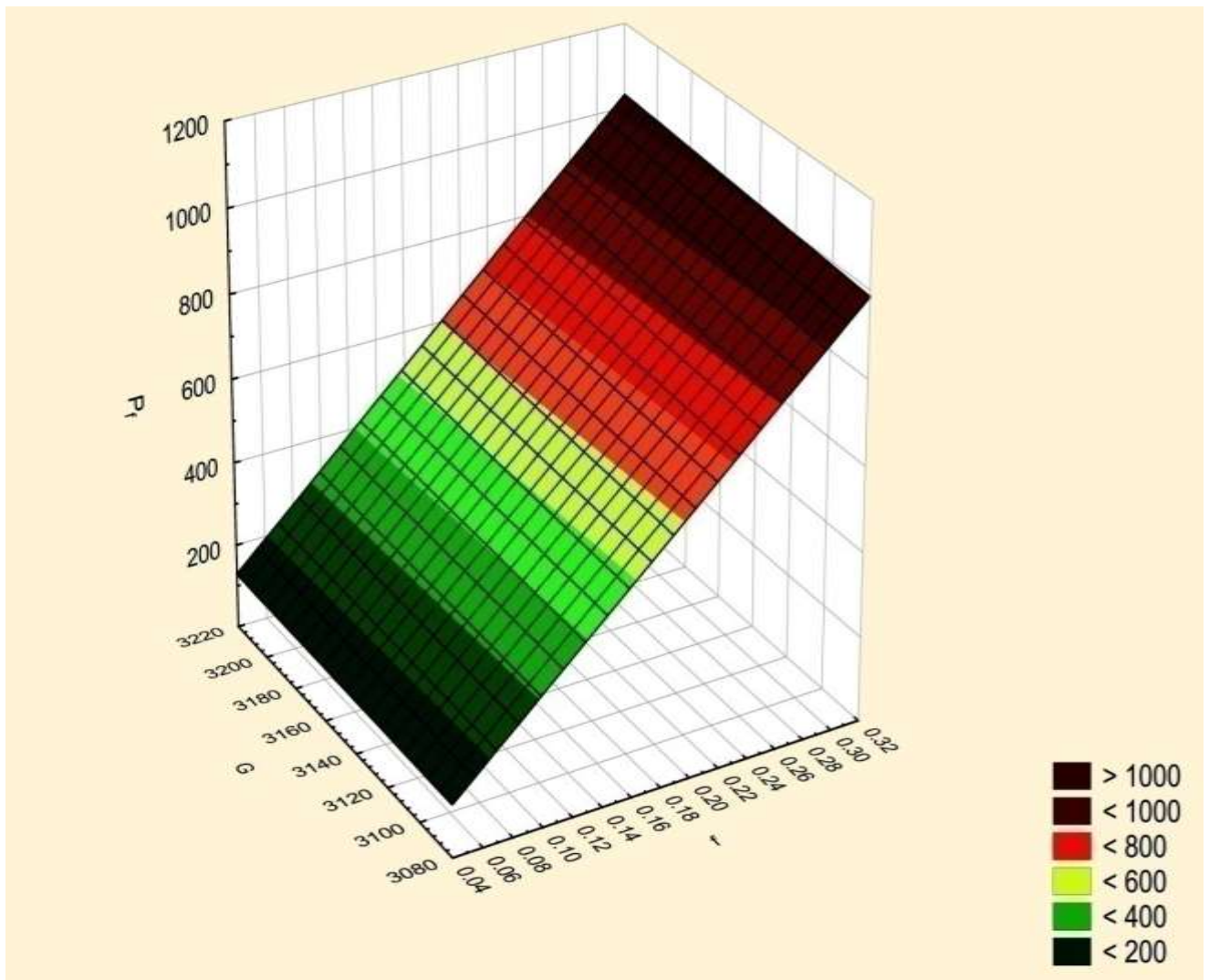


Рисунок 4.7. Зависимость силы сопротивления движению тележки ДМ «Кубань-ЛК1»  $P_f$  от коэффициента сопротивления качению  $f$  и её массы

Оборудование тележек ДМ шинами меньшей ширины профиля обусловило снижение нагрузки на опорную площадь на 1,0-1,1 кН и общее снижении силы тяжести тележки с 32,0 кН до 31,0кН (таблица 4.1).

Таблица 4.1. Зависимости масс и удельной материалоемкости ходовой системы машины «Кубань – ЛК1» от типа пневматических шин

Тип пневмоколеса (с диском)	Значение массы (кг) и удельной материалоемкости (кг/га/ч)			
	пневмоколесо	Тележка (с водой в трубопроводе)	Ходовая система ДМ	Удельная материалоемкость ходовой системы ДМ
	одно / два			
18.4R24	200 / 400	3200	4000	8000
11.2R44	150 / 300	3100	8000	6000

Как видно из рисунка 4.7, сопротивление качению  $P_f$  тележки дополнительно снижается на 4 – 6 %, что позволяет полностью компенсировать увеличение деформации почвы в связи с уменьшением ширины профиля колеса. При этом удельная материалоемкость  $m_{уд}$  ходовой системы базовой ДМ (10 тележек,  $Q=70$  л/с), определяемая отношением ее массы к часовой производительности  $W_r$  (например, при поливе  $m_n=400-500$  м<sup>3</sup>/га,  $W_r=0,50$ га/ч) за счет снижения массы пневматических колес уменьшилась с 8000 до 6000 кг/га в час, или на 25%.

#### 4.3.4. Результаты активного эксперимента по исследованию влияния сопротивления качению и коэффициента полезного действия привода тележки ДМ «Кубань-ЛК1», на величину потребляемой электрической мощности

При проведении вышеуказанного эксперимента использовалась методика п.3.5.3.

Обработка данных, полученных в ходе лабораторных и лабораторно-полевых исследований производилась по методикам п.3.4,3.4.1,3.4.2. Для оценки мощности энергопотребления ходовой системой ДМ «Кубань-ЛК1», оснащаемых различными по ширине профиля шинами, в зависимости от несущей способности

почвы, была получена зависимость, описываемая уравнением регрессии (4.5).

$$N = 1.3118 + 0.0004 \cdot P_f - 1.06 \cdot h - 1.0958E - 8 \cdot P_f^2 - 1.0815E - 17 \cdot P_f \cdot h - 0.0267 \cdot h^2 \quad (4.5)$$

Графическое отображение указанной зависимости приведено на рисунке 4.8. Из графика следует, что снижение мощности, потребляемой на передвижение тележки ДМ «Кубань-ЛК1» с устройством заравнивания колеи за счет уменьшения сопротивления качению от 10,0 кН до 1,16 кН и коэффициенте полезного действия (КПД) электропривода ( $\eta=0.50$ ), составляет 0,28 кВт (с 1,1 до 0,82 кВт). Для всей дождевальнoй машины снижение составит 2,5 – 2,7 кВт (с 11 до 8,3-8,5 кВт) или на 25-27%.

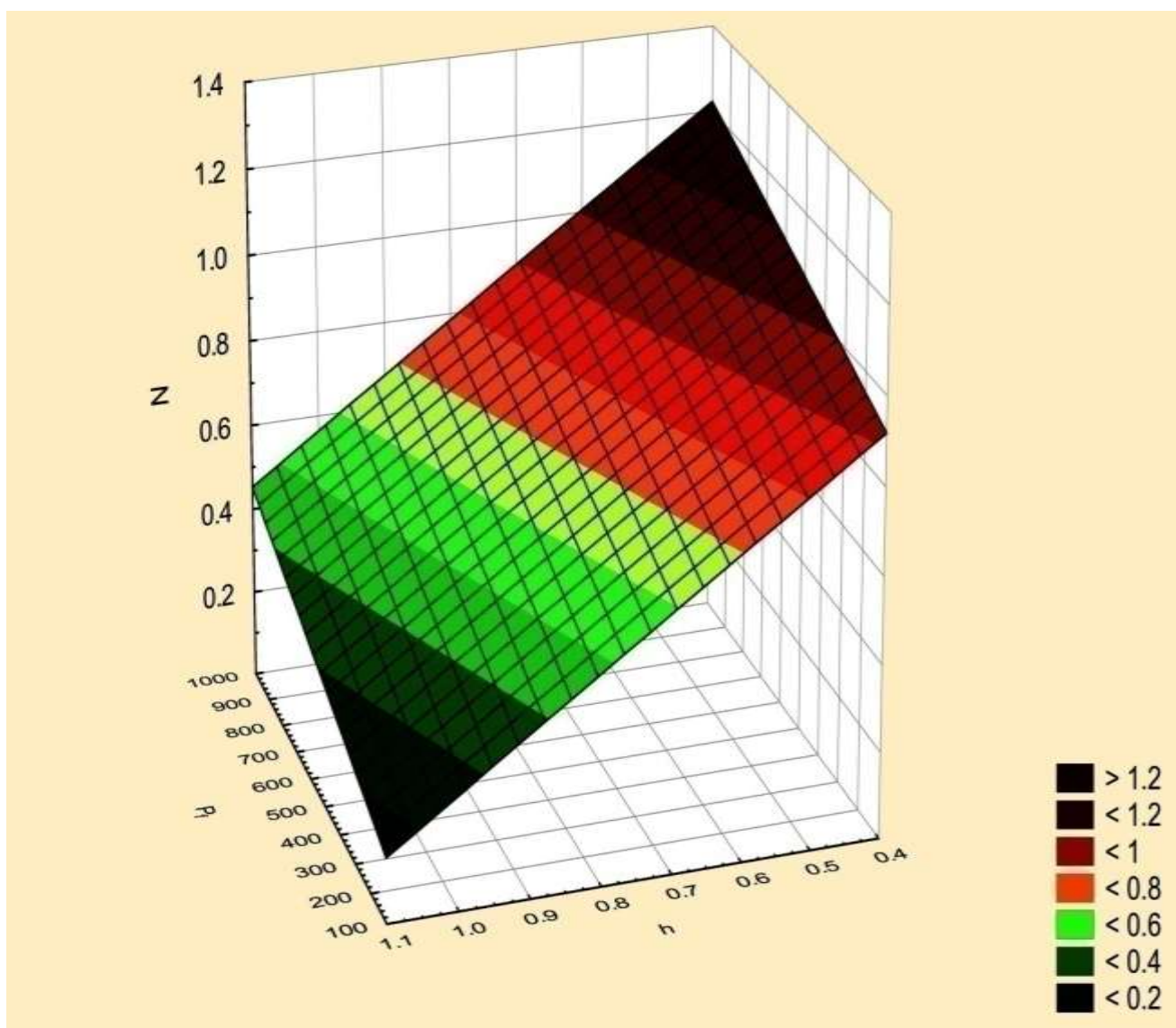


Рисунок 4.8. Зависимость мощности электропривода тележки ДМ «Кубань-ЛК1»  $N$  от сопротивления качению  $P_f$  и его КПД  $\eta$

Комплексный показатель эффективности ( $N_{nm}$ ) предложенных технических решений, определяемый отношением произведения материалоемкости ( $m$ ) ходовой системы тележки ДМ на мощность при ее передвижении ( $N$ ) к часовой производительности ( $W_a$ ), имеет наименьшее значение для узкопрофильных шин *11.2R44* при мощности электропривода  $N_{nm}=0,80$  кВт.

