Расчет номинальных значений основных показателей сельскохозяйственного трактора

Calculation of nominal values of the main indicators of agricultural tractor

В. А. САМСОНОВ, д-р техн. наук

АНО Редакция журнала "Механизация и электрификация сельского хозяйства", Москва, Россия, mehelagro@mail.ru

V. A. SAMSONOV, DSc in Engineering

Scientific journal "Mechanization and Electrification of Agriculture", Independent non-profit organization, Moscow, Russia, mehelagro@mail.ru

В качестве оптимальных значений основных показателей трактора (энергонасыщенности, мощности, эксплуатационной массы, тягового усилия, рабочей скорости) приняты их номинальные значения, расчет которых — актуальная задача теории трактора. Цель исследования — определение номинальных значений основных показателей трактора по максимуму тягового коэффициента полезного действия и минимуму энергозатрат. Объекты исследования: колесный трактор с передними управляемыми колесами меньшего диаметра, чем задние, и гусеничный трактор. Основной метод исследования — расчет с использованием компьютерных программ при изменении показателей методом дихотомии и с заданным шагом в цикле. Нижнее значение номинальной энергонасыщенности определяли минимизацией функции удельных энергозатрат — отношения энергозатрат при обработке единицы площади к единице производительности и единице рабочей скорости. Нижние номинальные значения мощности, эксплуатационной массы, тягового усилия, рабочей скорости определяются нижним значением номинальной энергонасыщенности, максимальным тяговым коэффициентом полезного действия и минимальными удельными энергозатратами, соответствующими работе трактора при допустимом буксовании. Для определения верхнего значения номинальной энергонасыщенности использован обобщенный безразмерный коэффициент эффективности трактора — геометрическое среднее значение частных безразмерных коэффициентов эффективности трактора по эксплуатационной массе, тяговому коэффициенту полезного действия, расходу топлива на единицу площади, производительности, расходу топлива на единицу производительности. При увеличении энергонасыщенности повышается производительность трактора, но снижается его эффективность по другим показателям. В качестве верхнего предела номинальной энергонасыщенности принято значение, при котором снижение обобщенного коэффициента эффективности трактора не превышает 5%. При этом производительность повышается на 11—19%. С использованием принятых критериев оптимальности определены интервалы изменения номинальной энергонасыщенности тракторов: колесных — 15,69—20 Вт/кг, гусеничных — 18,63—26 Вт/кг. Для этих интервалов определены номинальные значения мощности, эксплуатационной массы и рабочей скорости колесных и гусеничных тракторов тяговых классов 3—6.

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор; номинальные показатели; тяговый коэффициент полезного действия; удельные энергозатраты; коэффициенты эффективности.

As optimal values of the main indicators of tractor (energy intensity, power, operating weight, traction force, working speed) their nominal values are taken. Their calculation is a critical task of tractor theory. The aim of the study is to determine the nominal values of main indicators of tractor for maximum of propulsive coefficient and minimum of energy consumption. The objects of research are a wheel tractor with front steering wheels of smaller diameter than the rear ones and a caterpillar tractor. The main research method is calculation using computer programs with change of indicators by dichotomy method with given step in cycle. Low value of nominal energy intensity is determined by minimizing the function of specific power consumption that is the relationship of energy consumption during cultivating of a unit of area to a unit of performance and a unit of working speed. Low nominal values of power, operating weight, traction force and working speed are determined by the low value of nominal energy intensity, maximum propulsive coefficient and minimum energy consumption corresponding to tractor operation with permissible slipping. To determine the high values of nominal energy intensity a generalized non-dimensional coefficient of tractor efficiency is used, that is geometric mean values of partial non-dimensional coefficients of tractor efficiency on the operating weight, propulsive coefficient, fuel consumption per unit of area, performance, fuel consumption per unit of performance. With increasing of energy intensity the performance of tractor increases, but its efficiency on other indicators reduces. As upper limit of nominal energy intensity, a value is taken in which the reduction of generalized coefficient of tractor efficiency does not exceed 5%. At that the performance increases on 11—19%. Using the adopted optimality criteria, the intervals of changing of the nominal energy intensity of tractors are determined: 15,69—20 W/kg for wheeled tractors; 18,63—26 W/kg for caterpillar ones. For these intervals the nominal values of power, operating weight and working speed of wheeled and caterpillar tractors of 3—6 drawbar categories are determined.

Keywords: agricultural tractor; nominal values; propulsive coefficient; specific energy consumption; efficiency factors.

