

**Зуєв В.О.,
Кривошапов С.І.**
Харківський національний
автомобільно-дорожній університет
E-mail: tesa@khadi.kharkov.ua

ДІАГНОСТУВАННЯ ДВИГУНА ЗА ВИТРАТОЮ ПАЛИВА

УДК 629.014.1+ 62-614+ 62-144.3

Зуєв В.О., Кривошапов С.І. «Діагностування двигуна за витратою палива»

Проведено аналіз методів діагностування транспортних засобів в умовах експлуатації. Розглянуто переваги та недоліки стендових та дорожніх методів випробувань. Надано оцінку основних параметрів паливної економічності автомобілів за ГОСТ 20306-90. Обґрунтовано, що для експрес діагностування двигуна автомобілів немає необхідності використовувати дорогі стенди з біговими барабанами або обладнання для дорожніх випробувань, достатньо визначити витрату палива на режимі холостого ходу без навантаження. Для цього необхідно визначити норму витрати палива автомобіля, коли двигун працює на холостому ході, яка відсутня в нормативах. Проведено аналіз аналітичних методів розрахунку витрати палива. За основу було обрано методика проф. Говоруценко М.Я., яка дозволяє розраховувати витрату палива автомобіля на одиницю пробігу. В результаті деяких перетворень і прийнятих припущень була отримана формула розрахунку годинної витрати палива автомобіля, що працює на холостому ході без навантаження. Ця формула пов'язує конструктивні параметри двигуна, властивості палива і обороти колінчастого валу з витратою палива. Отримано графічні залежності зміни витрати палива від оборотів колінчастого валу двигуна на прикладі автомобіля Skoda Octavia. Для цього автомобіля отримана спрощена регресійна модель витрати палива у вигляді полінома третього ступеня. Таку модель зручно використовувати в програмному забезпеченні для портативного мікропроцесорного діагностичного обладнання, які мають суттєві обмеження за обсягом оперативної пам'яті і продуктивності процесора. У статті було отримано формулу для розрахунку індикаторного коефіцієнта корисної дії. Наведено приклад розрахунку індикаторного ККД для автомобіля Skoda Octavia. Отримано графічну залежність зміни індикаторного ККД від оборотів колінчастого валу двигуна на холостому ході без навантаження. Індикаторний ККД може також виступати в якості діагностичного параметра, який характеризує загальний технічний стан двигуна транспортного засобу. Діагностування автомобіля полягає в вимірі годинної витрати палива при різних обертах колінчастого валу двигуна і порівнянні результату з розрахунковими значеннями. Весь процес діагностування може бути реалізований мікропроцесорним портативним тестером, в програмному забезпеченні якого буде використана математична модель розрахунку витрати палива. За результатами досліджень були зроблені висновки та шляхи подальших досліджень.

Ключові слова: автомобіль, витрата палива, умови експлуатації, технічний стан, діагностування, навантажувально-швидкісний режим, коефіцієнт корисної дії.

Зуєв В.А., Кривошапов С.И. «Диагностика двигателя по расходу топлива»

Проведен анализ способов диагностирования транспортных средств в условиях эксплуатации. Рассмотрены достоинства и недостатки стендовых и дорожных методов испытаний. Оценены основные параметры топливной экономичности автомобилей по ГОСТ 20306-90. Обосновано, что для экспресс диагностирования двигателя автомобилей нет необходимости использовать дорогостоящие стенды с беговыми барабанами, или оборудования для дорожных испытаний, достаточно определить расход топлива на режиме холостого хода без нагрузки. Для этого необходимо установить норму расхода топлива автомобиля, когда двигатель работает на холостом ходе, которая отсутствует в нормативах. Проведен анализ аналитических методов расчета расхода топлива. За основу была выбрана методика проф. Говоруценко Н.Я., которая позволяет рассчитать расхода топлива автомобиля на единицу пробега. В результате некоторых преобразований и принятых допущений была получена формула расчета часового расхода топлива автомобиля, работающего на холостом ходу без нагрузки. Эта формула связывает конструктивные параметры двигателя, свойства топлива и обороты коленчатого вала с расходом топлива. Получены графические зависимости изменения расхода топлива от оборотов коленчатого вала двигателя на примере автомобиля Skoda Octavia. Для этого автомобиля получена упрощенная регрессионная модель расхода топлива в виде полинома третьей степени. Такую модель удобно использовать в программном обеспечении для портативного микропроцессорного диагностического оборудования, которые имеют существенные ограничения по объему оперативной памяти и производительности процессора. В статье была получена формула для расчета индикаторного коэффициента полезного действия. Приведен пример расчета индикаторного КПД для автомобиля Skoda Octavia. Получена графическая зависимость изменения индикаторного КПД от оборотов коленчатого вала двигателя на холостом ходе без нагрузки. Индикаторный КПД может также выступать в качестве диагностического параметра, который характеризует общее техническое состояние двигателя транспортного средства. Диагностирование автомобиля заключается в измерении часового расхода топлива при разных оборотах коленчатого вала двигателя и сравнении результата с расчетными значениями.

