

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТРАКТОРА

CALCULATION OF OPTIMAL POWER AND 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 "Mechanization and electrification of agriculture", Moscow, Russia,

² Russian Academy of Sciences (RAS), Moscow, Russia, mehelagro@mail.ru

Расчет оптимальных значений мощности, эксплуатационной массы и энергонасыщенности сельскохозяйственного трактора, при которых достигаются минимальный расход топлива и оптимальная производительность, – актуальная задача теории трактора. Цель исследования заключается в определении оптимальных значений мощности, эксплуатационной массы и энергонасыщенности сельскохозяйственного трактора по минимуму удельных энергозатрат – отношения энергозатрат при обработке единицы площади к достигнутой производительности. Объекты исследования: комбинированные пахотные агрегаты с колесными и гусеничными тракторами общего назначения. Исходный материал: номинальные тяговые усилия, принятые для разных тяговых классов; коэффициенты, характеризующие тягово-сцепные свойства трактора; уравнение мощностного баланса трактора; функция буксования; компьютерная программа минимизации функции методом дихотомии; зависимости для безразмерных коэффициентов, учитывающих увеличение удельного тягового сопротивления агрегата с повышением рабочей скорости. Основной метод исследования – расчет с использованием нелинейного программирования при изменении энергонасыщенности способом дихотомии. При загрузке номинальным тяговым усилием номинальную мощность трактора общего назначения и его максимальную энергонасыщенность определяют удельные энергозатраты, соответствующие работе пахотного агрегата с допустимыми значениями рабочей скорости и буксования. Минимальная энергонасыщенность трактора определяется отношением минимальной эксплуатационной мощности к максимальной эксплуатационной массе трактора, соответствующей максимуму тягового КПД. Основные выводы: удельные энергозатраты трактора на технологической операции зависят от ее вида и безразмерного коэффициента, учитывающего повышение удельного тягового сопротивления агрегата при увеличении скорости и изменяющегося по параболе; номинальная мощность колесного трактора находится в интервале, нижний предел которого определяют минимальные удельные энергозатраты при максимальном тяговом КПД, верхний – удельные энергозатраты при максимальной допустимой скорости и допустимом буксовании; номинальную мощность гусеничного трактора определяют удельные энергозатраты при максимальной допустимой скорости и допустимом буксовании.

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор, оптимальные значения мощности и энергонасыщенности, удельные энергозатраты, показатели эффективности.

Calculation of the optimum power, operating weight and energy saturation of the agricultural tractor at which the minimum fuel consumption and optimum performance are achieved is an actual task of the tractor theory. The purpose of the study is to determine the optimal power, operating weight and energy saturation of the agricultural tractor at the minimum specific energy consumption – the ratio of energy costs when processing a unit of area to the achieved productivity. Objects of research: combined arable units with wheeled and caterpillar tractors of general purpose. Initial material: nominal traction forces accepted for different traction classes; coefficients that characterize the traction-coupling properties of the tractor; the tractor's power balance equation; skidding function; computer program to minimize the function by the dichotomy method; dependences for dimensionless coefficients that take into account the increase in the specific traction resistance of the unit with an increase in operating speed. The main research method is the calculation using nonlinear programming when the energy saturation is changed by the dichotomy method. When loading with nominal tractive effort, the nominal power of a general-purpose tractor and its maximum energy saturation are determined by the specific energy costs corresponding to the operation of the arable unit with permissible operating speed and slippage. The minimum energy saturation of the tractor is determined by the ratio of the minimum operating power to the maximum operating weight of the tractor corresponding to the maximum traction efficiency. The main conclusions: the specific energy consumption of the tractor on the process operation depends on its type and the dimensionless coefficient, taking into account the increase in the specific traction resistance of the unit with increasing speed and changing in the parabola; the nominal power of the wheeled tractor is in the interval, the lower limit of which determines the minimum specific energy consumption at the maximum traction efficiency, the upper one – the specific energy consumption at the maximum permissible speed and permissible slippage; the rated power of the crawler tractor is determined by the specific energy consumption at the maximum permissible speed and permissible slippage.

Keywords: agricultural tractor, the optimal values of power and energy saturation, specific energy consumption, performance indicators.

