

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання курсового проєкту**

**з дисципліни**

***«ЕНЕРГЕТИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ  
РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ»***

**Харків – 2025**

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу 2 червня 2025 р., протокол № 10.

Методичні вказівки призначено для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальності *Л7 «Залізничний транспорт»* освітніх програм «Локомотиви та локомотивне господарство» та «Високошвидкісний рухомий склад» всіх форм здобуття освіти, які вивчають дисципліну «Енергетичне обладнання рухомого складу залізниць».

Укладачі:

проф. Д. С. Жалкін,  
доц. С. В. Михалків,  
старш. викл. О. В. Клименко

Рецензент

проф. О. С. Крашенінін

## ЗМІСТ

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Загальні вказівки.....                                                                                     | 4  |
| Завдання на курсовий проєкт тепловозного двигуна.....                                                      | 4  |
| Зміст проєкту.....                                                                                         | 6  |
| 1 Визначення основних показників роботи енергетичних установок рухомого складу.....                        | 7  |
| 2 Визначення витрат пального, повітря і газів, що відпрацювали.....                                        | 7  |
| 3 Визначення основних показників системи наддування.....                                                   | 9  |
| 4 Визначення основних параметрів робочого процесу двигуна.....                                             | 12 |
| 5 Побудова та обробка індикаторної діаграми робочого процесу двигуна.....                                  | 19 |
| 6 Динамічний розрахунок шатунно-кривошипного механізму.....                                                | 27 |
| 6.1 Побудова діаграми тангенційних та радіальних сил, що діють на шатунну шийку у V-подібному двигуні..... | 33 |
| 6.2 Динамічна діаграма сумарних тангенційних сил двигуна.....                                              | 35 |
| 7 Розрахунок вузла двигуна.....                                                                            | 40 |
| Список літератури.....                                                                                     | 40 |
| Додаток А Вихідні дані для розрахунків.....                                                                | 42 |
| Додаток Б Результати розрахунків діаграми $P-V$ .....                                                      | 44 |
| Додаток В Результати розрахунків діаграми питомих сил $N, K, Z, T$ .....                                   | 45 |

## ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

Мета виконання курсового проєкту полягає у тому, щоб здобувачі вищої освіти першого рівня (бакалавр) засвоїли методи теплового і динамічного розрахунку енергетичної установки автономного рухомого складу (ЕУРС), а також набули навичок в аналізі його роботи й побудови.

Оформлення пояснювальної записки має відповідати вимогам [1]. При виборі необхідних розрахункових величин, використанні таблиць, формул, довідкових матеріалів потрібно посилається на джерела. У проєкті для всіх розмірних величин застосовують Міжнародну систему одиниць вимірів (СВ). Пояснювальну записку обов'язково підписує здобувач.

## ЗАВДАННЯ НА КУРСОВИЙ ПРОЄКТ

Вихідні дані:

$N_e$  – ефективна потужність дизеля, кВт;

$\tau$  – тактність;

$i$  – кількість циліндрів;

$n$  – частота обертання колінчатого вала,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$D, S$  – діаметр циліндра і хід поршня, мм;

$g_e$  – питома ефективна витрата палива,  $\text{г/кВ}\cdot\text{год}$ ;

$\varphi$  – коефіцієнт продування;

$\eta_t$  – механічний коефіцієнт корисної дії (ККД) дизеля;

$\lambda$  – відношення радіуса кривошипа до довжини шатуна;

$\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря для згоряння;

$\varepsilon, \varepsilon_v$  – геометричний та дійсний ступені стиску двигуна;

$P_z$  – найбільший тиск згоряння, МПа;

$\gamma$  – коефіцієнт залишкових газів;

$\xi_z$  – коефіцієнт ефективного виділення тепла;

$M_{\text{п}}$  – маса поршня у складанні, кг;

$M_{\text{ш}}$  – маса шатуна у складанні, кг;

$\gamma_{\text{ц}}$  – кут між осями циліндрів  $V$ -подібного двигуна, град.

Числові значення цих величин вибирають з таблиць А.1, А.2 та А.3 додатку А, відповідно до останньої і передостанньої цифр навчального шифру здобувача. За узгодженням викладача, можливе виконання індивідуального завдання.

В усіх варіантах завдання можливо прийняти:

- склад дизельного палива у вагових частках: вуглець  $C=0,86$ ; водень  $H=0,135$ ; кисень  $O=0,005$ ;

- нижчу теплоту згоряння дизельного пального  $H_u=42500$  кДж/кг;

- коефіцієнт наповнення:  $\eta_v=0,85$  – для чотиритактного дизеля;  
 $\eta_v=0,80$  – для двотактного дизеля;

- внутрішній ККД турбіни турбокомпресора,  $\eta_{\text{тл}}=0,75$ ;

- адіабатичний ККД відцентрового компресора, що приводиться від турбіни або колінчастого вала,  $\eta_{\text{кад}}=0,79$ ;

- механічний ККД турбокомпресора,  $\eta_{\text{тм}}=0,96$ ;

- температуру повітря у повітряному ресивері дизеля,  $t_k=60$  °С.

*Примітка* – У завданні скрізь буквою  $T$  позначена температура в кельвінах, К, а буквою –  $t$  в градусах Цельсія, °С, при цьому  $T=t+273$ .

Якщо в навчальному шифрі здобувача після букв, що позначають спеціальність, стоїть тільки одна цифра, то передостанньою цифрою буде 0.

Вихідні дані для курсового проєкту обов'язково наводять на початку пояснювальної записки.

## ЗМІСТ ПРОЄКТУ

1 Визначити основні показники роботи дизеля: середній ефективний та індикаторний тиск; ефективний та індикаторний ККД; питому індикаторну витрату пального.

2 Визначити годинну витрату пального дизелем і витрату за кожен цикл; витрати повітря і газів, що відпрацювали.

3 Вибрати та відобразити на рисунку схему наддування відповідно до заданої тактності дизеля. Визначити основні показники системи наддування: тиск повітря перед впускними органами дизеля; ступінь підвищення тиску повітря у компресорі; потужності компресорів; зниження температури повітря у холодильнику наддувального повітря.

4 Визначити основні параметри робочого процесу двигуна; розрахувати середній ефективний тиск, ефективну потужність, питому ефективну витрату пального, ефективний ККД.

5 Побудувати індикаторну діаграму робочого процесу в координатах «тиск – об'єм» ( $P-V$ ), визначити середній індикаторний тиск.

6 Розрахувати сили, що діють у шатунно-кривошипному механізмі двигуна, і побудувати залежності цих сил від кута оберту колінчастого вала.

7 Виконати розрахунок вузла двигуна відповідно до завдання (таблиця А.3) і надати стислий опис призначення, побудови і принципу роботи вузла.

Розрахунки за пп. 5, 6 проєкту виконують на електронно-обчислювальних машинах (ЕОМ) [11].

# 1 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ РУХОМОГО СКЛАДУ

Середній ефективний тиск  $P_e$ , МПа [2 – 4],

$$P_e = \frac{N_e \cdot 0,03\tau}{V_h i n}, \quad (1)$$

де  $N_e$ ,  $i$ ,  $n$ ,  $\tau$  – задані (таблиця А.1);

$V_h$  – робочий об'єм одного циліндра, м<sup>3</sup>,

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} S.$$

*Примітка* – Для двотактного дизеля з поршнями, що зустрічно рухаються (таблиця А.1, варіант 5), підставляють подвійний хід поршня.

Середній індикаторний тиск  $P_i$ , МПа,

$$P_i = \frac{P_e}{\eta_M}. \quad (2)$$

Ефективний ККД  $\eta_e$

$$\eta_e = \frac{3600}{H_u g_e}. \quad (3)$$

Індикаторний ККД  $\eta_i$

$$\eta_i = \frac{\eta_e}{\eta_M}. \quad (4)$$

Питома індикаторна витрата пального  $g_i$ , кг/кВт·год,

$$g_i = \frac{3600}{H_u \eta_i} \quad \text{або} \quad g_i = g_e \eta_M. \quad (5)$$

## 2 ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ПАЛЬНОГО, ПОВІТРЯ І ГАЗІВ, ЩО ВІДПРАЦЮВАЛИ

Годинна витрата пального дизелем  $B_\Gamma$ , кг/год [3 – 6],

$$B_\Gamma = g_e N_e, \quad (6)$$

де  $g_e$  – питома ефективна витрата пального, кг/кВт·год.

Кількість пального, поданого в циліндр за кожний цикл  $g_u$ , кг/цикл,

$$g_u = \frac{B_\Gamma \cdot \tau}{120 n i}. \quad (7)$$

Теоретично необхідна кількість повітря для згоряння 1 кг пального:

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) \frac{\text{кмоль}}{\text{кг}};$$

$$L'_0 = m_n L_0 = 28,95 L_0 \text{ кг/кг},$$

де  $m_n = 28,95$  – молекулярна маса повітря.

Сумарний коефіцієнт надлишку повітря

$$\alpha_\Sigma = \varphi \alpha.,$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт продування.

Витрата повітря дизелем  $G_n$ , кг/с,

$$G_n = \frac{\alpha_\Sigma L_o' B_\Gamma}{3600}. \quad (8)$$

Кількість газів, що відпрацювали,  $G_\Gamma$ , кг/с,

$$G_\Gamma = \frac{(\alpha_\Sigma L_o' + 1) B_\Gamma}{3600}. \quad (9)$$

### **3 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМИ НАДДУВАННЯ**

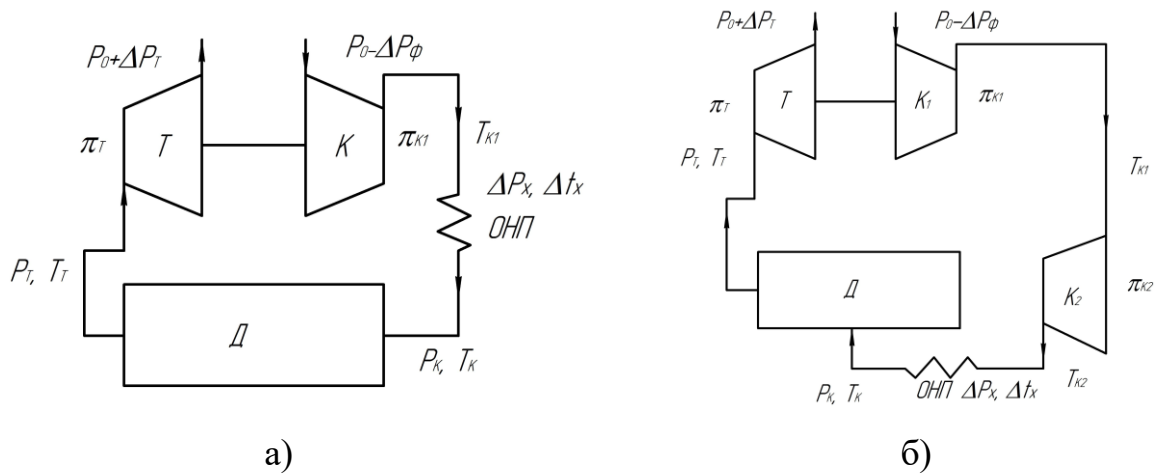
Для чотиритактних двигунів, відповідно до значення  $\pi_{\kappa\Sigma}$  застосовують одноступінчасте газотурбінне наддування (рисунок 1, а).

Тиск повітря перед впускними органами циліндра дизеля  $P_\kappa$ , МПа [3 – 5],

$$P_\kappa = \frac{g_u \alpha L_o 8314 T_\kappa}{\eta_v V_h \cdot 10^6},$$

де  $\eta_v$ ,  $\alpha$ ,  $T_\kappa$  – приймають із завдання, при цьому  $T_\kappa = (t_\kappa + 273)$  К;

$g_u$ ,  $L_o$ ,  $V_h$  – обчислені раніше.



Д – дизель; Т – турбіна; К, К<sub>1</sub>, К<sub>2</sub> – компресори;  
ОНП – охолоджувач наддувального повітря

Рисунок 1 – Схеми наддування дизелів рухомого складу  
чотиритактного (а), двотактного (б)

Сумарний ступінь підвищення тиску повітря в агрегатах наддування  
 $\pi_{k\Sigma}$

$$\pi_{k\Sigma} = \frac{P_k + \Delta P_x}{P_o - \Delta P_\phi}, \quad (10)$$

де  $P_o=0,1013$  – стандартний атмосферний тиск, МПа;

$\Delta P_x$ ,  $\Delta P_\phi$  – відповідно опір холодильника наддувального повітря і фільтра повітря на вході в агрегати наддування; можна прийняти  $\Delta P_x=\Delta P_\phi= 0,003$  МПа.

Для чотиритактного дизеля  $\pi_{k\Sigma} = \pi_{k1}$ .

Для двотактного дизеля найчастіше застосовують двоступінчате наддування (рисунок 1, б).

Ступінь підвищення тиску повітря у 1-му ступені – компресорі, що приводиться від турбіни, визначають з виразу

$$\pi_{\kappa 1} = \frac{\pi_{\kappa \Sigma}}{\pi_{\kappa 2}}.$$

Ступінь підвищення тиску у відцентровому компресорі, який приводиться від валу дизеля  $\pi_{\kappa 2}$ , обирають у діапазоні  $\pi_{\kappa 2}=1,25 - 1,35$ .

Температура  $T_{\kappa 1}$ , К,

$$T_{\kappa 1} = T_o \left( 1 + \frac{\pi_{\kappa 1}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\eta_{\kappa AD}} \right). \quad (11)$$

Температура  $T_{\kappa 2}$ , К,

$$T_{\kappa 2} = T_{\kappa 1} \left( 1 + \frac{\pi_{\kappa 2}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\eta_{\kappa AD}} \right).$$

Потужність, споживана компресором,  $N_{\kappa}$ , кВт,

$$N_{\kappa 1} = G_n^c \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_o \left( \pi_{\kappa 1}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{\kappa AD}}. \quad (12)$$

Для двотактного дизеля необхідно обчислити потужність 1-го і 2-го ступенів компресорів відповідно при  $\pi_{\kappa 1}$  та  $\pi_{\kappa 2}$ . При обчисленні потужності, споживаної компресором 2-го ступеня, необхідно замість температури  $T_o$  підставляти температуру повітря  $T_{\kappa 1}$  після стиску на виході з 1-го ступеня.

Необхідне зниження температури повітря у холодильнику наддувального повітря

$$\Delta t_x = T_{\kappa 1} - (273 + t_{\kappa}).$$

Максимальне значення  $\Delta t_x$  для водо-повітряних охолоджувачів дорівнює 70-80 °С.