Экономия мощности электропривода, как видно из рисунка 4.8 тележек ДМ может еще более возрасти за счет увеличения его коэффициента полезного действия  $\eta$  до 0,75-0,90.

#### **4.4. Эксплуатационно-технологическая оценка работы усовершенствованной ДМ «Кубань-ЛК1»**

С целью определения эксплуатационно-технологических характеристик ДМ «Кубань-ЛК1» (МДЭК-474-63-01) в ЗАО «Озеры», Московская область были проведены производственные испытания на двух поливах с нормой  $m=500$  м<sup>3</sup>/га. При первом поливе определялись характеристики ДМ оснащённой пневмошинами *11.2R44* с заравнивающими устройствами, во втором поливе фиксировались эти же показатели для ДМ с серийной ходовой системой на пневмошинах *18.4R24*, без заравнивающих устройств.

Определение эксплуатационно-технологических характеристик осуществлялось при помощи измерения временных интервалов одного полного оборота серийной и усовершенствованной ходовой системы с использованием справочной и нормативной документации для проведения соответствующей оценки. В таблице 4.2 приведены полученные данные.

Анализ приведенных показателей позволяет утверждать, что оснащение ДМ устройством для заравнивания колеи обеспечивает повышение несущей способности почвы перед очередным ее проходом с 75-85 до 300-320 кПа. Это обуславливает для узкопрофильной *11.2R44* и широкопрофильной *18.4R24* шин вне зависимости от числа проходов ДМ глубину колеи менее  $0,05\div 0,07$  м соответственно, против  $0,30\div 0,32$  м при движении без заравнивателей.

Таблица 4.2. Показатели эксплуатационно-технологической оценки ДМ «Кубань-ЛК1»

№ п.п	Наименование показателей	Значение
1	Хозяйство	ЗАО «Озёры»
2	Марка дождевальной машины	МДЭК-474-63-01
3	Условия и режим работы:	
	- тип почвы	суглинок
	- уклон поля:	
	общий	0.03
	местный	0.05
	- температура окружающего воздуха, С	28.4
	- скорость ветра, м/с	2
	- наименование культуры	картофель
	- поливная норма, м <sup>3</sup> /га	500
	- величина стока поле/колея	(5-7%)/(70-80%)
	- несущая способность почвы, кПа	
	при заравнивании колеи	300-320
без заравнивания колеи	75-85	
4	Средняя глубина колеи (после 5-ого прохода):	
	при заравнивании колеи, м	0.05-0.07
	без заравнивания колеи, м	0.30-0.32
5	Энергозатраты на передвижение ДМ, кВт	
	- при заравнивании колеи	8.2-8.3
	- без заравнивания колеи	10-11
6	Масса ДМ, кг	
	- на пневмошинах 11.2-44	20000
	- на пневмошинах 18.4-24	21000
7	Заминаемая площадь, га	
	- на пневмошинах 11.2-44	0.7
	- на пневмошинах 18.4-24	1.4
8	Время основной работы, ч	260
9	Производительность за час основного времени (m=500 м <sup>3</sup> /га), га/час	0.50
10	Эксплуатационно-технологические коэффициенты:	
	- технологического обслуживания	0.98
	- надежности технологического процесса	0.99
	- использования сменного времени	0.97
	- использования эксплуатационного времени	0.89
11	Коэффициент готовности	0.99



Суммарные энергетические затраты на качение ДМ составляют 8,0-8,3, против 10,0-11,0 кВт/ч. Оснащение ДМ узкопрофильными шинами *11.2R44* (вместо *18.4R24*) уменьшают ее массу на 1000 кг и заминаемую под ней площадь посевов на 0,35 га.

В ходе проведения производственных исследований ДМ «Кубань-ЛК1», оснащённой пневмошинами с уменьшенной шириной профиля *11.2R44* и заравнивающими устройствами, нарушений процесса кругового полива не наблюдались. В таблице 4.2 приведены эксплуатационно-технологические характеристики, свидетельствующие о высоком значении коэффициентов надёжности технологического процесса (0,99) и готовности (0,99), а также величин коэффициентов использования сменного и эксплуатационного времени в пределах, установленных техническими требованиями (0,97 и 0,89) соответственно.

#### **4.5. Определение площади воздействия ходовых систем дождевальной машины на сельскохозяйственные растения**

В ходе проведения лабораторно - полевых исследований был определён размер полезной площади растений, не повреждаемых ходовой системой ДМ в связи с уменьшением ширины профиля пневматических колёс, которая обеспечивает снижение издержек средств производства.

Площадь повреждения растений ходовой системой ДМ, определяется общей длиной колееобразования, шириной профиля колеса  $B$  с учётом радиальной деформации пневматической шины, равняющейся ширине полученной колеи  $B_k$ . В ходе расчетов учитывали ширину образующихся уплотнённых почвенных призм выпирания по бокам колеи, в пределах которых невозможны нормальное развитие и рост орошаемых культур.

Для серийного колеса *18.4R24* с шириной профиля 460 мм, ширина образовавшейся колеи  $B_k$  составляет в пределах 510 - 520 мм. Для



экспериментального колеса *11.2R44*, при  $B = 280$  мм, ширина образовавшейся колеи  $B_k$  составляла в пределах 310 - 320 мм.

Среднее значение увеличения ширины полученной колеи при заравнивании составляет 150 мм для пневмошины *11.2R44*, и 180 мм для *18.4R24*. С учётом полученной разницы по ширине около 0,23 м для двух вариантов ходовых систем, при общей длине колееобразования десятью опорами ДМ, которое составляет 15 км, увеличение площади, определяющей снижение издержек средств от потерь и повреждений сельскохозяйственной продукции, составляет 0,345 га.

Таким образом, определен размер площади, определяющей снижение издержек средств от повреждения сельскохозяйственной продукции. Площадь повреждения сельскохозяйственных культур от усовершенствованной ходовой системы ДМ «Кубань – ЛК1» уменьшается с 1,05 га до 0,705 га. При орошения 72 га, это соответствует снижению площади повреждений растений с 1,47 % до 0,97%, или на 33% в сравнении с серийным образцом.

#### **4.6. Выводы по 4 разделу**

1. Установлено, что под воздействием ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» несущая способность почвенной поверхности за счет заравнивания колеи и ее высыхания за межполивной период с последующим увлажнением (норма полива  $m=500$  м<sup>3</sup>/ч) упрочняется и составляет в среднем 320 и более кПа, против 85-110кПа при работе без заравнивающих устройств.

2. Выявлено, что за счет повышения несущей способности почвы под ходовой системой ДМ с заравнивателями колеи на различных по ширине профиля пневмошинах (серийных *18.4R24* и опытных *11.2R44*) обеспечивается в течение поливного периода глубина колеи практически одинаковая по величине. Она отвечает агротехническим требованиям и составляет в пределах 0,05-0,07 м, против 0,30-0,32 м и более в конце сезона при работе без заравнивателей. Соответственно, коэффициент сопротивления качению тележки ДМ составляет

0,05-0,07 против 0,30-0,32 без заравнивателей колеи.

3. Доказано, что качество заравнивания колеи от ходовой системы ДМ «Кубань-ЛК1» на пневматических шинах, различных по ширине профиля шин, может быть обеспечено применённым в работе дисковым заравнивающим устройством. При этом параметры установки дисков, с учётом уменьшения профиля шины (*11.2R44*) ходовой системы, аналогичны ранее обоснованным для серийной модели (*18.4R24*).

4. Определено, что оснащение тележек ДМ «Кубань – ЛК1» узкопрофильными шинами *11.2R44* наряду с сохранением показателей опорной проходимости, которые практически равны показателям для серийных колес *18.4R24*, позволяет снизить нагрузку на общую опорную площадь в пределах 1.0-1.1 кН и, как следствие, сопротивление качению тележек, как в целом и машины, на 4...6%. При этом общая масса ходовой системы ДМ составляет 3000 кг против 4000 кг на пневмоколесах *18.4R24*, соответственно, вся масса машины уменьшается с 21,0 т до 20,0 т.

5. Установлено, что снижение потребляемой мощности электродвигателем тележки ДМ, за счет уменьшения ее сопротивления качению при заравнивании колеи и КПД привода  $\eta=0,50$ , составляет 0,28 кВт, (с 1,1 до 0,82 кВт), а для всей машины – 2,5-2,7 кВт (с 11,0 до 8,3-8,5 кВт) или на 24-25%.

6. Проведённая в производственных условиях, эксплуатационно – технологическая оценка оснащённой пневмошинами с уменьшенной шириной профиля *11.2R44* и заравнивающими устройствами ДМ «Кубань-ЛК1», подтвердила соответствие требованиям, установленным для сельскохозяйственной техники.

7. Определен размер площади, определяющей снижение издержек средств от повреждения сельскохозяйственной продукции. Площадь повреждения сельскохозяйственных культур от усовершенствованной ходовой системы ДМ «Кубань – ЛК1» уменьшается с 1,05 га до 0,705 га. При орошения 72 га это соответствует снижению площади с 1,47 % до 0,97%, или на 33% в сравнении с серийным образцом.

## **5. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ ДМ «КУБАНЬ-ЛК1» НА ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИНАХ 11.2R44 С УСТРОЙСТВАМИ ДЛЯ ЗАРАВНИВАНИЯ КОЛЕИ**

Как показывает опыт эксплуатации, оснащение ДМ «Кубань-ЛК1» широкопрофильными шинами *18.4R24* не исключает образование, особенно в конце поливного сезона, глубокой до 0,30 – 0,35 м колеи, обуславливающей увеличение энергозатрат на перемещение. При этом стоимость пневмоколес составляет более 25% от стоимости машины.

