

Co to jest silnik cieplny?

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Film samouczek
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela



Co to jest silnik cieplny?

Źródło: dostępny w internecie: <https://pixabay.com/pl/photos/silnik-motoryzacja-cylinder-1100580/> [dostęp 10.06.2022], domena publiczna.

Czy to nie ciekawe ?

Silnik cieplny to urządzenie, które zamienia energię cieplną na pracę mechaniczną. Popatrz na garnek z gotującą się wodą (Fot. a.). Wskutek gromadzenia się pary pokrywka regularnie podskakuje - na pewno znasz to z domu. Energia cieplna pary zamienia się częściowo w energię kinetyczną pokrywki. W zasadzie dałoby się wykorzystać taką pokrywkę jako (dość osobliwy) silnik - np. napędzać nią prądnicę.

Jakie warunki musi spełniać silnik cieplny, aby mógł wykonywać użyteczną pracę? Odpowiemy na to pytanie w tym e-materiale.



Fot. a. Gotowanie wody w garnku

Źródło: dostępny w internecie: <https://pixabay.com/pl/photos/kuchnia-kucharz-garek-kuchenka-3597348/> [dostęp 10.06.2022], domena publiczna.

Twoje cele

- Dowiesz się, czym jest silnik termodynamiczny,
- Zrozumiesz, dlaczego silnik musi pracować w zamkniętym cyklu termodynamicznym,
- Przeanalizujesz prosty cykl termodynamiczny złożony z czterech przemian gazowych,
- Zrozumiesz, dlaczego w każdym cyklu część pobranego ciepła musi być oddana,
- Poznasz definicję pojemności skokowej cylindra i stopnia sprężania,
- Zrozumiesz, od czego zależy moc silnika cieplnego.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Pierwsze silniki ciepłe powstały w początku XVIII wieku. Były to maszyny parowe, które wykonywały pracę mechaniczną, wykorzystując rozprężającą się parę wodną. Pierwsze silniki parowe służyły do napędu maszyn w fabrykach, a także pomp odwadniających kopalnie. W roku 1825 w Anglii ruszyła pierwsza kolej żelazna, którą ciągnął parowóz zaprojektowany przez G. Stephensona. Silnik parowy był wynalazkiem, który zapoczątkował rewolucję przemysłową, zmieniając historię świata. Obecnie zastąpił go silnik spalinowy, w którym rozpręża się i wykonuje pracę spalana mieszanka paliwowa.



Rys. 1. Replika "Rakiety" Roberta Louisa Stevensona z 1825 roku.

Źródło: dostępny w internecie:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rocket_Verkehrsmuseum_Nuernberg_12092010_side_view.JPG [dostęp 10.06.2022], licencja: CC BY-SA 3.0.

W obu rodzajach silników ogrzany, rozprężający się gaz porusza tłok, wykonując w ten sposób pracę. Aby praca mogła być wykonywana w sposób ciągły, tłok musi wciąż powracać do poprzedniego położenia. Oznacza to cykliczność pracy silnika. To dlatego - między innymi - pokrywa podskakująca na garnku jest podobna do silnika: jej ruch jest cykliczny.

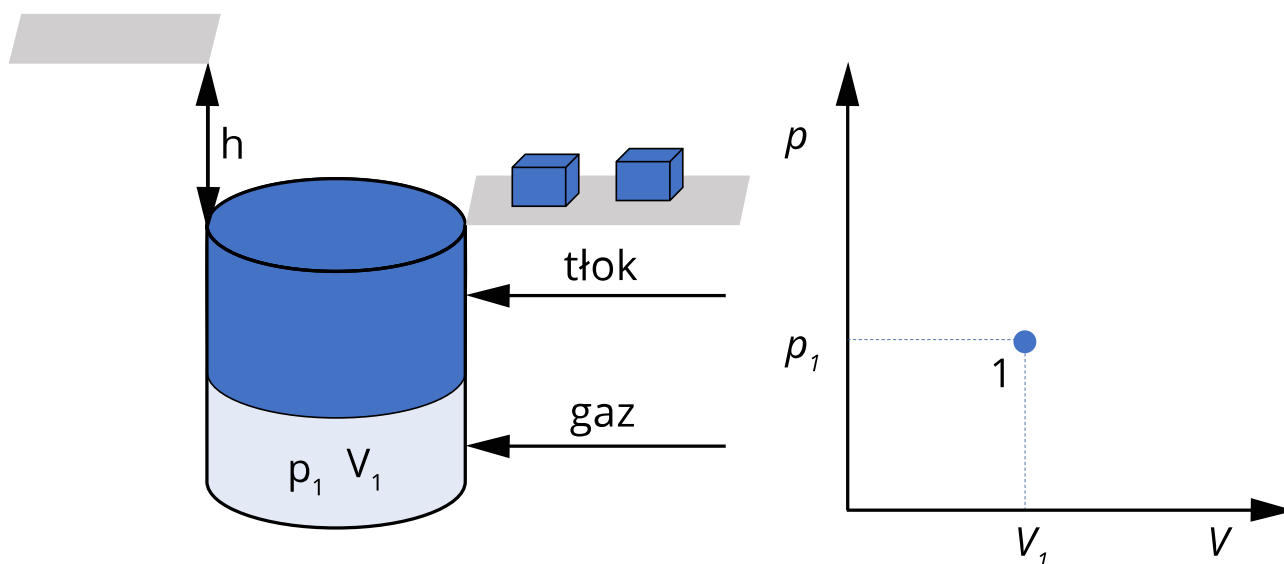
Silnik cieplny pracuje w zamkniętym cyklu termodynamicznym, powracając po każdym cyklu do stanu początkowego.

