

*На правах рукописи*

*Д. Яковлев*

**Яковлев Даниил Александрович**

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОШНИКОВ ПРИ РАБОТЕ  
ПОСЕВНЫХ АГРЕГАТОВ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНОЙ  
ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ СТЕПНОЙ ЗОНЫ СИБИРИ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

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

Барнаул - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ).

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

Официальные оппоненты: **Раднаев Даба Нимаевич**, доктор технических наук, доцент кафедры «Механизация сельскохозяйственных процессов» ФГБОУ ВО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова»

**Кокошин Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технические системы в агропромышленном комплексе» ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»

Ведущая организация: ФГБНУ «Омский аграрный научный центр»

Защита диссертации состоится 26 мая 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.278.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробιοтехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН) по адресу: 630501, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск-1, СФНЦА РАН, а/я 463, телефон (факс): 8(383) 348-12-09; e-mail: aspsibime@ngs.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью вашего учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в Сибирской научной сельскохозяйственной библиотеке. Автореферат и диссертация размещены на сайтах: <https://sfscs.ru> и <https://vak.minobrнауки.gov.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Назаров Николай Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В регионах Сибири преобладает резко континентальный климат, который характеризуется длинной зимой и коротким летом. Поэтому растениям не всегда хватает времени на полную вегетацию, и чем раньше фермеры проведут посевную, тем больше вероятность получить хороший урожай. Необходимо отметить, что в течение посевной влажность почвы может значительно изменяться, что влияет на качество посева и приводит к изменениям тягового сопротивления агрегата и расхода топлива тракторного двигателя. Типы рабочих органов посевных агрегатов, в виду особенностей своей конструкции могут оказывать значительное влияние на тяговое сопротивление посевного агрегата и расход топлива тракторного двигателя. По данным Министерства сельского хозяйства (МСХ) Алтайского края, наибольшее распространение в хозяйствах получили сеялки и посевные комплексы с анкерными и лаповыми сошниками, обеспечивающие ресурсосберегающие технологии.

В связи с этим на сегодняшний день являются актуальными исследования, направленные на выбор рациональных, с точки зрения энергозатрат, типов сошников и рабочих скоростей движения посевных агрегатов в условиях различной влажности почвы по расходу топлива тракторного двигателя.

**Степень разработанности темы.** Значительный вклад в развитие вопросов взаимосвязи рабочих органов почвообрабатывающих орудий и физико-механических свойств почвы внесен исследователями таких учреждений как Башкирский ГАУ, Белгородский ГАУ, Бурятская ГСХА, ВИМ, Волгоградский ГАУ, ГАУ Северного Зауралья, Иркутский ГАУ, Кабардино-Балкарский ГАУ, Казанский ГАУ, Кубанский ГАУ, Кузбасская ГСХА, Курская ГСХА, КФУ им. В.И. Вернадского, МГАУ им. В.П. Горячкина, МСХА им. К.А. Тимирязева, Омский АНЦ, Омский ГАУ, Пензенский ГАУ, Саратовский ГАУ, СибИМЭ, Ставропольский ГАУ, Тверская ГСХА, Южно-Уральский ГАУ и других.

При всей значимости выполненных исследований на сегодняшний день остаются недостаточно изученными вопросы оптимизации параметров и режимов работы посевных агрегатов в условиях различной влажности почв.

**Объект исследования** – энергетический процесс посева зерновых культур в условиях различной влажности почв.

**Предмет исследования** – взаимосвязь расхода топлива, типа сошников, скоростных режимов работы посевного агрегата, качества посева со влажностью почвы.

**Цель исследования** – снижение энергетических затрат на выполнение посевных работ, за счет рационального выбора типа сошников и рабочих скоростей движения посевных агрегатов.

### **Задачи исследования:**

1. Обосновать взаимосвязь тягового сопротивления сошников и уровня влажности почвы.
2. Усовершенствовать математическую модель работы посевного агрегата в условиях различного уровня влажности почвы.
3. Обосновать рациональные параметры и режимы работы посевных агрегатов в условиях различного уровня влажности почвы, провести энергетическую и агротехническую оценку их работы.
4. Провести производственную проверку и оценить экономическую эффективность результатов исследования.

### **Научная новизна и теоретическая значимость:**

1. Зависимости для определения тягового сопротивления анкерного и лапового сошников с учётом уровня влажности почвы.
2. Усовершенствованная математическая модель посевного агрегата, позволяющая определять расход топлива тракторного двигателя в зависимости от уровня влажности почвы, выбранного типа сошника и рабочей скорости движения.
3. Аналитические зависимости расхода топлива тракторного двигателя от уровня влажности почвы, выбранного типа сошника и рабочей скорости движения посевного агрегата.

### **Практическая значимость:**

1. Способ посева зерновых культур и сошник для бороздкового посева семян, позволяющие обеспечить семена необходимой для их развития влажностью, новизна защищена патентом РФ на изобретение.
2. Рекомендации производству, позволяющие снизить расход топлива и соблюдать агротехнические требования при посеве за счет рационального выбора типов сошников и режимов работы посевных агрегатов в условиях различного уровня влажности почвы.

**Методология и методы исследования** базировались на требованиях действующих государственных стандартов ГОСТ 30745-2001 «Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей.», ГОСТ 31345-2007 «Сеялки тракторные. Методы испытания» и ГОСТ 24026-80 «Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения». Полученные экспериментальные данные обрабатывались при помощи математических и статистических методов с применением пакетов современных прикладных программ Microsoft Office, STATISTICA и MATLAB.

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

1. Зависимости тягового сопротивления анкерного и лапового сошников от уровня влажности почвы.
2. Усовершенствованная математическая модель посевного агрегата, позволяющая определять расход топлива тракторного двигателя в зависимости от уровня влажности почвы, выбранного типа сошника и рабочей скорости движения.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению расхода топлива тракторного двигателя посевного агрегата при работе в условиях различной влажности почвы.

