



**Oleksandr S. Mytrofanov**  
Митрофанов  
Олександр  
Сергійович

УДК 621.438

## RESEARCH OF INFLUENCE OF OPERATING PROCESS PARAMETERS ON EFFECTIVE INDICATORS OF ROTOR-PISTON ENGINE

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ НА ЕФЕКТИВНІ ПОКАЗНИКИ РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГУНА

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2020.1\(13\).2](https://doi.org/10.15589/smi2020.1(13).2)

Oleksandr  
S. Mytrofanov

Митрофанов Олександр Сергійович, канд. техн. наук, доц.  
[mitrofanov.al.ser@gmail.com](mailto:mitrofanov.al.ser@gmail.com) ORCID: 0000-0003-3460-5369

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

**Abstract. Purpose.** The study of the influence of the parameters of the working cycle and the working fluid on the effective performance of a rotary piston engine.

**Methodology.** The purpose of the study is realized by mathematical modeling using the developed program for calculating the duty cycle of a rotary piston engine.

**Results.** The influence of parameters such as relative dead volume and degree of filling on the change in the effective performance of the 12RPD-4.4/1.75 rotary piston engine is considered. The value of these parameters directly depends on the design of the gas exchange system, its complexity and manufacturing accuracy. The considered rotary piston engine has a structurally simple spool gas exchange scheme, however, it allows regulating the operating modes of the engine not only by changing the parameters of the working fluid at the inlet (pressure and temperature), but also by changing the degree of filling, which is more productive. In the proposed design of a rotary piston engine, the value of the relative dead volume can be provided at the level of 0.015, which is a fairly high indicator, and the value of the degree of filling can vary significantly. Indicator diagrams of the operation of a rotary piston engine with a constant gas pressure at the inlet (the same operating mode) and a variable value of the relative dead volume and degree of filling are shown. With a value of the working fluid pressure at the engine inlet of 2 MPa, a decrease in meter volume by 20% leads to an increase in the maximum cycle pressure and indicator work (increase in the area of the indicator diagram), as well as to an increase in the effective engine power by 22% with a decrease in the effective flow rate of the working fluid by 27.7%. Dependences of changes in the effective performance of a rotary piston engine versus changes in the pressure of the working fluid at the engine inlet are presented for various values of the relative dead volume and degree of filling. So, the increase in the effective engine power occurs almost in proportion to the increase in the pressure of the working fluid at the inlet (with an increase in pressure by 42%, the increase in the effective engine power is about 41%).

**Scientific novelty.** The dependences of the influence of parameters such as relative dead volume, degree of filling and pressure of the working fluid in the inlet receiver on the change in the effective performance of a rotary piston engine of a fundamentally new design are analyzed and presented.

**Practical relevance.** It has been determined that an effective way to regulate the operating modes of a rotary piston engine is to change the degree of filling. A decrease in the degree of filling has a positive effect on the specific effective consumption of the working fluid with a slight decrease in the effective engine power. So compared with a decrease in effective power, the effective flow rate of the working fluid is reduced 4.2 times more. Therefore, given this, ensuring a change in the degree of filling in the widest possible range is mandatory when designing new rotary piston engines.

**Key words:** rotary piston engine, specific effective consumption of the working fluid effective power, relative dead volume, degree of filling.

**Анотація. Мета.** Дослідження впливу параметрів робочого циклу та робочого тіла на ефективні показники роторно-поршневого двигуна.

**Методика.** Мета дослідження реалізується методом математичного моделювання з використанням розробленої програми розрахунку робочого циклу роторно-поршневого двигуна.

**Результати.** Розглянуто вплив таких параметрів, як відносний мертвий об'єм і ступінь наповнення на змінення ефективних показників роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75. Значення цих параметрів прямо залежать від конструкції системи

газообміну, її складності й точності виготовлення. Розглянутий роторно-поршневий двигун має конструктивно-просту золотникову схему газообміну, однак вона дає змогу здійснювати регулювання експлуатаційних режимів роботи двигуна не тільки за рахунок зміння параметрів робочого тіла на вході (тиску й температури), а й за допомогою зміни ступеня наповнення, що є більш продуктивним. У запропонованій конструкції роторно-поршневого двигуна значення відносного мертвого об'єму може бути забезпечене на рівні 0,015, що є досить високим показником, а значення ступеня наповнення може змінюватися в дуже значних межах. Наведено індикаторні діаграми роботи роторно-поршневого двигуна при сталому значенні тиску газу на вході (однаковий режим роботи) та змінному значенні відносного мертвого об'єму й ступеня наповнення. При значенні тиску робочого тіла на вході у двигун 2 МПа зменшення мертвого об'єму на 20% призводить до зростання максимального тиску циклу й індикаторної роботи (збільшення площі індикаторної діаграми), а також до підвищення ефективної потужності двигуна на 22% при зниженні ефективної витрати робочого тіла на 27,7%. Подано залежності зміни ефективних показників роботи роторно-поршневого двигуна від зміни тиску робочого тіла на вході у двигун при різних значеннях відносного мертвого об'єму та ступеня наповнення. Так, зростання ефективної потужності двигуна відбувається майже пропорційно зростанню тиску робочого тіла на вході (при збільшенні тиску на 42% зростання ефективної потужності двигуна становить близько 41%).