Praca wykonywana jest kosztem dostarczonego ciepła. Aby cykl przemian był zamknięty, część ciepła musi być oddana w każdym cyklu do otoczenia, aby gaz mógł się ochłodzić i powrócić do stanu początkowego. Wtedy rozpoczyna się kolejny cykl.

Cykl termodynamiczny.

Zasadę działania silnika cieplnego oraz pojęcie cyklu pracy wyjaśnimy na prostym przykładzie.

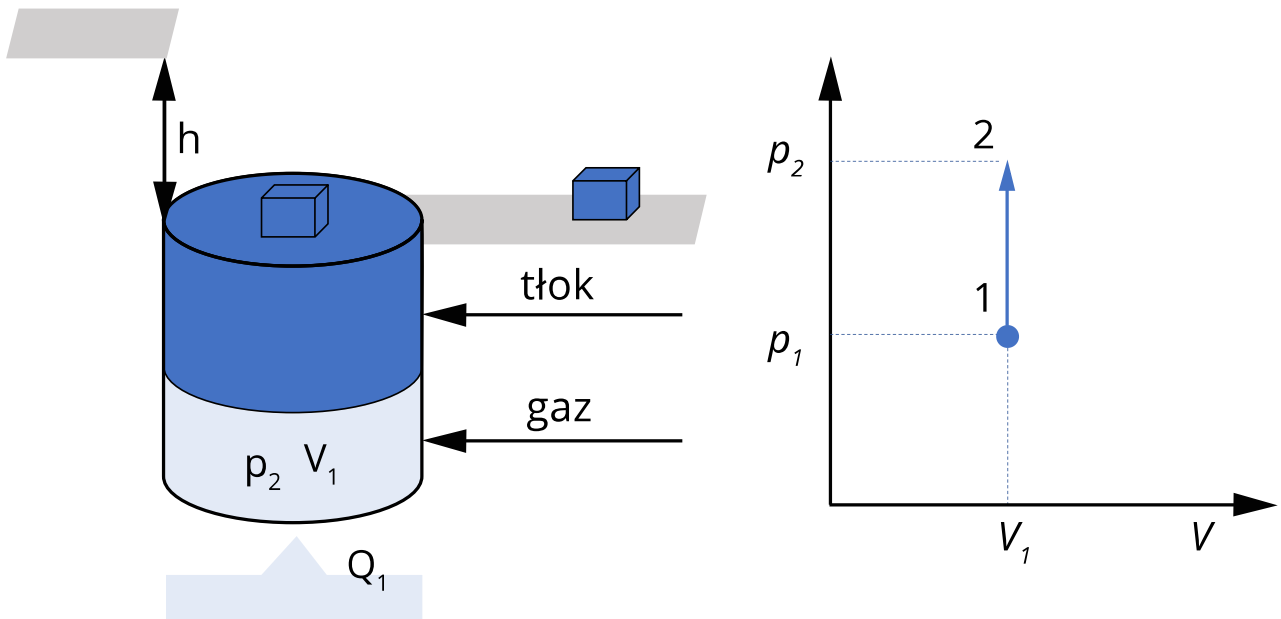
Gaz jest zamknięty w cylindrze z grubym tłokiem (Rys. 2.). Chcemy za pomocą tłoka podnosić ciężary na wysokość h . Początkowe ciśnienie gazu wynosi p_1 , a objętość V_1 . Stan gazu pokazuje punkt 1 na wykresie $p(V)$.



