

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

### MODELING OF PROCESSES IN METALLURGY AND MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.431

- Георгій Слинко д-р техн. наук, професор, професор кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: gslynko@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1954-8530
- Роман Сухонос магістр, старший викладач кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: romevs@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9683-3389
- Віра Слинко старший викладач кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vslynko@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4553-8387
- Віталій Лук'яненко магістр, незалежний дослідник, Німеччина

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЗОНАНСНОГО НАДДУВУ БЕНЗИНОВОГО ДВОТАКТНОГО ДВИГУНА НА ЙОГО ШВИДКІСНУ ХАРАКТЕРИСТИКУ

**Мета роботи.** Дослідити ефективність резонансного наддуву двотактного бензинового двигуна; поліпшити енергетичні характеристики існуючого двигуна внутрішнього згорання шляхом встановлення модернізованої системи резонансного наддуву.

**Методи дослідження.** Наведено результати розрахунку резонатора системи випуску двотактного бензинового двигуна за комбінованою методикою Блера і Григор'єва. Моделювання потоків відпрацьованих газів виконувалось в середовищі САПР SolidWorks Flow Simulation. Для розрахунку циклу двигуна використовувалась комп'ютерна програма Engine Calculation. Об'єкт дослідження – двотактний одноциліндровий бензиновий двигун мотоцикла ІЖ Планета Спорт 350.

**Отримані результати.** Вирішено актуальне питання підвищення потужності 2-тактного бензинового ДВЗ за рахунок реалізації явища резонансного наддуву в системі випуску відпрацьованих газів. Виконано розрахунок термодинамічного циклу двигуна ІЖ Планета Спорт 350 з визначенням його основних циклових параметрів, тиску та температури відпрацьованих газів. Виконано розрахунок резонатора, який забезпечить максимальне покращення показників двигуна на номінальному режимі роботи; побудовано 3D моделі системи випуску в трьох варіантах: базової конструкції (без резонатора), з резонатором заводу-виробника, та з резонатором власної розробки авторів дослідження. Виконано моделювання переміщення відпрацьованих газів в резонаторах різних моделей в середовищі SolidWorks Flow Simulation. Виконано стендові випробування двигуна на навантажувальному стенді, побудовані швидкісні характеристики при роботі з різними системами випуску.

**Наукова новизна.** Отримано модель руху робочої суміші в резонаторі системи випуску на режимі резонансу. Доведено, що в розрахованому резонаторі дійсно відбувається повернення 15...20 % робочої суміші назад до циліндру. Встановлено, що двигун ІЖ Планета Спорт 350 з модернізованою системою випуску за рахунок реалізації резонансного наддуву має максимальну ефективну потужність 24,4 кВт – на 3 % більшу, ніж базовий двигун.

**Практична цінність.** Методика розрахунку впливу ефектів резонансного наддуву бензинового 2-тактного двигуна на ефективні показники двигуна може бути використана при проектуванні нових та модернізації існуючих ДВЗ різного призначення.

**Ключові слова:** 2-тактний двигун внутрішнього згорання, відпрацьовані гази, ефективна потужність, резонансний наддув, резонатор, система випуску, швидкісна характеристика.

## Вступ

В багатьох сферах використання 2-тактних ДВЗ є більш доцільним, ніж 4-тактних. 2-тактні ДВЗ мають більш просту конструкцію, більшу питому потужність. Проте їх розвиток та сфера використання суттєво обмежені сучасними екологічними вимогами. Тим не менше, 2-тактні ДВЗ є актуальними в малій авіації, засобах малої механізації.

Сучасні дослідники [1–5] розглядають, як найбільш перспективні, наступні основні напрямки підвищення економічності та екологічності 2-тактних ДВЗ:

- повернення частини відпрацьованих газів в циліндр – для догорання залишкових (неспалених) вуглеводнів;
- організація безпосереднього впорскування палива в циліндр;
- організація пошарового введення свіжого заряду.

Другий і третій напрямки забезпечують найбільш ефективно покращення показників двигуна, проте вимагають суттєвої зміни конструкції та введення дороговартісних технічних рішень. Реалізація першого принципу можлива або організацією рециркуляції частини відпрацьованих газів або використанням явища резонансу у випускній системі.

Саме по собі явище резонансного наддуву відомо та досліджено вже доволі давно, проте мають місце значні проблеми щодо його практичного впровадження в кожному окремому випадку під окремий двигун. А зважаючи на очікування вичерпаності паливних енергоресурсів, покращення діючих зразків 2-тактних ДВЗ різного призначення є актуальним науковим та практичним питанням.