Введение

К основным показателям трактора относятся: эффективная мощность двигателя N_e , Вт; эксплуатационная масса m , кг; энергонасыщенность $\Theta = N_e/m$, Вт/кг; тяговое усилие $P_{кр}$, Н; рабочая скорость v , м/с. В качестве оптимальных значений основных показателей принимаем их номинальные значения N_n , m_n , Θ_n , $P_{крn}$, v_n , которые достигаются при максимальном тяговом КПД и минимальных энергозатратах трактора. В этом случае обеспечивается максимальная производительность машинно-тракторного агрегата с трактором заданного тягового класса.

Определение номинальных значений основных показателей трактора — актуальная задача теории трактора. Ее решение дает возможность найти для любого тягового класса оптимальное сочетание номинальной мощности и эксплуатационной массы трактора, что повышает эффективность его работы.

Цель исследования

Цель исследования заключается в разработке методики расчета номинальных значений основных показателей трактора: Θ_n — по минимуму энергозатрат при обработке единицы площади; N_n , m_n , $P_{крn}$, v_n — по мак-

симуму тягового КПД $\eta_{T \max}$ и минимуму энергозатрат с использованием $\mathcal{E}_H$.

Материалы и методы

Методику расчета номинальных показателей рассмотрим на примере тракторов тягового класса 3 (фон — стерня): колесного 4К4а (типа МТЗ-82) и гусеничного. В качестве исходного материала используем: алгоритм минимизации нелинейной функции методом дихотомии; уравнение мощностного баланса трактора; функцию буксования; зависимость удельного тягового сопротивления рабочей машины от скорости; пределы изменения тягового усилия, установленные для каждого тягового класса трактора; коэффициенты, характеризующие тягово-сцепные свойства трактора. Основной метод исследования: расчет с использованием компьютерных программ при изменении показателей методом дихотомии и с заданным шагом в цикле.

Результаты и их обсуждение

В работе [1] в качестве критерия оптимальности при расчете энергонасыщенности предложена выпуклая функция, $[Вт/(м^2/с)]/[(м^2/с)(м/с)]$:

$$E_y = \frac{\varepsilon_N N_H / Bv}{Bv \cdot v} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где ε_N — коэффициент загрузки двигателя по мощности (принимается $\varepsilon_N = 1$); B — ширина захвата, м.

Физический смысл критерия (1): минимум энергозатрат $\varepsilon_N N_H / Bv$ трактора при обработке единицы площади ($\varepsilon_N N_H / Bv$ — аналог расхода топлива на единицу площади), приходящихся на единицу производительности Bv и единицу скорости v , — минимум удельных энергозатрат. Функция (1) имеет локальный минимум, определяющий номинальную энергонасыщенность $\mathcal{E}_H$.

Преобразуем критерий (1), заменив $B = P_{кр}/k_a$:

$$E_y = \frac{\varepsilon_N N_H k_a^2}{P_{кр} v \cdot P_{кр} v \cdot v} = \frac{k_0^2 \varepsilon_N N_H \mu^2}{P_{кр} v \cdot P_{кр} v \cdot v} = k_0^2 e_y,$$

где

$$e_y = \frac{\mu^2}{P_{кр} \eta_T v^2} \rightarrow \min. \quad (2)$$

Здесь e_y — коэффициент удельных энергозатрат, $1/(Вт \cdot м/с)$; 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; $\mu = 1 + \Delta k(v - 1,4)$ — безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение k_a при возрастании v ; Δk — табличный коэффициент, учитывающий увеличение k_a при возрастании v , с/м [2]. При $k_0 = \text{const}$ критерий (2) эквивалентен критерию (1).

Коэффициент

$$\mu(v) = 0,052v^2 + 0,9$$

для стерни (вспашка) получен в работе [1] при допущении, что $\Delta k(v)$ — линейная функция: $\Delta k(v) = 0,052v + 0,072$.

Критерий (2) определяет нижний предел номинальной энергонасыщенности $\mathcal{E}_{H1}$. Для расчета $\mathcal{E}_{H1}$ принимаем функцию буксования в виде [3]:

$$\delta = a\varphi_{кр}/(b - \varphi_{кр}), \quad (3)$$

откуда

$$\varphi_{кр} = b\delta/(a + \delta), \quad (4)$$

где a, b — эмпирические коэффициенты; $\varphi_{кр}$ — коэффициент использования силы тяжести трактора для создания тягового усилия.

Для определения $\eta_{T \max}$ и соответствующего ему номинального буксования δ_H используем функцию:

$$\eta_T = \eta_M \eta_\delta \eta_f, \quad (5)$$

где η_M — КПД трансмиссии (принимается $\eta_M = 0,9$); $\eta_\delta = 1 - \delta$ — КПД, учитывающий потери энергии на буксование трактора; $\eta_f = \varphi_{кр}/(\varphi_{кр} + f)$ — КПД, учитывающий потери энергии на самопередвижение трактора (f — коэффициент сопротивления качению трактора).