Весь процесс диагностирования может быть реализован микропроцессорным портативным тестером, в программном обеспечении которого будет использована математическая модель расчета расхода топлива. По результатам исследований были сделаны выводы и пути дальнейших исследований.

Ключевые слова: автомобиль, расход топлива, условия эксплуатации, техническое состояние, диагностирования, погрузочно-скоростной режим, коэффициент полезного действия.

V.A. Zuyev, S.I. Krivoshapov "**Fuel consumption diagnostics of the engine**"

An analysis was made of the methods for diagnosing vehicles under operational conditions. The advantages and disadvantages of bench and road test methods are considered. The main parameters of fuel economy of engine for cars are estimated according to GOST 20306-90. It is proved that for express diagnostics of a car engine there is no need to use expensive stands with running drums or equipment for road tests, it is enough to determine fuel consumption at idle without load. To do this, it is necessary to establish the fuel consumption rate of the car when the engine is idling, which is not in the standards. An analysis was made of analytical methods for calculating fuel consumption. In the work was used the methodology of prof. Govorushchenko N.Ya., which allows you to calculate the fuel consumption of a car but per unit mileage. As a result of some transformations and accepted assumptions, a formula was obtained for calculating the hourly fuel consumption of an automobile idling without load. This formula relates the design parameters of the engine, the properties of the fuel and the speed of the crankshaft to the fuel consumption. Graphic dependencies of fuel consumption change on engine crankshaft speed are obtained using the Skoda Octavia as an example. A simplified regression model of fuel consumption in the form of a polynomial of the third degree was obtained for this car. This model is convenient to use in software for portable microprocessor diagnostic equipment, which have significant limitations on the amount of RAM and processor performance. The article obtained a formula for calculating of the performance coefficient indicator. An example has been performed of calculating a performance indicator for a Skoda Octavia. Graphical dependence of the change in indicator efficiency on the engine speed at idle without load is obtained. The indicator efficiency can also act as a diagnostic parameter that characterizes the general technical condition of the vehicle engine. Diagnosing a car consists in measuring the hourly fuel consumption at different engine speeds and comparing the result with the calculated values. The entire diagnostic process can be implemented by a portable microprocessor tester, in the software of which a mathematical model will be used to calculate fuel consumption. Based on the results of the research, conclusions were drawn and ways for further research were outlined.

Keywords: car, fuel consumption, operating conditions, technical condition, diagnosis, loading and speed mode, efficiency.

Вступ

Контроль за ефективністю використання паливо-енергетичного ресурсу під час експлуатації дозволяє діагностувати технічний стан транспортних засобів, який постійно змінюється під впливом дорожніх, транспортних та атмосферно-кліматичних умов.

Проведення випробувань автомобілів на паливну економічність виконуються в дорожніх умовах на спеціально обладнаних ділянках або на стендах з біговими барабанами які імітують дорожні умови.

Проведення випробувань автомобілів на паливну економічність на дорозі з одного боку має одну істотну перевагу – реальні умови руху (взаємодія колеса з опорною поверхнею, дорожній та аеродинамічний опори, атмосферно-кліматичні умови). Але з іншого боку дорожні випробування небезпечні, тому що режими руху при випробуваннях не збігаються з рухом всього потоку автомобілів. Крім того від вимірювання до вимірювання дорожні умови можуть сильно змінюватись (стан дорожнього покриття, температура, тиск повітря, інтенсивність руху і т.п.).

