

## АНАЛІЗ РОБОТИ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ НА ГАЗОВОМУ ПАЛИВІ В ГІРСЬКИХ УМОВАХ

Т.В. Дикун, Л.І. Гасва, В.М. Мельник, Б.В. Долішній, А.М. Януш

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727148;

e-mail: [trans@nung.edu.ua](mailto:trans@nung.edu.ua)

*Питання використання альтернативних видів палива на автомобільному транспорті в даний час досить актуальне. Особливо це стосується Карпатського регіону. Техніко-експлуатаційні показники двигунів у гірських умовах значною мірою залежить від густини повітря, яка змінюється з висотою над рівнем моря. Це особливо відбивається на роботі двигунів, що працюють на газовому пальному. Зміна параметрів навколишнього середовища призводить до зміни коефіцієнта наповнення, коефіцієнта залишкових газів та інших параметрів, що впливає на ефективну потужність, крутний момент і, звичайно, питому ефективну витрату палива і, в кінцевому результаті, на зниження техніко-економічних показників роботи автомобілів.*

*Пропонуються аналітичні дослідження основних техніко-експлуатаційних показників роботи двигуна ЗМЗ-5234.10 на газовому вуглеводородному паливі і бензині в умовах високогір'я та порівняльна оцінка аналогічних показників у звичайних умовах.*

*Зроблені висновки та аналіз отриманих результатів для подальших лабораторних та експлуатаційних досліджень.*

*Ключові слова: гірські умови, тиск, температура, дослідження, ефективна потужність, коефіцієнт залишкових газів, коефіцієнт наповнення, питома витрата палива, техніко-експлуатаційні показники, оцінка.*

*Вопрос использования альтернативных видов топлива на автомобильном транспорте в настоящее время весьма актуален. В том числе это относится к Карпатскому региону. Технико-эксплуатационные показатели двигателей в горных условиях в значительной степени зависят от плотности воздуха, которая изменяется в зависимости от высоты над уровнем моря. Это имеет большое значение при работе двигателей на газовом топливе. Изменение параметров окружающей среды приводит к изменению коэффициента наполнения, коэффициента остаточных газов и других параметров, влияет на эффективную мощность, крутящий момент и, конечно, на удельный эффективный расход топлива, и в итоге, на снижение технико-экономических показателей работы автомобилей.*

*Предлагаются аналитические исследования основных технико-эксплуатационных показателей работы двигателя ЗМЗ-5234.10 на газовом углеводородном топливе и бензине в условиях высокогорья и сравнительная оценка аналогичных показателей в обычных условиях работы двигателя. Сделаны выводы и анализ полученных результатов для дальнейших лабораторных и эксплуатационных исследований.*

*Ключевые слова: горные условия, давление, температура, исследования, коэффициент остаточных газов, коэффициент наполнения, эффективная мощность, удельный расход топлива, технико-эксплуатационные показатели, оценка.*

*The problem of utilization of alternative fuels in road transport is now very important. This is particularly specific for Carpathian region. The technical and operational engine characteristics under mountain conditions are largely dependent on the air density, which varies depending on the altitude. This is especially important when engines run on gas fuel. Changes in environmental parameters (temperature, density of fresh charge) lead to changes of the volumetric efficiency, coefficient of residual gases and other parameters that affect the effective power, torque and, of course, effective specific fuel consumption and, ultimately, reduction of technical and economic indices of automobile operation.*

*In the paper there are analytical studies of basic technical and operational characteristics of the engine WMD-5234.10 operation on gas hydrocarbon fuel and gasoline under high-mountain conditions and comparative evaluation of similar indices under normal conditions. Conclusions and analysis of the obtained results for further laboratory and operational studies have been made.*

*Keywords: mountain conditions, pressure, temperature, study, effective power, coefficient of residual gases, volumetric efficiency, specific fuel consumption, technical and operational indices, evaluation.*

**Вступ.** Питанню дослідження впливу гірських умов на показники роботи автомобільних двигунів в Україні та світі приділяється дуже мало уваги, а дослідження їх експлуатації у даних умовах на газовому паливі майже не проводилося.

Експлуатація автомобілів на гірських долинах Карпатського регіону на висоті 1000–3000 м над рівнем моря з підйомами і спусками до 12%, протяжністю ділянок до 15–20 км є складною.

