

## НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ІНФОРМАЦІЯ

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL INFORMATION

УДК 621.43.038

- Євсєєва Н. О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: korskovanat@ukr.net*, ORCID: 0000-0002-4782-829X
- Борзій В. В. магістр, слюсар з ремонту шляхових машин і механізмів Управління залізничного транспорту ПАТ «Запоріжсталь», м. Запоріжжя, Україна
- Сухонос Р. Ф. магістр, старший викладач кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: romevs@zp.edu.ua*, ORCID: 0000-0001-9683-3389
- Беженів С. О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: bezhenov@zp.edu.ua*, ORCID: 0000-0001-7329-356X

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СОПЛОВИХ ОТВОРІВ РОЗПИЛЮВАЧА ФОРСУНКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА У2Д6

### Вступ

Особливістю дизельного двигуна є висока залежність його техніко-економічних показників від якості роботи і параметрів паливної системи. В дизелі паливо впорскується під високим тиском (понад 20 МПа) через невеликі отвори (сопла) розпилювача форсунки, безпосередньо в камеру згорання, в попередньо стиснуте та підігрите повітря. При стисненні частинки палива спалахують і згорають. Робоче тіло в камері згорання може сягати тиску 8...21 МПа і температури до 2500 К. Значною мірою, якість робочого процесу дизеля залежить від того, як і коли подається паливо, як воно розпилене і яким чином розподілене за об'ємом камери згорання [1–5].

Паливна система дизеля складається з наступних основних елементів: паливний бак; насос; нагнітальний трубопровід; форсунки. До форсунок висуваються жорсткі вимоги, які в деякій мірі суперечать один одному [4]:

- забезпечення високого ступеня дроблення палива на краплі, оскільки чим менший діаметр крапель, тим більша їх загальна поверхня, швидше нагрівання та згорання, але менша довжина факела палива;
- забезпечення далекобійності (до протилежного краю камери згорання, тому краплі не повинні бути дуже дрібними – середній розмір їх 30...50 мкм);
- забезпечення розподілу палива по всьому об'єму камери згорання;
- швидкий початок упорскування та швидке припинення процесу.

Результати досліджень щодо впливу конструкції розпилювачів форсунок на якість розпилювання і ефективні показники дизеля, мають переважно емпіричний характер.

### Аналіз досліджень та публікацій

Підвищення довговічності та надійності дизелів у значній мірі залежить від досконалості конструкції та технічного стану їхньої паливної системи. На техніко-економічні показники дизельного двигуна з традиційною системою упорскування палива істотно впливає форсунка та її основний функціональний елемент – розпилювач. Розпилювач формує характеристику паливоподачі з урахуванням власних параметрів технічного стану. Робота форсунки відповідає за ресурс двигуна та параметри робочого процесу. У разі невідповідності параметрів розпилювачів вимогам не забезпечується оптимальне сумішоутворення та повне згорання палива, що призводить до зниження потужності двигуна зі зростанням питомої витрати палива.

З аналізу наукової літератури [1, 4, 6–9] визначено основні характеристики форсунки для дизельного двигуна:

- діаметр соплових отворів  $d_c$ , мм;
- кількість соплових отворів  $i_c$ ;
- ефективний прохідний переріз  $\mu_f$  (для транспортних дизелів  $D < 150$  мм значення  $\mu_f = 0,1 \dots 0,5$ , для дизелів великої потужності ця величина може сягати  $\mu_f = 1,0$ );
- кут розпилювання (найчастіше  $130 \dots 160^\circ$ );

- діаметр голки форсунки та висота її підйому, мм.

На основі інформації з джерел [10–12] визначено значення характеристики розпилювачів форсунок (кількість отворів  $i_c$  та їх діаметр  $d_c$ ) для транспортних та промислових дизелів різних типорозмірів. Кількість отворів більше восьми та діаметр отворів більше  $d_c = 0,4$  мм притаманна дизелям великої потужності з діаметром циліндра  $D = 150 \dots 430$  мм. Менші значення діаметру сопла ( $d_c \leq 0,2$  мм) притаманні розпилювачам форсунок транспортних дизелів з діаметром циліндра  $D < 100$  мм.