Обеспечение достаточной проходимости ДМ и её оборудование более дешевыми узкопрофильными шинами *11.2R44* достигается повышением несущей способности почвы в зоне качения ходовой системы посредством засыпки от нее колеи заравнивающими устройствами.

В экономических расчётах применялась методика оценки прямого экономического эффекта от внедрения усовершенствованной ДМ [17] с использованием положений ГОСТ 34393 - 2018.

Был оценен эффект за счёт снижения капитальных вложений, связанный с уменьшением стоимости ДМ. При существующей стоимости одного серийного пневмоколеса 50,0 тыс. руб. и 30,0 тыс. руб.- для опытного, с уменьшенной шириной профиля и разницы 20,0 тыс.руб., экономия по стоимости для одной тележки ходовой системы ДМ, на двух пневматических движителях и одним заравнивающим устройством, составит - 40,0 тыс. руб. Для 10 опорной ДМ общая сумма разницы стоимости вариантов составит 400 тыс. руб.

Снижение мощности, потребляемой электродвигателями ходовых тележек ДМ на величину около 30%, обуславливает возможность уменьшения площади сечения токоподводящих проводов. При осуществлении замены четырёхжильного силового кабеля, с площадью сечения одиночного провода 6 мм<sup>2</sup>, на 4 мм<sup>2</sup>, разница по стоимости для одного погонного метра составит 90 рублей. При общей длине токоподводящего кабеля 1250 м, снижение стоимости ДМ «Кубань-ЛК1» составит 112500 рублей.

Таким образом, суммарное снижение капитальных вложений составляет 512500 рублей.

Также была произведена оценка уменьшения издержек средств от потерь и повреждений сельскохозяйственной продукции.

Приращение полезной площади за счёт уменьшения ширины профиля колёс ходовой системы, составляет 0,35 га. Исходя из существующей урожайности в ЗАО "Озёры" 500 ц/га и стоимости картофеля 20 руб./кг, итоговая прибыль составила 330 тыс.руб.

Таблица 5.1. Основные составляющие определяющие общий экономический эффект

№ п/п	Наименование показателей	Значение
1	Уменьшение стоимости усовершенствованной ДМ, оснащённой опытными колёсами 11.2R44, относительно серийной ДМ, руб.	400000
2	Снижение стоимости ДМ «Кубань-ЛК1» с усовершенствованной ходовой системой, за счёт уменьшения площади сечения проводов, руб.	112500
3	Экономический эффект за счёт уменьшения издержек средств от потерь и повреждений сельскохозяйственной продукции, руб.	330000
4	Годовой экономический эффект, руб.	842500

### 5.1. Выводы по 5 разделу

Годовой экономический эффект от снижения материальных и энергетических затрат для ДМ «Кубань - ЛК1» на пневматических шинах 11.2R44 с устройствами для заравнивания колеи составил 842500 руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ условий функционирования многоопорных дождевальных машин (ДМ) кругового действия показал, что при заравнивании колеи, норме полива 500 м<sup>3</sup>/га и продолжительности межполивного периода 7 суток несущая способность почвы при повторных проходах ходовой системы возрастает с 70-80 кПа до 300-320 кПа.

2. При теоретическом обосновании параметров ходовой системы многоопорной ДМ кругового действия на основании предельного значения несущей способности почвы в колее установлено, что с учётом максимальной нагрузки 16 кН на колесо, ходовая система должна быть оснащена пневмошинами с шириной профиля 0,27 м, диаметром 1,6 м, давлением 0,15 МПа.

3. В ходе проведения экспериментальных исследований установлено, что усовершенствованная ходовая система ДМ «Кубань – ЛК1», оснащенная шинами обоснованного типоразмера *11.2R44*, обеспечивает снижение потребляемой мощности в среднем на 26%, площадь повреждения сельскохозяйственных культур уменьшается с 1,05 га до 0,705 га, что при площади орошения 72 га соответствует снижению с 1,47 % до 0,97%, или на 33% в сравнении с серийным образцом.

4. Годовой экономический эффект от использования ДМ «Кубань – ЛК1» при ее оснащении усовершенствованной ходовой системой с обоснованными параметрами составил 842500 рублей в расчете на одну дождевальную машину при площади орошения 72 га.

### Рекомендации производству

Для условий типичного представителя среднесуглинистой почвы Центрального Нечерноземья (ЗАО «Озёры»), оборудование ходовых систем «Кубань-ЛК1» шинами *11.2R44* с устройствами для заравнивания колеи, снижает стоимость колёсных движителей ходовой системы ДМ на 40%, при уменьшении

их материалоемкости на 25%. Кроме этого, энергетические затраты на проведение орошения снижаются в среднем на 26%, издержки средств от потерь сельскохозяйственной продукции, за счёт снижения площади повреждения растений ходовой системой ДМ, на 33%.

### **Перспектива дальнейшей разработки темы**

Дальнейшее снижение энергетических затрат многоопорной дождевальная машины кругового действия «Кубань-ЛК1» на узкопрофильных шинах *11.2R44* с устройствами заравнивания колеи в условиях средне - суглинистой почвы Центрального Нечерноземья, возможно осуществить за счёт повышения КПД передачи, применяемой в редукторе.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агротехнические требования на дождевальную электрифицированную машину кругового действия. – М. Минсельхоз, 1985 г.
2. Агротехнические требования на колеезаравнитель для дождевальных машин /М.Минсельхоз, 1993г.
3. Алексеев, В.М. Полевые методы изучения механических свойств грунтов: учебное пособие / В.М. Алексеев, П.И Калугин. – Воронеж: Воронеж. гос. арх. – строит. ун –т., 2011 – 112 с.
4. Аль-Хадад, А.О. Изменение свойств самана в зависимости от влажности /А. О. Хадад, Б. Я. Трофимов // Вестник ЮУрГУ. "Строительство и архитектура", 2018г.-№ 1.- с.41-46.
5. Андреева, С.Г. Дифференциальное и интегральное исчисление функций одной переменной: учебное пособие / С.Г. Андреева, М.А.Корытова, С.А. Шунайлова. – Челябинск : Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – 106 с.
6. Антипов, А.О., Повышение технического уровня ходовых систем широкозахватных дождевальных машин / Рязанцев А.И., Антипов А.О., Смирнов А.И. // Вестник Государственного социально-гуманитарного университета. 2018. №2(30). С. 69-71.
7. Баловнев, В. И. Определение оптимальных параметров и выбор землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации / В.И. Баловнев.– М. : МАДИ (ГТУ), 2010. – 134 с.
8. Барахтанов, Л.В. Экспериментально – теоретические исследования опорной проходимости многоосных колёсных машин / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, Д.А. Галкин, А.С. Зайцев, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2012. – №3(96). – 120 с.
9. Бахтин, П.У. Исследование физико-механических и технологических свойств основных типов почв СССР: диссертация на соискание степени доктора сельскохозяйственных наук/ П.У. Бахтин. - 1966г.



10. Бахтин, П.У. Физико-механические и технологические свойства почв / П.У. Бахтин. - М. Знание,1971.- 64с.
11. Беккер, М. Г. Введение в систему «местность-машина» / М.Г. Беккер ; пер. с англ. В. В. Гуськова. – М. : Машиностроение, 1973. – 520 с.
12. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: учебное пособие. / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – СПб.: издательство «Лань», 2010. – 608 с.
13. Винникова, Н. В. Технический уровень орошения дождевания в США / Н. В. Винникова, В. П. Рыжонков / М-во водохоз. строительства СССР. – М. : ЦБНТИ Минводстроя СССР, 1989. – 56 с.
14. Воробьёв, Е.С. Численные методы и математическое моделирование. Основы численных методов и приёмы построения математических моделей на их основе и эти решения в различных пакетах / Е.С. Воробьёв, В.Е. Воробьёва. – Казань: Казанский национальный технологический университет, 2016. – 105 с.
15. Гаврилица, А. О. Оптимизация широкозахватных дождевальных машин кругового действия для сложных почвенно-рельефных условий / А. И. Рязанцев, А. О. Гаврилица. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 207 с.
16. Гасанов, Б.Г. Теория эксплуатационных свойств автомобиля : учебное пособие / Б.Г. Гасанов. – Новочеркасск: ЮрГТУ, 2013. – 215 с.
17. ГОСТ 34393 – 2018. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы экономической оценки. – М. – ФГУП «Стандартинформ», 2018 – 15 с.
18. ГОСТ Р 58655 – 2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву. – М. Стандартинформ, 2019. – 9 с.
19. Джабборов, Н.И. Закономерности изменения амплитуды колебаний и вероятностных оценок тягового сопротивления почвообрабатывающих рабочих органов/ Джабборов Н.И., Сергеев А.В., Эвиев В.А., Очиров Н.Г. / Вестник аграрной науки Дона. 2019. – № 4 (48) – С. 42-49.
20. Динамическая характеристика многоцелевых колёсных машин при движении по грунтовым поверхностям : учебное пособие / В.В. Гуськов,

- В.П.Бойков, Ю.Д. Карпиевич, А.С. Поварехо, А.А. Сушнёв. – Минск: БНТУ, 2018. – 38 с.
21. Егоров, Ю. Н. Заравнивание колеи от многоопорных дождевальных машин / Ю. Н. Егоров, А. И. Рязанцев // Совершенствование средств механизации и мобильной энергетики в сельской хозяйстве : сб. науч. тр. одиннадцатой науч.-практ. конф. вузов Поволжья и Юго-Нечерноземной зоны Российской Федерации. – Рязань, 2000. – С. 257–259.
  22. Егоров, Ю. Н. Повышение проходимости многоопорных дождевальных машин посредством заравнивания колеи : рекомендации / Ю. Н. Егоров, А. И. Рязанцев. – М. : Росинформагротех, 2002. – 44 с.
  23. Егоров, Ю. Н. Разработка технологического решения по повышению проходимости многоопорных дождевальных машин кругового действия в сложных почвенно-рельефных условиях на действующих оросительных системах / Ю. Н. Егоров, А. И. Рязанцев, А. В. Федирко // (Научно-технический отчет за 2000 г. Государственный контракт № К-71) УДК 691.347, № гос. пер. 01.20.00 13387, инв. № 02.20.00 06205.
  24. Егоров, Ю. Н. Технологические и технические решения по уменьшению и предотвращению последствий колееобразования дождевальных машин кругового действия / Ю. Н. Егоров, А. И. Рязанцев. – М. : ВИНТИ РАН, 2001. – 27 с.
  25. Егоров, Ю. Н. Технология и устройство для заравнивания колеи от дождевальной машины «Фрегат» / диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Рязань: РГСА им П.А. Костычева . 2004 г.
  26. Журавлёв, С.Ю. Основы надёжности машин: учебн. пособие / С.Ю. Журавлёв. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2021. . – 257 с
  27. Исаев, А.П. Гидравлика и гидромеханизация сельскохозяйственных процессов / А.П. Исаев, Б.И. Сергеев, В.А. Дидур. – М: Агропромиздат, 1990. – 400 с.

