

DOI
УДК 631.372

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПРИЦЕПНОГО ОПРЫСКИВАТЕЛЯ ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ УРОЖАЯ**
А. А. Нурмиев, Р. Н. Хафизов, К. А. Хафизов, Н. Р. Залаков, И. И. Максимов

Реферат. Исследования проводили с целью оптимизация параметров прицепного опрыскивателя для снижения суммарных энергетических затрат при его работе, с учетом возможных потерь урожая. Вычислительные эксперименты проводил с использованием системной энергетической математической модели опрыскивателей на базе трактора МТЗ-80, 82. Рассматриваемая система включает подсистемы – трактор, оператор, опрыскиватель, поле, почва и урожай (ТООППУ). В качестве критерия оптимизации параметров опрыскивателя приняты суммарные энергетические затраты, включающие, кроме прямых и косвенных энергетических затрат, энергию урожая, теряемого при неверном выборе параметров опрыскивателя. Схема вычислительных экспериментов предусматривала шести параметрическую оптимизацию параметров агрегата для заданных условий его работы. Для принятых условий работы опрыскивателя (площадь поля $F_{\text{поля}}=60$ га; длина гона $l_{\text{гона}}=0,8$ км; расстояние переезда $l_{\text{пер}}=3$ км; коэффициент прочности несущей поверхности поля $Q_1=0,9$; объем работы $Q=1000$ га; культура – яровая пшеница; число сорняков – 50 шт./м²; число тракторов, занятых на операции $N_{\text{тракт}}=1$ шт.; продолжительность рабочего дня $T_{\text{днев}}=14$ ч; планируемая урожайность $Y_P=40$ ц/га; норма внесения ядохимикатов $N_3=150$ л/га; давление насоса $P_{\text{насоса}}=3$ МПа; давление воздуха в шинах $P_w=0,16$ МПа; число колес на одном борту моста $Z_k=1$ шт; коэффициент сцепления колес с почвой $K_{\text{сцеп}}=0,6$; коэффициент сопротивления перекатыванию колес $f_{\text{перек}}=0,1$; плотность почвы $\rho_z=1300$ кг/м³; твердость почвы $N=1800000$ Па) выявлено наличие сочетания значений шести параметров, когда суммарные энергетические затраты достигают минимума. Оптимальная ширина захвата составляет 32 м, скорость – 10 км/ч, диаметр колеса – 2 м, объем бака для ядохимикатов – 5000 л, ширина профиля шины колеса опрыскивателя – 0,2 м, коэффициент распределения веса опрыскивателя на его опорные колеса – 0,83. При повороте агрегата в пределах поля суммарные энергетические затраты составили 4852,9 МДж/га. При тех же значениях оптимальных параметров опрыскивателя поворот агрегата за пределами поля привел к трехкратному снижению суммарных энергетических затрат до 1365,4 МДж/га. Широко используемые частные показатели эффективности работы опрыскивателей – производительность, расход топлива на единицу обработанной площади не позволяют выявлять пути снижения потерь урожая.

Ключевые слова: машинно-тракторный агрегат, опрыскиватель, вычислительный эксперимент, энергозатраты, потери урожайности, оптимизация параметров, критерий оптимизации.

Введение. Возрастающие антропогенные энергетические затраты при производстве растениеводческой продукции [1, 2] привели к разработке и использованию в производстве так называемых энергосберегающих технологий возделывания сельскохозяйственных культур [3, 4, 5]. Их особенность заключается в широком использовании химических средств борьбы с вредителями культурных растений и сорняками, хотя бы впервые 5...6 лет [6, 7]. В сочетании с распространением практики применения различных биопрепаратов и стимуляторов роста и развития растений это вызвало формирование устойчивой мировой тенденции расширения использования агрегатов для опрыскивания культур их растворами [8, 9]. Особенность этой технологической операции – обработка посевов в период вегетации растений, что ведет к уничтожению определенной их части, а значит к потерям урожайности [10, 11].

Среди научных публикациях достаточно часто встречаются работы, посвященные повышению эффективности конструкции опрыскивателей, а также увеличению эффективности их эксплуатации [12, 13, 14]. В основном в них решаются вопросы, связанные с ростом производительности опрыскивателей, снижением прямых энергетических или финансовых

затрат [15, 16]. Известны результаты исследований, посвященных улучшению конструкции опрыскивателей, повышению надежности и качества их работы, автоматизации и роботизации этой технологической операции, особенно при работе с вредными для человека соединениями [17, 18, 19]. Однако исследований, в которых работу опрыскивателей рассматривают системно, с учетом негативного влияния таких агрегатов на формируемый урожай культурных растений недостаточно [20, 21, 22].

Цель наших исследований – оптимизация параметров прицепных опрыскивателей с учетом их негативного влияния на урожайность зерновых культур на примере яровой пшеницы.

Условия, материалы и методы. Для поиска путей повышения эффективности эксплуатации прицепных опрыскивателей, в том числе путем снижения потерь урожая, использовали метод вычислительных экспериментов на основе энергетической математической модели соответствующих машинно-тракторных агрегатов [23, 24, 25]. Критерием оптимальности принимаемых решений служила величина показателя суммарные энергетические затраты [26, 27, 28], который кроме прямых энергетических затрат

машинно-тракторного агрегата, учитывает и косвенные, в том числе энергию урожая, теряемого из-за принятия неверных решений по определению параметров опрыскивателя с учетом условий его работы. Вычислительные эксперименты проводили с использованием программ в системе компьютерной математики МАТЛАБ на примере работы опрыскивателя с трактором типа МТЗ-82. Конструкционная схема опрыскивателя – прицепной, одноосный с такими изменяемыми параметрами как ширина захвата, рабочая скорость, диаметр колеса, ширина профиля шины, объема резервуара для ядохимиката, коэффициент распределения веса на опорные колеса, длина дышла и др. Сравнивали организацию работ по защите растений с поворотом агрегата на посеянном поле и за его пределами. Поворот – в конце гона круговой.

Исходные данные для вычислительного эксперимента:

площадь поля $F_{\text{поля}}=60$ га;
 длина гона $l_{\text{гона}}=0,8$ км;
 расстояние переезда $l_{\text{пер}}=3$ км;
 коэффициент прочности несущей поверхности поля $Q_1=0,9$;
 объем работы $Q=1000$ га;
 культура – яровая пшеница;
 число сорняков – 50 шт./м²;
 число тракторов, занятых на операции $N_{\text{тракт}}=1$ шт.;
 продолжительность рабочего дня $T_{\text{дnev}}=14$ ч;
 планируемая урожайность $УР=40$ ц/га;
 норма внесения ядохимикатов $НЗ=150$ л/га;

давление насоса $P_{\text{насоса}}=3$ МПа;
 давление воздуха в шинах $P_w=0,16$ МПа;
 число колес на одном борту моста $Z_k=1$ шт;
 коэффициент сцепления колес с почвой $K_{\text{сцеп}}=0,6$;
 коэффициент сопротивления перекачиванию колес $f_{\text{перек}}=0,1$;
 плотность почвы $\rho_z=1300$ кг/м³;
 твердость почвы $H=1800000$ Па.

