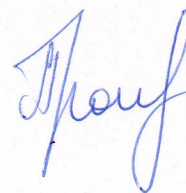


На правах рукописи



Прокопчук Роман Евгеньевич

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ  
РАБОТЫ АГРЕГАТА ДЛЯ ВНЕСЕНИЯ ЖИДКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ  
УДОБРЕНИЙ**

Специальность 05.20.01–Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Барнаул 2022 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет»

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
**Беляев Владимир Иванович**

**Официальные оппоненты:** **Назаров Николай Николаевич**, доктор технических наук, ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробιοтехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН), главный научный сотрудник

**Голованов Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, «Омский экспериментальный завод – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», директор

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова

Защита состоится «09» июня 2022 года в 09-00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.027.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет», по адресу: 675005, Амурская область, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86, корпус 12, ауд. 82, телефон/факс 8-4162-99-51-20, E-mail: [www.d.220.027.01@gmail.com](mailto:www.d.220.027.01@gmail.com)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет» [www.dalgau.ru](http://www.dalgau.ru)

Автореферат разослан «    » апреля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Якименко Андрей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одним из перспективных направлений повышения урожайности сельскохозяйственных культур является внутрипочвенное внесение жидких минеральных удобрений. Существенным их преимуществом является обеспечение растений легкодоступными элементами питания, в т.ч. различными формами азота пролонгированного действия на протяжении всего периода вегетации, что особенно важно в засушливые годы. Как результат, точечное внесение удобрений позволяет значительно повысить эффективность использования почвенной влаги и ее расход на единицу урожайности.

В настоящее время промышленностью выпускаются целый ряд машин для почвенной инъекции жидких минеральных удобрений зарубежного и отечественного производства. Их типоразмерный ряд ограничен, а методики выбора параметров тракторов для агрегатирования с ними отсутствуют.

Поэтому исследования, направленные на обоснование рациональных машинно-тракторных агрегатов (МТА) для внутрипочвенного внесения жидких минеральных удобрений (ликвилайзер), являются актуальными.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-316-90013/20 на 2020-2022 гг. по теме «Обоснование рациональных параметров и режимов работы агрегата для внесения жидких минеральных удобрений».

**Степень научной разработанности темы.** При обосновании параметров и режимов работы агрегатов для внутрипочвенного внесения жидких минеральных удобрений за основу принят метод аналогии с агрегатами, имеющими идентичные рабочие органы.

Вопросы взаимодействия рабочих органов машин с почвой, обоснования рациональных параметров и режимов работы МТА с позиций системного анализа рассмотрены в работах Бакулина В. К., Вагина А.Т., Горячкина В.П., Даценко Н.В., Дроздова В. Н., Желиговского В.А., Зиязетдинова Р.Ф., Киртбая Ю.К., Коврикова И. Г., Козырева Б. М., Кормщикова А.Д., Мухина А.А., Пилецкого А. З., Свирщевского Б.С., Чайгица Н.В. и др.

Исследованиями энергетической оценки МТА занимались Бауэр И.И., Беляев В.И., Бумбар И.В., Зыга Ю.С., Иванов С.А., Красовских В.С., Кривуца З.Ф., Кузнецов Е.Е., Назаров Н.Н., Павлюченко Г.В., Пирожков Д.Н., Соколов В.В., Щитов С.В., Яблонский А.А.

Алтайским ГАУ проводятся полевые опыты по оценке эффективности применения отечественных и зарубежных почвообрабатывающих и посевных МТА. В результате этого разработана математическая модель для обоснования рациональных параметров и режимов работы почвообрабатывающих и посевных МТА, которая постоянно совершенствуется и уточняется применительно к различным условиям эксплуатации и конструкциям машин.

Разработка аналогичной модели применительно к ликвилайзерам позволит определять рациональные параметры и режимы работы МТА, что приведет к существенному повышению эффективности их использования.

**Цель диссертационной работы:** повышение эффективности использования МТА для внесения жидких минеральных удобрений за счет обоснования рациональных составов и режимов работы с учетом технологических требований.

Для достижения цели, решены следующие задачи:

1. Провести анализ машин для внутрипочвенного внесения жидких минеральных удобрений и методик обоснования их параметров.

2. Разработать математическую модель МТА для внутрипочвенного внесения жидких минеральных удобрений, обосновать рациональные параметры и режимы его работы.

3. Провести энергетическую оценку машинно-тракторных агрегатов для внесения жидких минеральных удобрений и оценить эффективность их инъекции в рядок и междурядье на посевах яровой пшеницы.

4. Дать технико-экономическую оценку результатов исследований.

**Объект исследования:** технологический процесс внутрипочвенного внесения жидких минеральных удобрений.

**Предмет исследования:** взаимосвязь параметров и режимов работы МТА при внесении жидких минеральных удобрений.

**Научная новизна исследования:** впервые обоснованы рациональные параметры МТА для внутрипочвенного внесения жидких минеральных удобрений в Алтайском крае, дана их технико-экономическая и оценка эффективности при инъекции удобрений в рядок и междурядье на посевах яровой пшеницы.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

– модель МТА для внесения жидких минеральных удобрений, позволяющая оптимизировать параметры с учетом технологических требований.

– результаты исследований могут быть использованы хозяйствами Алтайского края при подборе параметров ликвилайзеров для агрегатирования с имеющимися моделями тракторов, а также заводами аграрного машиностроения при проектировании новой техники.

– результаты исследований внедрены в ООО «БочкариАгро» и ООО «Вирт» Целинного района Алтайского края, использующих внутрипочвенный способ внесения жидких минеральных удобрений; приняты к внедрению в «ТД Комплекс Агро», производящем ликвилайзеры; используются в учебном процессе Алтайского ГАУ.

**Методология и методы исследования:** В исследованиях применялись современные методы математического моделирования выходных энергетических и технико-экономических показателей МТА. Эксперименты проводились в полевых условиях с использованием методов планирования многофакторных опытов. Обработку полученных данных осуществляли на персональном компьютере на основе методов статистического анализа.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель машинно-тракторного агрегата для внутривспашечного внесения жидких минеральных удобрений.
2. Рациональные параметры МТА для внутривспашечного внесения жидких минеральных удобрений.
3. Результаты полевых опытов по энергетической, технологической и технико-экономической оценке работы МТА.

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Для определения оценочных показателей применялась приборная база с высокой точностью измерений. Обработка полученных результатов выполнялась с помощью пакета прикладных программ, MS Office, Statistica 12.

