

УДК 621.436

## **МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ И МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СМЕСЕВОГО МИНЕРАЛЬНО – РЫЖИКОВОГО ТОПЛИВА**

**Хохлов А.А., кандидат технических наук, доцент,  
тел. 89997693210, khokhlov.73@mail.ru**

**Хохлов А.Л., доктор технических наук, профессор,  
тел. 89278280897, chochlov.73@mail.ru  
ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ**

***Ключевые слова:** многопараметрическая модель, входные параметры, выходные параметры, физико-химические свойства, эксплуатационные свойства, параметры топливоподачи, показатели рабочего процесса дизеля, эксплуатационные показатели дизеля, эксплуатационные показатели МТА*

*С целью выявления показателей, оказывающих наибольшее влияние на эффективность функционирования с.-х. трактора в составе МТА, разработана многопараметрическая модель, раскрывающая влияние физико-химических и эксплуатационных свойств смесового минерально – рыжикового топлива на управляемые входные параметры топливоподачи и показатели рабочего процесса дизеля, которые с учетом неуправляемых параметров влияют на выходные параметры индикаторные и эффективные показатели дизеля, при этом выходные параметры формирует вектор  $K_{ЭП}$ , являющийся критерием комплексной оценки эксплуатационных показателей и эффективности функционирования с.-х. трактора в составе МТА.*

**Введение.** Использование в качестве моторного топлива смесового минерально-рыжикового топлива (СМРТ) влияет, прежде всего, на характер рабочего процесса дизеля и существенно влияет на его энергетические, топливно-экономические и экологические

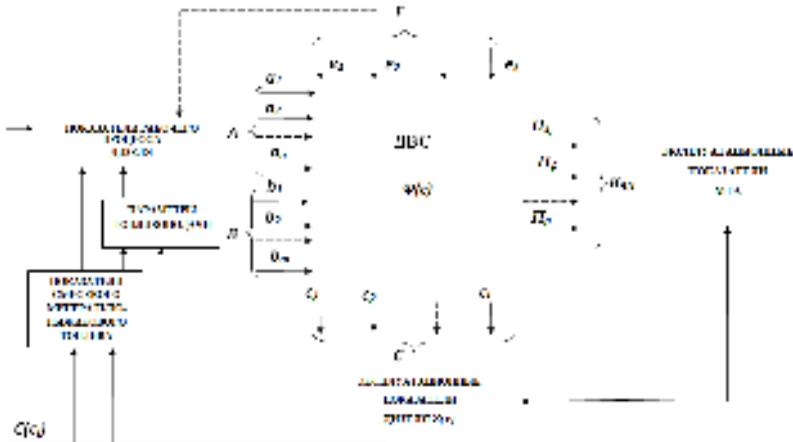
показатели, изменение которых влечет за собой изменение производительности машинно-тракторного агрегата (МТА) [1-6]. Функциональную связь между показателями МТА и показателями работы тракторного дизеля при работе на новом виде моторного топлива СМРТ рассмотрим на примере многопараметрической модели, учитывающей адекватность режима работы, условия и нагрузочно-скоростные режимы работы МТА.

С целью выявления наиболее значимых показателей, оказывающих наибольшее влияние на работоспособность МТА, будем рассматривать дизель как управляемую параметрическую систему.

**Материалы и методы исследований.** Дизель является многомерным объектом управления, так как количество входных параметров у него больше одного и каждый входной параметр влияет на два и более выходных параметра. Поэтому изменение условий работы дизеля может осуществляться изменением параметров рабочего процесса в результате изменения свойств топлива и режима его подачи в цилиндры двигателя. И то, и другое приведет к изменению его характеристик, и, соответственно, к изменению эксплуатационных характеристик МТА.

Модель работы дизеля можно представить как некую многомерную и многоуровневую систему.