Введение

Актуальная задача теории трактора заключается в определении оптимального отношения эксплуатационной мощности трактора N_e , Вт, к эксплуатационной массе m , кг (т.е. в определении оптимальной энергонасыщенности $\mathcal{E} = N_e/m$, Вт/кг) при номинальном тяговом усилии $P_{крн}$, Н, и соответствующей рабочей скорости v , м/с, при которых достигаются минимальный расход топлива и оптимальная производительность машинно-тракторного агрегата $\Pi = Bv$, м²/с (B – рабочая ширина захвата, м) с трактором заданного тягового класса.

Ее решение дает возможность при любом режиме работы найти оптимальное сочетание эксплуатационных показателей трактора, что повышает эффективность его работы.

Цель исследования

Цель исследования заключается в разработке методики расчета по минимуму удельных энергозатрат оптимальных значений мощности, массы, энергонасыщенности и производительности трактора.

В статье уточнены значения эксплуатационной мощности, энергонасыщенности и других показателей колесных и гусеничных сельскохозяйственных тракторов общего назначения, изданные в работе В.А. Самсонова и Ю.Ф. Лачуги в [1], с учетом их работы в составе комбинированных пахотных агрегатов.

Материалы и методы

Методику расчета рассмотрим на примере комбинированных пахотных агрегатов с тракторами тягового класса 3 (фон – стерня): колесными 4К4а (типа МТЗ-82) и гусеничными.

Исходный материал: номинальные тяговые усилия, принятые для разных тяговых классов; коэффициенты, характеризующие тягово-сцепные свойства трактора; уравнение мощностного баланса трактора; функция буксования; компьютерная программа минимизации функции методом дихотомии; зависимости для безразмерных коэффициентов, учитывающих увеличение удельного тягового сопротивления агрегата с повышением рабочей скорости.

Основной метод исследования – расчет с использованием нелинейного программирования при изменении энергонасыщенности способом дихотомии.

Результаты и обсуждение

С изменением \mathcal{E} при постоянных m и номинальном тяговом усилии $P_{крн}$ изменяются без экстремума значения функций $N_e(\mathcal{E})$, $v(\mathcal{E})$, $\Pi(\mathcal{E})$ и $E(\mathcal{E}) = \varepsilon_N N_H / \Pi$, Дж/м², (ε_N – коэффициент загрузки двигателя по мощности; N_H – номинальная мощность двигателя, Вт). Функция $E(\mathcal{E})$ определяет энергозатраты при обработке единицы площади (аналог погектарного расхода топлива). Так как она не имеет безусловного минимума, то с ее использованием не представляется возможным определить оптимальные значения N_e , \mathcal{E} и Π .

Для решения основной задачи теории трактора необходима выпуклая функция, экстремум которой дает возможность определить искомые оптимальные значения N_e , \mathcal{E} и Π .

Исследованиями авторов такая функция найдена: коэффициент удельных энергозатрат $e_p(\mathcal{E})$, Вт⁻¹, (аналог погектарного расхода топлива на единицу производительности), имеющий глобальный минимум.

Коэффициент $e_p(\mathcal{E})$ получим из функции удельных энергозатрат, (Дж/м²)/(м²/с):

$$E_y = E/\Pi \rightarrow \min.$$

Преобразуем ее:

$$E_y = \frac{\varepsilon_N N_H}{Bv \cdot Bv} = \frac{\varepsilon_N N_H k_a^2}{P_{кр} v \cdot P_{кр} v} = \frac{\varepsilon_N N_H k_0^2 [1 + \Delta k(v-1,4)]^2}{P_{кр} v \cdot P_{кр} v} = \frac{k_0^2 \mu^2}{\eta_T N_{кр}} = k_0^2 e_p \rightarrow \min, \quad (1)$$

где k_a – удельное тяговое сопротивление рабочей машины при $v > 1,4$ м/с ($v > 5$ км/ч), Н/м; k_0 – удельное тяговое сопротивление рабочей машины при $v = 1,4$ м/с, Н/м; Δk – табличный коэффициент, с/м, учитывающий увеличение k_a при $v > 1,4$ м/с [2]; $\mu = 1 + \Delta k(v-1,4)$ (2) – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение k_a при $v > 1,4$ м/с.

По данным [2], коэффициент Δk увеличивается с повышением v от 1,4 до 4,16 м/с (от 5 до 15 км/ч). Принимаем (в качестве допущения) функцию $\Delta k(v)$ линейной. Интервалы изменения Δk и функции $\Delta k(v)$ для основных операций предпосевной обработки почвы представлены в табл. 1.

