

УДК 531.41

Головіна Ніна Анатоліївна,
доцент, зав. кафедри загальної фізики
та методики викладання фізики
Налепа Наталія Василівна,
вчитель фізики Луцької гімназії №21
імені Михайла Кравчука
Савош Валентин Олексійович,
завідувач відділом фізико-
математичних дисциплін ВІППО

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ РЕАЛЬНИХ ЦИКЛІВ

У статті дано порівняльний аналіз окремих циклів: циклу, що складається із двох ізобар та двох ізохор; циклу чотирьохтактного двигуна внутрішнього згорання. Визначено для них коефіцієнт корисної дії при однакових умовах. Проаналізовано можливість досягнення максимального коефіцієнта корисної дії та проведено порівняння із циклом Карно у цих же умовах.

Ключові слова: реальні цикли, цикл чотирьохтактного двигуна внутрішнього згорання, цикл Карно, коефіцієнт корисної дії.

Golovina N. A., Nalepa N. V. Research of energy conversion efficiency of real cycles.

The article deals with the comparative analysis of individual cycles: cycle which is consists of two isobars and two isochors, four-cycle internal combustion engine. The energy conversion efficiency under the same conditions was determined for them. The possibility of achieving the maximum of the energy conversion efficiency was analyzed and the comparison with the Carnot cycle in the same conditions was made.

Key words: real cycles, four-cycle internal combustion engine, Carnot cycle, Energy conversion efficiency.

У роботі «Про рушійну силу вогню» французький інженер Саді Карно у 1824 році вперше підняв питання про взаємне перетворення теплоти та роботи. Основні результати роботи відомі у зв'язку із циклом Карно. Вчений розробив цикл, на основі якого було з'ясовано від чого залежить коефіцієнт корисної дії теплових машин та його межі. Формула коефіцієнта корисної дії ідеальної теплової машини Карно визначається лише температурами нагрівника та холодильника. Ця робота дала початок розвитку і теорії двигунів, і створенню машин та механізмів, які використовують ці двигуни, що працюють за замкненим циклом. Вона вказує на шляхи підвищення коефіцієнта корисної дії реальних машин. Зрозуміло, що він для реальних машин буде нижчий, ніж для ідеальних, через те, що частина теплоти марно витрачається у результаті випромінювання, нагрівання деталей,

подолання тертя, тощо. За цей час створено немало різних циклів, згідно яких працюють реальні механізми.

Метою цієї роботи є порівняльний аналіз різних реальних циклів, моделювання їх роботи та дослідження коефіцієнта корисної дії.

Сформулюємо задачу наступним чином. Цикл складається із двох ізобар та двох ізохор [1]. Визначити коефіцієнт корисної дії такого циклу, якщо об'єми 10^{-3} , $2 \cdot 10^{-3}$ м³, а тиски, відповідно 10^5 Па, $2 \cdot 10^5$ Па.

Зображений на рис.1 цикл, складається із чотирьох послідовних процесів. При першому ізохорному процесі температура підвищується, отже система отримує тепло $Q(ab)$ із зовнішнього середовища. При наступному ізобарному процесі об'єм газу пропорційний абсолютній температурі. Об'єм зростає, температура підвищується - система знову отримує тепло $Q(bc)$ із зовнішнього середовища.

Наступний процес іде ізохорно, тиск зменшується, що означає пониження температури. А газ при цьому віддає холодильнику деяку кількість теплоти $Q(cd)$. Далі при сталому тиску P газ стискується до об'єму V . Зменшення об'єму при ізобарному процесі зв'язане із пониженням температури газу. Отже, газ знову віддає деяку кількість теплоти $Q(da)$.

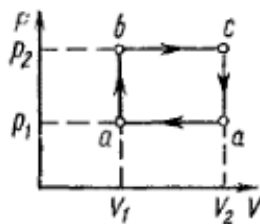


Рис.1.

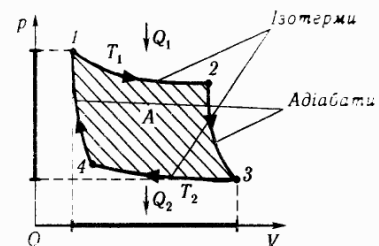


Рис. 2.

Тоді, коефіцієнт корисної дії циклу

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{A}{Q_1}$$

де A – робота, здійснена робочою речовиною протягом циклу; Q_1 - кількість теплоти, яку отримує система із зовнішнього середовища; Q_2 - кількість теплоти, яку віддає система назад зовнішньому середовищу.

Кількість теплоти Q_1 , надану газу при його нагріванні знайдемо використавши перший принцип термодинаміки:

$$Q_1 = \Delta U + A_{bc}$$

Зміна внутрішньої енергії при переході із стану a у стан c з використанням рівняння стану газу:

$$\Delta U = U_c - U_a = \frac{i}{2}(P_2V_2 - P_1V_1).$$

Робота $A_{bc} = P_2(V_2 - V_1)$.

Робота газу за цикл у координатах PV чисельно дорівнює площі фігури, обмеженої замкненою лінією (площі прямокутника). Тоді:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{(P_2 - P_1)(V_2 - V_1)}{(i/2)(P_2V_2 - P_1V_1) + P_2(V_2 - V_1)}$$

Підставивши значення числових величин P_1 , V_1 , P_2 , V_2 та i (для трьохатомного газу), отримаємо, що

$$\eta = 0,09.$$

Ускладнимо задачу. Нехай тиски та об'єми є змінними величинами, які можуть приймати довільні додатні значення. Знайдемо *максимальний коефіцієнт корисної дії такого циклу.* Для цього поділимо на P_2V_2 чисельник та знаменник останньої формули.

