

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТРАКТОРА

CALCULATION OF THE MAXIMUM ENERGY SATURATION OF AN AGRICULTURAL TRACTOR

В.А. САМСОНОВ¹, д.т.н.

Ю.Ф. ЛАЧУГА², академик РАН

¹ Автономная некоммерческая организация
«Редакция журнала «Механизация и электрификация
сельского хозяйства», Москва, Россия

² Российская академия наук (РАН), Москва, Россия,
mehelagro@mail.ru

V.A. SAMSONOV¹, DSc in Engineering

YU.F. LACHUGA², Academician of the Russian Academy
of Sciences

¹ Autonomous non-commercial organization
«Editorial Board of the journal VMechanization
and electrification of agriculture», Moscow, Russia

² Russian Academy of Science, Moscow, Russia,
mehelagro@mail.ru

Производительность машинно-тракторного агрегата увеличивается с повышением энергонасыщенности трактора. Поэтому представляет интерес определение максимальной энергонасыщенности и соответствующих ей показателей тяговой характеристики трактора с оценкой его эффективности по производительности и расходу топлива при сравнении с аналогом. С ростом энергонасыщенности увеличиваются рабочая скорость трактора и тяговое сопротивление рабочего органа агрегата, следовательно, повышается расход топлива. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете. Определение максимальной энергонасыщенности трактора с учетом ограничений по скорости и буксованию – актуальная задача теории трактора. Цель исследования заключается в разработке методики и алгоритмов расчета максимальной энергонасыщенности трактора и соответствующих ей показателей тяговой характеристики при изменении частоты вращения коленчатого вала двигателя. Объект исследования – колесный трактор общего назначения. Исходный материал: показатели двигателя и трактора; коэффициенты, характеризующие тягово-сцепные свойства трактора; уравнение баланса мощности трактора; функция буксования; функции расхода топлива двигателем и его крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала. Метод исследования – расчет по основным формулам теории трактора при изменении частоты вращения коленчатого вала на один оборот. Использованы передаточные числа трансмиссии, рассчитанные с учетом заданных значений номинальной частоты вращения коленчатого вала двигателя и коэффициента его приспособляемости по крутящему моменту. Основные выводы: предложен критерий оптимальности знаменателя ряда передач с учетом коэффициента приспособляемости двигателя по крутящему моменту; в тяговую характеристику трактора введены дополнительные показатели: коэффициенты погектарного расхода топлива, производительности и крюковой расход топлива на единицу производительности; критерием для расчета максимальной энергонасыщенности служит максимум тягового КПД при максимуме тяговой мощности и коэффициента приспособляемости на соответствующей передаче с принятой на ней теоретической скоростью.

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор, энергонасыщенность, тяговая характеристика, знаменатель ряда передач, расход топлива.

The efficiency of the machine-tractor unit increases with the increase of the energy saturation of the tractor. Therefore, it is of interest to determine the maximum energy saturation and the corresponding traction characteristics of the tractor with an estimate of its efficiency in terms of productivity and fuel consumption when compared with the analog. With increasing energy saturation, the working speed of the tractor and the traction resistance of the working element of the unit increase, hence the fuel consumption is increased. This circumstance must be taken into account in the calculation. Determination of the maximum energy saturation of the tractor, taking into account speed limits and skidding, is an actual task of the tractor theory. The purpose of the study is to develop a methodology and algorithms for calculating the maximum energy saturation of the tractor and its corresponding traction performance when the engine speed is changed. The object of investigation is a general purpose wheeled tractor. Source material: engine and tractor performance characteristics; coefficients that characterize the traction and coupling properties of the tractor; the tractor power balance equation; slipping function; the function of fuel consumption of the engine and its torque from the speed of the crankshaft. The method of investigation is the calculation by the basic formulas of the theory of the tractor when the rotational speed of the crankshaft is changed by one turnover. Gear ratios of the transmission, calculated taking into account the set values of the nominal engine speed and the coefficient of its adaptability for torque, are used. Main conclusions: a criterion for the optimality of the denominator of a number of gears is proposed, taking into account the coefficient of adaptability of the engine for the torque; in the traction characteristics of the tractor introduced additional indicators: the coefficients of per-hectare fuel consumption, productivity and hook consumption of fuel per unit of productivity; the criterion for calculating the maximum energy saturation is the maximum traction efficiency at the maximum tractive power and the efficiency factor in the corresponding gear with the theoretical speed assumed on it.