### Аналіз досліджень та публікацій

Принципова відмінність між двотактним і чотиритактним двигунами полягає в тому, що в двотактних двигунах випуск відпрацьованих газів і надходження нової порції паливо-повітряної суміші здійснюються практично одночасно. При цьому виникають дві проблеми: з одного боку, відпрацьований газ частково залишається в циліндрі, що зменшує потужність при подальшому такті, оскільки суміш, що знаходиться в камері згорання, менш схильна до займання. З іншого боку, через випускне вікно разом з відпрацьованим газом виходить і частина свіжої суміші, що призводить до більш високої витрати палива і створює загрозу для забруднення навколишнього середовища. Ці недоліки можна мінімізувати шляхом створення випускної труби особливої форми. Перш за все, випускна труба розширюється конусоподібною насадкою – дифузorzом. У ньому, на відміну від циліндра, виникає знижений тиск, внаслідок чого відпрацьований газ, отриманий в процесі згорання, відсмоктується при відкритті випускного вікна циліндра. Проте, відразу після цього необхідно створити підвищений тиск, що дозволить утримувати в циліндрі свіжу паливно-

повітряну суміш, до тих пір, поки знов не закриється випускне вікно. Щоб створити даний тиск, після дифузора встановлюється другий, звужуючий, конус. Від нього відбивається частина газу, що виходить через глушник. Внаслідок цього через вихідний отвір випускної труби витікає лише частина газу. Частина хвилі, що залишається, відбивається в напрямку випускного вікна циліндра і затримує там свіжу порцію газу наступного такту (рисунок 1).

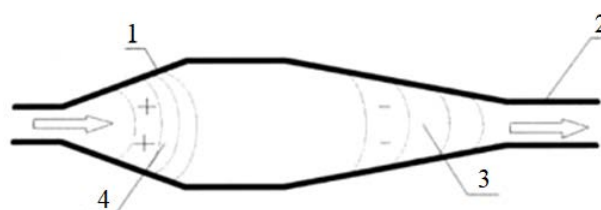


Рисунок 1. Розподіл тиску у випускній системі [6]:

- 1 – випускна система; 2 – патрубок; 3 – зона пониженого тиску; 4 – зона підвищеного тиску

Для досягнення якомога кращих показників двигуна необхідно забезпечити співставність величин кількості і швидкості випускного газу з часом відкриття випускного вікна, для забезпечення якісної продувки – високого значення коефіцієнта наповнення і низького значення коефіцієнта залишкових газів. Слід мати на увазі, що режим резонансу відпрацьованих газів для резонатора простої конструкції може відбуватись тільки у певному діапазоні швидкостей обертання колінчастого валу. Велике значення має величина і довжина випускної труби [7, 8].

Якщо випускна система буде надмірно великою в діаметральній площині, то тиск буде занадто малим, і досить багато свіжої паливно-повітряної суміші буде виходити через випускну трубу. Якщо ж випускна система занадто мала, то тиск хвилі буде дуже високим і згорілий газ не зможе виходити належним чином. Збільшення тиску веде до підвищення температури випускної системи і двигуна, що створює більшу вірогідність прогорання поршня.

Все це має велике значення, однак, оскільки двотактні двигуни існують вже давно, і їх дослідженням займалися багато вчених то відомий цілий ряд формул, що враховують параметри 2-тактних ДВЗ [6–12].

Оскільки для розрахунку системи випуску 2-тактного ДВЗ необхідно враховувати значну кількість емпіричних коефіцієнтів, що встановлюються дослідним шляхом, при розробці нових двигунів оптимальні розміри елементів системи випуску часто визначають експериментально на гальмівному стенді. Нерідко серія експериментів дозволяє значно швидше і точніше, ніж розрахунковим шляхом, визначити всі необхідні характеристики конкретної конструкції ДВЗ.

За минулі десятки років розвитку ДВЗ увага двигунобудівників до систем випуску то слабшала, то

посилювався. Основні результати досліджень (насамперед за межами України) були отримані з впровадженням обчислювальної техніки. В СРСР дослідження проводилися не надто систематично і неповно. Однак досягнуті результати свідчать про те, що роботи такі велися і були остаточно припинені лише наприкінці 1980-х років.

До того часу в Європі склалися істотно відмінні, від прийнятих в нашій моторобудівній промисловості, схеми, конфігурації і методи розрахунку випускних систем згідно з працями Григор'єва [10, 13]. У працях Блера [9, 14] описуються інші підходи до конструювання резонаторів, однак саме такі резонатори встановлюються практично на всіх імпортованих мотоциклах з двотактними двигунами. Основними даними для розрахунку системи випуску є величини середнього ефективного тиску і температури відпрацьованих газів.

Блер спирається на результати великої кількості експериментів, даючи розроблені ним формули. На жаль, його методики розрахунку не дають конкретних відповідей в питаннях взаємозв'язку довжин і діаметрів елементів резонатора та системи випуску і ефективності роботи двигуна.

#### Мета роботи

Дослідити ефективність резонансного наддуву двотактного бензинового двигуна; поліпшити енергетичні характеристики існуючого двигуна внутрішнього згорання шляхом встановлення модернізованої системи резонансного наддуву.

#### Матеріал і методика досліджень

Дослідження впливу резонансного наддуву на швидкісну характеристику двигуна виконано за наступною методикою.