Результаты и обсуждение. На первом этапе в ходе вычислительных экспериментов выявляли влияние параметров опрыскивателя на выбранный критерий оптимизации и другие общепринятые показатели эффективности работы МТА (производительность, расход топлива и др.), отдельно определяли величину потерь урожайности для заданного сочетания условий работы.

Расчеты в эксперименте с поворотом внутри поля дали следующие результаты:

оптимальная ширина захвата опрыскивателя $B_{\text{opt}}=32$ м;
 оптимальная скорость агрегата $V_{\text{opt}}=10$ км/ч;
 оптимальный объем бака опрыскивателя $V_{\text{емкopt}}=5000$ л;
 оптимальный диаметр колеса опрыскивателя $D_k=2,032$ м;
 оптимальная ширина шины колеса опрыскивателя $B_{\text{dvigit}}=0,2$ м;
 оптимальный коэффициент распределения веса опрыскивателя на его колеса $\lambda_{\text{ц.т. opt}}=0,83$.

Минимальные суммарные энергетические затраты при оптимальных параметрах опрыскивателя $E_{\text{min}}=4852,9$ МДж/га.

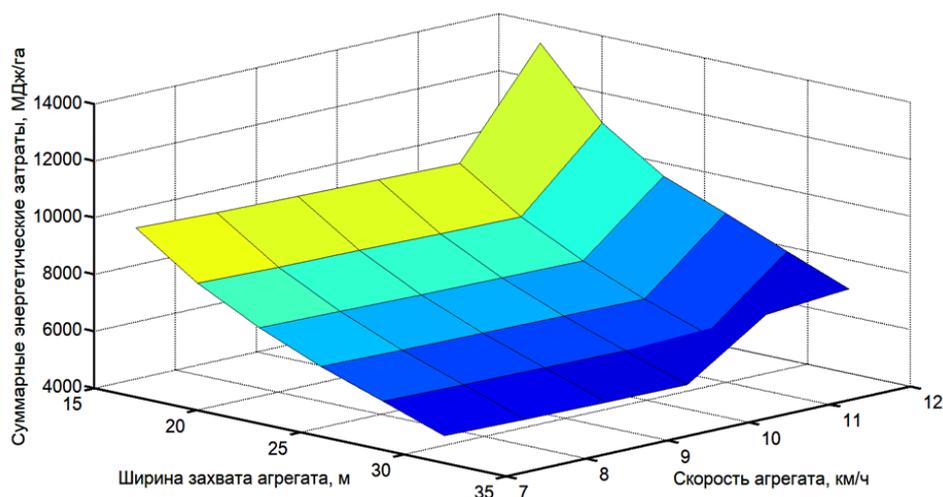


Рис. 1 – Изменение суммарных энергетических затрат при работе опрыскивателя от ширины его захвата и рабочей скорости агрегата

Анализ графического представления влияния параметров опрыскивателя на эффективность его работы показал, что на величину суммарных энергетических затрат большое влияние оказывает ширина захвата опрыскивателя, увеличение которой в 2 раза (с 16 до 32 м) на скорости 10 км/ч снизило суммарные

энергетические затраты с 9200 МДж/га до 4853 МДж/га, или почти в 2 раза (рис. 1). Увеличение скорости агрегата так же ведет к уменьшению суммарных энергетических затрат, но по величине это снижение незначительно и составляет 112 МДж/га при ширине захвата 32 м и росте скорости с 7 до 10 км/ч.

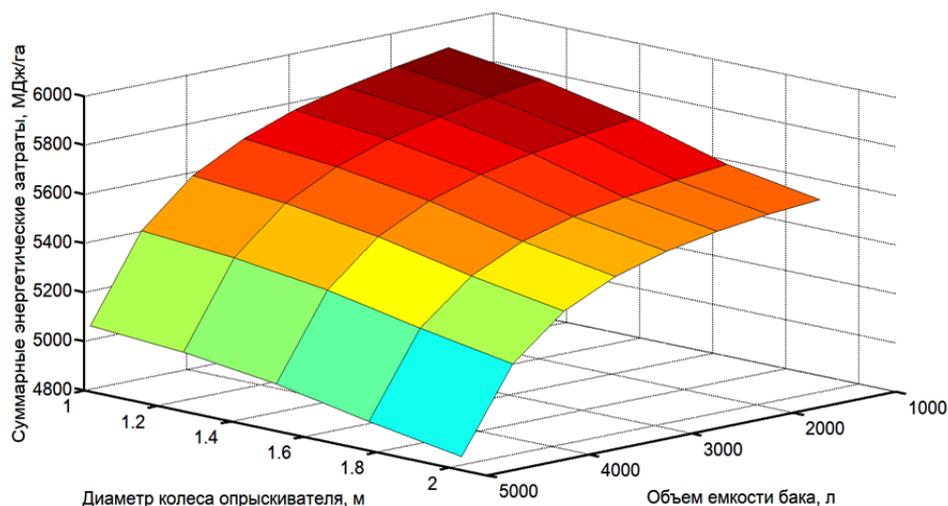


Рис. 2 – Изменение суммарных энергетических затрат при работе опрыскивателя от диаметра его опорного колеса и объема бака

Так как увеличение ширины захвата опрыскивателя сопровождается ростом оптимального объема бака (рис. 2, 3), максимальная оптимальная рабочая скорость агрегата

10 км/ч определяется принятой мощностью двигателя трактора 80 л.с. и может иметь более высокое значение при использовании трактора с большей мощностью (рис. 4).

