

УДК 641.43

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.94

## ПОБУДОВА РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ ПИТОМОЇ ВИТРАТИ ПОВІТРЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ПНЕВМОДВИГУНА

Філатова Г. Є.<sup>1</sup>, Варавіна О. П.<sup>1</sup>, Нікітченко І. М.<sup>2</sup>, Тесленко Е. В.<sup>2</sup>,  
Круговий А. О.<sup>2</sup>, Созикін М. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
(НТУ «ХПІ»)

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Результати проведеного дослідження щодо визначення оптимальних режимів роботи пневматичного двигуна демонструють, що залежності питомої індикаторної витрати стисненого повітря можуть бути адекватно визначені за допомогою регресійної моделі другого ступеня функції кутів відкриття-закриття впускних і випускних клапанів. Отримана модель у вигляді полінома другого порядку має високі показники адекватності, що є істотною перевагою як у цій роботі, так і в процесі використання інших досліджень подібної спрямованості.

**Ключові слова:** питома витрата повітря, пневмодвигун, регресійна модель, електрогідролічний привід клапанів.

### Вступ

Зниження питомої витрати повітря пневмодвигуна (ПД) протягом тривалого часу є одним з основних завдань у процесі конвертації автомобільних ПД [1].

На сьогодні впровадження електронних систем керування (з електрогідролічним приводом клапанів) подачею повітря дозволило здійснювати гнучку зміну циклової подачі та оптимальне регулювання кутів відкриття-закриття клапанів, що забезпечить задану характеристику роботи ПД [2, 3, 4].

Однак високотехнологічна модернізація систем впуску стиснутого повітря має доповнюватися комплексом комп'ютерного моделювання як робочих процесів у ПД, так і режимів його роботи з метою забезпечення функціонування системи подачі стисненого повітря в реальних умовах експлуатації.

### Аналіз публікацій

У ПД з автоматичним керуванням клапанів як привод використовуються електричні, пневматичні, гідравлічні та комбіновані приводи.

Найчастіше використовують електрогідролічні [5, 6, 7]. Так, питання розроблення, виготовлення та дослідження систем повітропостачання ПД вирішує велика кількість закордонних фірм, зокрема MDI [8], TATA [9], Peugeot [10], Engineair [11], ZPM [12].

Ця система керування дозволяє використовувати автоматичний вибір кутів відкриття-закриття впускних-випускних клапанів. Електрогідролічний привід дозволяє керувати не тільки подачею стисненого повітря, але й здійснювати якісне та кількісне регулювання заряду.

Крім того, електрогідролічна система керування клапанами дозволяє змінювати тактність двигуна.

### Мета і постановка завдання

**Метою** цієї роботи є визначення екстремуму багатофакторної залежності ПД відповідно до серії його швидкісних характеристик й індикаторних діаграм ПД.

**Завдання роботи:** побудова залежності параметра – питомої індикаторної витрати повітря ПД одночасно від чотирьох незалежних змінних (кутів відкриття-закриття впускного та випускного клапанів); побудова графіка універсальних багатопараметрових характеристик, визначення взаємодіючої залежності досліджуваних ф

акторів та їхньої проєкції на площину XY ( $\Phi_{вип}$ ,  $\Phi_{впк}$ ,  $\Phi_{випп}$ ,  $\Phi_{випкк}$ ) з перерізів поверхні відгуку  $g_i = f(\Phi)$  за визначених значень  $g_i$  у тривимірному просторі  $g_i$ ,  $\Phi_{вип}$ ,  $\Phi_{впк}$ ,  $\Phi_{випп}$ ,  $\Phi_{випкк}$ .

### Виклад основного матеріалу

Згідно з планом експерименту здійснено вимірювання індикаторної витрати стисненого повітря за швидкісними характеристи-

ками пневматичного автомобільного двигуна 1Д 9,2/9,2.

Експериментальне дослідження здійснювалось у лабораторії ДВЗ ХНАДУ на моторному стенді, оснащеному всією необхідною вимірною апаратурою [13]. Номінальна потужність була досягнута за повного наповнення за тиску  $p_{\text{вп}} = 0,7$  МПа.

Статичні характеристики ПД можна адекватно описати за допомогою поліномів відповідного ступеня. У дослідженні регресійна модель питомої витрати палива наведена у вигляді полінома другого ступеня функції режимних параметрів кутів відкриття-закриття клапанів.

