

УДК 629.113

Б. В. Ємець

к. т. н.

С. В. Пустовіт

к. т. н.

Житомирський національний агроекологічний університет

О. С. Поліщук

Л. В. Ємець

Житомирський агротехнічний коледж

МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ТЯГОВО-ШВИДКІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВТОМОБІЛЯ ПІД ЧАС ЙОГО РОБОТИ НА ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЯХ

Методом моделювання показників тягово-швидкісних властивостей (ТШВ) автомобіля КамАЗ-5320 під час його роботи на водопаливній емульсії (ВПЕ) встановлено, що показники ТШВ суттєво знижуються, якщо ВПЕ має концентрацію води більше 5%. У випадку використання ВПЕ для двигуна КамАЗ-740 з концентрацією води 20% наступні показники зменшаться: максимальна швидкість автомобіля КамАЗ-5320 – на 7% та максимальна сила тяги цього ж автомобіля – на 8%, при цьому збільшиться шлях вибігу з 50 км/год на 26% та час розгону до 60 км/год на 18%.

Ключові слова: автомобіль, водопаливна емульсія, тягово-швидкісні властивості, моделювання.

Постановка проблеми

За останні 25 років у світі потреба у первинних енергоносіях зросла у 3,6 раза, а потреба у нафті зросла в 5,9 раза. Запаси нафти у світі становлять 10% від загального об'єму розвіданих родовищ. Тому застосування джерел енергії, альтернативних нафті, є актуальною проблемою не тільки для України, а й для всього світу [1]. Один із способів вирішення проблеми альтернативи експлуатації нафтопродуктів – це можливість роботи як бензинових двигунів, так і дизелів на водопаливних емульсіях [2, 5, 8, інші].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Водопаливні емульсії (ВПЕ) – це системи, які складаються з води, що є дисперсною фазою з діаметром крапель від 0,1 до 10 мкм, і палива, що є дисперсним середовищем. Водопаливні емульсії отримують в гомонізаторах і диспаргаторах [2, 5]. Важливим показником якості емульсії є її стабільність, яка забезпечується додаванням до неї поверхнево-активних речовин (ПАР) – емульгаторів. Використання водопаливних емульсій не потребує конструктивних змін дизеля та дозволяє помітно покращити екологічні характеристики таких двигунів.

У праці [4] наведено дані експериментальних випробувань двигуна КамАЗ-740, серійний номер НОІКТ13141, з використанням водопаливних емульсій в якості палива, яке складалось з:

- 94% Л-0,2 ГОСТ 305-82, 1% ПАР, 5% H₂O;
- 89% Л-0,2 ГОСТ 305-82, 1% ПАР, 10% H₂O;
- 79% Л-0,2 ГОСТ 305-82, 1% ПАР, 20% H₂O;
- 88% Л-0,2 ГОСТ 305-82, 1% ПАР, 1% присадки ЦГН, 10% H₂O.

В якості емульгатора використані ПАР, які складаються з азот- та гідровмісних ефірів жирних кислот.

Виконані дослідження показали, що під час використання водопаливних емульсій в якості палива ефективна потужність двигуна знижується:

- для ВПЕ з концентрацією води 5% з 128,8 кВт до 124,1 кВт – на 3,6%;
- для ВПЕ з концентрацією води 10% з 128,8 кВт до 119,8 кВт – на 7,0%;
- для ВПЕ з концентрацією води 20% з 128,8 кВт до 116,0 кВт – на 9,9%.

У розрахунку на вуглеводневі складові економічність двигуна КамАЗ-740 під час роботи на ВПЕ покращилася. Так, питома ефективна витрата палива двигуна знижується:

- для ВПЕ з концентрацією води 5% з 241,8 г/кВт·год до 232,5 г/кВт·год – на 3,8%;
- для ВПЕ з концентрацією води 10% з 241,8 г/кВт·год до 238,2 г/кВт·год – на 1,9%;
- для ВПЕ з концентрацією води 20% з 241,8 г/кВт·год до 236,8 г/кВт·год – на 2,1%.

Годинна витрата вуглеводневих складових ВПЕ знижується:

- для ВПЕ з концентрацією води 5% з 36,3 кг/год до 35,6 кг/год – на 1,9%;
- для ВПЕ з концентрацією води 10% з 36,3 кг/год до 34,3 кг/год – на 5,5%;
- для ВПЕ з концентрацією води 20% з 36,3 кг/год до 21,2 кг/год – на 14,0%.