28. Карабаницкий, А.П. Теоретическое обоснование параметров энергосберегающих машинно – тракторных агрегатов: учебное пособие/ А.П. Карабаницкий, О.А. Левшукова. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 104 с.
29. Кауричев, И.С. Почвоведение / И.С.Кауричев, И.П.Гречин. - М.Колос,1969.-543 с.
30. Кацыгин, В. В. Закономерности сопротивления почвогрунтов при повторных нагрузениях / В. В. Кацыгин, А. Н. Орда // Сборник научных трудов / Центр. науч.-исслед. ин-т механизации и электрификации с.- х. нечерноземной зоны СССР.– Минск, 1976. – Вып. 13. – С. 117– 127.
31. Качинский, Н. А. Физика почв / Н. А. Качинский. – М. : Высш. школа, 1965. – 323 с.
32. Киреев, С.В. Графики в Mathcad : учебно – методическое пособие / С.В. Киреев, П.А. Вельямисов. – Ульяновск : УЛГТУ, 2018. – 84 с.
33. Колганов Д.А. Дождевальная машина «Фрегат» с усовершенствованной системой водоподачи для полива с низким напором: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Саратов : СГАУ, 2017. – 168 с.
34. Колганов, А. В. Пути организационного развития мелиорации и водного хозяйства России в период экономических реформ / А. В. Колганов, Е. Б. Колбачев, В. Н. Щедрин. – М. : Мелиоводинформ, 1998. – 117 с.
35. Колганов, Д. А. Модель интеллектуальной системы управления оросительным комплексом / Д.А Колганов, Д.А.Соловьёв, Г.Н. Камышова, Н.Н. Терехова // Аграрный научный журнал. 2021.№2.С.103-108.
36. Колганов, Д. А. Цифровые технологии и интеллектуальные системы управления оросительным комплексом с учётом фактических влагозапасов / Д.А.Колганов, Г. Н. Камышова, Н.Н. Терехова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 1 (61). С. 368 - 379.

37. Колганов, Д.А. Нейросетевое моделирование водопотребления / Д.А. Колганов, Г.Н. Камышова, Н.Н. Терехова // Аграрный научный журнал. 2021. №5. С.88-92.
38. Колганов, Д.А. Повышение эффективности орошения на основе внедрения цифровых моделей прогнозирования водопотребления / Д.А. Колганов, Д.А. Соловьёв, Г.Н. Камышова, Н.Н. Терехова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 4 (60). С.402-414.
39. Колганов, Д.А. Разработка роботизированного оросительного комплекса «Каскад» с интеллектуальной системой управления / Д.А. Колганов, Д.А. Соловьёв / Современные проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса. Сборник статей по итогам научно-практической конференции. 2019. С.90-93.
40. Котович С.В. Двигатели специальных средств / С.В. Котович - М: МАДИ (ГТУ), 2008-161с.
41. Кравченко Л.В. Моделирование распределения воды стационарными системами с дождевальными аппаратами кругового действия при расположении позиций по углам прямоугольника и ромба/ Черноволов В.А., Кравченко Л.В., Несмиян А.Ю. / Вестник аграрной науки Дона. 2019. – № 4 (48) – С. 12-20.
42. Кравченко Л.В. Оценка показателей агропроходимости мощных зерноуборочных комбайнов в комплектации с шинами различного исполнения / Кравченко В.А., Кравченко Л.В., Меликов И.М., Кондра Б.А. / Вестник аграрной науки Дона. 2020. – № 2 (50) – С. 34-43.
43. Кравченко Л.В. Результаты исследования процесса разгона МТА с различными механизмами включения трансмиссии трактора 5 класса / Кравченко В.А. / Вестник аграрной науки Дона. 2019. – № 3 (47) – С. 57-74.
44. Кравченко Л.В. Результаты исследования тягово-сцепных свойств олигомерных шин для двигателей тракторов третьего тягового класса /

- Кравченко В.А., Кравченко Л.В. / Вестник аграрной науки Дона. 2020. – № 1 (49) – С. 10-20.
45. Кравченко Л.В. Эффективность сдвливания колёс тракторов тягового класса 5 / Кравченко В.А., Кравченко Л.В., Меликов И.М. / Вестник аграрной науки Дона. 2021. – № 1 (53) – С. 4-12.
46. Кравченко, Л. В. Агротехнологические показатели ходовых систем трактора класса 5 с шинами 33R-32 разного конструктивного исполнения / Кравченко В.А., Кравченко Л.В., Меликов И.М., Кондра Б.А. / Вестник аграрной науки Дона. 2020. – № 3 (51) – С. 67-78.
47. Кувайскова, Ю. Е. Статистические методы прогнозирования : учебное пособие / Ю.Е. Кувайскова, В.Н. Клячкин – Ульяновск: УлГТУ, 2019. – 197 с.
48. Кузнецова, Е.В. Математическое планирование эксперимента: учебно-методическое пособие / Е.В. Кузнецова. – Пермь: Пермский государственный технический университет, 2011. – 33 с.
49. Лебедев, Б. М. Дождевальные машины / Б. М. Лебедев. – М. : Машиностроение, 1977. – 41 с
50. Листопад, И. А. Планирование эксперимента в исследованиях по механизации сельскохозяйственного производства / И. А. Листопад ; Всесоюз. акад. с.-х. наук. им. В. И. Ленина. – М. : Агропроимиздат, 1989. – 88 с.
51. Луцко, Н.Я. Инженерные расчёты в Excel: методические указания к лабораторным работам / Н.Я. Луцко, П.П. Анципорович, О.А. Алейникова. – Минск : БНТУ, 2013. . – 35 с.
52. Марголин, Ш. Ф. Исследование проходимости канавокопателей на осушенных болотах: экспериментально-теоретические основания механизации процессов осушения болот / Ш. Ф. Марголин. – Минск : Изд-во Акад. наук СССР, 1959. – 37с.
53. Мацепуро, М. Е. Технологические основания механизации уборки зерновых культур на торфяниках / М. Е. Мацуро, Н. А. Мальцер //

- Вопросы земледельческой механики / Акад. с.-х. наук БССР. Ин-т механизации и электрификации с.-х. – Минск, 1960. – Т. 4. – 384 с.
54. Медведев, В.В. Твёрдость почвы / В.В. Медведев.- Харьков, КГ1 Городская Типография, 2009.-152с.
55. Меликов И.М. Тягово-цепные свойства шин типоразмера 33-32 с разным внутренним строением / И.М. Меликов // Вестник аграрной науки Дона. 2020. – № 4 (52) – С. 28-38.
56. Механизация полива. Справочник / Б.Г. Штепа, В.Ф.Носенко, Н.В.Винникова, И.С. Остапов [и др].-М.: Агропромиздат.- 1990. – 336 с.
57. Механика грунтов, основания и фундаменты / учебное пособие // Л.Н. Шутенко, А.Г. Рудь, О.В. Кичаева и др.: под.ред. Л.Н. Шутенко – Харьков: ХНУГХ им А.Н. Бекетова, 2015. – 501 с.
58. Многоопорные дождевальные машины / С. Х. Гусейн-заде, Л. А. Перевезенцев, В. И. Коваленко [и др.]. – М. : Колос, 1984. – 191 с.
59. Надёжкина, Г.П. Совершенствование устройства приповерхностного полива дождевальной машины «Фрегат»/ диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Саратов: СГАУ . 2014.– 167 с.
60. Орошение и осушение в странах СНГ. (Краткий обзор по материалам продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, 1997 г.) / пер. С. Б. Пинаевой. – М. : ЦНТИ «Мелиоводформ»,1999. – 38 с.
61. Панов, К. М. Физические основы механики почв: учебное пособие / К. М. Панов, В.И. Ветохин. – Киев, :«Феникс», 2008 – 266 с.
62. Патент на полезную модель № 203047 МПК А01G25/09 Дождевальная машина / Рыжко Н.Ф., Рыжко Н.В., Рыжко С.Н., Смирнов Е.С., Шишенин Е.А., Бельтиков Б.Н. – 2020132901, заявлено 06.10.2020, опубл. 19.03.2021. Бюл. №8. – 6 с.
63. Патент на полезную модель №205812, А01G 25/09 Дождевальная машина / Рыжко Н.Ф., Хорин С.А., Хорина А.С., Рыжко С.Н., Рыжко Н.В.,

- Шишенин Е.А, Калинин А.Ю. -. 2021106585, заявлено 12.03.2021, опубл. 11.08.2021. Бюл. №23. – 6 с.
64. Патент на полезную модель № 1531926 SU A1. Многоопорная дождевальная машина кругового действия / А. И. Рязанцев, М. Л. Ценципер, В. И. Евтюхин ; заявитель Всесоюзное науч.-произв. объединение по механизации орошения «Радуга» ; № 4262989 ; заявл.20.04.1987 ; опубл. 30.12.1989, Бюл. № 48.
65. Патент № 1542441 SU A1. Устройство для заравнивания колеи / А. И. Рязанцев, И.А. Сандалов, В. М. Афанасьев, Н. И. Гречихин, В. Ф. Тащилин, В. Ф. Туммель, В. И. Евтюхин ; заявитель Всесоюзное науч.-произв. объединение по механизации орошения «Радуга»; № 4424674; заявл.13.05.1988 ; опубл. 15.02.1990, Бюл. № 6.
66. Патент № 1813371 SU A1. Тележка дождевальной машины / А. И. Рязанцев, Л. Г. Никитин, В. Г. Евтюхин, В. В. Каштанов ; заявитель Всесоюзное науч.-произв. объединение по механизации орошения «Радуга» ; №4925813; заявл. 08.04.1991; опубл. 07.05.1993, бюл.№17.
67. Патент № 2142681 RU S1. Следозаделыватель трактора / Ю. А. Савельев, А. В. Климанов, С. Н. Мокрицкий ; заявитель Самарская государственная сельскохозяйственная академия ; № 98107431/13 ; заявл. 21.04.1998 ; опубл. 20.12.1999
68. Патент № 2192727 RU S2. 2001г. Заравниватель колеи для дождевальной машины / В. В. Бородычев, А. В. Колганов, А. М. Салдаев, Е. В. Бородычева ; патентообладатели В. В. Бородычев, А. В. Колганов, А. М. Салдаев, Е. В. Бородычева ; №2001101565/13 ; заявл.16.01.2001 ; опубл. 20.11.2002, Бюл. № 32.
69. Патент №1069721 SU A1. Колесо движителя многоопорных дождевальных машин / А. И. Рязанцев; заявитель Всесоюзное науч.-произв. объединение по механизации орошения «Радуга» ; № 3460831 ; заявл. 02.07.1982 ; опубликовано 30.01.1984, Бюл. № 4.