Переваги стендових випробувань в тому, що вони забезпечують стабільність умов і режимів незалежно від погоди, пори року і доби, стану дорожнього покриття. Випробування проводяться на спеціальному стенді, оснащеному високоточними вимірювальними приладами і пристроями, що дозволяють оцінювати не тільки інтегральні показники, а також диференціювати їх по різних системах автомобіля, що перевіряються. На стенді можна також зімітувати екстремальні навантажувально-швидкісні режими роботи автомобіля, без втрати стійкості руху, тобто без ризику для людей.

Актуальність проблеми

Не варто за будь якої підозри піддавати автомобіль повному обстеженню складним діагностичним обладнанням, наприклад перевірку на стенді з біговими барабанами або дорожнім випробуванням.

Спочатку потрібен якийсь досить простий але інформативний спосіб виявлення недоліків, за яким можна стверджувати: автомобіль справний, чи – ні та необхідні додаткові випробування. Тому розглянемо деякі показники перевірки на паливну економічність за ГОСТ 20306-90 [1].

З точки зору діагностування за цим ГОСТом представляють інтерес за наступними показниками: 1.1 – контрольна витрата палива, 1.4 – витрата палива в міському циклі на стенді, 1.5 – паливна характеристика усталеного руху.

Показник 1.4 відображає роботу автомобіля на динамічних режимах. А показник 1.5 дає уявлення про витрату палива при роботі систем автомобіля (зокрема двигуна та трансмісії) в сталому русі, тобто про їх технічний стан.

Визначення цього показника не викликає ні яких ускладнень зі створенням режимів перевірки а ні в дорожніх умовах, ні в стендових. Але потрібно виїжджати на дорогу, або встановлювати його на стенд.

Простіше на наш погляд визначити витрату палива на режимі холостого ходу (Х.Х.) двигуна при різній частоті обертання колінчастого валу. Цей показник дає уяву о процесі утворення паливо-повітряної суміші, газорозподілу, іскроутворенню та механічних втрат у самому двигуні.

Щоб користуватись цим показником, як діагностичним, треба знати норму з якою буде порівнюватись отримане значення.

Нажаль норми витрати палива на Х.Х. [2] у поширеній літературі немає, тому зробимо спробу розрахувати цю норму.

Аналіз останніх досліджень

Математичних методів розрахунку витрати палива чимало. Можна виділити принципово два підходи. Один підхід – це оцінити основні робочі параметри теплового стану двигуна на різних режимах, з якого отримують індикаторний ККД і витрату палива. Інший підхід – це визначити необхідну енергію, що містить паливо, для забезпечення заданого навантажувального і швидкісного режиму. У роботі прийнятий другий підхід.

Детальний аналіз математичних моделей розрахунку витрати палива транспортних засобів наведено в роботі [3]. Різниця полягає в підході щодо реалізації режиму навантаження і обліку втрати енергії.

Для поставленої нами задачі найбільш підходить модель розрахунку витрати палива проф. Говорущенко М.Я. [4, 5]. За допомогою цієї моделі можна розрахувати шляхову витрату палива автомобіля в л/100 км. Необхідно адаптувати цю математичну модель для розрахунку годинної витрати палива.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є адаптація математичної моделі для визначення годинної витрати палива, яку можна використовувати в вимірювальній процедурі діагностування загального технічного стану двигуна автомобіля.

Результати дослідження

Скористаємося виведенням формули витрати палива, яка представлено в роботі [5]. Однак остаточні перетворення представимо в іншому вигляді.

У загальному вигляді формула для витрати палива (в кг/год) має вигляд:

$$Q_I = g_e \cdot N_e = \frac{3600 \cdot V_h \cdot P_e \cdot n}{H_H \cdot \eta_e \cdot 120 \cdot 10^3} = \frac{0,03 \cdot V_h \cdot P_e \cdot n}{H_H \cdot \eta_e}, \quad (1)$$

де g_e – питома витрата палива, кг/(кВт·год.);
 N_e – ефективна потужність двигуна, кВт;
 P_e – середній ефективне тиск, кПа;
 H_H – нижча теплота згоряння палива, кДж/кг;
 η_e – ефективний ККД;
 V_h – робочий об'єм циліндрів двигуна, л;
 n – частота обертання колінчастого вала, хв⁻¹.