На основании выражений (4) и (5) получены функции $\varphi_{кр}(\delta)$ и $\eta_T(\delta)$ (табл. 1) при исходных данных: для трактора 4К4а — $a = 0,394$; $b = 1,449$ [3]; $f = 0,1$ [4]; для гусеничного трактора — $a = 0,0089$; $b = 0,777$ [3]; $f = 0,08$ [4].

Коэффициент использования силы тяжести зависит от типа движителя: для трактора 4К4 $\varphi_{кр} = 0,4...0,45$; для гусеничного трактора $\varphi_{кр} = 0,5...0,6$ [4].

В табл. 2 представлены номинальные значения δ_H и $\varphi_{крH}$ при $\eta_{T \max}$, взятые из экспериментальных тяговых характеристик тракторов [5]. Средние экспериментальные и расчетные значения δ_H и $\varphi_{крH}$ близки, т.е. формула (3) достаточно точно отражает характер буксования.

Энергонасыщенность $\mathcal{E}_{H1}$ (нижний предел номинальной энергонасыщенности $\mathcal{E}_H$) определяем с учетом данных табл. 1: для трактора 4К4а — при $\varphi_{крH} = 0,4$ (соответствует допустимому буксованию $\delta_d = 0,15$); для гусеничного трактора — при $\varphi_{крH} = 0,6$ (соответствует $\eta_{T \max} = 0,7702$ и номинальному буксованию $\delta_H = 0,03$).

Алгоритм расчета $\mathcal{E}_{H1}$ (алгоритм 1): δ — по формуле (3); $\eta_\delta = 1 - \delta$; $\eta_f = \varphi_{кр}/(\varphi_{кр} + f)$; $v = \eta_M \eta_\delta \varepsilon_N (1 - \eta_f) \mathcal{E} / g f$; μ ; $m = N_H / \mathcal{E}$; $P_{кр} = mg \varphi_{кр}$; $\eta_T = P_{кр} v / \varepsilon_N N_H$; e_y (задаем $\varphi_{кр}, a, b, \eta_M, \varepsilon_N, f, N_H$).

Алгоритм 1 реализуем минимизацией функции (2) при изменении методом дихотомии текущего значения энергонасыщенности $\mathcal{E}$ в интервалах 14—15, 15—16 и т.д.

Таблица 1
Функции $\varphi_{кр}(\delta)$ и $\eta_T(\delta)$ тракторов на стерне

Трактор 4К4а							
δ	0,15	0,145	0,14	0,135	0,13	0,125	0,12
$\varphi_{кр}(\delta)$	0,3995	0,3898	0,3799	0,3698	0,3595	0,349	0,3383
$\eta_T(\delta)$	0,6118	0,6124	0,6127	0,6128	0,6126	0,6121	0,6113
Гусеничный трактор							
δ	0,05	0,045	0,04	0,035	0,03	0,025	0,02
$\varphi_{кр}(\delta)$	0,6596	0,6487	0,6356	0,6195	0,6	0,573	0,5377
$\eta_T(\delta)$	0,7625	0,7651	0,7674	0,7691	0,7702	0,7699	0,7677

Таблица 2

Номинальные значения $\Phi_{крн}$ и δ_n по экспериментальным тяговым характеристикам тракторов при $\eta_T \max$ (фон — стерня)

Модель трактора	$P_{крн}$, Н	m , кг	$\Phi_{крн}$	δ_n
Колесные тракторы 4К4				
МТЗ-82	14 028	3780	0,3782	0,13
К-150К	37 278	9300	0,4086	0,12
К-701	58 860	13 690	0,4298	0,132
Средние значения			0,4055	0,127
Гусеничные тракторы				
ДТ-75М	31 392	6460	0,4553	0,014
ДТ-75	31 392	5960	0,5369	0,04
ДТ-74	30 411	5600	0,5535	0,057
Т-4	43 164	8410	0,5232	0,04
Т-150	38 769	7660	0,5159	0,013
Т-130	65 236	12 542	0,5358	0,021
Средние значения			0,5258	0,031

Поскольку $\Theta_{н1}$ не зависит от N_H , то условно для расчета принимаем $N_H = 100\ 000$ Вт. Результаты расчета функций e_y (Θ^*) для стерни представлены в табл. 3. Значение Θ^* соответствует минимуму e_y (Θ^*) в каждом интервале. Энергонасыщенность $\Theta_{н1} = \Theta^*$ определяем по наименьшему из минимальных значений коэффициента удельных энергозатрат $e_{y \min}$: для трактора 4К4а $\Theta_{н1} = 15,69$ Вт/кг; для гусеничного трактора $\Theta_{н1} = 18,63$ Вт/кг.

