

10.31653/smf42.2021. 42-49

Козицький С. В., Швець О. І., \*Кіріян С. В.

Національний університет “Одеська морська академія”, Україна

\*Технологічний інститут, Ванкувер, Британська Колумбія, Канада

## ОЦІНКА ВТРАТ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У КРИВОШИПНО-ШАТУННОМУ МЕХАНІЗМІ

**Постановка задачі.** Перетворення внутрішньої (теплової) енергії палива у механічну енергію руху, наприклад, судна супроводжується як тепловими, так і механічними втратами. Таке перетворення у судовому двигуні внутрішнього згоряння здійснюється шляхом використання кривошипно - шатунного механізму (КШМ).

**Аналіз публікацій.** Кінематика та динаміка КШМ досліджена та описана детально, наприклад, у посібнику [1]. Також досліджені та описані теплопередача та тепловий баланс [1] в процесі роботи КШМ. Однак, нам не відомі дослідження по втратах механічної енергії у двигуні за рахунок руху складових КШМ.

**Мета роботи** – оцінка втрат механічної енергії у КШМ на кінетичну енергію руху складових (з урахуванням мас та форми), без врахування втрат на тертя.

Викладення основного матеріалу досліджень.

У тронковому КШМ [1] зворотно - поступальний рух поршня (у циліндровій втулці) зі змінною швидкістю  $V_B$  перетворюється на обертальний рух кривошипу довжиною  $r$  навколо осі вала  $O$  з кутовою швидкістю  $\omega$ , за допомогою шатуна довжиною  $L = AB$  (рис.1).

Кінетична енергія КШМ ( $T$ ) у будь-який момент часу, як енергія механічної системи, складається з трьох доданків:

$$T = T_{\text{п}} + T_{\text{ш}} + T_{\text{кр}}, \quad (1)$$

кінетичних енергій поршня ( $T_{\text{п}}$ ), шатуна ( $T_{\text{ш}}$ ) та кривошипа ( $T_{\text{кр}}$ ), відповідно.

Кінетична енергія поршня, який здійснює поступальний рух, визначається як

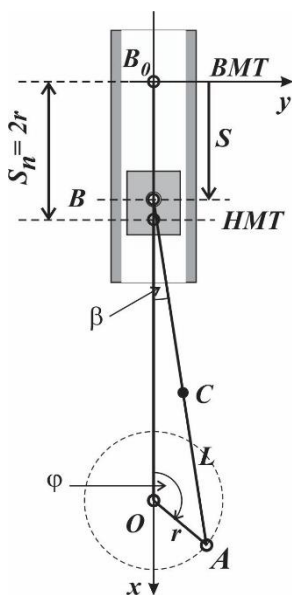


Рис. 1. Схема КШМ

$$T_{\Pi} = \frac{m_{\Pi} V_B^2}{2}, \quad (2)$$

де  $m_{\Pi}$  - маса поршня (для крейцкопфного КШМ – це додатково маса крейцкопфа та штока), а швидкість поршня  $V_B$  залежить від кута  $\varphi$  повороту кривошипа, сталої Брікса  $\lambda = r/L$  та кутової швидкості обертання кривошипа  $\omega$  як [2]

$$V_B = \omega \cdot r \cdot \left( \sin \varphi + \frac{\lambda \cdot \sin 2\varphi}{2\sqrt{1 - (\lambda \sin \varphi)^2}} \right). \quad (3)$$

З врахуванням рівняння (3) отримуємо

$$T_{\Pi} = \frac{m_{\Pi} \omega^2 \cdot r^2}{2} \cdot \left( \sin \varphi + \frac{\lambda \cdot \sin 2\varphi}{2\sqrt{1 - (\lambda \sin \varphi)^2}} \right)^2. \quad (4)$$

