

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАКТОРА «БЕЛАРУСЬ»**К. А. Хафизов, Р. Н. Хафизов, А. А. Нурмиев**

Реферат. В исследовании представлен комплексный анализ зависимости оптимальных параметров тракторов серии «Беларусь» от энергоемкости выполняемых сельскохозяйственных операций. Научная новизна работы заключается в применении системного энергетического подхода к оптимизации параметров машинно-тракторных агрегатов через призму совокупных энергетических затрат, включающих не только прямые эксплуатационные расходы, но и энергетическую оценку потенциальных потерь урожая. Исследование базируется на серии вычислительных экспериментов с использованием верифицированной математической модели, учитывающей взаимосвязь между основными параметрами трактора (масса, мощность двигателя), характеристиками агрегата (ширина захвата, рабочая скорость) и энергоемкостью различных технологических операций. Экспериментальная часть охватывает широкий спектр сельскохозяйственных работ: от ранневесенних операций с минимальной энергоемкостью (боронование, закрытие влаги) до энергозатратных операций основной обработки почвы (глубокое рыхление, вспашка). Установлены четкие количественные зависимости между удельным сопротивлением почвы и оптимальными параметрами трактора. В частности, выявлено, что увеличение удельного сопротивления на каждый кН/м требует пропорционального увеличения массы трактора на 5,1 кН и мощности двигателя на 19 л.с. Впервые установлена существенная дифференциация в характере влияния энергоемкости операций на оптимальные параметры тракторов в зависимости от сезона проведения работ. На основе полученных результатов предложена научно обоснованная сегментация тракторного парка на три специализированные группы: легкие тракторы (25-35 кН, 80-150 л.с. - МТЗ серии 800, 900) для ранневесенних работ (боронование, культивация), средние (100-120 кН, 250-350 л.с. - МТЗ серии 3000) для прямых посевных работ и дискования почвы, и тяжелые (130-150 кН, 400-500 л.с. - МТЗ серии 4000) для основной обработки почвы (вспашка, глубокое рыхление почвы). Данная сегментация обеспечивает оптимальное использование энергетического потенциала техники при минимизации суммарных энергозатрат, а значит и потерь урожая в различных производственных условиях.

Ключевые слова: энергоемкость, агрегат, оптимизация, анализ, затраты, сезонная, эффективность.

Введение. Современное развитие агропромышленного комплекса характеризуется возрастающими требованиями к энергетической эффективности сельскохозяйственных операций при одновременном повышении их производительности и качества выполнения [1]. В этом контексте особую актуальность приобретает оптимизация параметров тракторной техники с учетом специфики выполняемых технологических операций и условий их проведения.

Холдинг «МТЗ-ХОЛДИНГ» за свою почти 70-летнюю историю прошел значительный путь развития от производителя универсально-пропашных тракторов одного тягового класса до создания широкой линейки современной техники, охватывающей практически все классы тракторов, востребованные в сельском хозяйстве. Данная трансформация актуализирует необходимость научного обоснования параметров выпускаемой техники с учетом энергоемкости выполняемых операций и специфики их сезонного распределения.

Особенность представленного исследования заключается в применении системного энергетического подхода, позволяющего оценить эффективность использования тракторов не только через призму прямых энергетических затрат, но и с учетом энергетической оценки потенциальных потерь урожая, возникающих при неоптимальном выборе параметров техники.

Исследования [2, 3, 4] показывают, что несоответствие массы и мощности трактора условиям эксплуатации может привести к перерасходу топлива до 25-30% и снижению производительности на 15-20%. Особенно актуальна данная проблема для тракторов серии "Беларусь", которые широко используются в различных технологических операциях с существенно различающейся энергоемкостью.

Энергоемкость технологической операции, представляет собой количество энергии, затрачиваемой на выполнение единицы работы [5]. При этом данный показатель существенно варьируется в зависимости от вида выполняемых работ: от 2,5-3,5 кВт·ч/га при бороновании до 15-20 кВт·ч/га при вспашке тяжелых почв. В наших исследованиях для выражения энергоемкости технологической операции мы будем принимать удельное сопротивление сельскохозяйственной машины, кН/м.

Таким образом целью исследования является выявление характера влияния энергоемкости технологической операции на основные параметры трактора МТЗ.

Условия, материалы и методы. Исследование базируется на системном энергетическом анализе, рассматривающем машинно-тракторный агрегат (МТА) как комплексную систему преобразования энергии в процессе выполнения технологических операций [6, 7, 8]. Ключевой особенностью

предложенного подхода является интеграция энергетических потерь урожая в общую систему оценки эффективности МТА, что позволяет оптимизировать параметры техники с учетом её влияния на конечный результат сельскохозяйственного производства.

Разработанная математическая модель [9, 10, 11] оперирует следующим критерием оптимизации:

$$\sum \Xi = \Xi_{\text{изг.тр}} + \Xi_{\text{изг.сх}} + \Xi_{\text{кр.тр}} + \Xi_{\text{ТОР.тр}} + \Xi_{\text{ТОР.сх}} + \Xi_{\text{упр}} + \Xi_{\text{тсм}} + \Xi_{\text{агр}} + \Xi_{\text{упл}} \rightarrow \min$$

где:

$\sum \Xi$ - удельные суммарные энергетические затраты, МДж/га;

$\Xi_{\text{изг.тр}}$, $\Xi_{\text{изг.сх}}$ - энергия на изготовление трактора и сельхозмашины, МДж/га;

$\Xi_{\text{кр.тр}}$ - энергозатраты на капитальный ремонт трактора, МДж/га;

$\Xi_{\text{ТОР.тр}}$, $\Xi_{\text{ТОР.сх}}$ - энергозатраты на техническое обслуживание и ремонт, МДж/га;

$\Xi_{\text{упр}}$ - энергозатраты на управление агрегатом, МДж/га;

$\Xi_{\text{тсм}}$ - энергия топливно-смазочных материалов, МДж/га;

$\Xi_{\text{агр}}$ - энергопотери с урожаем из-за нарушения агросроков, МДж/га;

$\Xi_{\text{упл}}$ - энергопотери с урожаем от уплотнения почвы, МДж/га.

Исследование реализовано через серию вычислительных экспериментов в среде MATLAB, охватывающих основной спектр полевых операций [12, 13, 14]:

Ранневесенние работы: Боронование (закрытие влаги); Предпосевная культивация;

Посевные работы: Посев по подготовленной почве; Прямой посев;

Основная обработка почвы: Дискование; Вспашка; Глубокое рыхление.

Для каждой операции варьировались следующие параметры: Удельное сопротивление почвы (кН/м); Масса трактора; Мощность двигателя; Рабочая скорость; Ширина захвата агрегата.