#### 4 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВИГУНА

Початковим завданням є визначення тисків і температур робочого тіла в циліндрі в характерних точках індикаторної діаграми і встановлення закономірностей зміни цих параметрів у проміжних точках [2, 4-6].

З виразу для  $\varepsilon$  визначаємо об'єм камери стиску  $V_c$ , м<sup>3</sup>,

$$V_c = \frac{V_h}{\varepsilon - 1},$$

де  $\varepsilon$  – задане (таблиця А.1).

Для двотактного двигуна частку загубленого на процеси газообміну ходу поршня  $\psi$  визначають зі співвідношення, що пов'язує геометричний  $\varepsilon$  і дійсний  $\varepsilon_v$  ступені стиску  $\psi$ ,

$$\psi = 1 - \frac{\varepsilon_v - 1}{\varepsilon - 1},$$

де  $\varepsilon_v$  – задано (таблиця А.1).

Визначаємо повний об'єм циліндра  $V_a$ , м<sup>3</sup>,

- чотиритактний двигун

$$V_a = V_b = V_c + V_h;$$

- двотактний двигун

$$V_a = V_b = V_c + (1 - \psi) \cdot V_h.$$

При розрахунку робочого процесу використовують багато дослідних коефіцієнтів. Тому відповідність між дослідними і розрахунковими даними буде істотно залежати від вибору цих коефіцієнтів [2-5].

Тиск на початку стиснення (за дослідними даними)  $P_a$ , МПа,

- чотиритактний двигун  $P_a \approx (0,9 - 0,96) \cdot P_K$ ;

- двотактний двигун  $P_a \approx (0,95 - 1,05) \cdot P_K$ .

Температура робочого тіла на початку стиснення  $T_a$ , К,

$$T_a = \frac{T_K + \Delta t + \gamma T_\Gamma}{1 + \gamma}, \quad (13)$$

де  $T_K$  – температура повітря перед впускними органами дизеля, К ( $T_K = t_K + 273$ ;  $t_K$  – див. вихідні дані);

$\gamma$  – коефіцієнт залишкових газів, (див. таблицю А.1).

Коефіцієнтом залишкових газів  $\gamma$  називають відношення кількості залишкових газів  $M_\Gamma$  до свіжого заряду,

$$\gamma = \frac{M_\Gamma}{M_1}.$$

За дослідними даними можна прийняти:

-  $\Delta t = 10 - 15$  К;

-  $T_\Gamma = 800 - 900$  К – чотиритактний дизель;

-  $T_\Gamma = 700 - 800$  К – двотактний дизель.

Коефіцієнт наповнення,  $\eta_v$ ,

$$\eta_v = \frac{\varepsilon_{(v)}}{\varepsilon - 1} \frac{P_a T_K}{P_K T_a} \frac{1}{1 + \gamma}. \quad (14)$$

*Примітка – Увага!* Значення  $\eta_v$  завжди менше 1.

Тиск і температура робочого тіла наприкінці стиснення  $P_c$ ,  $T_c$ , МПа, К,

$$P_c = P_a \varepsilon_{(v)}^{n_1}; \quad (15)$$

$$T_c = T_a \varepsilon_{(v)}^{n_1-1}, \quad (16)$$

де  $\varepsilon_{(v)}$  – ступінь стиску геометричний  $\varepsilon$  (чотиритактний двигун), або дійсний  $\varepsilon_v$  (двотактний двигун);

$n_1$  – середній показник політропи стиснення.

За дослідними даними  $n_1=1,36-1,38$ . Величина  $n_1$  залежить від інтенсивності охолодження циліндра і його щільності: менше значення  $n_1$  приймають за інтенсивного охолодження та меншої щільності.

*Примітка – Увага!* Самозаймання пального досягається при  $T_c > 750$  К та  $P_c > 3,5-4$  МПа.

Параметри кінця згоряння характеризуються тиском  $P_z$  і температурою  $T_z$ , при цьому значення  $P_z$  задане (таблиця А.1). Перед тим як визначити температуру  $T_z$ , необхідно обчислити деякі характерні величини, що відносяться до процесу згоряння.

Кількість газів, що утворяться при згорянні 1 кг пального заданого складу з теоретично необхідною кількістю повітря ( $\alpha=1$ )  $M_o$ , кмоль,

$$M_o = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0,79L_o,$$

де  $C$ ,  $H$  – вміст вуглецю і водню в паливі, у частках (за завданням);

$L_o$  – теоретично необхідна кількість повітря для згоряння 1 кг пального,  $L_o \approx 0,5$  кмоль/кг.

Кількість повітря, яка витрачається при згорянні 1 кг пального,  $M_1$ ,  
кмоль,

$$M_1 = \alpha L_o,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря для згорання (таблиця А.1).

Кількість продуктів згорання, що утворюються при згорянні 1 кг пального із заданим коефіцієнтом надлишку повітря  $M_2$ , кмоль,

$$M_2 = M_o + (\alpha - 1)L_o.$$

Коефіцієнт молекулярної зміни складу газів при згорянні пального  
 $\mu_0$ ,

$$\mu_o = \frac{M_2}{M_1}.$$

Дійсний коефіцієнт молекулярної зміни  $\mu$ ,

$$\mu = \frac{(\mu_o + \gamma)}{1 + \gamma}, \quad (17)$$

де  $\gamma$  – заданий (таблиця А.1).

Ступінь підвищення тиску при згорянні,  $\lambda_z$ ,

$$\lambda_z = \frac{P_z}{P_c}, \quad (18)$$

де  $P_z$  – задане (таблиця А.1).

*Примітка – Увага!* Значення  $\lambda_z$ , за яких досягаються найбільші значення індикаторного ККД дизеля, лежать у межах 1,2-2,0. Більші

значення для дизелів з високим тиском наддування. При одержанні значень  $\lambda_z$ , що відрізняються від рекомендованих, потрібно переглянути вибір значень  $P_a$ ,  $n_1$ ,  $\varepsilon$  або провести корекцію значення  $P_k$ .

Температуру робочого тіла наприкінці згоряння визначають з рівняння згоряння  $T_z$ , К,

$$\frac{\zeta_z H_u}{\alpha L_0 (1 + \gamma)_z} = \mu \cdot c_{pmz} \cdot T_z - [c_{vmc} + \lambda_z R_\mu] \cdot T_c + 2,27 \cdot 10^3 (\mu - \lambda_z), \quad (19)$$

де  $R_\mu = 8,314$  – універсальна газова стала, кДж/(кг·К);

$c_{pmz}$  – середня питома молярна теплоємність при постійному тиску для продуктів згоряння у точці  $z$ , кДж/(кг·К);

$\zeta_z$  – коефіцієнт ефективного виділення тепла до точки  $z$  (додаток А),  $\zeta_z = 0,78 - 0,85$ ;

$H_u$  – нижча теплота згоряння пального (за завданням);

$c_{vmc}$  – середня питома молярна теплоємність при постійному об'ємі для повітря у точці  $c$ , кДж/(кг·К);

$T_c$  – температури робочого тіла у точці  $c$ , К.

Для обчислення теплоємностей використовують такі залежності їх від температури:

- для повітря

$$c_{vmc} = 20,38 + 209,5 \cdot 10^{-5} T_c;$$

- для «чистих» продуктів згоряння (при  $\alpha=1$ )

$$c_{vmz} = 21,45 + \frac{1,885}{\alpha} + (213,7 + \frac{92,8}{\alpha_\Sigma}) \cdot 10^{-5} \cdot T_z.$$

$$c_{pmz} = c_{vmz} + R_\mu.$$

Через те, що  $c_{vmz}$  залежить від температури  $T_z$ , рівняння (19) вирішують методом послідовних наближень із збіжністю  $|\Delta T| \leq 25$ , або підставляють величини в рівняння згоряння та одержують квадратне рівняння виду

$$aT_z^2 + bT_z + c = 0,$$

та розв'язують його відомими методами.

Приклад:  $\zeta_z = 0,80$ ;  $\gamma = 0,03$ ;  $T_c = 900$  К ;  $\lambda_z = 1,6$ ;  $\mu = 1,03$ ;  $L_0 = 0,5$ ;  $\alpha = 2,1$ ;  $\alpha_\Sigma = 2,3$ .

Обчислюємо при  $T = T_c$ ,

$$c_{vmc} = 20,38 + 209,5 \cdot 10^{-5} \cdot 900 = 22,27 \text{ кДж/(кг·К)};$$

Визначаємо величину  $D$ , що дорівнює

$$D = \frac{1}{\mu} \left[ \left( \frac{\zeta_z H_u}{\alpha L_0 (1 + \gamma)} \right) + (c_{vmc} + \lambda_z R_\mu) T_c - 2,27 \cdot 10^3 (\mu - \lambda_z) \right];$$

$$D = \frac{1}{1,03} \left[ \left[ \frac{0,8 \cdot 42500}{2,1 \cdot 0,5 \cdot (1 + 0,03)} + (22,27 + 1,6 \cdot 8,314) \cdot 900 \right] - 2,27 \cdot 1000 \cdot (1,03 - 1,6) \right] = 62781,6.$$

Приймаємо перше наближення  $T_{z1} = 1800$  К.

Обчислюємо

$$c_{vmz} = 21,45 + \frac{1,885}{2,1} + \left( 213,7 + \frac{92,8}{2,3} \right) \cdot 10^{-5} \cdot 1800 = 25,92 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

$$\text{Тоді } T_z = \frac{D}{R_\mu + c_{vmz}} = \frac{62781,6}{8,314 + 25,92} = 1834 \text{ К}.$$

Перевіряємо збіжність  $|\Delta T| = |T_z - T_{z1}| = 34 > 25$  К, збіжність не забезпечується. Приймаємо друге наближення  $T_{z2} = 1834$  К. При  $T = T_{z2}$

обчислення дають:  $c_{vmz}=26$  кДж/(кг·К);  $T_z=1829$ К;  $|\Delta T|=5$  К, тобто збіжність забезпечується та остаточно приймаємо

$$T_z \approx 1830 \text{ К.}$$

Після обчислення  $T_z$  визначаємо ступінь попереднього розширення  $\rho$

$$\rho = \frac{\mu T_z}{\lambda_z T_c}. \quad (20)$$

*Примітка – Увага!* Якщо одержано значення  $\rho < 1,1$ , розрахунок процесу згоряння повторюють з меншим значенням  $P_z$ .

Визначаємо  $V_z$ , м<sup>3</sup>,

$$V_z = \rho V_c.$$

Задане значення  $P_z$  і розрахункові значення  $T_z$  и  $V_z$  цілком визначають параметри і положення точки  $z$  в координатах тиск  $P$  – об'єм  $V$ .

Тиск  $P_b$  і температура  $T_b$  наприкінці розширення, МПа, К,

$$P_b = \frac{P_z}{\delta_{(v)}^{n_2}}; \quad (21)$$

$$T_b = \frac{T_z}{\delta_{(v)}^{n_2-1}}, \quad (22)$$

де  $n_2$  – середній показник політропи розширення;

$\delta_{(v)}$  – ступінь наступного розширення продуктів згоряння,  $\delta$  при  $\tau = 4$  та  $\delta_v$  при  $\tau = 2$ .

$$\delta_{(v)} = \frac{V_b}{V_z} = \frac{\varepsilon_{(v)}}{\rho}. \quad (23)$$

де  $\varepsilon_{(v)}$  – геометричний  $\varepsilon$  або дійсний  $\varepsilon_v$  ступені стиску, прийняті залежно від тактності двигуна ( $\varepsilon$  при  $\tau=4$ ,  $\varepsilon_v$  при  $\tau=2$ );

За дослідними даними  $n_2=1,26-1,28$ .

Після визначення параметрів характерних точок індикаторної діаграми обчислюють показники робочого процесу.

Розрахунковий середній індикаторний тиск  $P_{icер}$ , МПа,

$$P_{icер} = \frac{P_c}{\varepsilon_{(v)} - 1} \left[ \lambda_z (\rho - 1) + \frac{\lambda_z \rho}{n_2 - 1} \left( 1 - \frac{1}{\delta_{(v)}^{n_2 - 1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon_{(v)}^{n_1 - 1}} \right) \right], \quad (24)$$

де  $\varepsilon_{(v)}$  – геометричний  $\varepsilon$  чи дійсний  $\varepsilon_v$  ступені стиску, прийняті залежно від тактності двигуна ( $\varepsilon$  при  $\tau=4$ ,  $\varepsilon_{(v)}$  при  $\tau=2$ );

$\delta_{(v)}$  – ступінь наступного розширення продуктів згоряння ( $\delta$  при  $\tau=4$ ,  $\delta_{(v)}$  при  $\tau=2$ ).

Середній індикаторний тиск  $P_i$  дійсного циклу менше розрахункового  $P_{icер}$ , внаслідок наявності округлень у точках  $c$ ,  $z'$ ,  $z$  індикаторної діаграми і наприкінці розширення. Тому

$$P_i = \varphi_n P_{icер},$$

де  $\varphi_n$  – коефіцієнт повноти діаграми.

За дослідними даними значення  $\varphi_n$  приймають:

- чотиритактний двигун  $\varphi_n=0,97-0,99$ ;
- двотактний двигун:
- прямоточно-щілинне продування  $\varphi_n = 1,0$ ;
- клапанне-щілинне продування  $\varphi_n = 0,97 - 0,99$ .

Індикаторна потужність двигуна,  $N_i$ , кВт,

$$N_i = \frac{P_i V_h \text{in}}{0,03 \cdot \tau}, \quad (25)$$

де  $V_h$  – робочий об'єм, м<sup>3</sup>.

Індикаторний ККД,  $\eta_i$ ,

$$\eta_i = 8,314 \frac{\alpha L_0 P_{iK}}{H_u \eta_v P_K}. \quad (26)$$

Питома індикаторна витрата пального  $g_i$ , кг/кВт·год,

$$g_i = \frac{3600}{H_u \eta_i}. \quad (27)$$

Ефективні потужність  $N_e$ , кВт, ККД  $\eta_e$  та питому ефективну витрату палива  $g_e$ , кг/кВт·год, визначимо як:

$$N_e = N_i \eta_m; \quad (28)$$

$$\eta_e = \eta_i \eta_m; \quad (29)$$

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_m}, \quad (30)$$

де  $\eta_m$  – заданий (таблиця А.1).

Якщо розрахунки робочого циклу зроблені уважно і вдало обрані дослідні коефіцієнти, то розрахункові значення ефективної потужності  $N_e$  і питомої витрати пального  $g_e$  мають бути близькі з точністю  $\pm 5$  % до значень, прийнятих у завданні.