Результаты работы докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях:

– XVI Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (г. Барнаул, 12-13 февраля 2021 г.);

– VII Региональной молодежной научной конференции (г. Барнаул, 17 марта 2021 г.);

– I этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых заведений министерства сельского хозяйства РФ, (г. Барнаул, 17 марта 2021 г.);

– II этап Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых заведений министерства сельского хозяйства РФ, (г. Красноярск, 15 апреля 2021 г.);

– III этап Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых заведений министерства сельского хозяйства РФ, (г. Уфа, 24-25 мая 2021 г.);

– Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летнему юбилею инженерного факультета ФГБОУ ВО Оренбургского ГАУ «Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем»;

– XVII Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (г. Барнаул, 9-10 февраля 2022 г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ, в том числе 4 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем работы:** диссертационная работа состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения, списка использованных источников, включающего 114 наименований. Работа изложена на 125 страницах, содержит 21 таблицу, 53 рисунка и 4 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы и степень её разработанности, сформулированная рабочая гипотеза, цель и задачи, объект и предмет исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту. Также содержится информация об апробации работы, отражена структура и объем диссертации.

**В главе «Состояние проблемы»** проведен анализ применения минеральных удобрений в Алтайском крае и способов их внесения. Показана высокая эффективность и перспективность внутрипочвенного внесения жидких минеральных удобрений.

Выполненный анализ конструкций ликвилайзеров отечественного и зарубежного производства, показывающий, что наиболее распространенными агрегатами, используемыми в России, являются «Duport», «Gustrower», «ЛиквилайРус» и «Алтай». Ликвилайзер «Алтай», производимый в Алтайском крае, дешевле аналогов примерно в 2,5 раза и может агрегатироваться с тракторами различных тяговых классов.

Анализ методик обоснования рациональных параметров МТА показал, что основными параметрами, влияющими на эффективность их использования, являются мощность тракторного двигателя, масса МТА и ширина захвата сельскохозяйственного орудия.

Рациональные параметры игольчатых рабочих органов для инъекции жидких минеральных удобрений зависят от их конструктивных (диаметр диска, расстояний между концами игл, глубина питания) и эксплуатационных показателей (поступательная и окружная скорость движения, скоростной параметр). Исследование кинематики игольчатого рабочего органа ликвилайзера показывает, что колесо инжектора может быть оснащено 12 иглами длиной 8 см, что является достаточным для инъекции удобрений на заданную технологическую глубину 6 см.

Сформулированы цель и задачи исследований.

**Во второй главе «Теоретические исследования»** предложена математическая модель, позволяющая определять рациональные параметры МТА для внутрипочвенного внесения удобрений.

Предлагаемая модель работы машинно-тракторного агрегата представляет совокупность входных (ширина захвата агрегата ( $B_p$ ), скорость движения ( $V_p$ ), эксплуатационная масса машинно-тракторного агрегата ( $M_{мта}$ ), номинальная (максимальная) мощность двигателя ( $N_{ен}$ ) и номинальный расход топлива ( $G_{тн}$ ) тракторного двигателя) и выходных (чистая производительность ( $W_ч$ ), погектарный расход топлива ( $G_{га}$ ) и эксплуатационные затраты МТА ( $C_3$ )) переменных, а также внешних воздействий (неровности поля, физико-механические свойства почвы, структура и механический состав и плотность почвы, которые считаем неизменными

во времени). Влажность почвы ( $W_n$ ) в поверхностном слое (0-10 см) рассматриваем как пассивный контролируемый фактор, влияние которого будем учитывать при проведении опытов.

Рассматриваемая система взаимодействий представлена на рис. 1

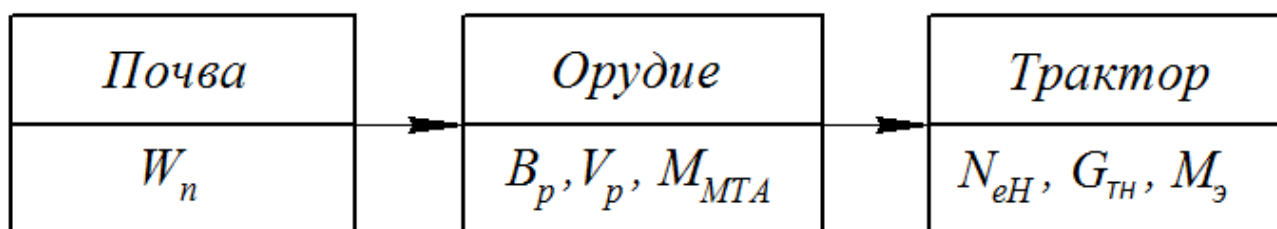


Рисунок 1 – Система «Почва-орудие-трактор»

Величина среднего расхода топлива тракторного двигателя агрегата внесения жидких минеральных удобрений рассматривается как функция вида:

$$G_T = f(M_э, N_{eH}, B_p, M_{MTA}, V_p, W_n), \quad (1)$$

где  $M_э$  – эксплуатационная масса трактора, кг;  $N_{eH}$  – номинальная мощность двигателя трактора, кВт;  $M_{MTA}$  – эксплуатационная масса машинно-тракторного агрегата, кг;  $B_p$  – ширина захвата ликвилайзера, м;  $V_p$  – скорость движения ликвилайзера, м/с;  $W_n$  – влажность почвы, %.

В основу математической модели по обоснованию параметров агрегатов для внесения жидких минеральных удобрений положена математическая модель почвообрабатывающего посевного агрегата, разработанная на кафедре сельскохозяйственной техники и технологий Алтайского ГАУ. Она базируется на энергетической оценке МТА по величине расхода топлива тракторного двигателя:

$$G_T = G'_{T0} + E_0 \cdot B_p \cdot h \cdot V_p^2, \quad (2)$$

где  $G'_{T0}$  – математическое ожидание расхода топлива на самопередвижение агрегата и потерь в передаточных механизмах системы, кг/ч;  $h$  – математическое ожидание глубины обработки почвы, м;  $B_p$  – рабочая ширина захвата МТА;  $V_p$  – математическое ожидание рабочей скорости движения МТА;  $E_0$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий влияние состояния почвы, параметров трактора и типа рабочих органов машин-орудий на интенсивность прироста расхода топлива двигателя от увеличения  $B_p$ ,  $V_p$  и  $h$ .

В исходном выражении (2) расход топлива двигателя представлен в виде:

$$G_T = G_{TXX} + G_{Tp}, \quad (3)$$

где  $G_{TXX}$  – расход топлива двигателя на самопередвижение МТА (на холостом ходу);  $G_{Tp}$  – расход топлива двигателя при выполнении рабочего процесса (рабочем ходе МТА).