**Степень достоверности и апробация работы.** Достоверность подтверждается корректностью применения математического аппарата при моделировании посевного агрегата, применением стандартных и разработанных автором частных методик проведения исследований с использованием поверенных приборов и оборудования, применением современных вычислительных средств статистической обработки и согласованностью результатов теоретических расчётов с экспериментальными данными.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры сельскохозяйственной техники и технологий, ученом совете инженерного факультета Алтайского ГАУ (2018 - 2021 гг.), региональной научно-практической конференции «Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования» в Новосибирском ГАУ (2016 г.), втором этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых МСХ России в Красноярском ГАУ (2015, 2016, 2018 гг.), третьем этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых МСХ России в РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева (2016 г.), седьмой научно-практической конференции Иркутского ГАУ с международным участием «Чтения И.П. Терских» (2017 г.), молодёжной инновационной конференции «Навигатор инноватора» ИЦ «СКОЛКОВО» (2017 г.), заседании научно-технического совета МСХ Иркутской области (2017 г.), седьмой Международной научно-практической конференции «Информационные технологии, системы и приборы в АПК» – АГРОИНФО – 2018 СибФТИ СФНЦА РАН (2018 г.), седьмой Международной научно-практической конференции Иркутского ГАУ «Климат, экология, Сельское хозяйство Евразии» (2019 г.).

**Реализация работы.** Результаты диссертационной работы внедрены в хозяйстве ООО КХ «Партнер» и на предприятии ООО «Агроцентр», используются в учебном процессе кафедры «Сельскохозяйственная техника и технологии» Алтайского ГАУ. Могут быть использованы в сельскохозяйственном машиностроении при создании новых или модернизации существующих орудий, проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по данной тематике.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, 5 публикаций из перечня ВАК, 1 публикация из международных баз данных, 7 публикаций в других изданиях. Получен патент РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, библиографического списка, включающего 196 источников, 17 из которых на английском языке, и 5-и приложений. Общий объем составляет 148 страниц машинописного текста, который включает 10 таблиц и 57 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель, объект и предмет исследования, научная гипотеза, научная новизна и теоретическая значимость, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследования»** рассмотрены особенности технологий возделывания зерновых культур в Алтайском крае. Установлена тенденция увеличения доли ресурсосберегающих технологий, которые применяются более чем на 50% посевных площадей. Проведен анализ работы сеялок для ресурсосберегающих технологий в условиях различной влажности почвы. Установлено, что наиболее распространенными типами сошников являются анкерный и лаповый. Исследован процесс взаимодействия сошников с почвой. При высокой и низкой влажности почвы повышается тяговое сопротивление сеялок, почва и растительные остатки сгуживаются перед сошниками и забивают основные их части, формируют недопустимую глыбистость и гребнистость, нарушая агротехнические требования. Различные типы сошников и скоростные режимы их работы отличаются величиной энергозатрат, что обуславливает различия в себестоимости производства зерна. Для регионов Сибири характерен короткий период вегетации растений, посев необходимо проводить как можно раньше и в короткие сроки. Необходимо отметить, что в течение посевной влажность почвы может значительно изменяться, что приводит к изменению тягового сопротивления посевных агрегатов. Вопросы взаимосвязи рабочих органов почвообрабатывающих орудий и физико-механических свойств почвы рассмотрены такими авторами как М.А. Адуов, Л.Ф. Бабицкий, П.У. Бахтин, А.Х. Габаев, А.А. Гафаров, В.П. Горячкин, Е.В. Демчук, М.Б. Ероков, В.А. Желиговский, А.Н. Зеленин, А. Зелинский, С.А. Ивженко, И.С. Имамов, А.Н. Карпенко, А.А. Кем, Н.А. Качинский, Ю.К. Киртбая, С.Н. Кокошин, А.С. Кушнарёв, Н.П. Ларюшин, А.И. Любимов, Н.И. Любушко, Г.О. Мазаев, Н.К. Мазитов, Е.М. Михальцов, С.Г. Мударисов, В.И. Мясенко, Н.Н. Назаров, Б.В. Нестерводский, И.П. Панов, Г.Н. Поляков, Е.В. Припоров, Д.Н. Раднаев, Г.Н. Синеоков, В.Н. Трубников, И.М. Фархутдинов, А.С. Фирсов, Х.Х. Шайдуллин, М.К. Шайхов, Н.В. Щучкин, А.Т. Яковенко, Н.С. Яковлев, Р.Е. Blackshaw, Y. Chen, M.J. Dwyer, K.N. Harker, R.L. Kushwaha, G.P. Lafond, K. Terzaghi и другими.

Машинно-тракторные агрегаты (МТА) могут работать в широком диапазоне скоростей движения. При этом скоростной режим движения оказывает влияние на величину тягового сопротивления. Влиянию скоростных режимов работы МТА на тяговое сопротивление посвящены работы таких авторов как В.И. Беляев, Н.Н. Бережнов, В.П. Горячкин, Н.И. Джабборов, С.А. Иофинов, Ю.К. Киртбая, В.В. Коцыгин, В.С. Красовских, А.Б. Лурье, Н.К. Мазитов, А.Я. Поляк, Н.И. Селиванов, Г.Н. Синеоков, В.В. Соколов, Д.А. Уханов и других.

При изменении тягового сопротивления посевных агрегатов, изменяется расход топлива тракторного двигателя. Поэтому важно определить наиболее

рациональные, с точки зрения энергозатрат, типы сошников и скоростные режимы работы посевных агрегатов при различном уровне влажности почвы.

Значительный вклад в развитие эксплуатации МТА внесли такие авторы как Л.Е. Агеев, В.П. Антипин, В.И. Беляев, Н.Н. Бережнов, Ю.Н. Блынский, Г.В. Веденяпин, Б.Д. Докин, М.Я. Дурманов, С.А. Иофинов, Н.Ф. Карпов, Ю.К. Киртбая, В.Ф. Коновалов, В.С. Красовских, А.Б. Лурье, А.Х. Морозов, В.П. Росляков, В.В. Соколов, В.И. Фортуна, К.А. Хафизов и другие.

В свою очередь, анализ данных работ показывает, что вопрос энергетической оценки агрегатов по расходу топлива тракторного двигателя в условиях различной влажности почвы, рассмотрен недостаточно полно, и суждения о данных зависимостях являются косвенно общепринятыми на основании смежных исследований в данной проблематике.

