

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЗКИ МТА

THE METHODOLOGY FOR DETERMINING OF THE ENERGY COSTS FOR THE PROBABILISTIC NATURE OF THE LOAD OF A MACHINE-TRACTOR UNIT

Н.И. ДЖАББОРОВ¹; д.т.н.
В.С. ШКРАБАК², д.т.н.

¹ Федеральное Государственное бюджетное научное учреждение «Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства» (ИАЭП), Санкт-Петербург, Россия, nozimjon-59@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (СПбГАУ), Санкт-Петербург, Россия, v.shkrabak@mail.ru

N.I. DZHABBOROV¹, DSc in Engineering
V.S. SHKRABAK², DSc in Engineering

¹ Federal State Budget Scientific Institution «Institute of Agroengineering and Ecological Problems of Agricultural Production» (IAEP), St. Petersburg, Russia, nozimjon-59@mail.ru

² Saint Petersburg State Agrarian University (St. Petersburg State Agricultural University), St. Petersburg, Russia, v.shkrabak@mail.ru

Случайный характер нагрузки служит основной причиной ухудшения энергетических параметров и технико-экономических показателей машинно-тракторных агрегатов (МТА). Колебания нагрузки приводит к увеличению затрат энергии на технологические процессы. Прямые топливно-энергетические затраты должны быть определены и спрогнозированы с высокой степенью достоверности с учетом специфики работы МТА и динамики выполнения ими технологических процессов. Определение и оптимизация энергетических затрат МТА обеспечит повышение эффективности выполняемых технологических процессов и технологий возделывания сельскохозяйственных культур в растениеводстве. Предметом исследования является разработка математических моделей для определения и оптимизации прямых энергетических затрат МТА, оснащенных перспективными тракторными газотурбинными двигателями (ГТД). Целью исследований является разработка методики определения прямых топливно-энергетических затрат МТА с учетом вероятностного характера нагрузки. Новизна исследований заключается в разработанных математических моделях и алгоритме расчета, а также оптимизации прямых топливно-энергетических затрат МТА с ГТД. Предложенная методика разработана на основе системного подхода, обобщения и анализа экспериментальных данных, математического моделирования процессов. Экспериментальные исследования проведены на лабораторных установках и в полевых условиях с использованием современных средств измерений и регистрации опытных данных. Предложенная методика позволяет с вероятностью 0,90–0,95 прогнозировать оптимальные значения прямых топливно-энергетических затрат МТА с ГТД. В качестве примера в статье приведены примеры расчета и оптимизации прямых топливно-энергетических затрат пахотного агрегата, состоящего из трактора «Кировец» с газотурбинным двигателем ГТД-350Т и плуга ПНИ-8/9-40, при различных уровнях реализации частоты вращения турбокомпрессора. Установлено, что при 100%-м уровне реализации частоты вращения турбокомпрессора и колебаниях коэффициента вариации нагрузки от 0 до 0,333, оптимальные значения прямых топливно-энергетических затрат пахотного агрегата увеличиваются от 543,0 до 723,12 МДж/га. Такая же тенденция увеличения прямых топливно-энергетических затрат МТА наблюдается и на других уровнях реализации частоты вращения турбокомпрессора ГТД. Следует отметить, что с уменьшением уровня реализации частоты вращения турбокомпрессора ГТД прямые топливно-энергетические затраты увеличиваются. Предложенная методика позволяет определить и оптимизировать значения прямых топливно-энергетических затрат МТА с ГТД с учетом вероятностного характера нагрузки в конкретных условиях их эксплуатации.

Ключевые слова: прямые топливно-энергетические затраты, машинно-тракторный агрегат, газотурбинный двигатель, мера рассеяния нагрузки, оптимальные параметры.