Алгоритм расчета показателей трактора при $\Theta_{н1}$ (алгоритм 2): $\Phi_{крп} = b\delta/(a + \delta)$; $\eta_\delta = 1 - \delta$; $\eta_f = \Phi_{крп}/(\Phi_{крп} + f)$; $v = \eta_M \eta_\delta \epsilon_N (1 - \eta_f) \Theta_{н1} / g f$; $m = P_{крп} / g \Phi_{крп}$; $N_H = \Theta_{н1} m$; μ ; $\eta_T = P_{крп} v / \epsilon_N N_H$; e_y (задаем a , b , δ , η_M , ϵ_N , f , $\Theta_{н1}$, $P_{крп}$).

Алгоритм 2 реализуем при изменении $P_{крп}$ в цикле с шагом $\Delta P_{крп}$, кратном 250 Н, в интервале 27 000—36 000 Н. В табл. 4 представлены три варианта расчета показателей: вариант 1 — при допустимом буксовании δ_d ; вариант 2 — при максимальном тяговом КПД $\eta_T \max$; в варианте 3 показатели определены при $\eta_T \max$ и коэффициенте энергозатрат e_y варианта 1.

Сравним варианты 1, 2 и 3 по эффективности, для определения которой используем следующую методику расчета.

Таблица 3

Функции $e_y(\Theta^*)$ тракторов на стерне

Трактор 4К4а			Гусеничный трактор		
Интервалы изменения Θ , Вт/кг	Θ^* , Вт/кг	$e_y \cdot 10^{-7}$	Интервалы изменения Θ , Вт/кг	Θ^* , Вт/кг	$e_y \cdot 10^{-7}$
13—14	14	161,1769	16—17	17	101,5111
14—15	15	160,2161	17—18	18	101,1042
15—16	$\Theta_{н1} = \Theta^* = 15,69$	160,1848	18—19	$\Theta_{н1} = \Theta^* = 18,63$	101,0913
16—17	16	160,3261	19—20	19	101,1661
17—18	17	161,38	20—21	20	101,6492

Таблица 4

Варианты показателей тракторов тягового класса 3 при допустимом δ_d и номинальном δ_n буксовании

Показатели	Трактор 4К4а ($\Theta_{н1} = 15,69$ Вт/кг)			Гусеничный трактор ($\Theta_{н1} = 18,63$ Вт/кг)		
	Вариант 1 ($\delta_d = 0,15$)	Вариант 2 ($\delta_n = 0,135$)	Вариант 3 ($\delta_n = 0,135$)	Вариант 1 ($\delta_d = 0,05$)	Вариант 2 ($\delta_n = 0,03$)	Вариант 3 ($\delta_n = 0,03$)
N_H , Вт	144 111	155 708	144 895	103 650	114 092	100 939
m , кг	9185	9924	9235	5564	6124	5418
$P_{крп}$, Н	36 000	36 000	33 500	36 000	36 000	31 850
v , м/с	2,45	2,65	2,65	2,19	2,44	2,44
$\mu = 0,052v^2 + 0,9$	1,212	1,265	1,265	1,15	1,21	1,21
η_T	0,6119	0,6128	0,6128	0,7625	0,7702	0,7702
$e_T = \mu/\eta_T$	1,981	2,065	2,065	1,509	1,571	1,571
$k_{п}$	72 754	75 410	70 173	68 688	72 632	64 259
$e_y \cdot 10^{-5}$	1,111	1,033	1,111	1	0,886	1
k_m	1,005	0,925	1	0,973	0,868	1
k_η	0,998	1	1	0,99	1	1
$k_{ег}$	1,041	1	1	1,039	1	1
$k_{кп}$	1,038	1,075	1	1,07	1,13	1
k_{ey}	1	1,069	1	1	1,114	1
$k_{эф}$	1,016	1,012	1	1,014	1,018	1

**Номинальные показатели и коэффициенты
эффективности трактора 4К4а тягового класса 3 при $\Theta_{н1} \geq \Theta_{н1}$
($\delta_{н} = 0,135$; $\eta_{т \max} = 0,6128$)**