**Во второй главе «Теоретическое обоснование параметров и режимов работы посевных агрегатов»** на основании трудов К. Terzaghi гласящих, что скважность почвы служит показателем закона консолидации частиц и является обобщающим показателем всех вариантов изменения свойств почвы, а также полученных Б.В. Нестерводским зависимостей тягового сопротивления от скважности в третьей степени, были получены зависимости, позволяющие определять тяговое сопротивление анкерного и лапового сошников в зависимости от их геометрических параметров и уровня влажности почвы.

Скважность почвы описывается следующей зависимостью:

$$n = 1 - \frac{\gamma_b}{\gamma_y}, \quad (1)$$

где  $\gamma_b$  – объемный вес влажной почвы,  $\text{кН/м}^3$ ;  $\gamma_y$  – удельный вес твёрдой фазы,  $\text{кН/м}^3$ .

**Тяговое сопротивление сошников сеялки с учетом влажности почвы** определялось при помощи методов плоскостного и пространственного динамометрирования почвообрабатывающих машин, разработанных Г.Н. Синеоковым. В соответствии с этим, продольная слагающая сила тяги анкерного и лапового сошников  $P_x$  будет равна:

$$P_x = R_{3x} + R_{кx} + R_{Gx} + R_{Fx}, \quad (2)$$

где  $R_{3x}$  – сопротивление почвы сжатию затылком затупившегося лезвия,  $\text{кН}$ ;  $R_{кx}$  – сопротивление почвы деформации,  $\text{кН}$ ;  $R_{Gx}$  – статическое давление почвенного пласта,  $\text{кН}$ ;  $R_{Fx}$  – динамическое давление почвенного пласта,  $\text{кН}$ .

Уравнение силы сопротивления почвы сжатию затылком затупившегося лезвия для анкерного сошника с учётом влажности будет иметь вид:

$$R_3 = 0,5\gamma_b b h^2 n^3 (tg\varphi \cdot ctg\varepsilon_3 + 1), \quad (3)$$

где  $b$  – длина лезвия сошника,  $\text{м}$ ;  $h$  – высота затылочной фаски лезвия сошника,  $\text{м}$ ;  $n$  – скважность почвы;  $\varphi$  – угол трения почвы о сталь, град;  $\varepsilon_3$  – задний угол резания, град.

Сила сопротивления почвы деформации при работе анкерного и лапового сошников описывается в соответствии с уравнением В.П. Горячкина:

$$R_{кк} = kab, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент удельного сопротивления почвы с учётом влажности, кН/м<sup>2</sup>;  $ab$  – глубина и ширина обработки, м<sup>2</sup>.

Статическое и динамическое давление почвенного пласта с учётом влажности для анкерного сошника будет описываться выражениями:

$$R_{Gx} = ab\gamma_B n^3 tg(\beta + \varphi); \quad (5)$$

$$R_{Fx} = \frac{ab\gamma_B n^3}{g} v^2 \sin\beta tg(\beta + \varphi), \quad (6)$$

где  $l$  – длина рабочей поверхности сошника, м;  $v$  – скорость, с которой почва перемещается по поверхности клина, м/с;  $\beta$  – угол крошения почвы, град;

Сила сопротивления почвы сжатию затылком затупившегося лезвия лапового сошника складывается по аналогии с анкерным, но при учёте действия касательных и нормальных сил и будет описываться выражениями:

$$R_{3x} = N_3 [\sin \varepsilon_3 \sin \gamma + f(\cos \varepsilon_3 \sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma)]; \quad (7)$$

$$R_{3y} = N_3 [\sin \varepsilon_3 \cos \gamma - f \sin \gamma \cos \gamma (1 - \cos \varepsilon_3)]; \quad (8)$$

$$R_{3z} = -N_3 (\cos \varepsilon_3 - f \sin \gamma \sin \varepsilon_3), \quad (9)$$

где  $N_3 = \frac{\gamma_B h^2 b n^3}{2 \sin \varepsilon_3}$  – равнодействующая элементарных нормальных давлений почвы на затылке лезвия, кН; (10)

$\varepsilon_3$  – угол затылка лезвия, град;  $\gamma$  – угол скоса лезвия, град;  $f$  – коэффициент трения почвы о сталь с учётом влажности.

По аналогии и с уравнениями составляющей статического (5) и динамического (6) давлений пласта для анкерного сошника, получим следующие выражения для лапового сошника:

$$R_{Gx} = ab\gamma_B n^3 \frac{\sin \beta + f(\cos \gamma + \sin \gamma \cos \beta)}{\cos \beta - f \sin \gamma \sin \beta}, \quad (11)$$

$$R_{Fx} = \frac{ab\gamma_B n^3 v^2 \sin^2 \gamma [\sin \beta + f \sin \gamma (ctg^2 \gamma + \cos \beta)]}{g (ctg \beta - f \sin \gamma)}. \quad (12)$$

Сила сопротивления почвы деформации –  $R_{кк}$  лапового сошника описывается той же зависимостью (4), что и для анкерного сошника.

Таким образом, подставляя значения  $R_{3x}$ ,  $R_{кк}$ ,  $R_{Gx}$ ,  $R_{Fx}$  в выражение (2), получим величину тягового сопротивления анкерного и лапового сошников с учётом уровня влажности почвы.

**Зависимость тягового сопротивления сеялки и расхода топлива.** Поскольку вышеописанные зависимости позволяют определять тяговое сопротивление сошников по-отдельности, далее приведен алгоритм определения тягового сопротивления всей сеялки. Согласно конструктивно-технологической схемы сеялки, её полное тяговое сопротивление складывается:

$$P = P_n + P_c + P_k, \quad (13)$$

где  $P_n$  – сопротивление сеялки на перекатывание, кН;  $P_c$  – тяговое сопротивление сошников, кН;  $P_k$  – тяговое сопротивление прикатывающих катков, кН.



Сопротивление сеялки на перекатывание определяется:

$$P_n = G \cdot f, \quad (14)$$

где  $G$  – эксплуатационный вес сеялки, кН;  $f$  – коэффициент сопротивления движения почве.

Тяговое сопротивление сошника определяется следующей формулой:

$$P_{\text{сош}} = P_x + R_x. \quad (15)$$

где  $R_x$  – сопротивление стойки сошника, кН.