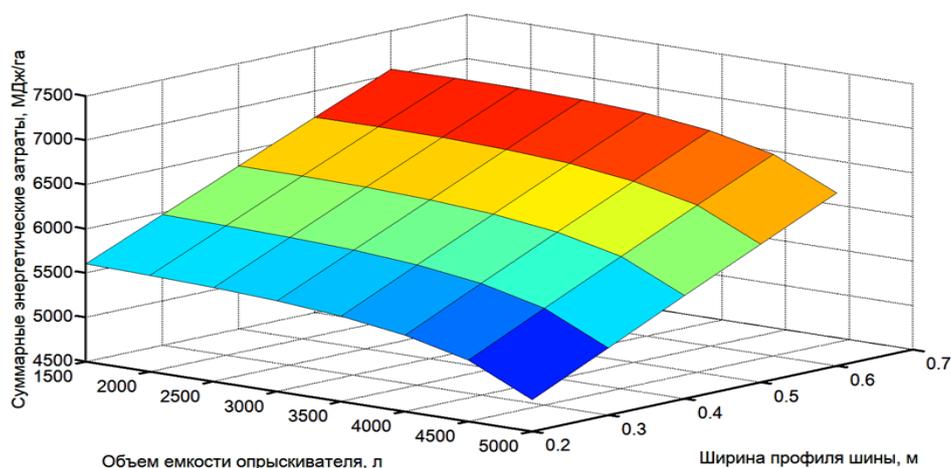


Рис.3 – Изменение суммарных энергетических затрат при работе опрыскивателя от объема бака и ширины профиля опорного колеса

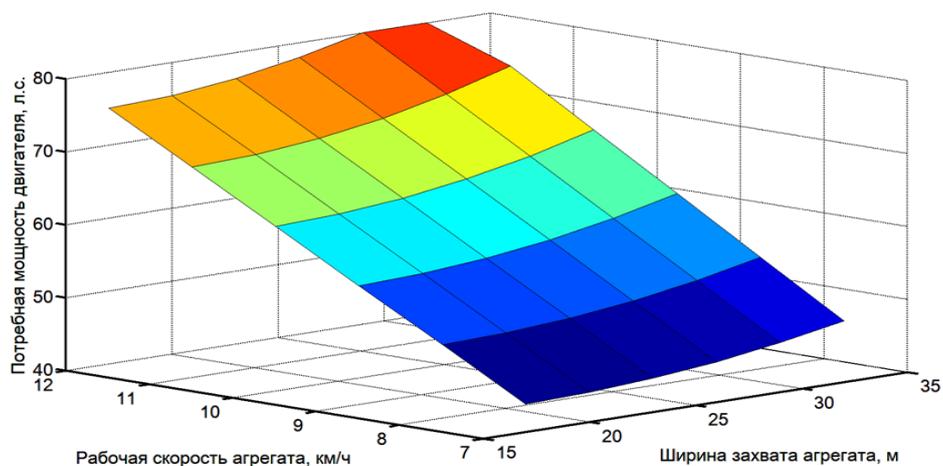


Рис. 4 – Изменение потребной мощности двигателя трактора от ширины захвата и рабочей скорости опрыскивателя

Пятикратное увеличение объема бака опрыскивателя с 1000 до 5000 л приводит к снижению суммарных энергетических затрат с 5900 МДж/га до 4853, или более чем на 1100 МДж/га (см. рис. 2). При этом увеличение диаметра колеса опрыскивателя с 1 м до 2 м при оптимальном объеме бака опрыскивателя 5000 л дает возможность сократить суммарные энергетические затраты на 180 МДж/га.

С ростом ширины профиля опорного колеса опрыскивателя с 0,2 м до 0,6 м при оптимальном объеме бака опрыскивателя 5000 л суммарные энергетические затраты увеличиваются на 1400 МДж/га (см. рис. 3), что противоречит привычной логике – чем больше

ширина колеса, тем меньше уплотнение почвы и, соответственно, потери урожайности. В этом случае определяющее влияние оказывает не уплотнение почвы, а размер вытравываемой колесами площади, рост которой сопровождается значительным повышением потерь урожая. С их учетом оптимальной ширины профиля колеса опрыскивателя следует считать 0,2 м.

Путем правильного подбора коэффициента распределения веса опрыскивателя с полной загрузкой бака жидкостью на его опорные движители, можно снизить суммарные энергетические затраты на 1000 МДж/га (рис. 5). Оптимальная его величина для условий проведения вычислительных экспериментов – 0,83.

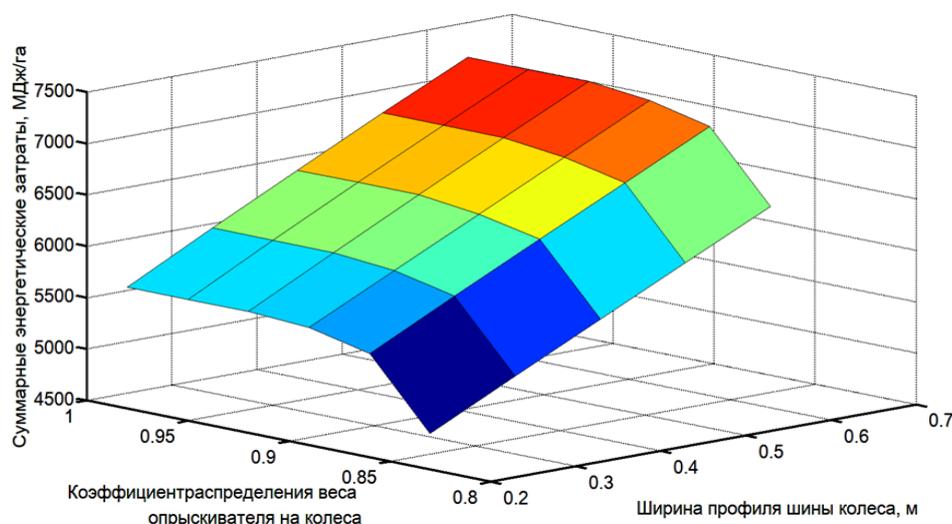


Рис. 5 – Изменение суммарных энергетических затрат при работе опрыскивателя от коэффициента распределения веса опрыскивателя на его колеса и ширины профиля опорного колеса

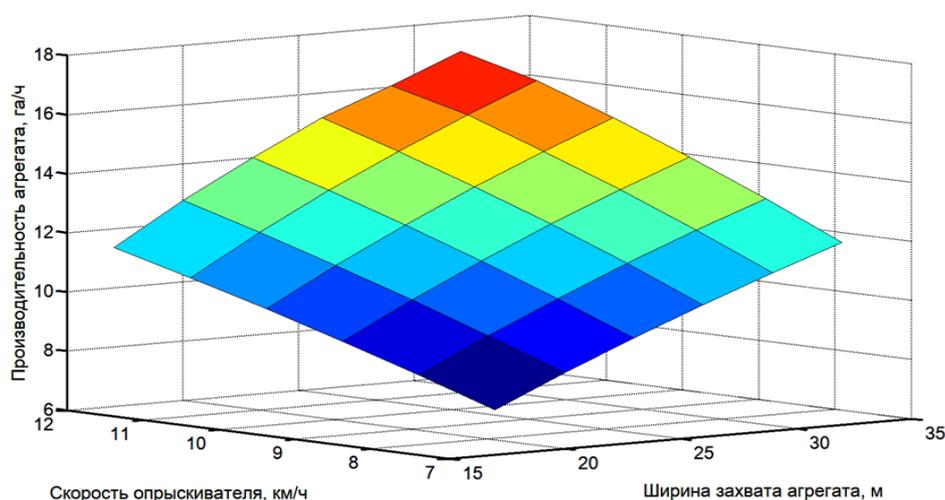


Рис. 6 – Изменение производительности опрыскивателя при изменении ширины его захвата и рабочей скорости

