

## Оценка эффективности использования трактора с двигателем постоянной мощности на операциях почвообработки

С.Ю. Журавлёв, к.т.н., ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ

Повышение эффективности использования современной высокопроизводительной сельскохозяйственной техники, с точки зрения минимума эксплуатационных затрат, является одним из основных требований к разработке новых и модернизации существующих технических систем, используемых в качестве мобильных сельскохозяйственных агрегатов (машинно-тракторных агрегатов).

Негативное влияние на показатели машинно-тракторного агрегата (МТА) вероятностной нагрузки в значительной степени снижается благодаря тому, что величина коэффициента запаса крутящего момента на валу двигателей современных тракторов может достигать величины  $K_M = 1,6$ . Несмотря на это при выполнении операций по основной обработке почвы колебания внешней нагрузки на агрегаты могут достигать большой величины, поэтому потери (недоиспользование) мощности и снижение производительности неизбежны. Исходя из вышесказанного, оценка влияния переменной нагрузки на параметры стендовой характеристики дизеля трактора и, соответственно, на технико-экономические показатели работы МТА даёт возможность установить наиболее энергосберегающие тягово-скоростные диапазоны и параметры энергонасыщенных колёсных тракторов улучшенной классической компоновки при выполнении технологических операций почвообработки.

Обоснование оптимальных параметров и режимов работы дизеля трактора в процессе выполнения почвообрабатывающих операций желательно проводить с учётом вероятностно-статистических оценок его энергетических и технико-экономических показателей [1 – 5]. Для решения этой задачи предпочтительно использовать метод функций случайных аргументов [1, 2, 4].

**Материал и методы исследования.** В качестве объекта исследования рассматриваются показатели работы дизеля ЯМЗ-53625 трактора «Кировец» К-424 при выполнении технологических операций почвообработки.

В соответствии с вышеназванным методом средние значения выходных параметров дизеля рассчитываются по следующим формулам [4, 5]:

$$M(N_e) = f(M_k) = 9550^{-1} \times \left[ \begin{aligned} &0,5(a\bar{M}_k + b\bar{M}_k^2 + b\sigma_M^2) + \\ &(a_1\bar{M}_k + b_1\bar{M}_k^2 + b_1\sigma_M^2)\Phi(t_H) + \\ &+ (a_2\bar{M}_k + b_2\bar{M}_k^2 + b_2\sigma_M^2)\Phi(t_{II}) - \\ &-\sigma_M\{b_1\varphi(t_H)\bar{M}_k + b_2\varphi(t_{II})\bar{M}_k\} \end{aligned} \right], \quad (1)$$

где  $M(N_e)$  – математическое ожидание эффективной мощности дизеля, кВт;

$\bar{M}_k$  – среднее значение крутящего момента на валу дизеля, Н·м;

$\Phi(t_H) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{t_H} e^{-t^2/2} dt$  – интегральная функция для  $Y = f(M_k)$ ;

$\varphi(t_H) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-0,5t_H^2)$  – плотность распределения аргумента  $t_H$ ;

$\Phi(t_{II}) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{t_{II}} e^{-t^2/2} dt$  – интегральная функция для  $Y = f(M_k)$ ;

$\varphi(t_{II}) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-0,5t_{II}^2)$  – плотность распределения аргумента  $t_{II}$ ;

$t_H = \frac{M_H - \bar{M}_k}{\sigma_M}$ ,  $t_{II} = \frac{M_{II} - \bar{M}_k}{\sigma_M}$ ,  $\sigma_M$  –

среднеквадратическое отклонение крутящего момента, Н·м;

$M_H$  – номинальное значение крутящего момента, Н·м;

$M_{II}$  – предельное значение крутящего момента, Н·м;

$a_1, b_1, a, b, a_2, b_2$  – расчётные коэффициенты (табл. 1).

Для расчёта средних значений часового расхода топлива двигателя использовали следующее выражение [6]:

$$\bar{G}_T = 0,5(a^* + b^*\bar{M}_k) + (a_1^* + b_1^*\bar{M}_k)\Phi(t_H) + (a_2^* + b_2^*\bar{M}_k)\Phi(t_{II}) - \sigma_P\{(b_1^*\varphi(t_H) + b_2^*\varphi(t_{II}))\}, \quad (2)$$

где  $\bar{G}_T$  – среднее значение часового расхода топлива, кг/ч;

$a_1^*, b_1^*, a_2^*, b_2^*, a^*, b^*$  – расчётные коэффициенты (табл. 2).

Среднее значение удельного расхода топлива определяли по соотношению:

$$\bar{g}_e = 10^{-3} \frac{\bar{G}_T}{\bar{N}_e}, \quad (3)$$

где  $\bar{g}_e$  – математическое ожидание удельного расхода топлива, г/кВт·ч.