Суммарное сопротивление сошников сеялки определяется как:

$$P_c = P_{\text{сош}} \cdot n, \quad (16)$$

где  $P_{\text{сош}}$  – сопротивление одного сошника, кН;  $n$  – количество сошников.

В соответствии с теорией движения катка по поверхности почвы его сопротивление перекатыванию определяется формулой Грандвуане-Горячкина:

$$P_k = 0,86 \sqrt[3]{\frac{G^4}{q \cdot b \cdot D^2}}, \quad (17)$$

где  $G = m \cdot g$  – вес катка, кН;  $b, D$  – ширина и диаметр катка, м;  $q$  – коэффициент объемного смятия почвы с учётом влажности, кН/м<sup>3</sup>.

Многочисленными исследованиями подтверждается, что тяговое сопротивление агрегатов изменяется пропорционально расходу топлива.

Поскольку энергетическая оценка посевных агрегатов проводилась по расходу топлива тракторного двигателя, то необходимо обосновать переход от значений тягового сопротивления к значениям расхода топлива. Расход топлива тракторного двигателя, определяемый электронным блоком управления (ЭБУ) трактора оборудованного системой впрыска Common Rail при работе МТА в режиме определенной нагрузки, соответствует определенному значению крутящего момента, усилия и мощности на крюке.

Крюковое усилие определяется следующим выражением:

$$P_{\text{кр}} = P_k - P_f, \quad (18)$$

где  $P_k$  – касательная сила тяги, кН;  $P_f$  – сила сопротивления качению, кН.

Касательная сила тяги определяется выражением:

$$P_k = \frac{M_k \cdot i_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{тр}}}{r_k}, \quad (19)$$

где  $M_k$  – крутящий момент двигателя при крюковой мощности, Нм;  $i_{\text{тр}}$  – передаточное число трансмиссии, соответствующее значению выбранной передачи;  $\eta_{\text{тр}}$  – КПД трансмиссии;  $r_k$  – динамический радиус колеса, м.

Сила сопротивления качению:

$$P_f = f \cdot G_3, \quad (20)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления качению трактора;  $G_3$  – эксплуатационный вес трактора, кН.

Тяговую мощность определим выражением:

$$N_{кр} = P_{кр} \cdot V_p, \quad (21)$$

где  $P_{кр}$  – усилия на крюке, кН;  $V_p$  – рабочая скорость движения, м/с.

Рабочая скорость движения определяется как:

$$V_p = \left( \frac{r_k \cdot \omega_n}{i_{тр}} \right) \cdot (1 - \delta), \quad (22)$$

где  $\omega_n$  – угловая скорость коленчатого вала, с<sup>-1</sup>;  $\delta$  – буксование движителя.

Исходя из этого расход топлива будет определяться из выражения:

$$G_T = g_{кр} \cdot N_{кр}, \quad (23)$$

где  $g_{кр}$  – крюковой расход топлива, определяемый трактором, г/кВт·с;  $N_{кр}$  – мощность на крюке, кВт

**Математическая модель оптимизации параметров и режимов работы посевного агрегата для работы в условиях различной влажности почвы.** В качестве основного оценочного показателя работы посевного агрегата используется величина расхода топлива тракторного двигателя, определяющая уровень потребляемой мощности для заданного технологического процесса обработки почвы. Многочисленными результатами испытаний агрегатов установлено, что применительно к реальным условиям работы МТА расход топлива тракторного двигателя является функцией связи от ширины захвата агрегата, глубины обработки почвы и скорости движения. Уравнение аппроксимации имеет вид:

$$G_T = G_{Т0} + E_0 \cdot B_p \cdot h \cdot V^2, \quad (24)$$

где  $G_{Т0}$  – расход топлива на самопередвижение агрегата и потери в передаточных механизмах системы, г/с;  $E_0$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий влияние физико-механических свойств почвы, параметров трактора и типов рабочих органов орудий на интенсивность прироста расхода топлива двигателя;  $B_p$  – рабочая ширины захвата, м;  $h$  – глубина обработки, м;  $V$  – рабочая скорость движения, м/с.

Представленное уравнение аппроксимации достаточно адекватно описывает процесс изменения данной системы взаимодействия параметров и характеристик МТА. В свою очередь, нас интересовали только некоторые изменяемые характеристики при конкретных взаимодействиях на систему, в частности влажность почвы.

В ходе анализа теоретических расходов топлива при помощи уравнения (24), обусловленных четырьмя различными уровнями влажности почвы при помощи метода наименьших квадратов по алгоритму Левенберга-Марквардта, были найдены коэффициент пропорциональности  $E_0$  и расход топлива на самопередвижение  $G_{Т0}$  для посевных агрегатов, оборудованных анкерным и лаповым сошниками. Поскольку полученные свободные члены уравнения изменяются при изменении влажности почвы в диапазоне 15-30%, далее относительно принятого нами базового уровня влажности почвы 15%

были найдены значения их изменений для каждого уровня влажности почвы в диапазоне и обозначены коэффициентами  $K_W^{E_0}$  и  $K_W^{G_T}$ .

Для анкерного сошника уравнение связи коэффициента  $K_W^{G_T}$  имеет вид:

$$K_W^{G_T} = 2,2905 - 0,1269 \cdot W + 0,0029 \cdot W^2, R^2 = 0,81, \quad (25)$$

для лапового:

$$K_W^{G_T} = 4,4069 - 0,3416 \cdot W + 0,008 \cdot W^2, R^2 = 0,85. \quad (26)$$

Для анкерного сошника уравнение связи коэффициента  $K_W^{E_0}$  имеет вид:

$$K_W^{E_0} = 3,8732 - 0,2696 \cdot W + 0,0055 \cdot W^2, R^2 = 0,89, \quad (27)$$

для лапового:

$$K_W^{E_0} = 3,5893 - 0,2448 \cdot W + 0,005 \cdot W^2, R^2 = 0,99. \quad (28)$$

Где  $W$  – влажность почвы, %.