Годинна витрата пального дизелем  $B_\Gamma$ , кг/год,

$$B_\Gamma = g_e N_e. \quad (31)$$

## 5 ПОБУДОВА ТА ОБРОБКА ІНДИКАТОРНОЇ ДІАГРАМИ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВИГУНА

Індикаторну діаграму будуємо в координатах «тиск  $P$  – об'єм  $V$ » (рисунок 2). За віссю абсцис відкладаємо обчислені раніше об'єми  $V_c, V_h, V_a, \psi \cdot V_h$  відповідно до положення характерних точок індикаторної діаграми. За віссю ординат відкладаємо обчислені раніше тиски, що відповідають характерним точкам індикаторної діаграми (точки  $a, c, z, b$ ).

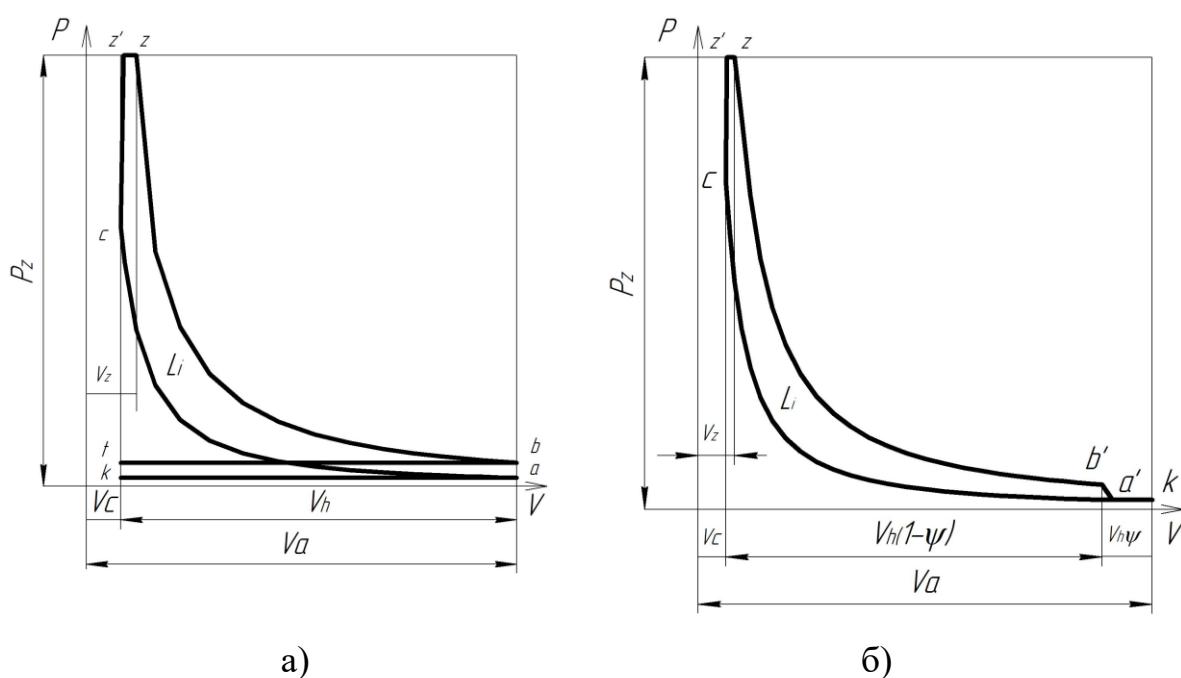


Рисунок 2 – Розрахункові індикаторні діаграми чотиритактного (а) і двотактного (б) двигунів у координатах  $P$ - $V$

Для чотиритактного двигуна (рисунок 2, а) у процесі наповнення циліндра повітрям (лінія  $k$ - $a$ ) і випускання газів, які відпрацювали, ( $b$ - $t$ ) умовно приймемо, що тиск по лінії  $k$ - $a$  зберігається постійним, при цьому  $P_k = P_a$ , з'єднавши точку  $a$  з точкою  $k$ , одержимо умовне зображення процесу наповнення [3, 4].

Для двотактного двигуна (рисунок 2, б) процес газообміну зображують лінією  $b'-a'-k$ , при цьому також умовно приймають, що  $P_K=P_a$ .

Далі необхідно визначити координати проміжних точок політроп стиснення  $a-c$  і розширення  $z-b$ . Для цього визначимо значення тисків  $P$  точок цих політроп при заданому поточному об'ємі  $V$ :

- політропа стиснення

$$P = P_a \left( \frac{V_a}{V} \right)^{n_1}; \quad (32)$$

- політропа розширення

$$P = P_z \frac{1}{\left( \frac{V}{V_z} \right)^{n_2}}, \quad (33)$$

де  $V_a, V_z$  – об'єми, що відповідають точкам  $a$  та  $z$ ;

$n_1, n_2$  – середні показники політроп стиснення і розширення.

Задавши значення поточного об'єму  $V$ , визначимо із наведених співвідношень тиск  $P$ . При заданому куті оберту колінчастого вала (окв)  $\varphi$  поточний об'єм для двигуна з одним поршнем у циліндрі,  $V, \text{м}^3$ ,

$$V = V_c + F_n \cdot s, \quad (34)$$

де  $V_c$  – об'єм камери стиску,  $\text{м}^3$ ;

$F_n$  – площа поперечного перетину циліндра (площа поршня),  $\text{м}^2$ ,

$$F_n = \frac{\pi D^2}{4},$$

де  $D$  – діаметр циліндра,  $\text{м}$ ;

$s$  – переміщення поршня від в.м.т.,  $\text{м}$ .

$$s \approx R(1 - \cos \varphi + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2\varphi)), \quad (35)$$

де  $R = \frac{S}{2}$  – радіус кривошипа (для дизеля з поршнями, що зустрічно рухаються, приймають хід одного поршня), м;

$\lambda$  – відношення радіуса кривошипа до довжини шатуна (таблиця А.1).

Зручно для побудови індикаторної діаграми і наступних динамічних розрахунків всі обчислення зводити в таблицю, складену за формою таблиці 1.

До неї заносимо такі значення:

- стовпчик 1 – кути  $\varphi$  оберту колінчастого валу (окв) від 0 °окв до 720 °окв через кожні 10-15 °окв; -180...+180 °окв для двотактного (-180...0 °окв – такт стиску, 0...+180 °окв – такт розширення);

- стовпчик 2 – кути  $\varphi$  оберту колінчастого валу у радіанах;

- стовпчик 3 – переміщення поршня  $s$ , м;

- стовпчик 4 – поточний об'єм циліндра  $V$ , м<sup>3</sup>, обчислений за виразом (34); зрозуміло, що при  $\varphi=0$ ,  $\varphi=360$  та  $\varphi=720$  °окв  $V=V_c$ , при  $\varphi=180$  та  $\varphi=540$  °окв  $V=V_a=V_b=V_c+V_h$ ;

- стовпчик 5 – відношення  $V_a/V$ , де  $V$  беремо зі стовпчика 4, а  $V_a$  визначений при розрахунку робочого циклу;

- стовпчик 6 – відношення  $V/V_z$ , де  $V$  беремо зі стовпчика 4, а  $V_z$  визначений при розрахунку робочого циклу;

- стовпчик 7 – поточний тиск  $P$ , МПа на лінії наповнення  $\varphi=0-180$  °окв,  $P=P_a$ ; - поточний тиск  $P$  на лінії стиснення  $\varphi=180-360$  °окв, одержуваний за формулою (32); - поточний тиск  $P$  на лінії горіння – розширення  $\varphi=360-540$  °окв, одержаний за формулою (33), якщо відношення  $V/V_z < 1$ , то у стовпчик 8 записуємо  $P=P_z$ ; - поточний тиск  $P$  на лінії випуску  $\varphi=540-720$  °окв,  $P=P_b$ ;

- стовпчик 8 – поточні значення індикаторної роботи  $L_i$ , Дж

$$L_i = ((P_{\varphi} + P_{\varphi-10})/2) * (V_{\varphi} - V_{\varphi-10});$$

Таблиця 1 – Розрахунок індикаторної діаграми

| $\varphi$ | $\varphi$ | s      | V              | Va/V   | V/Vz | P     | Li       |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|------|-------|----------|
| град окв  | рад       | м      | м <sup>3</sup> |        |      | МПа   | Дж       |
| 1         | 2         | 3      | 4              | 5      | 6    | 7     | 8        |
| 0         | 0         | 0,0000 | 0,00226        | 13,000 |      | 0,195 |          |
| 10        | 0,1745    | 0,0053 | 0,00267        | 11,042 |      | 0,195 |          |
| 160       | 2,7925    | 0,3592 | 0,02937        | 1,002  |      | 0,195 |          |
| 170       | 2,9671    | 0,3598 | 0,02942        | 1,000  |      | 0,195 |          |
| 180       | 3,1416    | 0,3600 | 0,02944        | 1,000  |      | 0,195 | 0        |
| 190       | 3,3161    | 0,3598 | 0,02942        | 1,000  |      | 0,195 | 0,00000  |
| 200       | 3,4907    | 0,3592 | 0,02937        | 1,002  |      | 0,196 | -0,00001 |
| 210       | 3,6652    | 0,3573 | 0,02923        | 1,007  |      | 0,197 | -0,00003 |
| 350       | 6,1087    | 0,0053 | 0,00267        | 11,042 |      | 4,991 | -0,00472 |
| 360       | 6,2832    | 0,0000 | 0,00226        | 13,000 | 0,58 | 6,221 | -0,00225 |
| 370       | 6,4577    | 0,0053 | 0,00267        |        | 0,68 | 7,500 | 0,00275  |
| 380       | 6,6323    | 0,0209 | 0,00384        |        | 0,99 | 7,500 | 0,00881  |
| 390       | 6,8068    | 0,0455 | 0,00570        |        | 1,46 | 4,604 | 0,01127  |
| 400       | 6,9813    | 0,0775 | 0,00812        |        | 2,08 | 2,930 | 0,00909  |
| 520       | 9,0757    | 0,3592 | 0,02937        |        | 7,54 | 0,565 | 0,00008  |
| 530       | 9,2502    | 0,3598 | 0,02942        |        | 7,56 | 0,564 | 0,00003  |
| 540       | 9,4248    | 0,3600 | 0,02944        |        | 7,56 | 0,563 | 0,00001  |
| 550       | 9,5993    | 0,3598 | 0,02942        |        |      | 0,560 |          |
| 710       | 12,392    | 0,0053 | 0,00267        |        |      | 0,560 |          |
| 720       | 12,566    | 0,0000 | 0,00226        |        |      | 0,560 |          |

За значеннями об'ємів  $V$  (стовпчик 4) і тисків  $P$  (стовпчик 7) будемо індикаторну діаграму. Виконуючи розрахунки на ЕОМ, таблицю 1 заповнюємо на основі даних роздрукування (додаток Б).

За індикаторною діаграмою визначаємо середній індикаторний тиск  $P_i$ . З цією метою необхідно, спочатку визначити суму індикаторних робіт  $L_i$  у стовпчику 8 та віднести цю суму до робочого об'єму  $V_h$ , потім визначити площу  $F_i$  індикаторної діаграми (рисунок 3), замкнуту між

лініями розширення і стиснення, тобто в контурі ( $a-c-z'-z-b-a$ ). Площа  $F_i$  у масштабі пропорційна роботі газів за цикл  $L_i$ .

Для обчислення площі  $F_i$  ділимо відрізок  $L_{Vh}$ , що відповідає у масштабі об'єму  $V_h$ , на  $m$  (10-15) рівних частин і визначаємо величини ординат  $y_0, y_1, \dots, y_m$ , які знаходяться між лініями стиснення і розширення. Наближене значення площі обчислюємо за формулою трапецій,  $F_i$ , мм<sup>2</sup>,

$$F_i = \frac{L_h}{m} \left( \frac{y_0 + y_m}{2} + y_1 + y_2 + \dots + y_{m-1} \right),$$

де  $L_{Vh}$  та  $y_i$  виражені у міліметрах.

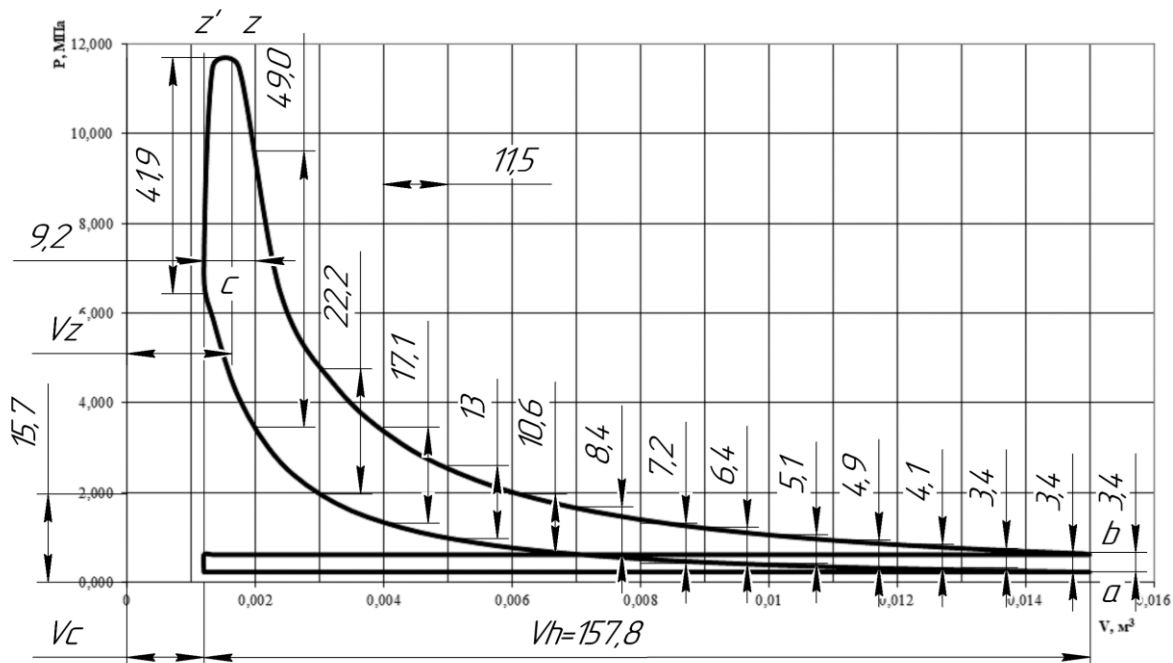


Рисунок 3 – Визначення площі індикаторної діаграми

Середня висота прямокутника площею  $F_i$  і основою  $L_{Vh}$  буде, мм,

$$y_m = \frac{F_i}{L_{Vh}}.$$

Якщо на індикаторній діаграмі масштаб тисків відповідає розміру  $m_p = 1 / l_p, \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$ , то середній індикаторний тиск  $P_i$ , МПа,

$$P_i = y_m m_p.$$

*Приклад:* Визначимо середній індикаторний тиск з діаграми (рисунок 3).

$$\begin{aligned} F_i &= \frac{41,9+49}{2} 9,2 + \frac{49+3,4}{2} 11,5 + \\ &+ 11,5(22,2+17,1+13+10,6+8,4+7,2+6,4+5,1+4,9+4,1+3,4+3,4) = \\ &= 1936,14 \text{ мм}^2. \end{aligned}$$

$$y_m = \frac{1936,14}{157,8} = 12,27 \text{ мм}.$$

$$m_p = 2 / 15,7 = 0,127 \text{ МПа/мм}.$$

$$P_i = 12,27 \cdot 0,127 = 1,56 \text{ МПа}.$$

Обчислене з індикаторної діаграми значення  $P_i$  має бути близьким до розрахункового, визначеного за формулою (24), що вказує на правильність побудови індикаторної діаграми. Припускається розбіжність цих значень у межах  $\pm 0,02$  МПа ( $\pm 5\%$ ).