Результаты расчёта средних значений энергетических параметров дизеля ЯМЗ-53625 представлены в таблице 3 и на рисунке 1.

1. Значения коэффициентов аппроксимации характеристики дизеля для расчёта математического ожидания мощности

Коэффициент	Расчётная формула	Значение
$A_1^*$	$n_{max}$	2300
$A_2^*$	$n_H + \{[n_H - n_{II}]\}/(k_2 - 1)\}$	2258
$A_3^*$	$n_{II} + \{[n_{II} - n_{min}]\}/(k_1 - 1)\}$	2005
$B_1^*$	$-(n_{max} - n_H)/M_H$	-0,135
$B_2^*$	$-(n_H - n_{II})/(M_{II} - M_H)$	-2,083
$B_3^*$	$-(n_{II} - n_{min})/(M_{max} - M_{II})$	-2,61
$a^*$	$A_1^* + A_3^*$	4305
$a_1^*$	$A_1^* - A_2^*$	42
$a_2^*$	$A_2^* - A_3^*$	253
$b^*$	$B_1^* + B_3^*$	-2,745
$b_1^*$	$B_1^* - B_2^*$	1,948
$b_2^*$	$B_2^* - B_3^*$	0,527

$n_{max}, n_H, n_{II}, n_{min}$  – угловая скорость вала дизеля соответственно: максимальная, при номинальном моменте, при предельном моменте и при максимальном моменте, мин<sup>-1</sup>;  $k_1 = M_{max}/M_{II}$ ;  $k_2 = M_{II}/M_H$

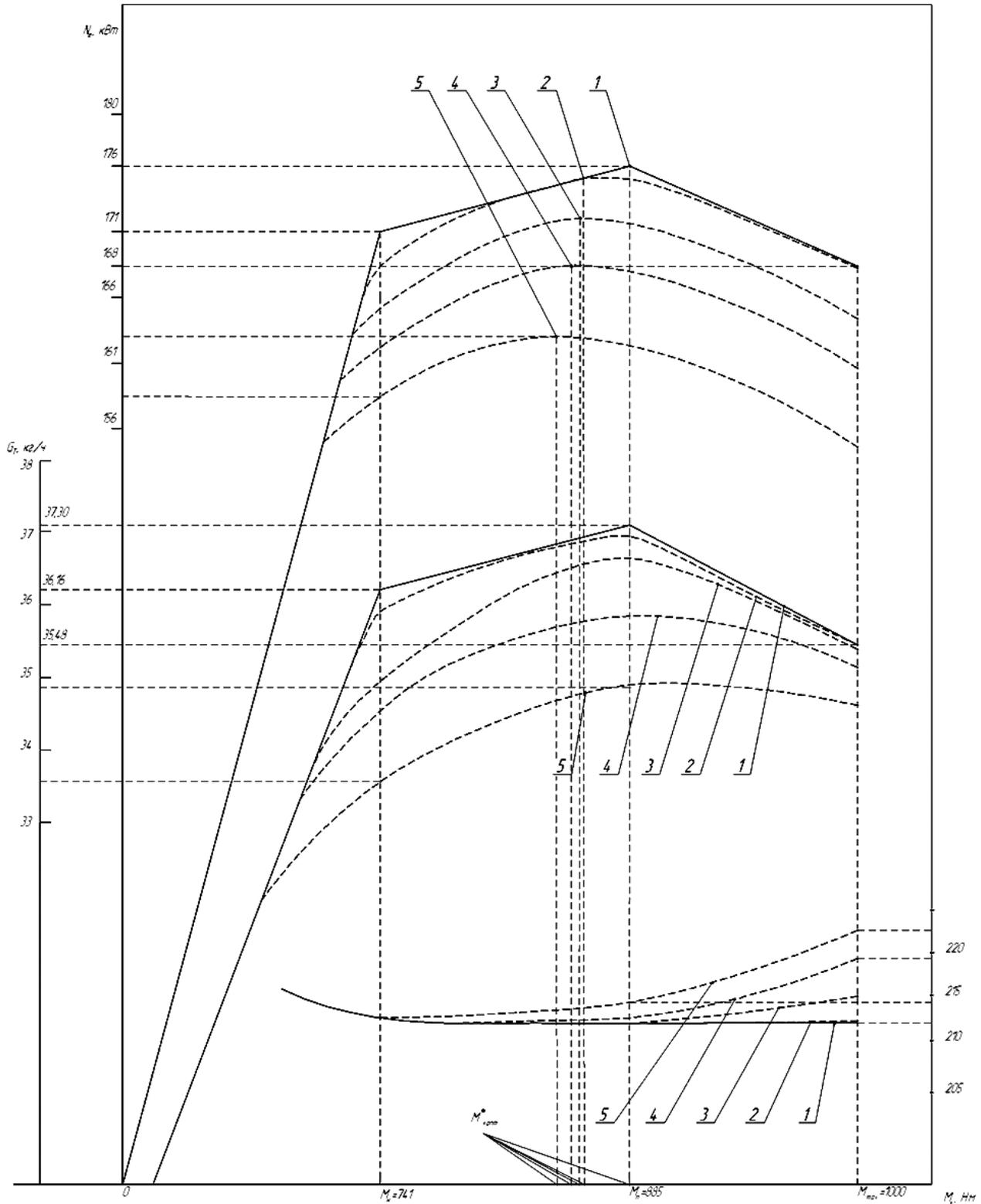
2. Расчётные значения коэффициентов аппроксимации характеристики часового расхода топлива