Базовые условия моделирования включали: Площадь поля: 100 га; Длина гона: 1 км;

Расстояние между полями: 3 км; Время работы в сутки: 16 ч; Планируемая урожайность: 40 ц/га.

Специфические параметры по типам операций систематизированы в матрицу технологических коэффициентов, учитывающую: Сезонные особенности почвенных условий; Характеристики движителей; Агротехнические требования; Временные ограничения.

Обработка результатов включала: Построение функциональных зависимостей параметров трактора от энергоёмкости операций; Анализ сезонной дифференциации энергозатрат; Оценку влияния параметров МТА на потери урожая; Определение оптимальных диапазонов параметров для различных условий.

Результаты и обсуждение. Проведенные исследования выявили существенную дифференциацию энергоёмкости различных технологических операций, что определяет специфические требования к параметрам используемых тракторов. Установлено три четко выраженных кластера операций по уровню энергоёмкости:

- низкоэнергоёмкие операции (ранневесенние работы): Боронование: 1,1-1,5 кН/м; Предпосевная культивация: 2,0-4,0 кН/м;

- среднеэнергоёмкие операции (посевные работы): Посев по подготовленной почве: 1,8-3,0 кН/м; Прямой посев: 5,0-9,0 кН/м;

- высокоэнергоёмкие операции (основная обработка почвы): Дискование: 7,0-11,0 кН/м; Вспашка: 40,0-80,0 кН/м²; Глубокое рыхление: 16,0-21,0 кН/м.

Результаты расчетов приведены в таблицах 1-7.

Первая серия вычислительных экспериментов была направлена на исследование влияния удельного сопротивления почвы при бороновании на оптимальные параметры трактора. Боронование как технологическая операция представляет особый интерес, поскольку характеризуется сравнительно низкой энергоёмкостью, но высокой чувствительностью к срокам проведения работ.

Таблица 1 - Влияние удельного сопротивления почвы рабочим органам бороновального агрегата на вес трактора и мощность его двигателя

Параметры	Удельное сопротивление почвы, кН/м			Изменение параметра при росте энергоёмкости операции *
	1,1	1,3	1,5	
1	2	3	4	5
Оптимальный вес трактора (Mt), кН	26,29	26,29	26,29	const
Потребная мощность двигателя (N), л.с.	100,11	86,72	98,26	$N \rightarrow \approx \langle N \rangle *$
Оптимизированная скорость (V) агрегата, км/ч	12,00	12,00	12,00	$V \rightarrow \approx \langle V \rangle$
Оптимизированная ширина захвата (B) агрегата, м	9,14	6,57	6,57	$B \rightarrow \downarrow$

1	2	3	4	5
Оптимизированная производительность (W) агрегата, га/ч	7,05	5,28	5,28	$W \rightarrow \downarrow$
Удельный расход топлива (G_h), кг/га	3,81	4,62	4,66	$G_h \rightarrow \uparrow$
Минимальные удельные суммарные энергозатраты (E_Σ), МДж/га	2433,35	3186,87	3188,80	$E_\Sigma \rightarrow \uparrow$

* Примечание: $\rightarrow \approx$ колеблется около; $\langle N \rangle$ - среднее значение; $\rightarrow \downarrow$ - стремится к понижению; $\rightarrow \uparrow$ - стремится к повышению; $[\delta]$ - допустимое значение

Анализ полученных результатов (табл. 1), выявил ряд принципиально важных закономерностей. Прежде всего, обращает на себя внимание стабильность оптимального веса трактора, который сохраняет значение 26,29 кН во всем исследованном диапазоне удельных сопротивлений почвы (1,1-1,5 кН/м). Эта особенность указывает на существование устойчивой зоны оптимума массы трактора для данного типа технологических операций.

При этом потребная мощность двигателя демонстрирует нелинейный характер изменения, колеблясь в диапазоне 86,72-100,11 л.с. Такое поведение объясняется комплексным влиянием двух противоположно направленных факторов: с одной стороны, рост удельного сопротивления требует увеличения мощности, с другой – адаптивное уменьшение ширины захвата агрегата частично компенсирует это требование.

Особого внимания заслуживает установленная закономерность изменения ширины захвата агрегата. При увеличении удельного

сопротивления почвы происходит ступенчатое снижение оптимальной ширины захвата с 9,14 м до 6,57 м, что сопровождается соответствующим снижением производительности с 7,05 до 5,28 га/ч. Данная адаптация параметров агрегата направлена на поддержание оптимального баланса между энергетическими затратами и производительностью.

Энергетическая эффективность процесса боронования отражается в динамике удельного расхода топлива и суммарных энергозатрат. Установлено, что увеличение удельного сопротивления почвы на 0,4 кН/м приводит к росту расхода топлива на 0,85 кг/га (с 3,81 до 4,66 кг/га) и увеличению суммарных энергозатрат на 755,45 МДж/га (с 2433,35 до 3188,80 МДж/га). Эта закономерность имеет практическое значение для прогнозирования энергетических затрат при работе в различных почвенных условиях.

Характер изменения суммарных энергетических затрат в зависимости от массы трактора (вариант с сопротивлением агрегата 1,1 кН/м) представлен на рисунке 1.

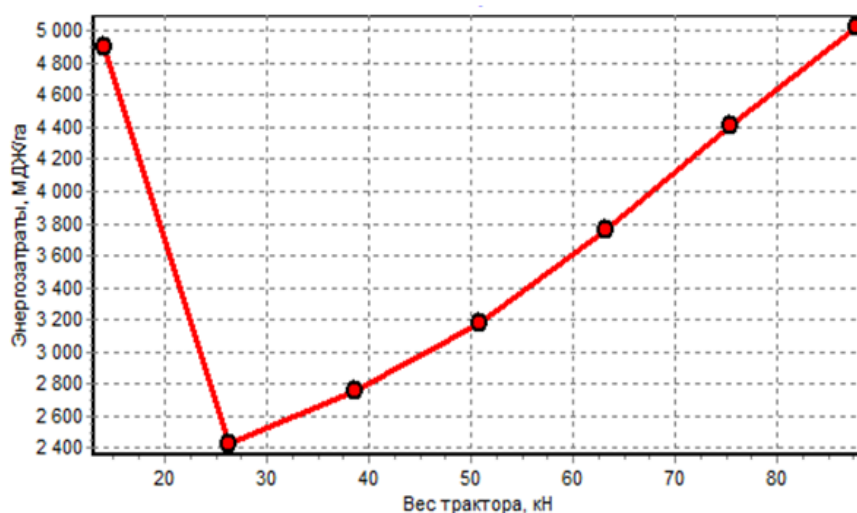


Рис. 1 - Оптимальный вес трактора по суммарным энергозатратам на бороновании-закрытии влаги

Минимальное значение суммарных энергетических затрат 2425,98 МДж/га достигается при массе трактора 2628 кг и мощности его двигателя 100 л.с. Следующим этапом исследования стал анализ влияния удельного сопротивления почвы при культивации

на оптимальные параметры трактора. Культивация представляет собой более энергоемкую операцию по сравнению с боронованием, что существенно влияет на характер оптимизации параметров машинно-тракторного агрегата.