На основе анализа многочисленных данных энергетической оценки МТА, установлено, что связь между затратами топлива двигателя на самопередвижение МТА, эксплуатационной массой агрегата и рабочей скоростью движения имеет вид:

$$G_{\text{ТХХ}} = a_0 + a_1 \cdot V_p + a_2 \cdot V_p^2 + a_3 \cdot M_{\text{МТА}}, \quad (4)$$

где  $V_p$  – скорость движения на перекачивание агрегата, м/с;  $M_{\text{МТА}}$  – эксплуатационная масса МТА, кг;  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты регрессии.

Диапазон математических ожиданий скорости движения МТА определяется по результатам агротехнологической оценки, учитывающей требования к качеству выполнения технологического процесса.

Рабочий процесс внутрипочвенного внесения минеральных удобрений выполняется с учетом ограничений по агротехнически заданной рабочей скорости движения (2,22 м/с). Тогда расход топлива двигателя на выполнение рабочего процесса агрегата заданной ширины захвата ( $B_p$ ) выражается уравнением:

$$G_{\text{Тр}} = b_0 + b_1 \cdot W_{\text{п}} + b_2 \cdot M_{\text{Тр}} + b_3 \cdot \frac{M_{\text{Тр}}}{M_{\text{МТА}}} \quad (5)$$

где  $W_{\text{п}}$  – влажность почвы, %;  $M_{\text{Тр}}$  – эксплуатационная масса трактора, кг;  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – коэффициенты регрессии.

Значения коэффициентов регрессии в уравнениях (4) и (5) определяются по результатам энергетической оценки МТА в условиях эксплуатации.

В реальных условиях МТА могут эксплуатироваться в режиме частичных нагрузок, поэтому расход топлива тракторного двигателя в зависимости от степени его загрузки может быть представлен выражением:

$$G_{\text{Тр}} = k_i \cdot G_{\text{ТН}}, \quad (6)$$

где  $k_i$  – коэффициент использования расхода топлива (загрузки двигателя по расходу топлива);  $G_{\text{ТН}}$  – номинальный (максимальный) расход топлива тракторного двигателя.

Для обоснования рациональных параметров МТА использован приведённый расход топлива к базовому трактору, параметры которого определены для конкретных условий эксплуатации:

$$G_{\text{пр}} = \frac{G_{\text{Т}}^i \cdot \mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_6}, \quad (7)$$

где  $G_{\text{Т}}^i$  – расход топлива исследуемого агрегата, кг/ч;  $\mathcal{E}_i$  – энергонасыщенность исследуемого агрегата, кВт/т;  $\mathcal{E}_6$  – энергонасыщенность базового агрегата, кВт/т/

Заменяя в выражении (7) энергонасыщенность на отношение мощности двигателя к массе агрегата, с учетом выражения (6) и приняв, что расход топлива двигателя линейно зависит от массы агрегата приведенный расход топлива можно представить в виде:

$$G_T^i = \frac{N_{eH}^i}{\Delta_6} \cdot \left( c_0 \cdot k_i + \frac{c_1}{M_3^i + M_{cXM}^i} \right), \quad (8)$$

где  $M_3^i$  – эксплуатационная масса трактора, кг;  $M_{cXM}^i$  – эксплуатационная масса ликвилайзера, кг;  $c_0, c_1$  – коэффициенты регрессии.

Коэффициент загрузки тракторных двигателей по расходу топлива ( $k_i$ ) зависит как от рабочей скорости движения, так и от ширины захвата агрегата. Увеличение рабочей скорости движения свыше 2,2 м/с недопустимо по технологическим требованиям. На основе многочисленных результатов экспериментов зависимость расхода топлива на выполнение рабочего процесса от ширины захвата МТА также принята линейной.

Тогда значение коэффициента  $k_i$  можно определить согласно уравнению:

$$k_i = (d_0 - d_1 \cdot N_{eH}^i + d_2 \cdot M_{MTA}^i) \cdot \frac{B_i}{12}, \quad (9)$$

где  $B_i$  – ширина захвата агрегата, м;  $d_0, d_1, d_2$  – коэффициенты регрессии.

Подставляя уравнение (9) в (8), получим выражение для определения рациональных параметров МТА в зависимости от мощности двигателя, массы трактора, массы и ширины захвата ликвилайзера.

Для нахождения коэффициентов регрессии необходимо провести энергетическую оценку агрегатов с различными значениями параметров.

**В третьей главе «Программа экспериментальных исследований»** приведены программа и частные методики экспериментальных исследований с описанием использованных приборов и оборудования.

Программа предусматривала получение для математической модели исходных регрессионных зависимостей по энергооценке МТА (рис. 2) в рабочем режиме и режиме холостого хода, а также закладку полевого опыта по оценке эффективности инъекции жидких минеральных удобрений в рядок и междурядье на посевах яровой пшеницы.

Полевые опыты проводились в рамках технологии No-Till в трех хозяйствах Алтайского края: ООО «Вирт» Целинного района, ООО «БочкариАгро» Целинного района и ФХ Зайцева А.И. Тюменцевского района.

В первом опыте исследовалось влияние скорости движения МТА и уровня заполнения емкости жидкими удобрениями на расход топлива двигателя трактора в режиме холостого хода. Проходы выполнялись с незаглубленными рабочими органами.



а

б

Рисунок 2 – Агрегаты для внесения жидких минеральных удобрений John Deere 8310R + Ликвилайзер «Алтай» (а) и John Deere 8430 + «Duport» (б)

Факторы и уровни их варьирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы и уровни варьирования (холостой ход МТА)

№	Состав МТА	Факторы и уровни их варьирования				
		Рабочая скорость движения, м/с			Заполнение емкости удобрений, %	
1	John Deere 8310R + «Алтай»	1,11	1,66	2,22	0	100
2	John Deere 8430 + «Duport»	1,11	1,66	2,22	0	100
3	Valtra T234+ «Duport»	1,11	1,66	2,22	0	100

Всего реализовано 6 вариантов сочетаний факторов для каждого из испытываемых агрегатов. Повторность опытов принята 5-ти кратной. Измерение расхода топлива при каждой повторности проведения опытов принята 15-ти кратной. Длина контрольного участка составляла 100 м при установившемся режиме работы МТА. В результате проведения опыта получены значения коэффициентов регрессии для уравнения (4).

