

УДК 629.017



І. К. Шаша



А. І. Нікорчук



А. Л. Таранов

## МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАЛЬНИМ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ НАЦІОНАЛЬНОЇ ГВАРДІЇ УКРАЇНИ (НА ПРИКЛАДІ АВТОМОБІЛЯ КрАЗ-6322)

Автори пропонують розглянути математичне моделювання як спрощену форму подання реальних процесів і взаємозв'язків у системі, що дозволяє вивчити, оцінити і прогнозувати вплив складових елементів (факторів) на поведінку системи в цілому (сукупність взаємопов'язаних елементів). Точність математичної моделі процесу слід підвищувати, головним чином, на важливих операціях, важливість їх слід виражати через економічні і технічні показники. Пропонується порядок розробки математичної моделі.

*К л ю ч о в і с л о в а:* математична модель, пальне, забезпечення, умови експлуатації, двигун, швидкість руху, автомобіль, алгоритм.

**Постановка проблеми.** Відомо, що математична модель – це наближений опис довільного класу явищ зовнішнього світу, поданий за допомогою математичної символіки. Наразі математичне моделювання виступає як метод прогнозування витрати пального залежно від умов експлуатації автомобіля. Аналіз математичних моделей дозволяє проникнути в сутність досліджуваних явищ.

Автотранспорт споживає близько 30 % світлих нафтопродуктів. Постійно зростає ціна пального й масел, збільшується частка цієї статті витрат у собівартості перевезень. Тому завдання економії пального виходить на третє місце в роботі автомобілістів після безпеки руху і екологічної безпеки. Витрата пального залежить від багатьох факторів, що характеризують режими роботи двигуна й умови експлуатації автомобіля. В основі математичної моделі витрати пального мають бути достатньо точне рівняння, що враховує різноманіття умов експлуатації автобронетанкової техніки Національної гвардії України і впливає з теорії автомобіля, а також алгоритм його рішення, що дозволяє здійснити імітаційне моделювання.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Економічну характеристику автомобіля, запропоновану академіком Є. О. Чудаковим ще в сорокові роки минулого століття [1], доречно вважати першою спробою створення математичної моделі оцінювання економічних якостей автомобіля, проте, для експлуатаційних цілей вона не придатна, тому що не враховує змінні навантаження двигуна, дорожні умови та інші важливі чинники.

У праці [2] пропонується витрату пального брати прямо пропорційною навантаженню двигуна в інтервалах 0–25; 25–50; 50–75; 75–90 та 90–100 %.

Також пропонувалася така лінійна залежність витрати пального за годину від навантаження двигуна [3]:

$$Q = a + bN_e \text{ л/год,} \quad (1)$$

де  $N_e$  – потужність двигуна, кВт;  $a$  і  $b$  – сталі числа, що беруть для доріг першої категорії рівними  $0,35N_{\max}$  та  $0,25-0,27$  відповідно.

У праці [4] також пропонувалася лінійна залежність. Вважалося, що для потужності двигуна до 50–60 % між витратою пального і відсотком використання потужності двигуна існує лінійна залежність. У цій праці також була запропонована залежність для визначення витрати пального на холостому ходу:

$$q_{x,x} = \frac{1000}{V} [Q_0 + C(V_1 - V_{\min})] \text{ г/км,} \quad (2)$$

де  $C$  і  $Q_0$  – коефіцієнти, що визначаються за даними витрат пального за годину на холостому ході.

У праці [5] вважається, що витрата пального у разі середніх і підвищених навантажень змінюється залежно від потужності на сталих обертах колінчастого вала двигуна за законом, близьким до лінійного. В остаточному вигляді рівняння витрати пального має такий вигляд:

$$Q = \frac{(a + cn + bN_e) \cdot 100}{V_a} \text{ кг/100 км,} \quad (3)$$

де  $a$ ,  $b$  та  $c$  – коефіцієнти, що визначаються експериментальним шляхом для кожного двигуна.

Аналіз рівняння показує, що в області малих швидкостей руху має місце значна неточність. Витрата пального набагато більше величини, отриманої в ході експериментальних досліджень.

У праці [6] пропонується розраховувати витрату пального за рівнянням

$$Q = \frac{q_e (G_a \psi + 0,077kFV_a^2)}{0,36 \cdot 10^5 \cdot \eta_{тр} \cdot \rho} \text{ л/100 км,} \quad (4)$$

де  $q_e$  – питома витрата пального, г/кВт·год;  $G_a$  – розрахункова маса автомобіля, кг;  $\psi$  – коефіцієнт дорожнього опору (0,026);  $k$  – коефіцієнт опору повітря, Нс<sup>2</sup>·м<sup>-4</sup>;  $F$  – лобова площа автомобіля, м<sup>2</sup>;

$V_a$  – швидкість автомобіля (60 % від максимальної швидкості), км/год;  $\eta_{тр}$  – коефіцієнт корисної дії трансмісії (0,875 для автомобіля з одним ведучим мостом і 0,825 – з двома ведучими мостами);  $\rho$  – густина пального (0,74 для бензину і 0,825 для дизельного пального).