Исследование культивации (табл.2), выявил ряд существенных особенностей в оптимизации параметров машинно-тракторного агрегата. В первую очередь следует отметить, что оптимальный вес трактора, как и при бороновании, сохраняет постоянное значение

в исследованном диапазоне удельных сопротивлений, но на более высоком уровне - 31,43 кН. Это значение на 19,6% превышает оптимальный вес трактора для боронования, что количественно отражает возросшие требования к тяговым характеристикам агрегата.

Таблица 2 - Влияние удельного сопротивления почвы рабочим органам культиваторного агрегата на параметры трактора

Параметры	Удельное сопротивление почвы, кН/м			Изменение параметра при росте энергоемкости операции
	2	3	4	
Оптимальный вес трактора (M_t), кН	31,43	31,43	31,43	const
Потребная мощность двигателя (N), л.с.	125,88	123,50	148,69	$N \rightarrow \uparrow$
Оптимизированная скорость (V) агрегата, км/ч	12	12	11,13	$V \rightarrow \approx \langle V \rangle$
Оптимизированная ширина захвата (B) агрегата, м	6,57	4,29	4,29	$B \rightarrow \downarrow$
Оптимизированная производительность (W) агрегата, га/ч	5,08	3,50	3,26	$W \rightarrow \downarrow$
Удельный расход топлива (G_h), кг/га	5,52	8,24	9,24	$G_h \rightarrow \uparrow$
Минимальные удельные суммарные энергозатраты (E_Σ), МДж/га	3494,55	5034,34	5358,45	$E_\Sigma \rightarrow \uparrow$

Принципиальное отличие от боронования проявляется в характере изменения потребной мощности двигателя. При культивации наблюдается устойчивый рост этого показателя с увеличением удельного сопротивления почвы - от 125,88 до 148,69 л.с. Особенно заметное увеличение мощности (на 20,4%) происходит при переходе от среднего (3 кН/м) к высокому (4 кН/м) значению удельного сопротивления. Высокая мощность двигателя определяется необходимостью повышения рабочей скорости агрегата, с целью увеличения производительности агрегата и снижения потерь урожая от нарушения агротехнических сроков выполнения данной операции.

Анализ скоростного режима работы агрегата показывает, что оптимальная скорость сохраняет максимальное значение (12 км/ч) при удельном сопротивлении до 3 кН/м, но снижается до 11,13 км/ч при дальнейшем увеличении сопротивления. Это свидетельствует о достижении энергетических пределов агрегата при росте энергоемкости процесса.

Особого внимания заслуживает динамика производительности агрегата. При увеличении удельного сопротивления почвы с 2 до 4 кН/м

происходит существенное снижение производительности - с 5,08 до 3,26 га/ч (на 35,8%), что обусловлено комбинированным эффектом уменьшения ширины захвата (с 6,57 до 4,29 м) и снижения рабочей скорости агрегата.

Энергетическая эффективность процесса культивации демонстрирует значительно более высокую чувствительность к изменению условий работы по сравнению с боронованием. Увеличение удельного сопротивления почвы на 2 кН/м приводит к росту удельного расхода топлива на 67,4% (с 5,52 до 9,24 кг/га) и увеличению суммарных энергозатрат на 53,3% (с 3494,55 до 5358,45 МДж/га). Эта закономерность имеет принципиальное значение для планирования энергетических затрат и выбора оптимальных сроков проведения культивации.

Особый научный и практический интерес представляет исследование влияния удельного сопротивления почвы на оптимальные параметры посевных агрегатов. Специфика посевных работ заключается в существовании двух принципиально различных технологий – посева по подготовленной почве и прямого посева, что требует дифференцированного подхода к анализу (табл. 3 и 4).

Таблица 3 - Влияние удельного сопротивления почвы рабочим органам посевного агрегата на параметры трактора

Параметры	Удельное сопротивление почвы, кН/м			Изменение параметра при росте энергоемкости операции
	1,8	2,4	3	
1	2	3	4	5
Оптимальный вес трактора (M_t), кН	74,29	102,86	117,14	$M_t \rightarrow \uparrow$
Потребная мощность двигателя (N), л.с.	152,47	224,46	205,06	$N \rightarrow \uparrow$

1	2	3	4	5
Оптимизированная скорость (V) агрегата, км/ч	6,31	6,75	5,44	$V \rightarrow \downarrow$
Оптимизированная ширина захвата (B) агрегата, м	18	18	18	const
Оптимизированная производительность (W) агрегата, га/ч	5,50	5,74	4,97	$W \rightarrow \downarrow$
Удельный расход топлива (Gh), кг/га	4,74	5,18	6,06	$G_h \rightarrow \uparrow$
Энергия, потерянная с урожаем из-за уплотнения почвы (Eur), МДж/га	3045,78	4427,53	5130,11	$E_{ur} \rightarrow \uparrow$
Энергия, потерянная с урожаем из-за нарушения агросроков (Eua), МДж/га	2577,28	2467,92	2828,99	$E_{ua} \rightarrow \uparrow$
Минимальные удельные суммарные энергозатраты (E_{Σ}), МДж/га	6123,15	7416,83	8566,61	$E_{\Sigma} \rightarrow \uparrow$

Сравнительный анализ данных по двум технологиям посева (табл. 3 и 4), раскрывает принципиальные различия в характере оптимизации параметров тракторов. При посеве по подготовленной почве наблюдается выраженная зависимость оптимального веса трактора от удельного сопротивления - увеличение с 74,29 до

117,14 кН при росте сопротивления с 1,8 до 3,0 кН/м, что составляет прирост в 57,7%. При прямом посеве, несмотря на значительно более высокие абсолютные значения оптимального веса (114,29-148,57 кН), относительный прирост при увеличении удельного сопротивления с 5 до 9 кН/м составляет только 30%.