Во втором опыте исследовалась зависимость расхода топлива двигателя трактора от уровня заполнения емкости жидкими минеральными удобрениями в рабочем режиме. Рабочая скорость машинно-тракторного агрегата принималась согласно технологическим требованиям (2,22 м/с.). Факторы и уровни варьирования приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Факторы и уровни варьирования (рабочий ход МТА)

№	МТА	Влажность поверхностного слоя почвы, % (пассивный контролируемый фактор)	Факторы и уровни их варьирования		
			Заполнение емкости удобрений, %		
1	John Deere 8310R + «Алтай»	14,8	0	50	100
2	John Deere 8430 + «Duport»	23,7	0	50	100
3	Valtra T234+ «Duport»	18,1	0	50	100

Всего на базе каждого агрегата реализовано 3 варианта опыта. Повторность проведения опытов принята 15-ти кратной.

По результатам проведения опыта получены значения коэффициентов регрессии для выражения (5).

В третьем опыте изучалось развитие растений яровой пшеницы и активность фотосинтеза на различном расстоянии от точки инъекций жидких минеральных удобрений, а также структура урожая и качество зерна при внесении удобрений в рядок посева и междурядье.

Различие в междурядьях посевного комплекса (16 см) и ликвилайзера (25 см) позволили на посевах яровой пшеницы выделить участки с внесением жидких минеральных удобрений на различном расстоянии от точки инъекции: 0 см (в точке инъекции), 8,0 см, 9,5 см и 12,5 см), а также в середине рядка посева и середине междурядья (рис. 3).

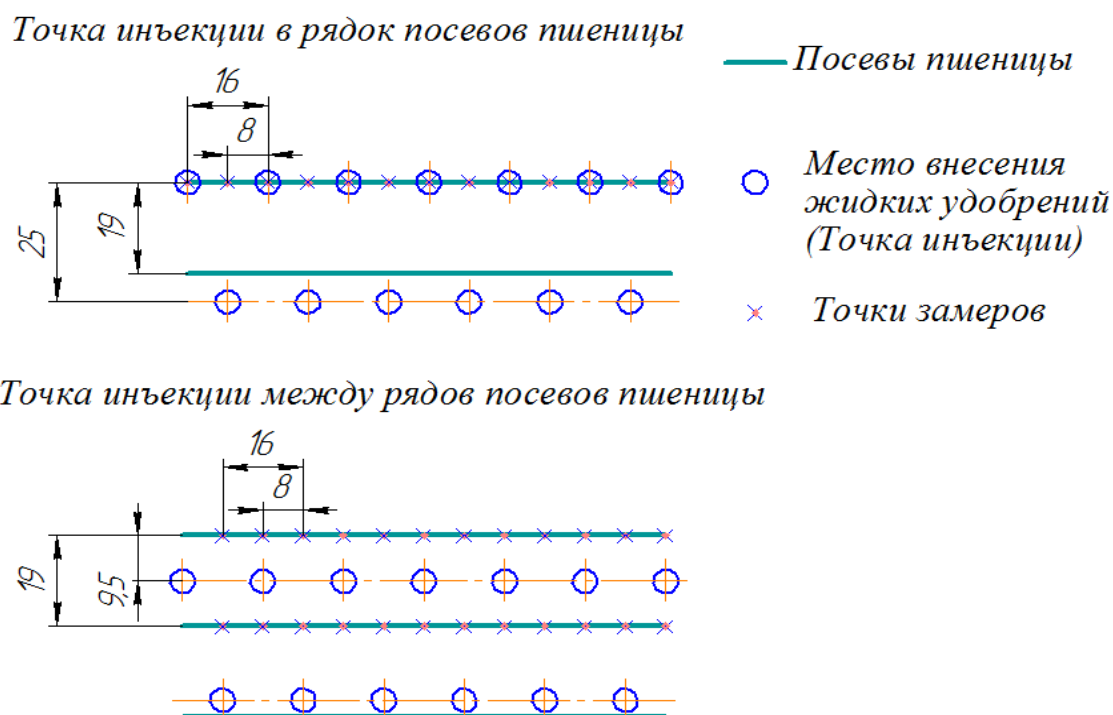


Рисунок 3 – Схема измерений растений

В опыте оценивались общая биомасса растений, количество продуктивных стеблей, масса зерна в колосе, количество зерен в колосе, масса 1000 зерен, высота растений, содержание клейковины и протеина в зерне пшеницы.

**В четвертом разделе «Результаты исследований»** представлены результаты проведения экспериментов и полученные на их основе зависимости.

В результате проведения первого опыта получены следующие значения среднего расхода топлива двигателя трактора при движении МТА на холостом ходу с разным уровнем заполнения емкости удобрениями (таблица 3).

Таблица 3 – Средний расход топлива двигателей тракторов при движении МТА на холостом ходу с различной скоростью и заполняемостью емкости удобрениями, кг/ч

Скорость движения, м/с	Состав агрегата и заполнение емкости удобрений, %					
	John Deere 8310R + «Алтай 12000»		Valtra T234 + «Duport»		John Deere 8430 + «Duport»	
	0 %	100 %	0 %	100 %	0 %	100 %
1,11	11,33	14,75	6,57	8,05	11,5	12,33
1,66	11,64	15,53	8,47	12,35	13,32	17,29
2,22	12,21	19,09	14,65	15,63	14,32	20,18

Обработка результатов эксперимента позволило получить обобщенное уравнение связи между расходом топлива на самопередвижение МТА, эксплуатационной массой агрегата и рабочей скоростью движения, аналогичное уравнению (4):

$$G_{\text{ТХХ}} = 0,28 + 0,463 \cdot V_{\text{п}} + 0,071 \cdot V_{\text{п}}^2 + 0,000288 \cdot M_{\text{МТА}}, \quad (10)$$

где  $V_{\text{п}}$  – скорость движения на перекачивание агрегата, м/с;  $M_{\text{МТА}}$  – масса МТА, кг.

Обобщенная поверхность отклика расхода топлива двигателя в зависимости от скорости движения и уровня заполнения ёмкости показана на рисунке 4.