Наведене рівняння не враховує зміни коефіцієнтів корисної дії двигуна, передавальних чисел коробки передач і головної передачі, радіуса колеса, а також теплоту згоряння пального та інших важливих експлуатаційних параметрів автомобіля.

Із зарубіжної літератури відомі математичні моделі різної складності для визначення витрати пального автомобілем. Найбільш складні моделі слугують для визначення миттєвої витрати пального і включають опис її зміни для різних положень дросельної заслінки та інших операцій. Також існують математичні моделі, за допомогою яких визначається середня величина витрат пального для дорожнього циклу руху в міських умовах. Це новий європейський цикл руху NEDC (New Driving Cycle) і американський цикл руху FTP 75 (Federal Test Procedure). Ступінь складності моделі залежить від поставленого завдання.

Якщо ставиться завдання оптимізації конструкції автомобіля, то розробляється математична модель витрати пального, в якій враховуються такі параметри, як маса, втрати в трансмісії, опір коченню, аеродинамічний опір тощо.

Результати експериментів автомобіля Ford Focus показують достатньо хороше наближення до математичної моделі витрати пального

$$PT = -1,07 + \frac{130,3}{V_{\text{ср}}} + 0,041 \cdot M \cdot PKE \text{ г/км,} \quad (5)$$

де  $V_{\text{ср}}$  – середня швидкість руху, км/год;  $M$  – маса автомобіля, кг;  $PKE$  – сума збільшення кінетичної енергії при русі автомобіля з прискоренням, м/с<sup>2</sup>.

**Метою статті** є побудова математичної моделі витрати пального з урахуванням конструктивних параметрів двигуна і трансмісії автомобіля, термодинамічних процесів згоряння пального, різноманітних умов експлуатації автобронетанкової техніки НГУ.

**Виклад основного матеріалу.** Теоретичною основою розрахунково-аналітичного методу визначення витрати пального є аналітичні залежності, які встановлюються в результаті спільного розв'язування рівнянь руху автомобіля і паливної характеристики двигуна.

Автори пропонують розглянути математичне моделювання як спрощену форму подання реальних процесів і взаємозв'язків у системі, що дозволяє вивчити, оцінити і прогнозувати вплив складових елементів (факторів) на поведінку системи в цілому (сукупність взаємопов'язаних елементів). Точність математичної моделі процесу слід підвищувати, головним чином, на важливих операціях, важливість їх необхідно виражати через економічні і технічні показники. Спрощення математичної моделі можна досягти виключенням несуттєвих змінних, зміною природи змінних (прийняти якусь величину безперервно мінливою замість дискретної), заміною лінійними рівняннями нелінійних (лінеаризація рівнянь).

Пропонується такий порядок розробки математичної моделі. Формулювання завдання таким чином, щоб забезпечити однозначність її розуміння. Виявлення теорії процесів, фізико-хімічних законів процесу на основі теоретичних і експериментальних даних інших дослідників, а за відсутності таких даних – висунення робочої гіпотези з подальшою її перевіркою. На підставі фізико-хімічних законів або прийнятої робочої гіпотези складання одного рівняння або системи рівнянь, що зв'язують параметри з фактами в найбільш простій і зрозумілій формі, визначення способу розв'язання прийнятих математичних рівнянь, способів визначення параметрів рівняння. Перевірка відповідності взятої моделі фактичному процесу за наявності фактичних даних і порівняння їх з розрахунковими за допомогою математичної моделі.

В основі математичної моделі витрати пального має бути достатньо точне рівняння, що враховує різноманіття умов експлуатації автомобілів і впливає з теорії автомобіля, а також алгоритм його розв'язання, що дозволяє здійснювати імітаційне моделювання [7, 8].

У загальному вигляді витрата пального на маршруті довжиною  $l$  за час  $t$  визначається залежністю

$$Q = \int_0^t Q_v dt, \quad (6)$$

де  $Q_v$  – витрата пального за годину, кг/год.