Таблица 4 - Влияние удельного сопротивления почвы рабочим органам агрегата прямого посева на параметры трактора

Параметры	Удельное сопротивление почвы, кН/м			Изменение параметров при росте энергоёмкости операции
	5	7	9	
Оптимальный вес трактора (M_t), кН	114,29	131,42	148,57	$M_t \rightarrow \approx \langle M_t \rangle$
Потребная мощность двигателя (N), л.с.	237,65	254,84	311,18	$N \rightarrow \uparrow$
Оптимизированная скорость (V) агрегата, км/ч	5,44	5,00	5,44	$V \rightarrow \approx \langle V \rangle$
Оптимизированная ширина захвата (B) агрегата, м	12,57	10,86	9,14	$B \rightarrow \downarrow$
Оптимизированная производительность (W) агрегата, га/ч	4,22	3,46	3,26	$W \rightarrow \downarrow$
Удельный расход топлива (Gh), кг/га	8,76	11,25	13,76	$G_h \rightarrow \uparrow$
Энергия, потерянная с урожаем из-за уплотнения почвы (Eur), МДж/га	6294,82	8807,26	12407,8	$E_{ur} \rightarrow \uparrow$
Энергия, потерянная с урожаем из-за нарушения агросроков (Eua), МДж/га	3312,15	3992,96	4228,42	$E_{ua} \rightarrow \uparrow$
Минимальные удельные суммарные энергозатраты (E_{Σ}), МДж/га	10347,20	13708,00	17664,90	$E_{\Sigma} \rightarrow \uparrow$

Особого внимания заслуживает анализ энергетических потерь урожая. При прямом посеве энергия, потерянная из-за уплотнения почвы, достигает 17664,9 МДж/га, что в 2,4 раза превышает аналогичный показатель при посеве по подготовленной почве (7416,83 МДж/га). Это различие объясняется как более высокой массой трактора, так и повышенной чувствительностью необработанной почвы к уплотняющему воздействию движителей.

Использование более тяжелого трактора на прямом посеве ведет к росту энергии,

потерянной с урожаем из-за уплотнения почвы (Eur) и нарушения агросрока выполнения технологической операции (Eua). Если при удельном сопротивлении почвы на посеве по подготовленной почве 3 кН/м $E_{ur}=5130,11$ МДж/га, то на прямом посеве при удельном сопротивлении почвы 9 кН/м эта составляющая суммарных энергетических возрастает до 12407,8 МДж/га. Энергия, потерянная с урожаем из-за нарушения агросроков (Eua) при этом возрастает с 2828,99 до 4228,42 МДж/га, что вызвано снижением производительности агрегата для прямого посева

по сравнению с посевным агрегатом по обработанной поверхности до 3,26 га/ч вместо 4,97 га/ч.

Заключительный этап исследований был посвящен анализу операций основной обработки почвы, включающих

дискование, вспашку и глубокое рыхление (табл. 5, 6, 7). Эти операции характеризуются максимальной энергоемкостью и предъявляют наиболее высокие требования к тяговым характеристикам тракторов.

Таблица 5 - Влияние удельного сопротивления почвы рабочим органам агрегата с дисковой бороной на параметры трактора

Параметры	Удельное сопротивление почвы, кН/м			Изменение параметра при росте энергоемкости операции
	7	9	11	
Оптимальный вес трактора (Mt), кН	102,86	102,86	102,86	const
Потребная мощность двигателя (N), л.с.	423,88	423,88	436,48	$N \rightarrow \approx \langle N \rangle$
Оптимизированная скорость (V) агрегата, км/ч	9,81	9,38	10,25	$V \rightarrow \uparrow$
Оптимизированная ширина захвата (B) агрегата, м	9,14	7,43	5,71	$B \rightarrow \downarrow$
Оптимизированная производительность (W) агрегата, га/ч	5,74	4,61	3,96	$W \rightarrow \downarrow$
Удельный расход топлива (Gh), кг/га	9,44	12,04	14,56	$G_h \rightarrow \uparrow$
Минимальные удельные суммарные энергозатраты (E_{Σ}), МДж/га	2028,49	2507,13	3011,59	$E_{\Sigma} \rightarrow \uparrow$

Сравнительный анализ операций основной обработки почвы выявил существенные различия в характере оптимизации параметров тракторов. При дисковании оптимальный вес трактора остается постоянным (102,86 кН) во всем диапазоне удельных сопротивлений, тогда как при вспашке наблюдается выраженная зависимость – увеличение с 102,86 до 165,71 кН при росте удельного сопротивления с 40 до 80 кН/м². Глубокое рыхление характеризуется стабильным оптимальным весом трактора на уровне 145,71 кН.

Для всех трех операций требуется значительная мощность – от 400 до 500 л.с., однако характер её изменения различен. При дисковании наблюдается незначительный рост мощности (с 423,88 до 436,48 л.с.), при вспашке – нелинейное изменение с максимумом при среднем значении удельного сопротивления (441,93 л.с.), а при глубоком рыхлении – слабое снижение мощности (с 498,44 до 488,28 л.с.) при увеличении удельного

сопротивления.

Производительность агрегатов демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению с ростом удельного сопротивления почвы для всех операций. Однако интенсивность этого снижения различна: при дисковании – с 5,74 до 3,96 га/ч (на 31%), при вспашке – с 2,97 до 1,97 га/ч (на 34%), при глубоком рыхлении – с 2,66 до 2,11 га/ч (на 21%).

Особый интерес представляет характер изменения мощности двигателя. Энергетическая эффективность операций характеризуется существенными различиями в удельном расходе топлива и суммарных энергозатратах. Минимальные значения наблюдаются при дисковании (9,44-14,56 кг/га), максимальные – при глубоком рыхлении (22,04-28,77 кг/га). Вспашка занимает промежуточное положение с диапазоном 15,95-26,67 кг/га, но характеризуется наибольшей чувствительностью к изменению удельного сопротивления почвы.

Таблица 6 - Влияние удельного сопротивления почвы рабочим органам пахотного агрегата на параметры трактора

Параметры	Удельное сопротивление почвы, кН/м			Изменение параметра при росте энергоемкости операции
	40	60	80	
1	2	3	4	5
Оптимальный вес трактора (Mt), кН	102,86	134,29	165,71	$M_t \rightarrow \uparrow$
Потребная мощность двигателя (N), л.с.	395,40	441,93	436,67	$N \rightarrow \approx \langle N \rangle$
Оптимизированная скорость (V) агрегата, км/ч	10	8,44	6,25	$V \rightarrow \downarrow$

1	2	3	4	5
Оптимизированная ширина захвата (В) агрегата, м	5,25	4,9	5,25	$B \rightarrow \downarrow$
Оптимизированная производительность (W) агрегата, га/ч	2,97	2,44	1,97	$W \rightarrow \downarrow$
Удельный расход топлива (Gh), кг/га	15,95	21,42	26,67	$G_h \rightarrow \uparrow$
Минимальные удельные суммарные энергозатраты (E_Σ), МДж/га	3204,05	4072,86	5065,18	$E_\Sigma \rightarrow \uparrow$