The random nature of the load is the main cause of deterioration of energy parameters and technical and economic indicators of machine-tractor units (MTU). Oscillations of the load lead to an increase in energy costs for technological processes. Direct fuel and energy costs should be determined and predicted with a high degree of reliability, taking into account the specifics of the work of the MTU and the dynamics of its performance of technological processes. The identification and optimization of energy costs of the MTU will ensure an increase in the efficiency of the technological processes and technologies of cultivation in crop production. The subject of the study is the development of mathematical models for determining and optimizing the direct energy costs of MTU equipped with advanced gas turbine engine (GTE) engines. The purpose of the research is to develop a methodology for determining the direct fuel and energy costs of MTU, taking into account the probabilistic nature of the load. The novelty of the research consists in the developed mathematical models and calculation algorithm, as well as optimization of the direct fuel and energy costs of MTU with GTE. The proposed methodology is developed on the basis of a systematic approach, generalization, and analysis of experimental data, mathematical modeling of processes. Experimental studies were

carried out in laboratory facilities and in the field using modern measuring instruments and recording experimental data. The proposed methodology allows, with a probability of 0,90–0,95, to predict the optimal values of the direct fuel and energy costs of the MTU with GTE. As an example, the article gives examples of calculation and optimization of direct fuel and energy costs of plowing unit consisting of a Kirovets tractor with a GTD-350T gas turbine engine and a PNI-8/9-40 plow at various levels of turbocharger speed. It is established that at the 100 % level of the turbo compressor speed and the variation of the load variation coefficient from 0 to 0,333, the optimal values of the direct fuel and energy costs of the plowing unit increase from 543,0 to 723,12 MJ/ha. The same trend of increasing the direct fuel and energy costs of MTU is also observed in other levels of implementation of the turbo GTE turbocharger speed. It should be noted that with a decrease in the level of implementation of the turbocharger GTE's speed, direct fuel, and energy costs are increasing. The proposed methodology allows to determine and optimize the values of direct fuel and energy costs of MTU with GTE taking into account the probabilistic nature of the load under the specific conditions of their operation.

Keywords: direct fuel and energy costs, machine and tractor unit, gas turbine engine, load dissipation measure, optimal parameters.

Введение

Разнообразные конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы являются основными причинами случайного характера нагрузки и других оценочных показателей машинно-тракторных агрегатов (МТА) при выполнении ими технологических процессов. К таким факторам относятся техническое состояние тракторов и сельскохозяйственных машин, ширина захвата отдельно взятого рабочего органа и в целом агрегата, глубина обработки, рельеф местности, профиль поверхности поля, каменистость, физико-механические характеристики почвы и т.д.

Исследования показывают, что случайный характер нагрузки служит основной причиной ухудшения эксплуатационных показателей МТА. Колебания нагрузки в достаточно широких пределах способствуют затратам энергии на технологические процессы.

Широко используемые в настоящее время методы оценки производства сельскохозяйственной продукции по затратам труда и экономическим показателям в ряде случаев недостаточны, поскольку эти показатели имеют существенные колебания, определяемые политикой ценообразования, и не позволяют установить уровень необходимых затрат энергии на производство продуктов.

Сущность энергетического анализа технологических процессов и технологий возделывания сельскохозяйственных культур сводится к оценке затрат на производство продукции и количества заключенной в ней энергии, выраженных в сопоставимых единицах. При этом принимают во внимание теплосодержание использованных нефтепродуктов, энергозатраты на их производство, энергоёмкость машин,

удобрений и энергосодержание сельскохозяйственной продукции в МДж или ккал/кг [1].

Энергетический анализ позволяет оценивать существующие и планируемые технологии, технологические процессы и операции, их перспективность с точки зрения энергоэффективности по сравнению с типовыми технологиями.

Анализ показывает, что существующие методики энергетической оценки технических средств не учитывают особенности работы ГТД в составе различных МТА.

В связи с этим возникла необходимость в разработке методики определения прямых топливно-энергетических затрат МТА с ГТД при вероятностных условиях их функционирования.