## 6 ДИНАМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ШАТУННО-КРИВОШИПНОГО МЕХАНІЗМУ

Сумарну питому силу, яка прикладена в центрі поршневого пальця, (рисунок 4) визначають як алгебраїчну суму двох сил  $P_{\Sigma}$ , МПа [2-5],

$$P_{\Sigma} = P_{\Gamma} + P_j, \quad (36)$$

де  $P_{\Gamma}$  – сила від тиску газів на поршень;

$P_j$  – питома сила інерції мас, що поступально рухаються.

Позитивними будемо вважати сили, спрямовані від поршня до колінчастого вала. Сила тиску газів  $P_{\Gamma}$  алгебраїчно складається з тиску газів на поршень з боку камери згоряння  $P$  і тиску з боку картера дизеля  $P_0$ , тобто

$$P_{\Gamma} = P - P_0, \quad (37)$$

де  $P_0 = 0,1013$  МПа.

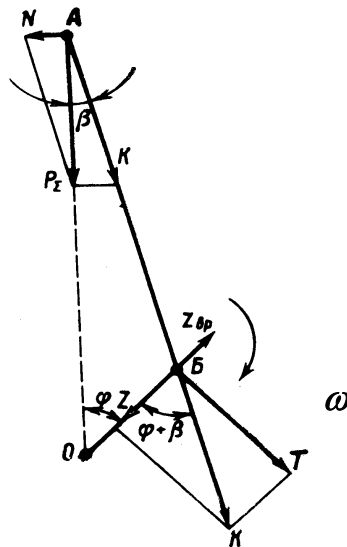


Рисунок 4 – Сили, що діють у шатунно-кривошипному механізмі

Залежність зміни тиску газу в циліндрі  $P$  від кута оберту кривошипа  $\varphi$  задана індикаторною діаграмою.

Питомі сили інерції мас, що поступально рухаються,  $P_j$ , МПа,

$$P_j = -10^{-6} \frac{M_{\Sigma\Pi}}{F_n} j, \quad (38)$$

де  $M_{\Sigma\Pi}$  – маса частин, що поступально рухаються, кг;

$F_n$  – площа поршня, м<sup>2</sup>;

$j$  – прискорення поршня залежно від кута оберту кривошипа, м/с<sup>2</sup>;

$$j \approx R\omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi).$$

де  $\omega = \pi n / 30$  – кутова швидкість колінчастого вала дизеля, с<sup>-1</sup>.

Маса  $M_{\Sigma\Pi}$  включає масу комплекту поршня  $M_{\Sigma\Pi}$  (поршень, вставка, палець, поршневі кільця тощо) та частину маси шатуна, що бере участь у поступальному русі, тобто

$$M_{\Sigma\Pi} = M_{\Pi} + M_{\text{шп}}. \quad (39)$$

Для визначення  $M_{\Sigma\Pi}$  масу шатуна ділимо на дві частини. Одну з них  $M_{\text{шп}}$  вважаємо зосередженою на осі поршневого пальця і відносимо до частин, що рухаються поступально, а другу  $M_{\text{шю}}$  – на осі кривошипа і відносимо до обертових частин. Розподіл мас робимо за правилами розкладання рівнодіючої на дві рівнобіжні сили:

$$M_{\text{шп}} = M_{\text{ш}} \frac{l_c}{L};$$

$$M_{\text{шю}} = M_{\text{ш}} \frac{L - l_c}{L},$$

де  $L$  – довжина шатуна між центрами верхньої і нижньої головок;

$l_c$  – відстань від центра ваги шатуна до центра кривошипної головки.

Для наближених розрахунків можна прийняти [3]:

$$\frac{l_c}{L} \approx 0,3; \quad \frac{L - l_c}{L} \approx 0,7.$$

Тоді величини у рівнянні (38):

- площа поршня  $F_n = \frac{\pi D^2}{4}$  ( $D$  – діаметр циліндра, м);

- маса частин, що поступально рухаються,

$$M_{\Sigma\Pi} \approx M_{\Pi} + 0,3M_{\text{ш}}. \quad (40)$$

де  $M_{\Pi}$  та  $M_{\text{ш}}$  – задані (таблиця А.1).

Обчислення питомих сил зводимо у таблицю, складену за формою таблиці 2.

До неї заносимо:

- стовпчик 9 – значення кута оберту колінчастого валу  $\varphi$  від в.м.т. (або в.о.м.т. для двигуна з ЗРП) через 10-15 °окв – на інтервалі 0...720 °окв для чотиритактного двигуна; -180...+180 °окв для двотактного (-180...0 °окв – такт стиску, 0...+180 °окв – такт розширення);

- стовпчик 10 – кути  $\varphi$  оберту колінчастого валу у радіанах;

- стовпчик 11 – тиск газів на поршень  $P$  залежно від  $\varphi$ ; значення беремо з таблиці 1 (стовпчик 7), сполучаємо кут  $\varphi=0$  °окв із початком такту впускання для чотиритактного двигуна і початком такту горіння-розширення для двотактного двигуна;

- стовпчик 12 – значення  $P_r$ , що обчислюють за формулою (37), тобто від даних стовпчика 11 віднімаємо  $P_0$  ;

- стовпчик 13 – значення прискорення поршня  $j$  з їхніми знаками;
- стовпчик 14 – значення  $P_j$ , що обчислюють за формулою (38), тобто дані стовпчика 13 помножуємо на постійний множник  $a = -10^{-6} \cdot \frac{M_{\Sigma n}}{F_n}$ ;
- стовпчик 15 – значення  $P_{\Sigma}$ , що обчислюють за формулою (36), тобто алгебраїчно складаємо дані стовпчиків 12 та 14.

Таблиця 2 – Розрахунок питомих сил

| $\varphi$<br>град окв | $\varphi$<br>рад | <b>P</b><br>МПа | <b>P<sub>Г</sub></b><br>МПа | <b>j</b><br>м/с <sup>2</sup> | <b>P<sub>j</sub></b><br>МПа | <b>P<sub>Σ</sub></b><br>МПа | <b>N</b><br>МПа | <b>K</b><br>МПа | <b>T</b><br>МПа | <b>Z</b><br>МПа |
|-----------------------|------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 9                     | 10               | 11              | 12                          | 13                           | 14                          | 15                          | 16              | 17              | 18              | 19              |
| 0                     | 0,000            | 0,195           | 0,09                        | 1374,695                     | -1,73028                    | -1,64                       | 0,000           | -1,637          | 0,000           | -1,637          |
| 10                    | 0,175            | 0,195           | 0,09                        | 1341,883                     | -1,68898                    | -1,60                       | -0,066          | -1,597          | -0,342          | -1,558          |
| 160                   | 2,793            | 0,195           | 0,09                        | -840,854                     | 1,058355                    | 1,15                        | 0,094           | 1,156           | 0,304           | -1,111          |
| 170                   | 2,967            | 0,195           | 0,09                        | -845,041                     | 1,063624                    | 1,16                        | 0,048           | 1,158           | 0,154           | -1,147          |
| 180                   | 3,142            | 0,195           | 0,09                        | -845,966                     | 1,064788                    | 1,16                        | 0,000           | 1,158           | 0,000           | -1,158          |
| 190                   | 3,316            | 0,195           | 0,09                        | -845,041                     | 1,063624                    | 1,16                        | -0,048          | 1,158           | -0,154          | -1,147          |
| 200                   | 3,491            | 0,196           | 0,09                        | -840,854                     | 1,058355                    | 1,15                        | -0,094          | 1,156           | -0,304          | -1,112          |
| 210                   | 3,665            | 0,197           | 0,10                        | -829,392                     | 1,043927                    | 1,14                        | -0,137          | 1,148           | -0,447          | -1,048          |
| 350                   | 6,109            | 4,991           | 4,89                        | 1341,883                     | -1,68898                    | 3,20                        | -0,132          | 3,203           | -0,686          | 3,126           |
| 360                   | 6,283            | 6,221           | 6,12                        | 1374,695                     | -1,73028                    | 4,39                        | 0,000           | 4,389           | 0,000           | 4,389           |
| 370                   | 6,458            | 7,500           | 7,40                        | 1341,883                     | -1,68898                    | 5,71                        | 0,236           | 5,715           | 1,223           | 5,577           |
| 380                   | 6,632            | 7,500           | 7,40                        | 1245,884                     | -1,56815                    | 5,83                        | 0,476           | 5,850           | 2,435           | 5,298           |
| 390                   | 6,807            | 4,604           | 4,50                        | 1093,757                     | -1,37667                    | 3,13                        | 0,375           | 3,149           | 1,876           | 2,500           |
| 400                   | 6,981            | 2,930           | 2,83                        | 896,4689                     | -1,12835                    | 1,70                        | 0,263           | 1,721           | 1,282           | 1,118           |
| 520                   | 9,076            | 0,565           | 0,46                        | -840,854                     | 1,058355                    | 1,52                        | 0,124           | 1,527           | 0,402           | -1,468          |
| 530                   | 9,250            | 0,564           | 0,46                        | -845,041                     | 1,063624                    | 1,53                        | 0,063           | 1,527           | 0,203           | -1,512          |
| 540                   | 9,425            | 0,563           | 0,46                        | -845,966                     | 1,064788                    | 1,53                        | 0,000           | 1,527           | 0,000           | -1,527          |
| 550                   | 9,599            | 0,560           | 0,46                        | -845,041                     | 1,063624                    | 1,52                        | -0,063          | 1,524           | -0,202          | -1,509          |
| 710                   | 12,392           | 0,560           | 0,46                        | 1341,883                     | -1,68898                    | -1,23                       | 0,051           | -1,231          | 0,264           | -1,202          |
| 720                   | 12,566           | 0,560           | 0,46                        | 1374,695                     | -1,73028                    | -1,27                       | 0,000           | -1,272          | 0,000           | -1,272          |

Залежності зміни сил  $P_{Г}$ ,  $P_j$ , і  $P_{\Sigma}$  від кута  $\varphi$  зображуємо на графіку.

На рисунку 5 наведено приклад залежності цих питомих сил від кута для чотиритактного двигуна.

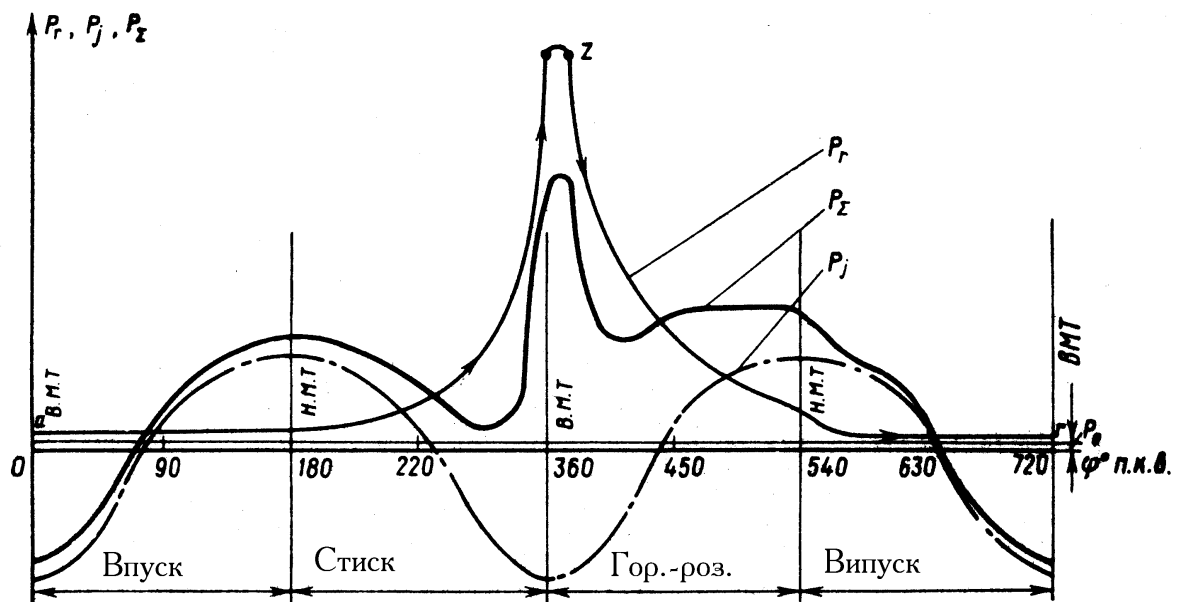


Рисунок 5 – Залежність питомих сил від кута окв  
для чотиритактного двигуна

Силу  $P_\Sigma$  (рисунок 4) розкладаємо на силу  $K$ , що діє уздовж осі шатуна, і силу  $N$ , спрямовану нормально до осі циліндра. А силу  $K$ , перенесену у центр шатунної шийки вала, розкладаємо на тангенційну силу  $T$ , що діє перпендикулярно кривошипу, і нормальну силу  $Z$ , спрямовану за кривошипом [3-5]. З рисунка 4 одержуємо такі вирази для визначення питомих сил:

$$N = P_\Sigma \operatorname{tg} \beta; \quad (41)$$

$$K = P_\Sigma \frac{1}{\cos \beta}; \quad (42)$$

$$T = P_\Sigma \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}; \quad (43)$$

$$Z = P_\Sigma \frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta}, \quad (44)$$

де  $\beta = \arcsin(\lambda \sin \varphi)$ .