Rys. 2. Prosty model silnika termodynamicznego

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

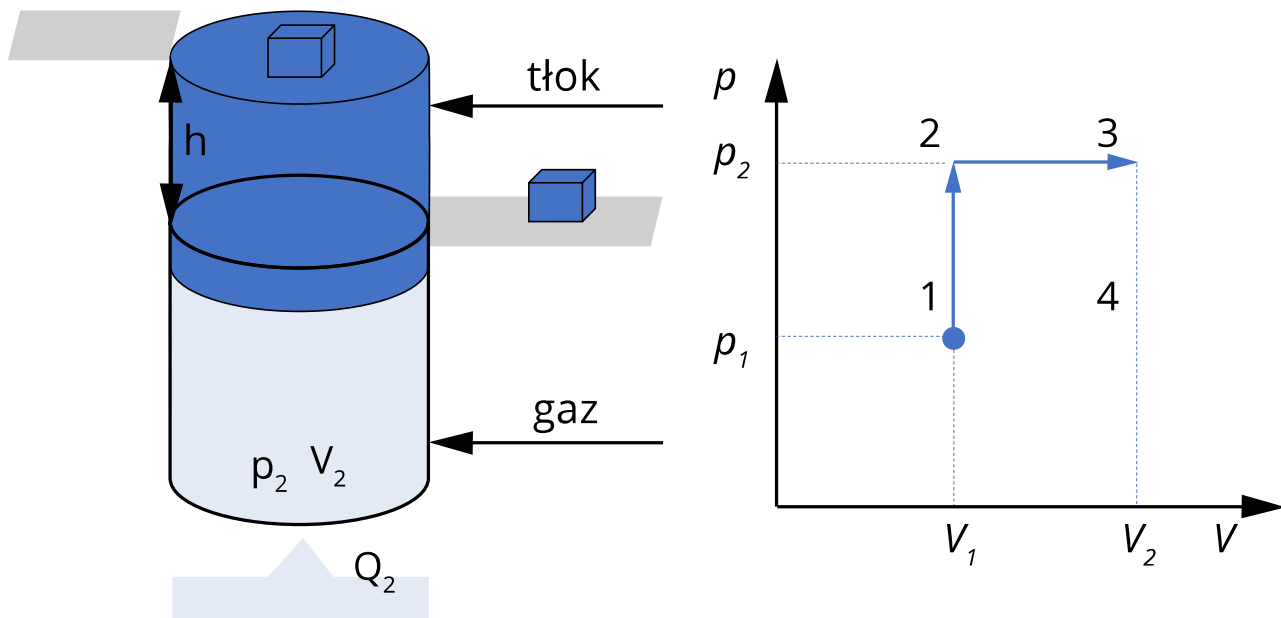
Przesuwamy ciężarek na tłok (Rys. 3.). Powoduje to zwiększenie nacisku na gaz. Ponieważ chcemy, aby tłok pozostał na tym samym poziomie podczas ładowania klocków, musimy gaz podgrzewać przy stałej objętości, aby ciśnienie gazu zrównoważyło zwiększone ciśnienie zewnętrzne. Gaz poddany zostaje [przemianie izochorycznej](#) $1 \rightarrow 2$ pokazanej na wykresie – ciśnienie wzrasta do wartości p_2 . Gaz pobiera ciepło Q_1 . W tej przemianie praca $W_1 = 0$, gdyż objętość gazu jest stała.



Rys. 3. Gaz pobiera ciepło Q_1 , ciśnienie zwiększa się przy stałej objętości

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Teraz możemy już odblokować tłok i przy dalszym ogrzewaniu będzie się on podnosił do góry (Rys. 4.). Ciśnienie gazu pozostaje stałe – gaz poddany jest **przemianie izobarycznej** $2 \rightarrow 3$, w której pobiera ciepło Q_2 . W tej przemianie gaz wykonuje pracę W_2 podnosząc ciężarek na wysokość h .