Під час роботи двигуна КамАЗ-740 на ВПЕ з різною концентрацією води димність відпрацьованих газів знижується у 5–6 разів, концентрація оксидів вуглецю – на 20–25 %, а концентрація оксидів азоту – до 70% [4].

Мета, завдання та методика досліджень

У літературі не наводяться дані про ТШВ тих автомобілів, на яких встановлюється двигун КамАЗ-740 (наприклад, КамАЗ-5320 [3]) під час роботи його на ВПЕ. Тому мета цього дослідження є моделювання ТШВ автомобіля КамАЗ-5320 з використанням ВПЕ в якості палива для його двигуна.

Завдання дослідження – встановити методом моделювання величини основних показників ТШВ автомобіля КамАЗ-5320 під час роботи його двигуна на ВПЕ та порівняти отримані дані з показниками ТШВ цього ж автомобіля на дизельному пальному.

Об'єктом дослідження стали ТШВ автомобіля КамАЗ-5320.

Вказані дослідження проведено на вітчизняних матеріалах та даних окремих зарубіжних країн [4,8, інші].

Дослідження виконано методом моделювання на персональному комп'ютері показників ТШВ автомобіля КамАЗ-5320 зі штатним дизелем КамАЗ-740, а також під час роботи цього двигуна на ВПЕ.

Результати досліджень

Показники ТШВ переобладнаного автомобіля або того, який працює на альтернативному паливі (окрім середньої швидкості), можна визначити шляхом розв'язку диференціального рівняння руху автомобіля, яке записується у вигляді [1, 6, інші]:

$$\frac{dV}{dt} \cdot M_a \cdot \delta_{об} = P_{кол}(V) - P_{он}(V, V^2) \pm G_a \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

де M_a – повна маса автомобіля, кг; $\delta_{об}$ – коефіцієнт, який враховує обертові маси автомобіля; $P_{кол}(V)$ – повна колова сила на ведучих колесах автомобіля, Н; $P_{он}(V, V^2)$ – сума сил опору руху автомобіля, які залежать від швидкості його руху, Н; $G_a \cdot \sin \alpha$ – сила опору підйому, Н; G_a – сила тяжіння від повної маси автомобіля, Н; α – кут поздовжнього нахилу полотна дороги; V – швидкість руху автомобіля, м/с; dV/dt – прискорення автомобіля, м/с².

Після визначення окремих складових рівняння (1), як правило, набуває вигляду

$$\frac{dV}{dt} \cdot M_a \cdot \delta_{об} = a_i \cdot V^2 + b_i \cdot V + c_i, \quad (2)$$

де коефіцієнти a_i , b_i , c_i визначаються параметрами конструкції автомобіля, його двигуна і передаточних відношень трансмісії.

У розрахунках показників ТШВ автомобіля найбільш традиційним та достатньо точним є використання залежності крутного моменту від кутової частоти обертання колінчастого вала двигуна $M_k = f(\omega)$ у вигляді

$$M_k = a \cdot \omega^2 + b \cdot \omega + c, \quad (3)$$

де a , b , c – сталі коефіцієнти, що визначаються за допомогою інтерполяційної формули Лагранжа:

$$a = \frac{M_{к.мин}}{A_{11}} + \frac{M_{к.мак}}{A_{12}} + \frac{M_{к.N}}{A_{13}},$$
$$b = \left[\frac{(\omega_N + \omega_M) \cdot M_{к.мин}}{A_{11}} + \frac{(\omega_N + \omega_{мин}) \cdot M_{к.мак}}{A_{12}} + \frac{(\omega_{мин} + \omega_M) \cdot M_{к.N}}{A_{13}} \right],$$

$$c = \left(M_{\kappa, \min} \cdot \frac{\omega_M \cdot \omega_N}{A_{11}} + M_{\kappa, \max} \cdot \frac{\omega_N \cdot \omega_{\min}}{A_{12}} + M_{\kappa, N} \cdot \frac{\omega_{\min} \cdot \omega_M}{A_{13}} \right),$$

$$\text{де } A_{11} = \omega_{\min}^2 - \omega_{\min}(\omega_N + \omega_M) + \omega_N \cdot \omega_M; \quad A_{12} = \omega_M^2 + \omega_M(\omega_N + \omega_{\min}) + \omega_N \cdot \omega_{\min};$$

$$A_{13} = \omega_N^2 + \omega_N(\omega_M + \omega_{\min}) + \omega_M \cdot \omega_{\min};$$

ω_{\min} , $M_{\kappa, \min}$ – мінімальна стійка кутова швидкість колінчастого вала двигуна, рад/с, та крутний момент, Н·м, при цій кутовій швидкості;