Таку витрату пального можна виразити через середній індикаторний тиск  $P_i$  та індикаторний ККД двигуна  $\eta_i$ :

$$Q_v = \left( \frac{0,0795 \cdot V_h \cdot i_k \cdot i_o \cdot (P_n + P_e) \cdot l}{\eta_i \cdot H_n \cdot r_k \cdot t} \right) \text{ кг/год}, \quad (7)$$

де  $V_h$  – повний об'єм циліндрів двигуна, л;  $P_n$  – середній тиск механічних втрат у двигуні, КПа;  $P_e$  – середній ефективний тиск у двигуні, КПа;  $\eta_i$  – індикаторний ККД двигуна;  $H_n$  – нижча теплота згоряння пального, кДж/кг;  $l$  – загальний пробіг автомобіля, км;  $t$  – час руху автомобіля, год;  $i_k$  – середньозважена величина передавального числа коробки передач;  $i_o$  – передавальне число головної передачі;  $r_k$  – радіус кочення колеса, м.

Механічні втрати в двигуні можна виразити через величину ходу поршня і частоту обертання колінчастого вала за формулою

$$P_n = a + 0,033 \cdot b \cdot S_n \cdot n \text{ КПа}, \quad (8)$$

де  $a$  та  $b$  – сталі для даного двигуна коефіцієнти;  $S_n$  – хід поршня, м;  $n$  – частота обертання колінчастого вала,  $\text{хв}^{-1}$ .

Середній ефективний тиск визначається зусиллям, що втрачається в трансмісії і зусиллями, підведеними до коліс автомобіля.

Середній ефективний тиск можна визначити, порівнявши потужність двигуна з силовим балансом автомобіля:

$$\frac{V_h \cdot P_e \cdot n}{120} = \frac{(P_{mp} + P_k) \cdot V_a}{3,6 \cdot 10^3} \quad (9)$$

Виразивши частоту обертання колінчастого вала через швидкість, радіус кочення колеса, середньозважене передавальне число коробки передач і головної передачі, отримуємо формулу визначення середнього ефективного тиску

$$P_e = \frac{12,56 \cdot r_k (P_{tp} + P_k)}{(V_h \cdot i_k \cdot i_o)} = 12,56 \cdot r_k \times \left[ a_1 + b_1 \cdot V_a + (1 + c_1) \left( G_a \psi + 0,077 kF \cdot V_a^2 \pm 0,1 \cdot \beta \cdot G_a \cdot \dot{V}_a \right) \cdot V_h \cdot i_k \cdot i_o \right] \quad \text{Кпа, (10)}$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, який враховує масу деталей автомобіля, що обертаються;  $\dot{V}_a$  – прискорення автомобіля, м/с<sup>2</sup>.

Після відповідних перетворень отримуємо в остаточному вигляді математичну модель витрати пального для усталеного режиму руху:

$$Q = \frac{7,95 \cdot V_h \cdot i_k \cdot i_o}{\eta_i \cdot H_H \cdot \rho \cdot r_k} \left\{ a + \frac{0,087 \cdot b \cdot S_{п} \cdot i_k \cdot i_o \cdot V_a}{r_k} + 12,56 \frac{r_k}{V_h \cdot i_k \cdot i_o} \times \left[ a_1 + b_1 \cdot V_a + (1 + c_1) \left( G_a \psi + 0,077 kF \cdot V_a^2 \right) \right] \right\} \text{ л/100 км. (11)}$$

У загальному вигляді останню залежність можна записати так:

$$Q = \frac{1}{\eta_i} \left\{ A \cdot i_k + B \cdot i_k^2 + C \left[ a_1 + b_1 \cdot V_a + (1 + c_1) \left( G_a \cdot \psi + 0,077 kF \cdot V_a^2 \right) \right] \right\} \text{ л/100 км, (12)}$$

де  $A = \frac{7,95 \cdot a \cdot V_h \cdot i_o}{H_H \cdot \rho \cdot r_k}$ ;  $B = \frac{0,69 \cdot b \cdot V_h \cdot S_{п} \cdot i_o}{H_H \cdot \rho \cdot r_k^2}$ ;  $C = \frac{100}{H_H \cdot \rho}$ .