Показатели	Значения показателей				
$\Theta_{н1}$, Вт/кг	$\Theta_{н1} = 15,69$	17	18	19	20
$N_{н1}$, Вт	144 895	158 164	168 708	179 390	190 534
$m_{н1}$, кг	9235	9304	9373	9442	9527
$P_{крн1}$, Н	33 500	33 750	34 000	34 250	34 500
$v_{н1}$, м/с	2,65	2,87	3,04	3,21	3,38
$\mu = 0,052v^2 + 0,9$	1,265	1,329	1,381	1,436	1,495
$e_{г1} = \mu/\eta_{т1}$	2,065	2,168	2,253	2,343	2,441
$k_{п1}$, Вт	70 173	72 934	74 873	76 569	78 068
$e_{п1} \cdot 10^{-1} = e_{г1}/k_{п1}$	2,942	2,973	3,009	3,06	3,126
k_m	1	0,992	0,985	0,977	0,968
$k_{ег}$	1	0,95	0,909	0,865	0,818
$k_{кп}$	1	1,039	1,067	1,091	1,112
$k_{еп}$	1	0,989	0,977	0,96	0,937
$k_{эф}$	1	0,992	0,983	0,97	0,953

Эффективность трактора максимально характеризуют эксплуатационная масса, тяговый КПД, производительность $\Pi = Bv$, энергозатраты E на единицу обрабатываемой площади, энергозатраты $E_{п1}$ на единицу производительности.

Производительность, m^2/c , определим с учетом тяговой мощности:

$$P_{кр}v = k_a Bv = k_0 \mu \Pi,$$

откуда

$$\Pi = k_{п1}/k_0,$$

где $k_{п1} = P_{кр}v/\mu$ — коэффициент производительности, Вт.

При любом постоянном значении k_0 коэффициент $k_{п1}$ эквивалентен производительности.

Энергозатраты на единицу площади (аналог расхода топлива на единицу площади, $кг/м^2$), $Дж/м^2$:

$$E = \varepsilon_N N_{н1}/Bv = \varepsilon_N N_{н1} k_a / P_{кр}v = k_0 e_{г1},$$

где $e_{г1} = \mu/\eta_{т1}$ — безразмерный коэффициент энергозатрат на единицу площади (коэффициент расхода топлива при обработке единицы площади).

Энергозатраты на единицу производительности (аналог расхода топлива на единицу производительности, $(кг/м^2)/(м^2/с)$), $(Дж/м^2)/(м^2/с)$:

$$E_{п1} = E/\Pi = k_0^2 e_{г1}/k_{п1} = k_0^2 e_{п1},$$

где $e_{п1} = e_{г1}/k_{п1}$ — коэффициент энергозатрат на единицу производительности (коэффициент расхода топлива на единицу производительности), $Вт^{-1}$.

При любом постоянном значении k_0 коэффициенты $e_{г1}$ и $e_{п1}$ эквивалентны соответственно энергозатратам E и $E_{п1}$.

Эффективность любого трактора T_i (сравниваемого) с показателями m , $\eta_{т1}$, $e_{г1}$, $k_{п1}$, $e_{п1}$ по отношению к трактору T_3 (с которым сравнивают) с показателями m_3 , $\eta_{т3}$, $e_{г3}$, $k_{п3}$, $e_{п3}$ оценим по обобщенному безразмерному коэффициенту эффективности — среднему геометрическому значению (дает наиболее точный результат осреднения по сравнению с другими средними):

$$k_{эф} = (k_m k_{\eta} k_{ег} k_{кп} k_{еп})^{1/5}, \quad (6)$$

где

$$k_m = 2 - m/m_3; \quad (7)$$

$$k_{\eta} = \eta_{т1}/\eta_{т3}; \quad (8)$$

$$k_{ег} = 2 - e_{г1}/e_{г3}; \quad (9)$$

$$k_{кп} = k_{п1}/k_{п3}; \quad (10)$$

$$k_{еп} = 2 - e_{п1}/e_{п3}. \quad (11)$$

Здесь k_m , k_{η} , $k_{ег}$, $k_{кп}$, $k_{еп}$ — частные безразмерные коэффициенты эффективности T_i по сравнению с T_3 соответственно по массе, тяговому КПД, расходу топлива на единицу площади, производительности, расходу топлива на единицу производительности (у трактора T_3 все коэффициенты эффективности принимаем равными единице).

При сравнении варианты 1 и 2 — это тракторы T_i , вариант 3 — трактор T_3 . В формуле (6) вместо $k_{еп}$ используем $k_{ey} = 2 - e_{y1}/e_{y3}$ — безразмерный коэффициент эффективности по удельным энергозатратам. При расчете

коэффициентов эффективности тракторов T_i в вариантах 1 и 2 коэффициенты k_m , k_{η} , $k_{ег}$, $k_{эф}$ трактора T_3 в варианте 3 принимаем равными единице. Результаты расчета по формулам (6)—(11) представлены в табл. 4. Из сравнения вариантов 1 и 2, у которых коэффициенты $k_{эф}$ незначительно превышают единицу, с вариантом 3 следует: для трактора 4К4а вариант 1 менее эффективен по тяговому КПД ($k_{\eta} < 1$), вариант 2 менее эффективен по массе ($k_m < 1$); для гусеничного трактора вариант 1 менее эффективен по массе и тяговому КПД ($k_m < 1$; $k_{\eta} < 1$), вариант 2 менее эффективен по массе ($k_m < 1$).