- розрахунок термодинамічного циклу двигуна з визначенням його основних циклових параметрів, тиску та температури відпрацьованих газів – за допомогою комп'ютерної програми Engine Calculation [15];

- розрахунок розмірів резонатора, який забезпечить високий рівень резонансу в системі випуску на всіх режимах роботи двигуна, – за методикою [9, 14];

- побудова 3D моделі резонаторів базової конструкції, та модернізованого – в середовищі SolidWorks;

- моделювання переміщення відпрацьованих газів в резонаторах різних моделей – в середовищі SolidWorks Flow Simulation;

- експериментальна перевірка ефективності базової системи випуску, а також системи з резонатором – з побудовою зовнішньої швидкісної характеристики.

В роботі розглянуто та порівняно 3 варіанти системи випуску двигуна мотоцикла ІЖ Планета Спорт 350:

- система базової конструкції, без резонатора;

- система з резонатором, запропонована заводом-виробником;

- система з резонатором, запропонована авторами роботи.

#### Виклад основного матеріалу дослідження

Виконано розрахунок резонатора для двигуна ІЖ Планета Спорт 350. Оскільки існує велике різноманіття систем резонансного наддуву, було прийнято рішення для встановлення на досліджуваній двигун резонансного наддуву з двоступінчастим дифузorzом випускної системи.

Система резонансного наддуву залежить від великої кількості індивідуальних показників двотактного двигуна. В якості об'єкта дослідження обрано 1-циліндровий бензиновий двигун мотоцикла ІЖ Планета Спорт 350 робочим об'ємом  $340 \text{ см}^3$ , ступенем стиснення  $10 \dots 10,5$ , номінальною потужністю  $N_e = 22,1 \text{ кВт}$  при  $n = 6100 \dots 6700 \text{ хв}^{-1}$ . Максимальний обертальний момент двигуна  $35 \text{ Н}\cdot\text{м}$  при  $n = 5600 \dots 5800 \text{ хв}^{-1}$ . Максимальна частота обертання колінчастого валу  $n = 7200 \text{ хв}^{-1}$ . Схема продувки – трьохканальна, з п'ятьма продувочними вікнами. Двигун карбюраторний, з карбюратором МІКУНІ АЕХ, із повітряним охолодженням циліндра набігаючим потоком повітря [16].

В розрахунках роботи системи випуску ІЖ Планета Спорт 350 приймалось, що випуск відбувається при повороті колінчастого валу на  $94^\circ 5'$  від верхньої мертвої точки (ВМТ), випускне вікно залишається відкритим  $171^\circ$ , тобто випускне вікно повністю закривається через  $265^\circ 5'$  ПКВ. Процес дозаряду відбувається після проходження нижньої мертвої точки (НМТ), приблизно  $85^\circ 5'$  триває інтенсивний випуск відпрацьованих газів, потім ще приблизно  $10^\circ$  ПКВ – випуск за рахунок інерції, коли поршень піднімається вгору. Тому при резонансному наддуву процес дозаряду може відбуватися зі  $190^\circ$  до  $265^\circ 5'$  і триває  $75^\circ 5'$  ПКВ [16].

Після розрахунку термодинамічного циклу двигуна за допомогою комп'ютерної програми Engine Calculation [15] та визначення величини середнього ефективного тиску  $p_e = 0,7 \text{ МПа}$ , за емпіричною формулою розраховано середню температуру випускних газів при проходженні випускного вікна [9]:

$$T_k = 534,67e^{0,048p_e} = 534,67e^{0,048 \cdot 7} = 794,5 \text{ К}, \quad (1)$$

де  $534,67$  і  $0,048$  – емпіричні коефіцієнти;  $P_e$  – середній ефективний тиск, бар.

Далі визначено швидкість тиску хвиль, яка використовується в розрахунку резонатора:

$$a_0 = \sqrt{\gamma RT_k} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 794,5} = 548,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}, \quad (2)$$

де  $\gamma = 1,4$  – емпіричний коефіцієнт;  $R = 287 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  – універсальна газова стала;  $T_k$  – температура випускних газів, К.

Визначено довжину резонатора  $L_t$  за допомогою методики Блера [9, 14], яка показує, що довжина резонатора визначається до кінця звужуючого конусу

$$L_t = \frac{1000 \cdot a_0 \cdot Q_{ep}}{12n} = \frac{1000 \cdot 548,8 \cdot 171}{12 \cdot 6700} = 1167 \text{ мм}, \quad (3)$$

де  $a_0$  – швидкість звуку в відпрацьованих газах,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $Q_{ep}$  – довжина фази випуску, ° повороту колінчастого валу (ПКВ) [10];  $n$  – кількість обертів двигуна, для яких розраховується резонатор,  $\text{хв}^{-1}$ .