Следует отметить, что влияние случайного характера нагрузки на энергетические параметры и технико-экономические показатели МТА с различными типами двигателей рассматривались в трудах ученых В.Н. Болтинского, А.Б. Лурье, С.А. Иофинова, Л.Е. Агеева, В.С. Шкрабака, В.Г. Еникеева, А.В. Николаенко, Саакяна, Е.И. Давидсона, Н.И. Джабборова, А.П. Савельева и их последователей. Оценке эффективности применения тракторных газотурбинных двигателей (ГТД) на тракторах посвящены работы профессоров Н.С. Ждановского, А.В. Николаенко, В.С. Шкрабака, Л.Е. Агеева, А.В. Соминича, Н.И. Джабборова и других ученых [2–4].

Цель исследований

Целью исследования является разработка методики определения прямых топливно-энергетических затрат МТА, оснащенных тракторными газотурбинными двигателями, с учетом случайного (вероятностного) характера внешних воздействий.

Материалы и методы

Предложенная методика разработана на основе системного подхода, обобщения и анализа экспериментальных данных, математического моделирования процессов. Экспериментальные исследования проведены на лабораторных установках и в полевых условиях с использованием современных средств измерений и регистрации опытных данных.

Результаты и обсуждения

Как известно, одним из основных резервов экономии нефтепродуктов в различных отраслях сельскохозяйственного производства является эффективное использование техники.

В условиях дороговизны и дефицита энергетических ресурсов топливно-энергетический анализ стал одним из основных методов оценки технологий и использования техники в целом.

В качестве основного критерия оценки энергетической эффективности технологий производства сельскохозяйственной продукции предложен показатель – коэффициент энергетической эффективности [1]:

$$R = \Pi/E, \quad (1)$$

где Π – энергия, содержащаяся в конечном сельскохозяйственном продукте, МДж; E – энергия, затраченная на производство сельскохозяйственной продукции, МДж.

Полные энергетические затраты на производство сельскохозяйственной продукции можно определить по формуле [1]:

$$E = E_{\Pi} + E_o + (E_{\text{ж}} + E_{\text{т}} + E_{\text{м}} + E_{\text{с}})W_{\text{ч}}^{-1}, \quad (2)$$

где E_{Π} – прямые затраты энергии, выраженные расходом топлива, МДж/га; E_o – затраты энергии на производство удобрений, ядохимикатов, семян и других технологических материалов, МДж/га; $E_{\text{ж}}$ – энергетические затраты живого труда, МДж/ч; $E_{\text{т}}$, $E_{\text{м}}$, $E_{\text{с}}$ – энергоёмкость трактора, машины, сцепки на единицу сменного времени, МДж/ч; $W_{\text{ч}}$ – сменная производительность МТА, га/ч.

Результаты анализа составляющих энергетических затрат (2) и технологий возделывания сельскохозяйственных культур в различных почвенно-рельефных и климатических условиях свидетельствуют о том, что прямые топливно-энергетические затраты, выраженные расходом топлива, электроэнергии и тепла, составляют 20–25 %, а косвенные (энергоёмкость

тракторов, сельскохозяйственных машин, удобрений, ядохимикатов, живого труда и других технологических материалов) – 75–80 % от общих энергетических затрат на производство единицы производимой продукции.

Энергетические затраты E_o , $E_{\text{ж}}$, $E_{\text{т}}$, $E_{\text{м}}$, $E_{\text{с}}$ и E_{Π} составляющие выражения (2), кроме E_{Π} , тесно не связаны с эффективным и качественным функционированием МТА, расходом нефтепродуктов непосредственно при выполнении технологических процессов.

Методика определения прямых энергетических затрат, предложенная в работе [1], не учитывает специфики работы МТА и динамики выполнения ими технологических процессов и не всегда пригодна для прогнозирования количественных характеристик энергетических затрат с высокой степенью достоверности.

По разработанной нами методике МТА рассматривается в виде модели (рис. 1). В качестве аргумента x принят момент сопротивления на валу тяговой турбины ГТД $M_{\text{т}}$. Выходными параметрами Y (функции) являются эффективная мощность ГТД N_e , удельный эффективный расход топлива g_e и зависящие от них производительность МТА $W_{\text{ч}}$ и прямые топливно-энергетические затраты E_{Π} .