70. Патент №1386114 SU A1. Способ повышения проходимости многоопорных дождевальных машин кругового действия/ А. И Рязанцев ; заявитель Всесоюзное науч.-произв. об-ние по механизации орошения «Радуга» ; № 3902988 ; заявл. 15.04.1985 ; опубликовано 07.04.1988, Бюл. № 13.
71. Патент №1665980 SU A1. Способ повышения проходимости многоопорной дождевальной машины / А. И. Рязанцев, А. О. Гаврилица; заявитель Всесоюзное науч.-произв. об-ние по механизации орошения «Радуга»; № 4691490; заявл. 03.04.1989 ; опубл. 30.07.1991, Бюл. № 28.
72. Патент на полезную модель №197334, A01G 25/09 Дождевальная машина / Рыжко Н.Ф., Рыжко С.Н., Хорин С.А., Карпова О.В., Ломакин М.А.. - 2019137912, заявлено 22.11.2019, опубл. 21.04.2020. Бюл. №12. – 8 с.
73. Патент на полезную модель № 197710, A01G 25/09 Дождевальная машина / Рыжко Н.Ф., Хорин С.А., Рыжко С.Н., Рыжко Н.В., Зобнин А.Н. - 2019139454, заявлено 03.12.2019, опубл. 25.05.2020. Бюл. №15. – 7 с.
74. Патент на полезную модель №187674 , B60C7/00;B60C7/06;B60C7/24 Колесо дождевальной машины / Рыжко Н.Ф., Шушпанов И.А., Рыжко Н.В., Попова Н.Е., Рыжко С.Н., Смирнов Е.С., Хорин С.А., Ботов С.В. - 2018101515, заявлено 16.01.2018, опубл. 14.03.2019. Бюл. №8. – 4 с.
75. Патент на полезную модель №2681445, A01G25/02;B05B1/18, Дождеватель / Соловьев Д.А., Колганов Д.А., Кузнецов Р.Е. - 2018117128, заявлено 07.05.2018, опубл. 06.03.2019. Бюл. №7. – 8 с.
76. Патент на полезную модель № 2682053, A01G25/02;B05B1/18, Дождеватель / Соловьев Д.А., Колганов Д.А., Кузнецов Р.Е. - 2018117126, заявлено 07.05.2018, опубл. 14.03.2019. Бюл. №8. – 8 с.
77. Патент на полезную модель № 2683546, A01G25/02;B05B1/18, Дождеватель турбинного типа / Соловьев Д.А., Колганов Д.А., Кузнецов Р.Е. - 2018116956, заявлено 07.05.2018, опубл. 28.03.2019. Бюл. №10. – 11 с.

78. Патент на полезную модель № 15446. Заравниватель колеи дождевальная машины / А. И. Рязанцев, Ю. Н. Егоров ; заявитель Коломенский институт переподготовки и повышения квалификации руководящих кадров и специалистов Министерства сельского хозяйства и продовольствия Рос. Федерации; № 2000107888/20 ; заявл. 03.04.2000 ; опубл. 20.10.2000, Бюл. № 29.
79. Патент на полезную модель № 19445. Заравниватель колеи дождевальная машины / А. И. Рязанцев, Ю. Н. Егоров ; заявитель Коломенский институт переподготовки и повышения квалификации руководящих кадров и специалистов Министерства сельского хозяйства и продовольствия Рос. Федерации ; №2001110809/20 ; заявл. 24.04.2001 ; опубл. 10.09.2001, Бюл. № 25.
80. Патент на полезную модель № 36166 RU U1. Низконапорная многоопорная дождевальная машина кругового действия с гидроприводом / Г. В. Ольгаренко, А. И. Рязанцев, Ю. Н. Егоров, В. В. Каштанов; патентообладатель Всероссийское науч.-произв. об-ние по орошению и сельхозводоснабжению «Радуга»; № 2003126049/20; заявл. 28.08.2003 ; опубл.10.03.2004, Бюл. № 7.
81. Пигулевский, М. Х. Пути и методы изучения физико-механических свойств почвы в целях правильного конструктивного оформления и опциональной эксплуатации средств механизации почвообработки / М. Х. Пигулевский. – М.: Сельхозгиз, 1936. – 145 с.
82. Положинцев, Б.И. Теория вероятностей: учебное пособие / Б.И. Положинцев. – СПб.: Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2020. – 108 с.
83. Полоус, Г.П. Основные элементы методики полевого опыта: учебное пособие / Г.П. Полоус, А.И. Войсковой. – Ставрополь: АГРУС Ставропольского аграрного университета, 2013 – 116 с.
84. Рекомендации по применению заравнивателя колеи дождевальных машин типа "Кубань"/А.И. Рязанцев и др.//ВНПО "Радуга".- 1991 г.

85. Розметов, К. С. Влияние мульчирования на влажность почвы и мощность почвенной корки / К. С. Розметов // Молодой ученый. – 2011. – № 5 (28), т. 2. – С. 266– 268.
86. Рыжко Н.Ф. Дождевальная машина вантовой конструкции с полиэтиленовым трубопроводом / Н.Ф. Рыжко, Е.С, Смирнова, И.А. Шушпанов // Новости науки в АПК. 2018.№2-2(11). - С. 379-382.
87. Рыжко Н.Ф. Новые технические решения по модернизации дождевальных машин кругового действия и результаты их внедрения / Н.Ф. Рыжко, Н.В. Рыжко, С.Н. Рыжко, Е.А. Шишенин // Орошаемое земледелие. 2019. №2. С.21- 24.
88. Рыжко Н.Ф. Совершенствование технологии приповерхностного дождевания на ДМ «Фрегат» / Н.Ф. Рыжко, Н.В. Рыжко, С.Н. Рыжко, С.В. Ботов // Аграрный научный журнал.- 2018.-№12.- С. 74-77.
89. Рыжко Н.Ф. Энергосбережение при поливе многоопорными дождевальными машинами / Н.Ф. Рыжко, Н.В. Рыжко, С.Н. Рыжко, С.А. Хорин // Мелиорация и водное хозяйство.-2021, № 6 – С 24-30.
90. Рыжко Н.Ф. Эффективность технологии приповерхностного полива многоопорными дождевальными машинами кругового действия / Н.Ф. Рыжко, Н.В. Рыжко, С.Н. Рыжко, Е.А. Шишенин // Орошаемое земледелие. 2020.№1. С.50 - 53.
91. Рыжко, Н. Ф. Технические средства внесения минеральных удобрений при поливе многоопорными дождевальными машинами / Н.Ф. Рыжко, Н.В. Рыжко, С.Н. Рыжко, О.В. Карпова // Аграрный научный журнал.-2019. № 9. С. 96-100.
92. Рыжко, Н.Ф. Особенности низконапорных ДМ "Фрегат" в зависимости от условий эксплуатации / Рыжко Н.Ф., Рыжко С.Н., Хорин С.А., Ботов С.В., Рыжко Н.В. // Научная жизнь. - 2018. - №11. - С. 6-15.
93. Рязанцев, А.И. Направления совершенствования дождевальных машин и систем / А.И. Рязанцев.– Рязань: ФБГОУ РГАТУ, 2013 – 306с.

94. Рязанцев, А.И. Повышение эксплуатационных показателей транспортных систем многоопорных дождевальных машин дождевальной техники / А. И Рязанцев. – Коломна: ГОУ ВО МО ГСГУ, 2014. –245с.
95. Рязанцев, А.И. Проходимость многоопорных дождевальных машин / А.И. Рязанцев – Рязань: ФБГОУ РГАТУ, 2015. – 237с.
96. Рязанцев, А.И. Улучшение эксплуатационных показателей дождевальной техники / А.И. Рязанцев. – Рязань: ФБГОУ РГАТУ, 2014. –303с.
97. Рязанцев, А.И. Эксплуатация транспортных систем многоопорных дождевальных машин / А. И Рязанцев. – Коломна: ГОУ ВО МО ГСГУ, 2016. – 225 с.
98. Салдаев, А. М. Способы снижения колееобразования под опорами широкозахватных дождевальных машин / А. М. Салдаев // Орошаемое земледелие в агроландшафтах степей : сборник науч. тр. ВНИИОЗ. – Волгоград, 1994. – С. 189–205.
99. Седлер, М.И. Статистические методы в управлении качеством: учебное пособие / М.И. Седлер, М.Х.Седлер. – СПб.: Санкт – Петербургский государственный политехнический университет, 2013. – 156 с.
100. Сельскохозяйственные машины (устройство, работа и основные регулировки): учебное пособие/ В.А. Романенко и [др.]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 232 с.
101. Смирнов А. И. Заравнивание колеи от многоопорных дождевальных машин / А. И. Рязанцев, А. О. Антипов, А. И. Смирнов // Вестник Рязанского агротехнологического университета. – 2018. – № 2 (38). – С. 116–121.
102. Смирнов А.И. Особенности оценки несущей способности почвы при поливе дождеванием / Рязанцев А.И., Антипов А.О., Смирнов А.И. // Вестник Государственного социально-государственного университета. 2019. №3. (35). С. 63-66.
103. Смирнов, А. И. Технологические особенности полива и показатели оценки эффективности ходовой системы ДМ «Кубань - ЛК1» / А. И. Рязанцев, А.