Ефективний діаметр випуску – діаметр труби, який відповідає випускному вікну гільзи двигуна

$$D_b = \sqrt{\frac{ab}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 30 \cdot 32 \cdot 2}{3,14}} = 50 \text{ мм}, \quad (4)$$

де  $a$  – ширина випускного вікна, мм;  $b$  – висота випускного вікна, мм;  $2$  – кількість випускних вікон розрахованого двигуна.

Далі розраховано коефіцієнти випуску, що використовуються в розрахунку резонатора. Вони є функціями режиму та типу двигуна:

- коефіцієнт для визначення діаметра кінця звужуючого конуса (конфузор):

$$K_0 = 1,0322e^{-0,0498p_e} = 1,0322e^{-0,0498 \cdot 7} = 0,73; \quad (5)$$

- коефіцієнт для визначення початкового діаметра конуса, що розширюється (дифузор):

$$K_1 = 1,9899e^{-0,0581p_e} = 1,9899e^{-0,0581 \cdot 7} = 1,33; \quad (6)$$

- коефіцієнт для визначення діаметра центральної циліндричної частини резонатора:

$$K_2 = 0,8439e^{-0,1226p_e} = 0,8439e^{-0,1226 \cdot 7} = 2,01. \quad (7)$$

Виконано розрахунок розмірів довжин основних частин випускної системи з двоступінчастим розширенням дифузору, за методикою [10]:

- довжина випускного патрубку, що знаходиться у циліндрі двигуна, вимірюється від стінки поршня до фланця кріплення резонатора

$$L_1 = 0,1 \cdot L_t = 0,1 \cdot 1167 = 116,7 \text{ мм}, \quad (8)$$

де  $L_t$  – довжина модернізованої випускної системи, мм;

- довжина першої ступені дифузора

$$L_2 = 0,41 \cdot L_t = 0,41 \cdot 1167 = 478,5 \text{ мм}; \quad (9)$$

- довжина другої ступені дифузора

$$L_3 = 0,14 \cdot L_t = 0,14 \cdot 1167 = 163,4 \text{ мм}; \quad (10)$$

- довжина центральної циліндричної частини випускної системи

$$L_4 = 0,11 \cdot L_t = 0,11 \cdot 1167 = 128,4 \text{ мм}; \quad (11)$$

- довжина конфузора

$$L_5 = 0,24 \cdot L_t = 0,24 \cdot 1167 = 280 \text{ мм}; \quad (12)$$

- довжина кінцевої циліндричної частини (хвостовика)

$$L_6 = L_5 = 280 \text{ мм}. \quad (13)$$

Розрахунок діаметрів основних частин випускної системи, за методикою [10]:

- початковий діаметр двоступінчастого дифузора

$$D_1 = K_1 D_b = 1,33 \cdot 50 = 66,5 \text{ мм}; \quad (14)$$

- середній діаметр двоступінчастого дифузора

$$D_2 = D_1 \left( \frac{D_3}{D_1} \right)^{\left( \frac{L_2}{L_2 + L_3} \right)^{1,33}}, \quad (15)$$

$$D_2 = 66,5 \left( \frac{100,5}{66,5} \right)^{\left( \frac{478,5}{478,5 + 164,3} \right)^{1,33}} = 87 \text{ мм};$$

- діаметр центральної циліндричної частини

$$D_3 = K_2 D_b = 2,01 \cdot 50 = 100,5 \text{ мм}; \quad (16)$$

- кінцевий діаметр конфузора

$$D_4 = K_0 D_b = 0,73 \cdot 50 = 36,5 \text{ мм}. \quad (17)$$

Після проведення розрахунку резонансної випускної системи проведено деякі уточнення, у зв'язку з тим, що на конкретному двигуні деякі розміри змінити неможливо. Початковий діаметр дифузора  $D_1$ , до якого буде приєднано фланець кріплення резонатора до циліндра двигуна, прийнято 52 мм. Довжину випускного патрубку  $L_1$  прийнято 88 мм. Дані розміри виміряно на діючому двигуні.

Проведено перерахунок довжини  $L_2$  з урахуванням того, що модернізована довжина резонатора не повинна змінюватись:

$$L_2 \text{ перераховане} = L_2 + L_1 - L_2 \text{ дійсне}, \quad (18)$$

$$L_2 \text{ перераховане} = 478,5 + 116,7 - 88 = 507,2 \text{ мм}.$$

З урахуванням даних розмірів і поправок побудовано схему резонатора (рис. 2).

Виконано порівняльну характеристику конструктивних особливостей випускної системи

базового і модернізованого двигунів. Базова система випуску (рис. 3а) має конічну та циліндричну частину, але відсутній дифузор після циліндричної частини. Відсутність даної частини не дає змоги відбуватися резонансному наддуву, внаслідок чого недопалена частина робочої суміші викидається безповоротно в атмосферу. Тому використання даної випускної системи є небажаним.

