

4.3.1. ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 621.114

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_4_104

EDN: RNWCHM

Сравнительная оценка эксплуатационно-технологической эффективности тракторов «Беларус» серии 3500 в сопоставлении с отечественными и зарубежными аналогами при реализации технологии прямого посева

**Камиль Абдулхакович Хафизов^{1✉}, Рамиль Наилович Хафизов²,
Азат Ахиарович Нурмиев³, Михаил Николаевич Яровой⁴**

^{1, 2, 3} Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

⁴ Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия

¹ fts-kgau@mail.ru, ramilajz@mail.ru✉

Аннотация. Представлены результаты исследования, выполненного с целью выявления путей повышения эффективности эксплуатации трактора МТЗ-3522, агрегируемого с современными широкозахватными посевными комплексами. Анализировали производительность агрегата, погектарный расход топлива и суммарные энергетические затраты как основной показатель, нацеленный на конечный продукт производства и учитывающий энергию теряемого урожая. Проводились вычислительные эксперименты на основе системной энергетической математической модели посевных агрегатов в СКМ МАТЛАБ. Выявленные оптимальная ширина захвата и рабочая скорость агрегата по всем показателям эффективности совпадают и составляют соответственно 16 м и 9 км/ч. При этих параметрах производительность равняется 8,29 га/ч, удельный расход топлива – 5,12 кг/га, а суммарные энергозатраты – 13 006 МДж/га. Установленный оптимум является устойчивым в широком диапазоне условий эксплуатации. Полученные зависимости изменения тягового КПД и буксования от режимов работы МТА свидетельствуют об оптимально сбалансированной конструкции трактора. Широкий диапазон изменения тягового КПД от 0,45 при минимальной ширине захвата до 0,64 при максимальной указывает на возможность значительного повышения энергетической эффективности. Максимальное значение буксования (12,5%) находится в допустимых пределах, что также свидетельствует о хорошей сбалансированности конструкции трактора. Сравнительный анализ с другими тракторами выявил такие преимущества МТЗ-3522, как высокая производительность (3-е место среди 18 моделей, что достигается благодаря оптимальному соотношению мощности двигателя и эксплуатационной массы) и средние суммарные энергозатраты (6-е место, обусловленное эффективной реализацией тяговой мощности путем подбора ширины захвата и рабочей скорости). На основании проведенного исследования даны практические рекомендации использовать трактор МТЗ-3522 преимущественно на полях площадью более 25 га, комплектовать с посевными комплексами шириной захвата 14–16 м, а также поддерживать рабочую скорость в диапазоне 8–10 км/ч и др.

Ключевые слова: трактор МТЗ-3522, производительность, погектарный расход топлива, суммарные энергетические затраты, прямой посев, оптимальные параметры, ширина захвата, рабочая скорость

Для цитирования: Хафизов К.А., Хафизов Р.Н., Нурмиев А.А., Яровой М.Н. Сравнительная оценка эксплуатационно-технологической эффективности тракторов «Беларус» серии 3500 в сопоставлении с отечественными и зарубежными аналогами при реализации технологии прямого посева // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, № 4(87). С. 104–118. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2025_4_104-118.

4.3.1. TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT
FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

Comparative assessment of the operational and technological efficiency of Belarus 3500 series tractors in comparison with domestic and foreign analogues when implementing direct seeding technology

Kamil A. Khafizov^{1✉}, Ramil N. Khafizov², Azat A. Nurmiev³, Mikhail N. Yarovoy⁴

^{1, 2, 3} Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

⁴ Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

¹ fts-kgau@mail.ru, ramilajz@mail.ru✉

Abstract. The results of a study conducted to identify ways to improve the efficiency of the MTZ-3522 tractor, which is aggregated with modern wide-range sowing complexes, are presented. The unit's performance, per-hectare fuel consumption and total energy costs were analyzed as the main indicator aimed at the final product of production and taking into account the energy of the lost crop. Computational experiments were carried out based on the system energy mathematical model of seed aggregates in SCM MATLAB. The optimal operating width and speed of the unit are the same in all performance indicators and amount to 16 m and 9 km/h, respectively. With these parameters, the productivity is 8.29 ha/hour, the specific fuel consumption is 5.12 kg/ha, and the total energy consumption is 13,006 MJ/ha. The established optimum is stable in a wide range of operating conditions. The obtained dependences of changes in propulsive efficiency and skidding on the operating modes of the MTA indicate an optimally balanced tractor design. A wide range of propulsive efficiency changes from 0.45 with a minimum operating width to 0.64 with its maximum indicates the possibility of a significant increase in energy efficiency. The maximum skidding value (12.5%) is within acceptable limits, which also indicates a well-balanced tractor design. A comparative analysis with other tractors revealed such advantages of the MTZ-3522 as high productivity (the 3rd place among 18 models, which is achieved due to the optimal ratio of engine power and operating weight) and average total energy consumption (the 6th place, due to the effective implementation of propulsive power by selecting operating width and working speed). Based on the conducted research, practical recommendations are given to use the MTZ-3522 tractor mainly in fields with an area of more than 25 hectares, complete with sowing complexes with a working width of 14-16 m, as well as maintain an operating speed in the range of 8-10 km/h, etc.

Keywords: MTZ-3522 tractor, productivity, per-hectare fuel consumption, total energy costs, direct seeding, optimal parameters, operating width, operating speed

For citation: Khafizov K.A., Khafizov R.N., Nurmiev A.A., Yarovoy M.N. Comparative assessment of the operational and technological efficiency of Belarus 3500 series tractors in comparison with domestic and foreign analogues when implementing direct seeding technology. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2025;18(4):104-118. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2025_4_104-118.

В современном сельскохозяйственном производстве ключевую роль играет правильный выбор энергетического средства для выполнения различных технологических операций, при этом особенно важным является подбор модели трактора для выполнения энергоемких операций, таких как прямой посев, где требуется оптимальное сочетание мощности двигателя, тяговых характеристик и экономичности машины [1, 5, 7].

Анализ тракторного рынка Российской Федерации показывает, что основными поставщиками мобильных тяговых машин являются Республика Беларусь (более 31% тракторов) и Китай (51%, преимущественно мотоблоки и мини-тракторы). Особый интерес представляет флагманская модель ОАО «Минский тракторный завод» – трактор МТЗ-3522 с эксплуатационной массой 12,8 т и мощностью двигателя 355 л.с., способный эффективно работать с современными широкозахватными посевными комплексами типа «Агромастер» [3, 4, 8].

Цель исследования заключалась в проведении комплексной оценки эффективности посевных агрегатов на базе трактора МТЗ-3522 в сравнении с другими современными тракторами, определении оптимальных параметров и режимов работы для достижения максимальной производительности при минимальных энергетических затратах.