Виразимо ефективний ККД через механічний і індикаторний ККД і підставимо у формулу (1):

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m = \eta_i \cdot \frac{P_e}{(P_n + P_e)}, \quad (2)$$

$$Q_I = \frac{0,03 \cdot V_h \cdot P_e \cdot n \cdot (P_n + P_e)}{H_H \cdot \eta_i}, \quad (3)$$

де P_n – середній тиск механічних втрат двигуна, кПа;
 η_i – індикаторний ККД двигуна;
 η_m – механічний ККД двигуна.

Після цього розкладемо отриману залежність (3) на дві складових, одна з яких буде враховувати механічні втрати в двигуні, а друга – втрати при виконанні корисної роботи, Q_I , кг/год.:

$$Q_I = \frac{P_n \cdot 0,03 \cdot V_h \cdot n}{H_H \cdot \eta_i} + \frac{P_e \cdot 0,03 \cdot V_h \cdot n}{H_H \cdot \eta_i}. \quad (4)$$

Ліва частина являє собою частину палива витраченого на подолання внутрішніх механічних втрат в двигуні, а права – витрата палива на здійснення корисної роботи.

У тому випадку, коли автомобіль не виконує корисну роботу він стоїть на місці, тобто другий доданок прагне до 0.

Назвемо перший доданок витратою на холостому ході і позначимо Q_{xx} , а другий доданок витратою палива на ефективну роботу і позначимо Q_e .

Середній тиск механічних втрат на тертя в двигуні від швидкісного режиму може бути представлено залежністю в розгорнутому вигляді [4]:

$$p_{m.n.} = a + b \cdot C_n + d \cdot C_n^2 \quad (5)$$

Так як найбільшу частку механічних втрат становлять втрати на тертя, що залежать від першого ступеня швидкості поршня, то нерідко дослідниками залежність $p_{m.n.}=f(C_n)$ наближають до лінійної залежності [5], кПа:

$$p_{m.n.} = (a + b \cdot C_n), \quad (6)$$

або

$$p_{m.n.} = \left(a + b \cdot \frac{2 \cdot S_n \cdot n}{60} \right), \quad (7)$$

де a, b – постійні для даного двигуна коефіцієнти, кПа;
 S_n – хід поршня, м.

У літературі [5] наведено такі значення коефіцієнтів a і b для бензинового двигуна: $a = 45$ кПа, $b = 13$ кПа, в літературі [6, 7] ці значення даються від співвідношення ходу поршня до його діаметра, S/D (табл. 1).

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів a і b в залежності від співвідношення S/D [6]

Співвідношення S/D	a , МПа	b , МПа·с·м ⁻¹
>1	0,049	0,0152
<1	0,039	0,0132

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів a і b в залежності від співвідношення S/D [7]

Співвідношення S/D	a , МПа	b , МПа·с·м ⁻¹
>1	0,05	0,0155
<1	0,04	0,0135

Якщо підставити вираз (7) у формулу (4), в ліву частину і врахувати густину палива ρ_T отримаємо, Q_{xx} , л/год.:

$$Q_{xx} = \left(a + b \cdot \frac{2 \cdot S_n \cdot n}{60} \right) \cdot \frac{0,03 \cdot V_h \cdot n}{H_H \cdot \eta_i} = \frac{0,03 \cdot a \cdot V_h \cdot n}{H_H \cdot \eta_i \cdot \rho_m} + \frac{0,03 \cdot b \cdot V_h \cdot S_n \cdot n^2}{30 \cdot H_H \cdot \eta_i \cdot \rho_m}, \quad (8)$$

Якщо позначити коефіцієнтом A_{xx} величину рівну співвідношенню – $A_{xx} = \frac{0,03 \cdot a \cdot V_h}{H_H \cdot \rho_m}$, а коефіцієнтом $B_{xx} = \frac{b \cdot V_h \cdot S_n}{1000 \cdot H_H \cdot \rho_m}$, то отримаємо рівняння витрати палива на холостому ходу в літрах за годину:

$$Q_{xx} = \frac{A_{xx} \cdot n + B_{xx} \cdot n^2}{\eta_i}, \quad (9)$$

де A_{xx} , B_{xx} – постійні коефіцієнти для даного двигуна при розрахунку витрати палива на холостому ході.