**Наукова новизна.** Проаналізовано й наведено залежності впливу таких параметрів, як відносний мертвий об'єм, ступінь наповнення та тиск робочого тіла у впускному ресивері на зміни ефективних показників роторно-поршневого двигуна принципово нової конструкції.

**Практична значимість.** Визначено, що ефективним способом регулювання експлуатаційних режимів роботи роторно-поршневого двигуна є зміна ступеня наповнення. Зменшення ступеня наповнення позитивно впливає на питому ефективну витрату робочого тіла при незначному зниженні ефективної потужності двигуна. Так, порівняно зі зменшенням ефективної потужності ефективна витрата робочого тіла знижується в 4,2 рази більше. Тому, з огляду на це, забезпечення зміни ступеня наповнення в максимально широкому діапазоні є обов'язковим під час проектування нових роторно-поршневих двигунів.

**Ключові слова:** роторно-поршневий двигун; питома ефективна витрата робочого тіла; ефективна потужність; відносний мертвий об'єм; ступінь наповнення.

## References

- [1] Bhardwajsinh, Mahida, & Dipak, C. Gosai (2015). An Experimental Study on I.C. Engine Using Compressed Air as Alternate of Fuel. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 4, 12, 1787–1791.
- [2] Qihui, Yu, & Maolin, Cai (2015). Experimental Analysis of a Compressed Air Engine. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 3, 144–153. <http://dx.doi.org/10.4236/jfcmv.2015.34014>.
- [3] Turenko, A. N., Bogomolov, V. A., & Abramchuk, F. I. i dr. (2009). Pnevmodvigatel' dlya avtomobil'noy gibridnoy silovoy ustanovki [Air motor for automotive hybrid propulsion system.]. *Avtomobil'nyy transport: sbornik nauchnykh trudov KHNADU* [Road transport: collection of scientific papers KHNADU], 24, 7–10.
- [4] Mityukov, N. V., & Tulumbasov, V. V. (2012). O vozmozhnosti konstruktivnoy realizatsii podvodnogo buksirovshchika na osnove pnevmaticheskoy mashiny [On the possibility of constructive implementation of an underwater tug based on a pneumatic machine]. *Novyy universitet. Seriya: Tekhnicheskkiye nauki* [New University. Series: Engineering], 3, 78–79.
- [5] Ryzhkov, A. A., Molodova, Yu. I., Prilutskiy, A. I., & Prilutskiy, I. K. (2012). Osobennosti raboty parozhidkostnogo detandera v sostave ustanovok ozhizheniya prirodnogo gaza [Features of the vapor-liquid expander as part of natural gas liquefaction plants]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda* [Bulletin of the International Academy of Refrigeration], 3, 8–12.
- [6] Agababov, B. C., & Koryagin, A. V. (2002). Opredeleniye energeticheskoy effektivnosti ispol'zovaniya detandergeneratornogo agregata v sistemakh gazosnabzheniya [Determining the energy efficiency of using an expander-generator unit in gas supply systems]. *Teploenergetika* [Heat power engineering], 12, 35–38.
- [7] Prilutskiy, I. K., Arsen'yev, I. A., Molodov, M. A., Prilutskiy, A. A., & Shevtsova, A. I. (2015). Gazovyy porshnevoy detander nizkogo davleniya [Low pressure gas piston expander]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya «Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovaniye»* [Scientific journal NRU ITMO. Series «Refrigeration and Air Conditioning»], 3, 1–14.
- [8] Bumagin, G. I. (2007). *Kriogennyye mashiny* [Cryogenic machines]. Omsk: Izd-vo OmGTU [Publishing House of OmSTU].
- [9] Voronkov, A. I., Teslenko, E. V., & Udovik, T. A. (2016). Opredeleniye minimalno neobkhodimogo podogreva szhatogo vozdukh na vkhode v avtomobilnyy pnevmodvigatel pri razlichnykh usloviyakh [Determination of the minimum necessary heating of compressed air at the entrance to an automotive pneumatic engine under various operating conditions]. *Vestnik KHNADU: sb. nauch. tr.* [KNAHU Bulletin: Collection of Scientific Publications], 75, 100–108.
- [10] Voronkov, A. I. (2016). Vliyaniye podogreva vozdukh na effektivnyye pokazateli rabochego protsessa pnevmodvigatelya [Influence of air heating on effective performance of the working process of a pneumatic engine]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Vseukr. nauch.-tekhn. zhurn. NTU «KHPI»* [Internal combustion engines: All-Ukrainian Scientific and Technical Journal of NTU «KPI»].