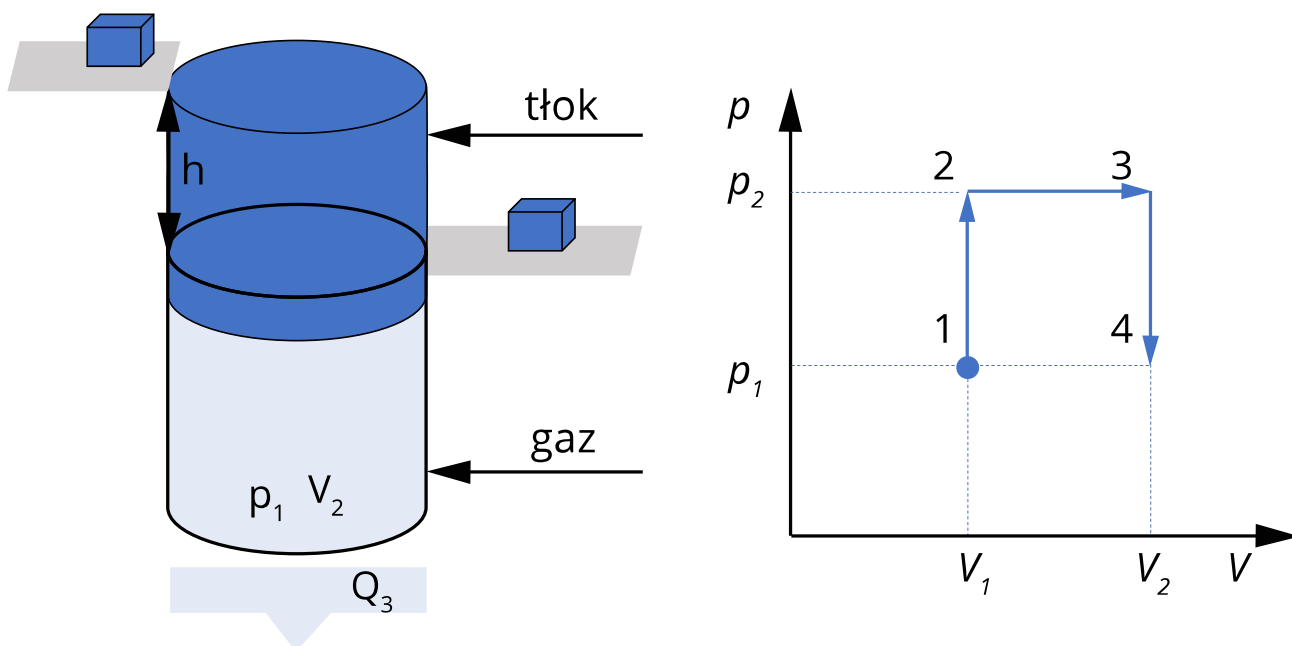


Rys. 4. Gaz pobiera ciepło Q_2 , przy stałym ciśnieniu objętość rośnie, tłok porusza się do góry i wykonuje pracę, podnosząc ciężarek

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Ciężarek chcemy teraz przesunąć z tłoka na wyższą półkę, tłok musi więc pozostać nieruchomy (Rys. 5.). Jednak ciśnienie wywierane na gaz podczas rozładunku maleje. Aby więc objętość mogła pozostać stała, musi też zmniejszyć się temperatura gazu. Gaz podlega

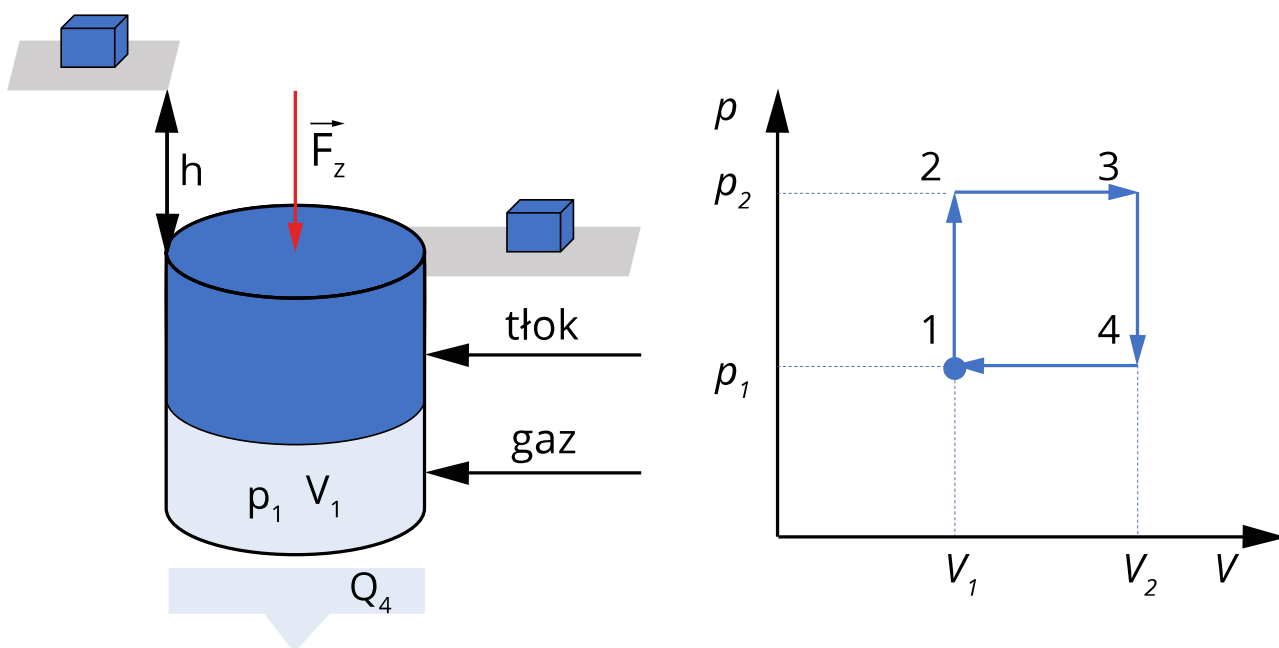
przemianie izochorycznej $3 \rightarrow 4$, w której oddaje ciepło Q_3 . Skoro jest to przemiana izochoryczna, praca $W_3 = 0$.



Rys. 5. Gaz oddaje ciepło Q_3 , ciśnienie zmniejsza się przy stałej objętości

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Pierwszy klocek już podniesiony, teraz tłok musi powrócić na dół po następny. Inaczej mówiąc, trzeba zakończyć cykl przemian. Aby to osiągnąć, siła zewnętrzna musi, naciskając na tłok, przesunąć go w dół i sprężyć gaz (Rys. 6.). Gaz jest sprężany przy stałym ciśnieniu, a pracę W_4 wykonuje siła zewnętrzna. W [przemianie izobarycznej](#) $4 \rightarrow 1$ gaz oddaje ciepło Q_4 . Cykl przemian został zamknięty.