От же отримано робочу формулу за якої можна розраховувати нормативні значення витрати палива автомобілем, але у формулі остається не визначеним індикаторний ККД двигуна.

Для його знаходження використаємо цю ж саму формулу вирішив його відносно η_i

$$\eta_i = \frac{A_{xx} \cdot n + B_{xx} \cdot n^2}{Q_{xx}}, \quad (10)$$

Далі потрібно знати витрату палива. Зазвичай у таких випадках діють наступним чином: обирають контрольну групу автомобілів (наприклад 5 од.), у справному стані, які пройшли період обкатки та випробують їх на витрату палива.

Ми не маємо такої можливості, тому скористалися даними які знайшли у звіті кафедри Технічної експлуатації та сервісу автомобілів ХНАДУ.

В таблиці 3. наведено витрату палива на холостому ходу для автомобіля Skoda Octavia отриманих в результаті експериментальних досліджень.

За даними таблиці 3 було побудовано графік. Як видно з рисунка 1 найбільш придатною є 3 ступінь апроксимації залежності зміни витрати палива від обертів двигуна Skoda Octavia:

$$Q_{xx} = 8,270075e-11x^3 - 806795e-07x^2 + 2,526567e-03x - 6,998274e-01. \quad (11)$$

Залежність часового витрати палива від оборотів колінчастого валу двигуна AGU 1.8 автомобіля Skoda Octavia на холостому ходу

Заданий режим роботи, хв ⁻¹	Дійсна частота обертання, хв ⁻¹	Часова витрата палива, л/год.
850	833	1,08
1000	923	1,33
2000	2011	2,69
3000	3025	3,89
4000	3886	5,41
5000	4999	7,75
5400	5364	9,03

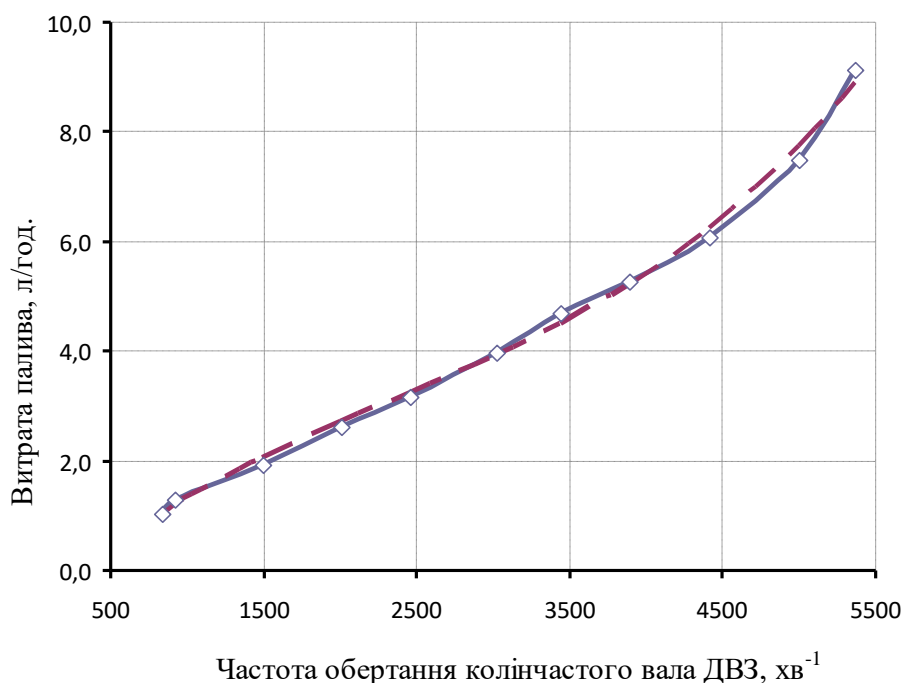


Рис. 1. Залежність витрати палива на холостому ході автомобіля Skoda Octavia від оборотів колінчастого валу ДВЗ: суцільна лінія – експериментальні дані; пунктирна лінія - апроксимація (11)