- [11] Turenko, A. N., Bogomolov, V. A., Abramchuk, F. I., Kharchenko, A. I., & Shilov, A. I. (2008). O vybore parametrov porshnevoogo pnevmodvigatelya, rabotayushchego v sostave gibridnoy energoustanovki avtomobilya [On the selection of parameters of a piston air motor operating as part of a hybrid power plant of a car]. *Avtomobilnyy transport* [Automobile transport], 22, 7–13.
- [12] Prilutskiy, A. I., Molodov, M. A., Borzenko, Ye. I., & Prilutskiy, I. K. (2012). Rabota porshnevoogo parozhidkostnogo detandera pri kolebaniyakh davleniya v vykhlopnom trakte [The operation of the piston vapor-liquid expander with pressure fluctuations in the exhaust tract]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroyeniye»* [Bulletin of MSTU N.E. Bauman. Ser. «Engineering»], 129–142.
- [13] Prilutskiy, I. K., Arsen'yev, I. A., Molodov, M. A., Prilutskiy, A. A., & Shevtsova, A. I. (2015). Gazovyy porshnevoy detander nizkogo davleniya [Low pressure gas piston expander]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya «Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovaniye»* [Scientific journal NRU ITMO. Series «Refrigeration and Air Conditioning»], 3, 1–14.
- [14] Snazin, A. A., Molodova, YU. I., Prilutskiy, A. I., Prilutskiy, I. K., & Voroshilov, I. V. (2014). Analiz effektivnosti raboty porshnevoogo detandera pri peremennoy prodolzhitel'nosti protsessa napolneniya [Performance analysis of a piston expander with a variable duration of the filling process]. *Vestnik MAKH* [Bulletin of the MAX], Vyp. 1, 68–73.
- [15] Voronkov, A. I., Zhilin, S. S., & Nikitchenko, I. N. (2013). Zolotnikovoye vozdukhoraspredeleniye pnevmodvigatelya gibridnoy silovoy ustanovki avtomobilya na baze benzinovogo dvigatelya [Spool air distribution of an air motor of a hybrid power plant based on a gasoline engine]. *Vestnik KHNADU: sb. nauch. tr.* [Bulletin of KHNADU: Sat scientific tr.], Vyp. 63, 36–40.
- [16] Timoshevs'kiy, B. G., & Mitrofanov, O. S. (2019). Doslidzhennya parametriv roboti rotorno-porshnevoogo dviguna [The next parameter is the robot rotary piston engine]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Vseukrainskiy nauchno-tekhnicheskiiy zhurnal* [Internal Combustion Engines: All-Ukrainian Scientific and Technical Journal], 1, 3–8.
- [17] Zelenetskiy, S. B., Ryabkov, Ye. D., & Mikerov, A. G. (1976). *Rotatsionnyye pnevmaticheskiye dvigateli* [Rotary pneumatic engines]. – Leningrad: Mashinostroyeniye [Mechanical Engineering].

**Постановка проблеми.** Розроблення екологічно чистих енергетичних установок на базі розширювальних машин сьогодні є досить перспективним напрямом у відновлювальній енергетиці. Пневмодвигуни різної конструкції знайшли досить широке застосування в енергетичних установках різного призначення, наприклад, транспортних [1–3], підводних технічних засобах [4], установках для зрідження природного газу [5], утилізації енергії стиснутого природного газу при редукуванні в газотранспортних і газорозподільних системах [6; 7], кріогенних установках різної продуктивності й багатьох інших.

Одним із головних завдань під час проектування і створення енергетичних установок на базі розширювальних машин є підбір необхідного обладнання, зокрема вибір типу двигуна. Двигун обирається відповідно до призначення, умов і режимів експлуатації тієї чи іншої установки, виходячи передусім із необхідності забезпечення максимальної ефективності енергоперетворення енергії стиснутого робочого тіла, надійності, ремонтпридатності, високого ресурсу роботи, простоти в експлуатації та обслуговуванні й, безумовно, вартості виготовлення. На всі ці перераховані умови безпосередньо впливає досконалість і, відповідно, складність конструкції розширювальної машини та її систем. Найбільш складними елементами двигунів цього типу є механізми газообміну та руху, конструкція яких прямо пов'язана зі способом перетворення енергії (тобто принципом роботи двигуна – об'ємної або кінетичної дії), а також термодинамічною ефективністю. Саме тому цим елементам розширювальної машини приділяється найбільша увага під час конструювання та проєк-