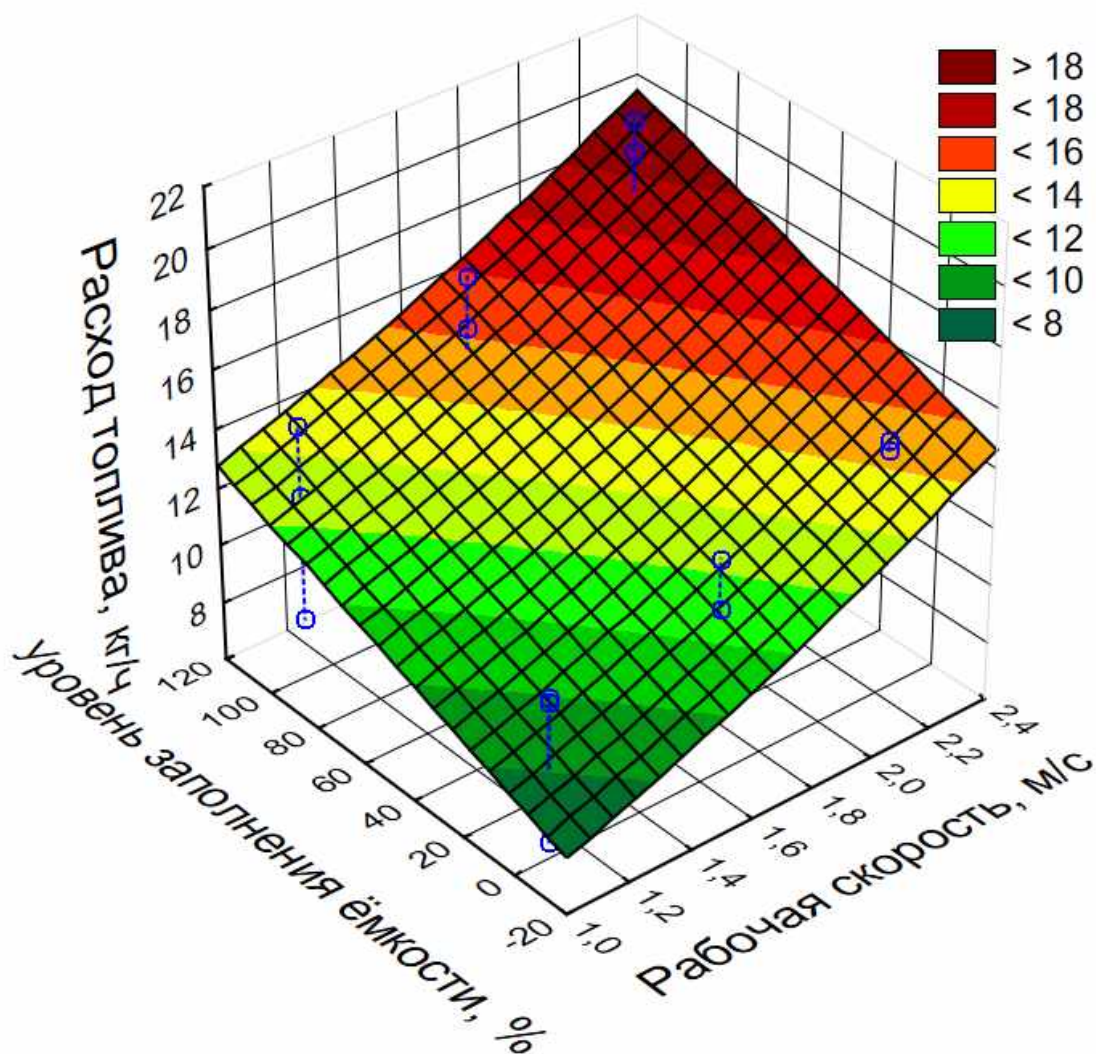


Рисунок 4 – Обобщенная поверхность отклика расхода топлива двигателя в зависимости от скорости движения и уровня заполнения ёмкости

Как показывает анализ, в среднем по испытываемым агрегатам увеличение загрузки емкости жидких удобрений с 0 % до 100 % приводит к пропорциональному увеличению расхода топлива двигателя в среднем на 3,0 кг/ч.

С увеличением рабочей скорости движения от 1,11 м/с до 2,22 м/с наблюдается увеличение расхода топлива двигателя в среднем на 5,3 кг/ч. Характер зависимости квадратичный.

На основе обработки экспериментальных данных второго эксперимента получены значения расхода топлива тракторных двигателей при различном уровне заполнения емкости удобрениями и различной влажности почвы при движении с постоянной скоростью (таблица 4).

Таблица 4 – Средний расход топлива двигателей тракторов при работе МТА с различным уровнем заполнения емкости удобрений, кг/ч

Уровень заполнения емкости удобрений	Состав агрегата, влажность почвы в слое 0-10 см		
	John Deere 8310R + «Алтай 12000» (14,1 %)	Valtra T234 + «Duport» (18,1 %)	John Deere 8430 + «Duport» (23,8%)
0	21,07	23,53	19,16
50%	21,47	23,61	20,29
100%	21,56	23,89	21,13

По результатам экспериментов было получено обобщенное уравнения для установления связи между влажностью поверхности почвы, эксплуатационной массой трактора и отношением массы трактора к машинно-тракторного агрегата в режиме рабочего хода:

$$G_{\text{тр}} = 20,55 - 0,82 \cdot W_{\text{п}} + 0,00126 \cdot M_{\text{э}} - 1,119 \cdot \frac{M_{\text{э}}}{M_{\text{МТА}}}, \quad (11)$$

где  $W_{\text{п}}$  – влажность почвы, %;

Коэффициент детерминации  $R^2=0,96$  указывает на высокую статистическую значимость уравнения.

Определив по выражению (3) расход топлива тракторного двигателя и используя выражение (6) определяется значение коэффициента загрузки двигателей трактора по расходу топлива. В результате регрессионного анализа получено уравнение вида (9), связывающее коэффициент загрузки тракторных двигателей по расходу с массой МТА и шириной захвата ликвилайзера:

$$k_i = (1,4882 - 0,0049 \cdot N_{\text{ен}}^i + 0,00206 \cdot M_{\text{МТА}}^i) \cdot \frac{B_i}{12}, \quad (12)$$

Зависимости коэффициента загрузки двигателей трактора по расходу топлива для МТА с различными параметрами показаны на рисунке 5.