Для автомобіля КраЗ-6322 математична модель витрати пального матиме такий вигляд:

$$Q = \frac{1}{\eta_i} \left\{ 1,24 \cdot i_k + 0,038 \cdot i_k^2 \cdot V_a + 0,0044 \times \left[ 90 + 6,9 \cdot V_a + 1,12 \left( G_a \cdot \psi + 0,077 kF V_a^2 \right) \right] \right\} \text{ л/100 км. (13)}$$

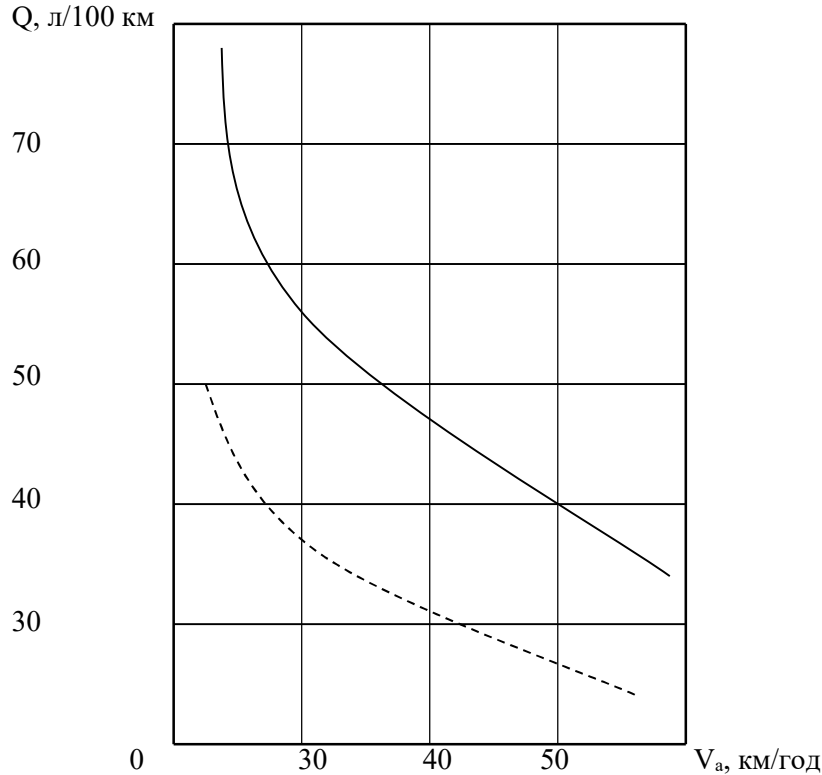
Після відповідних перетворень отримуємо математичну модель витрати пального, що складається з трьох частин. Перша не залежить від швидкості руху  $V_a$ , друга залежить від  $V_a$  в першому степені і третя залежить від  $V_a$  у другому степені:

$$Q = \frac{1}{\eta_i} (A_1 + A_2 V_a + A_3 A_a^2) \text{ л/100 км. (14)}$$

Для автомобіля КраЗ-6322

$$A_1 = 0,39 + 0,14 \cdot i_k + 0,0043 G_a \cdot \psi; \quad A_2 = 0,257 + 0,048 \cdot i_k^2; \quad A_3 = 0,8 \cdot 10^{-3}.$$

На рисунку представлені результати розрахунків за розробленою моделлю витрати пального для порожнього і навантаженого автомобілів. Значення середньої технічної швидкості руху автомобіля взяті для кожної групи доріг згідно з пропонованою для НГУ класифікацією умов експлуатації [9, 10].



Результати розрахунку витрати пального для порожнього (пунктирна лінія) і навантаженого (суцільна лінія) автомобілів залежно від середніх швидкостей руху

### Висновки

Аналіз математичної моделі витрати пального свідчить, що вона має низку переваг, оскільки враховує найважливіший експлуатаційний фактор – швидкість руху автомобіля. Отримане рівняння є оптимальним для розрахунку маршрутних норм витрати пального, а також для розрахунку норм витрати для різних груп доріг з урахуванням середньої технічної швидкості руху. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення нової методики нормування витрати пального для автобронетанкової техніки НГУ.

### Список використаних джерел

1. Чудаков, Е. А. Пути повышения экономичности автомобиля [Текст] / Е. А. Чудаков. – Москва : Изд-во АН СССР. Отд-ние техн. наук. – 1948. – № 12. – 94 с.
2. Козловский, П. И. Расчет скоростей движения автомобиля и расхода горючего [Текст] / П. И. Козловский. – Ленинград : Гострансиздат, 1939. – 136 с.
3. Клименко, Л. В. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст] / Л. В. Клименко, П. С. Тупицын ; под ред. М. Л. Клименко. – Москва : Наркомхоз, 1938. – 280 с.