Розпилювання палива, тобто дроблення струменя на дрібні краплі, сильно підвищує площу контактної поверхні палива з повітрям, що пришвидшує процеси тепло- і масообміну між нагрітим повітрям і рідиною (паливом). Зменшення розмірів крапель забезпечує їх нагрівання і випаровування за короткий час [1]. Форма камери згорання і метод використаного сумішоутворення задають різні вимоги до розпилювання палива і формування факелу. При об'ємному сумішоутворенні необхідне дрібне розпилювання палива і достатньо велика глибина проникнення факелу в об'єм камери з мінімальним потраплянням крапель на стінки. Плівкове сумішоутворення не потребує дроблення основної маси струменя на дрібні краплі, але для створення тонкої плівки необхідно забезпечити впорскування палива із соплового отвору з достатньо високими швидкостями.

Для камер, розташованих у поршні, коли паливо частково потрапляє на стінку, в кожному конкретному випадку в залежності від кількості соплових отворів, відстані від стінки, напрямку і швидкості руху газового заряду, змінюються вимоги до розміру крапель і розвитку факелу. На часткових подачах в ряді таких камер здійснюється об'ємне сумішоутворення.

Вимоги до розміру крапель палива змінюються також по мірі впорскування палива в камеру згорання протягом одного впорскування. Особливо небажано в даному випадку утворення крупних крапель в кінці впорскування. Також на початку впорскування бажано отримати дрібні краплі для ініціації їх швидкого запалювання.

При виході струменя палива в стиснуте повітря відбувається його руйнування, характер якого залежить від конструкції сопла. При витіканні струменя з високою швидкістю, його розпад починається безпосередньо біля сопла. При цьому спочатку утворюються «нитки», «плівки» і крупні краплі, які під дією сил поверхневого натягу і аеродинамічного опору розпадаються на більш дрібні краплі. Такий розпад струменя називають розпилюванням [1]. Проте на практиці частіше користуються величиною середнього діаметра крапель палива.

Відомі моделі для розрахунку параметрів паливоподачі та згорання в дизелях, зокрема, професора Н. Ф. Разлейцева (СРСР) [13], РК-модель професора А. С. Кулешова (Росія) [7], професора Н. Hiroyasu (Японія) [14] дозволяють досить точно розрахувати перебіг робочого процесу в ДВЗ, проте, як було сказано раніше, мають універсальний характер. Безпосередньо питання впливу кількості та діаметру соплових отворів розпилювача на техніко-економічні показники дизельного двигуна в науковій літературі досліджено недостатньо.

### Мета роботи

Метою даної роботи є дослідження впливу характеристик розпилювача форсунки на ефективні показники дизеля для локомотива.

Для досягнення мети вирішено ряд завдань:

- визначено параметри форсунок, що впливають на якість впорскування та розпилення палива в дизельних двигунах різних типів;
- виконано тепловий розрахунок двигуна У2Д6-250 на номінальному режимі з використанням комп'ютерної програми Engine Calculation;
- розраховано вплив кількості та діаметра отворів розпилювачів форсунок на показники робочого циклу дизеля: середній діаметр крапель  $d_{кр.ср}$ ; максимальний тиск перед соплами розпилювача  $p_{впр\ max}$ ; тривалість паливоподачі  $\varphi_{впр}$ ; тривалість згорання  $\varphi_{згор}$ ;
- виконано розрахунок впливу кількості та діаметра отворів розпилювачів форсунок на техніко-економічні показники двигуна У2Д6-250 на номінальному режимі.

### Матеріал і методика досліджень

Для дослідження впливу характеристик розпилювача форсунки на ефективні показники дизельного двигуна У2Д6-250 використовуємо теоретичні та практичні методики.

Для визначення зміни стану робочого тіла в циліндрі під час процесів стиснення та розширення використовуємо фізико-математичну модель (ФММ) розрахунку термодинамічного циклу ДВЗ другого рівня, розроблену професором Я. О. Єгоровим [15].

При виконанні роботи використовувалось наступне обладнання:

- двигун У2Д6-250;
- комплект розпилювачів СБ.517.01.2 (8x0,3x140) (рис. 1а);
- комплект розпилювачів СБ.517.01.1 (7x0,25x140) (рис. 1б);
- комплект форсунок 1Д12В (рис. 1в).

Двигуни серії Д6 – 6-циліндрові швидкохідні дизелі з безпосереднім впорскуванням палива, які використовуються для приводу генераторів, компресорів, насосів, залізничної техніки, екскаваторів, судах. В якості об'єкта

дослідження обрано систему живлення дизельного двигуна У2Д6-250, який встановлюється на локомотив МПТ-4 (рис. 2).

МПТ-4 – мотовоз навантажувально-транспортний – двовісний локомотив з двигуном внутрішнього згоряння. На передній консолі розташована несуча кабіна з вантажопідйомним краном консольного типу.