З підвищення місцевості над рівнем моря атмосферний тиск, густини повітря і темпера-

тура повітря знижується, що погіршує наповнення циліндрів автомобіля. Випробування довели, що на висоті 3000 м компресія (тиск) в циліндрах карбюраторного двигуна знижується з 686466 кПа до 441299 Па, а його потужність зменшується на 40%. У зв'язку із зниженням густини повітря горюча суміш перебагачується, при її згорянні утворюється велика кількість нагару, олива в двигуні розріджується незгорілим паливом.

Внаслідок розрідження повітря і малих швидкостей руху на крутих підйомах інтенсивність охолодження двигуна знижується. Одно-

часно робота двигунів на Perezбагаченій суміші і рух здебільшого на нижчих передачах призводить до перегрівання двигунів.

Слід також зазначити, що при порушенні герметичності системи охолодження внаслідок розрідження гірського повітря, вода в системі охолодження закипає за температури 85–90 °С. При роботі в гірських умовах також спостерігається значне нагрівання оливи внаслідок чого погіршуються її властивості.

Нагароутворення на свічках і систематична робота на повних навантаженнях пришвидшує зношення електродів свічок. Посилюється процес випаровування електроліту акумуляторної батареї, густина електроліту збільшується, а рівень знижується. Усе це скорочує термін служби батареї.

Тривалий рух автомобілів на понижених передачах створює підвищені навантаження на механізми силової передачі і викликає їх перегрівання. Часті переключення передач пришвидшують зношування деталей елементів трансмісії.

Гальмування двигуном, що часто застосовується під час руху гірськими дорогами призводить до передчасного зношування КШМ та ГРМ двигуна внаслідок засмокування пального в циліндри і змивання оливи.

Аналіз сучасних закордонних та вітчизняних досліджень. Згідно з даними, наведеними у [5], існує така залежність між зміною атмосферного тиску та температури із висотою над рівнем моря (табл. 1).

**Таблиця 1 – Основні показники довкілля залежно від висоти над рівнем моря**

Поз.	Висота, м	Атмосферний тиск, кПа	Температура, °С
1	0	101,3	20
2	1000	89,9	13,5
3	2000	79,5	7
4	3000	70,1	0,5

Дослідити вплив окремих параметрів навколишнього середовища (атмосферний тиск, температура навколишнього середовища, вологість повітря та ін.) у гірських районах на роботу двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), основні динамічні, техніко-експлуатаційні та екологічні показники важко. Всі ці параметри впливають на роботу ДВЗ по-різному, а тому виникає необхідність провести аналітичні розрахунки з метою виявлення величини цього впливу та напрямку зміни основних динамічних, техніко-експлуатаційних та екологічних показників роботи автомобілів у гірських умовах на газовому паливі.

За даними табл. 1 проведено аналітичні розрахунки впливу атмосферного тиску (рис. 1, 4, 6, 8) та температури довкілля (рис. 2, 5, 7, 8) на основні техніко-експлуатаційні показники роботи двигуна ЗМЗ-5234.10 на бензині та рідкому газовому паливі. Під час виконання розрахунків використано програмний ком-

плекс для розрахунку та оптимізації ДВЗ “Дизель-РК” [6].

Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми. Найбільш популярним заміником рідких моторних палив є природний газ. Це пов’язано з тими перевагами, які він має в порівнянні з одержаними з нафти традиційними бензинами. До них належить, насамперед, його відносно низька вартість. Адже в структурі собівартості автомобільних перевезень паливо (бензин) займає від 45 до 50 %. Використання в двигунах внутрішнього згорання газу дає можливість зменшити швидкість спрацювання деталей кривошипно-шатунного механізму (циліндро-поршневої групи), так як при пуску холодного двигуна (і не тільки) не утворюється плівка з бензину, яка змиває оливу. Крім того, газ згоряє повільніше, тому тиск в циліндрах зростає повільніше, тож, відповідно, ударні навантаження на деталі двигуна будуть меншими.

Двигун на газі працює м’якше, крім того газ практично не утворює нагару, що дає можливість збільшити термін служби моторних оливи, оливних фільтрів, свічок запалення, деталей системи випуску відпрацьованих газів. Використання газу в ДВЗ призводить до зменшення шкідливого впливу автотранспорту на довкілля, що важливо в Карпатському регіоні з розвинутою туристичною інфраструктурою. Це пов’язано з тим, що в продуктах згорання двигунів, які працюють на газі, викиду оксидів карбону до 10 разів менше, ніж тих, що працюють на бензинах. Це стосується і оксидів сірки, азоту, які є основною причиною утворення оптичного смогу.