Интенсивность влияния ширины захвата и рабочей скорости на производительность агрегата примерно одинакова – чем больше ширина захвата и скорость агрегата, тем выше его производительность. Максимальная величина

этого показателя 16,5 га/ч соответствует наибольшим заданным значениям ширины захвата – 32 м и скорости – 12 км/ч при условии достаточной мощности двигателя в 86 л.с. (рис. 6)

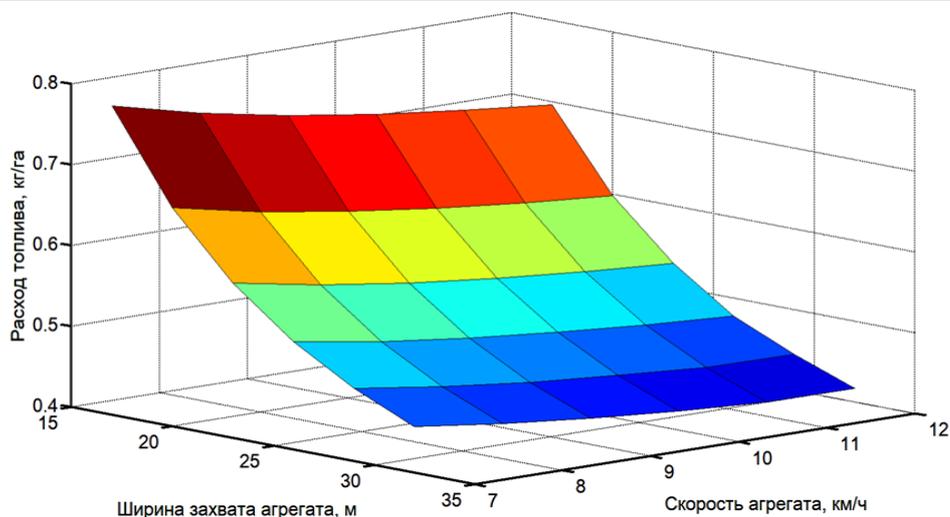


Рис. 7– Изменение погектарного расхода топлива опрыскивателя при изменении ширины его захвата и рабочей скорости

Расход топлива на единицу выполненной работы с увеличением ширины захвата агрегата с 16 до 32 м на скорости 10 км/ч снижается с 0,72 до 0,43 кг/га (рис. 7).

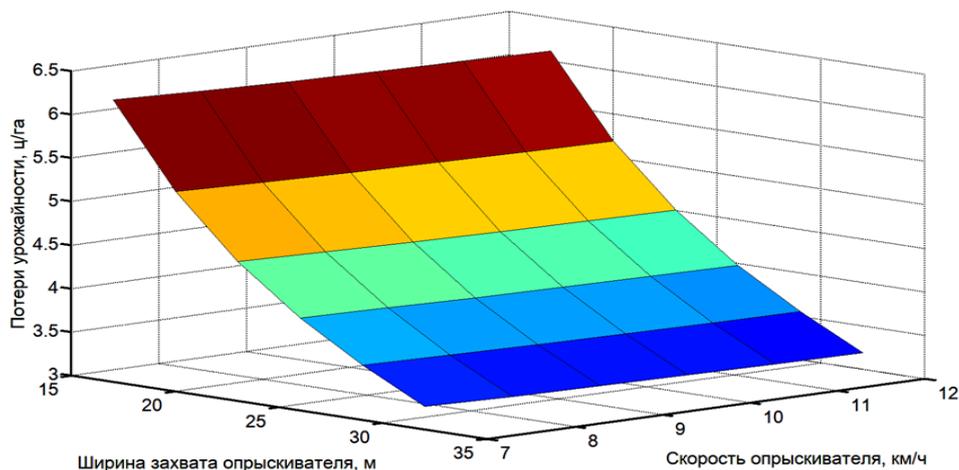


Рис. 8 – Зависимость потерь урожайности от ширины захвата и рабочей скорости опрыскивателя

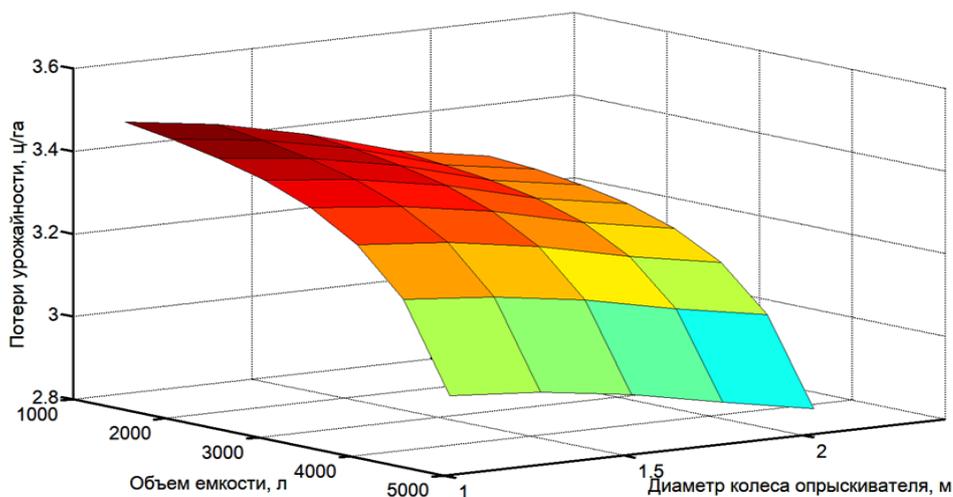


Рис. 9 – Зависимость потерь урожайности от диаметра опорного колеса и объема бака опрыскивателя

Характер изменения потерь урожая при варьировании оптимизируемых параметров опрыскивателя почти полностью копирует характер изменения суммарных энергетических затрат. Так, по мере увеличения ширины захвата опрыскивателя с 16 до 32 м при скорости агрегата 10 км/ч потери урожайности яровой пшеницы снижаются с 6,22 до 3,19 ц/га, или более чем в 2 раза (рис. 8). Наиболее значительное влияние на снижение потерь урожайности оказывали увеличение объема бака опрыскивателя, которое сокращает

агросроки выполнения технологической операции, и уменьшение ширины профиля шины колеса опрыскивателя, что способствует снижению площади посевов, подвергаемых вытаптыванию движителями опрыскивателя (рис. 9, 10, 11). Такие результаты свидетельствуют о том, что в суммарных энергетических затратах значительная часть приходится на энергию теряемого урожая и именно эта составляющая оказывает наибольшее влияние на оптимальные параметры опрыскивателя.