$M_{\kappa, \max}$, ω_M – максимальний крутний момент двигуна, Н·м, та кутова швидкість колінчастого вала двигуна, рад/с, що йому відповідає;

$M_{\kappa, N}$, ω_N – крутний момент, Н·м, та кутова швидкість колінчастого вала двигуна, рад/с, що відповідають його максимальній потужності

$$\omega_{\min} = (0,3 \dots 0,4) \omega_N.$$

З урахуванням залежностей $M_{\kappa} = f(\omega)$ та $V = F(\omega)$ колову силу на ведучих колесах автомобіля традиційно записують [6]

$$P_{\text{кол},i} = A_i \cdot V^2 + B_i \cdot V + C_i, \quad (4)$$

$$\text{де } A_i = a \cdot \frac{U_i^3 \cdot \eta_m}{r_{\partial} r_{\kappa}^2}, \quad B_i = b \cdot \frac{U_i^2 \cdot \eta_m}{r_{\partial} \cdot r_{\kappa}}, \quad C_i = c \cdot \frac{U_i \cdot \eta_m}{r_{\partial}}, \quad (5)$$

де U_i – загальне передаточне число трансмісії автомобіля на i -ій передачі; η_m – коефіцієнт корисної дії трансмісії; r_{∂} та r_{κ} – динамічний радіус та радіус кочення колеса, м.

Після визначення колової сили на ведучих колесах диференціальне рівняння руху автомобіля записують у вигляді

$$\frac{dV}{dt} \cdot M_a \cdot \delta_{\text{об}} = A_i \cdot V^2 + B_i \cdot V + C_i - P_{\text{он}}(V, V^2) \pm G_a \cdot \sin \alpha \quad (6)$$

Рівняння (6) дозволяє визначити всі показники ТШВ (окрім середньої швидкості), як тих, які нормовані державними стандартами, так і тих, які рекомендовані різними дослідниками [1,5, інші].

Відповідно до нормативних документів, показники ТШВ визначають на прямолінійних ділянках дороги. Характеристики розгону визначають на горизонтальних ділянках дороги ($\alpha = 0$). Тому, якщо позначити:

$$a_i = A_i - K_w F, \quad b_i = B_i - K_f M_a \cdot g, \quad c_i = C_i - f_0 \cdot M_a \cdot g,$$

де K_w – коефіцієнт обтічності, Н·с²/м⁴; F – площа проекції автомобіля на площину, перпендикулярну його поздовжній осі, м²; K_f – коефіцієнт, який враховує змінювання опору коченню залежно від швидкості; f_0 – коефіцієнт опору коченню при швидкостях, близьких до нуля, то диференціальне рівняння руху записують у вигляді формули (2). Після розділу змінних та інтегрування правої і лівої частин рівняння (2) одержують вирази для розрахунку часу розгону автомобіля в діапазоні від початкової швидкості V_n до кінцевої V_{κ} [6]

$$\tau = M_a \cdot \delta_{об} \cdot \int_{V_n}^{V_k} \frac{dV}{a_i \cdot V^2 + b_i \cdot V + c_i} \quad (7)$$

Даний інтеграл є табличним і вирішується в залежності від знаку дискримінанта Δ . При $\Delta = b_i^2 - 4 \cdot a_i \cdot c_i < 0$,

$$\tau = \frac{2 \cdot M_a \cdot \delta_{об}}{\sqrt{-\Delta}} \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot a_i \cdot V + b_i}{\sqrt{-\Delta}} \Big|_{V_n}^{V_k} \quad (8)$$

При $\Delta > 0$ в літературі [6, інші] згадують два інші варіанти розв'язку:

$$\tau = \frac{M_a \cdot \delta_{об}}{\sqrt{\Delta}} \cdot \ln \left| \frac{2 \cdot a_i \cdot V + b_i - \sqrt{\Delta}}{2 \cdot a_i \cdot V + b_i + \sqrt{\Delta}} \right| \Big|_{V_n}^{V_k} \quad (9)$$

або

$$\tau = \frac{M_a \cdot \delta_{об}}{a_i(p-q)} \cdot \ln \left| \frac{V-p}{V-q} \right| \Big|_{V_n}^{V_k}, \quad (10)$$

де p та q – корені рівняння $a_i \cdot V^2 + b_i \cdot V + c_i = 0$.