Цілі статті. Експерименти довели, що при переведенні двигунів на зріджений газ спостерігається зниження до 30 % викидів оксидів нітрогену (рис. 1 та 2), які під дією ультрафіолетового випромінювання в поєднанні з ненасиченими вуглеводнями утворюють канцерогени.

Більшість компонентів зрідженого газу мають підвищені антидетонаційні властивості, оскільки їх октанове число значно вище. Характеристику компонентів зріджених палив за цим параметром наведено в таблиці 2.

**Таблиця 2 – Порівняльна характеристика різних видів палива**

Вид палива	Октанове число		Максимальний ступінь стискування без детонації
	дослідний метод	моторний метод	
Бутан	93...35	92	8...8.5
Пропан	ПО...112	105	10...11
Ізобутан	100...102	99...100	9...9.2
Бензин А 92; 95; 98	92...98	83...87	9...9.2

Отже двигуни, які працюють на зрідженому газі, можуть мати більш високу міру стискування, що призведе до більш високого коефіцієнта корисної дії у порівнянні з бензиновими двигунами.

Другий якісний параметр – тиск насичених парів, що повинен забезпечувати хороші характеристики пуску двигунів узимку і усувати можливість утворення парових пробок улітку. В нашій країні використовуються, як правило, літні і зимові сорти зрідженого газу, які є сумішшю пропану і бутану з наведеними у табл. 3 показниками.

**Таблиця 3 – Показники тиску насичених парів різних видів газового палива**

Період	% пропану і бутану	тах тиск насичених парів
Зима	60...40	до 20 °С – не більше 0.15 МПа
Літо	40...60	9 °С .. 20 °С – не більше 1,6 МПа

Важливою перевагою двигунів, які працюють на зрідженому газі, є їх антидетонаційна стійкість (детонація – латинське detonate – гримити) – поширення полум'я з великою швидкістю, близькою до швидкості звука в даному середовищі. Для запалення суміші потрібна певна концентрація палива. Газ, в порівнянні з бензином, горить за менших концентрацій, тобто при бідніших сумішах. З підвищенням концентрації газу і збагачені суміші можна підвищити потужність двигуна. Збіднюючи суміш, можна знизити потужність. Газ, як правило, значно «слухняніший» за бензин.

Підсумовуючи сказане можна зробити такі висновки на макроекономічному рівні.

Переваги вуглеводневих газів:

- підвищення ефективності роботи автомобіля за рахунок дешевих енергоносіїв;
- зменшення збитків від забруднення середовища;
- підвищення ефективності роботи автомобілів та газових сумішах (за рахунок зниження собівартості перевезень), тобто комерційна ефективність.

Певною мірою, знижують ефективність роботи автомобілів з газовими двигунами (в т.ч. зрідженому) такі чинники:

- збільшення витрат на ТО і ПР автомобілів;
- підвищення вартості виробничо-технічної складової (вартість газового обладнання, приладів тощо);
- певні ризики з дотриманням заходів з охорони праці.

При порівняльному аналізі ефективності використання зрідженого газу, крім вищевказаних переваг і недоліків, необхідно враховувати і режими експлуатації рухомого складу, його вантажопідйомність, наявність власних заправок станцій і відстань до загальних заправок станцій (нульові пробіги), співвідношення цін на газ і бензин. Наприклад, ефективність заміщення бензину на газ за збільшенням нульового пробігу (відстань до заправної станції) суттєво знижується і при  $l_p > 25$  км фактично є нульовою).

При розгляді питання використання зрідженого газу необхідно враховувати і певне зниження потужності двигуна в зв'язку з нижчою ніж у бензині теплотою згорання газу. В умовах високогір'я впливають й інші чинники.

**Основний матеріал.** Як відомо, досконалість системи впуску ДВЗ оцінюється коефіцієнтом наповнення  $\eta$ .

Коефіцієнт наповнення циліндра – це відношення маси свіжого заряду ( $M_d$ ), яка надійшла у робочий циліндр, до маси заряду ( $M_r$ ), яка могла би надійти туди за  $P_0$  і  $T_0$  – тиску і температури навколишнього середовища:

$$\eta_v = \frac{M_d}{M_r}$$

з врахуванням густини свіжого заряду  $\rho_0$  кг/м<sup>3</sup>

$$\eta_v = \frac{M_d}{V_h \cdot \rho_0}$$

де  $V_h$  – робочий об'єм циліндрів

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R_{\text{воз}} \cdot T_0}$$

де  $R_{\text{воз}}$  – питома газова стала повітря,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Відношення повного об'єму  $V_a$  до робочого об'єму  $V_h$ :

$$\frac{V_a}{V_h} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}$$

де  $\varepsilon$  – міра стискування,

і температуру  $T$  заряду наприкінці процесу стискування

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma T_r}{1 + \gamma_r}$$

де  $\Delta T$  – підігрів заряду, який залежить, як правило, від взаємного розташування впускного і випускного колекторів;