Розрахунок питомих сил виконуємо в таблиці 2, де у стовпчики 16, 17, 18 та 19 записуємо значення сил, визначених за формулами (41, 42, 43, 44), при цьому значення сили  $P_{\Sigma}$  беремо зі стовпчика 15. Виконуючи розрахунки на ЕОМ, таблицю 2 заповнюють на основі результатів роздруковування (додаток В). Далі будуємо залежності зміни сил  $N$ ,  $K$ ,  $T$ ,  $Z$  від кута  $\varphi$ . Характер зміни питомих сил  $N$ ,  $K$ ,  $T$ ,  $Z$  залежно від  $\varphi$  для чотиритактного двигуна показаний на рисунках 6 і 7.

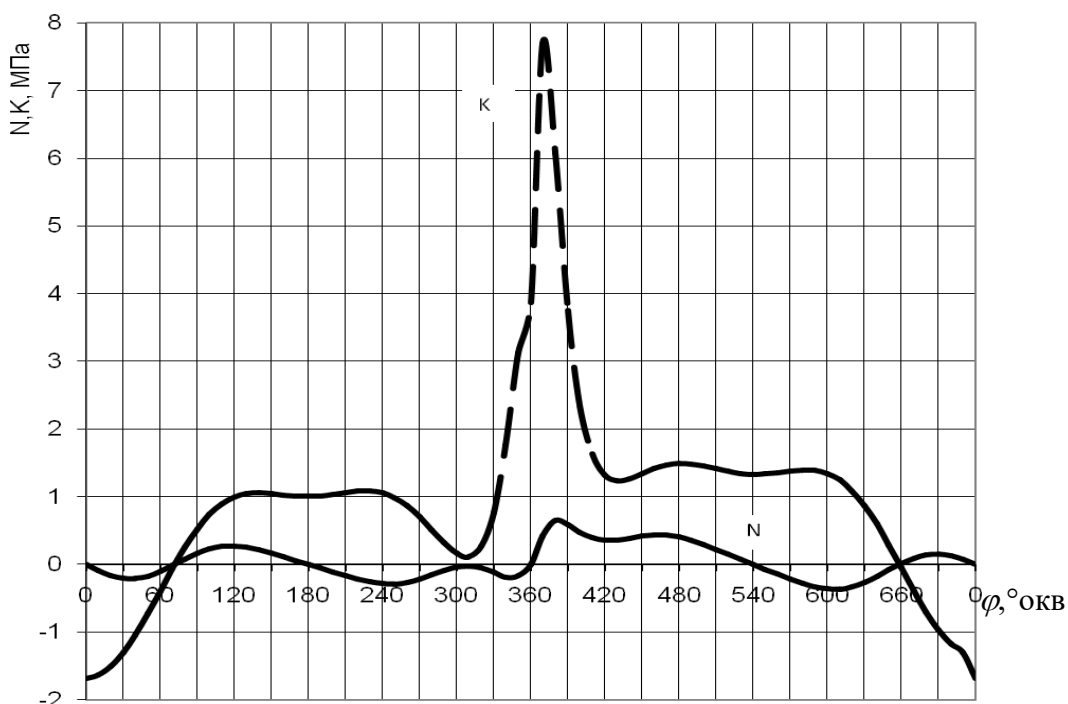


Рисунок 6 – Залежності питомих сил  $N$  та  $K$  від кута  $\varphi$   
для чотиритактного двигуна

Тангенційна сила створює момент  $M = TRF_{\Pi}$  на валу двигуна, який змінюється залежно від кута оберту кривошипа. У багатоциліндровому двигуні відбувається підсумовування моментів окремих циліндрів так, що повний момент витрачається на подолання моменту опору на фланці відбору потужності.

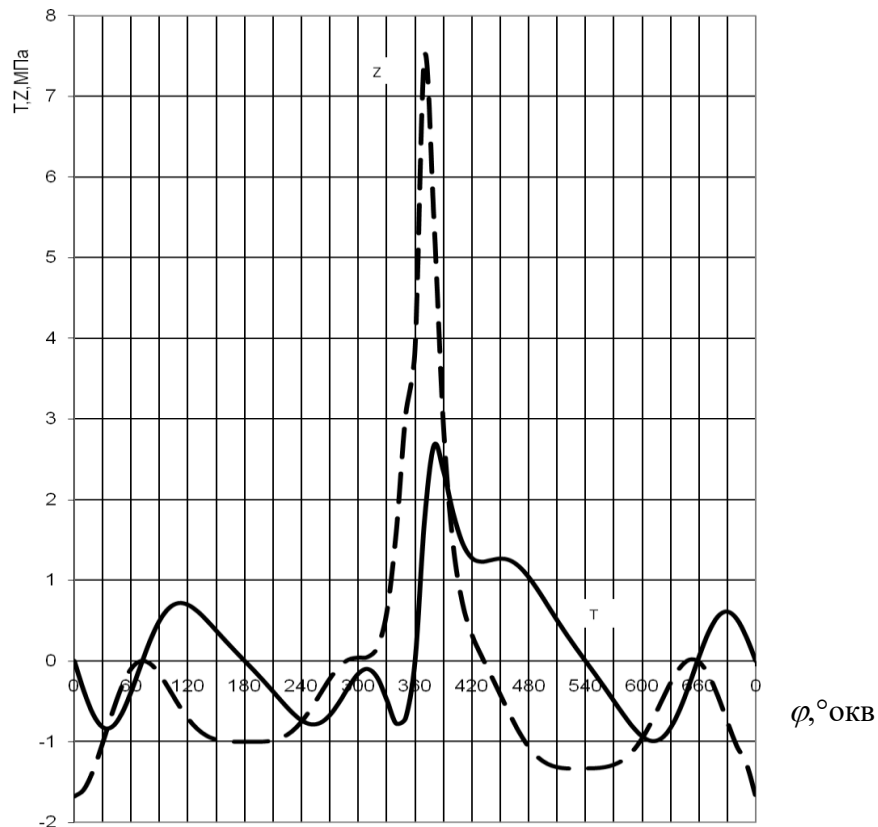


Рисунок 7 – Залежність питомих сил  $T$  і  $Z$  від кута  $\varphi$   
для чотиритактного двигуна

### 6.1 Побудова діаграми тангенційних та радіальних сил, що діють на шатунну шийку у V-подібному двигуні

Під час роботи двох поршнів на одну шатунну шийку їх тангенційні та радіальні сили підсумовуються між собою, даючи відповідні сумарні сили. Для отримання цих сумарних сил необхідно користуватися кривими зміни тангенційних та радіальних сил, показаними на рисунку 7 для одного циліндра, вважаючи що цю діаграму можна також застосовувати для всіх інших циліндрів. Необхідно уявляти, що однойменні точки кривих для окремих циліндрів зміщені між собою на кут оберту колінчастого вала, рівний інтервалу між спалахами в цих циліндрах [2-4, 6].

Пояснимо це на *прикладі*. Побудуємо діаграму сумарних тангенційних сил, що діють на першу шатунну шийку 8-циліндрового

V-подібного чотиритактного двигуна, схема розташування циліндрів якого показана на рисунку 8. Порядок роботи циліндрів 1л-4п-2л-3п-4л-1п-3л-2п.

Відповідно до наведеного порядку роботи спалах у 1п-му циліндрі відбудеться пізніше, ніж у 1л-му, на кут  $\varphi=450^\circ$ окв (кут між спалахами дорівнює  $720:8=90^\circ$ окв, а спалахи в 1п-му та 1л-му циліндрах відбудуться через 5 циліндрів, у 1л-4п-2л-3п-4л-1п, звідси відповідно  $\varphi=5 \cdot 90=450^\circ$ окв).

Прийнявши за початок відліку шкали сил в.м.т. 1л-го циліндра, наносимо на цій шкалі діаграму тангенційних сил 1л-го циліндра. Далі наносимо другу шкалу, на якій за початок відліку приймаємо кут  $\varphi=450^\circ$ оберту колінчастого вала.

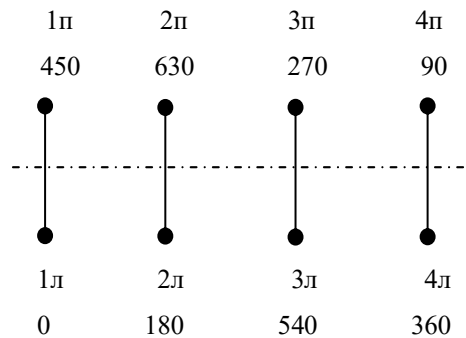


Рисунок 8 – Порядок розташування циліндрів за шийками колінчастого вала V-подібного чотиритактного дизеля

Після того, як нанесли другу шкалу для отримання діаграми сумарної тангенційної сили, на першій шийці достатньо скласти алгебраїчні сили, які відносяться до однакових кутів на обох шкалах. Результати підсумовування наведені на рисунку 9.

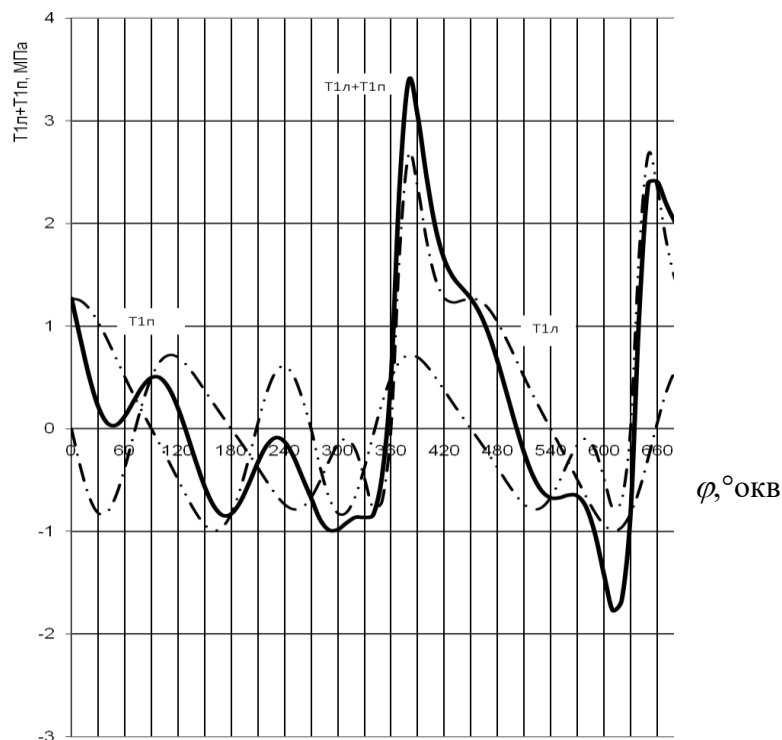


Рисунок 9 – Діаграми тангенційних сил в 1л-му та 1п-му циліндрах і сумарної сили від двох циліндрів

## 6.2 Динамічна діаграма сумарних тангенційних сил двигуна

Для отримання сумарних тангенційних сил двигуна можна користуватися тим же методом, який був прийнятий при визначенні сумарних сил від двох циліндрів, що діють на одну шийку вала. Проте в цьому випадку порядок спалахів у циліндрах не має значення, а важливий лише інтервал між спалахами, який дорівнює

$$ji = \frac{720}{k_{\tau} \cdot i}, \quad (45)$$

де  $k_{\tau}$  – коефіцієнт тактності ( $k_{\tau}=1$  для чотиритактних та  $k_{\tau}=2$  для двотактних дизелів);

$i$  – кількість циліндрів двигуна.

Під діаграмою тангенційної сили одного циліндра наносимо допоміжні шкали за кількістю циліндрів, що залишилися, і на кожній шкалі початок відліку кутів зміщуємо на кут  $j\dot{i}$ . Після цього підсумовуємо всі сили, які відносяться до однієї величини кута  $\varphi$ , а результат наносимо нижче на нову діаграму.

На рисунку 10 показана побудована діаграма сумарних тангенційних сил для чотиритактного 8-циліндрового двигуна ( $j\dot{i}=90^\circ\text{окв}$ ). У V-подібному двигуні з причіпним шатуном доцільно спочатку визначити суму обертальних моментів від головного та бокового циліндрів, що діють на один кривошип.

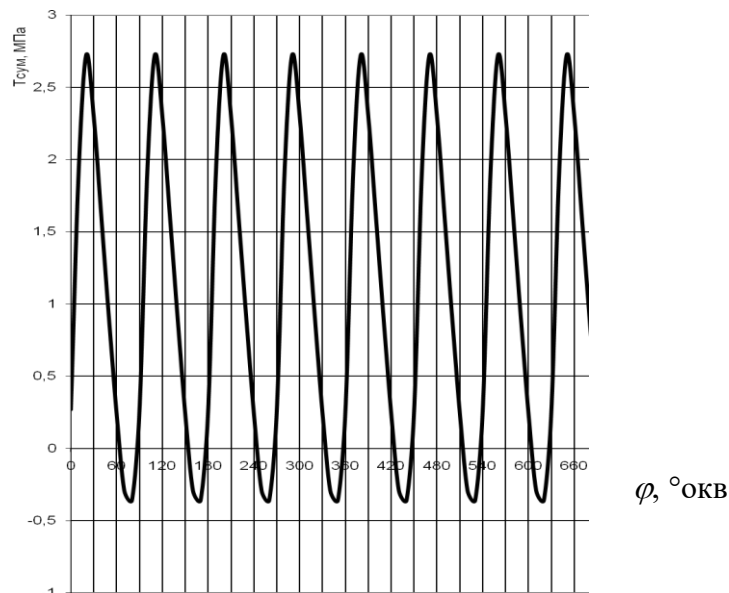


Рисунок 10 – Сумарна діаграма тангенційних сил V-подібного чотиритактного 8-циліндрового двигуна

Тангенційні сили, які виникають від головного та бокового циліндрів, складають із зсувом фаз, які визначаються порядком роботи; далі складають сили за всіма кривошипами із зсувом фаз на кут, відповідний взаємному положенню кривошипів. Період зміни повного обертового моменту дорівнює зсуву фаз роботи окремих циліндрів [3].

У разі виконання розрахунку на ЕОМ його виконують у вигляді таблиці так званого «набігаючого» моменту – таблиця 3. Заповнення таблиці 3 розглянемо на прикладі дизеля *K6S310DR*.

*Приклад:* дизель має 6 циліндрів. Інтервал між спалахами, за формулою (45),  $ij=720/6=120$  °окв. Порядок роботи циліндрів 1-3-5-6-4-2.

У стовпчик 20 переносять значення сили  $T$  зі стовпчика 18 та вважають, що одержані значення відповідають силі  $T_1$  першого циліндра.