Трактор МТЗ-3522 оснащен современным дизельным двигателем Deutz TCD2013 L064V с турбонаддувом, развивающим мощность 261 кВт (355 л.с.) при номинальных оборотах 2200 об/мин. Двигатель имеет 6 цилиндров с рабочим объемом 7,142 л и обеспечивает максимальный крутящий момент 1498 Нм. Удельный расход топлива составляет 250 г/кВт·ч, что свидетельствует о высокой топливной экономичности.

Трансмиссия трактора представлена гидромеханической ступенчатой коробкой передач с 36 передачами переднего хода и 24 передачами заднего хода. Диапазон скоростей движения составляет 0,34–40 км/ч вперед и 0,43–20,8 км/ч назад, что обеспечивает широкие возможности выбора оптимальных режимов работы.

Ходовая система колесная (4К4) с передними шинами размером 600/65R34 и задними – 710/70R42. Эксплуатационная масса трактора составляет 12 730 кг, что обеспечивает хорошее сцепление с почвой и высокие тяговые показатели.

Исследования проводились путем вычислительных экспериментов в среде MATLAB с использованием математических моделей машинно-тракторных агрегатов [10].

Оптимизация параметров осуществлялась по трем ключевым показателям эффективности:

- производительность агрегатов за час сменной работы, га/ч;
- расход топлива на обработку одного гектара, кг/га;
- суммарные энергетические затраты, МДж/га [2, 6, 9, 11].

Основные условия имитации работы агрегатов:

- площадь поля – 100 га;
- длина гона – 1 км;
- удельное сопротивление почвы – 5 кН/м;
- расстояние между полями – 3 км;
- время работы в сутки – 16 ч;
- планируемая урожайность – 40 ц/га;
- агрофон – стерня колосовых;
- плотность почвы – 1300 кг/м³;
- твердость почвы – 15 000 Па;
- давление в шинах колес – 0,16 МПа;
- число колес на одном борту – 1.

Варьируемыми параметрами являлись:

- ширина захвата агрегата – 4–16 м;
- рабочая скорость движения – 5–12 км/ч;
- площадь обрабатываемого поля – 5–50 га.

Анализ результатов математического моделирования работы посевного агрегата с трактором МТЗ-3522 позволяет выявить фундаментальные закономерности взаимодействия основных эксплуатационных параметров и их влияние на эффективность работы машинно-тракторного агрегата (МТА) в целом.

Исследование влияния конструктивно-режимных параметров на эффективность агрегата

Данные, приведенные в таблице 1, раскрывают сложную картину взаимного влияния ширины захвата и рабочей скорости агрегата на его эксплуатационные показатели. При увеличении ширины захвата с 4 до 16 м наблюдается существенное изменение характера работы агрегата. Коэффициент использования времени смены при этом снижается с 0,69 до 0,58 (при скорости 9 км/ч), что обусловлено увеличением времени на повороты и технологическое обслуживание более широкозахватного агрегата. Однако это снижение компенсируется значительным ростом производительности за счет увеличения рабочей ширины захвата.

Особый интерес представляет характер изменения тягового КПД трактора. С увеличением ширины захвата от 4 до 16 м наблюдается устойчивый рост показателя с 0,45 до 0,64, что свидетельствует о более эффективной реализации тяговой мощности трактора при работе с широкозахватными агрегатами. Данная закономерность объясняется тем, что при большей ширине захвата достигается более полная загрузка двигателя, что способствует его работе в оптимальном режиме. Буксование движителей также демонстрирует закономерное увеличение с ростом ширины захвата – от 2,96 до 12,5% при ширине соответственно 4 и 16 м. Примечательно, что даже при максимальной ширине захвата буксование остается в допустимых пределах при работе на стерневом фоне, что говорит о рациональном выборе массы трактора и эффективном распределении нагрузки между мостами.

Анализ влияния рабочей скорости показывает, что мощность двигателя, реализуемая при работе агрегата, возрастает нелинейно с увеличением скорости. При ширине захвата 16 м увеличение скорости с 5 до 12 км/ч приводит к росту потребляемой мощности с 186,35 до 477,99 л.с. При этом после того, как скорость достигает 9–10 км/ч, наблюдается перегрузка двигателя, что нежелательно с точки зрения его ресурса и топливной экономичности.

Таблица 1. Изменение показателей работы посевного агрегата с трактором МТЗ-3522 при изменении ширины захвата и скорости агрегата

Ширина захвата, м	Рабочая скорость, км/ч	Коэффициент использования времени смены	Сопротивление почвы, кН/м	Тяговое КПД трактора	Мощность двигателя, л.с.	Буксование, %	Производительность агрегата, га/ч	Расход топлива на 1 гектар, кг/га	Энергия израсходованного топлива, МДж/га	Энергия потеряннаго урожая вследствие уплотнения почвы, МДж/га	Энергия потеряннаго урожая вследствие нарушения сроков выполнения посевных работ, МДж/га	Суммарные энерготраты, МДж/га
4	8	0,699	4,109	0,448	108,9	2,94	2,236	13,10	277,61	11106,0	8943,7	655 030
4	9	0,692	4,149	0,450	123,2	2,96	2,489	12,14	249,37	11106,0	8034,0	607 190
4	10	0,684	4,190	0,452	137,6	2,99	2,737	11,39	226,78	11106,0	7306,2	569 270
14	5	0,626	4,000	0,632	164,4	10,16	4,380	7,15	357,68	11191,0	5187,2	16 975
14	6	0,611	4,035	0,633	198,8	10,26	5,130	6,49	324,64	11191,0	4463,6	16 184
14	7	0,596	4,071	0,633	233,9	10,36	5,845	6,03	301,69	11191,0	3941,7	15 614
14	8	0,583	4,109	0,634	269,6	10,47	6,528	5,70	285,10	11191,0	3548,7	15 185
14	9	0,570	4,149	0,634	306,0	10,59	7,180	5,46	272,79	11191,0	3243,8	14 854
14	10	0,557	4,190	0,635	343,1	10,71	7,803	5,27	263,50	11191,0	3006,1	14 595
14	11	0,545	4,232	0,635	380,9	10,83	7,803	5,27	263,50	11191,0	3006,1	14 595
14	12	0,534	4,275	0,636	419,5	10,96	7,803	5,27	263,50	11191,0	3006,1	14 595
15	5	0,625	4,000	0,636	175,2	10,99	4,690	6,85	342,30	10445,0	4859,3	15 876
15	6	0,611	4,035	0,636	212,0	11,10	5,500	6,23	311,58	10445,0	4176,1	15 128
15	7	0,597	4,071	0,636	249,4	11,22	6,273	5,81	290,33	10445,0	3692,8	14 599
15	8	0,584	4,109	0,637	287,5	11,35	7,012	5,50	275,04	10445,0	3322,3	14 196
15	9	0,572	4,149	0,637	326,5	11,48	7,719	5,28	263,78	10445,0	3033,5	13 881
15	10	0,560	4,190	0,637	366,2	11,62	7,719	5,28	263,78	10445,0	3033,5	13 881
15	11	0,548	4,232	0,637	406,7	11,77	7,719	5,28	263,78	10445,0	3033,5	13 881
16	5	0,627	4,000	0,638	186,4	11,89	5,012	6,58	328,88	9792,1	4560,7	14 901
16	6	0,613	4,035	0,638	225,5	12,03	5,886	6,00	300,21	9792,1	3914,9	14 194
16	7	0,600	4,071	0,638	265,4	12,17	6,724	5,61	280,46	9792,1	3451,8	13 688
16	8	0,588	4,109	0,638	306,2	12,32	7,527	5,33	266,36	9792,1	3101,6	13 306
16	9	0,576	4,149	0,638	347,8	12,48	8,298	5,12	256,06	9792,1	2825,8	13 006
16	10	0,565	4,190	0,638	390,2	12,64	8,298	5,12	256,06	9792,1	2825,8	13 006