- О. Антипов, И. В. Малько, А. И. Смирнов, Е. Ю. Евсеев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – Рязань, 2019. – С.
104. Смирнов, А. И. Тяговые характеристики многоопорных дождевальных машин / А. И. Рязанцев, А. О. Антипов, И. В. Малько, А. И. Смирнов. – Рязань: Аграрный научный журнал. – 2019. – № 5. – С. 85–89.
105. Сморгалова, В. М. Задачи проверки статистических гипотез: учебно – методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 23 с.
106. Совершенствование и опыт эксплуатации многоопорных широкозахватных дождевальных машин, работающих в движении / Н. В. Винникова, А. А. Митрюхин, Л. А. Перевезенцев [и др.]. – М. : ЦБНТИ, 1985. – 88 с.
107. Сохт, К.А. Дисковые бороны и луцильщики. Проектирование технологических параметров: учебное пособие / К.А. Сохт, Е.И. Трубилин, В.И. Коновалов. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 164 с.
108. СТО АИСТ 11.1 –2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей / ФГБНУ «Росинформагротех». – М., 2012. – 54 с.
109. Стоноженко, Л.В. Применение MS Excel и Statistica for Windows для лесотаксационных вычислений и обработки экспериментальных данных методами математической статистики: учебное пособие / Л.В. Стоноженко, А.Н. Югов, В.Н. Карминов. – М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2012 – 156 с.
110. Сыромятников Ю.Н. Пути снижения удельного давления колёсных движителей на почву// Сельское хозяйство. – 2017 – №4 – С.95 – 103.
111. Технические условия ТУ 4734–350–000080–64. Машина дождевальная «Кубань ЛК1» МДЭК 474–70 и модификации, 2005.
112. Тынкевич, М.А. Введение в численный анализ : учебное пособие / М.А. Тынкевич, А.Г. Пимонов ; КузГТУ. – Кемерово, 2017. – 176 с.

113. Федеральные регистры базовых и зональных технологий и технических средств для мелиоративных работ в сельскохозяйственном производстве России до 2010 г. / М. Росинформагротех, 2003 г.- с.82.
114. Хархута, Н. Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н. Я. Хархута, Ю. М. Васильев. – М.:Транспорт, 1975. – 286 с.
115. Цымбаленко, С.В. Заравнивание колеи от дождевальных машин/ С.В. Цымбаленко, В.Ф. Пономаренко //Техника в сельском хозяйстве, 1981, № 10. С. 47.
116. Цытович, Н. А. Механика грунтов / Н. А.Цытович. – М. : Госстройиздат, 1963. – 636 с.
117. Шестоपालов К.К. Машины для земляных работ: учебное пособие / К.К. Шестоपालов: МАДИ – М.,2011. – 145 с.
118. Шило, И.Н. Закономерности слеодообразования при взаимодействии с многоосной ходовой системой машинно – тракторных агрегатов / Шило И.Н., Романюк Н.Н., Орда А.Н., Шкляревич В.А., Воробей А.С. – Минск: Вести национальной академии наук Белоруссии. Серия аграрных наук. – 2016. – №4. – С.108–117.
119. Янковский, И.А. Прикладная эконометрика: методические указания. – Пинск; ПолесГУ, 2013. – 44 с.
120. Icarbio:[Электронный ресурс]: сайт – URL <https://icarbio.ru/articles/soprotivlenie-kacheniю.html> (дата обращения 04.03.2021).
121. Technological Features of Irrigation and Assessment Indicators of Multibasic Irrigation Running Systems Efficiency ( on Example of IM Kuban - LK1) / А. И. Рязанцев, А. И. Смирнов, Е. В. Евсеев [и др.] // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN 2278-3075. – 2019. – Vol. 8. – Issue. June. – S. 3.
122. Water conversation while using irrigation devices of multiple supports in the conditions of the Moscow region /А. И. Рязанцев, Г. В. Ольгаренко, А. О.

Антипов, А. И. Смирнов// Amazonia Investiga. – 2019. – Vol. 8, Num 18(Enero/febrero).

123. AGROONE. [Электронный ресурс]. сайт.- URL <https://www.agroone.info/publication/pochvennaja-korka-problema-goloj-roshvu/> (дата обращения 03.03.2021).

# ПРИЛОЖЕНИЯ



## Акт производственных исследований ЗАО «Озёры»



**Акт**  
**производственных исследований ДМ «Кубань-ЛК1»**  
**на усовершенствованной ходовой системе**

Производственные исследования машины «Кубань-ЛК1» проводились на орошаемом объекте в ЗАО «Озёры» Озёрского района Московской области при поливе всходов картофеля. Как показывают результаты исследований, оснащение ДМ заравнивателями колеи обеспечивает, подтверждённое данными лабораторных и лабораторно-полевых исследований, повышение несущей способности почвы перед очередным её проходом с 75-85 до 300-320 кПа. Это, в свою очередь обуславливает, как для узкопрофильной шины 11.2R44, так и для широкопрофильной 18.4-24 глубину колеи, вне зависимости от числа проходов ДМ не более 0.05-0.07 м, против 0.30-0.32 м, при её движении без заравнивателей. Соответственно отмеченному энергетические затраты на качение ДМ составляют 8.0-8.3 против 10.0-11.0 кВт/ч. При этом оснащение ДМ узкопрофильными шинами 11.2R44 вместо 18.4R24 уменьшает её массу на 1000 кг, и заминаемую под ними площадь на 0.35га. За время проведения исследований, нарушений технологического процесса полива ДМ «Кубань-ЛК1» на узкопрофильных пневмоколёсах 11.2R44, оснащённой заравнивателями колеи, не наблюдалось.

Показатели эксплуатационно-технологической оценки ДМ «Кубань-ЛК1»

№ п.п	Наименование показателей	Значение
1	Хозяйство	ЗАО «Озёры»
2	Марка дождевальная машины	МДЭК-474-63-01
3	Условия и режим работы:	
	- тип почвы	суглинок
	- уклон поля:	
	общий	0.03
	местный	0.05
	- температура окружающего воздуха, С	28.4
	- скорость ветра, м/с	2
	- наименование культуры	картофель
	- поливная норма, м <sup>3</sup> /га	500
	- величина стока поле/колея	(5-7%)/(70-80%)
	- несущая способность почвы, кПа	
	при заравнивании колеи	300-320
без заравнивания колеи	75-85	
4	Средняя глубина колеи (после 5-ого прохода):	
	при заравнивании колеи, м	0.05-0.07
	без заравнивания колеи, м	0.30-0.32
5	Энергозатраты на передвижение ДМ, кВт	
	- при заравнивании колеи	8.2-8.3
	- без заравнивания колеи	10-11
6	Масса ДМ, кг	
	- на пневмошинах 11.2-44	20000
	- на пневмошинах 18.4-24	21000
7	Заминаемая площадь, га	
	- на пневмошинах 11.2-44	0.7
	- на пневмошинах 18.4-24	1.4
8	Время основной работы, ч	260
9	Производительность за час основного времени (m=500 м <sup>3</sup> /га), га/час	0.50
10	Эксплуатационно-технологические коэффициенты:	
	- технологического обслуживания	0.98
	- надежности технологического процесса	0.99
	- использования сменного времени	0.97
	- использования эксплуатационного времени	0.89
11	Коэффициент готовности	0.99

Это обеспечило, наряду с высокими значениями показателей технологического обслуживания и надёжности технологического процесса, величины коэффициентов использования сменного и эксплуатационного времени в пределах, установленных требованиями 0.97 и 0.89.

От ФГОУ ВО РГТУ

Научный руководитель:

Рязанцев А.И.

Отв. исполнители;

Смирнов А.И.

Антипов А.О.

« 25 » августа 2020 г.

от ЗАО «Озёры»

Главный гидротехник

Кохан В.Д.

« 26 » августа 2020 г.

Акт внедрения НИИ и ОКР

«Утверждаю»

Ректор ФГБОУ ВО РГАТУ

Н. В. Бышов

«02» сентября 2020г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы

**1. Наименование организации, где осуществлено внедрение:**

ЗАО «Озёры», Озёрского района Московской области

**2. Шифр работы, наименование мероприятия:**

Совершенствование технологий, средств механизации, электрификации и технического сервиса сельскохозяйственного производства (тема №3 плана НИР ФГБОУ ВО РГАТУ на 2016-2020 г.)

**3. Наименование научной организации, проводившей научную разработку и опытное освоение внедряемого мероприятия:**

ФБОУ ВО Рязанский государственный агротехнологический университет имени В.А. Костачева. Научный руководитель д.т.н., проф. А.И. Рязанцев, отв. исполнители: А.И.Смирнов, Антипов А.О.

**4. Сроки начала внедрения мероприятия : июль 2019 г.**

**5. Краткая характеристика внедряемого мероприятия:**

С целью снижения материалоемкости, энергетических затрат на качение, и повреждаемости сельскохозяйственных культур произведено оснащение дождевальную машины «Кубань-ЛК1» узкопрофильными пневматическими шинами модели 11.2R44, вместо серийных 18.4 R24, с оборудованием её тележек устройствами для заравнивания колес, обеспечивающими/ с учётом продолжительности межполивного периода, повышение несущей

способности почвы, в зоне движения ходовой системы, с 80-100 кПа до 300-320.

#### **6.Эффективность внедряемого мероприятия :**

Оснащение тележек дождевальной машины «Кубань-ЛК1» узко профильными шинами 11.2R44 с заравнивающими устройствами обеспечивает снижение материалоемкости ходовой системы на 30-35%, энергетических затрат на качение на 25-27%, и повреждаемости сельскохозяйственных культур на 30-32%.

От ФГБОУ ВО РГАТУ

Научный руководитель :

Рязанцев А.И. 

Отв. исполнители ;

Смирнов А.И. 

Антипов А.О. 

«25» августа 2020 г.

От ЗАО "Озёры"

Главный гидротехник

Кохан В.Д. \_\_\_\_\_

 2020 г.  


Результаты экспериментальных исследований.

Производилось пять серий экспериментов, расхождения между мат ожиданиями в которых, не превысили значения 3.5 %, что позволяет говорить о соблюдении требований по величине доверительного интервала , не менее 95%.

Значения среднеквадратичного отклонения и расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями не превысили значений 5 %. Приведены результаты одной из пяти серий экспериментов, проведенных в полевых , и лабораторных условиях ( почвенный канал).

Таблица.1

Значение несущей способности почвы в зоне движения ходовой системы ДМ "Кубань-ЛК1" Рнес.( кПа) , до и перед проходом ДМ (Рнес.1), нормой 500 куб. м. на гектар.