$\gamma_r$  – коефіцієнт залишкових газів,

$$\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{P_a T_0}{P_0 T_a + \Delta T + \gamma_r T_r}$$

де  $P_a$  – величина заряду наприкінці процесу наповнення

$$\gamma_r = \frac{M_2}{M_1}$$

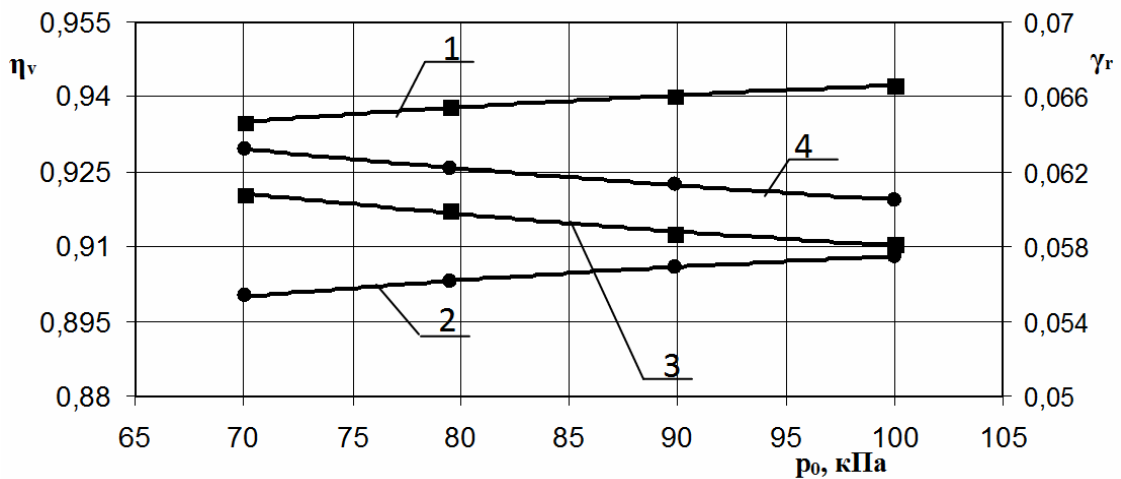
де  $M_1$  – кількість заряду наприкінці процесу наповнення;

$M_2$  – кількість залишкових газів.

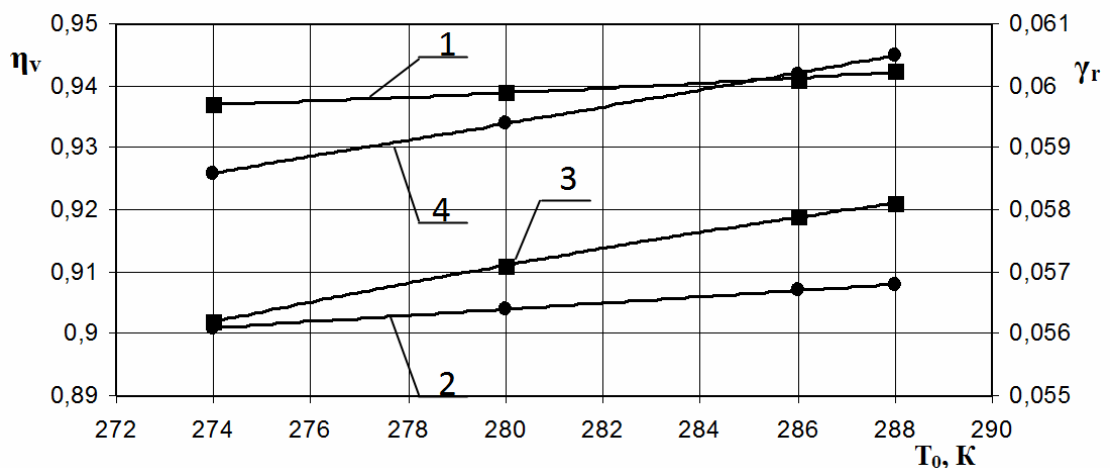
Як видно з останнього виразу, коефіцієнт наповнення є функцією  $P_a$  і  $P_0$ .