Данные зависимости позволяют определять величины коэффициентов при конкретном уровне влажности почвы в диапазоне 15-30%. Подставив коэффициенты  $K_W^{E_0}$  и  $K_W^{G_T}$  в уравнение (24), получим зависимость расхода топлива посевного агрегата от уровня влажности почвы:

$$G_T = K_W^{G_T} G_{T_0} + K_W^{E_0} E_0 \cdot B_p \cdot h \cdot V^2, \quad (29)$$

где  $K_W^{E_0}$  – коэффициент, учитывающий влияние влажности почвы, на интенсивность прироста расхода топлива двигателя при увеличении  $B_p$ ,  $h$ ,  $V$ ;

$K_W^{G_T}$  – коэффициент, учитывающий влияние влажности почвы, на интенсивность прироста расхода топлива двигателя при увеличении расхода топлива на самопередвижение агрегата.

Таким образом, предложено усовершенствование математической модели энергетической оценки посевного агрегата (24). В следствие чего полученная модель (29) позволяет выполнять обоснование параметров и режимов работы посевных агрегатов с анкерными и лаповыми сошниками по расходу топлива тракторного двигателя в диапазоне влажности почвы 15-30%.

**В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований»** представлена программа и методика проведения экспериментальных исследований. Опыт по определению расхода топлива был реализован в ООО КХ «Партнер» Михайловского района Алтайского края по стерневому фону, предшественник яровая пшеница, тип почв южный чернозём. Уклон плоскости, прилегающей поверхности фона в пределах габаритов трактора вдоль и поперёк движения составлял не более 2 и 6% соответственно. Комплектация трактора с учетом балласта и массы водителя соответствовала указанной в руководстве по эксплуатации для наиболее энергоёмкой по тяговому усилию операции, соответствующей назначению трактора. Нарботка трактора более 150 моточасов. Износ почвозацепов движителей по высоте не более 35%. Механизмы и оборудование, не передающие мощность движителям,

не участвующие в процессе работы агрегата были отключены. Посевной агрегат был сформирован на базе трактора New Holland T8.410 массой 11,3 т, номинальной мощностью двигателя 275 кВт и сеялки СТС 2,1 шириной захвата 2,1 м, массой 1,2 т, с анкерными и лаповыми сошниками (Рис. 1).



Рисунок 1 – Исследуемые анкерные (а) и лаповые (б) сошники

Длина гона составляла 460 м, полосы разгона между основными 100-метровыми участками составляли 15 м. Рабочая скорость движения агрегата задавалась механизатором из кабины трактора в диапазоне 4-10 км/ч, с шагом дискретизации 2 км/ч (Рис. 2). Измерение расхода топлива тракторного двигателя проводились на каждой скорости в пятнадцатикратной повторности. Опыт повторялся на четырёх уровнях влажности почвы (15, 20, 25, 30%) для агрегата с анкерными, а затем лаповыми сошниками.

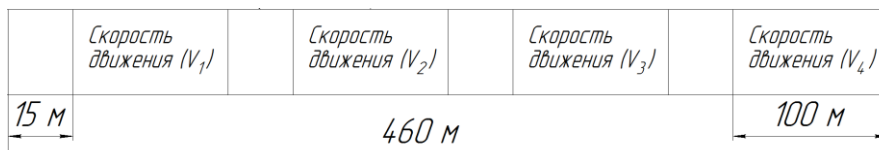


Рисунок 2 – Схема полевого опыта

Влажность почвы определялась с помощью электронного сенсорного влагомера НН-2 «Delta-T Devices», снабженного цифровым индикатором.

Скорость движения агрегата определялась как при помощи внутренней системы трактора путем расчетов ЭБУ и данных о местоположении трактора системой GPS/GLONASS, так и в соответствии с ГОСТ 30745-2001 «Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей».

Основным методом определения расхода топлива посевного агрегата являлся метод определения при помощи аккумуляторной топливоподающей системы дизельного двигателя Common Rail и ЭБУ трактора. Во избежание погрешностей при определении расхода топлива данный метод контролировался и сопоставлялся с классическими методиками государственных стандартов – ГОСТ 30745-2001 «Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей», которые включают в себя такие методы как массовый и объемный.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались при помощи методов регрессионного анализа с применением пакетов прикладных программ Microsoft Office, STATISTICA и MATLAB.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» приведены результаты экспериментальных исследований и проведен их анализ. Обработка результатов проведения энергетической оценки посевного агрегата методом регрессионного анализа позволила установить зависимость расхода топлива тракторного двигателя при работе посевного агрегата с анкерными сошниками от рабочей скорости движения и уровня влажности почвы, которая в раскодированном виде будет иметь следующий вид:

$$Gt = 10,298 + 0,346 \cdot V^2 + 0,0168 \cdot W^2 - 0,792 \cdot W. \quad (30)$$

Уравнение имеет высокую значимость ( $R^2 = 0,94$ ) и будет являться базовым для обоснования рациональных параметров посевного агрегата с анкерными сошниками при работе на различной влажности почвы.

Для посевного агрегата с лаповыми сошниками уравнение будет иметь следующий вид:

$$Gt = 14,204 + 0,422 \cdot V^2 + 0,025 \cdot W^2 - 1,171 \cdot W. \quad (31)$$

Уравнение также имеет высокую значимость ( $R^2 = 0,94$ ) и будет являться базовым для обоснования рациональных параметров посевного агрегата с лаповыми сошниками при работе на различной влажности почвы.