Такая система будет формироваться с учетом входных и выходных процессов. При этом часть входных процессов является управляющими и определяется  $n$ -мерным вектором  $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , определяющим индикаторные и эффективные показатели дизеля (индикаторное давление, эффективная мощность, количество свежего заряда и др.), и  $m$ -мерным вектором  $B(b_1, b_2, \dots, b_m)$ , определяющим параметры используемого СМРТ и конструктивные особенности системы топливоподачи (давление впрыскивания топлива, цикловая подача, температура топливной смеси и т.д.) [7-9]. Входной поток воздействий, представленный  $k$ -мерным вектором  $E(e_1, e_2, \dots, e_k)$ , является неуправляемым и характеризует природно-климатические, почвенные и дорожные условия в которых эксплуатируется двигатель (рис. 1).



**Рис. 1 – Многопараметрическая модель формирования эксплуатационных показателей МТА**

Выходные характеристики системы определяются  $i$ -мерным вектором  $C(c_1, c_2, \dots, c_i)$ , представляющим, соответственно, эксплуатационные и топливно-экономические показатели дизеля.

Выходной  $p$ -мерный вектор  $K_{ЭП}(P_1, P_2, \dots, P_p)$  содержит критерии комплексной оценки эксплуатационных показателей рассматриваемой системы. Скалярные выходные характеристики вектора  $K_{ЭП}$ , формирующие оценку МТА, будут зависеть от скалярно-векторных значений входных потоков, имеющих вероятно-статистические параметры и формирующие граничные значения, в пределах которых будет проходить изменение функционала  $K_{ЭП}$ .

Подобная система отражает не только известные потоки  $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$  и  $B(b_1, b_2, \dots, b_m)$ , но и позволяет учесть влияние выходного потока  $C(c_1, c_2, \dots, c_i)$ , причинно-следственную связь их образования и влияния на выходной поток  $K_{ЭП}$ .

В предлагаемой модели выходной поток  $C(c_1, c_2, \dots, c_i)$ , будет являться управляемыми параметрами, а их скалярно-векторные значения могут рассматриваться как граничные условия в которых наиболее эффективно могут быть изменены управляющие потоки  $A, B$  и  $K_{ЭП}$ . Предлагаемая модель позволяет учесть влияние выходных параметров  $C(c_1, c_2, \dots, c_i)$  и определить их влияние на выходной факториал  $K_{ЭП}$  и управляемые потоки  $A$  и  $B$ .

$$K_{ЭП} = f(A, B, E, A', B'). \quad (1)$$

Выходные потоки  $A'$  и  $B'$  формируют систему с обратной связью в виде потоков  $X$  и  $Y$  с учетом ограничений устанавливаемых  $K_{ЭП}$  при  $0 < p \leq 1$ :

$$\begin{aligned} X(x_i) &= A'(c'_1, c'_2, \dots, c'_i) \cdot K_{ТЭП}(П_1, П_2, \dots, П_p), \\ Y(y_j) &= B'(c''_1, c''_2, \dots, c''_j) \cdot K_{ТЭП}(П_1, П_2, \dots, П_p). \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда корректирующее воздействие на управляемые потоки  $A$  и  $B$  могут быть представлены системой уравнений:

$$\begin{aligned} A_X(a_1, a_2, \dots, a_n) &= A(a_1, a_2, \dots, a_n) \pm X(x_i), \\ B_Y(b_1, b_2, \dots, b_m) &= B(b_1, b_2, \dots, b_m) \pm Y(y_j), \\ A_Y(a_1, a_2, \dots, a_n) &= A(a_1, a_2, \dots, a_n) \pm Y(y_j), \\ B_X(b_1, b_2, \dots, b_m) &= B(b_1, b_2, \dots, b_m) \pm X(x_i). \end{aligned} \quad (3)$$

В этом случае значение результирующего функционала может быть представлено как

$$K_{ЭП} = (П_1, П_2, \dots, П_p) = \psi(c) \cdot X(x_i) \cdot Y(y_j), \quad (4)$$

$$\text{где } \psi(c) = \sum \left( (a_{ij} \cdot e_{iz}) + (b_{ij} \cdot e_{iz}) \right) \begin{cases} i = 1, 2, \dots, n, \\ j = 1, 2, \dots, m, \\ z = 1, 2, \dots, k. \end{cases} \quad (5)$$

Представленные положения показывают, что наибольшее влияние на изменение параметров двигателя оказывают рабочий процесс, проходящий в дизеле, и свойства СМРТ, использование которого требует изменение системы топливоподачи и ее параметров. Поскольку параметры рабочего процесса зависят от свойств используемого топлива и параметров системы топливоподачи, то можно предположить, что оптимальным воздействием, позволяющим изменить эксплуатационные показатели дизеля и МТА, будет выбор СМРТ соответствующего состава и, соответственно, изменение параметров топливоподачи, в зависимости от свойств используемого смесового топлива. Так как рабочий процесс проходит в цилиндре двигателя, то наибольшее влияние на изменение выходных параметров дизеля будут оказывать параметры топливоподачи.