Побудова математичної моделі здійснювалась за допомогою поліномів другого ступеня.

Згідно з розрахунками, модель у вигляді полінома другого ступеня має високі показники адекватності.

Завдяки вбудованим у *MATLAB* пакетам аналізу отримана така залежність регресійної моделі:

$$y = 9399,8871 + 0,26 + 0,18 + 0,057 + 0,03 + 2,6014x_1 - 62,9937x_2 - 19,9586x_3 - 15,9027x_4 + 0,2512x_1x_2 - 0,1x_1x_3 - 0,1x_1x_4 + 0,0044x_2x_3 + 0,002x_2x_4 - 0,0048x_3x_4. \quad (1)$$

Процес здійснювали з використанням пакета аналізу даних *MATLAB*. Для підвищення точності результату здійснено розрахунки побудови моделей у вигляді статечної функції витрати стисненого повітря від факторів, що розглядаються. На рис. 1 подана характеристика ПД питомої індикаторної витрати повітря як функція кутів відкриття-закриття впускного та випускного клапанів.

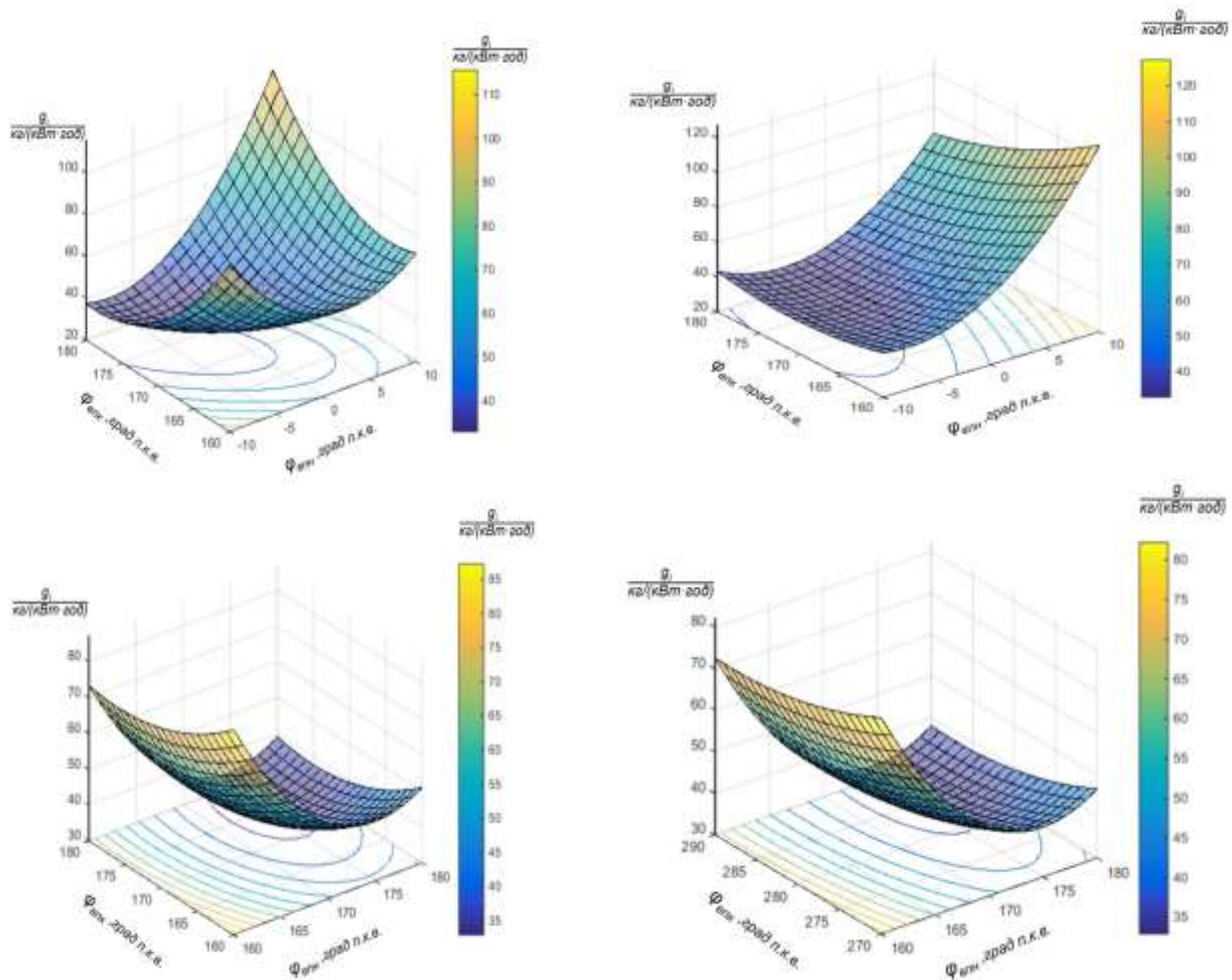


Рис. 1. Залежність  $g_i$  від кута відкриття-закриття клапанів

Точка найменшої питомої індикаторної витрати повітря  $g_{\min} = 32,29$  кг/кВт·год визначена за таких оптимальних кутів відкриття клапанів:  $\varphi_{\text{вип}} = -3,9^\circ$  пкв,  $\varphi_{\text{впк}} = 174,0^\circ$  пкв,  $\varphi_{\text{випп}} = 176,2^\circ$  пкв,  $\varphi_{\text{випкк}} = 266,9^\circ$  пкв.

У процесі експлуатації автомобільних ПД варто дотримуватись режимів, що відповідають околицям цієї точки, що забезпечить мінімальне споживання стисненого повітря  $g_{\min}$ .

Коефіцієнт детермінації дорівнює  $R^2 = 0,9$ . Оскільки  $R^2 > 0,85$ , можна дійти висновку, що достовірність рівня значимості за Фішером значно менше ніж 0,05, отже, модель має статичне значення. Коефіцієнт множини змішаної кореляції дорівнює 0,95.

Побудовано графіки отриманої моделі. Графічна побудова свідчить про те, що через забезпечення мінімальних значень питомої індикаторної витрати палива доцільно експлуатувати аналізований ПД з оборотами в межах  $1000$  хв<sup>-1</sup>. Оптимальною позицією щодо оборотів колінчастого вала ПД є  $800\text{--}1000$  хв<sup>-1</sup>, коли досягається робота з витратою стисненого повітря  $35\text{--}38$  кг/кВт·год за необхідної потужності.