На дизелях У2Д6-250 використовуються розпилювачі  $8 \times 0,3 \times 140$  або  $7 \times 0,25 \times 140$ , що зумовлено організаційною та економічною необхідністю підприємства.

Розглянута ФММ практично реалізована у вигляді комп'ютерних програм DVS2 та Engine Calculation [5]. В обох розрахунок циклу двигуна виконується аналогічним чином, але у останньої більший зручний інтерфейс, тому обираємо для роботи саме її.



**Рисунок 1.** Розпилювач СБ.517.01.2  $8 \times 0,3 \times 140$  (а), розпилювач СБ.517.01.1  $7 \times 0,25 \times 140$  (б), форсунка 1Д12В (в)



**Рисунок 2.** Машина МПТ-4 на ремонті і обслуговуванні в цеху поточного підтримання і ремонту шляху УЗДТ ПАТ «Запоріжсталь»

За результатами обчислень в програмі Engine Calculation отримано протокол результатів. До протоколу включено значення параметрів робочого тіла (тиск  $p$ , температура  $T$ , об'єм  $V$ ) при кутах повороту кривошипа колінчатого валу від  $\varphi = 180^\circ$  ПКВ до  $\varphi = 540^\circ$  ПКВ – процеси стиснення та розширення у 4-тактному ДВЗ. У кінці протоколу наведені основні циклові і питомі показники: індикаторна циклова робота  $L_i$ , середній індикаторний тиск  $p_i$ , індикаторний ККД  $\eta_i$ , індикаторна питома витрата палива  $g_i$ .

Для дослідження впливу характеристик (кількості та діаметра отворів) розпилювача форсунки на ефективні показники дизельного двигуна У2Д6-250 використовуємо комп'ютерну програму ДИЗЕЛЬ-РК.

Програма ДИЗЕЛЬ-РК належить до класу термодинамічних програм, циліндри двигуна розглядаються в ній як відкриті термодинамічні системи [7]. Програма ДИЗЕЛЬ-РК дозволяє моделювати робочий процес будь-якого поршневого двигуна внутрішнього згоряння. Використані математичні моделі дозволяють проводити розрахунки з високою точністю на всіх режимах роботи. В програмі реалізована РК-модель: модель сумішоутворення і згорання в двигуні яка дозволяє розраховувати швидкість тепловиділення з урахуванням [7]:

- форми камери згорання;
- інтенсивності вихору;

- кількості, діаметра і спрямованості соплових отворів;
- форми характеристики впорскування, включаючи багатофазне (багаторазове) впорскування і РССІ;
- взаємодії струменів зі стінками і між собою;
- біопалива і сумішей біопалива з дизельним паливом в різних пропорціях;
- системи рециркуляції відпрацьованих газів.

На рисунках 3–5 показано, що для проекту У2Д6 задано: кількість форсунок в камері згорання – 1; діаметр соплових отворів розпилювача; коефіцієнт витрати сопел 0,7; кількість соплових отворів розпилювача; зміщення розпилювача відносно осі камери згорання – немає; виступ розпилювача відносно осі камери згорання – 1 мм.

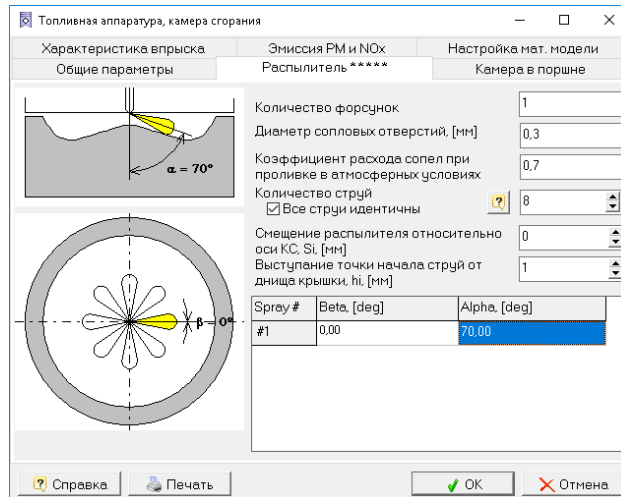


Рисунок 3. Параметры розпилювача форсунок У2Д6 в програмі ДИЗЕЛЬ-РК

Варіативними факторами для розрахунку в програмі ДИЗЕЛЬ-РК приймаємо:

- діаметр соплових отворів розпилювача – 0,25 мм; 0,275 мм; 0,3 мм; 0,325 мм; 0,35 мм;
- кількість соплових отворів розпилювача – 6; 7; 8; 9.