Рисунок 3 – Поверхности отклика расхода топлива в зависимости от влажности почвы и рабочей скорости движения посевного агрегата, оборудованного анкерными (а) и лаповыми (б) сошниками

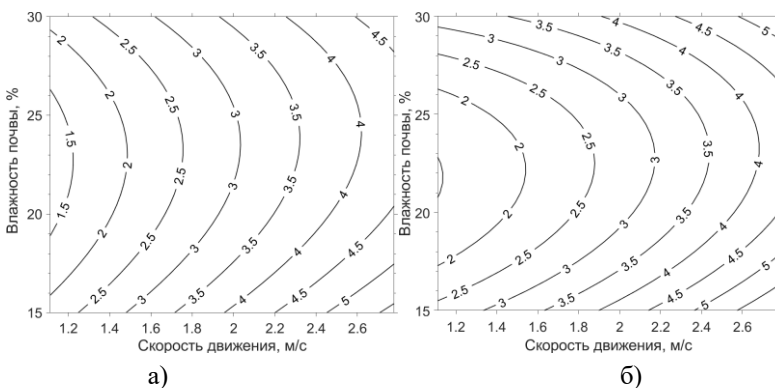


Рисунок 4 – Сечения поверхностей отклика расхода топлива в зависимости от влажности почвы и рабочей скорости движения посевного агрегата, оборудованного анкерными (а) и лаповыми (б) сошниками

Зависимость расхода топлива от рабочей скорости движения агрегатов является квадратичной со слабовыраженным характером, при повышении рабочей скорости движения расход топлива значительно возрастает. В свою очередь, зависимость расхода топлива от уровня влажности почвы также квадратичная, но имеет вид ярко выраженной параболы со сдвигом вдоль оси абсцисс. После нахождения экстремума функций (30) и (31) с двумя переменными установлено, что оптимальным значением уровня влажности почвы, при котором расход топлива будет минимальным, является 23,6% для посевного агрегата с анкерными сошниками и 23,4% с лаповыми. Данный факт говорит о том, что оптимумы данных функций практически совпадают, и средним оптимальным значением будет являться 23,5%. На основании многолетних данных установлено, что вариабельность влажности почвы в слое 0-10 см на полях отдельно взятого хозяйства в период посевной составляет 10-15%, в соответствии с этим, указываемый в дальнейшем диапазон влажности почвы 21-26% будет являться энергетически оптимальным. Данные поверхности отклика позволяют определять расход топлива посевного агрегата с лаповым или анкерным сошником в диапазоне рабочей скорости движения 1-3 м/с (4-10 км/ч) и влажности почвы 15-30% (Рис. 3 и 4).

**Сходимость теоретических и экспериментальных исследований.** Для проверки адекватности полученной математической модели работы посевного агрегата проведено сравнение теоретических и экспериментальных кривых, описывающих зависимость расхода топлива от уровня влажности почвы на скоростях движения. Максимальное расхождение относительно диапазона изменения расхода топлива тракторного двигателя при работе посевного агрегата, оборудованного анкерными либо лаповыми сошниками на рабочих скоростях движения 8 и 10 км/ч, не превышает 5%, что свидетельствует об адекватности усовершенствованной математической модели (Рис. 5).

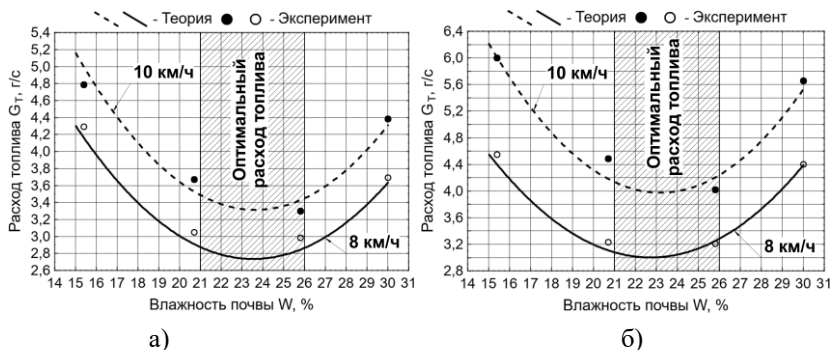


Рисунок 5 – Влияние влажности почвы на расход топлива посевного агрегата, оборудованного анкерными (а) и лаповыми (б) сошниками на рабочих скоростях движения 8 и 10 км/ч

С увеличением влажности почвы с 15 до 30%, расход топлива анкерного посевного агрегата изменяется в диапазоне 2,7-4,3 г/с при работе на рабочей скорости движения 8 км/ч и в диапазоне 3,3-5,1 г/с при 10 км/ч. В свою очередь, расход топлива лапового посевного агрегата изменяется в диапазоне 3-4,5 г/с при работе на рабочей скорости движения 8 км/ч и в диапазоне 4-6,2 г/с при 10 км/ч.

### Результаты проведения агротехнической оценки посевного агрегата.

Глубина заделки семян является одним из наиболее значимых агротехнических требований, оказывающих определяющее влияние на урожайность. Для оценки влияния типа сошника на агротехнические требования при работе посевных агрегатов в условиях различной влажности почвы был проведен анализ стандартных отклонений от глубины заделки семян (Рис. 6).

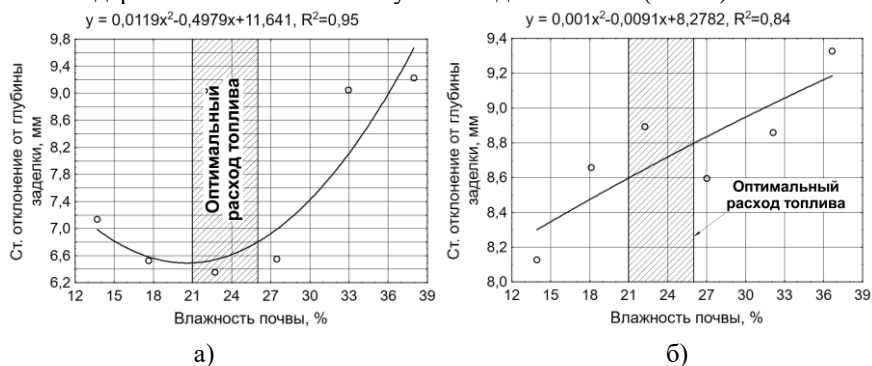


Рисунок 6 – Зависимость стандартных отклонений от глубины заделки от влажности почвы после посева анкерными (а) и лаповыми (б) сошниками

При сравнении агротехники двух типов сошника отмечено, что после посева агрегатами, оборудованными анкерными сошниками отклонения от глубины заделки изменялись от 6 до 10 мм. После посева агрегатами, оборудованными лаповыми сошниками, изменялись от 8 до 9,5 мм. Значение уровня влажности почвы, при котором лучше всего соблюдается заданная глубина заделки после посева анкерными сошниками составляет 21% и попадает в энергетически оптимальный диапазон. В случае с лаповыми сошниками такое значение отсутствует, поскольку зависимость глубины заделки от влажности почвы близка к линейной. Следует отметить, что все отклонения от глубины заделки после посева данными сошниками находятся в допустимых пределах изменений агротехнических требований  $\pm 10$  мм.