Кінетичну енергію шатуна, який здійснює плоский рух, знаходимо за теоремою Кеніга [3]

$$T_{\Pi} = \frac{m_{\Pi} V_C^2}{2} + \frac{I_{\Pi} \omega_L^2}{2}, \quad (5)$$

як суму поступального руху  $V_C$  центра маси  $C$  (рис. 1) та обертального руху навколо осі, що проходить через центр маси, перпендикулярно площині шатуна, з кутовою швидкістю  $\omega_L$ . Остання залежить від кута повороту вала  $\varphi$  та сталої Брікса, а  $V_C$  ще й від положення центра маси  $C$  шатуна [4]

$$V_C = \omega \cdot r \cdot \sqrt{\left( \sin \varphi + \frac{AC}{L} \frac{\lambda \sin 2\varphi}{2\sqrt{1 - (\lambda \sin \varphi)^2}} \right)^2 + \left(1 - \frac{AC}{L}\right)^2 \cos^2 \varphi}, \quad (6)$$

$$\omega_L = \omega \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - (\lambda \cdot \sin \varphi)^2}}. \quad (7)$$

Кінетичну енергію обертального руху кривошипа навколо осі вала з кутовою швидкістю  $\omega$ , знаходимо за формулою

$$T_{кр} = \frac{I_{кр} \omega^2}{2}, \quad (8)$$

де  $I_{кр}$  – його момент інерції відносно осі вала.

Подальші розрахунки вимагають обмежитися моделями для визначення моменту інерції кривошипа та шатуна.

Кривошип будемо вважати однорідним стрижнем масою  $m_{кр}$  та довжиною  $r$ , що обертається навколо точки  $O$  (осі вала). Тоді для моменту інерції, згідно теоремі Гюйгенса – Штейнера [3], маємо

$$I_{кр} = \frac{1}{12} m_{кр} r^2 + m_{кр} \left( \frac{1}{2} r \right)^2 = \frac{1}{3} m_{кр} r^2. \quad (9)$$

Отже, кінетична енергія кривошипа не залежить від його кута повороту та сталої Брікса і може бути оцінена як

$$T_{кр} = \frac{m_{кр} r^2 \cdot \omega^2}{6}. \quad (10)$$

Кінетична енергія шатуна залежить від положення його центру маси (точки  $C$  на рис. 1 та 2), та від його моменту інерції  $I_{ш}$ , який, в свою чергу, також залежить від положення центру маси шатуна. Щоб врахувати вплив положення центру мас шатуна на величину його кінетичної енергії, розглянемо дві прості моделі шатуна:

а) шатун - тонкий однорідний стрижень, тоді

$$\frac{AC}{L} = \frac{1}{2}, \text{ та } I_{ш} = \frac{m_{ш} L^2}{12},$$

- така модель дозволить визначити кінетичну енергію шатуна, коли центр маси шатуна знаходиться на його середині,

б) шатун - однорідний трикутник, ширина якого  $a$  та висота  $L$  (рис. 2). Тоді центр мас знаходиться на відстані  $1/3$  від основи, а наближена формула для його моменту інерції за умови  $a \ll L$  відносно осі, що проходить через центр мас  $C$ , перпендикулярно площині трикутника визначається за формулою [3]

$$I_x = \frac{mL^2}{18}.$$

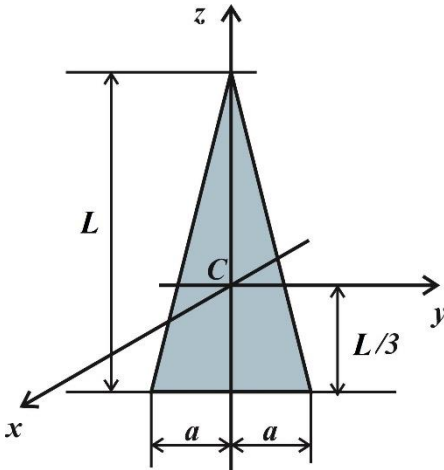


Рис.2. Модель шатуна у формі рівнобедреного трикутника

Така модель дозволить визначити залежність кінетичної енергії шатуна у випадках, коли центр маси шатуна знаходиться на відстані  $(1/3)L$  від точки  $A$  (ближче до кривошипа) чи на відстані  $(1/3)L$  від точки  $B$  (ближче до поршня, якщо трикутник на рис. 2 перевернутий).