Keywords: agricultural tractor, energy saturation, traction characteristics, denominator of a number of gears, fuel consumption.

Введение

В работе В.А. Самсонова и Ю.Ф. Лачуги [1] найдены интервалы изменения энергонасыщенности тракторов общего назначения по минимуму удельных энергозатрат. С ростом энергонасыщенности увеличивается производительность трактора. Максимальная производительность трактора достигается при максимальной энергонасыщенности, расчет которой с учетом принятых ограничений по скорости и буксованию – актуальная задача теории трактора.

Цель исследования

Целью исследования является разработка методики и алгоритмов расчета максимальной энергонасыщенности трактора и соответствующих ей показателей тяговой характеристики при изменении частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Материалы и методы исследования

Методика расчета рассмотрена на примере колесного трактора К-424 («Кировец») тягового класса 4 [2].

Исходный материал: показатели двигателя и трактора; коэффициенты, характеризующие тягово-сцепные свойства трактора; уравнение баланса мощности трактора; функция буксования; зависимости расхода топлива двигателем и его крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала.

Метод исследования – расчет по основным формулам теории трактора при изменении частоты вращения коленчатого вала на один оборот.

Результаты и обсуждение

У трактора К-424 необходимо отметить два существенных положительных свойства, повышающие его эффективность по сравнению с аналогами в тяговом классе 4: более экономичный двигатель (удельный расход топлива

$g_e = 197 \text{ г/(кВт·ч)}$ при номинальной частоте вращения $n_n = 2300 \text{ мин}^{-1}$), высокий коэффициент приспособляемости двигателя по крутящему моменту $k_m = 1,3$ [2].

Исходными данными служат основные показатели трактора К-424 (табл. 1) [2]. Теоретическая скорость принята с учетом рекомендаций Г.М. Кутькова [3].

На примере К-424 рассмотрим решение следующих задач:

- расчет тяговой характеристики при энергонасыщенности $\Xi = N_n/m = 176,5/10,6 = 16,65 \text{ кВт/т}$ (обозначим ТХ1);
- расчет максимальной энергонасыщенности Ξ_m ;
- расчет тяговой характеристики при Ξ_m (обозначим ТХ2);
- оценка эффективности трактора с ТХ2 и ТХ1.

Показатели, необходимые для расчета тяговой характеристики: N_n – номинальная мощность двигателя, Вт; m – эксплуатационная масса трактора, кг; n_n, n_m, n_x – соответственно, частота вращения коленчатого вала двигателя номинальная, при максимальном крутящем моменте, холостого хода, мин^{-1} ; k_m – коэффициент приспособляемости двигателя по крутящему моменту; M_n, M_m – соответственно, номинальный и максимальный крутящий момент двигателя, Н·м; ϵ_n, ϵ_m – соответственно, коэффициент загрузки двигателя по мощности и моменту; n – количество рабочих передач; q – знаменатель геометрического ряда передач; $P_{кр1} \dots P_{крn}$ – диапазон тягового усилия трактора на передачах $1 \dots n$, Н; $v_{т1} \dots v_{тn}$ – диапазон теоретической скорости на передачах $1 \dots n$, км/ч; η_m – КПД трансмиссии; δ – буксование; f – коэффициент сопротивления качению трактора; $i_{т1} \dots i_{тn}$ – диапазон передаточных чисел трансмиссии на передачах $1 \dots n$; r_k – радиус качения колеса.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Показатели	Значение	Показатели	Значение
N_n , кВт [2] (двигатель ЯМЗ-53625)	176,5	r_k , м [2] (шина 23,1R26)	0,8
m , т [2]	10,6	$v_{т1}$, км/ч [3]	10
k_m [2]	1,3	$v_{тn}$, км/ч [3]	17
n_n , мин^{-1} [2]	2300	η_m [4]	0,9
n_m , мин^{-1} [2]	1600	f [3, 4]	0,12
n_x , мин^{-1} [2]	2500	–	–