Таким образом, для тракторов 4К4а и гусеничного в качестве номинальных принимаем их показатели в варианте 3 при номинальной энергонасыщенности соответственно 15,69 и 18,63 Вт/кг.

Из сравнения вариантов 1—3 следует вывод: нижние номинальные значения основных показателей $N_{н1}$, $m_{н1}$, $P_{крн1}$ трактора определяются нижним пределом номинальной энергонасыщенности $\Theta_{н1}$, максимальным тяговым КПД и минимальными удельными энергозатратами, соответствующими допустимому буксованию.

Верхний предел $\Theta_{н2}$ номинальной энергонасыщенности определим из сравнения при $\delta_{н1}$ и $\eta_{т \max}$ эффективности тракторов с энергонасыщенностью $\Theta_{н1}$ из интервала $\Theta_{н1} \leq \Theta_{н1} \leq \Theta_{н2}$ и трактора с энергонасыщенностью $\Theta_{н1}$.

Показатели трактора при заданных $N_{н1}$, m и $P_{кр}$ рассчитываем по следующему алгоритму (алгоритм 3): $\varphi_{кр} = P_{кр}/gm$; $\delta = a\varphi_{кр}/(b - \varphi_{кр})$; $\eta_{\delta} = 1 - \delta$; $P_k = P_{кр} + mgf$; $v = \eta_M \eta_{\delta} \varepsilon_N N_{н1}/P_{кр}$; μ ; $\eta_{т} = P_{кр}v/\varepsilon_N N_{н1}$; $k_{п1}$; $e_{г1}$; $e_{п1}$ (задаем a , b , η_M , ε_N , f , $P_{кр}$, $N_{н1}$, m).

При сравнении в качестве тракторов T_3 принимаем: 4К4а с $\Theta_{н1} = 15,69$ Вт/кг, гусеничный с $\Theta_{н1} = 18,63$ Вт/кг. С тракторами T_3 сравниваем по эффективности тракторы T_i с энергонасыщенностью из интервала $\Theta_{н1}$ — $\Theta_{н2}$.

Результаты расчета представлены в табл. 5 и 6, в которых показатели N_H , m_H , $P_{крH}$ определены по алгоритму 2, показатели v_H , μ , e_T , $k_{п}$, $e_{п}$ — по алгоритму 3, коэффициенты k_m , k_{eT} , $k_{кп}$, $k_{eп}$, $k_{эф}$ — по формулам (6)—(11).

Из табл. 5, 6 видно, что при увеличении энергонасыщенности повышается производительность трактора (коэффициент $k_{п}$), но при этом увеличиваются эксплуатационная масса, расход топлива на единицу площади (коэффициент e_T), расход топлива на единицу производительности (коэффициент $e_{п}$), т.е. снижается эффективность трактора (коэффициенты k_m , k_{eT} , $k_{eп}$, $k_{эф}$). На основании этого принимаем следующее ограничение: верхнему пределу энергонасыщенности соответствует значение Θ_{H2} , при котором снижение обобщенного коэффициента эффективности трактора по сравнению с единицей не превышает 5 %:

$$s_{эф} = (1 - k_{эф}) \cdot 100 \% \leq 5 \% \quad (12)$$

Ограничение (12) выполняется для трактора 4К4а при $\Theta_{H2} = 20$ Вт/кг ($s_{эф} = 4,7$ %, см. табл. 5), для гусе-

ничного трактора при $\Theta_{H2} = 26$ Вт/кг ($s_{эф} = 5$ %, см. табл. 6). При этом по сравнению с Θ_{H1} производительность трактора 4К4а повышается на 11,2 %, гусеничного трактора — на 19 % (коэффициент $k_{кп}$).

В табл. 7 представлены интервалы номинальных значений основных показателей тракторов разных тяговых классов (рассчитаны по алгоритму 2), соответствующие интервалам номинальной энергонасыщенности 15,69—20 Вт/кг для трактора 4К4а и 18,63—26 Вт/кг для гусеничного трактора.