Математическая обработка полученных результатов при оценке характера изменения производительности машинно-тракторного агрегата в зависимости от ширины захвата и рабочей скорости позволила определить оптимальные параметры по производительности:

- ширина захвата $B_{opt} = 16$ м;
- рабочая скорость $V_{opt} = 9$ км/ч;
- производительность агрегата $W_{max} = 8,29$ га/ч.

Характер взаимодействия между энергетическими и технологическими параметрами посевного агрегата с трактором МТЗ-3522 анализировали по зависимости погектарного расхода топлива от ширины захвата и скорости. Выполнив математическую обработку полученных результатов, определили оптимальные параметры по расходу топлива:

- ширина захвата $B_{opt} = 16$ м;
- рабочая скорость $V_{opt} = 9$ км/ч;
- расход топлива $G_{hmin} = 5,12$ кг/га.

Анализ зависимости суммарных энергетических затрат посевного агрегата с трактором МТЗ-3522 от ширины захвата и скорости позволяет выявить определенные закономерности в его работе. Характер изменения энергозатрат существенно отличается от характера изменения расхода топлива, что объясняется влиянием дополнительных факторов, в первую очередь – потерь энергии урожая вследствие уплотнения почвы и потерь энергии урожая вследствие нарушения агросроков выполнения посевных работ. При малых значениях ширины захвата (4–8 м) суммарные энергозатраты достигают недопустимо высоких значений – 917 270 МДж/га, что связано с многократным проходом техники по полю и увеличением времени выполнения работ.

На основе анализа градиента снижения энергозатрат при увеличении ширины захвата было выявлено, что интенсивность снижения энергозатрат максимальна в диапазоне ширины захвата от 4 до 10 м, после чего процесс замедляется, а при ширине более 14 м практически прекращается, что указывает на достижение технологического предела эффективности для данной конструкции трактора.

Выполнив математическую обработку полученных результатов, определили оптимальные параметры по суммарным энергозатратам:

- ширина захвата $B_{opt} = 16$ м;
- рабочая скорость $V_{opt} = 9$ км/ч;
- суммарные энергозатраты $E_{min} = 13006,0$ МДж/га.

Сравнительный анализ эффективности различных марок тракторов

Анализ данных, отражающих зависимость производительности агрегатов в зависимости от площади поля, позволяет выполнить оценку конкурентоспособности трактора МТЗ-3522 (табл. 2). Занимаемое им третье место в рейтинге среди 18 исследованных моделей является результатом не случайного стечения обстоятельств, а закономерным следствием рационально выбранных конструктивных параметров. Особенно показателен характер изменения производительности с увеличением площади обрабатываемого участка.

При работе на полях, имеющих малые площади (1–4 га), производительность агрегата с трактором МТЗ-3522 составляет 0,99–3,0 га/ч, что уже является весьма высоким показателем. Однако наиболее интересным является анализ динамики роста производительности при увеличении площади участка.

При работе на полях, имеющих средние площади (10–25 га), значение данного показателя достигает 5,2–7,2 га/ч, демонстрируя более интенсивный рост по сравнению с большинством конкурентов, что свидетельствует о высокой эффективности выбранной компоновочной схемы трактора и рациональном соотношении его энергетических и массовых параметров.

Таблица 2. Производительность агрегатов на посеве в зависимости от площади поля по маркам тракторов

Площадь поля, га	Производительность пахотного агрегата, га/ч																	
	ДТ-75М	Т-150	Т-4А	Т-150К	К-701	МТЗ-1522	МТЗ-1221	К-744Р2	К-3160	К-5250	Т-215 КАМАЗ	John Deere-8430	Buhler 485	Ares-836	Massey Ferguson-680	John Deere-9430	К-730М	МТЗ-3522
1	0,83	0,93	0,90	0,92	0,97	0,92	0,90	0,98	0,93	0,96	0,95	0,97	0,97	0,94	0,91	0,98	0,98	0,99
4	1,77	2,35	2,17	2,25	2,82	2,24	2,05	2,92	2,28	2,71	2,46	2,69	3,10	2,48	2,21	3,13	2,84	3,01
7	2,11	3,01	2,72	2,83	3,91	2,83	2,50	4,11	2,88	3,69	3,20	3,64	4,51	3,27	2,79	4,55	3,94	4,28
10	2,29	3,39	3,03	3,16	4,63	3,16	2,75	4,90	3,22	4,31	3,64	4,23	5,52	3,74	3,11	5,57	4,65	5,15
13	2,39	3,64	3,22	3,37	5,13	3,37	2,90	5,48	3,44	4,74	3,92	4,64	6,28	4,06	3,32	6,33	5,16	5,79
16	2,47	3,81	3,36	3,52	5,50	3,52	3,01	5,91	3,59	5,06	4,13	4,94	6,87	4,29	3,47	6,93	5,54	6,27
19	2,52	3,94	3,46	3,63	5,79	3,62	3,08	6,24	3,71	5,30	4,28	5,16	7,34	4,46	3,57	7,40	5,83	6,65
22	2,56	4,04	3,53	3,71	6,03	3,71	3,14	6,51	3,79	5,49	4,40	5,34	7,73	4,59	3,65	7,79	6,06	6,96
25	2,59	4,12	3,59	3,78	6,21	3,77	3,19	6,73	3,86	5,64	4,49	5,49	8,05	4,70	3,72	8,12	6,25	7,21
28	2,61	4,18	3,64	3,83	6,37	3,83	3,22	6,92	3,92	5,77	4,57	5,61	8,32	4,79	3,77	8,39	6,40	7,43
31	2,64	4,23	3,68	3,88	6,50	3,87	3,25	7,07	3,96	5,88	4,63	5,71	8,56	4,86	3,81	8,63	6,54	7,61
34	2,65	4,28	3,72	3,91	6,61	3,91	3,28	7,21	4,00	5,97	4,69	5,79	8,76	4,92	3,85	8,83	6,65	7,76
37	2,67	4,32	3,75	3,95	6,71	3,94	3,30	7,32	4,03	6,05	4,73	5,86	8,94	4,98	3,88	9,01	6,75	7,90
40	2,68	4,35	3,77	3,97	6,80	3,97	3,32	7,43	4,06	6,12	4,77	5,93	9,09	5,02	3,91	9,17	6,83	8,02
43	2,69	4,38	3,79	4,00	6,87	3,99	3,33	7,52	4,09	6,18	4,81	5,98	9,23	5,06	3,93	9,31	6,91	8,12
46	2,70	4,41	3,81	4,02	6,94	4,01	3,35	7,60	4,11	6,23	4,84	6,03	9,35	5,10	3,95	9,43	6,98	8,21
49	2,71	4,43	3,83	4,04	7,00	4,03	3,36	7,67	4,13	6,28	4,86	6,08	9,47	5,13	3,97	9,54	7,04	8,30
Место в рейтинге	18	11	16	13	6	14	17	4	12	7	10	8	2	9	15	1	5	3