Таблица 7 - Влияние удельного сопротивления почвы рабочим органам агрегата для глубокого рыхления почвы на параметры трактора

Параметры	Удельное сопротивление почвы, кН/м			Изменение параметра при росте энергоёмкости операции
	16	19	21	
Оптимальный вес трактора (Mt), кН	145,71	145,71	145,71	const
Потребная мощность двигателя (N), л.с.	498,44	489,15	488,28	$N \rightarrow \approx \langle N \rangle$
Оптимизированная скорость (V) агрегата, км/ч	7,81	8,13	8,13	$V \rightarrow \approx \langle V \rangle$
Оптимизированная ширина захвата (В) агрегата, м	5,57	4,43	4	$B \rightarrow \downarrow$
Оптимизированная производительность (W) агрегата, га/ч	2,66	2,30	2,11	$W \rightarrow \downarrow$
Удельный расход топлива (Gh), кг/га	22,04	26,11	28,77	$G_h \rightarrow \uparrow$
Минимальные удельные суммарные энергозатраты (E_Σ), МДж/га	3711,14	4316,09	5288,68	$E_\Sigma \rightarrow \uparrow$

Комплексный анализ полученных результатов позволяет выявить фундаментальные закономерности влияния энергоёмкости технологических операций на оптимальные параметры тракторной техники. Для наглядного представления этих закономерностей рассмотрим графические зависимости ключевых параметров.

Рисунки 2 и 3 демонстрируют зависимость оптимального веса трактора от удельного сопротивления почвы для различных технологических операций. Анализ этой зависимости позволяет выделить три характерные зоны:

Зона низкой энергоёмкости

(1 - 4 кН/м) - характерна для ранневесенних работ. В этой зоне оптимальный вес трактора относительно стабилен и находится в пределах 25-35 кН. Стабильность оптимального веса объясняется малым уплотняющим воздействием трактора на почву, которое находится в пределах допустимого значения.

Зона средней энергоёмкости (4-12 кН/м) - соответствует посевным работам и дискованию.

Зона высокой энергоёмкости (свыше 12 кН/м) - характерна для глубокой обработки почвы.

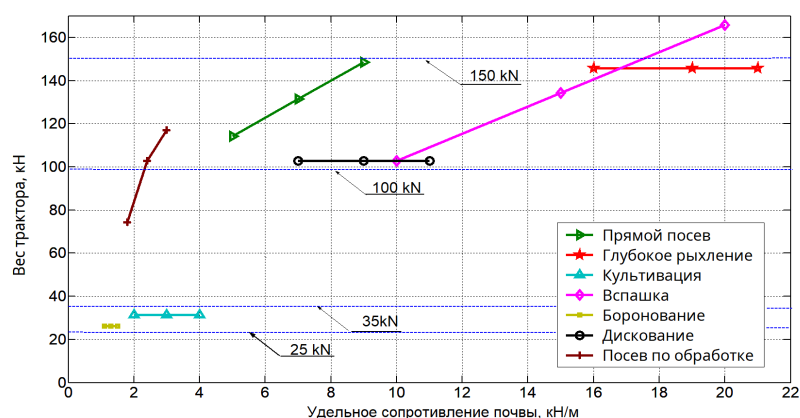


Рис.2 – Влияние энергоёмкости отдельных технологических операций на оптимальный вес трактора

Из рисунков 2 и 3 видно, что вес трактора зависит не только от энергоемкости технологической операции, но и от вида технологической операции и времени проведения технологической операции. В связи с этим возможно разделение тракторов на три класса по весу и мощности двигателя: для проведения ранневесенних технологических операций

(боронование, культивация, прикатывание посевов); для проведения посева по подготовленной почве и прямого посева; для проведения основной обработки почвы в осенний период (глубокое рыхление, вспашка, дискование, культивация, обработка комбинированными орудиями на глубину от 16 до 35 см).

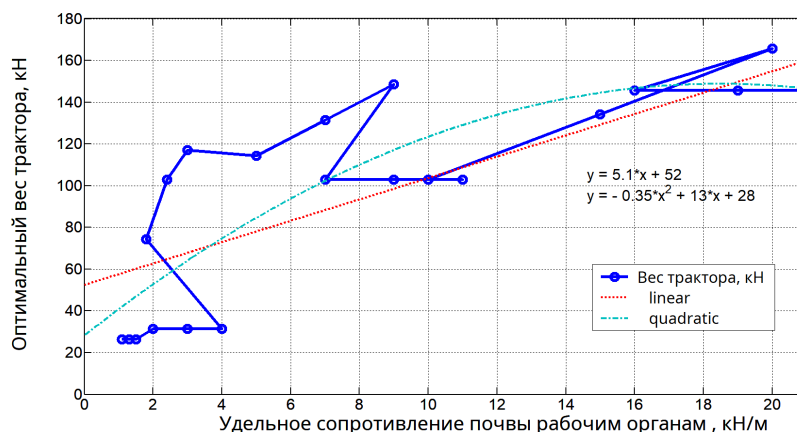


Рис. 3 – Линейная и квадратичная зависимость оптимального веса трактора от энергоемкости обработки почвы

Из рисунка 3 видно, что оптимизированный вес трактора от энергоемкости технологической операции можно примерно рассчитать по линейной зависимости:

$$G_T = 5,1 \cdot K_{уд} + 5$$

где:

G_T – вес трактора, кН;

$K_{уд}$ – удельное сопротивление сельскохозяйственной машины, кН/м (энергоемкость технологической операции).

Из уравнения вытекает, что увеличение сопротивления почвы на 1 кН/м ведет к необходимости повышения оптимизированного веса трактора примерно на 5,1 кН. Использование квадратного уравнения для аппроксимации результатов вычислительных экспериментов позволяет улучшить результаты предсказания веса трактора от энергоемкости

технологического процесса.

Связь между потребляемой мощностью двигателя и удельным сопротивлением почвы иллюстрирует графики на рисунках 4 и 5. Характер этой зависимости существенно различается для разных технологических операций:

- для ранневесенних работ мощность определяется преимущественно необходимостью поддержания высокой рабочей скорости;
- при посевных работах наблюдается близкая к линейной зависимость с коэффициентом около 19 л.с./(кН/м);

Для операций основной обработки почвы зависимость носит более сложный характер, что связано с необходимостью оптимизации скоростного режима из-за необходимости снижения потерь урожая от нарушения агротехнических сроков выполнения технологических операций.