Як видно з рисунка 1 найбільш придатною є 3 ступінь апроксимації залежності зміни витрати палива від обертів двигуна Skoda Octavia:

$$Q_{xx} = 8,270075e-11x^3 - 806795e-07x^2 + 2,526567e-03x - 6,998274e-01. \quad (11)$$

Для Skoda Octavia коефіцієнти A_{xx} , B_{xx} становить:

$$A_{xx} = \frac{0,03 \cdot 45 \cdot 1,781}{44000 \cdot 0,76} = 7,19 \cdot 10^{-5};$$

$$B_{xx} = \frac{13 \cdot 1,781 \cdot 0,0864}{1000 \cdot 44000 \cdot 0,76} = 5,98 \cdot 10^{-8}$$

При відомих коефіцієнтах A_{xx} , B_{xx} можемо розрахувати індикаторний ККД двигуна наприклад на обертах 850 хв⁻¹ колінчастого валу.

$$\eta_i = \frac{7,19 \cdot 10^{-5} \cdot 850 + 5,98 \cdot 10^{-8} \cdot 850^2}{1,079} = 0,097$$

Залежність індикаторного ККД від оборотів колінчастого валу двигуна AGU 1.8 автомобіля Skoda Octavia на холостому ході

Оберти двигуна, хв^{-1}	Індикаторний ККД
850	0,09
1000	0,09
2000	0,14
3000	0,19
4000	0,24
5000	0,25
5400	0,24

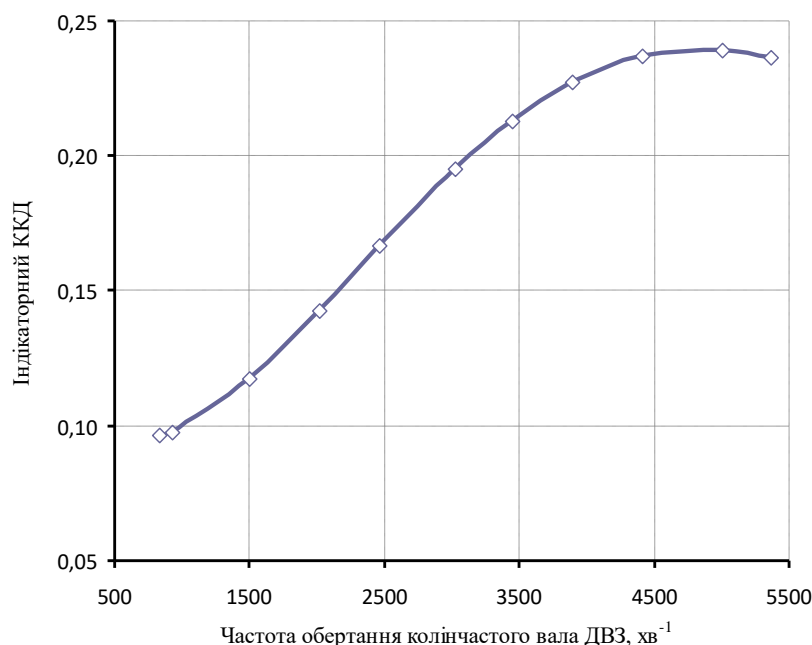


Рис. 2. Залежність індикаторного ККД двигуна AGU 1.8 автомобіля Skoda Octavia від оборотів колінчастого валу двигуна

Для здійснення процесу діагностування автомобіля необхідно провести вимірювання годинної витрати палива при різних оборотах колінчастого валу двигуна, а отримані результати порівняти з розрахунковими значеннями. Весь алгоритм діагностування може бути реалізований портативним тестером, який побудовано на базі мікропроцесора. На вхід контролера подається інформація з датчиків оборотів колінчастого валу і витрати палива. Вбудоване програмне забезпечення задає режим перевірки (частоту оборотів колінчастого валу та час вимірювання), обробляє інформацію з датчиків, розраховує з математичної моделі витрату палива, оцінює точність, порівнює розрахункові та змінені значення витрати палива, видає висновок на екран користувача. Значення вихідних даних для розрахунку витрати палива зберігаються у зовнішній пам'яті мікроконтролера, яку можна змінювати під конкретні марки автомобілів.