№	Средн.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Рнес	179.8	185	172	181	178	179	177	188	185	179	187	183	182	177	175	172	179	181	182	179	175
Рнес1	77.95	76	78	72	74	79	80	81	82	78	77	80	82	75	77	74	82	81	75	78	78

$\mu_1 = 179.8$  кПа,  $D_1 = 16.186$ ,  $\delta_1 = 4.02$ , или 2.3 %

$\mu_2 = 77.95$ кПа ,  $D_2 = 12.28$ ,  $\delta_2 = 2.74$ , или 3.5%

Таблица 2

Значение несущей способности почвы (кПа) в зоне движения ходовой системы ДМ "Кубань-ЛК1" в зависимости от номера прохода без заравнивания колеи, при поливной норме 500 куб. м на гектар

№	Средн.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	77.55	78	79	74	77	77	78	79	80	77	78	79	78	77	80	76	75	76	77	79	77
3	85.05	88	82	85	86	84	87	85	87	88	86	83	86	82	85	83	85	87	85	84	83
4	92.80.	92	94	93	91	94	91	92	93	96	95	94	93	93	92	91	90	91	93	95	93
5	101.15	103	105	99	101	102	100	104	101	98	99	104	102	97	98	100	101	104	103	102	100

$\mu_2 = 77.68$  кПа,  $D_2 = 2.35$ ,  $\delta_2 = 1.53$ , или 2.0 %;

$\mu_3 = 85.05$  кПа,  $D_3 = 2.82$ ,  $\delta_3 = 1.68$  или 2.0 %;

$\mu_4 = 93.2$ ,  $D_4 = 1.61$ ,  $\delta_4 = 1.27$  или 1.4%;

$\mu_5 = 101.15$  кПа,  $D_5 = 4.99$ ,  $\delta_5 = 2.24$  или 2.2%

Таблица 3  
Значение несущей способности почвы (мПа) перед началом следующего прохода в зависимости от номера прохода при заравнивании колен и поливной норме 500 куб.м. на гектар.

№	Средн	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	0.95	0.92	0.98	0.97	0.93	0.97	0.93	0.95	0.99	0.95	0.91	0.94	0.96	0.94	0.96	0.99	0.95	0.93	0.97	0.95	0.94
3	1.09	1.11	1.07	1.05	1.13	1.04	1.14	1.09	1.08	1.10	1.10	1.08	1.09	1.08	1.10	1.05	1.09	1.13	1.09	1.11	1.07
4	1.19	1.15	1.19	1.24	1.14	1.23	1.20	1.18	1.19	1.21	1.17	1.18	1.20	1.15	1.19	1.24	1.23	1.15	1.19	1.21	1.16
5	1.28	1.29	1.26	1.31	1.28	1.26	1.29	1.27	1.31	1.25	1.27	1.28	1.31	1.25	1.27	1.29	1.28	1.32	1.25	1.27	1.28

$\mu_2 = 0.95\text{мПа}, D_2 = 5.17, \delta_2 = 2.73, \text{ или } 2.35\%$ ;

$\mu_3 = 1.09\text{ мПа}, D_3 = 5.215, \delta_3 = 2.61, \text{ или } 2.5\%$ ;

$\mu_4 = 1.19\text{ мПа}, D_4 = 5.74, \delta_4 = 2.39, \text{ или } 2.0\%$

$\mu_5 = 1.28\text{ мПа}, D_5 = 4.25, \delta_5 = 2.11, \text{ или } 1.65\%$



Таблица 4

Значение несущей способности почвы (кПа) после прохода ДМ, при заравнивании колеи после начала следующего прохода и поливной норме 500 куб. м на гектар.

№	Средн	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	326.20	338	309	330	342	325	323	328	331	309	326	337	330	332	308	324	328	339	326	314	325
3	356.45	358	362	365	352	355	353	360	350	355	360	359	358	357	355	354	358	358	360	351	349
4	386.75	395	398	380	383	385	390	390	399	385	390	375	382	395	390	385	386	390	395	385	395
5	409.05	413	403	418	395	385	390	395	402	400	410	415	425	405	418	412	422	423	425	415	410

$\mu_2 = 326.20, D_2 = 15.77, \delta_2 = 3.97, \text{ или } 1.2 \%$ ;

$\mu_3 = 356.45, D_3 = 11.55, \delta_3 = 3.81, \text{ или } 1.1 \%$ ;

$\mu_4 = 386.75, D_4 = 34.01, \delta_4 = 5.83, \text{ или } 1.5 \%$ ;

$\mu_5 = 409.05, D_5 = 77.90, \delta_5 = 8.82, \text{ или } 2.15 \%$

Таблица 5

Значение глубины колеи Н (м) в зависимости от номера прохода при заравнивании колеи ходовой системы ДМ "Кубань-ЛК1", оборудованной штатными колёсами 18.4R24

№	Средн	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.053	0.04	0.07	0.05	0.045	0.06	0.06	0.055	0.05	0.06	0.07	0.055	0.05	0.06	0.045	0.04	0.05	0.055	0.04	0.06	0.05
2	0.044	0.05	0.06	0.07	0.03	0.04	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.045	0.05	0.07	0.05	0.06	0.03	0.03	0.04
3	0.041	0.05	0.045	0.03	0.025	0.035	0.04	0.03	0.02	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05	0.06	0.03	0.05	0.035	0.045	0.05	0.03
4	0.039	0.04	0.045	0.05	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.035	0.03	0.02	0.025	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.02
5	0.035	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03

$\mu 1 = 0.053$  м,  $D1 = 0.001389$ ,  $\delta 1 = 0.008$ , или 15 %;

$\mu 2 = 0.044$ ,  $D2 = 0.0011365$ ,  $\delta 2 = 0.005$ , или 11 %;

$\mu 3 = 0.041$ ,  $20D3 = 0.0012672$ ,  $\delta 3 = 0.007$ , или 16 %;

$\mu 4 = 0.039$ ,  $20D4 = 0.00092$ ,  $\delta 4 = 0.007$ , или 18 %;

$\mu 5 = 0.035$ ,  $20D5 = 0.00079$ ,  $\delta 5 = 0.006$ , или 17 %

В силу того, значение глубины колеи при использовании заравнивателя, стремится к нулю при увеличении числа проходов, точность её измерения уменьшается, и превышает требуемое значение 5 %.

Таблица 6

Значение глубины колеи Н (м) в зависимости от номера прохода без заравнивания колеи ходовой системы ДМ "Кубань-ЛК1", оборудованной штатными колёсами 18.4R24.

№	Средн	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.05	0.05	0.07	0.06	0.04	0.06	0.06	0.07	0.03	0.04	0.07	0.04	0.06	0.04	0.05	0.06	0.04	0.05	0.06	0.07	0.04
2	0.12	0.11	0.13	0.14	0.10	0.09	0.11	0.12	0.13	0.11	0.12	0.13	0.11	0.12	0.13	0.11	0.10	0.12	0.13	0.10	0.12
3	0.19	0.21	0.19	0.22	0.18	0.20	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.18	0.17	0.19	0.20	0.18	0.17	0.20	0.18	0.21
4	0.28	0.31	0.26	0.28	0.27	0.29	0.30	0.32	0.29	0.28	0.30	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.30	0.28	0.27	0.26	0.30
5	0.34	0.35	0.34	0.36	0.35	0.32	0.31	0.35	0.34	0.33	0.32	0.31	0.35	0.34	0.30	0.34	0.33	0.35	0.37	0.36	0.35

$\mu_1 = 0.05, D_1 = 1.7, \delta_1 = 1.3$ , или 26% ;

$\mu_2 = 0.11, D_2 = 2.1, \delta_2 = 1.45$ , или 13 %;

$\mu_3 = 0.19, D_3 = 2.9, \delta_3 = 2.4$ , или 8 %;

$\mu_4 = 0.28, D_4 = 3.1, \delta_4 = 1.76$ , или 6 %;

$\mu_5 = 0.34, D = 57, \delta_5 = 1.67$ , или 4.9 %.

Измеренное значение глубины колеи для пятого прохода соответствует требуемому значению доверительной вероятности 95 %.

Таблица 7

Значение глубины колеи Н (м) в зависимости от номера прохода при заравнивании колеи ходовой системы ДМ "Кубань-ЛК1", оборудованной экспериментальными колёсами 11.2R44

№	Средн	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	14	14	16	17	18	19	20
1	0.072	0.09	0.06	0.05	0.07	0.08	0.06	0.06	0.05	0.5	0.04	0.05	0.07	0.07	0.05	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.08	0.07
2	0.051	0.06	0.04	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05	0.05	0.07	0.07	0.04	0.04	0.03	0.04	0.06	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05
3	0.042	0.05	0.03	0.04	0.05	0.03	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04	0.03
4	0.039	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.05	0.02	0.03	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04
5	0.034	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.04	0.04	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03

$\mu_1 = 0.072$ ,  $D_1 = 2.2$ ,  $\delta_1 = 1.48$ , или 20 %;

$\mu_2 = 0.051$ ,  $D_1 = 19$ ,  $\delta_2 = 0.95$ , или 19 %;

$\mu_3 = 0.042$ ,  $D_3 = 17$ ,  $\delta_3 = 0.85$ , или 21 %;

$\mu_4 = 0.039$ ,  $D_4 = 19.64 = 0.95$ , или 28 %.

$\mu_5 = 0.034$ ,  $D_5 = 20$ , или 30% .

Глубина колеи стремится к нулю, с уменьшением глубины колеи точность измерений падает, так как усиливается влияние неровностей поверхности поля.