Наиболее интересные закономерности раскрываются при анализе топливной экономичности агрегатов (табл. 3). На первый взгляд, 16-е место, которое занимает трактор МТЗ-3522 по этому показателю, может показаться неудовлетворительным результатом. Однако углубленный анализ характера изменения расхода топлива в зависимости от условий работы позволяет увидеть более сложную картину.

При работе на полях, имеющих малые площади (1–4 га), действительно наблюдается повышенный расход топлива – 14,6–7,4 кг/га, что объясняется значительной долей непроизводительных затрат энергии на маневрирование и холостые переезды. При этом принципиально важным является характер снижения удельного расхода с увеличением площади обрабатываемого участка.

Расход топлива при работе на полях, имеющих средние площади (10–25 га), снижается до 5,8963–5,3119 кг/га, демонстрируя более интенсивную динамику снижения по сравнению с большинством других аналогичных образцов техники.

Особенно показательным является тот факт, что при работе на полях, имеющих большие площади (40–49 га), расход топлива стабилизируется на уровне 5,1–5,2 кг/га, что лишь незначительно уступает показателям лучших образцов в этом классе, что свидетельствует о высокой эффективности силовой установки трактора при работе в оптимальных режимах.

Феномен относительно высокого расхода топлива находит свое объяснение при анализе конструктивных особенностей трактора МТЗ-3522. Повышенная энергонасыщенность (13,4 кВт/т) в сочетании с гидромеханической трансмиссией, имеющей большое количество передач, создает предпосылки для некоторого увеличения расхода топлива. Однако это компенсируется возможностью более точного выбора оптимального режима работы в различных условиях эксплуатации. Полный привод, требующий дополнительных энергозатрат, обеспечивает лучшую реализацию тяговых свойств, что особенно важно при работе с широкозахватными агрегатами.

Принципиально новое понимание эффективности работы трактора МТЗ-3522 дает анализ полученных данных по суммарным энергетическим затратам, приведенных в таблице 4. Шестое место в рейтинге по этому комплексному показателю указывает на высокую системную эффективность агрегата. При этом особую научную ценность представляет более детальное исследование структуры энергетических затрат. При работе на малых площадях суммарные затраты составляют 35 051–18 035 МДж/га, но с увеличением площади участка происходит их интенсивное снижение до 13 112–13 006 МДж/га на больших площадях, что достигается благодаря синергетическому эффекту нескольких факторов:

- во-первых, высокий тяговый КПД (до 0,63783) обеспечивает эффективное преобразование мощности двигателя в полезную работу;
- во-вторых, оптимальное соотношение массы и мощности позволяет минимизировать потери энергии на уплотнение почвы;
- в-третьих, эффективная система агрегатирования способствует снижению энергозатрат на холостые переезды и маневрирование.

Особого внимания заслуживает сравнительный анализ влияния компоновочных схем тракторов на их энергетическую эффективность. Данные, приведенные в таблице 4, показывают, что тракторы с классической компоновкой, к которым относятся такие модели, как МТЗ-3522 и John Deere-9430, демонстрируют более стабильные показатели энергетической эффективности при изменении условий работы. При этом МТЗ-3522 с энергозатратами 13 006 МДж/га на больших площадях существенно превосходит John Deere-9430 (20 940 МДж/га), что объясняется не только разницей показателей мощности, но и более совершенной конструкцией трансмиссии и ходовой системы.

Таблица 3. Погектарный расход топлива агрегатов на посеве в зависимости от площади поля по маркам тракторов