Шлях розгону визначали, як рекомендовано в літературі [6, інші]:

$$S = \frac{1}{2a_i} \left\{ M_a \cdot \delta_{об} \cdot \ln \left| a_i \cdot V^2 + b_i \cdot V + c_i \right| \Big|_{V_n}^{V_k} - b_i \cdot \tau \right\} \quad (11)$$

Максимальне прискорення у процесі розгону автомобіля на заданій передачі для прийнятих даних визначали, як [6, інші]

$$j_{\max} = \frac{1}{M_a \cdot \delta_{об}} \cdot \left(c_i - \frac{b_i^2}{4 \cdot a_i} \right) \quad (12)$$

Сила тяги автомобіля визначається в заданих дорожніх умовах і при $dV/dt = 0$ [6]. Тому диференціальне рівняння руху набуває вигляду

$$a_i \cdot V^2 + b_i \cdot V + c_i + P_z = 0 \quad (13)$$

Максимальну силу тяги автомобіля визначали відповідно до швидкості

$$V = - \frac{B_i - K_f \cdot M_a \cdot g}{2 \cdot (A_i - K_w \cdot F)} \quad (14)$$

і в цьому випадку вона визначалась

$$P_{\max} = C_i - f_0 \cdot M_a \cdot g - \frac{(B_i - K_f \cdot M_a \cdot g)^2}{4 \cdot (A_i - K_w \cdot F)} \quad (15)$$

Максимальну швидкість визначили шляхом розв'язку рівняння балансу потужності автомобіля, яке записується у вигляді [1, інші]

$$V_{\max}^3 K_w F + V_{\max}^2 K_f \cdot G_a + V_{\max} f_0 G_a - 1000 N_e \eta_m = 0, \quad (16)$$

де N_e – ефективна потужність двигуна, кВт.

Всі наведені показники ТШВ автомобіля КамАЗ-5320 під час роботи на ВПЕ визначено шляхом інтегрування диференційного рівняння руху автомобіля, яке записано формулою (2). При цьому, окрім вищезгаданих параметрів, у розрахунках прийнято такі дані технічної характеристики автомобіля КамАЗ-5320 [3]: K_w – коефіцієнт обтічності, $K_w = 0,65 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$; F – площа проекції автомобіля на площину, перпендикулярну його поздовжній осі, $F = 5,1 \text{ м}^2$; f_0 – коефіцієнт опору коченню при швидкостях, близьких до нуля $f_0 = 0,02$ (отримані дані для автомобіля КамАЗ-5320 у табл. 1).

Таблиця 1. Показники тягово-швидкісних властивостей автомобіля КамАЗ-5320 при роботі на різних видах палива

Вид палива	Максимальна швидкість, м/с	Максимальна сила тяги, Н	Максимальне прискорення, м/с ²	Шлях вибігу з 50 км/год, м	Час розгону до 60 км/год, с
Дизельне паливо	22,2	49594	0,798	740	42
ВПЕ з концентрацією води 5%	21,8	48874	0,707	797	44
ВПЕ з концентрацією води 10%	21,3	46718	0,603	884	47
ВПЕ з концентрацією води 20%	20,9	46012	0,587	997	51

Аналіз табл. 1 показує, що суттєво показники ТШВ знижуються у випадку, якщо ВПЕ має концентрацією води більше 5%. На рис. 1 показано, у порівнянні, час розгону автомобіля КамАЗ-5320 на різних видах палива.

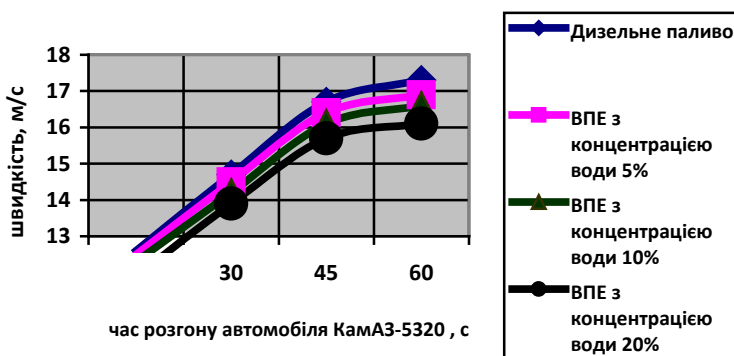


Рис. 1. Порівняння часу розгону автомобіля КамАЗ-5320 на різних видах палива

Попередньо порівняно отримані дані з продуктивності автомобіля КамАЗ-5320 під час роботи на ВПЕ з показниками продуктивності цього ж автомобіля на дизельному пальному (табл. 2) за допомогою моделі:

$$\begin{cases} z = p_1 \cdot x_1 + \dots + p_n \cdot x_n \\ x_1 + \dots + x_n \leq F \\ a_{11} \cdot x_1 + \dots + a_{1n} \cdot x_n \leq R_{a1} \\ a_{k1} \cdot x_1 + \dots + a_{kn} \cdot x_n \leq R_{ak} \\ 0 \leq x_1 \leq c_1 \cdot F \\ 0 \leq x_n \leq c_n \cdot F \end{cases}, \quad (17)$$