Під час дослідження визначено екстремум багатофакторної залежності ПД. Побудовані залежності параметрів – питомої індикаторної витрати повітря ПД одночасно від чотирьох незалежних змінних (кутів відкриття-закриття впускного та впускного клапанів). Побудовані графіки універсальних багатопараметрових характеристик. Криві питомої індикаторної витрати стисненого повітря можуть бути визначені за допомогою регресійної моделі другого ступеня функції кутів відкриття-закриття впускних і впускних клапанів. Отримана модель другого порядку є істотною перевагою як цього дослідження, так й інших досліджень подібної спрямованості.

Питома індикаторна витрата стисненого повітря стає можливою за допомогою електронного блока керування, який створює сигнали керування, може коригувати системи живлення (дозування та регулювання подачі стисненого повітря) для переведення ПД в найбільш економічний режим. Обґрунтування оптимальних режимів роботи аналізованого ПД та інших є актуальною проблемою.

### Висновки

Здійснено багатофакторну оптимізацію роботи ПД  $D/S = 9,2/9,2$ . Під час аналізу

розрахунків визначено екстремум. Оптимальні параметри є такими:  $\varepsilon_0 = 0,12$ ,  $\varepsilon_1 = 1$ ,  $\varepsilon_3 = 0,59$ ,  $p_{en} = 0,7$  МПа,  $n = 780$  хв<sup>-1</sup>.  $N_i = 2,23$  кВт,  $g_i = 32,29$  кг/кВт·год.

Наведена послідовність визначення питомої індикаторної витрати стисненого повітря за різних режимів роботи автомобільного ПД за допомогою розширених багатопараметрових характеристик дозволяє досягти режимів роботи ПД, що відповідають мінімальній питомій витраті стисненого повітря, та досягти узгодження з автоматичними трансмісіями, які впроваджуються в конструкції сучасних міських автомобілів.