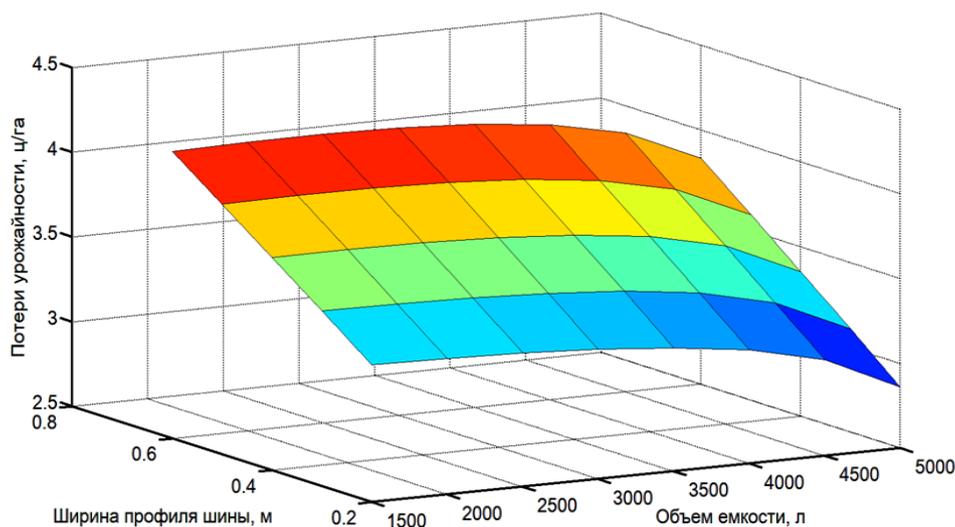


Рис. 10 – Зависимость потерь урожайности от ширины шины колеса и объема бака опрыскивателя

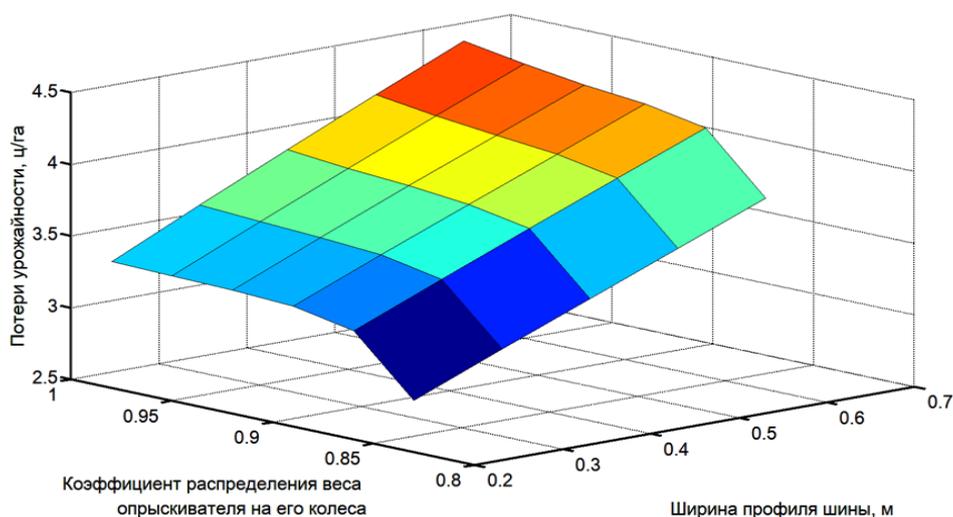


Рис. 11 – Зависимость потерь урожайности от коэффициента распределения веса опрыскивателя на его колеса и ширины шины колеса

По результатам вычислительного эксперимента с поворотом агрегата за пределами поля были получены такие же оптимальные параметры опрыскивателя, как и в варианте с поворотом внутри поля. При этом минимальные суммарные энергетические затраты резко снизились с 4852,9 МДж/га до 1365,4 МДж/га (см. рис. 2 и 12), или более чем на 300 %.

Таким образом, основные потери урожая формируются на поворотных полосах (см. рис. 9 и 13), поэтому необходимо принимать организационные и конструкционные (например, путем применения следящих устройств, обеспечивающих движение колес опрыскивателя след в след за колесами трактора) меры по их уменьшению.

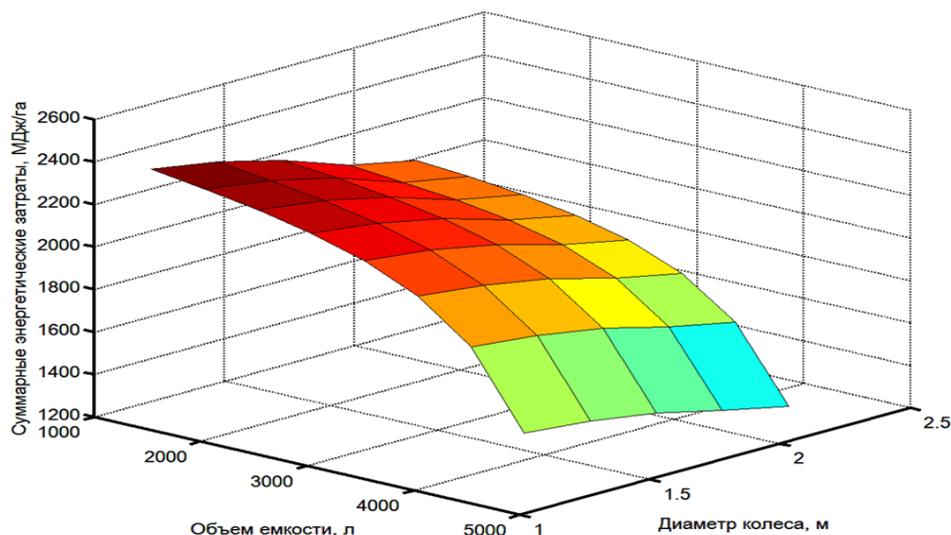


Рис. 12 – Изменение суммарных энергетических затрат при работе опрыскивателя от диаметра его опорного колеса и объема бака