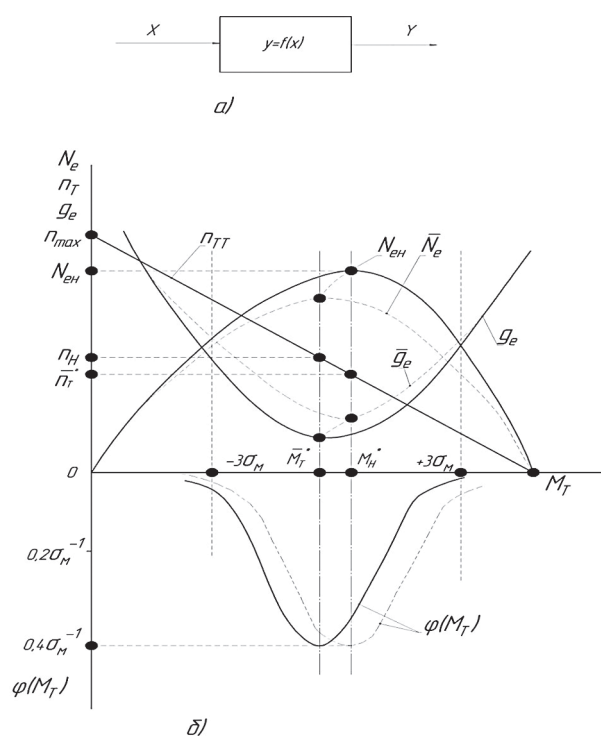


Рис. 1. Одномерная модель «вход – выход» (а) и схема (б) к определению вероятностных оценок энергетических параметров ГТД

В общем случае математические ожидания энергетических параметров ГТД при случайном аргументе M_T рассчитываются по формуле:

$$\bar{Y} = \int_{-\infty}^{\infty} Y \cdot \varphi(Y) \cdot dY = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot \varphi(x) \cdot dx, \quad (3)$$

где $\varphi(Y) = \varphi(x) \cdot |dx/dY|$ – плотность распределения вероятностей случайной величины Y (или выходного параметра) ГТД; $\varphi(x)$ – плотность распределения случайной величины x (входного параметра).

С учетом выражений (2) и (3) прямые топливно-энергетические затраты МТА с ГТД определяются выражением:

$$E_{\Pi} = \frac{G_{\text{ч}} \cdot t_p \cdot (\alpha_T + f_T) + (G_x \cdot t_x + G_0 \cdot t_0) \cdot (\alpha_T + f_T)}{W_{\text{ч}}}, \quad (4)$$

где $G_{\text{ч}}$ – часовой расход топлива ГТД на определенном рабочем режиме (табл. 1). Для установленного режима работы и уровня реализации частоты вращения вала тяговой турбины $\lambda_{\bar{n}_{\text{тк}}} = \bar{n}_T / n_{\text{тн}}$ значение часового расхода топлива ГТД остается постоянным, то есть $G_{\text{ч}} = \text{const}$ (табл. 1); G_x, G_0 – значения часового расхода топлива ГТД, соответственно, на поворотах и переездах и во время остановок МТА при работающем ГТД, кг/ч; $t_p = T_p / T_p = 1$; $t_x = T_x / T_p$; $t_0 = T_0 / T_p$ – коэффициенты; T_p, T_x, T_0 – соответственно, основное время работы, общее – на повороты и переезды и время остановки МТА с работающим двигателем; α_T –

энергосодержание топлива, применяемого для ГТД, МДж/кг; f_T – энергетический эквивалент топлива (т.е. затраты энергии на производство 1 кг топлива, МДж).

Производительность МТА $W_{\text{ч}}$ в час основного времени можно представить в виде:

$$W_{\text{ч}} = 0,36 \cdot \eta_T \cdot K_a^{-1} \cdot N_{\text{е}}, \quad (5)$$

где η_T – тяговый коэффициент полезного действия (КПД) трактора на рабочем режиме; K_a^{-1} – удельное сопротивление агрегата, кН/м; $N_{\text{е}}$ – эффективная мощность ГТД, кВт.