Rys. 6. Gaz oddaje ciepło Q_4 , przy stałym ciśnieniu objętość maleje i gaz powraca do stanu początkowego.

Pracę W_4 wykonuje siła zewnętrzna \vec{F}_z

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Jak się przekonaliśmy, aby silnik mógł pracować cyklicznie, musi nie tylko pobierać ciepło, ale i oddawać. Niezbędne do pracy silnika są dwa zbiorniki: jeden o wysokiej temperaturze, z którego gaz pobiera ciepło (grzejnik) i drugi o niskiej temperaturze, do którego gaz oddaje ciepło (chłodnica).

Bilans energii w cyklu.

Gaz pobrał ciepło w dwóch pierwszych przemianach, więc całkowite ciepło pobrane wynosi

$$Q_p = Q_1 + Q_2,$$

a całkowite ciepło oddane

$$Q_{od} = Q_3 + Q_4.$$

W całym cyklu gaz wykonał pracę W_2 , podnosząc klocek, a siła zewnętrzna wykonała pracę W_4 sprężając gaz i sprowadzając tłok do położenia początkowego. Zysk pracy lub praca „netto” w tym cyklu wynosi

$$W = W_2 - W_4.$$

Z zasady zachowania energii wynika, że ciepło pobrane w cyklu równe jest sumie wykonanej pracy W i ciepła oddanego Q_{od}

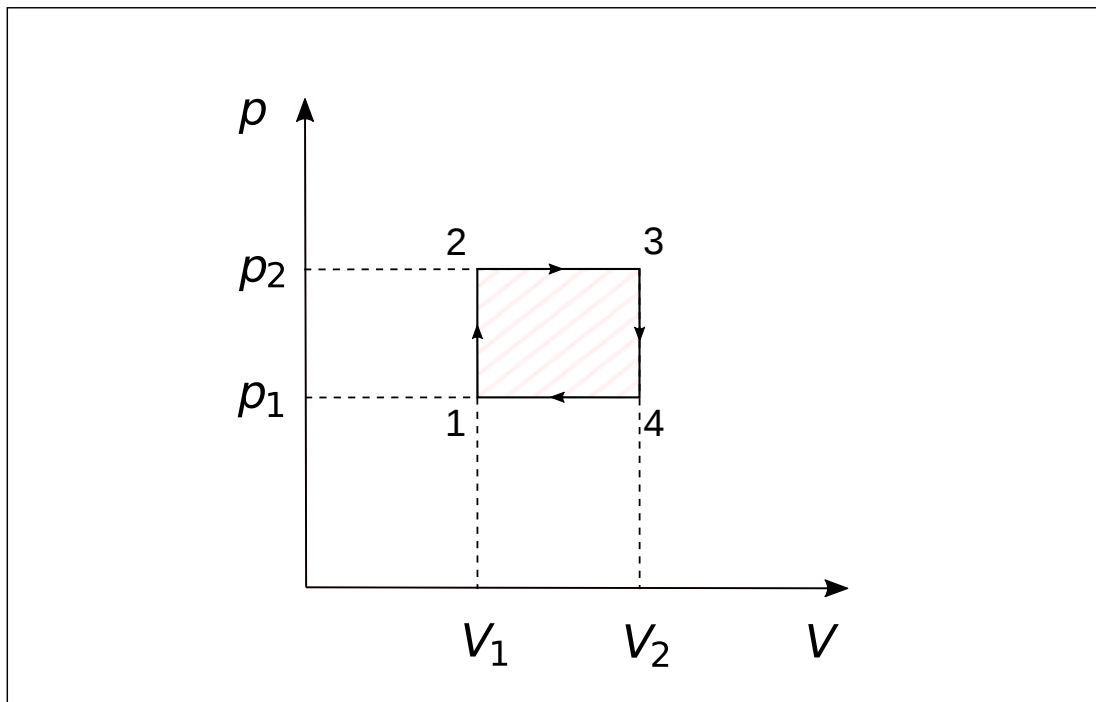
$$Q_p = W + Q_{od}.$$

Praca wykonana w jednym cyklu wynosi więc

$$W = Q_p - Q_{od}.$$

Pojemność skokowa cylindra i stopień sprężania.

Praca wykonana przez gaz w przemianie izobarycznej wyraża się wzorem $W = p \cdot \Delta V$, gdzie p to ciśnienie gazu, a ΔV – różnica między jego objętością końcową i początkową. Praca ta, W_2 , jest równa polu powierzchni pod wykresem przemiany $2 \rightarrow 3$. Praca W_4 wykonana przez siłę zewnętrzną równa jest polu powierzchni pod wykresem przemiany $4 \rightarrow 1$. Interpretacją graficzną pracy zyskanej podczas jednego cyklu jest więc pole powierzchni zawartej wewnątrz wykresu (Rys. 7).