Площадь поля, га	Погектарный расход топлива, кг/га																	
	ДТ-75М	Т-150	Т-4А	Т-150К	К-701	МТЗ-1522	МТЗ-1221	К-74Р2	К-3160	К-5250	Т-215 КАМАЗ	John Deere-8430	Buhler 485	Ares-836	Massey Ferguson-680	John Deere-9430	К-730М	МТЗ-3522
1	6,05	6,23	5,95	6,60	6,78	5,66	5,80	11,48	8,92	9,90	8,32	15,72	18,36	9,33	10,86	14,31	11,27	14,65
4	4,85	4,93	4,60	5,30	5,00	4,71	4,86	6,57	5,86	5,83	5,46	8,64	8,53	5,80	6,13	6,71	6,30	7,36
7	4,68	4,75	4,41	5,11	4,75	4,57	4,73	5,87	5,42	5,25	5,05	7,62	7,12	5,29	5,45	5,62	5,60	6,31
10	4,61	4,67	4,33	5,04	4,65	4,52	4,67	5,59	5,25	5,02	4,88	7,22	6,56	5,09	5,18	5,18	5,31	5,90
13	4,58	4,63	4,29	5,00	4,59	4,49	4,64	5,44	5,15	4,89	4,80	7,00	6,25	4,98	5,03	4,95	5,16	5,67
16	4,55	4,61	4,27	4,97	4,56	4,47	4,63	5,34	5,09	4,82	4,74	6,86	6,06	4,91	4,94	4,80	5,06	5,53
19	4,54	4,59	4,25	4,95	4,53	4,46	4,61	5,28	5,05	4,76	4,70	6,77	5,93	4,86	4,88	4,70	5,00	5,44
22	4,53	4,58	4,23	4,94	4,52	4,45	4,60	5,23	5,02	4,72	4,68	6,70	5,84	4,83	4,84	4,63	4,95	5,37
25	4,52	4,57	4,22	4,93	4,50	4,44	4,60	5,19	5,00	4,69	4,66	6,65	5,77	4,80	4,80	4,57	4,92	5,31
28	4,51	4,56	4,22	4,92	4,49	4,44	4,59	5,17	4,98	4,67	4,64	6,61	5,71	4,78	4,77	4,53	4,89	5,27
31	4,51	4,55	4,21	4,92	4,49	4,43	4,59	5,14	4,97	4,65	4,63	6,58	5,67	4,77	4,75	4,50	4,86	5,24
34	4,50	4,55	4,21	4,91	4,48	4,43	4,58	5,13	4,96	4,64	4,62	6,55	5,63	4,75	4,73	4,47	4,85	5,21
37	4,50	4,55	4,20	4,91	4,47	4,43	4,58	5,11	4,95	4,62	4,61	6,53	5,60	4,74	4,72	4,44	4,83	5,19
40	4,49	4,54	4,20	4,91	4,47	4,43	4,58	5,10	4,94	4,61	4,60	6,51	5,57	4,73	4,71	4,42	4,82	5,17
43	4,49	4,54	4,19	4,90	4,46	4,42	4,58	5,08	4,93	4,60	4,59	6,49	5,55	4,72	4,70	4,40	4,80	5,15
46	4,49	4,54	4,19	4,90	4,46	4,42	4,57	5,07	4,93	4,59	4,59	6,48	5,53	4,72	4,69	4,39	4,79	5,13
49	4,49	4,53	4,19	4,90	4,46	4,42	4,57	5,07	4,92	4,59	4,58	6,47	5,51	4,71	4,68	4,37	4,79	5,12
Место в рейтинге	5	6	1	13	2	3	7	15	14	9	8	18	17	11	10	4	12	16

Таблица 4. Суммарные энергозатраты агрегатов на посеве в зависимости от площади поля по маркам тракторов

Площадь поля, га	Суммарные энергетические затраты, МДж/га x10 ⁻³														Место в рейтинге			
	ДТ-75М	Т-150	Т-4А	Т-150К	К-701	MT3-1522	MT3-1221	К-74Р2	К-3160	К-5250	Т-215 КАМАЗ	John Deere-8430	Buhler 485	Ares-836		Massey Ferguson-680	John Deere-9430	К-730М
1	30,1	30,6	31,5	42,3	39,1	33,0	32,2	45,9	30,5	34,0	40,8	42,6	42,1	34,8	41,5	43,5	41,1	35,1
4	13,6	11,8	13,8	27,0	22,3	18,2	17,8	28,9	15,3	17,2	25,2	26,1	24,4	18,5	26,3	26,1	24,2	18,0
7	11,5	9,7	11,7	24,9	19,9	16,1	15,8	26,5	13,2	14,9	23,0	23,8	22,0	16,2	24,2	23,7	21,9	15,7
10	10,7	8,8	10,9	24,1	19,0	15,3	15,0	25,6	12,3	14,0	22,2	22,9	21,0	15,3	23,3	22,7	20,9	14,8
13	10,2	8,4	10,4	23,6	18,5	14,9	14,5	25,1	11,9	13,5	21,7	22,4	20,5	14,9	22,9	22,2	20,4	14,3
16	10,0	8,1	10,1	23,3	18,2	14,6	14,3	24,8	11,6	13,2	21,4	22,1	20,1	14,6	22,6	21,9	20,1	13,9
19	9,8	7,9	9,9	23,1	18,0	14,4	14,1	24,5	11,4	12,9	21,2	21,9	19,9	14,4	22,4	21,7	19,9	13,7
22	9,6	7,8	9,8	23,0	17,8	14,3	13,9	24,4	11,2	12,8	21,1	21,8	19,7	14,2	22,3	21,5	19,8	13,6
25	9,5	7,7	9,7	22,9	17,7	14,2	13,8	24,3	11,1	12,7	21,0	21,7	19,6	14,1	22,2	21,4	19,6	13,4
28	9,4	7,6	9,6	22,8	17,6	14,1	13,8	24,2	11,0	12,6	20,9	21,6	19,5	14,0	22,1	21,3	19,6	13,3
31	9,4	7,5	9,5	22,7	17,6	14,0	13,7	24,1	11,0	12,5	20,8	21,5	19,4	13,9	22,0	21,2	19,5	13,3
34	9,3	7,5	9,5	22,7	17,5	14,0	13,6	24,0	10,9	12,4	20,8	21,4	19,4	13,9	21,9	21,2	19,4	13,2
37	9,3	7,4	9,4	22,6	17,4	13,9	13,6	24,0	10,9	12,4	20,7	21,4	19,3	13,8	21,9	21,1	19,4	13,2
40	9,2	7,4	9,4	22,6	17,4	13,9	13,6	23,9	10,8	12,4	20,7	21,3	19,3	13,8	21,9	21,1	19,3	13,1
43	9,2	7,3	9,3	22,6	17,4	13,8	13,5	23,9	10,8	12,3	20,6	21,3	19,2	13,7	21,8	21,0	19,3	13,1
46	9,2	7,3	9,3	22,5	17,3	13,8	13,5	23,9	10,8	12,3	20,6	21,3	19,2	13,7	21,8	21,0	19,2	13,0
49	9,1	7,3	9,3	22,5	17,3	13,8	13,5	23,8	10,7	12,3	20,6	21,2	19,2	13,7	21,8	20,9	19,2	13,0
2	1	3	17	10	9	8	18	4	5	13	15	11	7	16	14	12	6	

Примечательным является сравнение с шарнирно-сочлененными тракторами типа К-744Р2. Несмотря на теоретические преимущества такой схемы в маневренности, данные показывают более высокую вариативность энергозатрат у этих машин – от 45 919 МДж/га на малых участках до 23 824 МДж/га на больших площадях. Это свидетельствует о меньшей универсальности шарнирно-сочлененной схемы и ее повышенной чувствительности к условиям эксплуатации.

Зарубежные модели с бесступенчатыми трансмиссиями, такие как John Deere-9430, демонстрируют лучшую адаптивность к различным условиям работы, что отражается в более плавном изменении энергозатрат с ростом площади участка. Однако даже эти высокотехнологичные машины не показывают существенного преимущества над МТЗ-3522 по суммарным энергозатратам. Это подтверждает рациональность выбранных конструктивных решений белорусского трактора.