тування, а також пред'являються підвищені вимоги щодо якості виготовлення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На ефективність енергоперетворення енергії стиснутого робочого тіла впливає багато різних факторів, починаючи від параметрів робочого тіла на вході (тиску й температури), його складу (наприклад, повітря, природний газ, водень тощо) та закінчуючи принциповою конструкцією (поршневі, роторні, турбодетандери) [8]. Так, у роботах [9; 10] розглянуто проблеми зниження мінімальної температури робочого тіла при збільшенні тиску на вході в пневмодвигун, а також проведено дослідження впливу попереднього підігріву робочого тіла на ефективні показники й визначення його мінімального значення. У роботі [11] авторами проаналізовано вплив параметрів робочого процесу при змінному значенні тиску на вході у двигун на ефективні показники, а також подано рекомендації щодо вибору параметрів пневмодвигуна гібридної енергетичної установки автомобіля.

Значна кількість робіт пов'язана з дослідженням впливу системи газообміну, її елементів і способу регулювання на ефективність енергоперетворення. Так, у роботі [12] виконано дослідження впливу коливань тиску відпрацьованого робочого тіла у випускному тракті. У праці [13] подана конструкція поршневого детандера з новою системою газообміну, яка базується на використанні нормально-відкритих самодіючих клапанів. Дослідження в роботі [14] присвячені аналізу ефективних показників роботи поршневого детандера при регулюванні тривалості процесу наповнення. Праця [15] присвячена можливій конвертації бензинового двигуна у двотактний пневмодвигун. При цьому для забезпечення роботи



пневмодвигуна запропоновано використання золотникового газорозподілу. Також авторами описано конструктивні особливості й вибір параметрів роботи цього типу газообміну.

**Виокремлення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Велика кількість досліджень у напрямі вдосконалення конструкції та підвищення ефективних показників розширювальних машин свідчить про актуальність і перспективність цього напрямку альтернативної екологічно-чистої енергетики. Більшість досліджень проводиться для двигунів класичних конструкцій. Найбільш розповсюдженою конструкцією механізму руху розширювальних машин є кривошипно-шатунний механізм (стиснуте робоче тіло розширюється в робочому циліндрі, тисне на поршень, який передає зусилля через шатун на колінчастий вал). Газообмін у таких двигунах може здійснюватися за рахунок золотника, клапанів, впускних і випускних вікон або комбінації клапанів і вікон. При цьому залежно від рівня складності й досконалості системи газообміну вона може бути регульованою або ні, що значно впливає на ефективні показники розширювальної машини.

Конструкція роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75 відрізняється від наявних двигунів як за механізмом руху, так і за способом організації й регулювання газообміну [16]. Виходячи із цього, розроблені різними дослідниками рекомендації щодо підвищення ефективних показників можна лише частково або в першому наближенні застосувати до роторно-поршневого двигуна нової конструкції.

**Мета статті** – дослідження впливу таких параметрів, як відносний мертвий об'єм, ступінь наповнення робочого циліндра й тиск робочого тіла перед двигуном на змінення ефективних показників роторно-поршневого двигуна нової конструкції.

**Методи, об'єкт та предмет дослідження.** Такі параметри роторно-поршневого двигуна, як відносний мертвий об'єм і ступінь наповнення робочого циліндра, прямо пов'язані з конструктивним виконанням двигуна (тобто для фізичного моделювання необхідне виготовлення декількох зразків двигуна), тому доцільним і більш раціональним із погляду матеріальних витрат є застосування саме методу математичного моделювання. Поставлена мета дослідження реалізується розрахунковим шляхом з використанням розробленої та апробованої програми розрахунку робочого циклу роторно-поршневого двигуна, яка враховує основні конструктивні й термодинамічні відмінності нового двигуна порівняно з класичними розширювальними машинами.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії стиснутого робочого тіла (повітря) при розширенні в робочому циліндрі роторно-поршневого двигуна.

Предметом дослідження є залежності й параметри, що характеризують процес перетворення енергії стиснутого робочого тіла (робочий цикл) у роторно-поршневому двигуні.

**Основний матеріал (результати).** Відповідно до загальноприйнятої класифікації, роторно-поршневий двигун нової конструкції належить до розширювальної машини об'ємної дії, тобто внутрішня енергія стиснутого робочого тіла перетворюється в інший вид енергії (механічну) за рахунок змінення об'єму (розширення) в разі переміщення поршня в робочому циліндрі. Перетворення енергії внаслідок розширення газу характеризується індикаторними (внутрішніми) показниками робочого процесу та відображається індикаторною діаграмою (зміна тиску робочого тіла в циліндрі від об'єму або кута повороту ротора). Оскільки в розширювальній машині, на відміну від двигуна внутрішнього згоряння, відбувається лише розширення робочого тіла (без хімічного процесу згоряння), найбільший вплив на індикаторні та ефективні показники має саме конструктивна досконалість двигуна. Значний вплив на ефективність енергоперетворення в поршневих об'ємних розширювальних машинах мають такі конструктивні параметри:

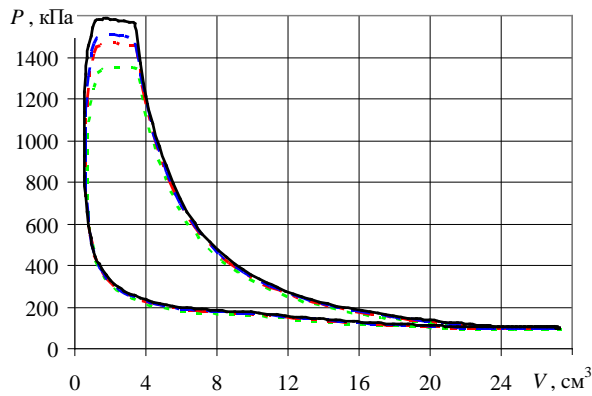
- конструкція органів газообміну й, відповідно, газодинамічний опір у них;
- наявність і величина мертвого об'єму;
- можливість регулювання режимів роботи двигуна за рахунок змінення ступеня наповнення;
- співвідношення ходу поршня та діаметра робочого циліндра, яке безпосередньо впливає на середню швидкість поршня й робочий об'єм двигуна.

Спосіб організації процесу газообміну прямо впливає на вигляд індикаторної діаграми та, відповідно, значення індикаторної роботи циклу (ефективність роботи двигуна). Конструктивно газообмін може здійснюватися через клапани, вікна або комбінацію вікон і клапанів, причому привід клапанів може бути різним від використання самодіючих клапанів до клапанів з гідравлічним приводом та електронним керуванням. Кожна конструкція має свої переваги та недоліки, більшість із яких пов'язана зі значним ускладненням конструкції двигуна.

Також конструкція механізму газообміну впливає на величину мертвого об'єму та можливість регулювання режимів роботи двигуна не тільки за допомогою зміни тиску на вході, а й за рахунок зміни ступеня наповнення. Так, наприклад, для двигунів із найбільш простою золотниковою схемою газорозподілу значення відносного мертвого об'єму може досягати 0,35...0,45 [8; 11; 17]. Таке велике значення відносного мертвого об'єму в цих схемах газорозподілу зумовлене насамперед наявністю значних за об'ємом каналів підведення робочого тіла, а також зазором між торцем робочого циліндра двигуна й поршнем. Використання більш складних схем газорозподілу істотно зменшує значення відносного мертвого об'єму (0,03...0,06), однак призводить до значного ускладнення конструкції й ваги двигуна, зменшує надійність та ускладнює обслуговування.

Розроблений на машинобудівному підприємстві ТОВ «Мотор-Плюс» роторно-поршневий

двигун 12РПД-4,4/1,75 має досить просту золотникову схему газообміну (центральный ротор виконує роль золотника, відкриваючи й закриваючи впускні та випускні отвори, що виконані в корпусі двигуна), яка забезпечує просту й компакту конструкцію. Оскільки двигун, по суті, є роторним, значення цього відносного об'єму, який зумовлений лише зазорами при виготовленні двигуна, може становити лише 0,015. На рис. 1 наведено вплив відносного мертвого об'єму на індикаторну діаграму роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75.



**Рис. 1.** Вплив відносного мертвого об'єму на індикаторну діаграму роторно-поршневого двигуна:

—  $\epsilon_0 = 0,020$ ; - -  $\epsilon_0 = 0,021$ ; - - -  $\epsilon_0 = 0,022$ ;  
- - - -  $\epsilon_0 = 0,025$