Тогда, выходной поток индикаторных и эффективных показателей может быть представлен системой уравнений:

$$A = \left\{ \begin{array}{l} \eta_v = f(p_a, p_o, T_r, \rho_o) \\ N_i = f(\eta_i, \eta_v, \rho_o) \\ N_e = f(N_i, \eta_m) \\ \eta_i = f(p_i, V_h, Q_m) \\ g_i = f(H_u, \eta_i) \\ g_e = f(H_u, \eta_i, \eta_m) \end{array} \right. , \quad (6)$$

где  $\eta_v$  - коэффициент наполнения;  $p_a$  - давление в конце такта впуска, МПа;  $p_o$  - давление окружающей среды, МПа;  $T_r$  - температура остаточных газов, °С;  $\rho_o$  - плотность свежего заряда на впуске, г/см<sup>3</sup>;  $N_i$  - индикаторная мощность, кВт;  $\eta_i$  - индикаторный КПД;  $N_e$  - эффективная мощность дизеля, кВт;  $\eta_m$  - механический КПД;  $p_i$  - среднее индикаторное давление действительного цикла, МПа;  $V_h$  - рабочий объем одного цилиндра, л;  $Q_m$  - количество теплоты подведенное с топливом за цикл, кДж;  $H_u$  - теплотворная способность (низшая теплота сгорания) топлива (кДж/кг);  $g_i$  - удельный индикаторный расход топлива, г/кВт·ч;  $g_e$  - удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч.

Известно, что индикаторный коэффициент полезного действия, удельный индикаторный расход топлива, эффективный коэффициент полезного действия, удельный эффективный расход топлива, зависят от качества протекания процесса сгорания топлива. Поэтому процесс сгорания должен удовлетворять ряду требований обеспечивающих экономичность и экологичность цикла - относительно высокие температуры и давление цикла, минимальный расход топлива. При этом должна обеспечиваться длительная и надежная работа дизеля. Однако одновременное выполнение этих требований не возможно в силу того, что в ряде случаев они противоречат друг другу. Поэтому задача может быть решена компромиссно, в зависимости от требований, предъявляемых к дизелю, путем изменения факторов влияющих на рабочий процесс. Одним из этих факторов является выбор топлива с соответствующими физико-химическими свойствами и его подготовка

перед подачей в цилиндр дизеля, создание необходимых условий распыливания и смешивания со свежим зарядом, обеспечение необходимого коэффициента избытка воздуха, выбор закона подачи топлива по углу поворота коленчатого вала, создание необходимого температурного режима смесового топлива в цилиндре для сокращения подготовки топлива к сгоранию.

Выходной поток параметров системы топливоподачи может быть представлено системой уравнений:

$$B = \left\{ \begin{array}{l} g_{ц} = f(h_{нл}, \beta_T, d_{нл}, n_n, \rho_m, \eta_T, P_{ост}, P_n, T_m) \\ \Theta = f(n, P_c, v, T_c, \varepsilon) \\ P_{max} = f(P_n, P_{пр}, s_p, h_p, \rho_m, \eta_T, P_{ост}, T_m) \\ \delta_{ц} = f(g_{цmax}, g_{цmin}, g_{цср}) \end{array} \right\}, \quad (7)$$