де z – цільова функція, яка визначає основний критерій оптимальності – максимізацію продуктивності автомобіля; p_1, \dots, p_n – продуктивність автомобіля на різному пальному; F – фонд часу експлуатації визначеної множини автомобілів; x_1, \dots, x_n – частина фонду часу F ; c_1, \dots, c_n – граничні обмеження часу експлуатації автомобіля на різному пальному; R_{a1}, \dots, R_{ak} – загальний енергетичний ресурс різних видів енергоджерел;

$\begin{pmatrix} a_{11}, \dots, a_{1n} \\ a_{k1}, \dots, a_{kn} \end{pmatrix}$ – загальна енергоємність різних видів палива, затрат праці і експлуатації.

Аналіз табл. 2 показує, що теоретично визначена середня продуктивність автомобіля КамАЗ-5320 при роботі на ВПЕ з концентрацією води 20% лише на 5% менша, аніж теоретична середня продуктивність роботи цього ж автомобіля на дизельному пальному. Але є необхідність у подальшому експериментальному підтверженні адекватності теоретичного моделювання.

Таблиця 2. Продуктивність автомобіля КамАЗ-5320 під час роботи на різних видах палива

Вид палива	Енерго-еквівалент палива, МДж	Енерго-затрати експлуатації, МДж	Середня продуктивність, т/год.
ВПЕ з концентрацією води 20%	1087,4	8,3	8,9
Дизельне пальне	966,7	7,9	9,4

Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Показники ТШВ автомобіля, який працює на ВПЕ, можна визначити шляхом розв'язку диференціального рівняння руху автомобіля.

2. Показники ТШВ автомобіля КамАЗ-5320 під час його роботи на ВПЕ суттєво знижуються, якщо ВПЕ має концентрацію води більше 5%.

3. У випадку, коли у якості палива для двигуна КамАЗ-740 використати ВПЕ з концентрацією води 20%, то зменшаться: максимальна швидкість автомобіля КамАЗ-5320 – на 7% та максимальна сила тяги цього ж автомобіля на 8%, а також збільшаться: шлях вибігу з 50 км/год на – 26% та час розгону до 60 км/год на 18%.

4. Є необхідність у подальшому експериментальному підтвердженні адекватності теоретичного моделювання.

Література

1. Ємець Б. В. Покращення показників техніко-експлуатаційних властивостей транспортних засобів з газогенераторними установками : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.02 / Б. В. Ємець. – К., 2008. – 20 с.

2. Иванов А. С. Водотопливная эмульсия для двигателей внутреннего сгорания / А. С. Иванов // Вестн. Московского гос. агроинж. ун-та им. В. П. Горячкина. – 2009. – № 4. – С. 66–67.

3. Медведков В. И. Автомобили КамАЗ-5320 и Урал-4320 / В. И. Медведков. – М. : ДОСААФ, 1981. – 334 с.

4. Морозов Л. С. Технический акт по определению топливно-мощностных и экологических характеристик двигателя КамАЗ-740 с применением водотопливной эмульсии в качестве топлива / Л. С. Морозов. – Санкт-Петербург, 1998. – 12 с.

5. Парсаданов И. В. Применение водотопливной эмульсии в автотракторном дизеле. Экологическая эффективность / И. В. Парсаданов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – № 2. – С. 118–121.

6. Автомобілі: тягово-швидкісні властивості та паливна економічність : навч. посібник / В. П. Сахно, Г. Б. Безбородова, М. М. Маяк, С. М. Шарай. – К. : Арістей, 2003. – 200 с.

7. Столярчук Л. В. Влияние способа подачи воды в цилиндр на экономичность и экологические показатели дизельного двигателя / Л. В. Столярчук, Е. Г. Черновец, А. Ю. Асанов // Двигателестроение. – 2008. – № 4. – С. 52–55.

8. Ceccarelli U. Metti l'emulsistem nel tuo motor / U. Ceccarelli // Tecnol. Serv. Pubbl. – 1987. – № 5. – P. 52–54, P. 58–59.