Расчет функции $q(n, k_m)$. Для определения знаменателя скоростного ряда с n рабочими передачами используем условие согласованности работы двигателя и трансмиссии [3]:

$$q \geq 1/k_m, \quad (1)$$

откуда:

$$q - 1/k_m \geq 0, \quad (2)$$

где

$$q = \sqrt[n-1]{v_{т1} / v_{тn}}. \quad (3)$$

С увеличением n при $k_m = \text{const}$ возрастает q и увеличивается левая часть выражения (2). При каком-то значении n она достигнет максимума. В этом случае критерий оптимальности для расчета q и n запишем как, %:

$$F_n = 100(q - 1/k_m)/(n - 1) \rightarrow \max. \quad (4)$$

Алгоритм расчета функции $q(n, k_m)$: при изменении в цикле n для каждого задаваемого значения k_m рассчитываем (3) и (4). Результаты расчета при $k_m = 1,3$ представлены в табл. 2. Максимум $F_n = 2,6633$ определяет оптимальные значения $n \geq 5$ и $q = 0,8757$. При этом выполняется ограничение (1): $0,8757 > 1/1,3 = 0,7518$.

Расчет передаточных чисел трансмиссии и теоретической скорости на передачах.

Исходное передаточное число находим при $v_{т1} = 10$ км/ч:

$$i_{т1} = (\pi n_k r / 30) / v_{т1} = (3,14 \cdot 2300 \cdot 0,8 / 30) / (10 / 3,6) = 69,3312.$$

Передаточные числа и теоретические скорости на передачах:

$$i_{тj} = i_{т1} q^{j-1} = 69,3312 q^{j-1};$$

$$v_{тj} = v_{т1} / q^{j-1} = 10 / q^{j-1},$$

где $j = 2 \dots n$; $q = 0,8757$.

Результаты расчета представлены в табл. 3.

Функции $M_e(n_e)$. Для расчета необходимы функции текущего крутящего момента $M_e(n_e)$

от частоты вращения коленчатого вала на корректорном и регуляторном участках скоростной характеристики двигателя. По аналогии с двигателями ЯМЗ-53622, ЯМЗ-53622-10, ЯМЗ-53622-30 [5] их принимаем прямыми:

– на корректорном участке

$$M_c = M_n + (M_m - M_n)(n_n - n_c)/(n_n - n_e); \quad (5)$$

– на регуляторном участке

$$M_c = M_n(n_n - n_e)/(n_n - n_e). \quad (6)$$

Функция буксования $\delta(\varphi_{кр})$. Ее находим аппроксимацией кривой $\delta(\varphi_{кр})$, полученной по осредненным данным для колесных тракторов [3]:

$$\delta = 0,02879397 + 0,1489948\varphi_{кр} - 0,6006476\varphi_{кр}^2 + 1,929105\varphi_{кр}^3. \quad (7)$$

Используем (7) для расчета максимального тягового КПД. Алгоритм расчета (изменяем $\varphi_{кр}$ в цикле с шагом 0,01): функция (7); $\eta_\delta = 1 - \delta$ – коэффициент, учитывающий потери энергии на буксование; $\eta_f = \varphi_{кр} / (\varphi_{кр} + f)$ – коэффициент, учитывающий потери энергии на качение трактора; $\eta_t = \eta_m \eta_\delta \eta_f$ – тяговый КПД.

Результаты расчета: максимальный тяговый КПД $\eta_{тм} = 0,612545$ при $\delta = 10,9$ %. Полученное значение $\eta_{тм}$ используем далее для определения максимальной энергонасыщенности.

Функция $g_e(n_e)$ удельного расхода топлива двигателем. Используем данные из руководства [5]: у двигателей ЯМЗ-53622, ЯМЗ-53622-10, ЯМЗ-53622-30 с $n_n = 2300$ мин⁻¹ функция $g_e(n_e)$ по всей скоростной характеристике – прямая линия, г/(кВт·ч):

$$g_e = 155 + 0,025n_e.$$

По аналогии с этой формулой, учитывая что у двигателя ЯМЗ-53625 при $n_n = 2300$ мин⁻¹ $g_e = 197$ г/(кВт·ч), найдем функцию $g_e(n_e)$ у трактора К-424:

$$g_e = 139,5 + 0,025n_e. \quad (8)$$

Таблица 2

Функция $q(n, k_m)$ при $k_m = 1,3$

n	4	5	6	7
q	0,8378	0,8757	0,8993	0,9153
F_n	2,2884	2,6633 max	2,6016	2,4354

Таблица 3

Расчетные передаточные числа трансмиссии и теоретические скорости

i_{mj}	69,3312	60,7133	53,1666	46,5580	40,7709
v_{mj} , км/ч	10,00	11,42	13,04	14,89	17,00

Дополнительные показатели тяговой характеристики. В работе [1] показано, что эквивалентом производительности служит коэффициент (мощность для ее достижения), кВт:

$$k_{\pi} = N_{\text{кр}}/\mu, \quad (9)$$

где $N_{\text{кр}}$ – тяговая мощность, кВт; $\mu = 0,052v^2 + 0,9$ – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение удельного тягового сопротивления при повышении рабочей скорости (на стерне).