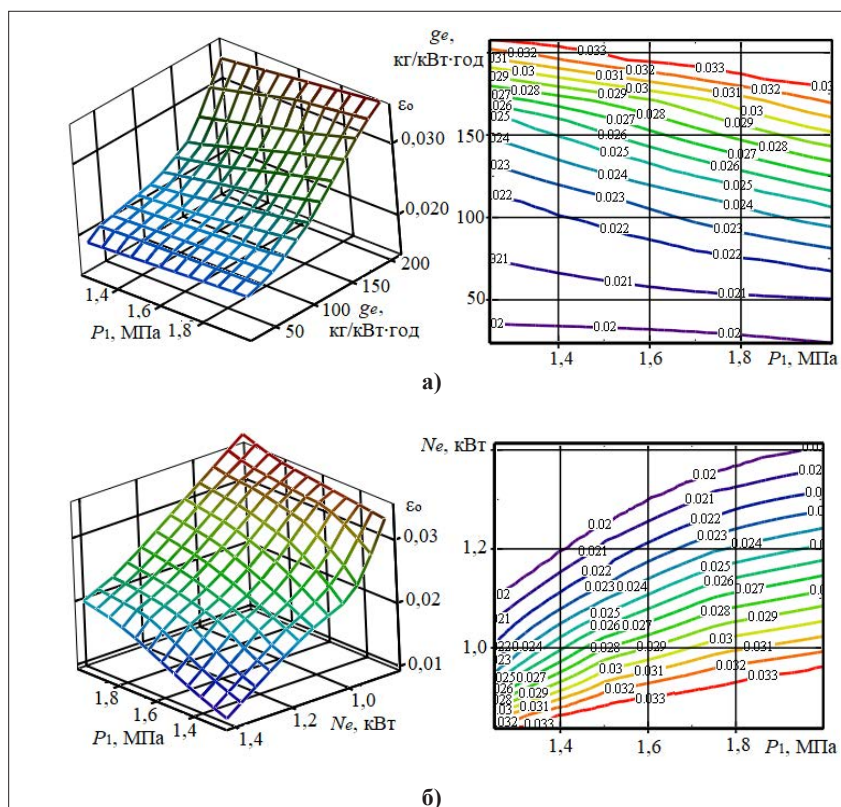
Значення тиску робочого тіла на вході в двигун було сталим і становило 2 МПа. З поданих діаграм чітко видно, що при зменшенні величини мертвого об'єму значення максимального тиску збільшувалося з 1,35 до 1,58 МПа, а також, відповідно, зростає індикаторна робота циклу (збільшення площі індикаторної діаграми).

На рис. 2 наведено вплив відносного мертвого об'єму на ефективні показники роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75 за різних значень тиску на вході.

З поданих залежностей видно, що при зменшенні величини мертвого об'єму з 0,025 до 0,020 (на 20%) значно знижується питома ефективна витрата робочого тіла із 32,9 до 23,8 кг/кВт·год (тобто на 27,7%) і збільшується ефективна потужність двигуна із 1,10 до 1,41 кВт (тобто на 22%) на всьому діапазоні змінення тиску на вході (1,25...2,00 МПа).

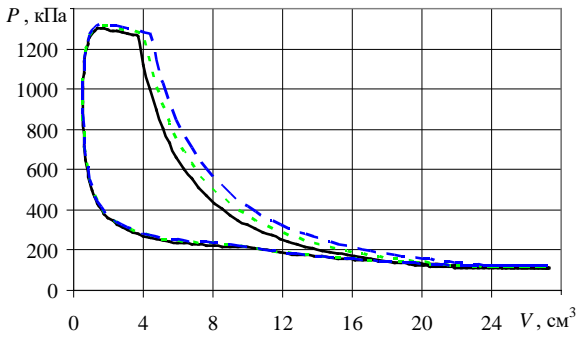
Зазвичай регулювання режимів роботи розширювальних машин здійснюють за рахунок зміни тиску робочого тіла на вході. Однак цей спосіб регулювання не дає змоги забезпечити максимальну ефективність енергоперетворення в усьому діапазоні режимів роботи двигуна. У сучасних двигунах із досить складною системою газорозподілу регулювання режимів роботи можна здійснювати за рахунок зміни ступеня наповнення (відношення об'єму робочого циліндра двигуна в період закінчення процесу наповнення до повного об'єму).

Конструкція механізму газорозподілу роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75 забезпечує



**Рис. 2.** Вплив відносного мертвого об'єму й тиску на вході в роторно-поршневий двигун на ефективні показники: а) питома ефективна витрата робочого тіла; б) ефективна потужність двигуна

регулювання зміни ступеня наповнення, при цьому є досить простою та надійною. Ступінь наповнення змінюється за рахунок повороту регульовального кулачка, що призводить до збільшення або зменшення кута початку та кінця подачі робочого тіла до циліндра двигуна [17]. На рис. 3 наведено вплив ступеня наповнення на індикаторну діаграму роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75. Значення тиску робочого тіла на вході у двигун було сталим і становило 1,5 МПа.



**Рис. 3.** Вплив ступеня наповнення на індикаторну діаграму роторно-поршневого двигуна:  
—  $\epsilon_1 = 0,135$ ; - -  $\epsilon_1 = 0,148$ ; - · -  $\epsilon_1 = 0,174$