Для зазначених моделей шатуна, його кінетична енергія описується наступними формулами:

для  $AC = L/2$ :

$$T_{ш(1/2)} = \frac{m_{ш}\omega^2 r^2}{2} \left[ \left( \sin\varphi + \frac{\lambda \sin 2\varphi}{4\sqrt{1-(\lambda \cdot \sin\varphi)^2}} \right)^2 + \frac{1}{4} \cos^2\varphi + \frac{1}{12} \frac{\cos^2\varphi}{1-(\lambda \cdot \sin\varphi)^2} \right], \quad (11a)$$

для  $AC = L/3$ :

$$T_{ш(1/3)} = \frac{m_{ш}\omega^2 r^2}{2} \left[ \left( \sin\varphi + \frac{1}{6} \frac{\lambda \sin 2\varphi}{\sqrt{1-(\lambda \cdot \sin\varphi)^2}} \right)^2 + \frac{4}{9} \cos^2\varphi + \frac{1}{18} \frac{\cos^2\varphi}{1-(\lambda \cdot \sin\varphi)^2} \right], \quad (11б)$$

для  $AC = 2L/3$ :

$$T_{ш(2/3)} = \frac{m_{ш}\omega^2 r^2}{2} \left[ \left( \sin\varphi + \frac{1}{3} \frac{\lambda \sin 2\varphi}{\sqrt{1-(\lambda \cdot \sin\varphi)^2}} \right)^2 + \frac{1}{9} \cos^2\varphi + \frac{1}{18} \frac{\cos^2\varphi}{1-(\lambda \cdot \sin\varphi)^2} \right]. \quad (11в)$$

Аналіз отриманих формул (4), (10) та (11) вказує, що енергія кожного доданку (кожного елемента КШМ) пропорційна масі елемента та квадрату добутку кутової швидкості обертання кривошипа на його розмір.

Зауважимо, що усі малообертові двигуни, які виготовляють провідні фірмами, мають таку конструкцію, що параметр  $\omega r$  лежить у вузькому діапазоні [1]:

для двигунів корпорації MAN Energy Solution від найкоротших до найдовших (K98, K90, L70, S60 та G80) параметр  $\omega r \in (11,5-13,5)$ ,

для двигунів корпорації Wartsilla при різних діаметрах поршня (RT-flex96, RT-flex82, RT-flex50) параметр  $\omega r \in (11,5-13,5)$ ,

для двигунів корпорації Mitsubishi Heavy Industries при різних діаметрах поршня UEC68LSE, UEC60LSE, UEC50LSE параметр  $\omega r \in (11,0-13,0)$ .

Вирази для обчислення кінетичних енергій поршня (2), шатуна (5) та кривошипа (8), з урахуванням (3), (4), (6), (7), (9), (11а – в), містять спільний множник  $(\omega r)^2$  та маси відповідних деталей. Тому подальші розрахунки доцільно приводити для приведеної кінетичної енергії  $\varepsilon_i = T_i / (m_i \omega^2 r^2)$  відповідних деталей:

$$\varepsilon_{\text{п}} = T_{\text{п}} / (m_{\text{п}} r^2 \cdot \omega^2) = \frac{1}{2} \cdot \left( \sin \varphi + \frac{\lambda \cdot \sin 2\varphi}{2\sqrt{1 - (\lambda \sin \varphi)^2}} \right)^2,$$

$$\varepsilon_{\text{ш}} = \frac{1}{2} \left[ \left( \sin \varphi + \frac{\lambda \sin 2\varphi}{4\sqrt{1 - (\lambda \cdot \sin \varphi)^2}} \right)^2 + \frac{1}{4} \cos^2 \varphi + \frac{1}{12} \frac{\cos^2 \varphi}{1 - (\lambda \cdot \sin \varphi)^2} \right],$$

$$\varepsilon_{\text{кр}} = T_{\text{кр}} / (m_{\text{кр}} r^2 \cdot \omega^2).$$

Графіки залежності приведеної кінетичної енергії складових КШМ від кута повороту колінчатого валу при  $\lambda = 0,4$  наведені на рис. 3.