Производительности с коэффициентом k_{π} соответствует определенный погектарный расход топлива, эквивалентом которого служит безразмерный коэффициент [1]:

$$g_{\pi} = \mu/\eta_{\pi}. \quad (10)$$

Двигатель трактора расходует на единицу тяговой мощности $N_{\text{кр}}$, кВт, (на создание единицы полезной энергии в единицу времени) топливо в количестве $g_{\text{кр}} = g_{\pi}/\eta_{\pi}$, г/(кВт·ч), – расход топлива (полезный) на единицу тяговой мощности (или крюковой расход топлива). Это количество топлива обеспечивает производительность с коэффициентом k_{π} .

Показатель эффективности трактора по полезному расходу топлива, г/(кВт·ч)/кВт:

$$g_{\text{кро}} = g_{\text{кр}}/k_{\pi}. \quad (11)$$

Физический смысл $g_{\text{кро}}$: полезный расход топлива на единицу производительности (относительный расход топлива или стоимость единицы производительности). Показатель $g_{\text{кро}}$ – обобщенный критерий эффективности трактора по производительности и расходу топлива: чем меньше $g_{\text{кро}}$, тем эффективнее трактор по сравнению с аналогом.

Показатели k_{π} , g_{π} , $g_{\text{кро}}$ включаем в тяговую характеристику трактора в качестве основных. Используя их, можно рассчитать производительность, га/ч, погектарный расход топлива, кг/га, и стоимость единицы производительности, кг/(га·ч) или р./(га·ч), на выполняемой трактором технологической операции.

Расчет максимальной энергонасыщенности. Максимальную энергонасыщенность Θ_m определяем на передаче, на которой достигается

максимальный тяговый КПД $\eta_{\text{TM}} = 0,612545$ при максимальной тяговой мощности.

Алгоритм расчета (алгоритм 1; в программу вводим $i_{\text{тj}}$ из табл. 3, Θ , $n_{\text{н}}$, $n_{\text{м}}$, $n_{\text{х}}$, $m = 10\ 600$ кг, f): $N_{\text{н}} = \Theta m$; $M_{\text{н}} = 30N_{\text{н}}/\omega n_{\text{н}}$; $M_{\text{м}} = k_{\text{м}}M_{\text{н}}$; если двигатель работает на регуляторном участке скоростной характеристики – формула (6); при работе двигателя на корректорном участке скоростной характеристики – формула (5); $\varepsilon_{\text{м}} = M_{\text{е}}/M_{\text{н}}$; $\varepsilon_{\text{н}} = \varepsilon_{\text{м}}n_{\text{е}}/n_{\text{н}}$; $P_{\text{к}} = \eta_{\text{м}}\varepsilon_{\text{м}}M_{\text{н}}i_{\text{тj}}/r_{\text{к}}$; $v_{\text{т}} = \eta_{\text{м}}\varepsilon_{\text{н}}N_{\text{н}}/P_{\text{к}}$; $P_{\text{кр}} = P_{\text{к}} - mgf$; $\varphi_{\text{кр}} = P_{\text{кр}}/mg$; δ – по формуле (7); $\eta_{\delta} = 1 - \delta$; $v = v_{\text{т}}\eta_{\delta}$; $N_{\text{кр}} = P_{\text{кр}}/v$; $\eta_{\pi} = N_{\text{кр}}/\varepsilon_{\text{н}}N_{\text{н}}$.

По алгоритму 1 методом подбора определили, что максимальный тяговый КПД $\eta_{\text{TM}} = 0,612544$ достигается на передаче с $i_{\text{т}} = 46,558$ при $\Theta_{\text{м}} = 22,6$ кВт/т и выполнении ограничений по скорости и буксованию. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Номинальная мощность двигателя трактора К-424 при $\Theta_{\text{м}} = 22,6$ кВт/т составляет $N_{\text{н}} = 22,6 \cdot 10,6 = 239,56$ кВт.