Розроблена авторами роботи система випуску (рисунок 3в), на відміну від системи випуску, запропованої заводом-виробником (рис. 3б), має двоступінчастий конфузор, за рахунок якого перехідний режим є більш плавним. Також зменшились розміри випускної системи без втрати її основних характеристик, що є важливими при встановленні на мотоцикл.

Побудовано тривимірні моделі базової та модернізованих систем випуску, проведено їх аналіз в середовищі SolidWorks Flow Simulation. Для цього було задано параметри руху робочої суміші та отримана модель руху робочої суміші на режимі

резонансу (рис. 4). За результатом дослідження встановлено, що 15...20% робочої суміші, яка залишає випускне вікно, повернулося назад до циліндру двигуна. Ця, повернута, частина суміші забезпечує суттєве зростання потужності двигуна, при незмінній годинній витраті палива.

За допомогою випробувального навантажувального стенду власної розробки визначено ефективні показники двигуна ІЖ Планета Спорт 350 з трьома варіантами системи випуску двигуна:

- система базової конструкції, без резонатора;
- система з резонатором, запропонована заводом-виробником;
- система з резонатором, запропонована авторами роботи.

На рис. 5 наведено швидкісні характеристики ефективної потужності, залежної від частоти обертання двигуна. Встановлено, що потужність двигуна на режимі резонансу зростає на 3% при незмінній витраті палива.

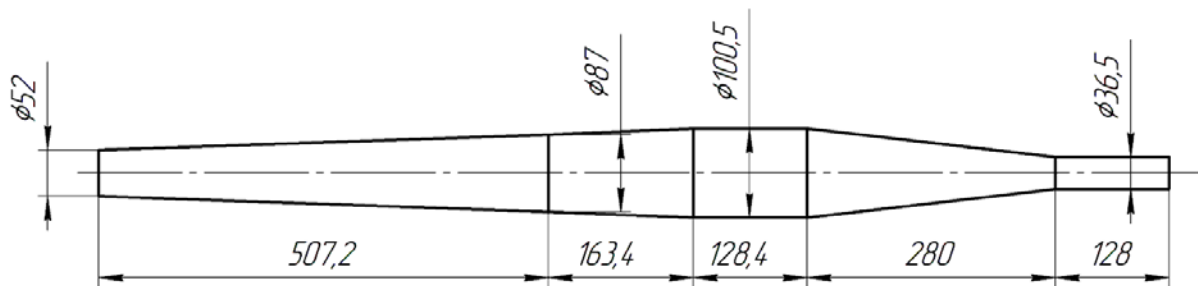


Рисунок 2. Ескіз спроектованого резонатора з основними розмірами

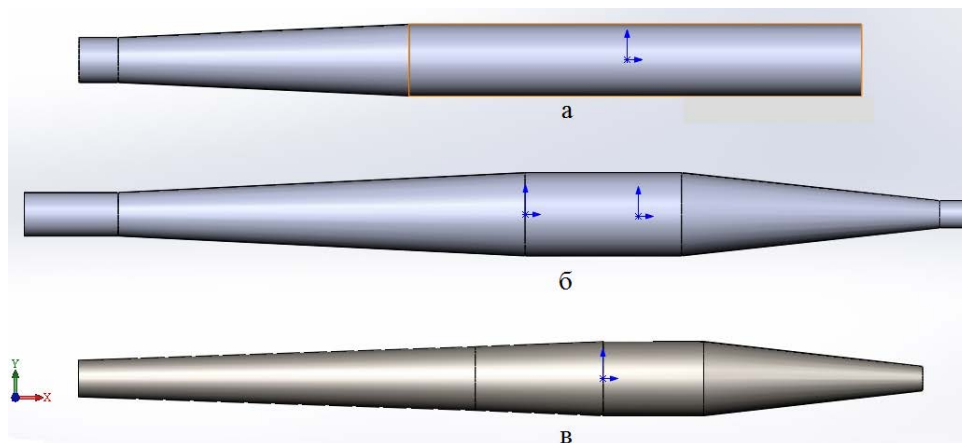
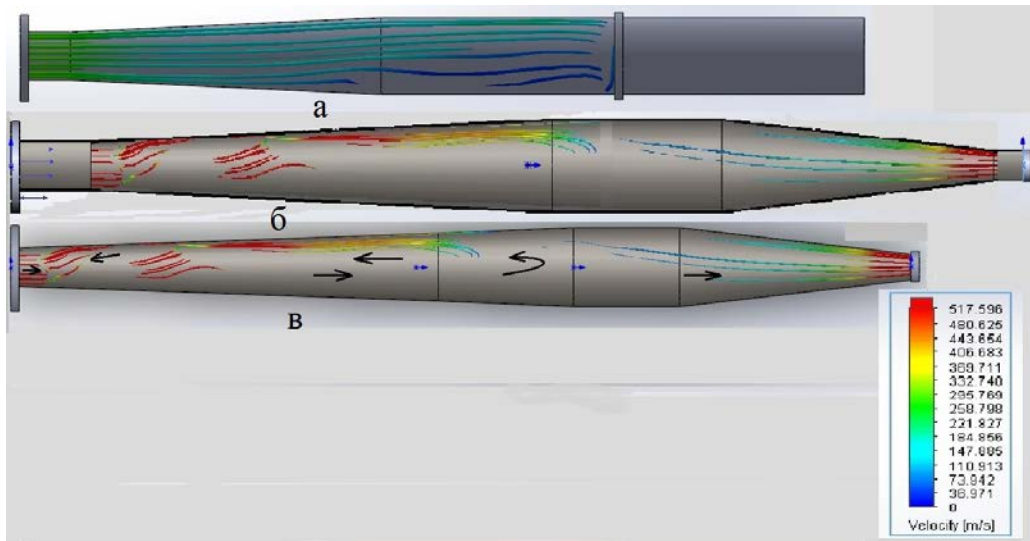