**В пятой главе «Определение технико-экономических показателей посева агрегата»** на основании результатов экспериментов были подобраны рациональные составы посевных агрегатов с анкерными и лаповыми сошниками. Наименьшая производительность (8,37 га/ч) и высокие эксплуатационные затраты (2858,7 руб./га) наблюдаются при анализе агрегата с лаповым посевным комплексом при рабочей ширине захвата 9,3 метра, наибольшая производительность (9,47 га/ч) и низкие эксплуатационные затраты (2362,6 руб./га) наблюдаются при анализе агрегата с анкерным посевным комплексом при рабочей ширине захвата 9,5 метра. Для возможности взаимозаменяемости посевных комплексов по типу сошника при изменении влажности почвы в период посевной были предложены варианты комплектования агрегатов. Стоимость двух посевных комплексов с разными типами сошников (анкерный и лаповый) будет составлять 11,2 млн. рублей. Стоимость одного комплекса и комплекта переоборудования взаимозаменяемых сошников (анкерный и лаповый) 6,1 млн. рублей. Переоборудование одного уже имеющегося у предприятия комплекса будет составлять 571 тыс. рублей, что будет наиболее выгодным вариантом инвестиционных затрат. Методика обоснования рациональных параметров посевных агрегатов позволила повысить их производительность на 6-11%, а также снизить величину погектарного расхода топлива на 4-9%. При работе посевных агрегатов с любым типом сошника на оптимальном уровне влажности почвы, экономия дизельного топлива за посевную на один агрегат составляет 0,8 тонн или 49724 рубля.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Анализ технологий возделывания зерновых культур в Алтайском крае показывает, что наблюдается тенденция увеличения доли ресурсосберегающих технологий. В настоящее время технологии прямого посева применяется более чем на 50% посевных площадей. Наиболее распространенными типами сошников сеялок в степной зоне края являются анкерный и лаповый.

2. Полученные теоретические зависимости, позволяют определять тяговое сопротивление анкерного и лапового сошников в зависимости от их геометрических параметров и уровня влажности почвы.



3. Обоснована взаимосвязь тягового сопротивления и расхода топлива тракторного двигателя. Приведен алгоритм расчёта тягового сопротивления в конкретный момент работы посевного агрегата, при наличии данных о расходе топлива тракторного двигателя в этот момент, что позволяет оценивать усилие, затрачиваемое на работу МТА, по известным значениям расхода топлива и упрощает процесс энергетической оценки.

4. Усовершенствованная математическая модель энергетической оценки посевных агрегатов позволяет обосновывать параметры и режимы их работы в условиях различной влажности почвы (15-30%) по расходу топлива.

5. Получены значения коэффициентов, учитывающие влияние влажности почвы на интенсивность прироста расхода топлива тракторного двигателя для агрегатов с лаповыми и анкерными сошниками (0,59-1,00 и 0,49-1,00 соответственно). А также коэффициенты, учитывающие прирост расхода топлива на самопередвижение агрегатов (0,77-1,41 и 0,78-1,08 соответственно).

6. Установлено, что влажность почвы, тип сошника посевного агрегата и его рабочая скорость движения являются высоко значимыми факторами, определяющими рациональные составы посевных агрегатов. Энергетически оптимальным уровнем влажности почвы при работе посевного агрегата с анкерными сошниками является 23,6%, с лаповыми – 23,4%. Величина расхода топлива двигателя трактора при работе в составе посевного агрегата, оборудованного анкерными сошниками на 3-5% ниже, чем с лаповыми.

7. Установлено, что после посева агрегатами, оборудованными анкерными сошниками в диапазоне влажности почвы 12-39 % отклонения от глубины заделки изменялись от 6 до 10 мм. После посева агрегатами, оборудованными лаповыми сошниками в диапазоне влажности почвы 12-36%, отклонения от глубины заделки изменялись от 8 до 9,5 мм. Исходя из этого следует, что все отклонения от глубины заделки после посева данными сошниками находятся в допустимых пределах изменений агротехнических требований, которые составляют  $\pm 10$  мм. В соответствии с тем, что вариабельность влажности почвы в слое 0-10 см на полях отдельно взятого хозяйства в период посевной составляет 10-15%, а средним энергетически оптимальным уровнем влажности почвы, при котором расход топлива тракторных двигателей посевных агрегатов с анкерными и лаповыми сошниками будет минимальным, является 23,5%, определен оптимальный диапазон влажности почвы 21-26%. Значение уровня влажности почвы, при котором лучше всего соблюдается заданная глубина заделки после посева анкерными сошниками составляет 21% и попадает в энергетически оптимальный диапазон. В случае с лаповыми сошниками такое значение отсутствует, поскольку зависимость глубины заделки от влажности почвы близка к линейной.

8. Определено, что наибольшая производительность (9,47 га/ч) и низкие эксплуатационные затраты (2362,6 руб./га) получены при агрегатировании трактора с посевным комплексом анкерного типа шириной захвата 9,5 м. Для возможности взаимозаменяемости посевных комплексов по типу сошника

при изменении влажности почвы в период посевной, были предложены варианты комплектования агрегатов. Стоимость двух посевных комплексов с разными типами сошников (анкерный и лаповый) будет составлять 11,2 млн. рублей. Стоимость одного комплекса и комплекта переоборудования взаимозаменяемых сошников (анкерный и лаповый) 6,1 млн. рублей. Переоборудование одного уже имеющегося у предприятия комплекса будет составлять 571 тыс. рублей, что будет наиболее выгодным вариантом инвестиционных затрат. Внедренная в ООО КХ «Партнер» и ООО «Агроцентр» методика обоснования рациональных параметров и скоростных режимов работы посевных агрегатов при эксплуатации в диапазоне влажности почвы 15-30% позволяет повысить производительность посевных агрегатов на 6-11%, снизить величину погектарного расхода топлива на 4-9%. При работе посевных агрегатов с любым типом сошника в оптимальном уровне влажности почвы, экономия топлива на один агрегат составляет 0,8 тонн или 49724 рубля за посевную.