### Література

1. Концепція створення пневматичного двигуна для автомобіля: монографія / О. І. Воронков та ін. Харків: ХНАДУ, 2019. 256 с.
2. Leontiev, D. M., Voronkov, O. I., Korohodskiy, V. A., Hlushkova, D., Nikitchenko, I. M., Teslenko, E. V., Lykhodii, O. Mathematical Modelling of Operating Processes in the Pneumatic Engine of the Car. SAE Technical Paper 2020-01-2222, 2020. ISSN: 0148-7191. doi: 10.4271/2020-01-2222.
3. Зміни ефективних параметрів роботи поршневого пневмодвигуна за швидкістними характеристиками / О. І. Воронков та ін. Автомобільний транспорт: зб. наук. пр. 2012. Вип. 31. С. 62–66
4. Воронков О. І., Леонтьев Д. М., Тесленко Є. В. Визначення вихідних енергетичних параметрів транспортного засобу із пневматичним двигуном. Автомобільний транспорт: зб. наук. пр. 2013. Вип. 33. С. 70–76.
5. Вибір схеми електрогідроавтоматики для керування впускним клапаном поршневого пневмодвигуна / О. І. Воронков та ін. Вісник ХНАДУ: зб. наук. пр. 2017. Вип. 78. С. 144–150.
6. Методика розрахунку об'ємного гідроприводу впускного клапана пневмомотора / Зіновій Лурье та ін. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2020. № 89.
7. Динаміка об'ємного гідроприводу впускного клапана пневмомотора / Зіновій Лурье та ін. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2020. № 90
8. "MDI's active chamber". Thefuture.net.nz. Archived from the original on 2011-05-07. Retrieved 2010-12-12 .
9. Tata Air Car to drive in by 2011. *Popular Mechanics* . Archived from the original on 2010-02-10.
10. Marc Carter. "Peugeot Announces Plans to Release a Hybrid Car That Runs on Compressed Air by 2016" . Retrieved 30 May 2015

11. Matt Campbell (November 3, 2011). The motorbike that runs on air . *Сідней Morning Herald*. Archived from the original on November 5, 2011. Retrieved 2011-11-07 .
12. Zero Pollution Motor – Двигуни з нульовим забрудненням. <https://zeropollutionmotors.us>.
13. Тесленко Е. В. Експериментальний стенд для дослідження автомобільних пневматичних двигунів із клапанним розподілом повітря. Вісник ХНАДУ: зб. наук. пр. 2018. Вип. 83. С. 23–34.

### References

1. Voronkov, O. I., Hlushkova, D. B., Hnatov, A. V., Karpenko, V. O., Teslenko, E. V. (2019). The concept of creating a pneumatic engine for a car: a monograph. Kharkiv: KNAHU. 56 p.
2. Leontiev, D. M., Voronkov, O. I., Korohodskiy, V. A., Hlushkova, D., Nikitchenko, I. M., Teslenko, E. V., Lykhodii, O. Mathematical Modeling of Operating Processes in the Pneumatic Engine of the Car. SAE Technical Paper 2020-01-2222, 2020. ISSN: 0148-7191. doi: 10.4271/2020-01-2222.
3. Voronkov, O. I., Nikitchenko I. M., Teslenko, O. V., Minin, O. M. (2012). Change of the effective parameters of the piston pneumatic engine according to the speed characteristics. *Automotive transport*. Issue 31. Pp. 62–66.
4. Voronkov, O. I., Leontiev, D. M., Teslenko, E. V. (2013). Determination of initial energy parameters of a vehicle with a pneumatic engine. *Automotive transport*. Issue 33. Pp. 70–76.
5. Voronkov, O. I., Avrunin, G. A., Nikitchenko, I. M., Teslenko, O. V., Nazarov, O. O. (201). Selection of the scheme of electro-hydraulic automation for controlling the intake valve of a piston pneumatic engine. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University*. Issue 78. Pp. 144–150.
6. Lurye, Z., Avrunin, G., Voronkov, O., Nikitchenko, I., Teslenko, E., Nazarov, A., Serikova, I., Soloviov, V., Tsenta, Y., Moroz, I. (2020). Methodology for calculating the volumetric hydraulic drive of the intake valve of the pneumatic motor. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University*. No. 89.
7. Lurye, Z., Avrunin, G., Voronkov, O., Nikitchenko, I., Teslenko, E., Soloviov, V., Tsenta, Y., Moroz, I. (2020). Dynamics of the volumetric hydraulic drive of the intake valve of the pneumomotor. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University*. No. 90.
8. "MDI's active chamber". *Thefuture.net.nz*. Archived from the original on 2011-05-07. Retrieved 2010-12-12 .
9. Tata Air Car to drive in by 2011. *Popular Mechanics* . Archived from the original on 2010-02-10.
10. Marc Carter. "Peugeot Announces Plans to Release a Hybrid Car That Runs on Compressed Air by 2016" . Retrieved 30 May 2015
11. Matt Campbell (November 3, 2011). The motorbike that runs on air . *Сідней Morning Herald* . Archived from the original on November 5, 2011. Retrieved 2011-11-07.
12. Zero Pollution Motor – "Engines with zero pollution." [<https://zeropollutionmotors.us>] (access: 09.2024).
13. Teslenko, E. V. (2018). Experimental stand for the research of automotive pneumatic engines with valve air distribution. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University*. Issue 83. Pp. 23–34.