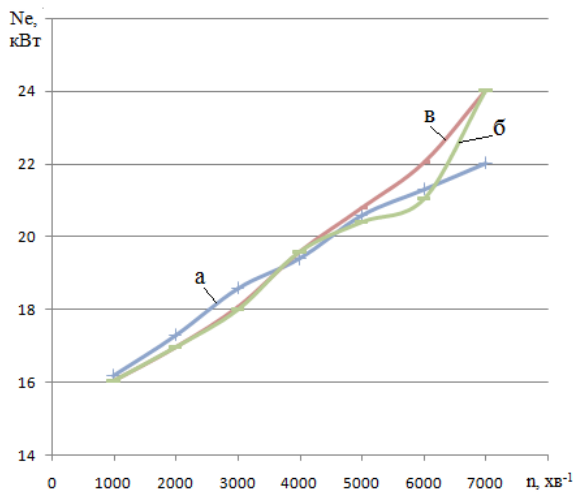
Рисунок 3. Випускні системи двигуна ІЖ Планета Спорт 350 (варіанти):

- а – базова випускна система; б – модернізована випускна система резонансного наддуву, запропонована заводом-виробником;  
в – модернізована система резонансного наддуву, запропонована авторами роботи



**Рисунок 4.** Схема руху відпрацьованих газів у випускних системах:

*a* – базова випускна система; *б* – модернізована випускна система резонансного наддуву, запропонована заводом-виробником; *в* – модернізована система резонансного наддуву, запропонована авторами роботи



**Рисунок 5.** Залежність зміни потужності двигуна ДЖ Планета Спорт 350 від кількості обертів колінчастого валу:

*a* – базова випускна система; *б* – модернізована випускна система резонансного наддуву, запропонована заводом-виробником; *в* – модернізована система резонансного наддуву, запропонована авторами роботи

### Висновки

1. За допомогою програми САПР SolidWorks отримано модель руху робочої суміші в резонаторі системи випуску у режимі резонансу. Дану модель можна вважати близькою до реального процесу в резонаторі. Доведено, що в розрахованому резонаторі дійсно відбувається повернення 15...20 % робочої суміші назад до циліндру.

2. Встановлено, що двигун з модернізованою системою випуску за рахунок реалізації резонансного наддуву має максимальну ефективну потужність 24,4 кВт – на 3 % більшу, у порівнянні з базовим двигуном.

### Список літератури

1. Корогодський В.А. Наукові основи перспективних робочих процесів двигунів з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / Корогодський Володимир Анатолійович. – Харків, 2018. – 499 с.
2. Дмитриев П. 2-х тактныe двигатели с системой впрыска масла [Електронний ресурс] / П. Дмитриев. – Сайт «kater.ua». – 2013. – Режим доступу: [http://kater.ua/usefull/articles/2kh\\_takny\\_e\\_dvigateli\\_s\\_si\\_stemoy\\_vpryska\\_masla/](http://kater.ua/usefull/articles/2kh_takny_e_dvigateli_s_si_stemoy_vpryska_masla/)
3. Singh A.K. Current Status of Direct Fuel Injection in Two Stroke Petrol Engine - A Review / A.K. Singh, A. Lanjewar, A. Rehman // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. – Vol. 12, Issue 2 Ver. II. 2015, P. 2320–2334. doi: 10.9790/1684-12228693.
4. Слинко Г.І. Аналіз напрямків покращення економічності та екологічності 2-тактних двигунів внутрішнього згорання / Г.І. Слинко, Р.Ф. Сухонос, В.В. Слинко // Інноваційні аспекти розвитку автомобільного транспорту України : Міжнарод. наук.-практ. конф., 16-18 травня 2023 р. : Тези доповідей. – Кам'янське : ДДТУ, 2023. – С. 123–125.
5. Слинко Г.І. Дослідження впливу резонансного наддуву бензинового двотактного двигуна на його ефективні і екологічні характеристики / Г.І. Слинко, В.П. Лук'яненко // Тиждень науки – 2015 : зб. тез доп. наук.-практ. конф. викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів, студентів ЗНТУ. В 5 т. – Т. 1. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. – С. 210.
6. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для втузов / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под. ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 372 с.