Таблиця 3 – Розрахунок сумарних тангенціальних сил

| $\varphi$ | $\varphi$ | <b>T1</b> | <b>T3</b> | <b>T5</b> | <b>T6</b> | <b>T4</b> | <b>T2</b> | <b>TΣ</b> | <b>MΣ</b> |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| град окв  | рад       | МПа       | МПа       | МПа       | МПа       | МПа       | МПа       | МПа       | Н*м       |
| 9         | 10        | 20        | 21        | 22        | 23        | 24        | 25        | 26        | 27        |
| 0         | 0,000     | 0,000     | 0,729     | -0,778    | 0,000     | 1,142     | -1,007    | 0,086     | 1,1691    |
| 10        | 0,175     | -0,342    | 0,679     | -0,794    | 1,224     | 0,990     | -1,026    | 0,731     | 9,9325    |
| 20        | 0,349     | -0,617    | 0,580     | -0,743    | 2,442     | 0,809     | -0,956    | 1,514     | 20,5704   |
| 30        | 0,524     | -0,775    | 0,451     | -0,626    | 2,884     | 0,611     | -0,791    | 1,753     | 23,8213   |
| 40        | 0,698     | -0,788    | 0,306     | -0,463    | 2,272     | 0,407     | -0,543    | 1,192     | 16,1889   |
| 50        | 0,873     | -0,661    | 0,154     | -0,292    | 1,781     | 0,203     | -0,240    | 0,945     | 12,8364   |
| 60        | 1,047     | -0,426    | 0,000     | -0,169    | 1,490     | 0,000     | 0,072     | 0,966     | 13,1299   |
| 70        | 1,222     | -0,132    | -0,154    | -0,157    | 1,363     | -0,202    | 0,338     | 1,056     | 14,3480   |
| 80        | 1,396     | 0,168     | -0,307    | -0,304    | 1,331     | -0,402    | 0,510     | 0,996     | 13,5359   |
| 90        | 1,571     | 0,426     | -0,456    | -0,599    | 1,330     | -0,595    | 0,554     | 0,661     | 8,9744    |
| 100       | 1,745     | 0,612     | -0,593    | -0,885    | 1,312     | -0,771    | 0,465     | 0,139     | 1,8845    |
| 110       | 1,920     | 0,712     | -0,706    | -0,771    | 1,251     | -0,915    | 0,264     | -0,165    | -2,2414   |
| 120       | 2,094     | 0,729     | -0,778    | 0,000     | 1,142     | -1,007    | 0,000     | 0,086     | 1,1691    |
| 130       | 2,269     | 0,679     | -0,794    | 1,224     | 0,990     | -1,026    | -0,342    | 0,731     | 9,9325    |

У стовпчик 21 переносять значення зі стовпчика 20, починаючи зі строки, що відповідає  $\varphi=120$  °окв, ці значення відповідають силі  $T_3$  третього циліндра.

У стовпчик 22 переносять значення зі стовпчика 20, починаючи зі строки, що відповідає  $\varphi=240$  °окв, ці значення відповідають силі  $T_5$  третього циліндра.

У стовпчик 23 переносять значення зі стовпчика 20, починаючи зі строки, що відповідає  $\varphi=360^\circ$  окв, ці значення відповідають силі  $T_6$  шостого циліндра.

У стовпчик 24 переносять значення зі стовпчика 20, починаючи зі строки, що відповідає  $\varphi=480^\circ$  окв, ці значення відповідають силі  $T_4$  четвертого циліндра.

У стовпчик 25 переносять значення зі стовпчика 20, починаючи зі строки, що відповідає  $\varphi=600^\circ$  окв, ці значення відповідають силі  $T_2$  другого циліндра.

У стовпчику 26 виконують, за кожним рядком, підсумовування тангедійних сил від кожного циліндра, сумують значення комірок у стовпчиках 20, 21, 22, 23, 24 та 25. Одержана сума і буде значенням сумарної тангедійної сили  $T_\Sigma$  для поточного значення кута оберту  $\varphi$ .

На рисунку 11 показана побудована діаграма сумарних тангенційних сил.

У стовпчику 27 підраховують значення сумарного обертового моменту  $M_{об} = T_\Sigma R F_{II}$ , Н\*м. Сума значень стовпчика 27 віднесена до кількості рядків (71 рядок в додатку В) дорівнює значенню середнього обертового моменту, що створює сумарна тангедійна сила  $T_\Sigma$ .

Правильність побудови сумарної діаграми перевіряють відношенням

$$M_{обсер1}/M_{обсер2}=0,98-1,02,$$

де  $M_{обсер1} = T_{\Sigma сер} R F_{II}$  – середній обертовий момент, що створює сумарна тангедійна сила  $T_\Sigma$ , кН;

$M_{обсер2} = 9,74 \frac{N}{n}$  – середній обертовий момент на валу дизеля, Н\*м;

$T_{\Sigma сер}$  – середня сумарна тангедійна сила, МПа;

$R$  – радіус кривошипа колінчастого валу, м;

$F_{\Pi}$  – площа поршня,  $\text{м}^2$ ;

$N$  – потужність дизеля, що визначають на основі сумарної роботи газів за цикл, кВт;

$n$  – частота обертів колінчастого вала,  $\text{хв}^{-1}$ .

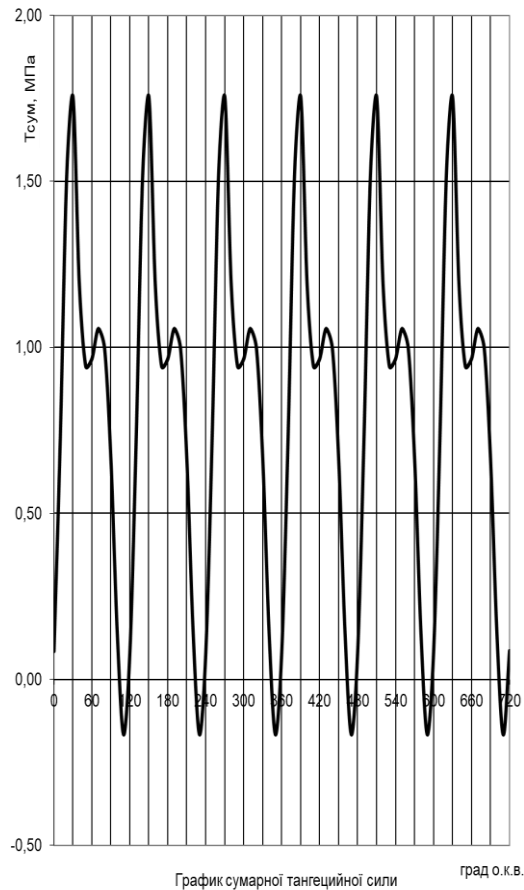


Рисунок 11 – Сумарна діаграма тангенційних сил  
чотиритактного шестициліндрового двигуна

Одержане значення відношення  $M_{\text{обсер1}}/M_{\text{обсер2}}$  наведено в роздрукуванні (додаток В).

## **7 РОЗРАХУНОК ВУЗЛА ДВИГУНА**

Розрахунок вузла ЕУРС виконують відповідно до завдання (таблиця А.3) для того варіанта двигуна-зразка, що вказаний у таблиці А.2. Наприклад, здобувач виконує за таблицею А.1 варіант 5, для якого в таблиці А.2 вказано двигун-зразок 10Д100. Відповідно до шифру з таблиці А.3 здобувач виконує розрахунок гільзи циліндра двигуна 10Д100. Розрахунок вузла виконують відповідно до [12]. За результатами розрахунку визначають основні геометричні розміри заданого вузла. Перед розрахунком вибирають і дають обґрунтування конструкції зазначеного вузла, застосовуваних матеріалів. У пояснювальній записці проєкта приводять стислий опис призначення, побудови і принципу роботи вузла (0,5-1 сторінки). У таблиці А.2 вказані посилання, де наведено опис побудови і принципу роботи вузлів двигунів-зразків.

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1 Студентська навчальна звітність. Текстова частина (пояснювальна записка). Загальні вимоги до побудови, викладення та оформлення: метод. посіб. з додержання вимог нормоконтролю у студ. навч. звітності / Є. В. Коновалов, Л. М. Козар та ін. Харків: УкрДАЗТ, 2014. 58 с.

2 Автомобільні двигуни: підручник / Ф. І. Абрамчук, Ю. Ф. Гутаревич, К. Є. Долганов, І. І. Тимченко. Київ: Арістей, 2006. 476 с.

3 Головка В. Ф. Енергетичне обладнання рухомого складу залізниць: навч. посіб. Харків: ПП вид-во «Нове слово», 2003. 256 с.

4 Дяченко В. Г. Двигуни внутрішнього згоряння. Теорія: підручник. Харків: НТУ «ХП», 2008. 488 с.

5 Марченко А. П., Рязанцев М. К., Шеховцов А. Ф. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах. Т. 1. Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин / за ред. А. П. Марченка та А. Ф. Шеховцова. Харків: Прапор, 2004. 384 с.

6 Марченко А. П., Рязанцев М. К., Шеховцов А. Ф. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах. Т. 2. Доводка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин / за ред. А. П. Марченка та А. Ф. Шеховцова. Харків: Прапор, 2004. 367 с.

7 Марченко А. П., Рязанцев М. К., Шеховцов А. Ф. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах. Т. 3. Комп'ютерні системи керування ДВЗ / за ред. А. П. Марченка та А. Ф. Шеховцова. Харків: Прапор, 2005. 344 с.

8 Посібник з технічного обслуговування тепловоза ЧМЕ-3П. Чеська республіка : Чеська-Требсова, 2008. 38 с.

9 EMD 645E. Engine Maintenance Manual. URL: // <https://www.rail-fallenflags.org/manual/emd645-title.pdf> (дата звернення: 23.05.2025).

10 Техніко-економічна документація № 620М 0159-2: Рейковий автобус 620М. Pojazdy PESA Bydgoszcz SA Holding Polska, 2008. 57 с.

11 Використання EXCEL в розрахунках. URL: <https://ami.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/01/Excel.pdf> (дата звернення: 23.05.2025).

12 Жалкін Д. С., Жалкін С. Г., Агулов А. Ф. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Локомотивні енергетичні установки» Ч. 2. Визначення основних розмірів деталей локомотивних енергетичних установок. Харків: УкрДАЗТ, 2013. 50 с.

**ДОДАТОК А**  
(обов'язковий)  
Вихідні дані для розрахунків

Таблиця А.1 – Вихідні дані для розрахунків

| Параметри                 | Остання цифра шифру (варіант завдання) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                           | 0                                      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| $N_e$                     | 1455                                   | 880   | 2200  | 1470  | 2200  | 2205  | 990   | 2940  | 3400  | 385   |
| $\tau$                    | 4                                      | 4     | 2     | 2     | 4     | 2     | 4     | 4     | 4     | 4     |
| $i$                       | 12                                     | 8     | 12    | 12    | 16    | 10    | 6     | 16    | 12    | 6     |
| $n$                       | 1800                                   | 1000  | 900   | 750   | 1000  | 850   | 750   | 1000  | 1150  | 1900  |
| $D$                       | 170                                    | 260   | 250   | 230   | 260   | 207   | 310   | 260   | 250   | 128   |
| $S$                       | 190                                    | 260   | 254   | 300   | 260   | 2×254 | 360   | 260   | 320   | 166   |
| $g_e$                     | 203                                    | 210,8 | 214   | 238,7 | 211,4 | 231,2 | 220   | 211,4 | 195   | 220   |
| $\varphi$                 | 1,1                                    | 1,05  | 1,5   | 1,5   | 1,05  | 1,5   | 1,05  | 1,12  | 1,1   | 1,1   |
| $\eta_m$                  | 0,91                                   | 0,85  | 0,82  | 0,82  | 0,87  | 0,81  | 0,85  | 0,87  | 0,9   | 0,91  |
| $\varepsilon$             | 14,0                                   | 12,5  | 16,4  | 16,4  | 12,5  | 16,7  | 13    | 12,5  | 17,1  | 17,0  |
| $\varepsilon_v$           | 14,0                                   | 12,5  | 14,5  | 14,5  | 12,5  | 15,1  | 13    | 12,5  | 17,1  | 17,0  |
| $\gamma$                  | 0,01                                   | 0,04  | 0,06  | 0,08  | 0,03  | 0,06  | 0,02  | 0,03  | 0,02  | 0,01  |
| $P_z$                     | 17,0                                   | 9,5   | 14,0  | 10,6  | 11,5  | 10,0  | 7,5   | 12,5  | 24,0  | 22,0  |
| $\zeta_z$                 | 0,85                                   | 0,80  | 0,82  | 0,80  | 0,82  | 0,80  | 0,83  | 0,80  | 0,82  | 0,85  |
| $M_{\Pi}$                 | 7,3                                    | 32    | 40    | 46    | 32    | 35,5  | 68    | 32    | 32    | 3,8   |
| $M_{\Pi\Pi}$              | 14,0                                   | 60    | 50    | 54,3  | 60    | 39,6  | 90    | 60    | 69    | 7,0   |
| $\alpha$                  | 1,9                                    | 2,1   | 2,0   | 2,0   | 2,1   | 2,1   | 2,0   | 1,9   | 2,0   | 1,9   |
| $\lambda$                 | 1/4,3                                  | 1/3,3 | 1/4,1 | 1/4,1 | 1/3,2 | 1/5   | 1/4,2 | 1/3,1 | 1/4,4 | 1/4,4 |
| Розташування<br>циліндрів | Р **                                   | V***  | V     | V     | V     | ЗРП*  | Р     | V     | V     | V     |

\*)ЗРП – з поршнями, що зустрічно рухаються; \*\*)Р – рядне; \*\*\*)V – V-подібне

Таблиця А.2 – Двигун-зразок та порядок роботи циліндрів

| Варіант<br>за таблицю<br>А.1 | Двигун-зразок      |                       | $\gamma_{\Pi}$ | Порядок роботи<br>циліндрів                       | Джерела |
|------------------------------|--------------------|-----------------------|----------------|---------------------------------------------------|---------|
|                              | Заводська<br>марка | Позначення за<br>ДСТУ |                |                                                   |         |
| 1                            | 2                  | 3                     | 4              | 5                                                 | 6       |
| 0                            | CAT3512B           | 12CH170/190           | -              | 1л-1п-4п-4л-5л-5п-2п-2л-3л-3п-6п-6л               | [8]     |
| 1                            | 6Д49               | 8CH26/26              | 42             | 1л-4п-2л-3п-4л-1п-3л-2п*                          | [2]     |
| 2                            | EMD645             | 12CH23/25,4           | 45             | 1л-1п-6п-4л-3л-3п-4п-5л-2л-2п-5п-6л               | [9]     |
| 3                            | 14Д40              | 12ДН23/30             | 45             | 1л-1п-6л-6п-2л-2п-4л-4п-3л-3п-5л-5п               | [2]     |
| 4                            | 1А-5Д49            | 16CH26/26             | 42             | 1п-4л-5п-2л-7п-6л-3п-1л-8п-5л-4п-7л-2п-3л-6п-8л** | [2]     |
| 5                            | 10Д100             | 10ДН20,7/2×25,4       | -              | 1-6-10-2-4-9-5-3-7-8                              | [2]     |
| 6                            | K6S310DR           | 6CH31/36              | -              | 1-3-5-6-4-2                                       | [2]     |