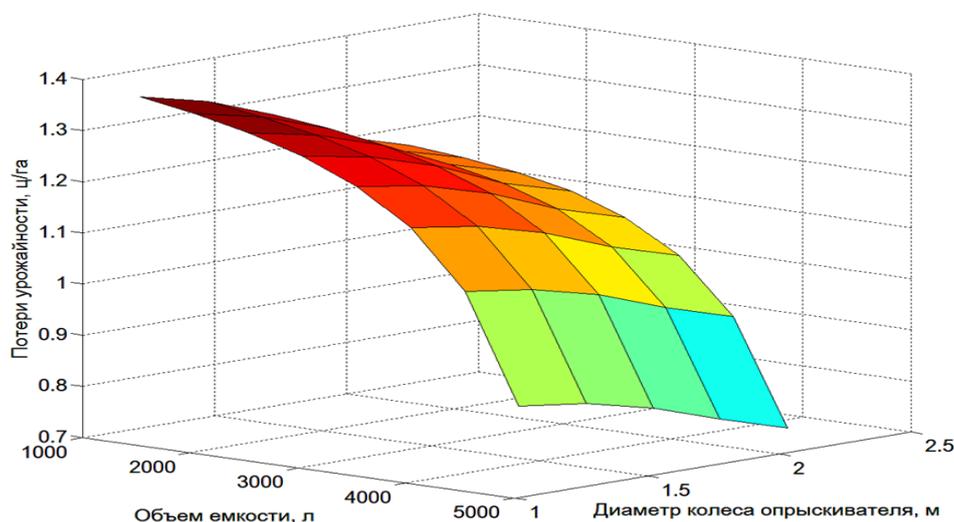


Рис. 13– Зависимость потерь урожайности от диаметра опорного колеса и объема бака опрыскивателя

Выводы. Вычислительные эксперименты, проведенные с использованием энергетической математической модели опрыскивателей, учитывающей влияние его параметров на формируемую урожайность яровой пшеницы показали, что существует сочетание значений оптимизируемых параметров в пределах заданных величин, когда суммарные энергетические затраты от работы агрегата достигают минимума. Для принятых, в ходе вычислительных экспериментов, условий работы прицепного опрыскивателя с трактором типа МТЗ-82 оптимальная ширина захвата составляет 32 м, скорость – 10 км/ч, диаметр колеса – 2 м, объем бака 5000 л, ширина профиля шины – 0,2 м, коэффициент распределения веса опрыскивателя на его опорные колеса 0,83;

минимальные суммарные энергетические затраты снижаются с ростом ширины захвата агрегата, его рабочей скорости, диаметра

колеса опрыскивателя, объема бака; при снижении ширины профиля колеса опрыскивателя и коэффициента распределения веса опрыскивателя на его опорные колеса (в заданных пределах).

При повороте агрегата в пределах поля занятого растениями минимальные суммарные энергетические затраты составили 4852,9 МДж/га, осуществление поворота агрегата за пределами поля привело к их трехкратному снижению до 1365,4 МДж/га.

Для повышения эффективности работы агрегата при обработке посевов вегетирующих растений растворами агрохимикатов необходимо рассматривать систему, в состав которой входят трактор, оператор, опрыскиватель, поле, почва, урожай (ТООПШУ), а в качестве объективного критерия оптимизации его параметров использовать суммарные энергетические затраты, учитывающие влияние на урожайность культур.

Литература

1. Михайлова З.И., Ивченко В.К., Полосина В.А. Приемы энергосбережения при возделывании яровой пшеницы по двум предшественникам на черноземах выщелоченных // Вестник КрасГАУ. 2022. № 6. С. 41–46. doi: 10.36718/1819-4036-2022-6-41-46
2. Ресурсосберегающие технологии сельскохозяйственного производства. / И.Н Шило, В.Н. Дашков. Мн.: БГАУ, 2003. 183 с.
3. Влияние минеральных и микробиологических удобрений на биологическую активность каштановой почвы и продуктивность яровой твердой пшеницы в условиях сухостепного Заволжья / К. Е. Денисов, И. С. Полетаев, А. А. Гераскина и др. // Аграрный научный журнал. 2022. № 12. С. 27-30. doi: 10.28983/asj.y2022i12pp27-30.
4. Г.А. Булаткин Эколого-энергетические основы оптимизации продуктивности агроэкосистем /отв. ред. В.В. Снакин. М.: НИА-Природа, 2008. 366 с.
5. Шпаков А. С., Прологова Т. В., Воловик В. Т. Агроэнергетический анализ в специализированных животноводческих хозяйствах. М.: РАН, 2021. 93 с.
6. Ивенин А. В., Саков А. П. Влияние систем обработки светло-серой лесной почвы на урожайность и энергетическую эффективность выращивания зерновых культур за ротацию зернового севооборота в условиях Волго-Вятского региона // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2020. Т. 15. № 2(58). С. 14-19. doi: 10.12737/2073-0462-2020-14-19.
7. Зубко Н. Г., Долженко Т. В. Действие фунгицидов на содержание фотосинтетических пигментов в растениях пшеницы яровой // Аграрная наука. 2022. № 12. С. 110-118. doi: 10.32634/0869-8155-2022-365-12-110-118.
8. Ревякин Е.Л., Краховецкий Н.Н. Машины для химической защиты растений в инновационных технологиях: науч. аналит. обзор. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. 124 с.
9. Технические средства для химической защиты растений: состояние и перспективы развития / А. С. Дорохов, И. А. Старостин, А. В. Ещин и др. // Агроинженерия. 2022. Т.24, № 3. С. 12-18. doi: 10.26897/2687-1149-2022-3-12-18.
10. Тенденции развития опрыскивателей и задачи совершенствования методов расчета их параметров и режимов работы / А. А. Нурмиев, Н. Р. Залаков, Э. П. Утяшеви др. // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса: научные труды Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Мартьянова А.П. Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2022. С. 429-437.
11. Захаренко В. А. Современное состояние и перспективы экономики применения пестицидов в агроэкосистемах России // Агрохимия. 2021. № 5. С. 68-83. doi: 10.31857/S0002188121050148.
12. Патент № 2253229 С2 Российская Федерация, МПК А01М 7/00. опрыскиватель: № 2003111831/12: заявл. 23.04.2003: опубл. 10.06.2005 / Н. Н. Краховецкий; заявитель ОАО «Научно-исследовательский институт сельскохозяйственного машиностроения им. В.П. Горячкина».
13. Дьячков А.П. К вопросу определения грузоподъемности основного бака полуприцепного опрыскивателя // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2016. № 1 (48). С. 56-63.
14. Константинов М.М., Петренко Е.С. Технико-экономическое обоснование ширины захвата штангового опрыскивателя // Известия ОГАУ. 2018. № 1(68). С.122-125.
15. Зырянов А.П., Гуляев Д.В. Теоретическое исследование баланса времени смены работы опрыскивателя // Вестник ЧГАА. 2013. Т. 65. С. 20-23.
16. Влияние технологических параметров вертикального опрыскивания на обеспечение экологической безопасности при возделывании пропашных культур // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2022. № 4(68). С. 502-514. doi: 10.32786/2071-9485-2022-04-59.
17. Направления повышения эффективности использования полевых штанговых опрыскивателей / И. С. Крук, О. В. Гордеевко, С. К. Карпович и др. // Агропанорама, 2022. № 5(153). С. 2-10.
18. Коннов Д. И., Проскурин Д. А. О средствах автоматизации самоходных полевых опрыскивателей // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием). Оренбург: Оренбургский государственный университет. 2021. С. 625-627.
19. Сабиров, Р. Ф. Определение дисперсности распыливания рабочего раствора биопрепарата / Р. Ф. Сабиров, А. Р. Валиев, Ф. Ф. Мухамадьяров // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 17, № 1(65). – С. 77-82.
20. Фёдоров Р.Н., Хафизов К.А. Определение потерь урожая и направления их снижения от уплотнения ходовыми системами машинно-тракторных агрегатов по уходу за растениями // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2009. № 4(14). С 152-155.
21. Хафизов К. А. Оптимизация параметров и режимов работы МТА на основе энергетического анализа // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 7. С. 32-34.
22. Методика расчета и проектирование дозатора-распределителя почвы / И. Х. Гайфуллин, Д. Т. Халиуллин, М. Н. Калимуллин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2023. – Т. 18, № 1(69). – С. 45-51.
23. Optimization of main parameters of tractor working with soil-processing implement / A. Nurmiev, C. Khafizov, R. Khafizov, et al. // Engineering for Rural Development: Proceedings. 2018. Vol. 17. P. 161-167. doi 10.22616/ERDev2018.17.N191.
24. Optimization of main parameters of tractor and unit for deep processing of soil according to criterion - total energy costs / C. Khafizov, R. Khafizov, A. Nurmiev, et al. // Engineering for Rural Development. 2020. Vol. 19. P. 603-608. DOI 10.22616/ERDev.2020.19.TF134.
25. Khafizov C. A., R. Khafizov, A. Nurmiev, et al. Rationale for Measurements to be Selected for Tractors to Perform Agricultural Activities Differing in Energy Intensity //BIO Web of Conferences. 2021. Vol. 37. С. 00138. URL:https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2021/09/bioconf_fies2021_00138/