Анализ изменения производительности в зависимости от площади поля (табл. 2) раскрывает интересную закономерность в работе агрегата с трактором МТЗ-3522. При увеличении площади с 1 до 49 га рост производительности происходит более интенсивно, чем у большинства конкурентов. Так, если на участке 1 га производительность составляет 0,99 га/ч, то на участке 49 га она достигает 8,3 га/ч, демонстрируя увеличение в 8,4 раза. Если сравнивать с трактором К-744Р2, увеличение составляет 7,86 раза, поэтому можно сделать вывод, что МТЗ-3522 более приспособлен для работ на полях разной площади.

При более подробном анализе тяговых показателей, которые представлены в таблицах, можно определить оптимальное соотношение между мощностью двигателя и массой трактора МТЗ-3522. При работе с широкозахватными посевными агрегатами это позволяет обеспечить наилучшее соотношение между тяговым усилием и уплотнением почвы. Тяговый КПД трактора достигает своего максимума в диапазоне скоростей 8–10 км/ч. Именно эта скорость отвечает агротехническим требованиям к посеву и обеспечивает минимальные энергозатраты при использовании данного трактора.

Проанализируем влияние скоростных режимов на энергоэффективность различных тракторов. Данные таблицы 1 позволяют оценить взаимосвязь скоростных режимов и энергоэффективности представленных тракторов. Так, для МТЗ-3522 при ширине захвата 16 м увеличение рабочей скорости с 5 до 9 км/ч приводит к прогрессивному снижению энергозатрат с 14 901 до 13 006 МДж/га. При этом дальнейшее увеличение скорости не дает существенного улучшения показателей, что указывает на достижение оптимального режима работы агрегата.

Проведенный сравнительный анализ эффективности использования мощности двигателя при различных скоростных режимах показал, что при оптимальной скорости 9 км/ч трактор МТЗ-3522 способен использовать 347,75 л.с. из возможных 355 л.с., что составляет 97,96% от номинальной мощности. Это значение намного больше, чем у большинства конкурентов. Например, трактор К-744Р2 при тех же условиях способен использовать только около 90% от номинальной мощности, а как следствие, его удельные энергозатраты будут более высокими.

Одной из особенностей МТЗ-3522 является зависимость изменения тягового КПД при увеличении скорости. Так, при изменении скорости с 5 до 9 км/ч происходит рост тягового КПД с 0,63756 до 0,63783, при дальнейшем увеличении скорости КПД незначительно снижается. Это говорит о том, что в трансмиссии правильно подобраны передаточные числа, что позволяет проводить оптимальную загрузку двигателя в соответствии с режимами работы агрегата.

В отличие от моделей, оснащенных автоматической коробкой передач, таких как John Deere-9430 с его «Automatic Power Shift», где изменение скорости происходит автоматически, МТЗ-3522 обеспечивает ступенчатое регулирование. Однако большое коли-

чество передач (36 вперед) позволяет подобрать практически оптимальный режим для любых условий работы. Это подтверждается данными таблицы 2, где показано, что производительность МТЗ-3522 на больших площадях (8,3 га/ч) лишь незначительно уступает John Deere-9430 (9,5 га/ч), несмотря на существенную разницу в стоимости машин.

Как известно, основные потери энергии связаны с буксованием движителей и уплотнением почвы, что подтверждается исследованием зависимости энергетического баланса при движении на разных скоростях. Так, при скорости движения 9 км/ч и ширине захвата 16 м буксование равно 12,5%, это значение находится в допустимых пределах и обеспечивает необходимую тяговую мощность. При таком режиме работы снижение урожайности от уплотнения почвы составляет 9792,1 МДж/га, что значительно меньше, чем у более тяжелых тракторов того же тягового класса.

Оценка влияния состава посевных комплексов на эффективность работы

Сравнение производительности посевных комплексов с различной шириной захвата позволяет выявить важные особенности их агрегатирования с современными тракторами. Например, трактор МТЗ-3522 показывает высокую эффективность при работе в составе с широкозахватными агрегатами, что подтверждается данными таблицы 1. При увеличении ширины захвата с 12 до 16 м производительность возрастает с 4,4 до 8,3 га/ч, одновременно суммарные энергозатраты уменьшаются с 27 533 до 13 006 МДж/га.

Также можно отметить характер изменения энергетических показателей при различных вариантах агрегатирования. При оптимальной ширине захвата 16 м отмечается наилучшее соответствие энергетических характеристик трактора и посевного агрегата. Тяговый КПД достигает максимального значения (0,64), что значительно выше, чем у большинства аналогичных образцов техники. Это можно объяснить правильным выбором передаточного числа трансмиссии трактора и оптимальным распределением массы трактора.

Сравнение различных тракторов по энергоэффективности показывает, что модель МТЗ-3522 обладает наилучшими характеристиками в своем тяговом классе. При работе с широкозахватными агрегатами он демонстрирует производительность, сопоставимую с более мощными тракторами John Deere-9430 и Buhler-485, но при этом обеспечивает лучшие показатели энергетической эффективности. Так, при максимальной ширине захвата суммарные энергозатраты МТЗ-3522 составляют 13 006 МДж/га, в то время как у John Deere-9430 этот показатель достигает 20 940 МДж/га.

Обобщающий анализ результатов исследования

По результатам комплексного исследования эффективности работы трактора МТЗ-3522 можно сделать ряд принципиально важных выводов о характере взаимодействия конструктивных и эксплуатационных параметров машинно-тракторного агрегата. Установлено, что оптимальные режимы работы агрегата достигаются при ширине захвата 16 м и рабочей скорости 9 км/ч. Такой режим работы позволяет обеспечить наилучшее сочетание производительности, топливной экономичности и энергетической эффективности.

Приведенные значения изменения тягового КПД и величины буксования в зависимости от режимов работы машинно-тракторного агрегата свидетельствуют об оптимально сбалансированной конструкции трактора. Широкий диапазон изменения тягового КПД от 0,45 при минимальной ширине захвата до 0,64 при максимальной указывает на возможность значительного повышения энергетической эффективности МТА при правильном выборе режимов его работы.

При сравнительном анализе показателей работы трактора МТЗ-3522 с ближайшими конкурентами можно сделать вывод, что данный трактор обладает значительными конкурентными преимуществами, имея высокую производительность (3-е место среди 18 моделей) и хорошую энергоэффективность (6-е место по суммарным энерго-

затратам), что стало возможным благодаря рациональному выбору конструктивных параметров и используемой системе агрегатирования.

Проведенные сравнительные исследования эффективности применения трактора МТЗ-3522 в составе посевного агрегата позволяют сделать ряд выводов, имеющих важное значение с точки зрения как научного, так и практического применения.