**1. Філатова Ганна Євгенівна**, д.т.н., проф., проф. кафедри комп'ютерної інженерії та програмування [filatova@khrpi.edu.ua](mailto:filatova@khrpi.edu.ua), тел. +38(098)778-14-45, ORCID: 0000-0003-1982-2322

<sup>1</sup>Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" (НТУ "ХПІ"), вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**2. Варавіна Олена Павлівна**, доцент кафедри видобутку нафти, газу та конденсату [ovaravina2024@gmail.com](mailto:ovaravina2024@gmail.com), тел. +38(098)245-52-81, ORCID:0000-0002-6715-5651

<sup>1</sup>Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" (НТУ "ХПІ"), вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**3. Нікітченко Ігор Миколайович**, к.т.н., доц. кафедри двигунів внутрішнього згоряння, [dvs@khadi.kharkov.ua](mailto:dvs@khadi.kharkov.ua), тел. +38(099)311-61-10, ORCID: 0000-0002-9481-4296

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

**4. Тесленко Едуард Вікторович**, асистент кафедри двигунів внутрішнього згоряння [dvs@khadi.kharkov.ua](mailto:dvs@khadi.kharkov.ua), тел. +38 (067) 853-83-85, ORCID: 0000-0001-8833-1733

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

**5. Круговий Андрій** аспірант кафедри двигунів внутрішнього згоряння [dvs@khadi.kharkov.ua](mailto:dvs@khadi.kharkov.ua), тел. +38 (096) 571-97-15, ORCID: 0009-0001-6765-8486

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

**6. Созикін Михайло Васильович**, аспірант кафедри двигунів внутрішнього згоряння [dvs@khadi.kharkov.ua](mailto:dvs@khadi.kharkov.ua), тел. +38 (096) 571-97-15, ORCID: 0009-0001-6765-8486

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

### Construction of the regression model of the specific air consumption for an automobile pneumatic engine

**Abstract. Problem.** The object of the investigation is a detailed assessment of the cost-effectiveness of the PD and the selection of optimal valve opening-closing settings.

The method of this work was based on a series of rapid indicators and indicator diagrams of PD, determined by the extremum of the multifactorial occurrence of this PD.

**Methodology.** To achieve the goal of the current task: the duty of the parameter – at the business indicator flow of the PD simultaneously from four independent changes (the valves of the inlet and outlet no valves). Weekly graph of universally wide-ranging characteristics, plotted as a result of projection onto the XY area ( $\varphi v_{pm}, \varphi v_{pk}, \varphi v_{pm}, \varphi v_{pk}$ ) from cross-sections of the surface  $g_i = f(\varphi)$  for given values of  $g_i$  in trivial room space  $g_i, \varphi v_{pm}, \varphi v_{pk}, \varphi_{впт}, \varphi_{впк}$ . The subject of investigation is the interconnections between the indicator and the pressure of the compressed air and the opening-closing of the PD valves. **Goal.** based on a series of speed characteristics and indicator diagrams of PD, determination of the extremum of the multifactorial dependence of this PD. **Task.** construction of the dependence of the parameter – the specific indicator air flow of the PD simultaneously on four independent variables (opening-closing angles of the intake and exhaust valves). Construction of a graph of universal multiparameter characteristics, determination of the mutual influence of the studied factors and their projection on the XY plane **Results.** As a result of the research carried out to determine the optimal modes of the PD robot, it was established that the curves of the compressed wind indicator power consumption can be adequately described using a regression model of another stage of the cutter function This is the closing of the intake and exhaust valves, which is an important result. A model of a different order has been removed, which is a real advantage, and in work, a number of works have similar directness. **Originality.** Proposal method for determining the extremum of the pet's indicator waste of the compressed area. This is the goal of conducting an extreme experiment to induce a rich factor function due to the upcoming resolution of the problem of insane optimization with the use of the simplex method. **Practical value.** Among the parameters for assessing the technical level of PD, the level of the minimum feed indicator value of the compressed air from the point of opening - closing of the valves is determined. **Key words:** power supply, pneumatic motor, regression model, electrohydraulic valve drive.