Минимизация (1) при $k_0 = \text{const}$ эквивалентна минимизации функции:

$$e_p = \mu^2 / \eta_T N_{кр} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Таблица 1

Функция $\Delta k(v)$ на основных операциях предпосевной обработки почвы

Операция	Интервал изменения Δk , с/м, при повышении v от 1,4 до 4,16 м/с	Функция $\Delta k(v)$
Вспашка серийными плугами. Сплошная культивация серийными культиваторами	0,144...0,288	$\Delta k = 0,052v + 0,071$ (3)
Лущение, дискование	0,072...0,144	$\Delta k = 0,026v + 0,035$
Боронование зубowymi боронами	0,072...0,216	$\Delta k = 0,052v + 0,001$ (4)

Из баланса мощности трактора найдем функцию v (ε , δ):

$$v = \frac{\eta_m \eta_\delta \eta_\varepsilon \varepsilon (1 - \eta_f)}{gf}, \quad (6)$$

где η_m – КПД трансмиссии (принимаем $\eta_m = 0,9$); $\eta_\delta = 1 - \delta$ – КПД, учитывающий потери энергии на буксование трактора; η_ε – коэффициент запаса эксплуатационной мощности двигателя (принимаем $\eta_\varepsilon = 0,85$ [3]); η_f – КПД, учитывающий потери энергии на самопередвижение трактора; f – коэффициент сопротивления качению трактора (на стерне: $f = 0,10...0,12$ – колесные тракторы, $f = 0,07...0,08$ – гусеничные тракторы [4]).

Показатель:

$$\eta_f = \varphi_{кр} / (\varphi_{кр} + f), \quad (7)$$

где $\varphi_{кр}$ – коэффициент использования силы тяги трактора на создание тягового усилия.

Скорость v в (6) зависит от функции буксования, которую принимаем в следующем виде [5]:

$$\varphi_{кр} = b\delta / (a + \delta), \quad (8)$$

где a , b – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа трактора и почвенного фона.

Для оценки эффективности тракторов, кроме e_p , используем коэффициенты производительности – k_n , Вт, и энергозатрат на единицу площади – e_r (безразмерный коэффициент).

Производительность, м²/с, определим с учетом тяговой мощности:

$$N_{кр} = P_{кр} v = k_a B v = k_0 \mu \Pi,$$

откуда $\Pi = k_n / k_0$, где

$$k_n = N_{кр} / \mu. \quad (9)$$

При любом постоянном значении k_0 коэффициент k_n эквивалентен производительности.

Энергозатраты на единицу площади (аналог расхода топлива на единицу площади, кг/м²), Дж/м²:

$$E = \varepsilon_N N_n / B v = \varepsilon_N N_n k_a / P_{кр} v = k_a / \eta_f = k_0 \mu / \eta_f = k_0 e_r,$$

где

$$e_r = \mu / \eta_f. \quad (10)$$

В табл. 2 представлены исходные данные для расчета, где δ_d – допустимое буксование; δ_n – буксование при максимальном тяговом КПД $\eta_{тmax}$; $\varphi_{крд}$, $\varphi_{крп}$ – коэффициенты $\varphi_{кр}$, соответственно при δ_d и δ_n .

Таблица 2

Исходные данные для расчета (фон – стерня)

Показатели	Трактор 4К4а	Гусеничный трактор
δ_d	0,15	0,05
a	0,193	0,0089
b	0,919	0,777
f	0,12	0,08
δ_n	0,12	0,028
$\eta_{тmax}$	0,6169	0,7703
$\varphi_{крд}$	0,4019	0,6596
$\varphi_{крп}$	0,3522	0,5896

Показатели δ_η , $\eta_{\text{тmax}}$, $\varphi_{\text{крд}}$, $\varphi_{\text{крп}}$ найдены минимизацией функции:

$$1/\eta_t = 1/\eta_m \eta_\delta \eta_f \rightarrow \min$$

при изменении δ методом дихотомии в интервале $0 \dots \delta_d$.