bioconf_fies2021_00138.html (дата обращения: 20.04.2023).

26. Пути повышения эффективности использования машинно-тракторных агрегатов / К. А. Хафизов, Ф. Х. Халиуллин // Техника и оборудование для села. 2015. № 10. С. 20-22.

27. Энергетический метод оптимизации основных параметров тракторов / К. А. Хафизов, Р. Н. Хафизов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2015. Т. 10. № 1(35). С. 75-81. DOI 10.12737/11383.

28. Сидоренко, И. Д. Теоретические предпосылки к обоснованию формы рабочего элемента вращающегося распылителя / И. Д. Сидоренко // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 2(62). – С. 215-220. – DOI 10.18286/1816-4501-2023-2-215-220.

Сведения об авторах:

Нурмиев Азат Ахиарович – старший преподаватель кафедры тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов, e-mail: azat-nurmiev@mail.ru

Хафизов Камил Абдулхакович – доктор технических наук, заведующий кафедры тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов, e-mail: fts-kgau@mail.ru

Хафизов Рамиль Наилевич – кандидат технических наук, доцент кафедры тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов, e-mail: ramilajz@mail.ru

Залаков Наиль Ринатович – соискатель кафедры тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов, e-mail: Nail.Zalakov@tatar.ru

Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия

Максимов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин и комплексов, e-mail: maksimov48@inbox.ru

Чувашский государственный аграрный университет, г. Чебоксары, Россия

**INCREASING THE EFFICIENCY OF THE USE OF THE PULL-TYPE SPRAYER
BY REDUCING HARVEST LOSS**

A. A. Nurmiev, K. A. Khafizov, R. N. Khafizov, N. R. Zalakov, I. I. Maksimov

Abstract. The research was carried out with the aim of optimizing the parameters of the trailed sprayer to reduce the total energy costs during its operation, taking into account possible crop losses. Computational experiments were carried out using a system energy mathematical model of sprayers based on the tractor MTZ-80, 82. The system under consideration includes subsystems - tractor, operator, sprayer, field, soil and crop (TOOPPU). As a criterion for optimizing the parameters of the sprayer, the total energy costs are taken, including, in addition to direct and indirect energy costs, the energy of the crop lost when the parameters of the sprayer are chosen incorrectly. For the accepted operating conditions of the sprayer (field area $F_{\text{polya}} = 60$ ha; head length $l_{\text{gona}} = 0.8$ km; travel distance $l_{\text{per}} = 3$ km; strength factor of the field bearing surface $Q1=0.9$; volume of work $Q=1000$ ha; crop - spring wheat; number of weeds - 50 pieces/m²; number of tractors employed in the operation $N_{\text{тракт}} = 1$ piece; working day $T_{\text{днев}} = 14$ hours; planned yield $YP = 40$ c/ha; application rate of pesticides $H3 = 150$ l/ha; pump pressure $P_{\text{насosa}} = 3$ MPa, air pressure in tires $P_w = 0.16$ MPa, number of wheels on one side of the axle $Z_k = 1$ piece, coefficient of adhesion of wheels to soil $K_{\text{сцеп}} = 0.6$, coefficient of resistance to wheel rolling $f_{\text{перек}} = 0.1$; soil density $\rho_z=1300$ kg/m³; soil hardness $H=1800000$ Pa) revealed the presence of a combination of values of six parameters, when the total energy costs reach a minimum. the volume of the tank for pesticides is 5000 l, the width of the sprayer wheel profile is 0.2 m, the coefficient of distribution of the weight of the sprayer on its support wheels is 0.83. When turning the unit within the field, the total energy costs amounted to 4852.9 MJ/ha. With the same values of the optimal parameters of the sprayer, turning the unit outside the field led to a threefold reduction in total energy costs to 1365.4 MJ/ha. Widely used partial performance indicators of sprayers - productivity, fuel consumption per unit of treated area do not allow to identify ways to reduce crop losses.

Key words: machine-tractor unit, sprayer, computational experiment, energy consumption, yield loss, parameter optimization, optimization criterion.