Среднее значение $\bar{N}_{\text{е}}$ эффективной мощности ГТД с учетом влияния коэффициента вариации нагрузки v_m определяется по формуле:

$$\bar{N}_{\text{е}} = c [A \cdot \bar{M}_T^2 (1 + v_m^2)], \quad (6)$$

где $c = 9554^{-1}$ – поправочный коэффициент; A, B – соответственно, постоянная величина и угловой коэффициент, определяемые по параметрам стендовой характеристики ГТД (табл. 1); M_T – момент на валу тяговой турбины ГТД, Н·м; v_m – коэффициент вариации нагрузки ГТД.

Выражение (4) можно представить в виде:

$$E_{\Pi} = E_{\Pi}^{\circ} + E_{\Pi}^A, \quad (7)$$

где $E_{\Pi}^{\circ} = [G_{\text{ч}} \cdot t_p \cdot (\alpha_T + f_T)] / W_{\text{ч}}$ – основные прямые топливно-энергетические затраты, то есть затраты энергии на установившемся нагрузочном (или рабочем) режиме ДПМ (после затухания переходных процессов) МТА при вы-

Таблица 1

Основные энергетические параметры, установленные по типовым характеристикам ГТД-350Т

$\lambda_{\bar{n}_T}$	μ	$A, \text{мин}^{-1}$	$B, \text{мин}^{-1}/\text{Нм}$	$G_{\text{ч}}, \text{кг/ч}$	$N_{\text{ен}}, \text{кВт}$
1,0	2,040	10820	–11,79	94	260
0,95	2,045	10285	–12,24	84	226
0,90	2,050	9530	–12,18	76	195
0,85	2,055	8920	–12,31	68	169
0,80	2,060	8220	–12,35	60	143
0,75	2,065	6980	–12,84	47	99
0,70	2,070	6270	–12,98	40	79
0,60	2,075	4930	–14,39	27	44

Примечание

$\lambda_{\bar{n}_{\text{тк}}} = \bar{n}_T / n_{\text{тн}}$ – уровень реализации частоты вращения вала тяговой турбины; $\bar{n}_T, n_{\text{тн}}$ – соответственно, текущее и номинальное значения частоты вращения тяговой турбины, мин^{-1} ; $\mu = M_{\text{max}} / M_{\text{н}}$ – кратность моментов, или коэффициент приспособляемости ГТД; $M_{\text{max}}, M_{\text{н}}$ – соответственно, максимальное и номинальное значения крутящего момента на валу тяговой турбины, Нм; $A = n_{\text{max}}$ – постоянная величина, равная максимальной частоте вращения вала тяговой турбины, мин^{-1} ; $B = -(n_{\text{max}} - n_{\text{min}})(\mu M_{\text{н}})^{-1}$ – угловой коэффициент, $\text{мин}^{-1}/\text{Нм}$; n_{min} – минимальное значение частоты вращения тяговой турбины, мин^{-1} ; G_T – часовой расход топлива ГТД, кг/ч; $N_{\text{ен}}$ – номинальная мощность ГТД, кВт.

полнении технологического процесса, МДж/га;
 $E_{\Pi}^{\Delta} = [(G_x \cdot t_x + G_0 \cdot t_0) \cdot (\alpha_T + f_T)] / W_{\Pi}$ – дополнительные прямые топливно-энергетические затраты, то есть затраты энергии при работе ГТД без нагрузки (на остановках) и с неполной нагрузкой (на поворотах и переездах), МДж/га.

Анализ показывает, что в зависимости от видов технологических операций и процессов значения дополнительных прямых энергозатрат E_{Π}^{Δ} находятся в пределах 10–15 % от E_{Π}^O .