Rys. 7. Pole powierzchni zawartej wewnątrz wykresu równe jest pracy W zyskanej w cyklu

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Z wykresu widzimy, że praca zyskana przez silnik w jednym cyklu jest tym większa, im większa jest różnica między objętością maksymalną i minimalną cylindra. Różnica ta nazywa się **pojemnością skokową cylindra**. Im większa pojemność skokowa, czyli różnica $V_2 - V_1$, tym większe pole powierzchni wewnątrz wykresu cyklu.

Praca zyskana w jednym cyklu zależy też od relacji między ciśnieniem minimalnym i maksymalnym gazu. Stosunek ciśnienia maksymalnego do minimalnego w cyklu silnika nazywamy **stopniem sprężania**. W naszym przykładzie będzie to $\frac{p_2}{p_1}$. Im większy stopień sprężania, tym większą pracę wykonuje silnik w jednym cyklu.

Moc silnika

Moc P opisuje tempo wykonywania pracy. Średnią moc obliczamy dzieląc wykonaną pracę W przez czas t , w którym została ona wykonana:

$$P = \frac{W}{t}$$

Wyrażając moc silnika możemy uznać, że t to czas trwania jednego cyklu, zaś W to zysk pracy w jednym cyklu.

Od czego zależy moc silnika cieplnego? Wiemy już, że praca wykonana przez silnik w jednym cyklu zwiększa się wraz ze zwiększaniem pojemności skokowej i zwiększaniem stopnia sprężania.

Moc zależy także od czasu trwania jednego cyklu, jest do niego odwrotnie proporcjonalna.

Aby zwiększyć moc, należałoby skrócić ten czas. Jak to zrobić? Czas jest potrzebny na pobieranie ciepła w dwóch pierwszych przemianach: $1 \rightarrow 2$ i $2 \rightarrow 3$ oraz na oddawanie ciepła w przemianach $3 \rightarrow 4$ i $4 \rightarrow 1$. Szybkość przepływu ciepła zależy od różnicy temperatur między ciałami – im większa różnica temperatur, tym szybciej przepływa ciepło. Jeśli więc zwiększymy temperaturę grzejnika i zmniejszymy temperaturę chłodnicy, to ciepło będzie pobierane i oddawane szybciej. Skróci to więc czas trwania jednego cyklu i zwiększy moc silnika.

Podsumowując możemy stwierdzić, że na zwiększenie mocy silnika cieplnego wpływają trzy podstawowe czynniki:

1. Zwiększenie pojemności skokowej cylindra.
2. Zwiększenie stopnia sprężania.
3. Zwiększenie różnicy temperatur między grzejnikiem i chłodnicą.

Sprawność silnika cieplnego

Sprawność silnika informuje o tym, na ile efektywnie jest w nim wykorzystane dostarczone ciepło. Zakładamy przy tym, że celem jest zamiana tego ciepła na pracę. Sprawność η (grecka litera eta) definiujemy więc jako stosunek pracy W , uzyskanej w jednym cyklu, do pobranego ciepła Q_p :

$$\eta = \frac{W}{Q_p}.$$

Więcej na temat sprawności silników cieplnych dowiesz się w kilku e-materiałach poświęconych temu zagadnieniu, m.in. „Cykl Carnota” oraz „Jak obliczyć sprawność silników cieplnych?”

Słowniczek

przemiana izochoryczna

(*ang.: isochoric process*) przemiana gazu doskonałego, w której objętość gazu pozostaje stała, a ciśnienie jest wprost proporcjonalne do temperatury w skali Kelvina: $\frac{p}{T} = \text{const}$

przemiana izobaryczna

(*ang.: isobaric process*) przemiana gazu doskonałego, w której ciśnienie gazu pozostaje stałe, a objętość jest wprost proporcjonalna do temperatury w skali Kelvina: $\frac{V}{T} = \text{const}$

moc

(*ang.: power*) praca wykonana w jednostce czasu. Moc wyraża się wzorem $P = \frac{W}{t}$.
Jednostką mocy jest $1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}}$

Film samouczek

Co to jest silnik cieplny?

Polecenie 1

Obejrzyj film samouczek, w którym przeanalizujemy pracę silnika cieplnego. Zwróć uwagę na nietypowy przykład, który pokazuje, że zamiana ciepła na pracę może następować w codziennych warunkach, bez podejmowania specjalnych działań i bez stosowania wysublimowanej techniki.

Oceń, na ile jednak nieefektywne byłoby wykorzystanie pokazanego w filmie silnika do napędzania realnych urządzeń.

Polecenie 2

Wyjaśnij, dlaczego nieoptymalne jest wykorzystanie garnka z wrzącą wodą, na którym podskakuje pokrywka, jako silnika cieplnego. Przeanalizuj oddzielnie każdy z trzech czynników wpływających na moc silnika cieplnego:

- pojemność skokową cylindra,
- stopień sprężania,
- czas trwania cyklu.