Зміна коефіцієнту наповнення і коефіцієнту залишкових газів в залежності від температури і тиску навколишнього середовища зображено на рисунках 1, 2.

Зміна тиску  $P_a$  наприкінці процесу впускання на 0,01 МПа призводить до зміни коефіцієнта наповнення  $\eta_v$  на 15...18%. До прикладу, при такій самій зміні тиску  $P_r$  наприкінці процесу випускання коефіцієнт наповнення  $\eta_v$  змінюється на 1...2%.



1 - бензин, 2 - зріджений газ; зміна коефіцієнта залишкових газів  $\gamma_r$ ; 3 - бензин, 4 - зріджений газ  
**Рисунок 1** – Аналітична залежність зміни коефіцієнтів наповнення  $\eta_v$  та залишкових газів  $\gamma_r$  двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни атмосферного тиску



1 - бензин, 2 - зріджений газ; зміна коефіцієнта залишкових газів  $\gamma_r$ ; 3 - бензин, 4 - зріджений газ  
**Рисунок 2** – Аналітична залежність зміни коефіцієнтів наповнення  $\eta_v$  та залишкових газів  $\gamma_r$  двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни температури довкілля

Із збільшенням висоти, а отже, із зменшенням температури і атмосферного тиску, змінюється ефективна потужність і питома ефективна витрата палива.

Ефективна потужність – це потужність двигуна, що віддається робочій машині безпосередньо або через силову передачу. Вона визначається за формулою:

$$N_e = \frac{P_e V_h n_e i}{30\tau}, \text{ кВт};$$

де  $P_e$  – питомий ефективний тиск у циліндрі двигуна, Па;

$V_h$  – робочий об'єм двигуна, м<sup>3</sup>;

$n_e$  – оберти колінчастого вала, хв<sup>-1</sup>;

$i$  – кількість циліндрів.

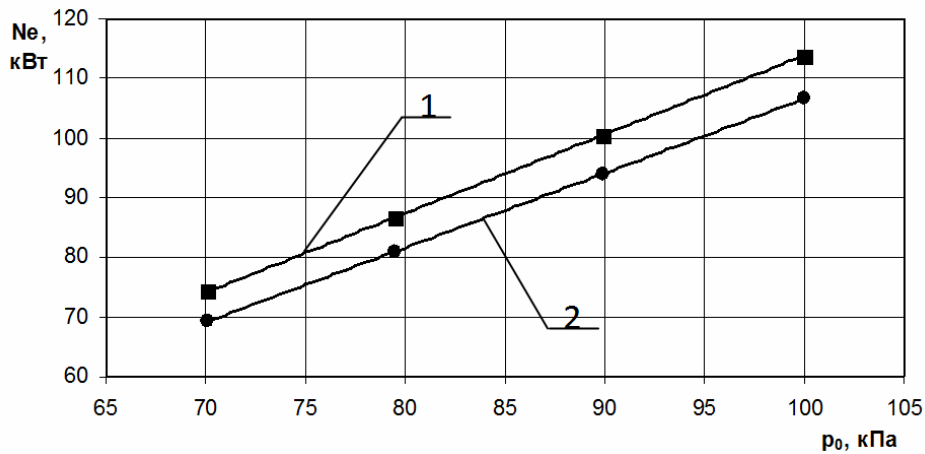
При зменшенні атмосферного тиску наповнення циліндрів тиск і ефективна потужність двигуна в циліндрі  $P_e$  також буде зменшуватись. Аналітична залежність зміни ефективної потужності двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни атмосферного тиску зображено на рисунку 3.

При зменшенні температури густина повітря збільшується, циліндри краще наповнюються свіжим зарядом, тиск в циліндрі збільшується, ефективна потужність також збільшується. Аналітична залежність зміни ефективної потужності двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни температури довкілля зображено на рисунку 4.

Зміна ефективного крутного моменту та концентрація NO<sub>x</sub> залежно від параметрів навколишнього середовища зображено на рисунках 5, 6.