Существенную экономию прямых энергетических затрат E_{Π} можно достичь путем оптимизации E_{Π}^O , зависящей от эффективного использования МТА с ГТД при выполнении механизированных полевых работ.

С учетом выражений (4)–(7) основные прямые топливно-энергетические затраты E_{Π}^O равны:

$$E_{\Pi}^O = \frac{G_{\Pi}(\alpha_T + f_T)}{0,36 \cdot c \cdot \eta_T \cdot K_a^{-1} [A \cdot \bar{M}_T + B \cdot \bar{M}_T^2 (1 + v_m^2)]} \quad (8)$$

Используя выражения (7) и (8), можно прогнозировать значения прямых топливно-энергетических затрат с большой достоверностью, с учетом случайного характера внешней нагрузки на работу МТА с ГТД.

Оптимальное значение основных прямых топливно-энергетических затрат E_{Π}^{O*} определяется с учетом экстремальных значений эффективной мощности $\bar{N}_e^*$ ГТД и производи-

тельности $\bar{W}_{\Pi}^*$ МТА, соответствующие критериям:

- максимум КПД трактора на данном рабочем режиме, т.е. $\eta_T \rightarrow \max$;
- минимум прямых топливно-энергетических затрат, т.е. $E_{\Pi} \rightarrow \min$.

При этом экстремальное (оптимальное) значение эффективной мощности ГТД определяется по формуле:

$$\bar{N}_e^* = c[A \cdot \bar{M}_T^* + B \cdot \bar{M}_T^{*2} (1 + v_m^2)], \quad (9)$$

где $\bar{M}_T^* = -A / [2B(1 + v_m^2)]$ – экстремальное значение момента $\bar{M}_T^*$ на валу тяговой турбины ГТД, Н·м.

Экстремальное значение часовой производительности МТА $\bar{W}_{\Pi}^*$ (га/ч) можно представить в виде:

$$\bar{W}_{\Pi}^* = 0,36 \cdot \eta_T \cdot K_a^{-1} \cdot \bar{N}_e^* \quad (10)$$

С учетом выражений (4), (7), (9) и (10) оптимальное значение прямых топливно-энергетических затрат определяется по выражению:

$$E_{\Pi}^* = E_{\Pi}^{O*} + E_{\Pi}^{\Delta}; \quad (11)$$

$$E_{\Pi}^{O*} = \frac{G_{\Pi}(\alpha_T + f_T)}{0,36 \cdot c \cdot \eta_T \cdot K_a^{-1} [A \cdot \bar{M}_T^* + B \cdot \bar{M}_T^{*2} (1 + v_m^2)]} \quad (12)$$

В качестве примера в таблице 2 приведены расчетные оптимальные значения прямых топливно-энергетических затрат пахотного агрегата, состоящего из газотурбинного трактора

Таблица 2

Прямые топливно-энергетические затраты пахотного агрегата ГТТ «Кировец»+ПНИ-8/9-40
 ($\eta = 0,7$; $K_a = 6,0$ кН/м)

λ_{Π}	$\bar{N}_e^*$, кВт	G_{Π} , кг/ч	v_m , %	$\bar{W}_{\Pi}^*$, га/ч	E_{Π}^{Δ} , Дж/га	E_{Π}^{O*} , МДж/га	E_{Π}^* , МДж/га
1,0	260	94	0	10,92	74,72	468,27	543,0
	239,92		8,3	10,07	81,03	507,80	588,83
	222,65		16,7	9,35	87,27	546,91	634,18
	207,87		25,0	8,73	93,47	585,75	679,22
	194,92		33,3	8,20	99,51	623,61	723,12
0,9	195	76	0	8,19	99,63	504,81	604,44
	180,16		8,3	7,57	107,79	546,16	653,95
	167,19		16,7	7,02	116,24	588,95	705,19
	156,10		25,0	6,55	124,58	631,21	755,79
	146,37		33,3	6,15	132,68	672,26	804,94
0,8	143	60	0	6,0	136,0	544,0	680,0
	132,20		8,3	5,55	147,03	588,11	735,14
	122,68		16,7	5,15	158,45	633,77	792,22
	114,53		25,0	4,81	169,65	678,58	848,23
	107,40		33,3	4,51	180,93	723,73	904,66

ГТТ «Кировец» с газотурбинным двигателем ГТД-350Т, и плуга ПНИ-8/9-40.