Коэффициент	Расчётная формула	Значение
$A_1$	$G_{TX}$	9,04
$A_2$	$G_{TH} + \{[G_{TH} - G_{TII}]\}/(k_2 - 1)\}$	30,28
$A_3$	$G_{TII} + \{[G_{TII} - G_{TO}]\}/(k_1 - 1)\}$	42,5
$B_1$	$-(G_{TX} - G_{TH})/M_H$	0,037
$B_2$	$-(G_{TH} - G_{TII})/(M_{II} - M_H)$	0,008
$B_3$	$-(G_{TII} - G_{TO})/(M_{max} - M_{II})$	-0,016
$a$	$A_1^* + A_3^*$	51,54
$a_1$	$A_1^* - A_2^*$	-21,24
$a_2$	$A_2^* - A_3^*$	-12,22
$b$	$B_1^* + B_3^*$	0,021
$b_1$	$B_1^* - B_2^*$	0,029
$b_2$	$B_2^* - B_3^*$	0,024

$G_{TX}, G_{TH}, G_{TII}, G_{TO}$  – часовой расход топлива соответственно: на холостом ходу, номинальный, для предельного крутящего момента, при максимальном крутящем моменте, кг/ч;  $k_1 = M_{max}/M_{II}$ ;  $k_2 = M_{II}/M_H$

3. Средние значения энергетических показателей двигателя ЯМЗ-53625 в зависимости от коэффициента вариации  $v_M$  крутящего момента на коленчатом валу

Коэффициент вариации $v_M$	$M_H = 741 \text{ Н}\cdot\text{м}$		$M_{II} = 885 \text{ Н}\cdot\text{м}$		$M_{max} = 1000 \text{ Н}\cdot\text{м}$		Оптимальное значение $M_k^*, \text{ Н}\cdot\text{м}$	Значение $N_e$ при $M_k^*, \text{ кВт}$	$n_\partial, \text{ мин}^{-1}$
	$N_e, \text{ кВт}$	$n_\partial, \text{ мин}^{-1}$	$N_e, \text{ кВт}$	$n_\partial, \text{ мин}^{-1}$	$N_e, \text{ кВт}$	$n_\partial, \text{ мин}^{-1}$			
0	171	2200	176	1900	167,5	1600	885	176	1900
0,05	168	2165	175	1888	167	1595	862	175	1888
0,1	165,55	2134	172,47	1849	164,6	1572	860	172,46	1849
0,15	162,3	2092	168,3	1816	160,44	1532	856	168,3	1816
0,2	158,48	2042	163,15	1761	154,4	1475	846	163,15	1761
Коэффициент вариации $v_M$	$M_H = 741 \text{ Н}\cdot\text{м}$		$M_{II} = 885 \text{ Н}\cdot\text{м}$		$M_{max} = 1000 \text{ Н}\cdot\text{м}$		Оптимальное значение $M_k^*, \text{ Н}\cdot\text{м}$	Значение $g_e$ при $M_k^*, \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$	$G_T, \text{ кг}/\text{ч}$
	$g_e$ при $M_k^*, \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$	$g_T, \text{ кг}/\text{ч}$	$g_e$ при $M_k^*, \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$	$g_T, \text{ кг}/\text{ч}$	$g_e$ при $M_k^*, \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$	$g_T, \text{ кг}/\text{ч}$			
0	211,5	36,16	212	37,3	211,8	35,48	885	212	37,3
0,05	212,2	35,65	210,9	36,9	212,5	35,49	862	210,9	36,9
0,1	212	35,1	211,1	36,41	215	35,4	860	211,1	36,41
0,15	212	34,42	212,2	35,72	219	35,14	856	212,2	35,72
0,2	212,3	33,65	213,8	34,88	225	34,71	846	213,8	34,88



- 1 – коэффициент вариации крутящего момента  $v_{M_{кр}} = 0$ ;
- 2 – коэффициент вариации крутящего момента  $v_{M_{кр}} = 0,05$ ;
- 3 – коэффициент вариации крутящего момента  $v_{M_{кр}} = 0,10$ ;
- 4 – коэффициент вариации крутящего момента  $v_{M_{кр}} = 0,15$ ;
- 5 – коэффициент вариации крутящего момента  $v_{M_{кр}} = 0,2$ ;

Рис. 1 – Средние значения энергетических показателей работы дизеля ЯМЗ-53625 в условиях вероятностной нагрузки

**Результаты исследования.** В ходе анализа результатов вычислительного эксперимента по оценке влияния переменных внешних воздействий на параметры работы дизеля ЯМЗ-53625 установлены следующие закономерности.