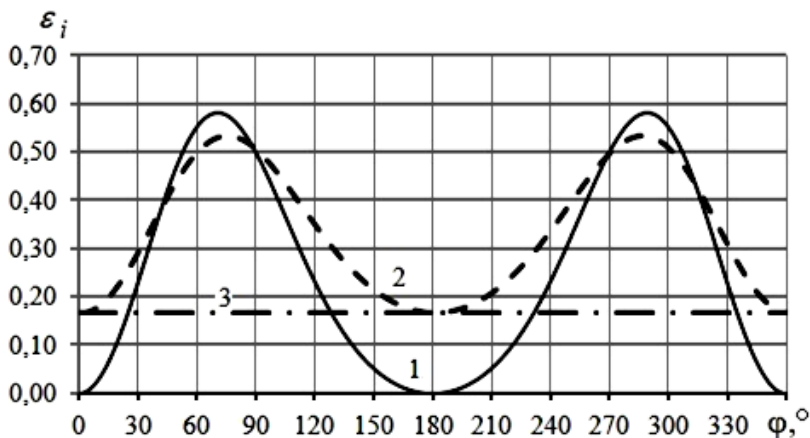


Рис.3. Графіки залежності величин  $\varepsilon_i$  від кута повороту  $\varphi$  при  $\lambda = 0,4$  для поршня (1), шатуна (2) коли  $AC/L = 1/2$  та кривошипа (3)

Щоб визначити вплив положення центра маси шатуна на його кінетичну енергію, на рисунку 4 наведені графіки для приведеної енергії шатуна при різних положеннях його центра мас.

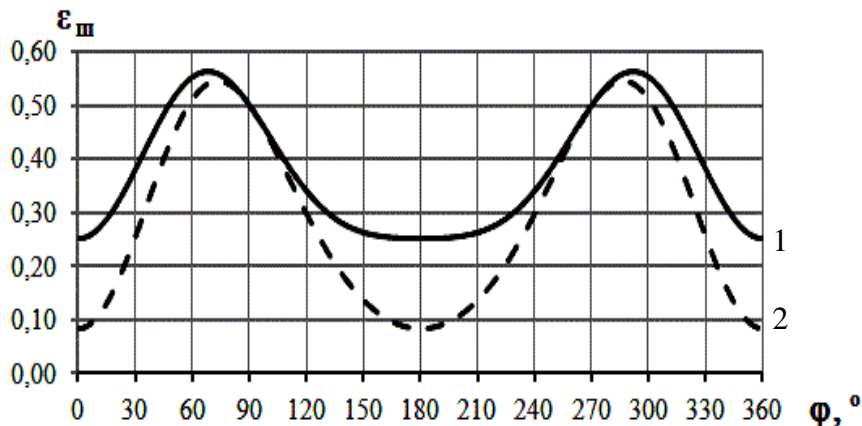


Рис.4. Графіки залежності величин  $\varepsilon_{ш}$  від кута повороту  $\varphi$  при  $\lambda = 0,4$

(1) – коли  $AC/L = 1/3$  та (2) – коли  $AC/L = 2/3$

З графіків, що зображені на рисунку 4, видно, що положення центра маси шатуна суттєво впливає на його кінетично енергію. Отже для зменшення втрат на рух шатуна потрібно зміщувати його центр маси, по можливості так, щоб віддалявся від кривошипа, тобто зміщувався до поршня.

Для визначення сумарної втрати енергії КШМ за повний цикл двигуна потрібно визначити середні значення відповідних приведених кінетичних енергій за період:

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{\bar{T}_i}{m_i \omega^2 r^2} = \frac{1}{2\pi m_i \omega^2 r^2} \int_0^{2\pi} T_i(\varphi) d\varphi.$$

Проведені розрахунки середніх приведених значень кінетичної енергії за період при різних значеннях сталої Брікса для кривошипа, поршня та шатуна з врахуванням його положення центра маси наведені у таблиці 1. Отримані результати дозволяють для довільного малообертового двигуна, знаючи масу деталей КШМ та параметри двигуна (частоту обертання та розмір кривошипа), оцінити втрату енергії на рух кожної складової за період та для КШМ загалом за формулою

$$\bar{T}_i = \bar{\varepsilon}_i \cdot m_i (\omega r)^2.$$

Таблиця 1. Приведені середні значення енергій деталей КШМ в одиницях Дж/(кг·м<sup>2</sup>·с<sup>-2</sup>) в залежності від сталої Брікса та положення центра маси кривошипа

	Деталь	$\lambda$				$ACL$
		0,2	0,3	0,4	0,5	
$\bar{\varepsilon}_{кр}$	кривошип	0,166	0,166	0,166	0,166	-
$\bar{\varepsilon}_п$	поршень	0,253	0,256	0,261	0,268	-
$\bar{\varepsilon}_ш$	шатун	0,377	0,379	0,381	0,385	0,33
		0,335	0,336	0,337	0,340	0,50
		0,293	0,295	0,297	0,301	0,67

Проведемо розрахунки для сучасного двигуна MAN G-80-ME-C9, параметри якого наступні: маса кривошипа 4500 кг, маса шатуна 4900 кг, маса поршня, штока та крейцкопфа 6190 кг, хід поршня 3,72 м, частота обертання  $n = 68$  об/хв. циліндрова потужність даного двигуна  $N_{ц} = 4450$  кВт [1, 5].