Установлено, что при уровне реализации частоты вращения турбокомпрессора $\lambda_{\bar{n}_t} = 1,0$ (100 %) и колебания коэффициента вариации нагрузки от 0 до 0,333 оптимальные значения прямых топливно-энергетических затрат пахотного агрегата увеличиваются от 543,0 до 723,12 МДж/га. Такая же тенденция увеличения прямых топливно-энергетических затрат МТА наблюдается и на других уровнях реализации частоты вращения турбокомпрессора ГТД.

Следует отметить, что с уменьшением уровня реализации частоты вращения турбокомпрессора ГТД прямые топливно-энергетические затраты увеличиваются.

Например, при фиксированном значении коэффициента вариации нагрузки $v_m = 0,333$ значения прямых топливно-энергетических затрат пахотного агрегата увеличивается от 634,18 МДж/га (при $\lambda_{\bar{n}_t} = 1,0$) до 792,22 МДж/га (при $\lambda_{\bar{n}_t} = 0,8$).

Выводы

При энергетической оценке технологических процессов следует учесть случайный характер внешних воздействий, из-за которых постоянно возникают естественные отклонения энергетических параметров и технико-экономических показателей МТА от их базового значения. Учет этих отклонений позволяет с наибольшей достоверностью прогнозировать эксплуатационные показатели МТА.

Увеличение меры рассеяния нагрузки v_m способствует снижению производительности и увеличению прямых топливно-энергетических затрат МТА. Прямые топливно-энергетические затраты следует подразделить на основные (затраты энергии, выраженные расходом топлива на рабочем режиме двигателя) и дополнительные (затраты энергии, выраженные расходом топлива на остановках с работающим двигателем, поворотах и переездах).

Литература

1. Методические рекомендации по топливно-энергетической оценке сельскохозяйственной техники, технологических процессов и технологий в растениеводстве. М.: ВИМ, 1989. 59 с.
2. Агеев Л.Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов. Л.: Колос, Ленинградское отделение, 1978. 296 с.
3. Шкрабак В.С., Джаббаров Н.И. Эффективность применения газотурбинных двигателей на тракторах сельскохозяйственного назначения // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 10. С. 46–48.
4. Шкрабак В.С., Джаббаров Н.И., Шкрабак Р.В., Федькин Д.С. Сравнительная оценка энергетической эффективности пахотных агрегатов на базе тракторов с дизельным и газотурбинным двигателями // Тракторы и сельхозмашины, 2016. № 2. С. 44–46.

References

1. Metodicheskie rekomendacii po toplivno-ehnergeticheskoj ocenke sel'skohozyajstvennoj tekhniki, tekhnologicheskikh processov i tekhnologij v rastenievodstve [Methodical recommendations on the fuel and energy assessment of agricultural machinery, technological processes and technologies in crop production]. Moscow: VIM Publ., 1989. 59 p.
2. Ageev L.E. Osnovy rascheta optimal'nyh i dopuskaemyh rezhimov raboty mashinno-traktornyh agregatov [Basics of calculating optimal and acceptable modes of operation of machine-tractor units]. Leningrad: Kolos, Leningradskoe otdelenie Publ., 1978. 296 p.
3. SHkrabak V.S., Dzhabborov N.I. Efficiency of using gas turbine engines on agricultural tractors. Traktory i sel'hozmashiny, 2015, No 10, pp. 46–48 (in Russ.).
4. SHkrabak V.S., Dzhabborov N.I., SHkrabak R.V., Fed'kin D.S. A comparative assessment of the energy efficiency of plowing units based on tractors with diesel and gas turbine engines. Traktory i sel'hozmashiny, 2016, No 2, pp. 44–46 (in Russ.).