Продовження таблиці А.2

| 1                                                      | 2                  | 3            | 4  | 5                                               | 6    |
|--------------------------------------------------------|--------------------|--------------|----|-------------------------------------------------|------|
| 7                                                      | 2А-5Д49            | 16СН26/26    | 42 | 1п-4п-5п-2л-7п-6л-3п-1л-8п-5л-4п-7л-2п-3л-6п-8л | [2]  |
| 8                                                      | GEVO12             | 12СН25/320   | 45 | 1п-1л-5п-5л-3п-3л-6п-6л-2п-2л-4п-4л             | [7]  |
| 9                                                      | MAND2876<br>LUE623 | 6СН12,8/16,6 | -  | 1-5-3-6-2-4                                     | [10] |
| *) буква п – правий ряд циліндрів; **) буква л – лівий |                    |              |    |                                                 |      |

Таблиця А.3 – Завдання на виконання розрахунку вузла дизеля

| Передостання<br>цифра шифру | Найменування вузла                  |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1                           | 2                                   |
| 0, 6                        | Колінчастий вал                     |
| 1, 9                        | Поршень                             |
| 2, 8                        | Шатуни (шатун)                      |
| 3, 5                        | Втулка (гільза) циліндра            |
| 4, 7                        | Паливний насос (секція) та форсунка |

# ДОДАТОК Б (довідковий)

## Результати розрахунків діаграми $P-V$

| Вихідні дані |                    |                     | дизель K6S310DR |                       |         |            |                |           |                    |
|--------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|---------|------------|----------------|-----------|--------------------|
| D, м         | S, м               | n, хв <sup>-1</sup> | Pa, МПа         | Vc, м <sup>3</sup>    | Pc, МПа | i          | εг             | εд        | n1                 |
| 0,31         | 0,36               | 750                 | 0,195           | 0,00226               | 6,23    | 6          | 13             | 13        | 1,35               |
| Pz, МПа      | ρ                  | Vz, м <sup>3</sup>  | Pb, МПа         | Va(b), м <sup>3</sup> | n2      | Mп, кг     | Mш, кг         | λ         | Vh, м <sup>3</sup> |
| 7,5          | 1,72               | 0,003895            | 0,56            | 0,02944               | 1,28    | 68         | 90             | 0,24      | 0,02717            |
| Pi, МПа      | ω, с <sup>-1</sup> | Mшп, кг             | Mзп, кг         | Fп, м <sup>2</sup>    | N, кВт  | Мср1       | Мср2           | Мср1/Мср2 |                    |
| 1,22         | 78,54              | 27                  | 95              | 0,0755                | 869     | 11,20      | 11,07          | 1,01      |                    |
| φ            | φ                  | s                   | V               | Va/V                  | V/Vz    | P          | Li             |           |                    |
| град окв     | рад                | м                   | м <sup>3</sup>  |                       |         | МПа        | Дж             |           |                    |
| 1            | 2                  | 3                   | 4               | 5                     | 6       | 7          | 8              |           |                    |
| 0            | 0                  | 0,0000              | 0,00226         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 10           | 0,1745             | 0,0034              | 0,00252         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 20           | 0,3491             | 0,0134              | 0,00327         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 30           | 0,5236             | 0,0295              | 0,00449         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 40           | 0,6981             | 0,0510              | 0,00611         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 50           | 0,8727             | 0,0769              | 0,00807         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 60           | 1,0472             | 0,1061              | 0,01027         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 70           | 1,2217             | 0,1374              | 0,01263         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 80           | 1,3963             | 0,1695              | 0,01506         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 90           | 1,5708             | 0,2014              | 0,01747         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 100          | 1,7453             | 0,2320              | 0,01978         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 110          | 1,9199             | 0,2605              | 0,02192         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 120          | 2,0944             | 0,2861              | 0,02386         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 130          | 2,2689             | 0,3083              | 0,02553         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 140          | 2,4435             | 0,3267              | 0,02693         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 150          | 2,618              | 0,3412              | 0,02802         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 160          | 2,7925             | 0,3517              | 0,02881         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 170          | 2,9671             | 0,3579              | 0,02928         |                       |         | 0,195      |                |           |                    |
| 180          | 3,1416             | 0,3600              | 0,02944         | 1,000                 |         | 0,195      | 0              |           |                    |
| 190          | 3,3161             | 0,3579              | 0,02928         | 1,005                 |         | 0,196      | -0,00003       |           |                    |
| 200          | 3,4907             | 0,3517              | 0,02881         | 1,022                 |         | 0,201      | -0,00009       |           |                    |
| 210          | 3,6652             | 0,3412              | 0,02802         | 1,051                 |         | 0,208      | -0,00016       |           |                    |
| 220          | 3,8397             | 0,3267              | 0,02693         | 1,093                 |         | 0,220      | -0,00023       |           |                    |
| 230          | 4,0143             | 0,3083              | 0,02553         | 1,153                 |         | 0,236      | -0,00032       |           |                    |
| 240          | 4,1888             | 0,2861              | 0,02386         | 1,234                 |         | 0,259      | -0,00042       |           |                    |
| 250          | 4,3633             | 0,2605              | 0,02192         | 1,343                 |         | 0,290      | -0,00053       |           |                    |
| 260          | 4,5379             | 0,2320              | 0,01978         | 1,488                 |         | 0,334      | -0,00067       |           |                    |
| 270          | 4,7124             | 0,2014              | 0,01747         | 1,685                 |         | 0,394      | -0,00084       |           |                    |
| 280          | 4,8869             | 0,1695              | 0,01506         | 1,955                 |         | 0,482      | -0,00106       |           |                    |
| 290          | 5,0615             | 0,1374              | 0,01263         | 2,330                 |         | 0,611      | -0,00133       |           |                    |
| 300          | 5,236              | 0,1061              | 0,01027         | 2,866                 |         | 0,808      | -0,00168       |           |                    |
| 310          | 5,4105             | 0,0769              | 0,00807         | 3,649                 |         | 1,119      | -0,00212       |           |                    |
| 320          | 5,5851             | 0,0510              | 0,00611         | 4,817                 |         | 1,628      | -0,00269       |           |                    |
| 330          | 5,7596             | 0,0295              | 0,00449         | 6,558                 |         | 2,470      | -0,00332       |           |                    |
| 340          | 5,9341             | 0,0134              | 0,00327         | 8,994                 |         | 3,783      | -0,00380       |           |                    |
| 350          | 6,1087             | 0,0034              | 0,00252         | 11,683                |         | 5,386      | -0,00345       |           |                    |
| 360          | 6,2832             | 0,0000              | 0,00226         | 13,000                |         | 6,221      | -0,00148       |           |                    |
| 370          | 6,4577             | 0,0034              | 0,00252         |                       | 0,65    | 7,500      | 0,00175        |           |                    |
| 380          | 6,6323             | 0,0134              | 0,00327         |                       | 0,84    | 7,500      | 0,00565        |           |                    |
| 390          | 6,8068             | 0,0295              | 0,00449         |                       | 1,15    | 6,254      | 0,00836        |           |                    |
| 400          | 6,9813             | 0,0510              | 0,00611         |                       | 1,57    | 4,213      | 0,00849        |           |                    |
| 410          | 7,1558             | 0,0769              | 0,00807         |                       | 2,07    | 2,953      | 0,00701        |           |                    |
| 420          | 7,3304             | 0,1061              | 0,01027         |                       | 2,64    | 2,168      | 0,00564        |           |                    |
| 430          | 7,5049             | 0,1374              | 0,01263         |                       | 3,24    | 1,663      | 0,00452        |           |                    |
| 440          | 7,6794             | 0,1695              | 0,01506         |                       | 3,87    | 1,328      | 0,00363        |           |                    |
| 450          | 7,854              | 0,2014              | 0,01747         |                       | 4,49    | 1,098      | 0,00292        |           |                    |
| 460          | 8,0285             | 0,2320              | 0,01978         |                       | 5,08    | 0,937      | 0,00235        |           |                    |
| 470          | 8,203              | 0,2605              | 0,02192         |                       | 5,63    | 0,821      | 0,00189        |           |                    |
| 480          | 8,3776             | 0,2861              | 0,02386         |                       | 6,13    | 0,737      | 0,00150        |           |                    |
| 490          | 8,5521             | 0,3083              | 0,02553         |                       | 6,56    | 0,676      | 0,00118        |           |                    |
| 500          | 8,7266             | 0,3267              | 0,02693         |                       | 6,91    | 0,631      | 0,00091        |           |                    |
| 510          | 8,9012             | 0,3412              | 0,02802         |                       | 7,19    | 0,600      | 0,00067        |           |                    |
| 520          | 9,0757             | 0,3517              | 0,02881         |                       | 7,40    | 0,579      | 0,00046        |           |                    |
| 530          | 9,2502             | 0,3579              | 0,02928         |                       | 7,52    | 0,567      | 0,00027        |           |                    |
| 540          | 9,4248             | 0,3600              | 0,02944         |                       | 7,56    | 0,563      | 0,00009        |           |                    |
| 550          | 9,5993             | 0,3579              | 0,02928         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 560          | 9,7738             | 0,3517              | 0,02881         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 570          | 9,9484             | 0,3412              | 0,02802         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 580          | 10,123             | 0,3267              | 0,02693         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 590          | 10,297             | 0,3083              | 0,02553         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 600          | 10,472             | 0,2861              | 0,02386         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 610          | 10,647             | 0,2605              | 0,02192         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 620          | 10,821             | 0,2320              | 0,01978         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 630          | 10,996             | 0,2014              | 0,01747         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 640          | 11,17              | 0,1695              | 0,01506         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 650          | 11,345             | 0,1374              | 0,01263         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 660          | 11,519             | 0,1061              | 0,01027         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 670          | 11,694             | 0,0769              | 0,00807         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 680          | 11,868             | 0,0510              | 0,00611         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 690          | 12,043             | 0,0295              | 0,00449         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 700          | 12,217             | 0,0134              | 0,00327         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 710          | 12,392             | 0,0034              | 0,00252         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
| 720          | 12,566             | 0,0000              | 0,00226         |                       |         | 0,560      |                |           |                    |
|              |                    |                     |                 |                       |         | <b>ΣLi</b> | <b>0,03309</b> |           |                    |

*Примітка* – Для користування шаблоном, який побудовано у MS "Excel" [11], необхідно відкрити файл із назвою, що відповідає дизелю-прототипу (наприклад K6S310DR.XLS). У файлі на аркуші 1 ввести вихідні дані, та роздрукувати результати і необхідні графіки.