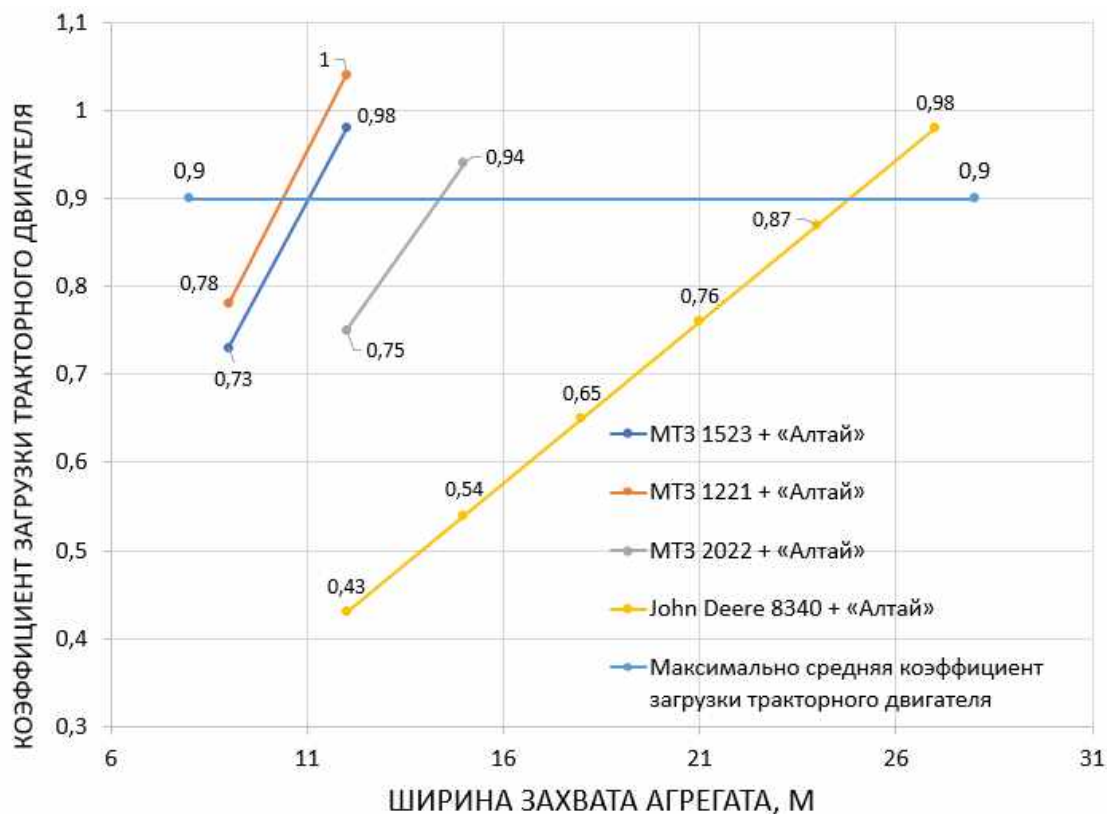


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента загрузки тракторного двигателя от ширины захвата ликвилайзера

Как показывает анализ, тракторы МТЗ-1523 и МТЗ-1221 целесообразно агрегатировать с ликвилайзером шириной захвата 9 м. При этом загрузка тракторных двигателей составит в среднем 0,73 и 0,78 соответственно. Эти варианты агрегатов можно считать рациональными, т.к. дальнейшее увеличение ширины захвата МТА до 12 м (с учетом ширины захвата секции 3 м) приведет к перегрузке тракторных двигателей.

Для трактора МТЗ-2022 рациональной является ширина захвата ликвилайзера 12 м, которая обеспечит среднюю загрузку двигателя равную 0,75. При увеличении ширины захвата до 15 м загрузка двигателя превысит среднюю допустимую и составит 0,94.

Трактор John Deere 8340 возможно агрегатировать с ликвилайзерами шириной захвата от 12 м до 24 м. При этом величина средней загрузки двигателя составит 0,43 – 0,87. Дальнейший рост ширины захвата до 27 м приведет к загрузке двигателя выше средней допустимой (0,90) и составит 0,98.

Итоговое выражение для определения рациональных параметров МТА в зависимости от мощности двигателя, массы трактора, массы и ширины захвата ликвилайзера имеет вид:

$$G_{\text{Т}}^i = \frac{N_{\text{EH}}^i}{\mathcal{E}_6} \cdot \left( 0,83 \cdot k_i + \frac{3,1}{M_3^i + M_{\text{СХМ}}^i} \right), R^2 = 0,88, \quad (13)$$

На основе реализованных полевых проведен сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований. Оценивались отклонения теоретических (по уравнению (13)) и экспериментальных данных расхода топлива тракторных двигателей при различной эксплуатационной массе испытываемых МТА.

Полученные теоретические зависимости расхода топлива МТА в зависимости от эксплуатационной массы приведены на рисунке 6.

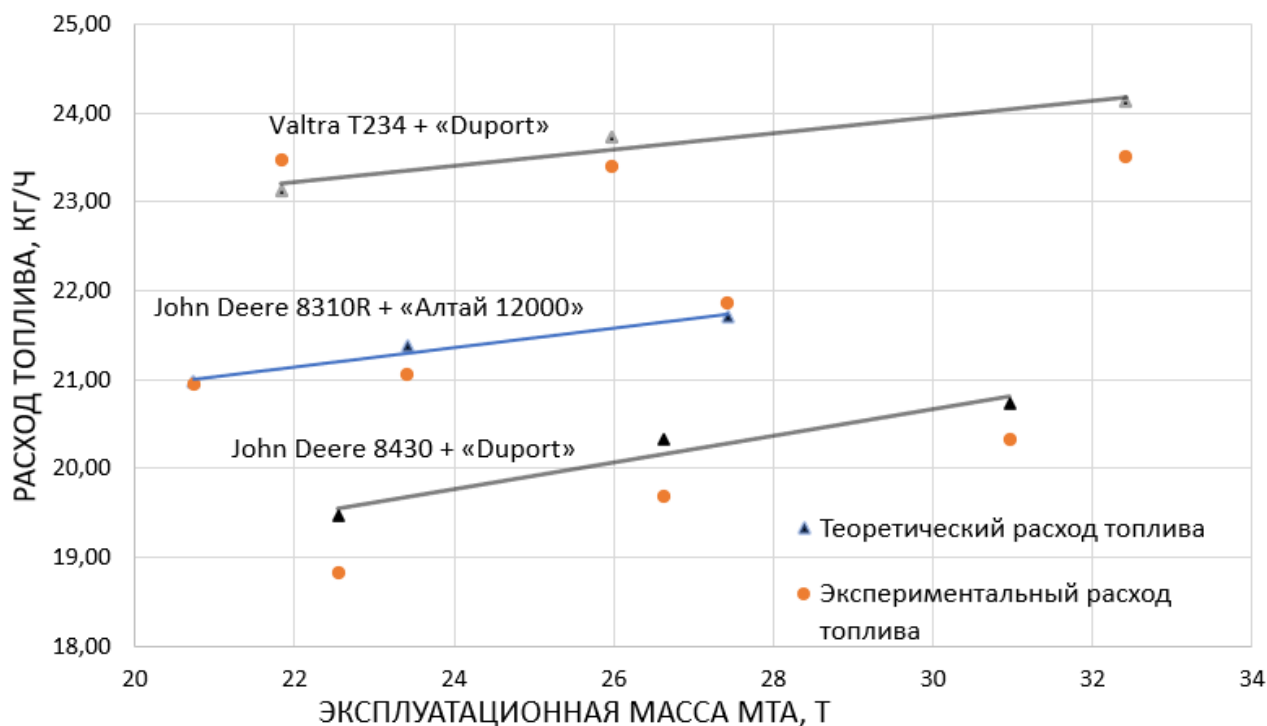


Рисунок 6 – Теоретический и экспериментальный расход топлива двигателя трактора в зависимости от эксплуатационной массы МТА

Отклонения результатов теоретических расчетов и опытных данных не превышают 3,2%.