Провівши аналіз, приходимо до висновку, що максимальний коефіцієнт корисної дії буде у випадку, коли

$$\frac{P_1}{P_2} \rightarrow 0, \frac{V_1}{V_2} \rightarrow 0.$$

Тоді максимально можливий коефіцієнт корисної дії такого циклу: $\eta_{\max} = 0,25$.

Тепер знайдемо коефіцієнт корисної дії *циклу Карно*, який працює у тому ж температурному інтервалі, що і наш попередній цикл. Цикл Карно (рис.2) складається із двох ізотерм та двох адіабат та не залежить від робочого тіла:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

де T_1 , T_2 – максимальна та мінімальна температури циклу, відповідно.

Тоді $T_1 = T_c$, $T_2 = T_a$. Підставивши відповідні формули та значення, отримаємо:

$$\eta_k = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{P_2V_2} = 0,75.$$

Розглянемо *чотирьохтактний двигун внутрішнього згорання.* Будемо вважати, що робоча суміш поводить себе з достатньою точністю як ідеальний трьохатомний газ. Схема реального циклу

чотирьохтактного двигуна внутрішнього згорання подана на рис. 3а. Здійснимо ідеалізацію циклу чотирьохтактного двигуна внутрішнього згорання (рис. 3б) [2].

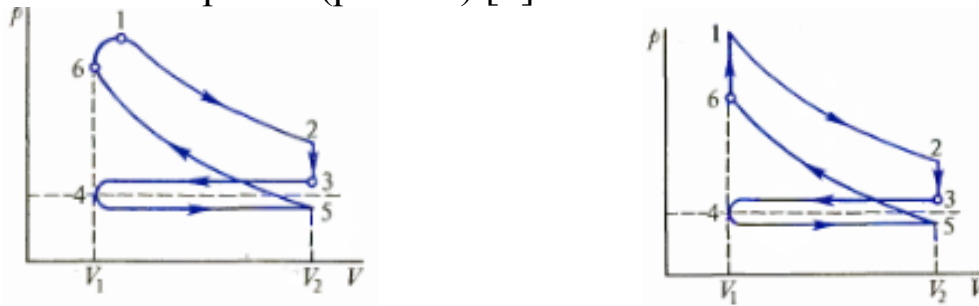


Рис. 3 а, б

У стані 1 у камері об'ємом V_1 знаходиться газ під тиском P_1 . Це початок робочого циклу. Газ розширюється (адіабата 1-2) та здійснює додатну роботу. У стані 2 досягається максимальне розширення, а об'єм V_2 дорівнює сумі об'ємів камери згорання та циліндра. Відкривається випускний клапан, тиск у циліндрі падає і стає близьким до атмосферного. У ідеальному циклі ці процеси відбуваються миттєво. На ділянці 3-4 відбувається виштовхування продуктів згорання із циліндра. У 4 закривається випускний та відкривається впускний клапан. Ділянка 4-5 – засмоктування палива. У 5 закривається впускний клапан та на 5-6 робоча суміш стискується. У 6 вона загоряється, а тиск зростає до P_1 . В ідеальному циклі вважаємо, що 5 співпадає із 3, шлях 3-4 співпадає з 4-5, а робота на шляху 3-4-5 не виконується.

Роботу у циклі визначимо за формулою роботи при адіабатному процесі:

$$A = C_v (T_1 - T_6) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}\right)$$

де T_1 , T_6 – температури у станах 1 та 6, відповідно. Енергія, що витрачається на збільшення температури моля газу від T_6 до T_1 :

$$Q_1 = C_v (T_1 - T_6).$$

Тоді коефіцієнт корисної дії цього циклу:

$$\eta = \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}\right).$$

В умовах нашої задачі $\eta = 0,206$.

Відношення $\frac{V_2}{V_1}$ - це і є ступінь стискуваності. Чим більший ступінь стискуваності, тим більший коефіцієнт корисної дії. Причому,

коефіцієнт корисної дії, обчислений за формулою є зазвичай вищим у приблизно два рази у порівнянні з дійсним у реальному двигуні. Джерелом розходження є значні відхилення умов роботи, прийняті для ідеального циклу від умов функціонування реального циклу.

Використавши електронні таблиці ми змінювали ступінь стискуваності та порівняли окремі реальні цикли. Як видно із проведеного аналізу, коефіцієнт корисної дії циклу чотирьохтактного двигуна внутрішнього згорання визначається ступенем стискуваності і в умовах першої задачі становить 0,206. Для циклу, представленого на рис 1, значення 0,25 коефіцієнта корисної дії є максимально можливим для циклу. Із результатів видно, що коефіцієнт корисної дії циклу Карно у цьому ж температурному інтервалі у 8,3 рази вищий за коефіцієнт корисної дії циклу, що складається із двох ізобар та двох ізохор.

Розглянуті вище задачі доцільно запропонувати учням 10-го класу при вивченні розділу «Основи термодинаміки», зокрема, теми «Принцип дії теплових двигунів. Холодильна машина». Це дозволить підвести учнів до усвідомлення циклічності процесу, формування поняття роботи, теплообміну, уміння визначати ККД. Адже існують двигуни однократної дії, які циклічності процесу не вимагають. Виконується робота, наприклад, під час стрільби з будь-якої вогнепальної зброї, вибуху бомби тощо.

Раціональне використання двигунів з певним циклом у побуті, господарстві та промисловості, дозволить зберегти довкілля в чистоті, що є життєво важливим для людства.

Список використаних джерел

1. Фирганг Е.Г. Руководство к решению задач по курсу общей физики: Учебное пособие. 4-е изд., испр./ Е.Г. Фирганг. – СПб.:Лань, 2009. -352 с.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика./ А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1981. – 400 с.