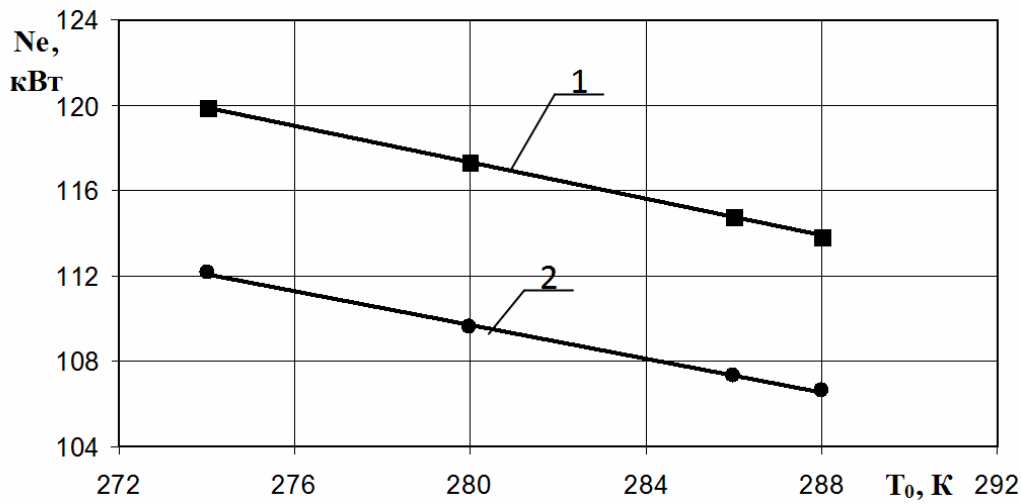
Як відомо, питома ефективна витрата палива  $q_e$  обернено пропорційна ефективній потужності  $N_e$ . Це означає, що із зменшенням ефективної потужності питома ефективна витрата палива збільшується оскільки питома ефективна витрата палива  $q_e$  – це відношення годинної витрати палива  $G_T$  до ефективної потужності  $N_e$ :

$$q_e = \frac{G_T}{N_e}, \text{ г/кВт год.}$$



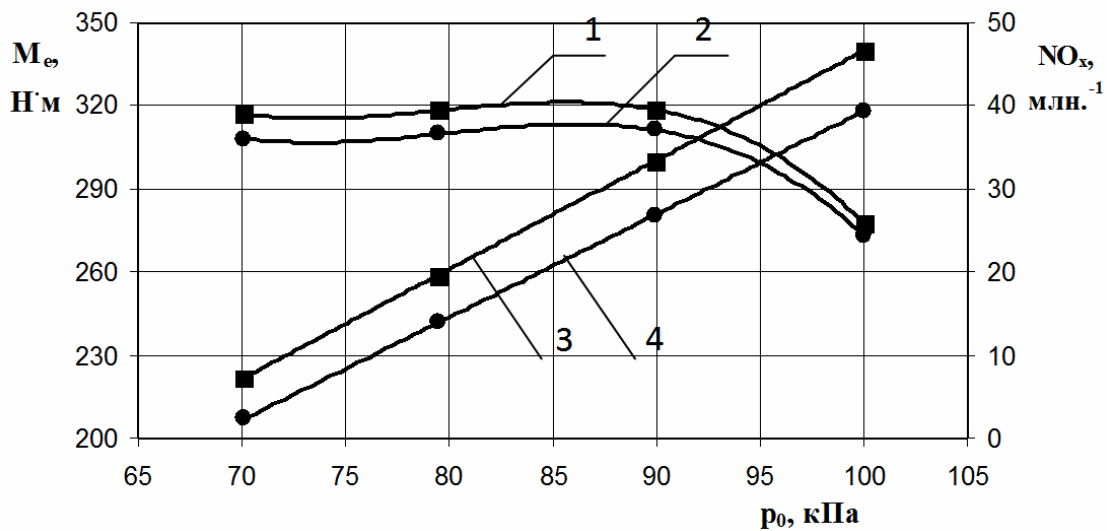
1 - бензин; 2 - зріджений газ

Рисунок 3 – Аналітична залежність зміни ефективної потужності двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни атмосферного тиску