Предложенная математическая модель позволяет с высокой степенью адекватности описывать взаимосвязь параметров МТА для внесения жидких минеральных удобрений и выполнять их оптимизацию.

В результате проведения опытов по выявлению влияния расстояния от точки инъекции жидких минеральных удобрений до растения яровой пшеницы на их развитие, формирование урожая и качество зерна установлено, что высота растений пшеницы существенно зависит от расстояния до точки инъекции жидких удобрений (рисунок 7а). Максимальная величина получена в точке инъекции. С увеличением расстояния до 8,0 см от точки инъекции средняя высота растений снижалась с 56,8 см до 53,2 см, а далее при расстояниях 9,5 см и 12,5 см до 50,2 см и 47,5 см соответственно.

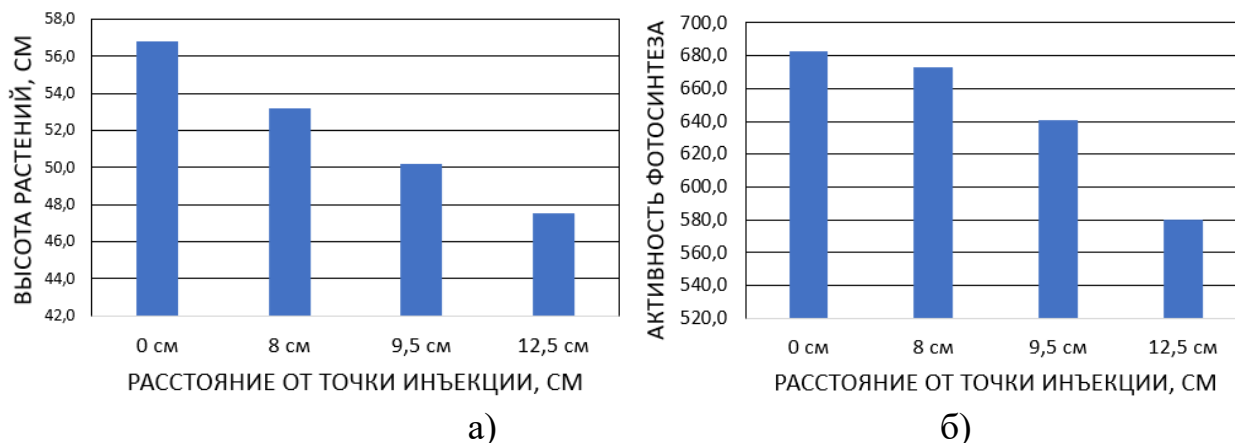


Рисунок 7 – Зависимость высоты растений (а) яровой пшеницы и активности фотосинтеза (б) от расстояния до точки инъекции жидких минеральных удобрений.

Активность фотосинтеза растений по мере удаления от точки инъекции существенно снижалась (рисунок 7б). Если в точке инъекции жидких удобрений активность фотосинтеза 683 ед., то на расстоянии 8 см от точки инъекции 673 ед., а при 9,5 см и 12,5 см 641 ед. и 580 ед. соответственно.

Таким образом, величина расстояния от точки инъекции жидких минеральных удобрений до растения пшеницы в значительной мере определяло их рост и развитие, а также активность фотосинтеза, выражающуюся в наращивании растительной массы.

При этом средние значения структуры урожая пшеницы при внесении удобрений в рядок посева и междурядье существенно различались. Так, количество продуктивных стеблей при внесении удобрений в рядок посева получено на 24,4 % выше, количество зерен в колосе на 7,4 %, массы 1000 зерен на 1,7 %. В результате масса зерна в колосе при внесении удобрений в рядок посева была выше на 10,2 %, а биологическая урожайность яровой пшеницы на 36,6 %.

**В пятой главе «Технико-экономическая оценка МТА для внесения жидких минеральных удобрений»** проведены экономические расчеты МТА с различными параметрами, обоснованы их рациональные составы. Оценка технико-экономических показателей результатов исследований проводилась в соответствии с ГОСТ 23728-88 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки»

Результаты расчёта выходных показателей работы МТА для внесения жидких минеральных удобрений были сведены в таблице 5.

Таблица 5 – Выходные показатели МТА для внесения жидких минеральных удобрений

№ п/п	Машинно-тракторный агрегат	Нен, кВт	Гга, кг/га	Wч, га/ч	Вр, м	Сэк, руб/га
1	МТЗ 1523 + «Алтай»	109	2,0	19,8	9	513,7
2	МТЗ 1221 + «Алтай»	96	2,0	19,8	9	504,3
3	МТЗ 2022 + «Алтай»	156	1,5	26,4	12	453,9
4	МТЗ 2022 + «Duport»	156	1,5	26,4	12	702,6
5	John Deere 8340 + «Алтай»	225	1,5	26,4	12	509,6
6	John Deere 8340 + «Алтай»	225	1,2	33,0	15	443,6
7	John Deere 8340 + «Алтай»	225	1,0	39,6	18	399,5
8	John Deere 8340 + «Алтай»	225	0,9	46,2	21	368,0
9	John Deere 8340 + «Алтай»	225	0,8	52,8	24	344,3
10	John Deere 8340 + «Duport»	225	1,5	26,4	12	758,4
11	John Deere 8340 + «Duport»	225	1,2	33,0	15	692,4
12	John Deere 8340 + «Duport»	225	1,0	39,6	18	648,3
13	John Deere 8340 + «Duport»	225	0,9	46,2	21	616,8
14	John Deere 8340 + «Duport»	225	0,8	52,8	24	593,0

Проведенный анализ показывает, что ликвилайзеры шириной захвата 9 м при агрегатировании с тракторами МТЗ-1523 и МТЗ-1221 с технологически заданной рабочей скоростью движения являются рациональными и обеспечат сопоставимые значения производительности и удельного расхода топлива (по площади) (19,8 кг/ч и 2,0 кг/га соответственно). При этом величина эксплуатационных затрат также различается несущественно (513,7 и 504,3 руб./га соответственно).

Увеличение рабочей ширины захвата ликвилайзера до 12,0 м возможно при агрегатировании с трактором МТЗ-2022. Это приводит к росту производительности и снижению погектарного расхода топлива до 26,4 га/ч и 1,5 кг/га. Величина эксплуатационных затрат на базе ликвилайзера алтайского производства составит 453,9 руб./га, а импортного производства – выше на 248,7 руб./га.