### **Рекомендации производству**

На основании результатов исследований были разработаны рекомендации производству, направленные на повышение эффективности посева зерновых культур в условиях различной влажности почвы (15-30%):

1. Необходимо приобретать сеялки и посевные комплексы на основании объективной оценки опыта реальной эксплуатации в условиях функционирования максимально приближенных к тем, где будет работать данное орудие.

2. Энергетически оптимальный уровень влажности почвы при работе сеялок с анкерными сошниками составляет 23,6%, с лаповыми 23,4%.

3. В период посевной почва зачастую не достигает физической спелости, поэтому лаповые и дисковые сошники не могут работать эффективно в данных условиях, поскольку на них налипают почва и возрастает тяговое сопротивление, в следствие чего повышается расход топлива и снижается качество посева. Поэтому, предприятиям рекомендуется иметь в наличии сеялки и комплексы с анкерными сошниками, благодаря меньшей площади сопротивления данные рабочие органы испытывают меньшее тяговое сопротивление и позволяют продолжать посев в условиях повышенной влажности почвы. Мелким и средним предприятиям, которые не всегда могут иметь несколько и более сеялок или комплексов с различным типом сошника, рекомендуется приобретать комплекты переоборудования с одного типа на другой.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Перспективой дальнейшей разработки темы являются исследования, направленные на оптимизацию параметров и режимов работы посевных агрегатов различной ширины захвата, с различными рабочими органами при агрегатировании тракторами разной мощности с учетом различных почвенно-климатических условий.

## Основные положения диссертации опубликованы в работах:

### *Публикации из перечня рецензируемых научных изданий ВАК*

1. Яковлев Д.А. Обоснование рациональных параметров сошниковой группы сеялки СЗС-2.1 для прямого посева / Д.А. Яковлев, В.И. Беляев, Г.Н. Поляков // Вестник алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 9 (179). – С. 131-135.

2. Яковлев Д.А. Сравнительная энергооценка рабочих органов посевных машин для прямого посева в условиях различного увлажнения почв / Д.А. Яковлев, В.И. Беляев, Р.Е. Прокопчук // Вестник алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 6 (188). – С. 144-150.

3. Беляев В.И. Сравнительная технико-экономическая оценка посевных агрегатов точного высева на базе тракторов «Кировец» / В.И. Беляев, Р.Н. Бачурин, **Д.А. Яковлев** // Вестник алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 8 (190). – С. 115-118.

4. Яковлев Д.А. Энергооценка работы посевных агрегатов в условиях различного увлажнения почв / Д.А. Яковлев, В.И. Беляев // Вестник НГИЭИ. – 2021. – № 9 (124). – С. 18-27.

5. Яковлев Д.А. Теоретическое обоснование параметров и режимов работы посевных агрегатов в условиях различного увлажнения почв / Д.А. Яковлев, В.И. Беляев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета. – 2021. – Т.13. – № 3. – С. 128-134.

### *Публикации из международных реферативных баз данных*

6. Belyaev V.I. The influence of the sowing coulters type on the seeding quality and the spring wheat yield / V.I. Belyaev, V.V. Vol'nov, **D.A. Iakovlev** and others. – DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899X/941/1/012042> // IOP conference series: materials science and engineering. – 2020. – Vol. 941

### *Патенты Российской Федерации*

7. Патент на изобретение № 2758720, МПК А01С 7/00 (2006.01), А01С 7/20 (2006.01). Способ посева зерновых культур и сошник для бороздкового посева семян / Д.А. Яковлев; заявитель и патентообладатель Д.А. Яковлев. – № 2021102163; заявл. 29.01.2021; опубл. 01.11.2021, бюл. № 31.

### *Публикации в других изданиях*

8. Поляков Г.Н. Выбор и обоснование сошников посевных машин / Г.Н. Поляков, **Д.А. Яковлев** // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2016. – № 20. – С. 43-49.

9. Майнель Т. Влияние комплексов машин для прямого посева яровой пшеницы на развитие растений, водный режим почвы, структуру урожая и качество зерна в Кулундинской степи Алтайского края / Т. Майнель, В.И. Беляев, **Д.А. Яковлев** // Вестник алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 9 (167). – С. 138-145.

10. Яковлев Д.А. Рациональное комплектование посевных машин рабочими органами для условий повышенного увлажнения почв / Д.А. Яковлев В.И. Беляев, Г.Н. Поляков // Информационные технологии, системы и приемы в АПК: матер. 7-ой междунар. науч. – практ. конф. – Новосибирск-Краснообск: СибФТИ, 2018. – С. 497-500.

11. Яковлев Д.А. Показатели качества посева яровой пшеницы при различных технологиях возделывания в Кулундинской степи Алтайского края / Д.А. Яковлев, В.И. Беляев, Т. Майнель // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: матер. 10-ой рег. науч. – практ. конф. студ., аспирант. и мол. уч., памяти доцента М.А. Анфиногенова. – Новосибирск: НГАУ, 2018. – С. 340-347.

12. Беляев В.И. Оценка тяговых энергозатрат посевного комплекса «Кузбасс» при различных скоростях движения / В. И. Беляев, Д. А. Яковлев // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сбор. мат. 14-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Барнаул: Алтайский ГАУ, 2019. – № 2. – С. 12-15.

13. Поляков Г.Н. Распределение семян по глубине при посеве различными типами сошников / Г.Н. Поляков, С.Н. Шуханов, Д.А. Яковлев // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2019. – № 31. – С. 13-22.

14. Беляев В.И. Перспективы применения технологий прямого посева в Алтайском крае / В.И. Беляев, А.А. Хижников, Д. А. Яковлев // Аграрная наука - сельскому хозяйству: сбор. матер. 15-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Барнаул: Алтайский ГАУ, 2020. – № 2. – С. 14-16.

Издательская лицензия ЛР 020261 от 14.01.1997.

Подписано в печать \_\_.\_\_.2022.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Усл.-печ. л. 1,16. Тираж 125. Заказ \_\_.

Типография Алтайского государственного университета:  
656049, Барнаул, ул. Димитрова, 66