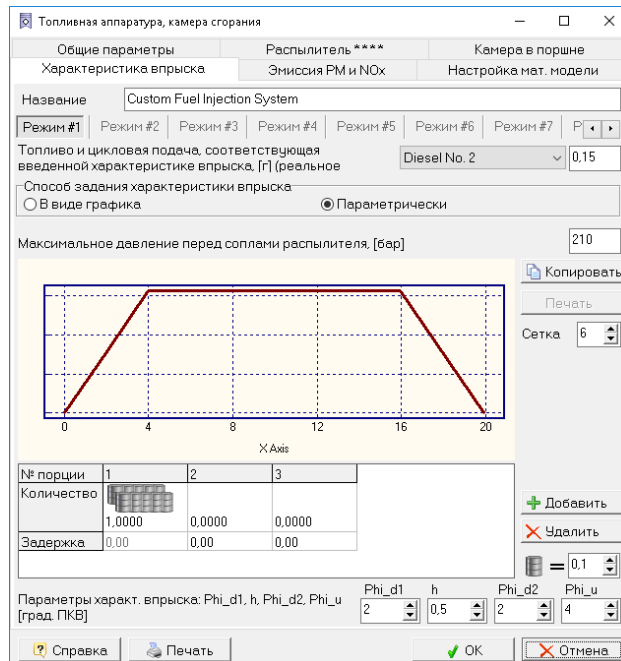
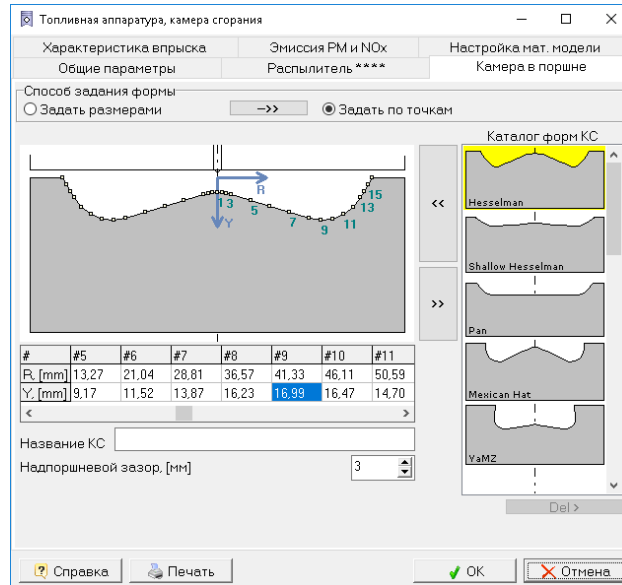


Рисунок 4. Характеристика впрыску дизеля У2Д6 в програмі ДИЗЕЛЬ-РК



**Рисунок 5.** Параметри камери згорання в поршні дизеля У2Д6 в програмі ДИЗЕЛЬ-РК кут розпилювання  $140/2 = 70^\circ$ ; характеристику впорскування; тип камери згорання; тиск у форсунці 21 МПа

Розрахунки роботи дизеля У2Д6 в програмах Engine Calculation і ДИЗЕЛЬ-РК виконуємо на номінальному режимі, оскільки дизель встановлено на локомотив і велику частину часу двигун експлуатується при навантаженні, близькому до максимального.

Теоретичні результати роботи апробовано в цеху поточного підтримання і ремонту шляху Управління залізничного транспорту ПАТ «Запоріжсталь». Двигун У2Д6-250 локомотива МПТ-4 експлуатувався із розпилювачами форсунок 8x0,3x140 та 7x0,25x140.

### Результати досліджень

Для визначення впливу характеристик розпилювача форсунки на робочий процес і техніко-економічні показники дизеля У2Д6-250 в програмному комплексі «ДИЗЕЛЬ-РК» проведено тепловий розрахунок двигуна на номінальному режимі (частота обертання  $n = 1500 \text{ хв}^{-1}$ ).

Варіативними факторами для розрахунку в програмі ДИЗЕЛЬ-РК прийнято: діаметр соплових отворів розпилювача – 0,25 мм; 0,275 мм; 0,3 мм; 0,325 мм; 0,35 мм; кількість соплових отворів розпилювача – 6; 7; 8; 9.

З табл. 1 видно, що зі збільшенням діаметра отворів  $d_c$  розпилювача форсунки на 0,025 мм середній діаметр крапель розпиленого палива  $d_{кр,ср}$  збільшується на 7,7...10,3 %. При збільшенні кількості отворів  $i_c$  на 1 середній діаметр крапель  $d_{кр,ср}$  зростає на 1,1...3,1 %.