Используем функции (3) и (4) в табл. 1 при минимизации функции (5) на самой энергоемкой операции – вспашка+измельчение (плуг+борона) для вариантов агрегатов, указанных в табл. 3. Коэффициент (2) для вариантов агрегатов определяем как среднее геометрическое:

$$\mu_3 = 1 + \Delta k_3(v - 1,4); \quad (11)$$

$$\mu_4 = 1 + \Delta k_4(v - 1,4); \quad (12)$$

$$\mu = (\mu_3 \mu_4)^{1/2}, \quad (13)$$

где Δk_3 , Δk_4 рассчитываем по формулам соответственно (3) и (4).

Функцию (5) минимизируем методом дихотомии по переменной δ . Алгоритм минимизации (алгоритм 1; в программу вводим η_m , η_δ , f , a , b , $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $P_{\text{крп}}$, H , δ_d или δ_η): $\varphi_{\text{крп}}$ – по формуле (8); $m = P_{\text{крп}}/g\varphi_{\text{крп}}$; $N_\delta = \delta m$; $\eta_\delta = 1 - \delta_d$ – в вариантах К1, Г1 или $\eta_\delta = 1 - \delta_\eta$ – в вариантах К2, Г2; η_f – по формуле (7); v – по формуле (6); Δk_3 – по формуле (3); Δk_4 – по формуле (4); μ_3 – по формуле (11); μ_4 – по формуле (12); μ – по

формуле (13); $N_{\text{крп}} = P_{\text{крп}} v$; $\eta_t = N_{\text{крп}}/\eta_\delta N_\delta$; k_π – по формуле (9); e_r – по формуле (10); e_p – по формуле (5).

Для иллюстрации выпуклости функции $e_p(\delta)$ в табл. 4 представлен фрагмент ее расчета для варианта К1: с увеличением δ и N_δ увеличивается производительность (коэффициент k_π), при этом $e_p(\delta)$ имеет минимум – $2,63555 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}^{-1}$, который определяет оптимальные энергонасыщенность $\delta = 20,12 \text{ Вт/кг}$ и производительность – $k_\pi = 76 \text{ 984 Вт}$.

Минимальный коэффициент энергозатрат e_{pmin} находим с учетом допустимой рабочей скорости при номинальном тяговом усилии $P_{\text{крп}}$ [4]:

$$\text{трактор 4К4а} - v_d = 8 \dots 10 \text{ км/ч}; \quad (14)$$

$$\text{гусеничный трактор} - v_d = 7 \dots 9 \text{ км/ч}. \quad (15)$$

Результаты расчета по алгоритму 1 показателей агрегатов представлены в табл. 5 и 6 – варианты К1, К2, Г1, Г2. В вариантах К1 и К2 минимальный коэффициент e_{pmin} достигается при выполнении условия (14), но есть возможность повысить производительность при увеличении скорости до максимально допустимой – $v_{\text{дм}} = 10 \text{ км/ч}$. В вариантах Г1 и Г2 показатель e_{pmin} соответствует скорости $v > v_{\text{дм}} = 9 \text{ км/ч}$.

Таблица 3

Варианты пахотных агрегатов

Номер варианта	Содержание операции	Трактор 4К4а (индекс варианта «К»)	Гусеничный трактор (индекс варианта «Г»)
Обозначение вариантов			
1	Вспашка+измельчение (плуг+борона); $\delta = \delta_d$	К1	Г1
2	Вспашка+измельчение (плуг+борона); $\delta = \delta_\eta$; $\eta_t = \eta_{\text{тmax}}$	К2	Г2

Таблица 4

Фрагмент расчета функции $e_p(\delta)$ агрегата с трактором 4К4а (тяговый класс 3; $P_{\text{крп}} = 36 \text{ 000 Н}$; $\delta_d = 0,15$)

Интервал изменения δ , Вт/кг	Оптимальные значения			$e_p \cdot 10^{-5}$, Вт ⁻¹
	N_δ , Вт	δ , Вт/кг	k_π , Вт	
18...19	173 489	19,00	74 658	2,64567
19...20	180 335	19,75	76 237	2,63733
20...21	183 762	20,12	76 984	2,63555 min
21...22	191 766	21,00	78 617	2,63723
23...24	200 883	22,00	80 294	2,64843

Таблица 5

Показатели вариантов пахотных агрегатов с трактором 4К4а (тяговый класс 3; $P_{крп} = 36\ 000\ Н$)