References

1. Mikhaylova ZI, Ivchenko VK, Polosina VA. [Energy saving techniques in spring wheat cultivation according to two predecessors on leached chernozems]. Vestnik KrasGAU. 2022; 6. 41-46 p. doi: 10.36718/1819-4036-2022-6-41-46
2. Shilo IN, Dashkov VN. Resursoberegayushchie tekhnologii sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva. [Resource-saving technologies of agricultural production]. Minsk: BGATU. 2003; 183 p.
3. Denisov KE, Poletaev IS, Geraskina AA. [Influence of mineral and microbiological fertilizers on the biological activity of chestnut soil and the productivity of spring durum wheat in the conditions of the dry steppe Trans-Volga]. Agrarnyi nauchnyi zhurnal. 2022; 12. 27-30 p. doi: 10.28983/asj.y2022i12pp27-30.
4. Bulatkin GA, Snakin VV. Ekologo-energeticheskie osnovy optimizatsii produktivnosti agroekosistem. [Ecological and energy bases for optimizing the productivity of agroecosystems]. Moscow: NIA-Priroda. 2008; 366 p.
5. Shpakov AS, Prologova TV, Volovik VT. Agroenergeticheskii analiz v spetsializirovannykh zhivotnovodcheskikh khozyaistvakh. [Agroenergy analysis in specialized livestock farms]. Moscow: RAN. 2021; 93 p.
6. Ivenin AV, Sakov AP. [Influence of light gray forest soil processing systems on productivity and energy efficiency of growing grain crops for grain crop rotation in the conditions of Volga-Vyatka region]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020; Vol.15. 2(58). 14-19 p. doi: 10.12737/2073-0462-2020-14-19.
7. Zubko NG, Dolzhenko TV. [The effect of fungicides on the content of photosynthetic pigments in spring wheat plants]. Agrarnaya nauka. 2022; 12. 110-118 p. doi: 10.32634/0869-8155-2022-365-12-110-118.
8. Revyakin EL, Krakhovetskii NN. Mashiny dlya khimicheskoi zashchity rastenii v innovatsionnykh tekhnologiyakh: nauch. analit. obzor. [Machines for chemical plant protection in innovative technologies: scientific and analytical review]. Moscow: FGNU "Rosinformagrotekh". 2010; 124 p.
9. Dorokhov AS, Starostin IA, Eshchin AV. [Technical means for chemical protection of plants: state of the art and development prospects]. Agroinzheneriya. 2022; Vol.24. 3. 12-18 p. doi: 10.26897/2687-1149-2022-3-12-18.
10. Nurmiev AA, Zalakov NR, Utyashevi EP. [Trends in the development of sprayers and the tasks of improving methods for calculating their parameters and operating modes. The current state and prospects for the development of the technical base of the agro-industrial complex]. Nauchnye trudy Vserossiiskoi (natsional'noi) nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati d.t.n., professora Mart'yanova A.P. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet. 2022; 429-437 p.
11. Zakharenko VA. [Current state and economic prospects for the use of pesticides in agroecosystems in Russia].

Agrokimiya. 2021; 5. 68-83 p. doi: 10.31857/S0002188121050148.

12. Krakhovetskiy NN. [Sprayer]. Patent № 2253229 C2 Rossiiskaya Federatsiya, MPK A01M 7/00: № 2003111831/12: zayavl. 23.04.2003: opubl. 10.06.2005 /; zayavitel' OAO "Nauchno-issledovatel'skii institut sel'skokhozyaistvennogo mashinostroeniya im. V.P. Goryachkina".

13. D'yachkov AP. [On the issue of determining the carrying capacity of the main tank of a semitrailer sprayer]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016; 1 (48). 56-63 p.

14. Konstantinov MM, Petrenko ES. [Feasibility study of the width of the boom sprayer]. Izvestiya OGAU. 2018; 1 (68). 122-125 p.

15. Zyryanov AP, Gulyaev DV. [Theoretical study of the balance of time for changing the work of a sprayer]. Vestnik ChGAA. 2013; Vol.65. 20-23 p.

16. Meznikova MV. [Influence of technological parameters of vertical spraying on ensuring environmental safety in the cultivation of tilled crops]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2022; 4(68). 502-514 p. doi: 10.32786/2071-9485-2022-04-59.

17. Kruk IS, Gordeenko OV, Karpovich SK. [Directions for increasing the efficiency of using field boom sprayers]. Agropanorama. 2022; 5(153). 2-10 p.

18. Konnov DI, Proskurin DA. [On the means of automation of self-propelled field sprayers. University complex as a regional center of education, science and culture]. Materialy Vserossiiskoy nauchno-metodicheskoi konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem). Orenburg: Orenburgskiy gosudarstvennyi universitet. 2021; 625-627 p.

19. Sabirov RF, Valiev AR, Mukhamadyarov FF. [Determination of dispersion of spraying of a working solution of a biological product]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol. 17. 1(65). 77-82 p.

20. Fedorov RN, Khafizov KA. [Determination of crop losses and the direction of their reduction from compaction by running systems of machine-tractor units for plant care]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2009; 4(14). 152-155 p.

21. Khafizov KA. [Optimization of parameters and operating modes of MTA based on energy analysis]. Traktory i sel'skokhozyaistvennyye mashiny. 2006; 7. 32-34 p.

22. Gayfullin IH, Khaliullin DT, Kalimullin MN, Ziganshin BG, Hamitov RR. [Methodology of calculation and design of the dispenser-distributor of soil]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; Vol. 18. 1 (69). 45-51 p.

23. Nurmiev A, Khafizov C, Khafizov R. Optimization of main parameters of tractor working with soil-processing implement. Engineering for rural development: proceedings. 2018; Vol.17. 161-167 p. doi 10.22616/ERDev2018.17.N191.

24. Khafizov C, Khafizov R, Nurmiev A. Optimization of main parameters of tractor and unit for deep processing of soil according to criterion - total energy costs. Engineering for rural development. 2020; Vol.19. 603-608 p. DOI 10.22616/ERDev.2020.19.TF134.

25. Khafizov C, Khafizov R, Nurmiev A. Rationale for measurements to be selected for tractors to perform agricultural activities differing in energy intensity. [Internet]. BIO Web of Conferences. 2021; Vol.37. 00138 p. [cited 2023, April 20]:https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2021/09/bioconf_fies2021_00138/bioconf_fies2021_00138.html.

26. Khafizov KA, Khaliullin FK. [Ways to improve the efficiency of using machine-tractor units]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2015; 10. 20-22 p.

27. Khafizov KA, Khafizov RN. [Energy method for optimizing the main parameters of tractors]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2015; Vol.10. 1(35). 75-81 p. DOI 10.12737/11383.

28. Sidorenko ID. [Theoretical prerequisites for substantiating the shape of the working element of a rotating atomizer]. Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaistvennoy akademii. 2023; 2(62). 215-220 p. – DOI 10.18286/1816-4501-2023-2-215-220.

Authors:

Nurmiev Azat Akhbarovich - senior lecturer of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes Department, e-mail: azat-nurmiev@mail.ru

Khafizov Kamil Abdulkhakovich - Doctor of Technical sciences, Head of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes Department, e-mail: fts-kgau@mail.ru

Khafizov Ramil Nailovich – Ph.D. of Technical sciences, Associate Professor of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes Department, e-mail: ramilajz@mail.ru

Zalakov Nail Rinatovich – an applicant student of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes Department, e-mail: Nail.Zalakov@tatar.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

Maksimov Ivan Ivanovich - Doctor of Technical sciences, Professor of Transport and technological machines and complexes Department, e-mail: maksimov48@inbox.ru

Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russia.