Зменшення розмірів крапель сприяє швидкому нагріванню та випаровуванню палива, проте зменшується маса крапель. Легші краплі гірше розповсюджуються по камері згорання, що небажано для ДВЗ із великим діаметром циліндрів.

**Таблиця 1** – Вплив діаметра  $d_c$  та кількості  $i_c$  отворів розпилювача форсунки на середній діаметр крапель  $d_{кр,ср}$ , МКМ

$d_c$ , мм	$i_c$			
	6	7	8	9
0,35	38,86	40,06	41,29	42,48
0,325	36,08	37,14	38,21	39,00
0,30	33,24	34,06	35,02	35,92
0,275	30,65	31,30	32,04	32,72
0,25	28,37	28,70	29,18	29,65

З табл. 2 видно, що зі збільшенням діаметра отворів  $d_c$  розпилювача форсунки на 0,025 мм максимальний тиск перед соплами розпилювача  $p_{впр \text{ max}}$  зменшується на 1,7...7,8 %. При збільшенні кількості отворів  $i_c$  на 1 тиск  $p_{впр \text{ max}}$  зменшується на 0,4...5,2 %. Зменшення тиску дизельного палива перед соплами призводить до укрупнення крапель палива на виході із сопла.

**Таблиця 2** – Вплив діаметра  $d_c$  та кількості  $i_c$  отворів розпилювача форсунки на максимальний тиск перед соплами розпилювача  $p_{впр\ max}$ , бар

$d_c$ , мм	$i_c$			
	6	7	8	9
0,35	188,86	182,13	178,99	175,84
0,325	199,08	188,76	182,09	178,98
0,30	211,01	201,61	192,26	183,96
0,275	218,77	212,66	205,52	196,13
0,25	217,11	220,07	219,15	212,74

З табл. 3 видно, що зі збільшенням діаметра отворів  $d_c$  розпилювача форсунки на 0,025 мм тривалість паливоподачі  $\varphi_{впр}$  скорочується на 2,5...8,1 ° ПКВ (на 10,3...15,4 %). При збільшенні кількості отворів  $i_c$  на 1 тривалість паливоподачі  $\varphi_{впр}$  зменшується 1,9...6,6 ° ПКВ (8,2...12,7 %).

**Таблиця 3** – Вплив діаметра  $d_c$  та кількості  $i_c$  отворів розпилювача форсунки на тривалість паливоподачі  $\varphi_{впр}$ , ° ПКВ

$d_c$ , мм	$i_c$			
	6	7	8	9
0,35	29,451	26,097	23,520	21,583
0,325	33,442	29,409	26,514	24,051
0,30	38,152	33,314	30,065	27,392
0,275	44,189	38,685	34,641	31,398
0,25	52,258	45,621	40,691	36,653

З таблиці 4 видно, що зі збільшенням діаметра отворів  $d_c$  розпилювача форсунки на 0,025 мм тривалість згорання  $\varphi_{згор}$  має різний характер:

- при  $d_c = 0,25...0,3$  мм – тривалість згорання  $\varphi_{згор}$  скорочується в середньому на 5,1 ° ПКВ (3,5 %);
- при  $d_c = 0,3...0,35$  мм – тривалість згорання  $\varphi_{згор}$  зростає в середньому на 7,3 ° ПКВ (5,4 %).

При збільшенні кількості отворів  $i_c$  на 1 тривалість згорання  $\varphi_{згор}$  зменшується в середньому на 8,5 ° ПКВ (5,9 %).

**Таблиця 4** – Вплив діаметра  $d_c$  та кількості  $i_c$  отворів розпилювача форсунки на тривалість згорання  $\varphi_{згор}$ , ° ПКВ

$d_c$ , мм	$i_c$			
	6	7	8	9
0,35	154,6	159,2	148,4	129,0
0,325	145,2	140,0	140,4	129,4
0,30	146,6	134,8	126,4	125,0
0,275	152,8	140,4	129,6	120,8
0,25	161,2	146,2	137,8	128,2

Виходячи з даних табл. 1–4 можна зробити висновок, що найкращі показники робочого процесу мають місце при  $d_c = 0,3...0,35$  мм і при збільшенні кількості отворів форсунки до 8...9.

З розрахунку двигуна У2Д6-250 в комп'ютерній програмі ДИЗЕЛЬ-РК визначено вплив діаметра  $d_c$  та кількості  $i_c$  отворів розпилювача форсунки на ефективні показники двигуна на номінальному режимі роботи:

- середній ефективний тиск  $p_e$ ;
- ефективна потужність двигуна  $N_e$ ;
- ефективна питома витрата палива  $g_e$ ;
- ефективний ККД  $\eta_e$ .