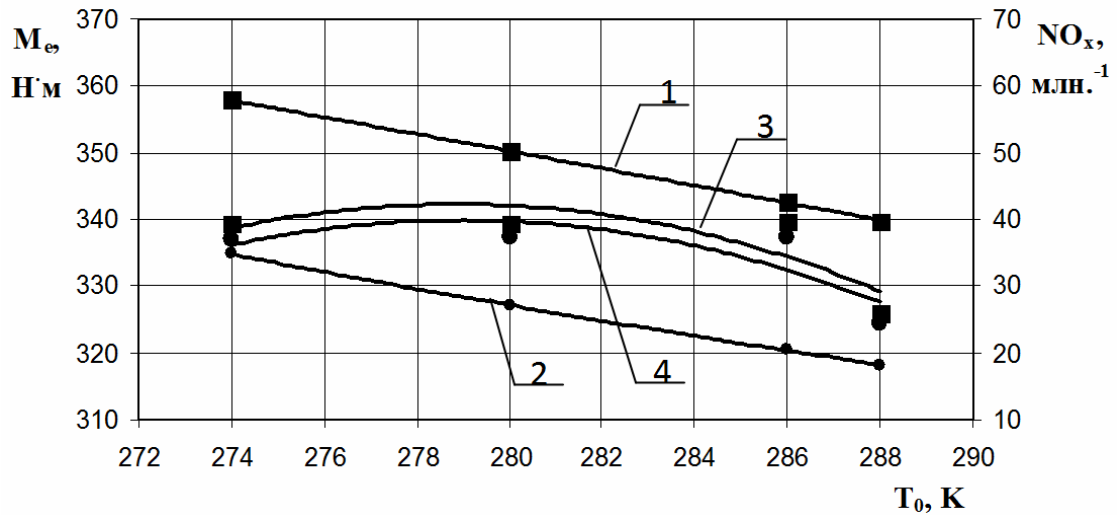
1 - бензин; 2 - зріджений газ

Рисунок 4 – Аналітична залежність зміни ефективної потужності двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни температури довкілля



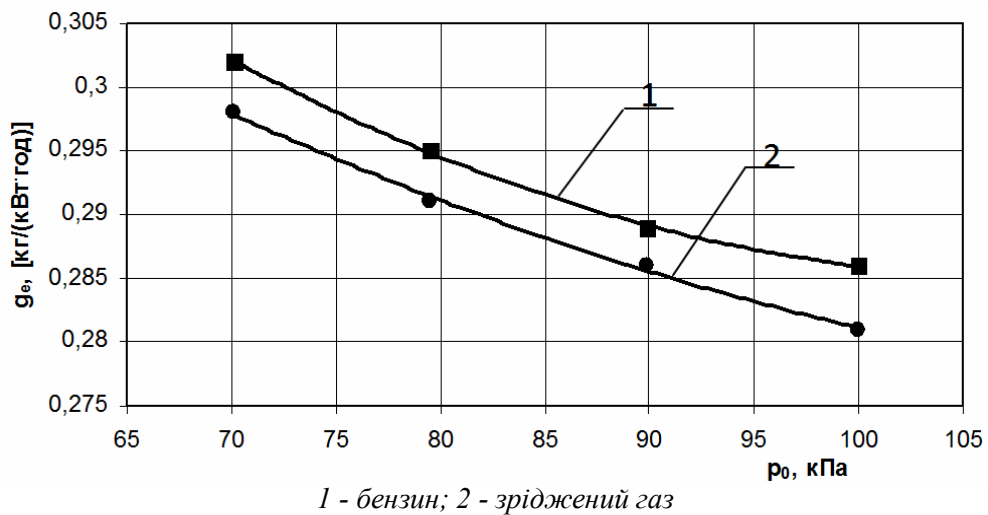
1 - бензин, 2 - зріджений газ; концентрація  $NO_x$ : 3 - бензин, 4 - зріджений газ

Рисунок 5 – Аналітична залежність зміни ефективного крутного моменту  $M_e$  та концентрації  $NO_x$  у відхідних газах двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни атмосферного тиску



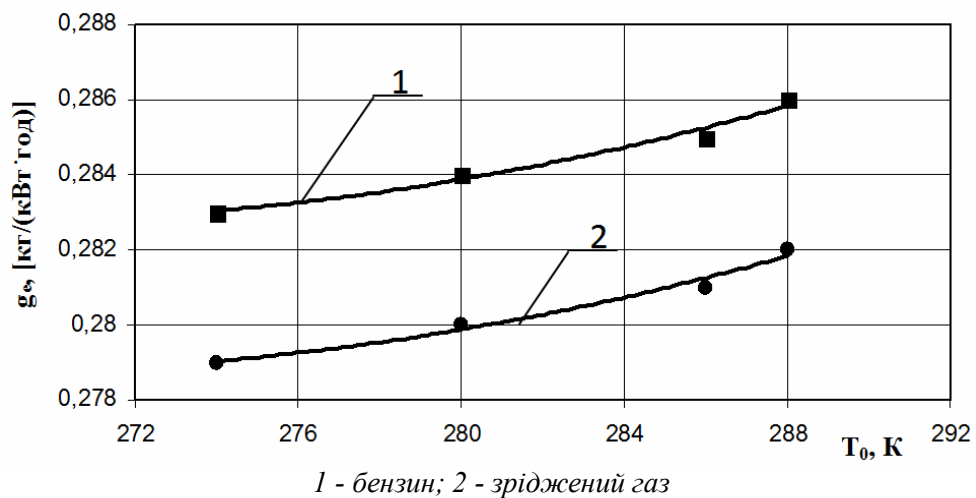
1 - бензин, 2 - зріджений газ; концентрація  $NO_x$ : 3 - бензин, 4 - зріджений газ