Zapisz swoją wypowiedź w przygotowanym polu i porównaj z wyjaśnieniem wzorcowym.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Stopień sprężania w silniku cieplnym to (wskaż najbardziej trafne uzupełnienie):

- różnica pomiędzy ciśnieniem maksymalnym a minimalnym w cyklu pracy silnika.
- różnica pomiędzy objętością maksymalną a minimalną w cyklu pracy silnika.
- stosunek objętości maksymalnej do minimalnej w cyklu pracy silnika.
- stosunek ciśnienia maksymalnego do minimalnego w cyklu pracy silnika.

Ćwiczenie 2



Wskaż prawdziwe stwierdzenie dotyczące wpływu stopnia sprężania na moc silnika. Przyjmij, że inne parametry pracy silnika nie ulegają zmianie.

- Zwiększenie mocy silnika wynika ze zwiększenia stopnia sprężania.
- Zwiększenie mocy silnika nie jest możliwe do uzyskania przez zmianę stopnia sprężania.
- Zwiększenie mocy silnika wynika ze zmniejszenia stopnia sprężania.

Ćwiczenie 3



Wskaż właściwe uzupełnienia:

Nie można zbudować silnika, który całe pobrane ciepło zamienia na pracę (czyli ma sprawność równą 100%), ponieważ

w każdym cyklu część pobranego ciepła musi być oddana do otoczenia /

zabrania tego zasada zachowania energii /

mamy niewystarczająco zaawansowaną technologię .

W przyszłości ograniczenie to będzie niezmiennie obowiązywało /

zostanie być może ominięte dzięki postępowi technicznemu /

zostanie przesunięte w górę, np. do poziomu 120% .

Ćwiczenie 4



Uzupełnij zdanie:

W celu zwiększenia mocy silnika cieplnego należy zwiększyć zmniejszyć
temperaturę chłodziwy i, niezależnie od tego, zwiększyć zmniejszyć temperaturę
grzejnika.

Dzięki temu bowiem, na pewno skróci się czas trwania cyklu

zwiększy się pojemność skokowa wzrośnie stopień sprężania .

Ćwiczenie 5



Silnik cieplny pobiera w jednym cyklu ciepło $Q_p = 5,8$ kJ, a oddaje ciepło $Q_{od} = 2,2$ kJ.
Oblicz pracę wykonaną przez silnik podczas jednego cyklu.

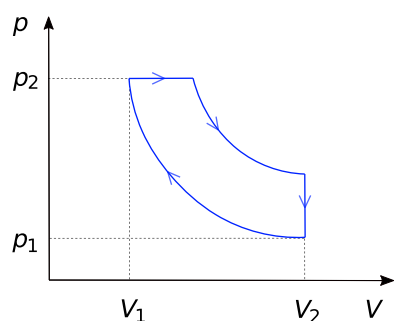
$W =$ kJ

Ćwiczenie 6

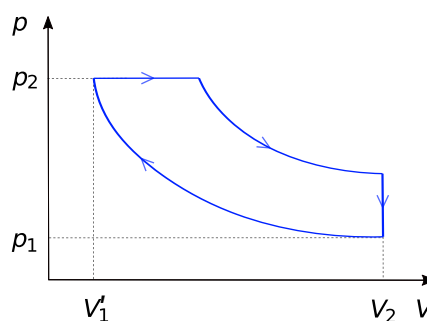


Na wykresach poniżej przedstawiono cykle termodynamiczne dwóch silników. Oba wykresy wykonane są w tej samej skali. Czy można rozstrzygnąć, który z silników ma większą moc? Uzasadnij swój pogląd.

Wpisz swoje rozumowanie w przygotowane pole i porównaj z wyjaśnieniem wzorcowym



A



B

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

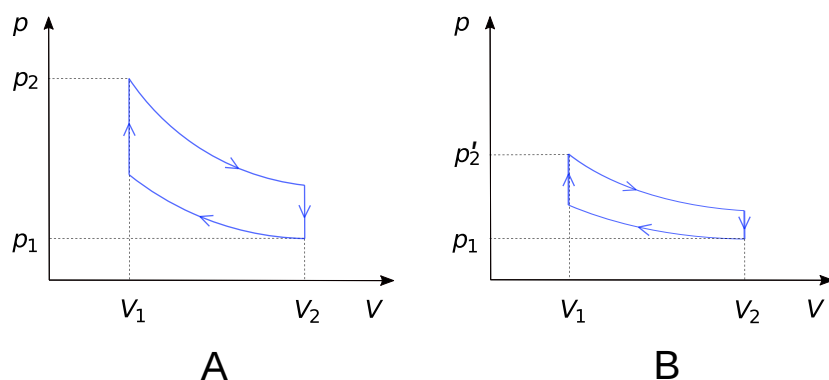
Ćwiczenie 7



Na wykresach poniżej przedstawiono cykle termodynamiczne dwóch silników. Oba wykresy wykonane są w tej samej skali. Mimo różnic w przebiegu, w obu silnikach czas trwania cyklu jest jednakowy.