Энергонасыщенность, значение которой входит в номинальный интервал, имеет гусеничный трактор ДТ-175М тягового класса 3 (обозначим этот вариант как ДТ-175М₃): $N_H = 132\ 000$ Вт, $m = 6600$ кг, $\Theta_H = 20$ Вт/кг. Сравним его эффективность с гусеничным трактором Т₃ тягового класса 3 с номинальными показателями из табл. 6 при $\Theta_H = 20$ Вт/кг, коэффициенты эффективности k_m , $k_{п}$, $k_{кп}$, $k_{eп}$, $k_{эф}$ которого принимаем равными единице.

Сравнительные показатели ДТ-175М₃ и Т₃ представлены в табл. 8. Из нее видно, что при большей произ-

Таблица 6

Номинальные показатели и коэффициенты эффективности гусеничного трактора тягового класса 3 при $\Theta_H \geq \Theta_{H1}$
($\delta_H = 0,03$; $\eta_{T \max} = 0,7702$)

Показатели	Значения показателей							
	$\Theta_{H1} = 18,63$	20	21	22	23	24	25	26
Θ_H , Вт/кг	$\Theta_{H1} = 18,63$	20	21	22	23	24	25	26
N_H , Вт	100 939	109 723	116 102	122 567	129 116	135 750	142 470	149 274
m_H , кг	5418	5486	5529	5571	5614	5656	5699	5741
$P_{крH}$, Н	31 850	32 250	32 500	32 750	33 000	33 250	33 500	33 750
v_H , м/с	2,44	2,62	2,75	2,88	3,01	3,14	3,27	3,41
$\mu = 0,052v^2 + 0,9$	1,21	1,257	1,294	1,332	1,372	1,414	1,458	1,503
$e_T = \mu/\eta_T$	1,571	1,632	1,68	1,729	1,781	1,836	1,893	1,952
$k_{п}$, Вт	64 259	67 226	68 122	70 868	72 470	73 933	75 265	76 472
$e_{п} \cdot 10^{-1} = e_T/k_{п}$	2,444	2,428	2,43	2,44	2,458	2,483	2,515	2,553
k_m	1	0,987	0,979	0,972	0,964	0,956	0,948	0,94
k_{eT}	1	0,961	0,931	0,899	0,866	0,831	0,795	0,757
$k_{кп}$	1	1,046	1,076	1,103	1,128	1,15	1,171	1,19
$k_{eп}$	1	1,007	1,006	1,001	0,994	0,984	0,971	0,955
$k_{эф}$	1	1	0,996	0,991	0,983	0,974	0,962	0,95

Таблица 7

Интервалы номинальных значений основных показателей тракторов разных тяговых классов

Показатели	Значения показателей			
	3 (27—36 кН)	4 (36—45 кН)	5 (45—54 кН)	6 (54—72 кН)
Трактор 4К4а ($\Theta_H = 15,69...20$ Вт/кг; $\delta_H = 0,135$; $\eta_{T \max} = 0,6128$; $v_H = 2,65...3,38$ м/с)				
N_H , Вт	144 895—190 534	180 578—238 452	217 342—286 693	288 708—381 799
$P_{крH}$, Н	33 500—34 500	41 750—43 250	50 250—52 500	66 750—69 250
m_H , кг	9235—9527	11 509—11 923	13 852—14 335	18 401—19 090
Гусеничный трактор ($\Theta_H = 18,63...26$ Вт/кг; $\delta_H = 0,03$; $\eta_{T \max} = 0,7702$; $v_H = 2,44...3,41$ м/с)				
N_H , Вт	100 939—149 274	125 976—186 869	151 330—224 465	202 037—298 649
$P_{крH}$, Н	31 850—33 750	39 750—42 250	47 750—50 750	63 750—67 500
m_H , кг	5418—5741	6762—7187	8123—8633	10 845—11 483

Таблица 8

Сравнительные показатели тракторов ДТ-175М₃, Т₃, ДТ-175М₄

Показатели	ДТ-175М ₃ (тяговый класс 3, $\Theta_H = 20$ Вт/кг)	Т ₃ (тяговый класс 3, $\Theta_H = 20$ Вт/кг, номинальный вариант)	ДТ-175М ₄ (тяговый класс 4, $\Theta_H = 19,4$ Вт/кг, номинальный вариант)
N_H , Вт	132 000	109 723	132 000
m , кг	6600	5486	6804
$P_{кр}$, Н	32 250	32 250	40 000
v , м/с	3,12	2,62	2,54
$\mu = 0,052v^2 + 0,9$	1,407	1,257	1,236
δ	0,016	0,03	0,03
η_T	0,7631	0,7702	0,7702
$e_T = \mu/\eta_T$	1,844	1,632	1,605
k_{Π}	71 577	67 226	82 258
$e_{\Pi} \cdot 10^{-5} = e_T/k_{\Pi}$	2,576	2,428	1,951
k_m	0,797	1	0,969
k_{η}	0,991	1	1,009
k_{eT}	0,87	1	1,13
$k_{k\Pi}$	1,065	1	1,149
$k_{e\Pi}$	0,939	1	1,243
$k_{\text{эф}}$	0,928	1	1,095