Таблица 8

Значение глубины колеи Н(м) в зависимости от количества проходов , без заравнивания колеи ходовой системы ДМ "Кубань-ЛК1", оборудованной экспериментальными колёсами 11.2R44

№	Средн	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.070	0.09	0.06	0.05	0.07	0.08	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.07	0.05	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.08	0.07
2	0.16	0.15	0.19	0.18	0.16	0.15	0.14	0.19	0.17	0.18	0.15	0.14	0.13	0.15	0.16	0.17	0.18	0.17	0.18	0.19	0.19
3	0.28	0.28	0.29	0.27	0.28	0.24	0.30	0.25	0.23	0.31	0.25	0.26	0.26	0.27	0.30	0.28	0.28	0.26	0.29	0.25	0.27
4	0.33	0.33	0.29	0.28	0.35	0.34	0.35	0.34	0.28	0.35	0.33	0.32	0.33	0.35	0.32	0.30	0.31	0.32	0.35	0.35	0.33
5	0.35	0.36	0.33	0.34	0.32	0.33	0.31	0.34	0.32	0.33	0.34	0.36	0.37	0.35	0.36	0.35	0.34	0.36	0.35	0.36	0.35

$\mu_1 = 0.07, D_1 = 2.4, \delta_1 = 1.55$  см, или 22%,

$\mu_2 = 0.16, D_2 = 3.3, \delta_2 = 1.81$  см или 10.6 %,

$\mu_3 = 0.28, D_3 = 4.65, \delta_3 = 2.15$  см, или 7.3 %

$\mu_4 = 0.33, D_4 = 6.3, \delta_4 = 2.5$  см или 6.2 %

$\mu_5 = 0.35, D_5 = 2.95, \delta_5 = 1, 71$  см или 5.0 %

При глубине колеи 35 см обеспечивается требуемая точность измерений.

Таблица 9

Зависимость коэффициента сопротивления качению от глубины колеи ходовой системы ДМ"Кубань-ЛК1", оснащённой штатными колёсами 18.4R24.

H(м)	фср.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03
0.12	0.12	0.13	0.11	0.13	0.11	0.12	0.13	0.11	0.12	0.12	0.11	0.13	0.11	0.12	0.12	0.11	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13	0.12
0.19	0.19	0.20	0.18	0.19	0.20	0.19	0.18	0.19	0.20	0.19	0.19	0.21	0.17	0.19	0.18	0.20	0.18	0.21	0.18	0.18	0.18	0.19
0.28	0.25	0.26	0.24	0.25	0.26	0.24	0.23	0.27	0.25	0.24	0.24	0.26	0.26	0.25	0.24	0.26	0.27	0.23	0.25	0.25	0.25	0.27
0.34	0.32	0.35	0.34	0.33	0.35	0.33	0.31	0.33	0.30	0.32	0.33	0.31	0.32	0.31	0.33	0.33	0.32	0.32	0.31	0.290	0.31	0.30

$\mu_1 = 0.04, 20D1 = 0.001, \delta_1 = 0.0022$ , или 5 %;

$\mu_2 = 0.12, 20D2 = 0.001, \delta_2 = 0.0022$ , или 1.8 %;

$\mu_3 = 0.19, 20D3 = 0.0016, \delta_3 = 0.009$ , или 4,7 %;

$\mu_4 = 0.25, 20D4 = 0.0018, \delta_4 = 0.0094$ , или 3.76%;

$\mu_5 = 0.32, 20D5 = 0.0025, \delta_5 = 0.011$ , или 3,4 %

Результаты полевых исследований .

Таблица 10

Значение глубины колеи Н (м) в зависимости от номера прохода при заравнивании колеи ходовой системы ДМ "Кубань-ЛК1", оборудованной экспериментальными колёсами 11.2R44

№	Средн	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	14	16	17	18	19	20	
1	0.070	0.09	0.07	0.05	0.07	0.08	0.06	0.06	0.08	0.5	0.07	0.09	0.08	0.08	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.05	0.09	0.07
2	0.050	0.06	0.04	0.06	0.05	0.04	0.03	0.05	0.06	0.06	0.05	0.07	0.05	0.03	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04
3	0.045	0.05	0.03	0.04	0.05	0.03	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
4	0.040	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.05	0.02	0.03	0.06	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04
5	0.035	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03

$\mu_1 = 0.07, D_1 = 2.2, \delta_1 = 1.48, \text{ или } 20\%$ ;

$\mu_2 = 0.050, D_1 = 0.95, \delta_2 = 0.97, \text{ или } 19\%$ ;

$\mu_3 = 0.045, D_3 = 0.85, \delta_3 = 0.92, \text{ или } 21\%$ ;

$\mu_4 = 0.039, D_4 = 0.95, \delta_4 = 0.97, \text{ или } 28\%$ ;

$\mu_5 = 0.035, D_5 = 1.00, \text{ или } 30\%$  .

Глубина колеи стремится к нулю, с уменьшением глубины колеи точность измерений падает, так как усиливается влияние неровностей поверхности поля.

Таблица 11

Значение несущей способности почвы (мПа) перед началом следующего прохода в зависимости от номера прохода при выравнивании колес и поливной норме 500 куб.м на гектар.

№	Средн	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	0.99	0.95	0.95	1.10	0.970	0.96	0.94	0.93	0.91	0.97	0.95	0.98	1.10	0.98	1.11	1.13	0.98	0.98	0.96	0.98	0.97
3	1.05	0.98	1.02	0.95	0.945	0.99	0.96	1.01	1.03	1.00	1.04	0.99	0.97	1.03	1.02	1.01	1.00	0.99	1.05	0.99	1.03
4	1.15	1.11	1.08	1.19	1.12	1.11	1.19	1.13	1.15	1.16	1.13	1.14	1.12	1.15	1.19	1.18	1.17	1.20	1.18	1.17	1.21
5	1.24	1.25	1.27	1.25	1.24	1.23	1.25	1.24	1.27	1.26	1.23	1.22	1.24	1.23	1.22	1.21	1.25	1.23	1.24	1.22	1.24

$\mu_2 = 0.99\text{Па}, D_2 = 31.75, \delta_2 = 25, \text{ или } 2.6\%$ ;

$\mu_3 = 1.05\text{ мПа}, D_3 = 3015, \delta_3 = 55, \text{ или } 6\%$ ;

$\mu_4 = 1.15\text{ мПа}, D_4 = 1235, \delta_4 = 35, \text{ или } 2.9\%$

$\mu_5 = 1.24\text{ мПа}, D_5 = 350, \delta_5 = 18.7, \text{ или } 1.4\%$



Таблица 12

Значение несущей способности почвы (кПа) после прохода ДМ, при выравнивании колеи после начала следующего прохода и поливной норме 500 куб. м на гектар.

№	Средн	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	325	335	315	330	320	315	335	330	320	325	330	320	315	320	335	330	320	315	335	320	330
3	358.5	340	370	350	355	360	375	360	350	360	350	360	350	370	375	360	360	350	340	365	370
4	386	375	405	380	385	390	370	395	370	395	370	390	395	380	390	400	390	380	395	390	380
5	425	435	440	410	415	410	430	435	420	430	425	435	420	440	410	440	425	420	425	400	430

$\mu_2 = 325, D_2 = 55, \delta_2 = 7.46$  или 2.3 %;

$\mu_3 = 355, D_3 = 36.1, \delta_3 = 6.26$ , или 2.0 %;

$\mu_4 = 395, D_4 = 63.75, \delta_4 = 8.00$ , или 2.1 %;

$\mu_5 = 425, D_5 = 135, \delta_5 = 11.6$ , или 2.8 %

Таблица 13

Зависимость коэффициента сопротивления качению от глубины колеи ходовой системы ДМ"Кубань-ЛК1", оснащённой штатными колёсами 18.4R24.

H(м)	fcp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03μ
0.12	0.12	0.13	0.11	0.13	0.11	0.12	0.13	0.11	0.12	0.12	0.11	0.13	0.11	0.12	0.12	0.11	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13	0.12
0.19	0.19	0.20	0.18	0.19	0.20	0.19	0.18	0.19	0.20	0.19	0.19	0.21	0.17	0.19	0.18	0.20	0.18	0.21	0.18	0.18	0.18	0.19
0.28	0.25	0.26	0.24	0.25	0.26	0.24	0.23	0.27	0.25	0.24	0.24	0.26	0.26	0.25	0.24	0.26	0.27	0.23	0.25	0.25	0.25	0.27
0.34	0.32	0.35	0.34	0.33	0.35	0.33	0.31	0.33	0.30	0.32	0.33	0.31	0.32	0.31	0.33	0.33	0.32	0.32	0.31	0.290	0.31	0.30

$\mu_1 = 0.04, D_1 = 0.001, \delta_1 = 0.0022, \text{ или } 5 \%$ ;

$\mu_2 = 0.12, D_2 = 0.001, \delta_2 = 0.0022, \text{ или } 1.8 \%$ ;

$\mu_3 = 0.19, D_3 = 0.0016, \delta_3 = 0.009, \text{ или } 4,7 \%$ ;

$\mu_4 = 0.25, D_4 = 0.0018, \delta_4 = 0.0094, \text{ или } 3.76 \%$ ;

$\mu_5 = 0.32, D_5 = 0.0025, \delta_5 = 0.011, \text{ или } 3.4 \%$

Таблица 14

Значение глубины колеи Н (м) в зависимости от номера прохода без заравнивания колеи ходовой системы ДМ "Кубань-ЛК1", оборудованной штатными колёсами 18.4R24.

№	Средн	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.05	0.07	0.05	0.06	0.04	0.06	0.06	0.07	0.04	0.03	0.07	0.04	0.04	0.06	0.05	0.06	0.05	0.04	0.06	0.07	0.04
2	0.12	0.13	0.11	0.10	0.14	0.11	0.09	0.13	0.12	0.12	0.11	0.13	0.11	0.12	0.13	0.11	0.10	0.12	0.13	0.10	0.12
3	0.19	0.19	0.21	0.18	0.22	0.17	0.20	0.19	0.18	0.21	0.20	0.17	0.18	0.21	0.19	0.21	0.17	0.17	0.18	0.20	0.21
4	0.28	0.26	0.31	0.27	0.28	0.30	0.29	0.29	0.32	0.30	0.28	0.29	0.27	0.28	0.25	0.26	0.28	0.30	0.26	0.27	0.31
5	0.34	0.36	0.34	0.35	0.32	0.35	0.35	0.31	0.33	0.34	0.31	0.32	0.30	0.34	0.35	0.35	0.37	0.34	0.33	0.35	0.36

$\mu_1 = 0.05, D_1 = 34, \delta_1 = 1.3$ , или 26% ;

$\mu_2 = 0.11, D_2 = 42, \delta_2 = 1.45$ , или 13 %;

$\mu_3 = 0.19, D_3 = 58, \delta_3 = 1.7$ , или 8 %;

$\mu_4 = 0.28, D_4 = 63, \delta_4 = 1.77$ , или 6 %;

$\mu_5 = 0.34, D = 57, \delta_5 = 1.69$ , или 4.9 %.

Измеренное значение глубины колеи для пятого прохода соответствует требуемому значению доверительной интервала 95 %.