Rozstrzygnij, który z silników, A czy B, ma większą moc. Uzasadnij swoje rozstrzygnięcie.

Wpisz rozumowanie w przygotowane pole i porównaj z wyjaśnieniem wzorcowym



Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Ćwiczenie 8



Silnik samochodowy rozwija użyteczną moc $P = 120 \text{ kW}$ przy wskazaniach obrotomierza 4800 obrotów na minutę. W każdym cyklu pracy wydziela się w nim - wskutek spalania benzyny - ciepło $Q_p = 5 \text{ kJ}$. Oblicz sprawność tego silnika.

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Krystyna Wosińska
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Co to jest silnik cieplny?
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
Podstawa programowa	<p>Cele i kształcenia - wymagania ogólne</p> <p>I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości;</p> <p>II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych;</p> <p>Zakres rozszerzony</p> <p>Treści nauczania - wymagania szczegółowe</p> <p>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 7) wyodrębnia z tekstów, tabel, diagramów lub wykresów, rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach; 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu;</p> <p>VI. Termodynamika. Uczeń: 15) analizuje przepływ energii w postaci ciepła i pracy mechanicznej w silnikach i pompach cieplnych.</p>
Kształtowane kompetencje kluczowe:	<p>Zalecenie Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:</p> <ul style="list-style-type: none">• kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji,• kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii,• kompetencje cyfrowe,• kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.

Cele operacyjne:	<p>Uczeń:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. omówi, czym jest silnik termodynamiczny. 2. wyjaśni, dlaczego silnik musi pracować w zamkniętym cyklu termodynamicznym. 3. przeanalizuje prosty cykl termodynamiczny złożony z czterech przemian gazowych. 4. wyjaśni, dlaczego w każdym cyklu część pobranego ciepła musi być oddana. 5. poda definicję pojemności skokowej, stopnia sprężania, mocy oraz sprawności silnika. 6. wyjaśni, w jaki sposób parametry pracy silnika wpływają na jego moc.
Strategie nauczania:	strategia eksperymentalno-obszernyjna (dostrzeganie i definiowanie problemów).
Metody nauczania:	wykład informacyjny, pokaz multimedialny, analiza pomysłów.
Formy zajęć:	praca w grupach; praca indywidualna.
Środki dydaktyczne:	komputer z rzutnikiem lub tablety do dyspozycji każdego ucznia.
Materiały pomocnicze:	e-materiały: „Co to jest pompa ciepła”, „ Jak zanalizować cykle termodynamiczne? ”, „Analizujemy przepływ energii w postaci ciepła i pracy mechanicznej w silnikach i pompach ciepłych.”, „ Cykl Carnota ”, „ Cykl pracy czterosuwowego silnika spalinowego ”.
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
<ul style="list-style-type: none"> • Wprowadzenie zgodnie z treścią w części pierwszej „Czy to nie ciekawe?”. • Odwołanie do potocznej wiedzy uczniów o silnikach ciepłych. 	
Faza realizacyjna:	

Nauczyciel wyjaśnia podstawową zasadę działania silnika cieplnego, jako urządzenia, które zamienia ciepło na pracę, podkreślając konieczność cykliczności pracy silnika. Uczniowie analizują przykładowy silnik, w którym gaz doskonały wykonuje dwie przemiany izobaryczne i dwie izochoryczne, wykonując pracę, która polega na podnoszeniu ciężarów. Nauczyciel definiuje stan początkowy układu i zaznacza odpowiadający mu punkt na wykresie. Uczniowie zgłaszają pomysły, jakim przemianom poddawać kolejno gaz, czy ciepło dostarczać do gazu, czy odbierać, aby zrealizować zadanie podniesienia ciężarka. W rezultacie uczniowie przy pomocy nauczyciela konstruują cały cykl przemian.

Nauczyciel podkreśla, że w każdym cyklu część ciepła musi być oddana i definiuje sprawność silnika.

W drugim etapie lekcji uczniowie oglądają film samouczek. W trakcie analizy przemian zachodzących w „silniku garnkowym” nauczyciel zwraca uwagę na pojęcia stopnia sprężania i pojemności skokowej. Uczniowie uogólniają to, co przedstawia film i podają definicje tych pojęć; nauczyciel w razie potrzeby doprecyzowuje te definicje.

Faza podsumowująca:

Uczniowie w grupach wykonują polecenie powiązane z filmem oraz zad. 6. z części „Sprawdź się”.

Praca domowa:

Zadania z części „Sprawdź się”: obowiązkowo zad. 1-3 oraz 7.; do wyboru jedno z pozostałych zadań.

Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium:

Film samouczek może być wykorzystany przez uczniów po lekcji do powtórzenia i utrwalenia materiału.