где  $g_{ц}$  - цикловая подача топлива, г/цикл;  $h_{нл}$  - геометрически полезный ход плунжера топливного насоса, мм;  $\beta_T$  - коэффициент сжимаемости топлива;  $d_{нл}$  - диаметр плунжера, мм;  $n_n$  - частота вращения кулачкового вала насоса,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $\rho_m$  - плотность топлива,  $\text{г/см}^3$ ;  $\eta_T$  - коэффициент подачи насоса, учитывающий потери геометрического полезного хода плунжера;  $P_{ост}$  - остаточное давление в линии нагнетания топлива, МПа;  $P_n$  - давление начала подъема иглы распылителя, МПа;  $T_m$  - температура топлива,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Theta$  - угол опережения впрыскивания топлива, град. п.к.в.;  $n$  - частота вращения коленчатого вала двигателя,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $P_c$  - давления сжатия свежего заряда в цилиндре, МПа;  $v$  - скорость нарастания давления, МПа/ град. п.к.в.;  $T_c$  - температура сжатия, К;  $\varepsilon$  - степень сжатия;  $P_{max}$  - максимальное давление впрыскивания топлива, МПа;  $P_n$  - давление, развиваемое топливным насосом, МПа;  $P_{пр}$  - давление противодействия впрыскиванию топлива, МПа;  $s_p$  - сечение распылителя,  $\text{мм}^2$ ;  $h_p$  - ход иглы распылителя, мм;  $\delta_{ц}$  - неравномерность цикловой подачи топлива, %;  $g_{цmax}$ ,  $g_{цmin}$ ,  $g_{цср}$  - максимальное, минимальное и среднее значение цикловой подачи, г/цикл.

В соответствии с многопараметрической моделью влияние эксплуатационных показателей дизеля на эксплуатационные показатели МТА, параметры выходного потока также могут быть представлены системой функций:

$$K_{\text{ЭЭП}} = \left\{ \begin{array}{l} g_{za} = f(g_{\text{ц}}, n, z, \tau, B_p, v_p, \delta, r_k, i_{\text{тр}}) \\ E_o = f(M_i, M_{\text{МТ}}, \eta_i, r_{\text{кр}}) \\ E_e = f(P_e, P_{\text{МТ}}, L_o, \alpha, \rho_{\text{в}}, \eta_v, H_u) \\ W = f(B_p, H_u, G_T, P_c, v_p) \end{array} \right\}, \quad (8)$$

где  $g_{za}$  – погектарный расход топлива, кг/га;  $g_{\text{ц}}$  – цикловая подача топлива, г/цикл;  $n$  – частота вращения коленчатого вала тракторного дизеля, мин<sup>-1</sup>;  $z$  – число цилиндров двигателя;  $\tau$  – тактность двигателя;  $B_p$  – рабочая ширина захвата агрегатируемой машины, м;  $v_p$  – рабочая скорость МТА, км/ч;  $\delta$  – коэффициент буксования ведущих колес трактора;  $r_k$  – радиус качения ведущих колес трактора, м;  $i_{\text{тр}}$  – передаточное отношение трансмиссии трактора.  $E_o$  – общие удельные энергозатраты, МДж/га;  $E_e$  – удельный эффективный расход энергии, снимаемой с коленчатого вала (к.в.) дизеля, МДж/га;  $M_i$  – индикаторный крутящий момент двигателя, Н·м;  $M_{\text{МП}}$  – момент механических потерь, Н·м;  $\eta_i$  – индикаторный КПД;  $Vh$  – рабочий объем одного цилиндра двигателя, м<sup>3</sup>;  $r_{\text{кр}}$  – радиус кривошипа коленчатого вала двигателя, м.  $P_e$  – среднее эффективное давление, МПа ( $P_e = P_i - P_{\text{МП}}$ ,  $P_i$  – среднее индикаторное давление, МПа;  $P_{\text{МП}}$  – среднее давление механических потерь, МПа);  $l_o$  – количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания 1 кг СМРТ, кг;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_v$  – коэффициент наполнения цилиндров дизеля свежим зарядом;  $W$  – производительность МТА, га/ч;  $H_u$  – теплотворная способность топлива, МДж/кг;  $G_T$  – часовой расход топлива, кг/ч;  $P_c$  – сила тяги, Н.