Також визначаємо вплив  $d_c$  та кількості  $i_c$  на наступні величини, які мають практичне значення для використання результатів дослідження:

- годинна витрата палива  $G_m$ ;
- максимальний тиск циклу  $p_{max}$ ;
- максимальна температура циклу  $T_{max}$ .

З табл. 5 видно, що зі збільшенням діаметра отворів  $d_c$  розпилювача форсунки на 0,025 мм зміна ефективну потужність двигуна  $N_e$  має неоднозначний характер:

- при  $d_c = 0,25...0,3$  мм –  $N_e$  збільшується в середньому на 1,2 %;
- при  $d_c = 0,3...0,35$  мм –  $N_e$  зменшується в середньому на 0,4 %.

При збільшенні кількості отворів  $i_c$  на 1 величина  $N_e$  зростає в середньому на 1,1 %.

**Таблиця 5** – Вплив діаметра  $d_c$  та кількості  $i_c$  отворів розпилювача форсунки на ефективну потужність двигуна  $N_e$ , кВт

$d_c$ , мм	$i_c$			
	6	7	8	9
0,35	184,46	183,62	186,39	189,50
0,325	185,41	186,87	187,07	189,34
0,3	184,28	187,07	188,85	189,42
0,275	181,62	184,96	187,39	189,13
0,25	178,00	182,47	184,92	187,13

З табл. 6 видно, що зі збільшенням діаметра отворів  $d_c$  розпилювача форсунки на 0,025 мм зміна ефективного ККД  $\eta_e$  має різний характер:

- при  $d_c = 0,25 \dots 0,3$  мм –  $\eta_e$  збільшується в середньому на 1,2 %;
  - при  $d_c = 0,3 \dots 0,35$  мм –  $\eta_e$  зменшується в середньому на 0,4 %.
- При збільшенні кількості отворів  $i_c$  на 1 величина  $\eta_e$  збільшується в середньому на 1,2 %.

**Таблиця 6** – Вплив діаметра  $d_c$  та кількості  $i_c$  отворів розпилювача форсунки на ефективний ККД  $\eta_e$  двигуна

$d_c$ , мм	$i_c$			
	6	7	8	9
0,35	0,3311	0,3297	0,3350	0,3415
0,325	0,3332	0,3361	0,3364	0,3408
0,3	0,3308	0,3364	0,3399	0,3409
0,275	0,3259	0,3323	0,3371	0,3404
0,25	0,3191	0,3276	0,3323	0,3365

Виходячи з аналізу отриманих даних, можна зробити висновок, що найкращі показники робочого процесу (середній діаметр крапель  $d_{кр.ср}$ ; максимальний тиск перед соплами розпилювача  $p_{впр\ max}$ ; тривалість паливоподачі  $\varphi_{впр}$ ; тривалість згорання  $\varphi_{згор}$ ) мають місце при  $d_c = 0,3 \dots 0,35$  мм і при збільшенні кількості отворів форсунки до  $i_c = 9$ . Проте покращення показників розпилювача форсунки з 9 отворами у порівнянні з розпилювачем з 8 отворами вкрай незначне, а вартість такого розпилювача буде більшою. До того ж, максимальна температура циклу збільшується на 23 К. Тому оптимальним визначаємо розпилювач  $8 \times 0,3 \times 140$ .

Теоретичні результати роботи апробовано в цеху поточного підтримання і ремонту шляху Управління залізничного транспорту ПАТ «Запоріжсталь». На двигуні У2Д6-250 локомотива МПТ-4 виконано заміну розпилювачів форсунок  $7 \times 0,25 \times 140$  на розпилювачі  $8 \times 0,3 \times 140$ .

### Висновки

З аналізу наукових та технічних літературних джерел визначено параметри розпилювачів форсунок дизельних ДВЗ, що найбільше впливають на кількість та якість розпилювання палива: кількість отворів та їх діаметр.

В якості об'єкта дослідження обрано дизельний двигун У2Д6-250, розглянуто його характеристики та особливості конструкції. Розкрито основні положення дослідницьких методик – теплового розрахунку за ФММ другого рівня та програми ДИЗЕЛЬ-РК; проведено відповідні розрахунки.