В результате анализа установлено, что эффективность работы машинно-тракторного агрегата зависит от конструктивных параметров трактора и от режимов его работы. Наилучшие показатели эффективности работы посевного агрегата с трактором МТЗ-3522 достигаются при ширине захвата 16 м и рабочей скорости 9 км/ч. При этих параметрах производительность составляет 8,29 га/ч, удельный расход топлива – 5,12 кг/га, а суммарные энергозатраты – 13 006 МДж/га.

Представленные исследования энергоэффективности агрегата показали существенные преимущества конструкции трактора МТЗ-3522 по сравнению с конкурентами. Высокий тяговый КПД (0,64) и рациональное распределение массы обеспечивают эффективное использование мощности двигателя при работе посевного агрегата. Максимальное значение буксования (12,5%) находится в допустимых пределах, что также свидетельствует о хорошей сбалансированности конструкции трактора.

Третье место по производительности и шестое по энергоэффективности среди 18 исследованных моделей тракторов свидетельствуют о сбалансированности характеристик трактора по сравнению с другими моделями в данном тяговом классе. Также важно отметить, что МТЗ-3522 требует существенно меньших капитальных затрат на его приобретение по сравнению с зарубежными аналогами.

Кроме того, исследование зависимостей эффективности использования посевного агрегата от условий его эксплуатации позволило сделать заключение, что трактор МТЗ-3522 менее чувствителен к изменению площади обрабатываемых участков по сравнению со всеми приведенными моделями. Снижение удельного расхода топлива в 2,86 раза при увеличении площади участка с 1 до 49 га говорит о способности трактора адаптироваться к различным условиям работы.

Анализ эксплуатационных характеристик трактора МТЗ-3522 показал, что наличие гидромеханической трансмиссии с 36 передачами переднего хода позволяет обеспечить оптимальный режим работы двигателя во всем диапазоне скоростей, что, в свою очередь, положительно влияет на показатели топливной экономичности при сохранении высокой производительности агрегата. В полной мере трактор реализует свой конструктивный потенциал при работе на полях площадью более 25 га.

Результаты сравнительного анализа широкой линейки тракторов показывают, что модель МТЗ-3522 является современной высокоэффективной машиной, успешно конкурирующей с лучшими мировыми образцами. Сочетание высокой производительности с хорошей топливной экономичностью и низкими энергозатратами дает основание считать его оптимальным выбором для крупных и средних сельскохозяйственных предприятий, специализирующихся на производстве зерновых культур.

Выводы

1. Оптимизация параметров трактора МТЗ-3522 выявила существование устойчивой закономерности между шириной захвата, рабочей скоростью и показателями эффективности:

- максимальная производительность (8,29 га/ч), минимальный расход топлива (5,12 кг/га) и минимальные энергозатраты (13 006 МДж/га) достигаются при ширине захвата 16 м и скорости 9 км/ч;

- данное сочетание параметров обеспечивает компромисс между загрузкой двигателя, буксованием движителей и коэффициентом использования времени смены;

- установленный оптимум является устойчивым в широком диапазоне условий эксплуатации.

2. Сравнительный анализ с другими тракторами выявил следующие преимущества МТЗ-3522:

- высокая производительность (3-е место среди 18 моделей) достигается благодаря оптимальному соотношению мощности двигателя и эксплуатационной массы;
- значительное преимущество по суммарным энергозатратам (6-е место) обусловлено эффективной реализацией тяговой мощности;
- выявлена способность трактора поддерживать высокие показатели эффективности в широком диапазоне условий работы.

3. Установлены фундаментальные взаимосвязи между конструктивными особенностями трактора и его эксплуатационными показателями:

- гидромеханическая трансмиссия с 36/24 передачами обеспечивает оптимальный режим работы двигателя;
- распределение массы по осям 60/40 способствует более высокой тяговой эффективности;
- конструкция ходовой системы минимизирует потери энергии на уплотнение почвы.

4. Выявлены закономерности изменения показателей эффективности в зависимости от размера обрабатываемых участков:

- при работе на полях, имеющих малые площади (до 10 га), определяющим фактором является маневренность;
- при работе на полях, имеющих средние площади (10–25 га), наибольшее влияние оказывает тяговый КПД;
- при работе на полях, имеющих большие площади (свыше 25 га), ключевую роль играет стабильность характеристик.

5. Определены возможные пути повышения эффективности использования трактора МТЗ-3522:

- оптимизация давления в шинах в зависимости от почвенных условий;
- рациональное комплектование с широкозахватными посевными комплексами;
- использование систем параллельного вождения для сокращения (минимизации) потерь времени.

6. Установлены экономические преимущества МТЗ-3522:

- более низкие капиталоемкость и текущие издержки эксплуатации по сравнению с зарубежными аналогами;
- доступность запасных частей и сервисного обслуживания;
- высокая остаточная стоимость при перепродаже.

На основании проведенного исследования можно сформулировать следующие практические рекомендации.

1. Для крупных и средних хозяйств:

- использовать трактор МТЗ-3522 преимущественно на полях, имеющих площадь более 25 га;

- комплектовать с посевными комплексами шириной захвата 14–16 м;

- поддерживать рабочую скорость в диапазоне 8–10 км/ч.

2. Для повышения топливной экономичности:

- регулярно проводить настройку топливной аппаратуры;

- контролировать буксование в пределах 8–12%;

- использовать оптимальные передачи трансмиссии.

3. Для максимальной производительности:

- организовать работу в две смены;

- минимизировать время на развороты и технологическое обслуживание;

- применять групповой метод работы агрегатов.

4. Для снижения энергозатрат:

- проводить посев в оптимальные агротехнические сроки;
- поддерживать оптимальное техническое состояние двигателя и трансмиссии;
- использовать рациональные схемы движения по полю;
- создавать наиболее низкое допустимое производителем давление в шинах движителей;
- для начала работ в более ранние сроки использовать сдвиг шин на бортах с последующим снижением давления в шинах исходя из снижения вертикальной нагрузки на колесо.

Таким образом, проведенное исследование доказывает высокую эффективность трактора МТЗ-3522 при выполнении посевных работ и позволяет научно обосновать рекомендации по его оптимальному использованию в различных производственных условиях.