7. Корогодский В.А. Оценка показателей газообмена при 3D-моделировании рабочего процесса двухтактного бензинового двигателя / В.А. Корогодский, Е.П. Воропаев // Автомобильный транспорт. – 2017. – № 40. – С. 101–113.
8. Sufei Wang. Simulation Research on the Effect of 2-Stroke Engine Exhaust Resonance on Aspiration / Sufei Wang, Fujun Zhang // Journal of Beijing Institute of Technology. – 2020. – 29(3). – P. 410–416. doi: 10.15918/j.jbit1004-0579.19108
9. Blair G.P. Design and Simulation of Two Stroke Engines / Society of Automotive Engineers, Queens University Belfast, 1996 – 647 p.
10. Двухтактные карбюраторные двигатели внутреннего сгорания / В.М. Кондрашов, Ю.С. Григорьев, В.В. Тупов и др. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.
11. Орлин А.С. Двухтактные двигатели внутреннего сгорания / А.С. Орлин, М.Г. Круглов. – М. : Машгиз, 1960. – 556 с.
12. Березин С.Р. Теория и расчет газодинамических процессов в быстроходном 2-х тактом турбопоршневом двигателе : Автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.02 / Березин Сергей Романович. – М., 1994. – 30 с.
13. Григорьев Ю.С. Мотоцикл без секретов. – М. : Машиностроение, 1973. – 113 с.
14. Blair G.P. The Basic Design of the Two Stroke Engine / Queens University Belfast, Society of Automotive Engineers. 1990 – 104 P.
15. Слинко Г.І. Тепловий і динамічний розрахунок ДВЗ : навчальний посібник з курсового проектування / Г.І. Слинко, Р.Ф. Сухонос, В.В. Слинко. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 130 с.
16. ИЖ Планета Спорт 350: инструкция по эксплуатации. – Ижевск, 1979. – 96 с.

Одержано 26.12.2024

## RESEARCH ON THE INFLUENCE OF RESONANT CHARGING OF A TWO-STROKE GASOLINE ENGINE ON ITS POWER CURVE

- Georgy Slynko Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Power Plants, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: gslynko@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1954-8530
- Roman Sukhonos M. Sc., Senior lecturer of the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Power Plants, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: romevs@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9683-3389
- Vira Slinko Senior lecturer of the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Power Plants, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vslinko@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4553-8387
- Vitaly Lukyanenko M. Sc., Independent Researcher, Germany

**Purpose.** Investigate the efficiency of resonant charging of a two-stroke gasoline engine; to improve the energy characteristics of an existing internal combustion engine by installing an improved resonant exhaust system.

**Research methods.** The results of calculating the resonator of the exhaust system of a two-stroke gasoline engine using the combined Blair and Grigoriev method are presented. The modeling of exhaust gas flows was performed in the SolidWorks Flow Simulation. The Engine Calculation computer program was used to calculate the engine cycle. The object of the research is a two-stroke single-cylinder gasoline engine of the IZH Planeta Sport 350 motorcycle.

**Results.** The current issue of increasing the power of a 2-stroke gasoline internal combustion engine by implementing the phenomenon of resonant charging in the exhaust system has been resolved. The thermodynamic cycle of the IZH Planeta Sport 350 engine has been calculated with the determination of its main cycle parameters, exhaust gas pressure and temperature. The resonator has been calculated, which will provide maximum improvement in engine performance at nominal operating mode; 3D models of the three versions of exhaust system have been built: basic design (without resonator), with a resonator of the manufacturer, and with a resonator of the authors of the study's own design. The movement of exhaust gases in resonators of different models has been simulated in the SolidWorks Flow Simulation environment. Bench tests of the engine have been performed on a load bench, and speed characteristics have been built when working with different exhaust systems.

**Scientific novelty.** A model of the movement of the working mixture in the resonator of the exhaust system in the resonance mode was obtained. It was proved that in the calculated resonator, 15...20 % of the working mixture is actually returned back to the cylinder. For the first time, it was established that the IZH Planeta Sport 350 engine with a modernized exhaust system due to the implementation of resonant charging has a maximum effective power of 24.4 kW - 3% more than the basic engine.

**Practical value.** The method for calculating the influence of the effects of resonant charging of a gasoline 2-stroke engine on the effective performance of the engine can be used when designing new and modernizing existing internal combustion engines for various purposes.

**Key words:** 2-stroke internal combustion engine, exhaust gases, effective power, resonant charging, resonator, exhaust system, power curve.