# ДОДАТОК В (ДОВІДКОВИЙ)

## Результати розрахунків питомих сил $N, K, Z, T$ та $T_{\Sigma}$

| φ        | φ      | P     | Pr   | j                | Pj       | PΣ    | N      | K      | T      | Z      | T1     | T3     | T5     | T6     | T4     | T2     | TΣ     | MΣ      |
|----------|--------|-------|------|------------------|----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| град окв | рад    | МПа   | МПа  | м/с <sup>2</sup> | МПа      | МПа   | МПа    | МПа    | МПа    | МПа    | МПа    | МПа    | МПа    | МПа    | МПа    | МПа    | МПа    | Н*м     |
| 9        | 10     | 11    | 12   | 13               | 14       | 15    | 16     | 17     | 18     | 19     | 20     | 21     | 22     | 23     | 24     | 25     | 26     | 27      |
| 0        | 0,000  | 0,195 | 0,09 | 1374,695         | -1,73028 | -1,64 | 0,000  | -1,637 | 0,000  | -1,637 | 0,000  | 0,729  | -0,778 | 0,000  | 1,142  | -1,007 | 0,086  | 1,1691  |
| 10       | 0,175  | 0,195 | 0,09 | 1341,883         | -1,68898 | -1,60 | -0,066 | -1,597 | -0,342 | -1,560 | -0,342 | 0,679  | -0,794 | 1,224  | 0,990  | -1,026 | 0,731  | 9,9325  |
| 20       | 0,349  | 0,195 | 0,09 | 1245,884         | -1,56815 | -1,47 | -0,120 | -1,479 | -0,617 | -1,344 | -0,617 | 0,580  | -0,743 | 2,442  | 0,809  | -0,956 | 1,514  | 20,5704 |
| 30       | 0,524  | 0,195 | 0,09 | 1093,757         | -1,37667 | -1,28 | -0,154 | -1,292 | -0,775 | -1,034 | -0,775 | 0,451  | -0,626 | 2,884  | 0,611  | -0,791 | 1,753  | 23,8213 |
| 40       | 0,698  | 0,195 | 0,09 | 896,4689         | -1,12835 | -1,03 | -0,160 | -1,047 | -0,788 | -0,690 | -0,788 | 0,306  | -0,463 | 2,272  | 0,407  | -0,543 | 1,192  | 16,1889 |
| 50       | 0,873  | 0,195 | 0,09 | 667,8003         | -0,84054 | -0,75 | -0,139 | -0,760 | -0,661 | -0,374 | -0,661 | 0,154  | -0,292 | 1,781  | 0,203  | -0,240 | 0,945  | 12,8364 |
| 60       | 1,047  | 0,195 | 0,09 | 422,983          | -0,53239 | -0,44 | -0,092 | -0,448 | -0,426 | -0,139 | -0,426 | 0,000  | -0,169 | 1,490  | 0,000  | 0,072  | 0,966  | 13,1299 |
| 70       | 1,222  | 0,195 | 0,09 | 177,2405         | -0,22309 | -0,13 | -0,030 | -0,133 | -0,132 | -0,016 | -0,132 | -0,154 | -0,157 | 1,363  | -0,202 | 0,338  | 1,056  | 14,3480 |
| 80       | 1,396  | 0,195 | 0,09 | -55,6144         | 0,07     | 0,16  | 0,039  | 0,168  | 0,168  | -0,010 | 0,168  | -0,307 | -0,304 | 1,331  | -0,402 | 0,510  | 0,996  | 13,5359 |
| 90       | 1,571  | 0,195 | 0,09 | -264,364         | 0,332746 | 0,43  | 0,105  | 0,439  | 0,426  | -0,105 | 0,426  | -0,456 | -0,599 | 1,330  | -0,595 | 0,554  | 0,661  | 8,9744  |
| 100      | 1,745  | 0,195 | 0,09 | -441,228         | 0,555359 | 0,65  | 0,157  | 0,668  | 0,612  | -0,267 | 0,612  | -0,593 | -0,885 | 1,312  | -0,771 | 0,465  | 0,139  | 1,8845  |
| 110      | 1,920  | 0,195 | 0,09 | -582,27          | 0,732884 | 0,83  | 0,190  | 0,848  | 0,712  | -0,461 | 0,712  | -0,706 | -0,771 | 1,251  | -0,915 | 0,264  | -0,165 | -2,2414 |
| 120      | 2,094  | 0,195 | 0,09 | -687,347         | 0,865141 | 0,96  | 0,202  | 0,980  | 0,729  | -0,654 | 0,729  | -0,778 | 0,000  | 1,142  | -1,007 | 0,000  | 0,086  | 1,1691  |
| 130      | 2,269  | 0,195 | 0,09 | -759,613         | 0,956099 | 1,05  | 0,195  | 1,068  | 0,679  | -0,824 | 0,679  | -0,794 | 1,224  | 0,990  | -1,026 | -0,342 | 0,731  | 9,9325  |
| 140      | 2,443  | 0,195 | 0,09 | -804,656         | 1,012793 | 1,11  | 0,171  | 1,120  | 0,580  | -0,958 | 0,580  | -0,743 | 2,442  | 0,809  | -0,956 | -0,617 | 1,514  | 20,5704 |
| 150      | 2,618  | 0,195 | 0,09 | -829,392         | 1,043927 | 1,14  | 0,136  | 1,146  | 0,451  | -1,053 | 0,451  | -0,626 | 2,884  | 0,611  | -0,791 | -0,775 | 1,753  | 23,8213 |
| 160      | 2,793  | 0,195 | 0,09 | -840,854         | 1,058355 | 1,15  | 0,094  | 1,156  | 0,306  | -1,115 | 0,306  | -0,463 | 2,272  | 0,407  | -0,543 | -0,788 | 1,192  | 16,1889 |
| 170      | 2,967  | 0,195 | 0,09 | -845,041         | 1,063624 | 1,16  | 0,048  | 1,158  | 0,154  | -1,148 | 0,154  | -0,292 | 1,781  | 0,203  | -0,240 | -0,661 | 0,945  | 12,8364 |
| 180      | 3,142  | 0,195 | 0,09 | -845,966         | 1,064788 | 1,16  | 0,000  | 1,158  | 0,000  | -1,158 | 0,000  | -0,169 | 1,490  | 0,000  | 0,072  | -0,426 | 0,966  | 13,1299 |
| 190      | 3,316  | 0,196 | 0,10 | -845,041         | 1,063624 | 1,16  | -0,048 | 1,160  | -0,154 | -1,149 | -0,154 | -0,157 | 1,363  | -0,202 | 0,338  | -0,132 | 1,056  | 14,3480 |
| 200      | 3,491  | 0,201 | 0,10 | -840,854         | 1,058355 | 1,16  | -0,095 | 1,162  | -0,307 | -1,120 | -0,307 | -0,304 | 1,331  | -0,402 | 0,510  | 0,168  | 0,996  | 13,5359 |
| 210      | 3,665  | 0,208 | 0,11 | -829,392         | 1,043927 | 1,15  | -0,138 | 1,159  | -0,456 | -1,066 | -0,456 | -0,599 | 1,330  | -0,595 | 0,554  | 0,426  | 0,661  | 8,9744  |
| 220      | 3,840  | 0,220 | 0,12 | -804,656         | 1,012793 | 1,13  | -0,175 | 1,145  | -0,593 | -0,979 | -0,593 | -0,885 | 1,312  | -0,771 | 0,465  | 0,612  | 0,139  | 1,8845  |
| 230      | 4,014  | 0,236 | 0,13 | -759,613         | 0,956099 | 1,09  | -0,202 | 1,110  | -0,706 | -0,856 | -0,706 | -0,771 | 1,251  | -0,915 | 0,264  | 0,712  | -0,165 | -2,2414 |
| 240      | 4,189  | 0,259 | 0,16 | -687,347         | 0,865141 | 1,02  | -0,216 | 1,045  | -0,778 | -0,698 | -0,778 | 0,000  | 1,142  | -1,007 | 0,000  | 0,729  | 0,086  | 1,1691  |
| 250      | 4,363  | 0,290 | 0,19 | -582,27          | 0,732884 | 0,92  | -0,212 | 0,946  | -0,794 | -0,514 | -0,794 | 1,224  | 0,990  | -1,026 | -0,342 | 0,679  | 0,731  | 9,9325  |
| 260      | 4,538  | 0,334 | 0,23 | -441,228         | 0,555359 | 0,79  | -0,190 | 0,810  | -0,743 | -0,324 | -0,743 | 2,442  | 0,809  | -0,956 | -0,617 | 0,580  | 1,514  | 20,5704 |
| 270      | 4,712  | 0,394 | 0,29 | -264,364         | 0,332746 | 0,63  | -0,153 | 0,644  | -0,626 | -0,153 | -0,626 | 2,884  | 0,611  | -0,791 | -0,775 | 0,451  | 1,753  | 23,8213 |
| 280      | 4,887  | 0,482 | 0,38 | -55,6144         | 0,07     | 0,45  | -0,109 | 0,464  | -0,463 | -0,029 | -0,463 | 2,272  | 0,407  | -0,543 | -0,788 | 0,306  | 1,192  | 16,1889 |
| 290      | 5,061  | 0,611 | 0,51 | 177,2405         | -0,22309 | 0,29  | -0,066 | 0,294  | -0,292 | 0,036  | -0,292 | 1,781  | 0,203  | -0,240 | -0,661 | 0,154  | 0,945  | 12,8364 |
| 300      | 5,236  | 0,808 | 0,71 | 422,983          | -0,53239 | 0,71  | -0,037 | 0,178  | -0,169 | 0,055  | -0,169 | 1,490  | 0,000  | 0,072  | -0,426 | 0,000  | 0,966  | 13,1299 |
| 310      | 5,411  | 1,119 | 1,02 | 667,8003         | -0,84054 | 0,18  | -0,033 | 0,181  | -0,157 | 0,089  | -0,157 | 1,363  | -0,202 | 0,338  | -0,132 | -0,154 | 1,056  | 14,3480 |
| 320      | 5,585  | 1,628 | 1,53 | 896,4689         | -1,12835 | 0,40  | -0,062 | 0,404  | -0,304 | 0,266  | -0,304 | 1,331  | -0,402 | 0,510  | 0,168  | -0,307 | 0,996  | 13,5359 |
| 330      | 5,760  | 2,470 | 2,37 | 1093,757         | -1,37667 | 0,99  | -0,119 | 0,999  | -0,599 | 0,799  | -0,599 | 1,330  | -0,595 | 0,554  | 0,426  | -0,456 | 0,661  | 8,9744  |
| 340      | 5,934  | 3,783 | 3,68 | 1245,884         | -1,56815 | 2,11  | -0,173 | 2,121  | -0,885 | 1,927  | -0,885 | 1,312  | -0,771 | 1,251  | -0,915 | 0,264  | -0,165 | -2,2414 |
| 350      | 6,109  | 5,386 | 5,28 | 1341,883         | -1,68898 | 3,60  | -0,149 | 3,599  | -0,771 | 3,515  | -0,771 | 1,251  | -0,915 | 0,264  | 0,712  | -0,706 | -0,165 | -2,2414 |
| 360      | 6,283  | 6,221 | 6,12 | 1374,695         | -1,73028 | 4,39  | 0,000  | 4,389  | 0,000  | 4,389  | 0,000  | 1,142  | -1,007 | 0,000  | 0,729  | -0,778 | 0,086  | 1,1691  |
| 370      | 6,458  | 7,500 | 7,40 | 1341,883         | -1,68898 | 5,71  | 0,236  | 5,715  | 1,224  | 5,582  | 1,224  | 0,990  | -1,026 | -0,342 | 0,679  | -0,794 | 0,731  | 9,9325  |
| 380      | 6,632  | 7,500 | 7,40 | 1245,884         | -1,56815 | 5,83  | 0,476  | 5,850  | 2,442  | 5,316  | 2,442  | 0,809  | -0,956 | -0,617 | 0,580  | -0,743 | 1,514  | 20,5704 |
| 390      | 6,807  | 6,254 | 6,15 | 1093,757         | -1,37667 | 4,78  | 0,573  | 4,810  | 2,884  | 3,849  | 2,884  | 0,611  | -0,791 | -0,775 | 0,451  | -0,626 | 1,753  | 23,8213 |
| 400      | 6,981  | 4,213 | 4,11 | 896,4689         | -1,12835 | 2,98  | 0,462  | 3,019  | 2,272  | 1,989  | 2,272  | 0,407  | -0,543 | -0,788 | 0,306  | -0,463 | 1,192  | 16,1889 |
| 410      | 7,156  | 2,953 | 2,85 | 667,8003         | -0,84054 | 2,01  | 0,373  | 2,046  | 1,781  | 1,007  | 1,781  | 0,203  | -0,240 | -0,661 | 0,154  | -0,292 | 0,945  | 12,8364 |
| 420      | 7,330  | 2,168 | 2,07 | 422,983          | -0,53239 | 1,53  | 0,323  | 1,568  | 1,490  | 0,487  | 1,490  | 0,000  | 0,072  | -0,426 | 0,000  | -0,169 | 0,966  | 13,1299 |
| 430      | 7,505  | 1,663 | 1,56 | 177,2405         | -0,22309 | 1,34  | 0,307  | 1,374  | 1,363  | 0,169  | 1,363  | -0,202 | 0,338  | -0,132 | -0,154 | -0,157 | 1,056  | 14,3480 |
| 440      | 7,679  | 1,328 | 1,23 | -55,6144         | 0,07     | 1,30  | 0,313  | 1,334  | 1,331  | -0,083 | 1,331  | -0,402 | 0,510  | 0,168  | -0,307 | -0,304 | 0,996  | 13,5359 |
| 450      | 7,854  | 1,098 | 1,00 | -264,364         | 0,332746 | 1,33  | 0,326  | 1,369  | 1,330  | -0,326 | 1,330  | -0,595 | 0,554  | 0,426  | -0,456 | -0,599 | 0,661  | 8,9744  |
| 460      | 8,029  | 0,937 | 0,84 | -441,228         | 0,555359 | 1,39  | 0,336  | 1,431  | 1,312  | -0,572 | 1,312  | -0,771 | 0,465  | 0,612  | -0,593 | -0,885 | 0,139  | 1,8845  |
| 470      | 8,203  | 0,821 | 0,72 | -582,27          | 0,732884 | 1,45  | 0,333  | 1,491  | 1,251  | -0,810 | 1,251  | -0,915 | 0,264  | 0,712  | -0,706 | -0,771 | -0,165 | -2,2414 |
| 480      | 8,378  | 0,737 | 0,64 | -687,347         | 0,865141 | 1,50  | 0,316  | 1,534  | 1,142  | -1,024 | 1,142  | -1,007 | 0,000  | 0,729  | -0,778 | 0,000  | 0,086  | 1,1691  |
| 490      | 8,552  | 0,676 | 0,57 | -759,613         | 0,956099 | 1,53  | 0,284  | 1,557  | 0,990  | -1,201 | 0,990  | -1,026 | -0,342 | 0,679  | -0,794 | 1,224  | 0,731  | 9,9325  |
| 500      | 8,727  | 0,631 | 0,53 | -804,656         | 1,012793 | 1,54  | 0,239  | 1,561  | 0,809  | -1,335 | 0,809  | -0,956 | -0,617 | 0,580  | -0,743 | 2,442  | 1,514  | 20,5704 |
| 510      | 8,901  | 0,600 | 0,50 | -829,392         | 1,043927 | 1,54  | 0,185  | 1,554  | 0,611  | -1,428 | 0,611  | -0,791 | -0,775 | 0,451  | -0,626 | 2,884  | 1,753  | 23,8213 |
| 520      | 9,076  | 0,579 | 0,48 | -840,854         | 1,058355 | 1,54  | 0,126  | 1,541  | 0,407  | -1,486 | 0,407  | -0,543 | -0,788 | 0,306  | -0,463 | 2,272  | 1,192  | 16,1889 |
| 530      | 9,250  | 0,567 | 0,47 | -845,041         | 1,063624 | 1,53  | 0,063  | 1,531  | 0,203  | -1,517 | 0,203  | -0,240 | -0,661 | 0,154  | -0,292 | 1,781  | 0,945  | 12,8364 |
| 540      | 9,425  | 0,563 | 0,46 | -845,966         | 1,064788 | 1,53  | 0,000  | 1,527  | 0,000  | -1,527 | 0,000  | 0,072  | -0,426 | 0,000  | -0,169 | 1,490  | 0,966  | 13,1299 |
| 550      | 9,599  | 0,560 | 0,46 | -845,041         | 1,063624 | 1,52  | -0,063 | 1,524  | -0,202 | -1,510 | -0,202 | 0,338  | -0,132 | -0,154 | -0,157 | 1,363  | 1,056  | 14,3480 |
| 560      | 9,774  | 0,560 | 0,46 | -840,854         | 1,058355 | 1,52  | -0,124 | 1,522  | -0,402 | -1,468 | -0,402 | 0,510  | 0,168  | -0,307 | -0,304 | 1,331  | 0,996  | 13,5359 |
| 570      | 9,948  | 0,560 | 0,46 | -829,392         | 1,043927 | 1,50  | -0,180 | 1,513  | -0,595 | -1,391 | -0,595 | 0,554  | 0,426  | -0,456 | -0,599 | 1,330  | 0,661  | 8,9744  |
| 580      | 10,123 | 0,560 | 0,46 | -804,656         | 1,012793 | 1,47  | -0,228 | 1,489  | -0,771 | -1,274 | -0,771 | 0,465  | 0,612  | -0,593 | -0,885 | 1,312  | 0,139  | 1,8845  |
| 590      | 10,297 | 0,560 | 0,46 | -759,613         | 0,956099 | 1,41  | -0,262 | 1,439  | -0,915 | -1,110 | -0,915 | 0,264  | 0,712  | -0,706 | -0,771 | 1,251  | -0,165 | -2,2414 |

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до виконання курсового проєкту  
з дисципліни  
*«ЕНЕРГЕТИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ  
РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ»*

Відповідальний за випуск Жалкін Д. С.

Редактор Ібрагімова Н. В.

---

Підписано до друку 11.07.2025 р.  
Умовн. друк. арк. 2,75. Тираж . Замовлення № .  
Видавець та виготовлювач Український державний університет залізничного  
транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018