Агрегатирование трактора John Deere 8340 возможно осуществлять с ликвилайзерами отечественного и зарубежного производства шириной захвата от 9 м до 24 м. С ростом ширины захвата МТА увеличивается чистая производительность с 26,4 м<sup>2</sup>/с до 52,8 м<sup>2</sup>/с, а погектарный расход топлива снижается с 1,5 кг/га до 0,8 кг/га. Величина эксплуатационных затрат МТА на базе отечественного ликвилайзера находится в пределах 509,6 – 349,3 руб./га, а зарубежного 758,4-593,0 руб./га. Это указывает высокую эффективность импортозамещения агрегатами отечественного производства.

Как показал анализ, параметры трактора (эксплуатационная масса, мощность двигателя) и ликвилайзера (ширина захвата), существенно влияют на выходные показатели (производительность МТА, топливная экономичность, эксплуатационные

затраты). А с учетом того, что применение машин для внутрпочвенного внесения жидких минеральных удобрений позволяет значительно повысить урожайность культур, эффект от их внедрения будет гораздо более существенным.

## ВЫВОДЫ

1. На основе анализа конструкций агрегатов для внесения жидких минеральных удобрений установлено, что рациональными параметрами рабочих органов ликвилайзеров являются количество игл на колесе иньектора 12 штук; расстояние между колесами 0,25 м; глубина внесения жидких удобрений в почву 0,06 м; расстояние между иглами 0,12 м; диаметр колеса иньектора 0,53 м. В тоже время отсутствуют методики обоснования рациональных параметров МТА и их комплектования с учетом условий эксплуатации.

2. Разработана математическая модель, позволяющая определять рациональные параметры МТА для внутрпочвенного внесения жидких удобрений. Модель основана на определении расхода топлива тракторного двигателя в зависимости от мощности двигателя, массы трактора, массы и ширины захвата ликвилайзера с учетом коэффициента загрузки тракторного двигателя.

3. Проведенная энергетическая оценка агрегатов позволила определить численные значения расхода топлива тракторных двигателей в зависимости от параметров и режимов работы МТА в эксплуатации. Установлено, что увеличение влажности почвы в исследуемых пределах от 14,8 % до 23,7 % приводило к снижению расхода топлива на выполнение рабочего процесса в среднем на 0,82 кг/ч на каждый процент. При этом с ростом массы трактора расход топлива двигателя возрастает линейно на 1,26 кг/ч на каждую тонну увеличения массы. С увеличением же соотношения массы трактора и агрегата расход топлива снижается линейно.

4. При внесении жидких минеральных удобрений в рядок с семенами, в сравнении с внесением в междурядье, урожайность яровой пшеницы получена существенно выше (на 12,0 ц/га или 36,6 %). Поэтому, ширину междурядий ликвилайзера необходимо согласовывать с шириной междурядий посевных комплексов, а внесение жидких минеральных удобрений в почву проводить с использованием систем точного позиционирования в рядок посева.

5. Рациональное значение ширины захвата ликвилайзера для агрегатирования с тракторами МТЗ-1523 и МТЗ-1221 составляет 9 м. Величина эксплуатационных при этом сопоставима и составляет 513,7 и 504,3 руб./га.

Для агрегатирования с тракторами МТЗ-2022 и John Deere 8340 рациональной является ширина захвата 12 м и 24 м соответственно. При этом применение ликвилайзеров отечественного производства позволяет снизить величину эксплуатационных затрат с 702,6 руб./га до 459,3 руб./га и с 593,0 руб./га до 344,3 руб./га.

## **Рекомендации производству**

Предложен типоразмерный ряд ликвилайзеров с различной рабочей шириной захвата (9 м, 12 м, 15 м, 18 м, 21 м и 24 м) для агрегатирования с тракторами различных параметров. Рекомендовано производство ликвилайзеров с изменяющимся расстоянием между колесами инъекторами в соответствии с междурядьями выпускаемых промышленностью посевных комплексов. В сочетании с применением системы «автопилот» трактора, внесение жидких минеральных удобрений точно в рядки посева, существенно повысит эффективность использования удобрений и урожайность зерновых культур.

## **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении совмещения технологических операций за один проход посевного комплекса: посев с внесением гранулированных и жидких минеральных удобрений. При этом ширина междурядий посева и расстояний между колесами инъектора должны совпадать и обоснованы исходя из возделываемых культур и условий эксплуатации.

## **Список работ, опубликованных по теме диссертации:**

### **в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации**

1. Беляев В.И., Яковлев Д.А., Прокопчук Р.Е. Сравнительная энергооценка рабочих органов посевных машин для прямого посева в условиях различного увлажнения почв. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета.- 2020.-№ 6 (188).- С. 144-149.

2. Беляев В.И., Буксман В.Э., Прокопчук Р.Е. Мониторинг работы посевных комплексов Condor 15000 и Citan Z в Алтайском крае // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2021. - №4(198). - С. 100-109.

3. Беляев В.И., Прокопчук Р.Е., Буторов Н.А. Влияние режимов работы посевных агрегатов на качество посева, водный режим почвы и урожай яровой пшеницы // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2021. - №9 (203). - С. 114-119.

4. Прокопчук Р.Е., Беляев В.И. Энергооценка машинно-тракторных агрегатов для внутрпочвенного внесения жидких минеральных удобрений // Вестник АПК Верхневолжья. – 2021. -№3(55). – С 71-76.

### **Публикации по теме диссертации в других научных изданиях**

1.Беляев В.И., Соколова Л.В., Кузнецов В.Н., Прокопчук Р.Е. Влияние приемов обработки на агрегатный состав почвы в засушливой степи алтайского края // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов: в 2 кн. / XIII Международная научно-практическая конференция - 2018. - Кн. 2. - С. 244-246.

2. Прокопчук Р.Е., Беляев В.И., Щербинин В.В. Точная инъекция жидких минеральных удобрений. // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов: в 2 кн. / XVI Международная научно-практическая конференция (12-13 февраля 2021 г.). – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2021. –Кн. 2. – С. 11-13.

3. Беляев В.И. Сравнительная эффективность гранулированных и жидких минеральных удобрений при возделывании ячменя в алтайском крае/ Буксман В.Э., Прокопчук Р.Е., Соколова Л.В.// Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем: материалы национальной с международным участием научно-практической конференции, посвященной 70-летию юбилею инженерного факультета ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ / отв. ред. Ю.А. Ушаков. – Оренбург: ООО «Типография «Агентство Пресса»: 4 февраля 2021 г, – 9-14 с.