**Заключение.** Анализируя многопараметрическую модель влияния параметров дизеля на эксплуатационные показатели МТА параметры выходного потока  $K_{\text{ЭП}}$ , можно сделать следующее заключение. Обеспечение эффективности эксплуатационных показателей МТА при работе дизеля трактора на смесевом топливе возможно изменением системы топливоподачи и параметров ее работы в зависимости от физико-химических свойств используемого СМРТ.

### Библиографический список:

1. Уханов, А.П. Биотопливо из рыжика: монография / А.П.

---

Уханов, А.А. Хохлов. – Пенза: РИО ПГАУ, 2020. - 192 с.

2. Influence of the thickness and porosity of the oxide coating on the piston heads depending on the parameters of the microarc oxidation mode / A. Khokhlov, D. Maryin, D. Molochnikov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, Divnomorskoe, 31 мая – 06 2021 года. – Divnomorskoe, 2021. – P. 042046.

3. Modernization of high pressure fuel pump for operation on mixed rapeseed-mineral fuel / A. S. Averyanov, S. N. Vlasov, E. G. Rotanov, A. A. Khokhlov // E3S Web of Conferences, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. – Sevastopol, 2020. – P. 01030.

4. Design adaptation of the automobile and tractor diesel engine for work on mixed vegetable-mineral fuel / A. Khokhlov, A. Khokhlov, D. Marin [et al.] // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2019) : International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2019), Kazan, 13–14 ноября 2019 года. Vol. 17. – Kazan: EDP Sciences, 2020. – P. 00077.

5. Results of engine tests of an experimental gasoline internal combustion engine / D. Marin, A. Glushchenko, A. Khokhlov [et al.] // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2019) : International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2019), Kazan, 13–14 ноября 2019 года. Vol. 17. – Kazan: EDP Sciences, 2020. – P. 00078.

6. Устройства для конструктивной адаптации дизелей автотракторной техники к работе на биоминеральном топливе / А.П. Уханов, Д.А. Уханов, Е.А. Хохлова, А.А. Хохлов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – Вып. 2. – С. 34-40.

7. Информационная модель изменения эксплуатационных показателей МТА при работе дизеля на смесевом рыжиково-минеральном топливе / А. П. Уханов, А. А. Хохлов, Д. А. Уханов, А. Л. Хохлов // Актуальные вопросы аграрной науки: Материалы Национальной научно-практической конференции, Ульяновск, 20–21

октября 2021 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2021. – С. 417-422.

8. Хохлова, Е.А. Способ регулирования дизельного смешанного топлива / Е.А. Хохлова, А.П. Уханов, А.А. Хохлов, Е.Г. Ротанов, А.Л. Хохлов // Эксплуатация автотракторной техники: опыт, проблемы, инновации, перспективы: материалы II Международной научно-практической конференции. – Пенза: Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, 2015. – С. 137-141.

9. Уханов, А.П. Теоретическое обоснование дозирования компонентов дизельного смешанного топлива / А.П. Уханов, Е.А. Хохлова, А.А. Хохлов, Е.Г. Ротанов, А.Л. Хохлов // Образование, наука, практика: инновационный аспект: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной Дню российской науки. ФГБОУ ВПО "Пензенская государственная сельскохозяйственная академия". – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2015. – С. 82-85.

## **MULTIPARAMETER MODEL FOR THE FORMATION OF THE PERFORMANCE INDICATORS OF A DIESEL AND A MACHINE-TRACTOR UNIT WHEN USING A MIXED MINERAL- CANE FUEL**

**Khokhlov A.A., Khokhlov A.L.**

***Keywords:** multi-parameter model, input parameters, output parameters, physical and chemical properties, operational properties, fuel supply parameters, diesel working process indicators, diesel performance indicators, MTA performance indicators*

*In order to identify the indicators that have the greatest impact on the efficiency of the functioning of the page - x. tractor as part of the MTA, a multi-parameter model has been developed that reveals the effect of the physicochemical and operational properties of mixed mineral-camelinated fuel on the controlled input parameters of the fuel supply and diesel engine operating process indicators, which, taking into account uncontrolled parameters, affect the output parameters, indicator and effective indicators of the diesel engine, while the output parameters are formed by the CEP vector, which is a criterion for a comprehensive assessment of operational performance and the effectiveness of the functioning of the agricultural sector. tractors as part of the MTA.*