Для оцінки приймемо  $\lambda = 0,4$ ,  $ACL = 0,5$  та, оскільки  $r = 1,86$  м,  $\omega = 2\pi n / 60 = 7,12$  рад/с, тоді  $\omega r = 13,24$  м/с і отримуємо:

$$\text{для поршня } \bar{T}_п = 0,262 \cdot (13,24)^2 \cdot 6190 = 283,8 \text{ кДж,}$$

$$\text{для шатуна } \bar{T}_ш = 0,337 \cdot (13,24)^2 \cdot 4900 = 288,9 \text{ кДж,}$$

$$\text{для кривошипа } \bar{T}_{кр} = 0,166 \cdot (13,24)^2 \cdot 4500 = 130,7 \text{ кДж.}$$

Отож, в цілому для даного КШМ, втрати енергії на рух деталей протягом періоду складають  $\bar{T} = 703,4$  кДж.

Отримані дані дозволяють визначити втрату потужності двигуна на рух складових КШМ. Період циклу у двигуні складає  $\tau = 60/68 = 0,8824$  с, отож, втрата потужності двигуна тільки на рух його деталей становить

$$\bar{N} = \frac{\bar{T}}{\tau} = 797 \text{ кВт,}$$

що складає

$$\delta = \frac{\bar{T}}{N_{ц}} = 797/4450 = 18\%$$

циліндрової потужності двигуна.

Оскільки втрати енергії визначаються масою деталі, то шляхом використання сучасних технологій можна суттєво збільшити коефіцієнт корисної дії двигуна, шляхом використання сучасних технологій. Додавання нанопорошків (підшихтовка) до звичайних порошків при вироб-

ництві сплавів методами порошкової металургії дозволяє отримувати одночасно міцні та пластичні матеріали. Такі сплави алюмінію та титану робить їх перспективним для виготовлення деталей [6], а заміна ними сталених у 2,5 – 3 рази зменшує їх вагу, а отже і втрати енергії на їх рух.

### **Висновки:**

1. Втрати у кожній деталі та у всьому КШМ практично не залежать від сталої Брікса.
2. Максимальна питома витрата енергії у КШМ приходить на рух шатуна, зменшення його маси найбільш суттєве при зменшенні втрат у КШМ.
3. При заданій масі шатуна витрати енергії на його рух зменшуються при переміщенні центра маси від кривошипа до поршня. Так, при зміні АС/Л від 1/3 до 2/3 втрати зменшуються на 25%.
4. Заміна сталених деталей сучасними матеріалами з малою питомою вагою, але високими механічними властивостями – шлях до підвищення ККД двигуна.

### **Література**

1. Суворов П. С. Судовые двигатели внутреннего сгорания [Текст]: Учебное пособие / П. С. Суворов. – Одесса: ОНМА, 2012. – 626 с.
2. Козицький С. В. Оцінка втрат кінетичної енергії у кривошипно-шатунному механізмі / С. В. Козицький, О. І. Швець // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт». – Одеса, 2019. с. 52-55.
3. Козицький С. В. Теоретична механіка. Підручник. / С. В. Козицький // – Одеса: Астропринт, 2014. – 468 с.
4. Козицький С. В. Теоретична та прикладна механіка. Методичні вказівки для виконання розрахунково-графічної роботи // С. В. Козицький, О. І. Швець // – Одеса: НУ «ОМА», 2019 – 41 с.
5. HYUNDAI – MANB&W DIESEL ENGINE MAIN ENGINE MANUAL, volume 1.
6. Балоян Б. М. Наноматеріали / Б.М. Балоян, А.Г. Колмаков, М. И. Алимов, А. М. Кротов // Международный университет природы и общества «Дубна», 2007. – 125 с.