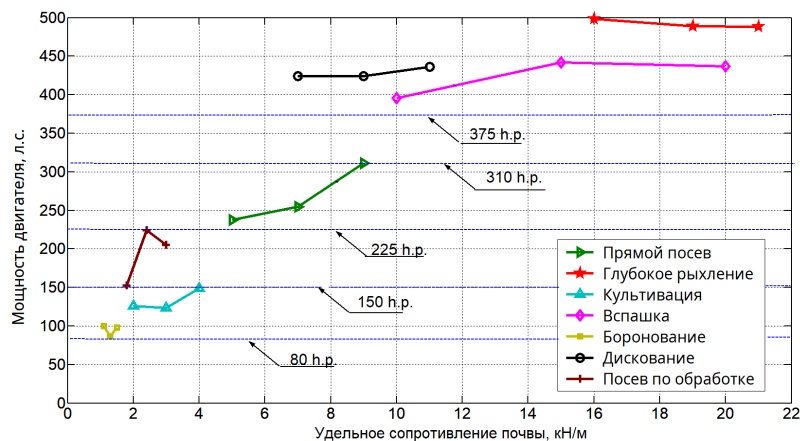


Рис. 4 – Влияние энергоемкости отдельных технологических операций на потребляемую мощность двигателя трактора с учетом его влияния на формируемый урожай зерновых культур

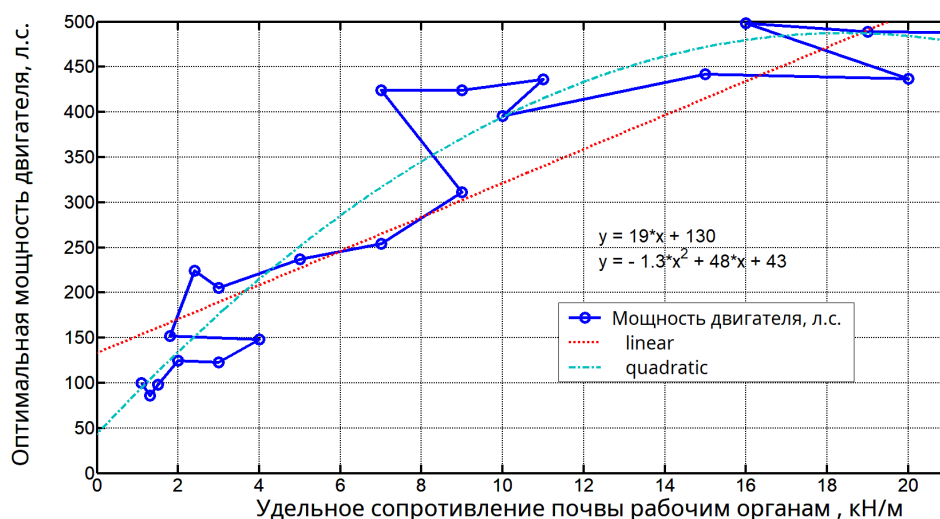


Рис. 5 – Линейная и квадратичная зависимость потребной мощности двигателя трактора от энергоёмкости обработки почвы

Анализ суммарных энергетических затрат (рис. 6) позволил выявить существенную дифференциацию интенсивности роста энергозатрат.

Из рисунка видно, что на ранневесенних работах интенсивность увеличения суммарных энергетических затрат с ростом энергоёмкости технологической операции происходит гораздо интенсивнее (боронование,

предпосевная культивация, посев по подготовленной почве и прямой посев) – до 2000 МДж/га на единицу увеличения удельного сопротивления, чем на осенних технологических операциях по основной обработке почвы (дискование, вспашка, глубокое рыхление почвы) – около 200 МДж/га на единицу увеличения сопротивления.

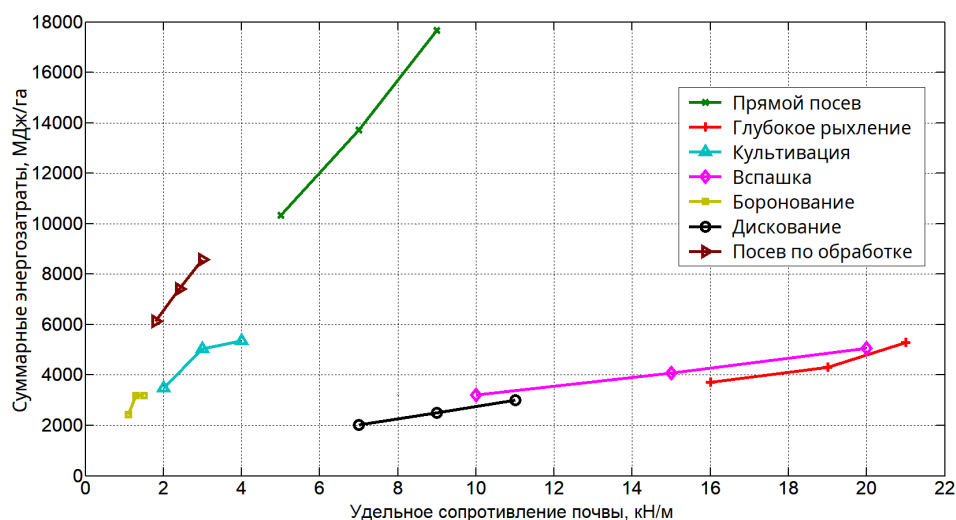


Рис. 6 – Зависимость суммарных энергетических затрат на выполнение отдельных технологических операций от удельного сопротивления почвы

Характер изменения величины суммарных энергетических затрат в зависимости от вида технологической операции, энергоёмкости технологической операции и времени проведения технологической операции подтверждает необходимость разделения тракторов на два или три класса по величине веса (с возможностью догрузки) и необходимости иметь внутри каждого весового класса модификации тракторов с различной мощностью двигателя.

Проведенное исследование раскрывает

фундаментальную взаимосвязь между энергоёмкостью технологических операций и оптимальными параметрами тракторной техники. Особую значимость представляет выявленная сезонная дифференциация требований к параметрам машинно-тракторных агрегатов, что существенно влияет на эффективность использования техники в течение агротехнического цикла.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что увеличение

удельного сопротивления почвы на каждый килоньютон на метр требует пропорционального увеличения массы трактора приблизительно на 5,1 кН. Эта закономерность носит устойчивый характер в широком диапазоне условий, однако имеет существенные особенности в зависимости от типа выполняемой операции и сезона работ.

Наиболее значимым открытием стала существенная разница в интенсивности роста суммарных энергетических затрат между весенними и осенними полевыми работами. В весенний период увеличение удельного сопротивления почвы на единицу приводит к росту энергозатрат примерно на 2000 МДж/га, тогда как для осенних работ этот показатель составляет около 200 МДж/га. Данное различие объясняется повышенной чувствительностью формирующегося урожая к качеству выполнения весенних полевых работ и более жестким временным ограничениям на их проведение.