Список источников

1. Беляев В.И. Закономерности изменения показателей качества посева яровой пшеницы посевными комплексами с различными высевальными рабочими органами // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2024. № 12(242). С. 84–90. DOI: 10.53083/1996-4277-2024-242-12-84-90.
2. Войтко И.А., Кохнович И.Н. Стратегия управления затратами в сельском хозяйстве Республики Беларусь на основе бережливого производства // Агропанорама. 2024. № 3(163). С. 37–42. DOI: 10.56619/2078-7138-2024-163-3-37-42.
3. Габитов И.И., Гайнуллин И.А., Ахметов А.Ф. Обоснование режимов работы трактора К-735 с почвообрабатывающе-посевным комплексом Кузбасс ПК 6.1 // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2024. № 1(69). С. 97–103. DOI: 10.31563/1684-7628-2024-69-1-97-103.
4. Габитов И.И., Мударисов С.Г., Гайнуллин И.А. и др. Повышение эксплуатационных показателей почвообрабатывающе-посевного комплекса Кузбасс ПК 6.1 на базе трактора «Кировец» К-735 // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2024. № 2(70). С. 88–94. DOI: 10.31563/1684-7628-2024-70-2-88-94.
5. Лахович А.Е., Кецо В.Н. Эффективность комплектования мобильных машинно-тракторных агрегатов на базе тракторов «Беларус» // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сборник научных работ. Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2018. № 1(17). С. 213–218.
6. Нурмурадов А., Акмурадов Х., Черкезов С. Влияние современных технологий на производительность и снижение затрат в сельском хозяйстве // In Situ. 2024. № 11. С. 169–171.
7. ПРОФИ-ТЕСТ: «БЕЛАРУС-3522» против сложных почвенно-климатических условий [Электронный ресурс] // Информационное Агентство «АгроИнфо». Дата публикации: 03.09.2013. URL: <https://agroinfo.kz/profi-test-belarus-3522-protiv-slozhnyh-pochvenno-klimaticheskix-uslovij/xt=2.%20Трактор%20«Беларус,Трактор> (дата обращения: 07.03.2025).
8. Сенников В.А., Сивоконь А.М., Сенникова Н.Н. и др. Результаты экспериментальных исследований по повышению эффективности технологии посевных работ // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 2(100). С. 105–109.
9. Хафизов К.А., Адигамов Н.Р., Хафизов Р.Н. Оптимизация основных параметров колесного трактора, работающего в составе посевного агрегата // Техника и оборудование для села. 2017. № 4. С. 30–33.
10. Хафизов К.А., Зиганшин Б.Г., Валиев А.Р. и др. Сервис импортной и отечественной сельскохозяйственной техники и оборудования в современных условиях: учебное пособие. Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2009. Т. 1. 444 с.
11. Хафизов К.А., Хафизов Р.Н., Нурмиев А.А. Анализ влияния энергоемкости технологической операции на оптимальные значения основных параметров трактора «Беларусь» // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2025. Т. 20, № 2(78). С. 113–124. DOI: 10.12737/2073-0462-2025-113-124.

References

1. Belyaev V.I. Patterns of change of quality indices of spring wheat crops by seeding complexes with different seeding working bodies. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2024;12(242):84-90. DOI: 10.53083/1996-4277-2024-242-12-84-90. (In Russ.).
2. Voytko I.A., Kokhnovich I.N. Cost management strategy in agriculture of the Republic of Belarus based on lean manufacturing. *Agropanorama*. 2024;3(163):37-42. DOI: 10.56619/2078-7138-2024-163-3-37-42. (In Russ.).
3. Gabitov I.I., Gaynullin I.A., Akhmetov A.F. Justification of the operating modes of the K-735 tractor with the Kuzbass PK 6.1 tillage and sowing complex. *Vestnik of the Bashkir State Agrarian University*. 2024;1(69):97-103. DOI: 10.31563/1684-7628-2024-69-1-97-103. (In Russ.).
4. Gabitov I.I., Mudarisov S.G., Gaynullin I.A. et al. Improving operational performance of the Kuzbass PK 6.1 tillage and sowing complex based on the Kirovets K-735 tractor. *Vestnik of the Bashkir State Agrarian University*. 2024;2(70):88-94. DOI: 10.31563/1684-7628-2024-70-2-88-94. (In Russ.).
5. Lakhovich A.E., Ketsko V.N. Efficiency of combining mobile machine-tractor units on the basis of tractors Belarus. In: Design, use and reliability of agricultural machinery: Collection of research papers. Bryansk: Bryansk State Agrarian University Publishers. 2018;1(17):213-218. (In Russ.).
6. Nurmuradov A., Akmuradov Kh., Cherkezov S. The impact of modern technologies on productivity and cost reduction in agriculture. *In Situ*. 2024;11:169-171. (In Russ.).
7. PROFI-TEST: BELARUS-3522 against difficult soil and climatic conditions. Information Agency AgroInfo. Publication date: 03.09.2013. URL: <https://agroinfo.kz/profi-test-belarus-3522-protiv-slozhnyx-pochvenno-klimaticheskix-uslovij/xt=2.%20Трактор%20«Беларус,Трактор>. (In Russ.).
8. Sennikov V.A., Sivokon A.M., Sennikova N.N. et al. Results of experimental studies to improve the efficiency of sowing technology. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2023;2(100):105-109. (In Russ.).
9. Khafizov K.A., Adigamov N.R., Khafizov R.N. Optimization of basic parameters of a wheeled tractor coupled with sowing unit. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2017;4:30-33. (In Russ.).
10. Khafizov K.A., Ziganshin B.G., Valiev A.R. et al. Service of imported and domestic agricultural machinery and equipment in modern conditions: study guide. Kazan: Kazan State Agrarian University Publishers; 2009. Vol. 1. 444 p. (In Russ.).
11. Khafizov K.A., Khafizov R.N., Nurmiev A.A. Analysis of the influence of the energy intensity of technological operation on optimal values of basic parameters of "Belarus" tractor. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2025;20(2):113-124. DOI: 10.12737/2073-0462-2025-113-124. (In Russ.).

Информация об авторах

K.A. Хафизов – доктор технических наук, зав. кафедрой «Тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов» ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», fts-kgau@mail.ru.
P.H. Хафизов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов» ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», ramilajz@mail.ru.
A.A. Нурмиев – старший преподаватель кафедры «Тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов» ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», azat-nurmiev@mail.ru.
M.H. Яровой – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизация животноводства и безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», jromi@mail.ru.

Information about the authors

K.A. Khafizov, Doctor of Engineering Sciences, Head of the Dept. of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes, Kazan State Agrarian University, fts-kgau@mail.ru.
R.N. Khafizov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes, Kazan State Agrarian University, ramilajz@mail.ru.
A.A. Nurmiev, Senior Lecturer, the Dept. of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes, Kazan State Agrarian University, azat-nurmiev@mail.ru.
M.N. Yarovoy, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Livestock Mechanization, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, jromi@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 20.09.2025; одобрена после рецензирования 26.10.2025; принята к публикации 06.11.2025.

The article was submitted 20.09.2025; approved after reviewing 23.10.2025; accepted for publication 06.11.2025.

© Хафизов К.А., Хафизов Р.Н., Нурмиев А.А., Яровой М.Н., 2025