При значениях коэффициента вариации крутящего момента  $v_M$  на валу дизеля, учитываемых в диапазоне значений от 0 до 0,2 (принимая следующие значения  $v_M$  для трёх основных групп операций почвообработки [7]: 0,05–0,1 – 3 группа; 0,1–0,15 – 2 группа и 0,15–0,2 – 1 группа почвообрабатывающих операций), важнейший показатель эффективности работы дизеля мощность  $N_e$  на участке стеновой характеристики от  $M_{KH}$  до  $M_{KП}$  принимает следующие значения.

В области номинального момента  $M_{KH}$  недоиспользование (снижение) мощности дизеля достигает почти 8 %, т.е. от 171 до 158 кВт. Одной из причин такого снижения мощности дизеля является невысокий по современным меркам запас крутящего момента (согласно данным завода-производителя коэффициент  $K_M = 1,35$ ). Современные тракторные дизели могут иметь коэффициент  $K_M = 1,4–1,6$ . Однако такое значение коэффициента приспособляемости ( $K_M = 1,35$ ) позволяет дизелю поддерживать режим постоянной мощности при значениях частоты вращения дизеля  $n_D$  от 2200 до 1600 мин<sup>-1</sup>. В области стеновой характеристики, соответствующей  $M_{KП}$ , снижение мощности достигает 7,4 % при коэффициенте  $v_M = 0,2–7,4$  %, при этом максимумы значений мощности сдвигаются в сторону номинального значения крутящего момента  $M_K$ .

С учётом влияния вероятностной нагрузки оптимальные нагрузочные режимы дизеля расположены в области значений  $M_K = 846–885$  Н·м при значениях  $v_M = 0,2–0$ , т.е. величина оптимальной степени загрузки дизеля  $\lambda_M$  составляет 0,96–0,974. У данного дизеля, как и у большин-

ства многих современных тракторных дизелей, максимум мощности  $N_e = 176$  кВт стеновой характеристики находится в области предельного крутящего момента  $M_{KП} = 885$  Н·м.

Удельный расход топлива  $\bar{g}_e$  при различных значениях коэффициента вариации момента практически не меняет своих значений на участке стеновой характеристики от момента  $M_{KH}$  до области, соответствующей  $M_{KП}$ . Только в режиме перегрузки (участок характеристики от  $M_{KП}$  до максимального момента  $M_{max}$ ) значения  $\bar{g}_e$  существенно возрастают.

**Выводы.** Анализ оценки воздействия вероятностного характера внешней нагрузки на дизель трактора К-424 при его использовании в составе различных почвообрабатывающих агрегатов показал, что современная система подготовки топливной смеси двигателя, включающая топливную систему Common Rail и турбонагнетатель, при запасе крутящего момента в 35% достаточно эффективно преодолевает негативное воздействие колебаний момента на валу дизеля. Особенно это отражается на расходе топлива  $\bar{g}_e$ .

### Литература

1. Агеев Л.Е., Бахриев С.Х. Эксплуатация энергонасыщенных тракторов. М.: Агропромиздат, 1991. 271 с.
2. Журавлев С.Ю. Оценка эффективности функционирования мобильных сельскохозяйственных агрегатов с использованием тяговой характеристики трактора // Вестник Красноярского ГАУ. 2011. № 9. С. 146–151.
3. Селиванов Н.И. Технологические свойства колёсных тракторов: учебн. пособие / Краснояр. гос. аграр. у-нт. Красноярск, 2019. 308 с.
4. Эвиев В.А. Повышение эффективности функционирования тяговых и тягово-приводных агрегатов с трактором за счёт оптимизации эксплуатационных режимов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб. – Пушкин, 2006. 32 с.
5. Практикум по надёжности технических систем сельскохозяйственных машин: учебное пособие / В.Е. Рогов, В.П. Чернышов, В.А. Шахов [и др.]. Оренбург, 2012.
6. Журавлев С.Ю. Минимизация энергозатрат при использовании машинно-тракторных агрегатов: монография. Красноярск, 2013.
7. Селиванов Н.И. Эксплуатационные параметры колёсных тракторов высокой мощности // Вестник КрасГАУ. 2014. № 3. С. 176–184.