Особого внимания заслуживает выявленная закономерность в требованиях к мощности двигателя. Установлено, что оптимальное соотношение массы трактора и мощности двигателя существенно варьируется в зависимости от характера выполняемой операции. При выполнении ранневесенних работ определяющим фактором становится необходимость повышения рабочей скорости для соблюдения агротехнических сроков, что требует повышенной энерговооруженности трактора. В то же время, при выполнении операций основной обработки почвы ключевое значение приобретает обеспечение необходимого тягового усилия, что смещает акцент в сторону оптимизации массы трактора.

Результаты исследования позволяют обосновать необходимость дифференцированного подхода к формированию тракторного парка сельскохозяйственных предприятий. Оптимальная структура машинно-тракторного парка должна включать три основные категории тракторов, различающихся по массе и мощности. Легкие тракторы массой 25-35 кН с двигателями мощностью 80-150 л.с. обеспечивают максимальную эффективность на ранневесенних работах. Тракторы средней категории массой 100-120 кН и мощностью 250-350 л.с. оптимальны для посевных работ. Тяжелые тракторы массой 130-150 кН с двигателями мощностью 400-500 л.с. необходимы для выполнения энергоемких операций по основной обработке почвы.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности научно обоснованного выбора параметров тракторной техники с учетом специфики почвенно-климатических условий и структуры севооборотов конкретных хозяйств. Предложенный подход к оценке эффективности использования тракторов через призму суммарных энергетических затрат позволяет оптимизировать состав машинно-тракторного парка с учетом сезонной неравномерности использования

техники и различной значимости отдельных технологических операций в формировании конечного урожая.

Выводы. 1. Проведенное исследование существенно расширяет понимание взаимосвязи между энергоемкостью сельскохозяйственных операций и оптимальными параметрами тракторной техники. Применение системного энергетического подхода позволило выявить и количественно описать ряд фундаментальных закономерностей, имеющих важное значение как для теории проектирования сельскохозяйственной техники, так и для практики её эффективного использования.

2. Ключевым научным достижением работы является установление количественной зависимости между энергоемкостью технологических операций и оптимальными параметрами трактора. Впервые доказано, что увеличение удельного сопротивления почвы на единицу требует пропорционального увеличения массы трактора на 5,1 кН и мощности двигателя на 19 л.с. Эта закономерность носит универсальный характер, однако её практическая реализация существенно модифицируется в зависимости от сезона проведения работ и специфики выполняемых операций.

3. Особую научную ценность представляет выявленное различие в характере влияния энергоемкости операций на суммарные энергетические затраты в зависимости от сезона проведения работ. Установленная десятикратная разница в интенсивности роста энергозатрат между весенними и осенними операциями (2000 МДж/га против 200 МДж/га на единицу увеличения удельного сопротивления) имеет принципиальное значение для оптимизации структуры машинно-тракторного парка.

4. Разработанная методология энергетической оценки эффективности использования тракторной техники, учитывающая не только прямые эксплуатационные затраты, но и энергетический эквивалент потенциальных потерь урожая, создает научную основу для дифференцированного подхода к формированию технического парка сельскохозяйственных предприятий. Предложенная сегментация тракторов на три весовые категории (25-35 кН, 100-120 кН и 130-150 кН) с соответствующими диапазонами мощности обеспечивает оптимальное соответствие параметров техники характеру выполняемых операций.

5. Практическая ценность полученных результатов заключается в возможности научно обоснованного выбора параметров тракторной техники с учетом конкретных производственных условий. Разработанные рекомендации позволяют оптимизировать состав машинно-тракторного парка не только по критерию минимизации прямых энергозатрат, но и с учетом влияния параметров техники на конечную урожайность сельскохозяйственных культур.

6. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением спектра анализируемых технологических операций, уточнением

влияния почвенно-климатических условий на оптимальные параметры техники и разработкой методологии оптимизации машинно-тракторного парка с учетом многолетней динамики севооборотов.

Особый интерес представляет исследование возможностей адаптации параметров тракторной техники к условиям точного земледелия и цифровизации сельскохозяйственного производства.

Литература

1. Концептуальные направления развития беспилотных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения / И. А. Старостин, А. В. Ещин, Т. З. Годжаев и др. // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 1. С. 23-38. doi: 10.17816/0321-4443-567812.
2. Кадухин А.И. Повышение эффективности эксплуатации машинно-тракторных агрегатов за счет выбора рационального режима движения (на примере пахотных агрегатов): дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Саратов, 2016. - Режим доступа: <https://www.vavilovsar.ru/files/pages/28625/14771159870.pdf>
3. Лахович А. Е., Кецо В.Н. Эффективность комплектования мобильных машинно-тракторных агрегатов на базе тракторов "Беларус" // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2018. № 1(17). С. 213-218.
4. Load characteristics analysis of tractor drivetrain under field plowing operation considering tire-soil interaction / X. Shao, Z. Yang, S. Mowafy, et al. // Soil Tillage Res. 2023, 227, 105620.
5. Сравнительная энерго-экологическая оценка почвообрабатывающих агрегатов / Н. И. Джаббаров, Р. А. Косульников, А. В. Добринов и др. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 1(73). С. 251-263. doi:10.32786/2071-9485-2024-01-29.
6. Research progress of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China / Q. Wang, X. Cao, C. Wang, et al. // Trans. Chin. Soc. Agric. Mach. 2021, 52, 1–15.
7. Жданович Ч. И., Калинин Н. В. Обоснование параметров физической модели электромеханической трансмиссии трактора // Актуальные вопросы машиноведения. 2023. Т. 12. С. 121-126.
8. Обоснование параметров элементов поддрессирования лесохозяйственного трактора на основе анализа его динамических качеств / С. Ш. Саая, С. Н. Орловский, С. Н. Долматов и др. // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 2(62). С. 34-39. doi: 10.18324/2077-5415-2024-2-34-39.
9. Хафизов К. А., Адигамова Н. Р., Хафизов Р. Н. Оптимизация основных параметров колесного трактора, работающего в составе посевного // Техника и оборудование для села. 2017. № 4. С. 30-33.
10. Хафизов, К. А. Методика расчета МТА по критерию "совокупные энергозатраты" // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 3. С. 46-51.
11. Хафизов, К. А. Оптимизация параметров и режимов работы МТА на основе энергетического анализа // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 7. С. 32-34.
12. Писарева, О. М., Белоусова М. Н., Стефановский Д. В. Современные тенденции цифровой трансформации российских предприятий АПК полного цикла производства // Российский журнал менеджмента. 2024. Т. 22, № 3. С. 541-572. doi: 10.21638/spbu18.2024.308.
13. Ways to increase the efficiency of using agricultural machinery in performing technological operations / D. T. Khaliullin, A. V. Belinsky, I. Kh. Gayfullin [et al.] // Vol. 1212, 2023. P. 12055. doi: 10.1088/1755-1315/1212/1/012055.
14. Energy Justification of the Number of Tractors for Agricultural Operations / K. A. Khafizov, R. N. Khafizov, A. A. Nurmiev, et al. // BIO Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. Т. 37. С. 00136. doi: 10.1051/bioconf/20213700136.