Висновки

Таким чином у роботі запропоновано зручний спосіб який не потребує багато часу та складного діагностичного обладнання. Він дозволяє у першому наближенні зробити висновки о роботі двигуна та визначити, в разі потреби, подальший напрямок пошуку недоліків. Але для його поширення потрібні експериментальні дослідження індикаторного ККД двигунів на холостому ході, та його припустимого зниження в процесі експлуатації.

Список використаних джерел

1. Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний: ГОСТ 20306-90. – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 34 с.
2. Про затвердження змін до Норм витрат палива і мастильних матеріалів на автомобільному транспорті [Електронний ресурс] : Наказ Міністерство Інфраструктури України № 36 від 24.01.2012 // Верховна Рада України - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0036733-12#n2>. – (Звернення: 01.10.2020 р.)
3. Маяк Н.М. Топливная экономичность автомобиля в сложных условиях движения / Н.М. Маяк. – Киев: Вища школа, 1990. – 215 с.
4. Говорущенко Н.Я. Системотехника транспорта (на примере автомобильного транспорта). / Н.Я. Говорущенко, А.Н. Туренко. - В двух частях. – Харьков: РИО ХГАДТУ, 1998. – Ч.1. – 219 с.
5. Говорущенко Н.Я. Системотехника автомобильного транспорта (расчетные методы исследований): монографія. – Харьков : ХНАДУ, 2011. – 292 с.
6. Двигатели внутреннего сгорания : учеб. для ВУЗов по спец. «Строительные и дорожные машины и оборудование» / [Хачиян А.С., Морозов К.А., Луканин В.Н. и др.] – М.: Высш. Школа., 1985. – 311 с.
7. Двигатели внутреннего сгорания. Том 1: Рабочие процессы в двигателя и их агрегатах / [Орлин А.С., Вырубов Д.Н., Калиш Г.Г и др.] – М: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1957. – 397 с.

References

1. Motor vehicles. Fuel efficiency. Test Methods: GOST 20306-90 [Avtotransportnye sredstva. Toplivnaja jekonomichnost'. Metody ispytanij : GOST 20306-90]. – Moscow: USSR State Committee on Product Quality and Standards Management, 1990. – 34 p.
2. About the statement of changes to Norms of expenses of fuel and lubricants on motor transport [Pro zatverdzhennja zmin do Norm vytrat palyva i mastyl'nyh materialiv na avtomobil'nomu transporti]. - Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0036733-12#n2>. – (Access: 01.10.2020 p.)
3. Majak N.M. Fuel economy in difficult driving conditions [Toplivnaja jekonomichnost' avtomobilja v slozhnyh uslovijah dvizhenija]. – Kiev: Higher School, 1990. - 215 p.
4. Govorushhenko N.Ja., Turenko A.N. System engineering of transport (on the example of automobile transport) [Sistemotehnika transporta (na primere avtomobil'nogo transporta)]. - Kharkov: KhGADTU, 1998. - 219 p.
5. Govorushhenko N.Ja. Automotive system engineering (design research methods) [Sistemotehnika avtomobil'nogo transporta (raschetnye metody issledovanij)] : monograph. - Kharkov: KhNADU, 2011. - 292 p.
6. Hachijan A.S., Morozov K.A., Lukanin V.N. Internal combustion engines: textbook. for universities for special. "Construction and road machinery and equipment" [Dvigateli vnutrennego sgoranija : ucheb. dlja VUZov po spec. «Stroitel'nye i dorozhnye mashiny i oborudovanie»]. – Kiev: Higher School, 1985. - 311 p.
7. Orlin A.S., Vyubov D.N., Kalish G.G. Internal combustion engines. Volume 1: Workflows in the engine and their components [Dvigateli vnutrennego sgoranija. Tom 1: Rabochie processy v dvigatelja i ih agregatah]. – Moscow: State scientific and technical publishing house of engineering literature, 1957. - 397 p.