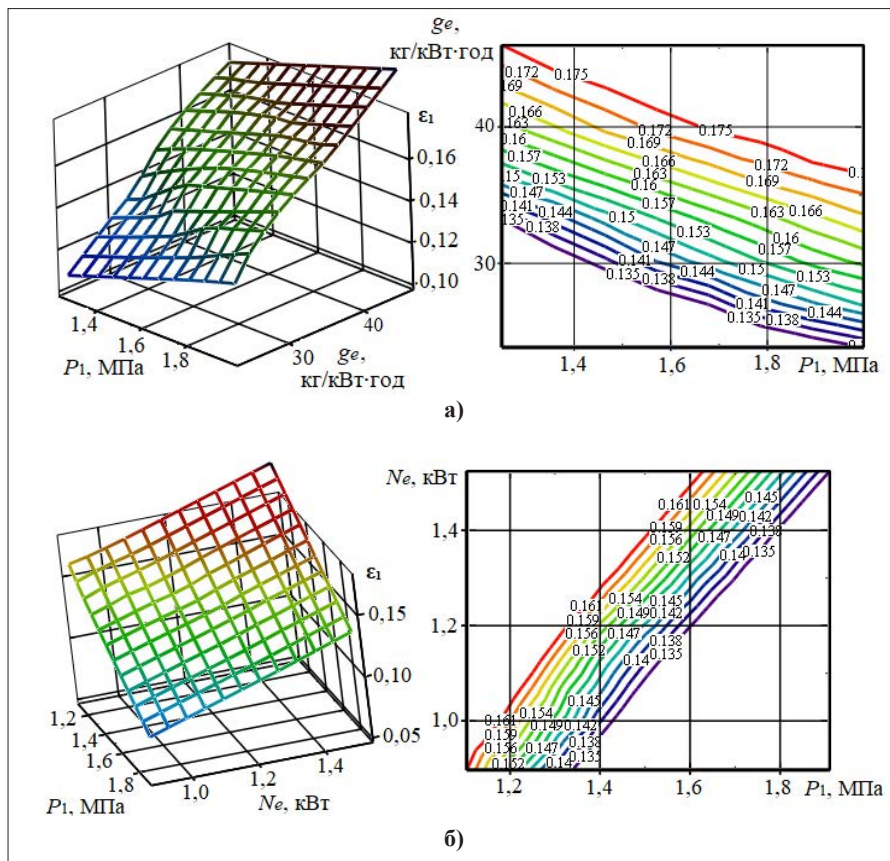
З поданих діаграм чітко видно, що при зростанні величини ступеня наповнення спостерігається збільшення площі індикаторної діаграми, тобто підвищення індикаторної роботи циклу та середнього ефективного тиску. Площа індикаторної діаграми зростає на ділянках наповнення й розширення робочого тіла.

На рис. 4 наведено вплив ступеня наповнення на ефективні показники роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75 за різних значень тиску на вході.

З поданих залежностей видно, що при зменшенні ступеня наповнення із 0,175 до 0,135 за рівних значень тиску перед двигуном (2 МПа) спостерігається зниження питомої ефективної витрати робочого тіла із 36,5 до 23,8 кг/кВт·год (тобто на 34,9%), а також деяке зниження ефективної потужності із 1,2 до 1,1 кВт (тобто на 8,3%). Збільшення тиску робочого тіла на вході у двигун при сталому значенні ступеня наповнення призводить також до покращення ефективних показників роторно-поршневого двигуна.

**Обговорення отриманих результатів.** Отже, ефективність енергоперетворення в роторно-поршковому двигуні прямо залежить від конструкції системи газорозподілу та параметрів робочого тіла на вході.

Забезпечення мінімального значення мертвого об'єму й можливості регулювання режимів робо-



**Рис. 4.** Вплив ступеня наповнення й тиску на вході в роторно-поршковий двигун на ефективні показники: а) питома ефективна витрата робочого тіла; б) ефективна потужність двигуна



ти двигуна за рахунок зміни ступеня наповнення є одним із головних завдань під час проектування системи газообміну та двигуна загалом. Крім того, необхідним є зменшення технологічних зазорів і покращення точності виготовлення елементів двигуна, що сприятиме мінімізації витоків газу з робочого циліндра.

Підвищення тиску робочого тіла на вході сприяє покращенню ефективних показників, однак призводить до зниження мінімальної температури відпрацьованого робочого тіла [8–10]. Зниження температури робочого тіла відбувається при дроселюванні (ефект Джоуля-Томсона), а також безпосередньо при розширенні в робочому циліндрі (ефект Сименса-Клода). Зниження мінімальної температури не має перевищувати допустимих значень, тому підвищення тиску на вході в роторно-поршневий двигун без попереднього підігріву робочого тіла або утилізації холоду можливе лише в певних межах і потребує окремого розгляду.

**Висновки.** Установлено, що збільшення відносного мертвого об'єму на 20% призводить до зрос-

тання питомої ефективної витрати робочого тіла на 27,7% і знижує ефективну потужність двигуна на 22%. Тому забезпечення мінімального значення відносного мертвого об'єму під час проектування та виготовлення двигуна є одним зі способів покращення його ефективних показників.

Визначено, що при зменшенні значення ступеня наповнення спостерігається зниження ефективних показників роторно-поршневого двигуна, причому зниження питомої ефективної витрати робочого тіла в 4,2 рази більше, ніж ефективної потужності, що дає змогу використовувати ступінь наповнення як ефективний спосіб регулювання експлуатаційних режимів двигуна та підвищення економічності.