### Побудова регресійної моделі питомої витрати повітря автомобільного пневмодвигуна

**Анотація. Проблема.** Об'єктом дослідження є аналіз економічності ПД і вибір оптимальних кутів відкриття-закриття клапанів.

**Метою** роботи є визначення екстремуму мно-гофакторної залежності ПД відносно до серії

швидкісних показників і індикаторних діаграм ПД.

**Методологія** Для досягнення поставленої мети вирішені такі завдання: побудова залежності параметра: за індикаторної витрати повітря ПД одночасно від чотирьох незалежних змінних (кутів відкриття-закриття впускного та випускного клапанів). Побудова графіка універсально багатопрометрових характеристик, отримання проєкції на площину XY ( $\varphi_{впт}, \varphi_{впк}, \varphi_{впт}, \varphi_{впк}$ ) з перерізів поверхні відгуку  $g_i = f(\varphi)$  за значень  $g_i$  у тривимірному просторі  $g_i, \varphi_{впт}, \varphi_{впк}, \varphi_{впт}, \varphi_{впк}$ .

**1. Предметом дослідження** є взаємозв'язок питомої індикаторної витрати стисненого повітря та кутів відкриття-закриття клапанів ПД.

**Результати.** Під час дослідження з визначення оптимальних режимів роботи ПД визначено, що криві питомої індикаторної витрати стисненого повітря можуть бути адекватно описані за допомогою регресійної моделі другого ступеня функції кутів відкриття-закриття впускних і випускних клапанів. Отримана модель другого порядку є істотною перевагою як цієї роботи, так й інших робіт подібної спрямованості.

#### 2. Оригінальність.

Запропонований метод визначення екстремуму питомої індикаторної витрати стисненого повітря. Це досягається під час екстремального експерименту для побудови багатофакторної функції відгуку з наступним розв'язанням задачі безумовної оптимізації з використанням симплексного методу.

**3. Практична цінність.** Як параметр визначення технічного рівня ПД вибрана залежність мінімальної питомої індикаторної витрати стисненого повітря від кута відкриття-закриття клапанів.

**4. Ключові слова:** рівняння регресії, пневматичний двигун, питома індикаторна витрата, стиснене повітря, кут відкриття-закриття клапанів.

Filatova Ganna Evhenivna, D.Sc., Prof.,  
Department of Computer Engineering and Programming, e-mail: filatova@khp.edu.ua,  
tel. +38(098)778-14-45,  
ORCID: 0000-0003-1982-2322

<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"). 2, Kurpyukhova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

Varavina Olena Pavlivna, Assoc. Prof.,  
Department of Oil, Gas and Condensate Production, ovaravina2024@gmail.com,  
tel. +38(098)245-52-81,  
ORCID:0000-0002-6715-5651

<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"). 2, Kurpyukhova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

**Nikitchenko Ihor Mykolajovych**, Ph.D., Assoc. Prof., Department of Internal Combustion Engines, [dvs@khadi.kharkov.ua](mailto:dvs@khadi.kharkov.ua), tel. +38(099)311-61-10, ORCID: 0000-0002-9481-4296

<sup>2</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

**Teslenko Eduard Viktoroviya**, Assistant, Department of Internal Combustion Engines, Kharkiv National Automobile and Highway University [dvs@khadi.kharkov.ua](mailto:dvs@khadi.kharkov.ua), tel. +38 (067) 853-83-85, ORCID: 0000-0001-8833-1733

<sup>2</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

**Krugovij Andrij Oleksandrovych**, post-graduate student, Department of Internal Combustion Engines, [dvs@khadi.kharkov.ua](mailto:dvs@khadi.kharkov.ua), tel. +38 (096) 571-97-15, ORCID: 0009-0001-6765-8486

<sup>2</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

**Sozykin Mykhailo Vasyliiovych**, post-graduate student, Department of Internal Combustion Engines, [dvs@khadi.kharkov.ua](mailto:dvs@khadi.kharkov.ua), tel. +38 (097) 9439307

<sup>2</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

---