## References

1. Korohodskiy, V. A. (2018). *Naukovi osnovi perspektivnih robochih procesiv dviguniv z iskrovim zapalyuvannyam pri vnutrishnomu sumishoutvorenni* [Scientific foundations of promising working processes of spark-ignition engines with internal mixture formation] : dissertation... d-ra tehn. nauk : 05.05.03, Kharkiv, 499 [in Ukrainian].
2. Dmitriev, P. (2013). 2-h taktnye dvigateli s sistemoy vpryska masla [2-stroke engines with an oil injection system]. *kater.ua*. – Retrieved from [http://kater.ua/usefull/articles/2kh\\_taktnye\\_dvigateli\\_s\\_sistemoy\\_vpryska\\_masla/](http://kater.ua/usefull/articles/2kh_taktnye_dvigateli_s_sistemoy_vpryska_masla/) [in Russian]
3. Singh, A.K., Lanjewar, A., Rehman, A. (2015) Current Status of Direct Fuel Injection in Two Stroke Petrol Engine - A Review // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 12, Issue 2 Ver. II, 2320–2334. doi: 10.9790/1684-12228693 [in English].
4. Slyn'ko, G.I., Suhonos, R.F., Slinko, V.V. (2023). Analiz napryamkiv pokrashennya ekonomichnosti ta ekologichnosti 2-taktnih dviguniv vnutrishnogo zgorannya [Analysis of directions for improving the economics and environmental friendliness of 2-stroke internal combustion engines]. Proceedings from International Scientific and Practical Conference *Innovacijni aspekti rozvitku avtomobilnogo transportu Ukrayini – Innovative aspects of the development of automobile transport in Ukraine*, 123–125. Kam'yanske: DDTU [in Ukrainian].
5. Slyn'ko, G.I., Lukyanenko, V.P. (2015). Doslidzhennya vplivu rezonansnogo nadduvu benzinovogo dvotaktnogo dviguna na jogo effektivni i ekologichni charakteristik [Investigation of the resonant supercharging of a two-stroke gasoline engine on its efficient and environmental characteristics]. Scientific and Practical Conference *Tizhden nauki-2015 – Week of Science-2015*, (p. 210). Vol. 1. – Zaporizhzhya : ZNTU [in Ukrainian].
6. Vyubov D.N., Ivashenko N.A., Ivin V.I. (1983). *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevih i kombinirovanyh dvigatelej. Uchebnik dlya vtuzov* [Internal combustion engines: Theory of piston and combined engines. Textbook] / Ed. A.S. Orlin, M.G. Kruglov. – 4th edition. – Moscow : Mashinostroenie, 372 [in Russian].
7. Korohodskiy, V.A., Voropaev, E.P. (2017). Ocenka pokazatelej gazoobmena pri 3D-modelirovanii rabocheho processa dvouhtaktnogo benzinovogo dvigatelya [Evaluation of gas exchange indicators in 3D modeling of the working process of a two-stroke gasoline engine] // *Avtomobilnyj transport – Automobile transport*, 40, 101–113 [in Russian].
8. Sufei Wang, Fujun Zhang (2020). Simulation Research on the Effect of 2-Stroke Engine Exhaust Resonance on Aspiration // *Journal of Beijing Institute of Technology*, 29(3), 410–416. doi: 10.15918/j.jbit1004-0579.19108 [in English].
9. Blair, G.P. (1996). *Design and Simulation of Two Stroke Engines* / Society of Automotive Engineers, Queens University Belfast, 647 [in English].
10. Kondrashov, V.M., Grigorev, Yu.S., Tupov, V.V. (1990). *Dvouhtaktnye karbyuratornye dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Two-stroke carburetor internal combustion engines]. – Moscow : Mashinostroenie, 272 [in Russian].
11. Orlin, A.S. Kruglov, M.G. (1960). *Dvukhtaktnye dvigateli vnutrenneho sgoraniya* [Two-stroke internal combustion engines]. – Moscow: Mashgiz, 556 [in Russian].
12. Berezin, S.R. (1994). *Teoriya i raschet gazodinamicheskikh processov v bystrohodnom 2-h taktom turboporshnevom dvigatele* [Theory and calculation of gas-dynamic processes in a high-speed 2-stroke turbopiston engine]. Abstract of thesis ... d-ra tehn. nauk: 05.04.02. – Moscow, 30 [in Russian].
13. Grigorev, Yu.S. (1973). *Motocikl bez sekretov* [Motorcycle without secrets]. – Moscow : Mashinostroenie, 113 [in Russian].
14. Blair, G.P. (1990). *The Basic Design of the Two Stroke Engine* / Society of Automotive Engineers, Queens University Belfast, 104 [in English].
15. Slyn'ko, G.I., Sukhonos, R.F., Slinko, V.V. (2024). *Teplovij i dinamichnij rozrahunok DVZ : navchal'nij posibnik z kursovogo proektuvannja* [Thermal and dynamic calculation of internal combustion engine: manual for course project]. – Zaporizhzhia: National University «Zaporizhzhia Polytechnic» [in Ukrainian].
16. *IZh Planeta Sport 350: instrukciya po ekspluatacii* [IZH Planeta Sport 350: Manual]. – Izhevsk, 1979, 96 [in Russian].