Расчет тяговых характеристик ТХ1 и ТХ2. Показатели тяговых характеристик рассчитываем по максимуму k_{π} при максимуме $N_{\text{кр}}$, $n_{\text{е}}$ изменяем в цикле с шагом 1 мин⁻¹. Алгоритм расчета (алгоритм 2; в программу вводим $i_{\text{тj}}$ из табл. 3, $N_{\text{н}}$, $n_{\text{н}}$, $n_{\text{м}}$, $n_{\text{х}}$, $m = 10\ 600$ кг, f): $M_{\text{н}} = 30N_{\text{н}}/\omega n_{\text{н}}$; $M_{\text{м}} = k_{\text{м}}M_{\text{н}}$; если двигатель работает на регуляторном участке скоростной характеристики – формула (6); при работе двигателя на корректорном участке скоростной характеристики – формула (5); $\varepsilon_{\text{м}} = M_{\text{е}}/M_{\text{н}}$; $\varepsilon_{\text{н}} = \varepsilon_{\text{м}}n_{\text{е}}/n_{\text{н}}$; $P_{\text{к}} = \eta_{\text{м}}\varepsilon_{\text{м}}M_{\text{н}}i_{\text{тj}}/r_{\text{к}}$; $v_{\text{т}} = \eta_{\text{м}}\varepsilon_{\text{н}}N_{\text{н}}/P_{\text{к}}$; $P_{\text{кр}} = P_{\text{к}} - mgf$; $\varphi_{\text{кр}} = P_{\text{кр}}/mg$; δ – по формуле (7); $\eta_{\delta} = 1 - \delta$; $v = v_{\text{т}}\eta_{\delta}$; $N_{\text{кр}} = P_{\text{кр}}/v$; $\eta_{\pi} = N_{\text{кр}}/\varepsilon_{\text{н}}N_{\text{н}}$; $g_{\text{е}} = g_{\pi}/\eta_{\pi}$; $\mu = 0,052v^2 + 0,9$; k_{π} – по формуле (9); g_{π} – по формуле (10); $g_{\text{кро}}$ – по формуле (11).

Результаты расчета по алгоритму 2 представлены в табл. 5: верхние строки – ТХ1 при $\Theta = 16,65$ кВт/т; нижние строки – ТХ2 при $\Theta_{\text{м}} = 22,6$ кВт/т. Из таблицы следует, что трактор при $\Theta_{\text{м}} = 22,6$ кВт/т существенно эффективнее по производительности (больше k_{π}) и по относительному расходу топлива (меньше $g_{\text{кро}}$). Буксование на передачах 1 и 2 соизмеримо с буксованием на стерне других колесных

Таблица 4

Результаты расчета тягового КПД при $\Theta_{\text{м}} = 22,6$ кВт/т ($i_{\text{м}} = 46,558$, $v_{\text{т}} = 14,87$ км/ч, $\delta = 10,6$ %)

$n_{\text{е}}$, мин ⁻¹	2294	2295	2296	2297	2298
$N_{\text{кр}}$, Вт	146 736,3	146 736,7	146 737,1	146 737,3	146 737,4
η_{π}	0,612551	0,612548	0,612544 max	0,612541	0,612537

Таблица 5

Расчетные тяговые характеристики ТХ1 (верхние строки, $\Theta = 16,65$ кВт/т) и ТХ2 (нижние строки, $\Theta_m = 22,6$ кВт/т)