Проведено дослідження впливу діаметра  $d_c$  та кількості  $i_c$  отворів розпилювача форсунки дизеля У2Д6-250 на показники робочого процесу: середній діаметр крапель  $d_{кр.ср}$ ; максимальний тиск перед соплами розпилювача  $p_{впр\ max}$ ; тривалість паливоподачі  $\varphi_{впр}$ ; тривалість згорання  $\varphi_{згор}$ . Виходячи з аналізу отриманих даних, можна зробити висновок, що найкращі показники робочого процесу мають місце при  $d_c = 0,3 \dots 0,35$  мм і при збільшенні кількості отворів форсунки до  $i_c = 8 \dots 9$ . З техніко-економічних причин оптимальним визначаємо розпилювач  $8 \times 0,3 \times 140$ .

Виходячи із практичного завдання дослідження – перевірки доцільності заміни розпилювача  $7 \times 0,25 \times 140$  на розпилювач  $8 \times 0,3 \times 140$  – встановлено наступні зміни енергетичних показників двигуна:

- збільшення ефективної потужності двигуна (і середнього ефективного тиску) на 3,38 %;
- зменшення питомої ефективної витрати палива (збільшення ефективного ККД) на 3,6 %;
- зменшення годинної витрати палива на 0,23 %.

Технічний ефект заміни розпилювачів форсунок  $7 \times 0,25 \times 140$  на розпилювачі  $8 \times 0,3 \times 140$  на дизельному двигуні У2Д6-250 локомотиву МПТ-4 підтверджено апробацією в Цеху поточного підтримання і ремонту шляху Управління залізничного транспорту ПАТ «Запоріжсталь». Результати роботи рекомендовані до впровадження на ПАТ «Запоріжсталь».

### Список літератури

1. Астахов, И. В. Подача и распыливание топлива в дизелях [Текст] / И. В. Астахов, В. И. Трусов, А. С. Хачиян и др. – М. : Машиностроение, 1972. – 359 с.
2. Технология Common Rail [Электронный ресурс] // Режим доступа: [https://www.common-rail.ru/tech/tech\\_01.php](https://www.common-rail.ru/tech/tech_01.php)
3. Євсєєва, Н. О. Дослідження систем паливоподачі дизельних ДВЗ [Електронний ресурс] / Н. О. Євсєєва, В. В. Борзій // Тиждень науки-2022 : щоріч. наук.-практ. конф., 18–22 квітня 2022 р. : тези доп. / Редкол.: В.В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2022. – С. 139–141.
4. Богатырев, А. В. Автомобили [Текст] / А. В. Богатырев, Ю. К. Есеновский-Лашков, М. Л. Насоновский, В. А. Чернышев. – М. : Колос-с, 2004. – 497 с.
5. Методичні вказівки до курсового проекту з дисципліни «Теорія ДВЗ» для студентів спеціальності 7(8).05050304 «Двигуни внутрішнього згорання» всіх форм навчання [Текст] / Укл. : Г. І. Слинко, Я. О. Єгоров. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. – 50 с.
6. Колчин, А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст] : Учеб. пособие для вузов / А. И. Колчин, В. П. Демидов. – 4-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2008 – 496 с.
7. Кулешов, А. С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС [Текст] : дисс. на соискание уч. степ. д-ра техн. наук по спец. 05.04.02 – тепловые двигатели / А. С. Кулешов. – МГТУ им. Баумана. – М., 2011. – 235 с.
8. Дьяченко, В. Г. Теория двигателей внутреннего сгорания [Текст] : Учебник для вузов / В. Г. Дьяченко. – Пер. с укр. – Х. : ХНАДУ, 2009. – 500 с.
9. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст] : учебник для вузов / Д. Н. Вырубов, Н. А. Иващенко, В. И. Ивин и др.; Под ред. А. С. Орлина и М. Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 372 с.
10. Применимость распылителей [Электронный ресурс] // Режим доступа: [https://loskzapchast.com.ua/index.php?route=journal2/blog/post&journal\\_blog\\_post\\_id=6](https://loskzapchast.com.ua/index.php?route=journal2/blog/post&journal_blog_post_id=6)
11. Топливная аппаратура [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://korabel.narod.ru/katalog.html>
12. Розпилювач форсунок [Електронний ресурс] // Режим доступа: <https://chda.com.ua/uk/7-rozplyuvach-forsunki>
13. Разлейцев, Н. Ф. Моделирование и оптимизации процесса сгорания в дизелях [Текст] / Н. Ф. Разлейцев. – Харьков : Вища школа, при Харьковском университете, 1980. – 169 с.
14. Hiroyasu, H. Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions / Hiroyuki Hiroyasu, Toshikazu Kadota and Masataka Arai // Bull. JSME. – 1983. – P. 214–12. – Vol. 26. – N 214. – P. 576–583. doi: 10.1299/jsme1958.26.569
15. Егоров, Я. А. Физико-математическая модель рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания автотракторного типа : Учебное пособие [Текст] / Я. А. Егоров. – К. : УМК ВО, 1991. – 56 с.