Сведения об авторах:

Хафизов Камилль Абдулхакович – доктор технических наук, заведующий кафедрой 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

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

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE ENERGY INTENSITY OF TECHNOLOGICAL OPERATION ON OPTIMAL VALUES OF BASIC PARAMETERS OF "BELARUS" TRACTOR

K. A. Khafizov, R. N. Khafizov, A. A. Nurmiev

Abstract. The study presents a comprehensive analysis of the dependence of optimal parameters of "Belarus" series tractors on the energy intensity of the agricultural operations performed. The scientific novelty of the work lies in the application of a systemic energy approach to optimizing the parameters of machine and tractor units through the prism of total energy costs, including not only direct operating costs, but also an energy assessment of potential crop losses. The study is based on a series of computational experiments using a verified mathematical model that takes into account the relationship between the main parameters of the tractor (weight, engine power), device characteristics (working width, operating speed) and the energy intensity of various technological operations. The experimental part covers a wide range of agricultural operations: from early spring operations with minimal energy intensity (harrowing, moisture closure) to energy-intensive operations of primary soil cultivation (deep loosening, plowing). Clear quantitative relationships between the specific soil resistance and the optimal tractor parameters have been established. In particular, it has been found that an increase in specific resistance by each kN/m requires a proportional increase in tractor weight by 5.1 kN and engine power by 19 hp. For the first time, a significant differentiation has been established in the nature of the influence of the energy intensity of operations on the optimal tractor parameters depending on the season of work. Based on the obtained results, a scientifically substantiated segmentation of the tractor fleet into three specialized groups is proposed: light tractors (25-35 kN, 80-150 hp - MTZ series 800, 900) for early spring work (harrowing, cultivation), medium (100-120 kN, 250-350 hp - MTZ series 3000) for direct seeding and disking, and heavy (130-150 kN, 400-500 hp - MTZ series 4000) for

primary tillage (plowing, deep loosening of the soil). This segmentation ensures optimal use of the energy potential of the equipment while minimizing total energy costs, and therefore crop losses in various production conditions.

Key words: energy intensity, aggregate, optimization, analysis, costs, seasonal, efficiency.

References

1. Starostin IA, Eshchin AV, Godzhaev TZ. [Conceptual directions of development of unmanned mobile energy vehicles for agricultural purposes]. *Traktory i selkhoz mashiny*. 2024; Vol.91. 1. 23-38 p. doi: 10.17816/0321-4443-567812.
2. Kadukhin AI. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii mashinno-traktornykh agregatov za schet vybora ratsionalnogo rezhima dvizheniya (na primere pakhotnykh agregatov): dis. na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. [Increasing the efficiency of operation of machine and tractor units by choosing a rational driving mode (using arable units as an example): dissertation for a degree of Ph.D. of Technical sciences]. Saratov. 2016; Available from: <https://www.vavilovsar.ru/files/pages/28625/14771159870.pdf>
3. Lakhovich AE, Ketsko VN. [Efficiency of completing mobile machine-tractor units based on “Belarus” tractors]. *Konstruirovaniye, ispolzovaniye i nadezhnost mashin selskokhozyaystvennogo naznacheniya*. 2018; 1(17). 213-218 p.
4. Shao Kh, Yang Z, Mowafy S. Load characteristics analysis of tractor drivetrain under field plowing operation considering tire-soil interaction. *Soil Tillage Res*. 2023; 227. 105620.
5. Dzhaborov NI, Kosulnikov RA, Dobrinov AV. [Comparative energy and environmental assessment of tillage units]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie*. 2024; 1(73). 251-263 p. doi: 10.32786/2071-9485-2024-01-29.
6. Wang Q, Cao X, Wang C. Research progress of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in north-east black land of China. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach*. 2021; 52. 1-15 p.
7. Zhdanovich ChI, Kalinin NV. [Justification of the parameters of the physical model of the electromechanical transmission of tractor]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*. 2023; Vol.12. 121-126 p.
8. Saaya SSh, Orlovskiy SN, Dolmatov SN. [Justification of the parameters of the suspension elements of the forestry tractor based on the analysis of its dynamic qualities]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2024; 2(62). 34-39 p. doi: 10.18324/2077-5415-2024-2-34-39.
9. Khafizov KA, Adigamov NR, Khafizov RN. [Optimization of the main parameters of a wheeled tractor operating as part of a sowing]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*. 2017; 4. 30-33 p.
10. Khafizov KA. [Methodology for calculating the MTA based on the criterion “total energy consumption”]. *Traktory i selskokhozyaystvennyye mashiny*. 2006; 3. 46-51 p.
11. Khafizov KA. [Optimization of parameters and operating modes of MTA based on energy analysis]. *Traktory i selskokhozyaystvennyye mashiny*. 2006; 7. 32-34 p.
12. Pisareva OM, Belousova MN, Stefanovskiy DV. [Modern trends in the digital transformation of Russian agro-industrial complex enterprises with a full production cycle]. *Rossiyskiy zhurnal menedzhmenta*. 2024; Vol.22. 3. 541-572 p. doi: 10.21638/spbu18.2024.308.
13. Khaliullin DT, Belinskiy AV, Gayfullin IKh. Ways to increase the efficiency of using agricultural machinery in performing technological operations. Vol.1212. 2023; 12055 p. doi: 10.1088/1755-1315/1212/1/012055.
14. Khafizov KA, Khafizov RN, Nurmiev AA. Energy justification of the number of tractors for agricultural operations. *BIO Web of Conferences*. EDP Sciences. 2021; Vol.37. 00136 p. doi: 10.1051/bioconf/20213700136

Authors:

Khafizov Kamil Abdulkhakovich – Doctor of Engineering, Head of Department of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes, e-mail: fts-kgau@mail.ru
 Khafizov Ramil Nailovich – Ph.D. in Engineering, Associate Professor of Department of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes, e-mail: ramilajz@mail.ru
 Nurmiev Azat Akhbarovich – Senior Lecturer of Department of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes, e-mail: azat-nurmiev@mail.ru
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.