Показатели	i , номер передачи					
	69,3312 1	60,7133 2	53,1666 3	46,5580 4	40,7709 5	35,7031 6
	Значения показателей					
n_e , мин ⁻¹	2300 2319	2255 2300	2148 2300	2078 2214	2030 2097	1852 2055
ε_N	1,000 0,912	0,999 1,000	0,995 1,000	0,989 1,000	0,985 0,996	0,960 0,987
ε_m	1,000 0,905	1,019 1,000	1,065 1,000	1,095 1,002	1,116 1,05	1,192 1,105
$P_{кр}$, кН	44,708 57,765	38,565 55,491	34,231 46,779	29,577 39,502	25,042 35,651	22,625 31,493
v_t , км/ч	10,00 10,08	11,20 11,42	12,18 13,04	13,45 14,87	15,01 15,98	15,64 17,35
v , км/ч	8,52 7,49	9,93 8,79	11,03 11,09	12,44 13,31	14,22 14,50	14,81 16,09
$N_{кр}$, кВт	105,791 120,221	106,324 135,464	104,273 144,050	102,246 146,076	98,914 144,524	93,095 140,792
η_t	0,5994 0,5500	0,6028 0,5655	0,5973 0,6040	0,5855 0,6125	0,5621 0,6087	0,5495 0,5979
δ , %	14,8 25,7	11,1 23,0	9,4 15,0	7,5 10,4	5,3 8,7	5,0 7,2
$g_{кр}$, г/(кВт·ч)	329 359	325 348	323 326	327 321	334 318	338 319
g_t	1,987 2,046	2,149 2,140	2,324 2,306	2,599 2,630	3,007 2,883	3,240 3,243
$k_{п}$, кВт	88,813 106,841	82,087 111,964	75,553 103,403	67,205 90,670	57,800 82,371	52,288 72,601
$g_{кро}$, (г/(кВт·ч))/кВт	3,701 3,361	3,959 3,112	4,281 3,154	4,866 3,545	5,784 3,861	6,466 4,397
g_e , г/(кВт·ч)	197,000 197,475	195,875 197,000	193,200 197,000	191,450 196,900	190,250 193,550	185,800 190,875
Π , га/ч	1,776 2,136	1,641 2,239	1,511 2,078	1,344 1,823	1,156 1,652	1,045 1,457
G_t , кг/га	19,517 20,145	21,202 21,019	22,386 22,640	24,809 25,790	28,524 27,892	30,015 30,941
$G_{пг}$, (кг/га)/(га/ч)	10,989 9,431	12,920 9,587	14,815 10,895	18,459 14,147	24,674 16,883	28,722 21,236

тракторов [6]: МТЗ-82 – 25 %, Т-150К – 23,5 %, К-701 – 23,9 %.

При $\Theta_m = 22,6$ кВт/т на передачах 1 и 2 трактор может работать с номинальным тяговым усилием. По алгоритму 2 находим показатели режимов:

– передача 1 – $n_e = 2352$ мин⁻¹; $\varepsilon_N = 0,757$; $P_{кр} = 44,959$ кН; $v_t = 10,23$ км/ч; $N_{кр} = 110,233$ кВт; $\eta_t = 0,6088$; $\delta = 13,7$ %; $k_{п} = 90,905$ кВт; $g_{кро} = 3,587$ (г/(кВт·ч))/кВт;
– передача 2 – $n_e = 2351$ мин⁻¹; $\varepsilon_N = 0,856$; $P_{кр} = 44,956$ кН; $v_t = 11,57$ км/ч; $N_{кр} = 127,751$ кВт; $\eta_t = 0,6081$; $\delta = 13,7$ %; $k_{п} = 95,931$ кВт; $g_{кро} = 3,390$ (г/(кВт·ч))/кВт.

На этих режимах трактор работает с недогрузкой по мощности, но его производитель-

ность больше (больше $k_{п}$) и относительный расход топлива меньше (меньше $g_{кро}$), чем при работе с тяговой характеристикой ТХ1.

Показатели эффективности К-424 с тяговыми характеристиками ТХ1 и ТХ2. Показатели в последних трех строках табл. 5 рассчитаны по формулам:

– производительность, га/ч:

$$\Pi = 0,36k_{п}/k_0;$$

– погектарный расход топлива, кг/га:

$$G_t = 2,77k_0g_eg_t;$$

– погектарный расход топлива на единицу производительности (относительный расход

топлива, стоимость единицы производительности), (кг/га)/(га/ч):

$$G_{\text{тп}} = G_{\text{г}}/\Pi,$$

где k_0 – удельное тяговое сопротивление плуга при скорости 5 км/ч, кН/м (при расчете приняты: удельное сопротивление почвы – 60 кН/м², глубина обработки – 0,3 м, $k_0 = 60 \cdot 0,3 = 18$ кН/м).

Показатели $g_{\text{кpo}}$ и $G_{\text{тп}}$ – эквивалентны; первый не учитывает сопротивление почвы, и его удобнее применять при проектировании, второй оценивает эффективность трактора в конкретных условиях эксплуатации. Чем меньше $G_{\text{тп}}$, тем эффективнее трактор.