4. Яковлев, Н. А. Теория автомобиля [Текст] / Н. А. Яковлев, Н. В. Диваков. – Москва : Высш. шк., 1962. – 424 с.
5. Рубец, Д. А. Смесеобразование в автомобильном двигателе при переменных режимах [Текст] / Д. А. Рубец. – Москва; Ленинград : Машгиз, 1948. – 254 с.
6. Токарев, А. А. Топливная экономичность и тягово-скоростные свойства автомобиля [Текст] / А. А. Токарев. – Москва : Машиностроение, 1982. – 222 с.
7. Говорущенко, Н. Я. Новая методика нормирования расхода топлива с учетом конкретных условий работы автомобилей [Текст] / Н. Я. Говорущенко, И. К. Шаша // Автомобильный транспорт : респ. межвед. науч.-техн. сб. – Киев : – 1987. – Вып. 24. – С. 14–19.
8. Шаша, И. К. Совершенствование действующей системы нормирования расхода топлива грузовых автомобилей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / И. К. Шаша. – Харьков, 1991. – 167 с.
9. Шаша, І. К. Удосконалення методики розрахунку впливу дорожніх умов на рівень безпеки дорожнього руху в Україні [Текст] / І. К. Шаша, Р. І. Топчій // Вісник Севастопольського національного технічного університету. – Севастополь : СНТУ, 2011. – Вип. 121. – С. 30–33. – (Серія “Машинобудування та транспорт”).
10. Топчій, Р. І. Шляхи удосконалення діючої системи оцінювання умов експлуатації транспорту сил охорони правопорядку [Текст] / Р. І. Топчій // Збірник наукових праць ХУПС. – Харків : ХУПС, 2011. – № 1 (27). – С. 247–251.

*Стаття надійшла до редакції 03.04.2019 р.*

**УДК 629.113**

**І. К. Шаша, А. І. Нікорчук, А. Л. Таранов**

**МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ТОПЛИВОМ АВТОБРОНЕТАНКОВОЙ ТЕХНИКИ НАЦИОНАЛЬНОЙ ГВАРДИИ  
УКРАИНЫ (НА ПРИМЕРЕ АВТОМОБИЛЯ КраЗ-6322)**

*Авторы предлагают рассмотреть математическое моделирование как упрощенную форму представления реальных процессов и взаимосвязей в системе, что позволяет изучать, оценить и прогнозировать влияние составляющих элементов (факторов) на поведение системы в целом (совокупность взаимосвязанных элементов). Точность математической модели процесса следует повышать, главным образом, на важных операциях, их важность следует выражать через экономические и технические показатели. Предлагается порядок разработки математической модели.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: математическая модель, топливо, обеспечение, условия эксплуатации, двигатель, скорость движения, автомобиль, алгоритм.*

**UDC 629.113**

**I. K. Shasha, A. I. Nikorchuk, A. L. Taranov**

**METHODOLOGY OF THE CONSTRUCTION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF  
SUPPLYING WITH THE FUEL OF ARMORED VEHICLES OF THE NATIONAL GUARD  
OF UKRAINE (by the example of KRAZ-6322)**

*The author proposes to consider mathematical modeling as a simplified form of the representation of real processes and interconnections in the system, which allows studying, evaluating and predicting the influence of the constituent elements (factors) on the behavior of the system as a whole (a set of interrelated elements). The accuracy of the mathematical model of the process should be increased mainly for important operations,*

*their importance should be expressed through economic and technical indicators. Simplification of the mathematical model can be achieved by excluding nonessential variables, changing the nature of variables (assuming some value is constantly variable instead of discrete), replacing nonlinear with linear equations (linearization of equations).*

*The author proposes the following procedure for developing a mathematical model: the formulation of the problem in such a way as to ensure the uniqueness of its understanding. Then the identification of the theory of processes, the physicochemical laws of the process based on the literature and experimental data of other researchers, and in the absence of such data, the nomination of a working hypothesis with its subsequent verification. On the basis of physicochemical laws or the accepted working hypothesis, the compilation of a single equation or system of equations relating parameters to facts in the simplest and clearest form, the determination of the method of solving the adopted mathematical equations, methods for determining the parameters of the equation. Then it checks the conformity of the adopted model to the actual process when there is evidence and comparing it with the calculated ones using a mathematical model.*

*The mathematical model of fuel consumption should be based on a fairly accurate equation that takes into account the variety of operating conditions for cars and arises from the theory of the car, as well as an algorithm for solving it, which allows for simulation modeling.*

*K e y w o r d s: mathematical model, fuel, supply, operating conditions, engine, speed, car, algorithm.*

**Шаша Ігор Костянтинович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України.  
<https://orcid.org/0000-0001-7549-3119>

**Нікорчук Андрій Іванович** – кандидат технічних наук, начальник кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України.  
<https://orcid.org/0000-0003-2683-9106>

**Таранов Антон Леонідович** – курсант Національної академії Національної гвардії України.  
<https://orcid.org/0000-0002-8732-6833>