Показатели	Варианты			
	К1	К2	КН1	КН2
N_c , Вт	183 702	185 709	199 705	199 136
m , кг	9131	10 415	9 131	10 415
\mathcal{E} , Вт/кг	20,12	17,83	21,87	19,12
v , км/ч	9,20	9,32	10,00	10,00
$k_{п}$, Вт	77 015	77 552	80 148	80 148
e_r	2,027	2,035	2,118	2,112
$e_p \cdot 10^{-5}$, Вт ⁻¹	2,632	2,624	2,642	2,635

Таблица 6

Показатели вариантов пахотных агрегатов с гусеничным трактором (тяговый класс 3; $P_{крп} = 36\ 000\ Н$)

Показатели	Варианты			
	Г1	Г2	ГН1	ГН2
N_c , Вт	145 045	143 454	138 859	137 459
m , кг	5 563	6 224	5 563	6 224
\mathcal{E} , Вт/кг	26,07	23,05	24,96	22,08
v , км/ч	9,40	9,39	9,00	9,00
$k_{п}$, Вт	77 863	77 829	76 143	76 143
e_r	1,583	1,566	1,550	1,534
$e_p \cdot 10^{-5}$, Вт ⁻¹	2,033	2,013	2,035	2,015

Оптимальные значения N_c и \mathcal{E} с учетом достижения во всех вариантах скорости $v_{дм}$ рассчитываем минимизацией по алгоритму 2 функции:

$$F = |v/v_{дм} - 1| \rightarrow \min, \quad (16)$$

где v находим по формуле (6).

Алгоритм 2 получим из алгоритма 1 включением в исходные данные дополнительно $v_{дм}$ и минимизируемой функции (16) вместо (5). Результаты расчета представлены в табл. 5 и 6: варианты КН1, ГН1 – при $\delta = \delta_d$, варианты КН2, ГН2 – при $\delta = \delta_n$.

Из табл. 5 и 6 следует: оптимальная эксплуатационная мощность трактора 4К4а находится в интервале $N_c = 185\ 709...199\ 705$ Вт, нижний предел которого определяют минимальные удельные энергозатраты при $\eta_{тmax}$, верхний – удельные энергозатраты при $v_{дм}$ и δ_d ; оптимальную эксплуатационную мощность гусеничного трактора определяют удельные энергозатраты при $v_{дм}$ и δ_d .

В качестве номинальной мощности из полученных значений N_c принимаем максимальное: для трактора 4К4а $N_n = 199\ 705$ Вт, для гусенич-

ного трактора $N_n = 138\ 859$ Вт. Тогда в вариантах КН1 и ГН1 имеем максимальную энергонасыщенность: $\mathcal{E}_{max} = 21,87$ Вт/кг – у трактора 4К4а, $\mathcal{E}_{max} = 24,96$ Вт/кг – у гусеничного трактора.

Для всех тяговых классов основные показатели обоих типов тракторов находим по формулам:

$$m_{min} = P_{крп} / g \varphi_{крд}; \quad (17)$$

$$m_{max} = P_{крп} / g \varphi_{крп}; \quad (18)$$

$$N_n = \mathcal{E}_{max} m_{min} = 21,87 m_{min} \text{ – трактор 4К4а}; \quad (19)$$

$$N_n = \mathcal{E}_{max} m_{min} = 24,96 m_{min} \text{ – гусеничный трактор}; \quad (20)$$

$$\mathcal{E}_{min} = \varepsilon_{Nmin} N_n / m_{max} = 0,85 N_n / m_{max}, \quad (21)$$

где $\varphi_{крд}$, $\varphi_{крп}$ – из табл. 2.

Результаты расчета по формулам (17)–(21) представлены в табл. 7. В табл. 8 указана энергонасыщенность некоторых распространенных марок зарубежных колесных тракторов разных тяговых классов. Их максимальная энергонасыщенность мало отличается (кроме John Deere 7930) от полученной $\mathcal{E}_{max} = 21,87$ Вт/кг

Таблица 7

Расчетные значения номинальной мощности, эксплуатационной массы и энергонасыщенности тракторов 4К4а и гусеничных