Рисунок 6 – Аналітична залежність зміни ефективного крутного моменту  $M_e$  та концентрації  $NO_x$  у відхідних газах двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни температури довкілля



1 - бензин; 2 - зріджений газ

Рисунок 7 – Аналітична залежність зміни питомої ефективної витрати палива двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни атмосферного тиску



1 - бензин; 2 - зріджений газ

Рисунок 8 – Аналітична залежність зміни питомої ефективної витрати палива двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни температури довкілля

Зміна ефективної питомої витрати палива в залежності від температури і тиску навколишнього середовища зображено на рисунках 7, 8.

Відтак зі зниженням атмосферного тиску витрати палива збільшуються (рис. 7), а при зниженні температури – зменшуються. Аналітична залежність зміни питомої ефективної витрати палива двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни температури доквілля зображено на рисунку 8.

### Висновки

За результатами аналізу робочого циклу двигуна, який працює в гірських умовах на газовому паливі, робимо наступні висновки:

1) температура і тиск повітря на заданій висоті будуть відрізнятися від тиску і температури над рівнем моря, і їх значення будуть нижчими;

2) витрата повітря змінюється прямопропорційно до зміни тиску і оберненопропорційна до зміни температури;

3) зменшення густини повітря із збільшенням висоти над рівнем моря призводить до зменшення масового заряду циліндрів двигуна;

4) при зниженні атмосферного тиску від 100 до 70 кПа відбувається зменшення ефективної потужності двигуна до 35 %, зростання питомої ефективної витрати палива до 5 %, зменшення ефективного крутного моменту до 35 %, зниження вмісту оксидів азоту у відхідних газах ДВЗ до 34 %, зменшення коефіцієнта наповнення до 1 % та збільшення коефіцієнта залишкових газів до 4,5 %;

5) при зниженні температури доквілля від 288 до 274 К за результатами розрахунків отримали збільшення ефективної потужності двигуна до 5 %, зниження питомої ефективної витрати палива до 1 %, зростання ефективного крутного моменту до 5 %, зростання вмісту оксидів азоту у відхідних газах ДВЗ до 34 %, зменшення коефіцієнта наповнення до 1 % та зменшення коефіцієнта залишкових газів до 4 %.

### Література

- 1 International Energy Outlook 2001. U.S. Department of Energy, March 2001. (IEO 2001).
- 2 Стативко В.Л. Состояние и перспектива использования газовых видов топлива на транспорте / В.Л. Стативко, Е.Н. Пронин, В.А. Билоусенко. – М.: Мосэкотранс, 2000. – 332 с.
- 3 Турсунов А.А. Управление работоспособностью автомобилей в горных условиях эксплуатации / А.А. Турсунов. – Душанбе: Маориф ва Фарханг, 2003. – 356 с.
- 4 Турсунов А.А. Влияние атмосферно-климатических условий и рельефа местности на эффективность работы автомобилей / А.А. Турсунов, М.А. Абдуллоев // Проблемы транспорта Дальнего Востока: Сб. – Владивосток, 2001. – №1. – С. 277-279.
- 5 Турсунов А.А. Применение газового топлива при эксплуатации автомобильного транспорта в горных условиях А.А. Турсунов, М.А. Абдуллоев // Проблемы эксплуатации и обслуживания транспортно-технологических машин. – Тюмень: ТюмГНГУ. – 2009. – №2 – С. 365-369.
- 6 Кулешов А.С. Программа расчета и оптимизации двигателей внутреннего сгорания ДИЗЕЛЬ-РК. Описание математических моделей, решение оптимизационных задач / А.С. Кулешов. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 123 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
08.10.14*

*Рекомендована до друку  
професором **Петриною Ю.Д.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
канд. техн. наук **Пилипченком О.В.**  
(ТзОВ Міжгалузевий науково-виробничий  
центр «Епсілон лтд», м. Івано-Франківськ)*