Одержано 24.05.2023

## RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE NOZZLE HOLES OF INJECTOR ON THE CHARACTERISTICS OF THE U2D6 DIESEL ENGINE

- Yevsyeyeva N. Ph. D., Associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: korskovanat@ukr.net*, ORCID: 0000-0002-4782-829X
- Borziy V. M. Sc., Mechanic of the Department of Railway Transport, PJSC “Zaporizhstal”, Zaporizhzhia, Ukraine
- Sukhonos R. M. Sc., Senior Lecturer of the Department of Internal Combustion Engines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: romevs@zp.edu.ua*, ORCID: 0000-0001-9683-3389
- Bezhenov S. Ph. D., Associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: bezhenov@zp.edu.ua*, ORCID: 0000-0001-7329-356X



### References

1. Astahov, I. V., Trusov, V. I., Hachiyan, A. S., et al. (1972). Podacha i raspylivanie topliva v dizelyah [Fuel supply and spraying in diesel engines]. Moscow, USSR: Mashinostroenie, 359.
2. Common rail technology. Available at : [https://www.common-rail.ru/tech/tech\\_01.php](https://www.common-rail.ru/tech/tech_01.php)
3. Yevsyeyeva, N. O., Borziy V. V. (2022). Doslidzhennya sistem palivopodachi dizel'nih DVZ [Research of fuel supply systems of diesel internal combustion engines]. Science week-2022 : Annual scientific and practical Conference. Zaporizhzhia (Ukraine), 139–141.
4. Bogatyrev, A. V., Esenovskij-Lashkov, Yu. K., Nasonovskij, M. L., Chernyshev, V. A. (2004). Avtomobili [Cars]. Moscow, Russia: KolosS, 497.
5. Slin'ko, G. I., Egorov, Ya. O. (2015) Metodichni vkazivki do kursovogo proektu z disciplini «Teoriya DVZ» dlya studentiv special'nosti 7(8).05050304 «Dviguni vnutrishn'ogo zgorannya» vsih form navchannya [Methodical guidelines for the course project on the discipline "Theory of Internal Combustion Engines" for students of the specialty 7(8).05050304 "Internal Combustion Engines" of all forms of education]. Zaporizhzhya, Ukraine: ZNTU, 50.
6. Kolchin, A. I., Demidov, V. P. ed. (2008). Raschet avtomobil'nyh i traktornyh dvigatelej [Calculation of automobile and tractor engines]. Moscow, Russia: Vysshaya shkola, 496.
7. Kuleshov, A. S. (2011). Razvitie metodov rascheta i optimizaciya rabochih processov DVS [Development of calculation methods and optimization of internal combustion engines processes]. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 235.
8. D'yachenko, V. G. (2009). Teoriya dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Theory of internal combustion engines]. Kharkiv, Ukraine: KhNADU, 500.
9. Vyubov, D. N., Ivashchenko, N. A., Ivin, V. I. et al. (1983). Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevnyh i kombinirovannyh dvigatelej [Internal combustion engines: Theory of reciprocating and combined engines]. Moscow, USSR: Mashinostroenie, 372.
10. Applicability of sprayers. Available at : [https://loskzapchast.com.ua/index.php?route=journal2/blog/post&journal\\_blog\\_post\\_id=6](https://loskzapchast.com.ua/index.php?route=journal2/blog/post&journal_blog_post_id=6)
11. Fuel equipment. Available at : <http://korabel.narod.ru/katalog.html>
12. Injector nozzle. Available at : <https://chda.com.ua/uk/7-rozpilyuvach-forsunki>
13. Razlejcev, N. F. (1980). Modelirovanie i optimizacii processa sgoraniya v dizelyah [Modeling and optimization of the combustion process in diesel engines]. Vyshcha shkola, 169.
14. Hiroyasu, H., Kadota T., Arai M. (1983) Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions. Bulletin of the JSME, 26 (214), 576–583. doi:10.1299/jsme1958.26.569
15. Egorov, Ya. A. (1991). Fiziko-matematicheskaya model' rabocheho cikla dvigatelya vnutrennego sgoraniya avtotraktornogo tipa: Uchebnoe posobie [Physical and mathematical model of the working cycle of an internal combustion engine of an autotractor type]. UMK VO, 56.