Показатели	Тяговый класс 3	Тяговый класс 4	Тяговый класс 5	Тяговый класс 6
	$P_{крн}, Н$			
	36 000	45 000	54 000	72 000
4К4а ($\Theta = 16,30...21,87$ Вт/кг)				
$N_n, Вт$	199 695	249 624	299 531	399 390
$m, кг$	9 131...10 419	11 414...13 024	13 696...15 629	18 262...20 839
Гусеничный трактор ($\Theta = 18,96...24,96$ Вт/кг)				
$N_n, Вт$	138 852	173 571	208 291	277 729
$m, кг$	5 563...6 224	6 954...7 780	8 345...9 336	11 127...12 448

Таблица 8

Сравнение по эффективности тракторов 4К4а и зарубежных

Показатели	Тяговый класс 3		Тяговый класс 4		Тяговый класс 5		Тяговый класс 6	
	John Deere 7930	4К4а	John Deere 8530	4К4а	Claas Axion	4К4а	Claas Xerion	4К4а
$N_n, Вт$	162 000	199 695	236 000	249 624	301 555	299 531	367 750	399 390
$m, кг$	8 130	9 131	11 027	11 414	13 060	13 696	17 230	18 262
$\Theta, Вт/кг$	19,92	21,87	21,40	21,87	23,09	21,87	21,34	21,87
$v, км/ч$	9,11	10,00	9,78	10,00	10,55	10,00	9,76	10,00
$P_{кр}, Н$	32 053	36 000	43 474	45 000	51 490	54 000	67 930	72 000
$k_n, Вт$	68 233	80 146	95 849	100 185	117 257	120 215	179 578	160 293
e_r	2,018	2,118	2,092	2,118	2,186	2,118	2,089	2,118
$e_p \cdot 10^{-5}, Вт^{-1}$	2,957	2,642	2,183	2,118	1,864	1,761	1,397	1,321
$k_{эф}$	1,000	1,073	1,000	1,020	1,000	1,037	1,000	1,036
$u_n, \%$	–	17,46	–	4,52	–	2,52	–	7,16
$u_r, \%$	–	4,95	–	1,24	–	–3,11	–	1,39
$u_c, \%$	–	–10,65	–	–3,00	–	–5,52	–	–5,44

(табл. 7) при несколько меньшей мощности (за исключением Claas Axion). Сравним их по эффективности с тракторами 4К4а.

Для сравнения используем следующие показатели: $k_{эф}$ – безразмерный обобщенный коэффициент эффективности; u_n, u_r, u_c – соответственно, изменение производительности, расхода топлива на единицу площади и расхода топлива на единицу производительности, %:

$$k_{эф} = (k_{ен} k_{ер} k_{еп})^{1/3}; \quad (22)$$

$$u_n = 100 (k_{ин} / k_n - 1); \quad (23)$$

$$u_r = 100 (e_{ин} / e_r - 1); \quad (24)$$

$$u_c = 100 (e_{пн} / e_p - 1), \quad (25)$$

где $k_{ен}, k_{ер}, k_{еп}$ – частные коэффициенты эффективности соответственно по производительности, расходу топлива на единицу площади и расходу топлива на единицу производительно-

ности; $k_{ин}, e_{ин}, e_{пн}$ – показатели тракторов 4К4а, k_n, e_r, e_p – показатели зарубежных тракторов (при сравнении для зарубежных тракторов принимаем $k_{эф} = 1$).

Частные коэффициенты эффективности:

$$k_{ен} = k_{ин} / k_n; \quad (26)$$

$$k_{ер} = 2 - e_{ин} / e_r; \quad (27)$$

$$k_{еп} = 2 - e_{пн} / e_p. \quad (28)$$

Алгоритм расчета показателей тракторов при сравнении (алгоритм 3; в программу вводим $\eta_m, \eta_s, f, a, b, g = 9,81$ м/с²; N_n, m, δ_d); $\varphi_{кр}$ – по формуле (8); $P_{кр} = mg\varphi_{кр}$; $\eta_s = 1 - \delta_d$; v – по формуле (6); Δk_3 – по формуле (3); Δk_4 – по формуле (4); μ_3 – по формуле (11); μ_4 – по формуле (12); μ – по формуле (13); $N_{кр} = P_{кр} v$; $\eta_r = N_{кр} / \eta_s N_n$; k_n – по формуле (9); e_r – по формуле (10); e_p – по формуле (5); формулы (26)–(28); формулы (22)–(25).