Средние геометрические значения Π , $G_{\text{г}}$ и $G_{\text{тп}}$ по всему тяговому диапазону:

– характеристика ТХ1 –

$$\Pi = 1,388 \text{ га/ч}; G_{\text{г}} = 24,117 \text{ кг/га}; \\ G_{\text{тп}} = 17,375 \text{ (кг/га)/(га/ч)};$$

– характеристика ТХ2 –

$$\Pi = 1,876 \text{ га/ч}; G_{\text{г}} = 24,448 \text{ кг/га}; \\ G_{\text{тп}} = 13,075 \text{ (кг/га)/(га/ч)}.$$

При незначительно большем погектарном расходе топлива трактор К-424 с ТХ2 эффективнее: по производительности – на $100 \cdot (1,876/1,388) - 1 = 35,1$ %, по относительному расходу топлива – на $100 \cdot (13,075/17,375) - 1 = -24,7$ %; за 1 ч работы при обработке 1 га расход топлива меньше на $17,375 - 13,075 = 4,3$ кг, то есть экономия топлива за 10 ч работы (одна смена) составит 43 кг.

Таким образом, для трактора К-424 с эксплуатационной массой 10,6 т максимальная энергонасыщенность, при которой существенно увеличивается производительность и уменьшается относительный расход топлива, составляет 22,6 кВт/т.

Выводы

1. Предложен критерий оптимальности знаменателя ряда передач с учетом коэффициента приспособляемости двигателя по крутящему моменту.

2. В тяговую характеристику трактора введены дополнительные показатели: коэффициенты погектарного расхода топлива, производительности и крюковой расход топлива на единицу производительности. Используя их, можно рассчитать производительность, погектарный расход топлива и стоимость единицы производительности.

3. Максимальная энергонасыщенность трактора определяется максимумом тягового КПД при максимуме тяговой мощности и коэффициента производительности на соответствующей передаче с принятой на ней теоретической скоростью.

Литература

1. Самсонов В.А., Лачуга Ю.Ф. Расчет оптимальных значений мощности и энергонасыщенности сельскохозяйственного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 7. С. 25–32.
2. Описание основных узлов и технические характеристики трактора К-424 «Кировец». URL: http://kirovets-ptz.com/rus/i_dc1/ci_i/63/informatsiya_pro_k4f_1_.pdf
3. Кутков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. М.: КолосС, 2004. 504 с.
4. Скотников В.А., Машенский А.А., Солонский А.С. Основы теории и расчета трактора и автомобиля. М.: Агропромиздат, 1986. 384 с.
5. Двигатели ЯМЗ-536, ЯМЗ-5361, ЯМЗ-5362, ЯМЗ-5363, ЯМЗ-5364, их модификации и комплектации. Руководство по эксплуатации / Под ред. Н.Л. Шамалы. Ярославль: ОАО «Автодизель», 2013. 240 с.
6. Антонов А.П., Антышев Н.М., Банник А.П. и др. Тяговые характеристики сельскохозяйственных тракторов. Альбом-справочник. М.: Россельхозиздат, 1979. 240 с.

References

1. Samsonov V.A., Lachuga Yu.F. Calculation of optimum power and energy saturation of an agricultural tractor. Traktory i sel'khoz mashiny. 2017. No 7, pp. 25–32.
2. Opisaniye osnovnykh uzlov i tekhnicheskie kharakteristiki traktora K-424 «Kirovets». URL: http://kirovets-ptz.com/rus/i_dc1/ci_i/63/informatsiya_pro_k4f_1_.pdf
3. Kut'kov G.M. Traktory i avtomobili. Teoriya i tekhnologicheskie svoystva [Tractors and automobiles. Theory and technological properties]. Moscow: KolosS Publ., 2004. 504 p.
4. Skotnikov V.A., Mashchenskiy A.A., Solonskiy A.S. Osnovy teorii i rascheta traktora i avtomobilya [The fundamentals of the theory and calculation of tractor and automobile]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1986. 384 p.
5. Dvigateli YaMZ-536, YaMZ-5361, YaMZ-5362, YaMZ-5363, YaMZ-5364, ikh modifikatsii i komplektatsii. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Engines YMZ-536, YMZ-5361, YMZ-5362, YMZ-5363, YMZ-5364, their modifications and configurations. Manual]. Pod red. N.L. Shamalya. Yaroslavl': OAO «Avtodizel'» Publ., 2013. 240 p.
6. Antonov A.P., Antyshev N.M., Bannik A.P. i dr. Tyagovye kharakteristiki sel'skokhozyaystvennykh traktorov. Al'bom-spravochnik [Traction characteristics of agricultural tractors. Album-directory]. Moscow: Rossel'khozizdat Publ., 1979. 240 p.