водительности (на 6,5 %, коэффициент $k_{k\Pi}$) и меньшем тяговом КПД эффективность ДТ-175М₃ ниже, чем у Т₃; в целом (коэффициент $k_{\text{эф}}$) на 7,2 %; по массе (коэффициент k_m) на 21,3 %, т.е. на 21,3 % больше уплотняющее воздействие на почву; по расходу топлива на единицу площади (коэффициент k_{eT}) на 13 %; по расходу топлива на единицу производительности (коэффициент $k_{e\Pi}$) на 6,1 %. Из сравнения следует, что номинальной энергонасыщенности $\Theta_H = 20$ Вт/кг трактора ДТ-175М₃ не соответствует сочетание его номинальной мощности и эксплуатационной массы.

Для повышения эффективности использования ДТ-175М скорректируем его тяговое усилие и массу до номинальных значений тягового класса 4 (обозначим этот вариант как ДТ-175М₄) при той же номинальной мощности $N_H = 132 000$ Вт. Из интервалов $P_{крH} = 39 750 \dots 42 250$ Н; $m_H = 6762 \dots 7187$ кг (см. табл. 7) интерполированием получим: $P_{крH} = 40 000$ Н; $m_H = 6804$ кг. Этим показателям соответствуют энергонасыщенность $\Theta_H = 19,4$ Вт/кг и коэффициент балластирования 1,031, т.е. эксплуатационную массу ДТ-175М₃ необходимо увеличить на 3,1 %.

При сравнении ДТ-175М₄ (трактор Т₄) и ДТ-175М₃ (трактор Т₃) коэффициенты эффективности последнего принимаем равными единице. Номинальные показатели ДТ-175М₄ и его коэффициенты эффективности, рассчитанные соответственно по алгоритму 3 и формулам (6)–(11), представлены в табл. 8.

Из сравнения следует, что трактор ДТ-175М₄ с увеличенной на 3,1 % массой целесообразно использовать в тяговом классе 4 с номинальным тяговым усилием 40 000 Н. В этом случае его эффективность существенно выше, чем у ДТ-175М₃: в целом (коэффициент $k_{\text{эф}}$) на 9,5 %; по расходу топлива на единицу площади (коэффициент k_{eT}) на 13 % (расход топлива уменьшается на 13 %); по производительности (коэффициент $k_{k\Pi}$) на 14,9 % (производительность увеличивается на 14,9 %); по расходу топлива на единицу производительности на 24,3 % (расход топлива уменьшается на 24,3 %).

Выводы

1. С использованием принятых критериев оптимальности (минимум энергозатрат и максимум тягового КПД) определены интервалы $\Theta_{H1} - \Theta_{H2}$ изменения номинальной энергонасыщенности тракторов: 15,69–20 Вт/кг для трактора 4К4а, 18,63–26 Вт/кг для гусеничного трактора.

2. При изменении энергонасыщенности от Θ_{H1} до Θ_{H2} производительность тракторов 4К4а и гусеничных тракторов увеличивается на 11–19 % при снижении их обобщенного коэффициента эффективности на 5 %.

3. Для интервалов $\Theta_{H1} - \Theta_{H2}$ определены номинальные значения мощности, эксплуатационной массы и рабочей скорости тракторов 4К4а и гусеничных тракторов тяговых классов 3–6.

Литература и источники

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. 271 с.
3. Зангиев А. А. Оптимизация состава и режимов работы машинно-тракторных агрегатов по критериям ресурсосбережения: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 1987. 520 с.
4. Кутков Г. М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. М.: КолосС, 2004. 504 с.
5. 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. Optimal energy saturation of 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 of operation of machine and tractor fleet]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985, 271 p.
3. Zangiev A. A. *Optimizatsiya sostava i rezhimov raboty mashinno-traktornykh agregatov po kriteriyam resursosberezheniya* [Optimization of structure and operating modes of machine-tractor units by resource-saving criteria]. DSc in Engineering thesis. Moscow, 1987, 520 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. Antonov A. P., Antyshev N. M., Bannik A. P. et al. *Tyagovyye kharakteristiki sel'skokhozyaystvennykh traktorov. Al'bom-spravochnik* [Traction characteristics of agricultural tractors. Album-handbook]. Moscow, Rossel'khozizdat Publ., 1979, 240 p.