Підвищення тиску робочого тіла на вході в роторно-поршневий двигун на 42% збільшує ефективну потужність на 41% (зростання потужності відбувається майже пропорційно зростанню тиску). Однак при збільшенні тиску необхідно враховувати зниження мінімальної температури циклу, що передусім може негативно вплинути на змащення деталей двигуна.

#### Список літератури:

- [1] Bhardwajsinh, Mahida & Dipak, C. Gosai. An Experimental Study on I.C. Engine Using Compressed Air as Alternate of Fuel. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2015. Vol. 4. № 12. P. 1787–1791.
- [2] Qihui Yu, & Maolin Cai. Experimental Analysis of a Compressed Air Engine. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*. 2015. № 3. P. 144–153. URL: <http://dx.doi.org/10.4236/jfcmv.2015.34014>.
- [3] Пневмодвигатель для автомобильной гибридной силовой установки / А.Н. Туренко, В.А. Богомолов, Ф.И. Абрамчук и др. *Автомобильный транспорт* : сборник научных трудов ХНАДУ. 2009. № 24. С. 7–10.
- [4] Митюков Н.В., Тулумбасов В.В. О возможности конструктивной реализации подводного буксировщика на основе пневматической машины. *Новый университет. Серия «Технические науки»*. 2012. № 3. С. 78–79.
- [5] Особенности работы парожидкостного детандера в составе установок ожижения природного газа / А.А. Рыжков, Ю.И. Молодова, А.И. Прилуцкий, И.К. Прилуцкий. *Вестник Международной академии холода*. 2012. № 3. С. 8–12.
- [6] Агабабов В.С., Корягин А.В. Определение энергетической эффективности использования детандер-генераторного агрегата в системах газоснабжения. *Теплоэнергетика*. 2002. № 12. С. 35–38.
- [7] Газовый поршневой детандер низкого давления / И.К. Прилуцкий, И.А. Арсеньев, М.А. Молодов, А.А. Прилуцкий, А.И. Шевцова. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование»*. 2015. № 3. С. 1–14.
- [8] Бумагин Г.И. Криогенные машины. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2007.
- [9] Воронков А.И., Тесленко Е.В., Удовик Т.А. Определение минимально необходимого подогрева сжатого воздуха на входе в автомобильный пневмодвигатель при различных условиях. *Вестник ХНАДУ* : сборник научных трудов. 2016. № 75. С. 100–108.
- [10] Воронков А.И. Влияние подогрева воздуха на эффективные показатели рабочего процесса пневмодвигателя. *Двигатели внутреннего сгорания* : Всеукр. науч.-техн. журн. НТУ «ХПИ». 2016.
- [11] О выборе параметров поршневого пневмодвигателя, работающего в составе гибридной энергоустановки автомобиля / А.Н. Туренко, В.А. Богомолов, Ф.И. Абрамчук, А.И. Кравченко, А.И. Шилов. *Автомобильный транспорт*. 2008. № 22. С. 7–13.
- [12] Работа поршневого парожидкостного детандера при колебаниях давления в выхлопном тракте / А.И. Прилуцкий, М.А. Молодов, Е.И. Борзенко, И.К. Прилуцкий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*. 2012. С. 129–142.
- [13] Газовый поршневой детандер низкого давления. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование»* / И.К. Прилуцкий, И.А. Арсеньев, М.А. Молодов, А.А. Прилуцкий, А.И. Шевцова. 2015. № 3. С. 1–14.
- [14] Анализ эффективности работы поршневого детандера при переменной продолжительности процесса наполнения / А.А. Сназин, Ю.И. Молодова, А.И. Прилуцкий, И.К. Прилуцкий, И.В. Ворошилов. *Вестник МАХ*. 2014. Вып. 1. С. 68–73.

- [15] Воронков А.И., Жилин С.С., Никитченко И.Н. Золотниковое воздухораспределение пневмодвигателя гибридной силовой установки автомобиля на базе бензинового двигателя. *Вестник ХНАДУ* : сборник научных трудов. 2013. Вып. 63. С. 36–40.
- [16] Тимошевський Б.Г., Митрофанов О.С. Дослідження параметрів роботи роторно-поршневого двигуна. *Двигатели внутреннего сгорания* : Всеукраинский научно-технический журнал. 2019. № 1. С. 3–8.
- [17] Зеленецкий С.Б., Рябков Е.Д., Микеров А.Г. *Ротационные пневматические двигатели*. Ленинград : Машиностроение, 1976.

---

© Митрофанов О. С.

Дата надходження статті до редакції: 29.04.2020

Дата затвердження статті до друку: 27.07.2020