Таблица 9

Сравнительные показатели расчетного гусеничного трактора и Т-150-05-09 ($\delta = 0,05$)

N_n , Вт	m , кг	\mathcal{E} , Вт/кг	v , км/ч	$P_{кр}$, Н	k_n , Вт	e_r	$e_p \cdot 10^{-5}$, Вт $^{-1}$
Расчетный гусеничный трактор							
173 571	7780	22,31	8,04	50 341	99 850	1,477	1,479
Трактор Т-150-05-09							
128 700	8150	15,79	5,69	52 735	81 661	1,339	1,640

Результаты расчета по алгоритму 3 представлены в табл. 8. Из нее следует: в целом расчетные тракторы 4К4а эффективнее зарубежных (больше $k_{эф}$), при этом больше производительность (показатели k_n и u_n), меньше расход топлива на единицу производительности (показатели e_p и u_e).

Из числа гусеничных наиболее близок по мощности и массе к расчетному из табл. 7 трактор Т-150-05-09. Его показатели, рассчитанные по алгоритму 3 при допустимом буксовании, представлены в табл. 9. Расчетный гусеничный трактор эффективнее Т-150-05-09: по производительности (больше коэффициент k_n) – на 18,7 %, по расходу топлива на единицу производительности (меньше коэффициент e_p) – на 10,9 %.

Выводы

1. Минимальные удельные энергозатраты трактора на технологической операции зависят от ее вида и безразмерного коэффициента, учитывающего повышение удельного тягового сопротивления при увеличении скорости и изменяющегося по параболе.

2. Номинальная мощность трактора 4К4а находится в интервале, нижний предел которого определяют минимальные удельные энергозатраты при максимальном тяговом КПД, верхний – удельные энергозатраты при максимальной допустимой скорости и допустимом буксовании.

3. Номинальную мощность гусеничного трактора определяют удельные энергозатраты при максимальной допустимой скорости и допустимом буксовании.

4. При загрузке трактора номинальным тяговым усилием его минимальная эксплуатационная масса соответствует режиму работы с допустимым буксованием, максимальная – режиму работы с максимальным тяговым КПД. При этом увеличение массы трактора составляет: у 4К4а – 14 %; у гусеничного – 12 %.

5. Максимальная энергонасыщенность трактора определяется отношением номинальной мощности к его минимальной эксплуатационной массе.

6. Минимальная энергонасыщенность трактора определяется отношением минимальной эксплуатационной мощности (при загрузке двигателя на 85 % от номинальной мощности) к его максимальной эксплуатационной массе.

Литература

1. Самсонов В.А., Лачуга Ю.Ф. Оптимальная энергонасыщенность сельскохозяйственного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 11. С. 13–16.
2. Иофинов С.А., Бабенко Э.П., Зуев Ю.А. Справочник по эксплуатации машинно-тракторного парка. М.: Агропромиздат, 1985. 272 с.
3. Скотников В.А., Машенский А.А., Солонский А.С. Основы теории и расчета трактора и автомобиля. М.: Агропромиздат, 1986. 384 с.
4. Кут'ков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. М.: КолосС, 2004. 504 с.
5. Зангиев А.А., Шпилько А.В., Левшин А.Г. Эксплуатация машинно-тракторного парка. М.: КолосС, 2004. 320 с.

References

1. Samsonov V.A., Lachuga Yu.F. Optimum energy saturation of an agricultural tractor. Traktory i sel'khoz-mashiny. 2015. No 11, pp. 13–16 (in Russ.).
2. Iofinov S.A., Babenko E.P., Zuev Yu.A. Spravochnik po ekspluatatsii mashinno-traktornogo parka [Handbook for the operation of the machine and tractor fleet]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1985. 272 p.
3. Skotnikov V.A., Mashchenskiy A.A., Solonskiy A.S. Osnovy teorii i rascheta traktora i avtomobilya [The fundamentals of theory and calculation of tractor and automobile]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1986. 384 p.
4. Kut'kov G.M. Traktory i avtomobili. Teoriya i tekhnologicheskie svoystva [Tractors and automobiles. Theory and technological properties]. Moscow: KolosS Publ., 2004. 504 p.
5. Zangiev A.A., Shpil'ko A.V., Levshin A.G. Ekspluatatsiya mashinno-traktornogo parka [Operation of the machine and tractor fleet]. Moscow: KolosS Publ., 2004. 320 p.