

BOLESŁAW EGIEJMAN
INŻYNIER - TECHNOLOG

TERMODYNAMIKA TECHNICZNA

ZE 102 RYSUNKAMI W TEKŚCIE,
8 TABLICAMI LICZBOWYMI,
2 TABLICAMI WYKRESÓW TS i IS
i 170 ZADANIAMI



PAŃSTWOWE ZAKŁADY WYDAWNICTW SZKOLNYCH
WARSZAWA 1949



BOLESŁAW EGIEJMAN
INŻYNIER - TECHNOLOG

TERMODYNAMIKA TECHNICZNA

ZE 102 RYSUNKAMI W TEKŚCIE,
8 TABLICAMI LICZBOWYMI,
2 TABLICAMI WYKRESÓW TS i IS
i 170 ZADANIAMI



PAŃSTWOWE ZAKŁADY WYDAWNICTW SZKOLNYCH
WARSZAWA 1949

ZATWIERDZONE DO UŻYTKU SZKOLNEGO NA ROK
SZKOLNY 1949/50 PISMEM MINISTERSTWA OŚWIATY
NR VI Oc-2732/48 Z DNIA 3 LUTEGO 1949 r.



147 139

Podpisano do druku dnia 11. II. 1949 r. Zarząd. 594/II. — E-01839 II. nakład 20 000
Arkuszy druk. 16+2 wkl. Papier w form. 61×80 cm, 70 g, VII kl. Zamówienie Nr 3149

ZAKŁ. GRAF. PAŃSTWOWYCH ZAKŁADÓW WYDAWNICTW SZKOLNYCH — BYDGOSZCZ

Podręcznik niniejszy dostosowany został do urzędowego programu „Termodynamiki technicznej” wydanego w r. 1937 dla liceów mechanicznych. Opracowany on jest bez posilkowania się wyższą matematyką i zawiera prócz części teoretycznej zbiór zadań z rozwiązaniami, dzięki czemu nadaje się i dla samouków.

Mysłą przewodnią przy opracowaniu tego podręcznika było ułatwić w miarę możliwości nauczycielowi wykładanie, a młodzieży szkolnej studiowanie tego przedmiotu dość trudnego, a będącego podstawą tzw. techniki cieplnej.

AUTOR

TREŚĆ

I. Podstawy termodynamiki

Str.

Wstęp	9
1. Przedmiot termodynamiki	10
2. Równoważność ciepła i pracy	10
3. Czynnik termodynamiczny	11
4. Energia wewnętrzna i praca. Pierwsza zasada termodynamiki	13
5. Wykres pracy	15
6. Zmiany stanu	18
7. Odwracalność zmian termodynamicznych	20
8. Obieg	22
9. Druga zasada termodynamiki	24
10. Sprawność silnika	25
11. Obieg Carnota i jego sprawność	27
12. Uogólnienie drugiej zasady termodynamiki	30
13. Entropia	32
14. Wykres ciepła	33
15. Własności entropii	35

II. Gaz jako czynnik termodynamiczny

16. Równanie stanu gazów	38
17. Mol	41
18. Mieszaniny gazów	42
19. Równanie stanu mieszaniny gazów	44
20. Ciepło właściwe gazów	45
21. Energia wewnętrzna gazów	48
22. Entalpia	48
23. Praca techniczna	49
24. Zmiany stanu gazów	
a) przy stałej objętości	51
b) przy stałej prężności	52
c) przy stałej temperaturze	54
d) bez odpływu i dopływu ciepła	57

	Str.
25. Zmiana politropowa	61
26. Dławienie	65
27. Obieg Carnota dla gazów	66
28. Obieg w silniku spalinyowym wybuchowym	68
29. Obieg w silniku spalinyowym Diesla	70
30. Obieg w sprężarce gazowej	72

III. Para jako czynnik termodynamiczny

31. Para nasycona	75
32. Wykresy parowania	81
33. Zmiany stanu pary nasyconej	86
34. Para przegrzana	91
35. Zmiany stanu pary przegrzanej	94
36. Silnik parowy teoretyczny	97
37. Sprawność silnika parowego teoretycznego	104
38. Stan ciągłości gazowociekłej	107
39. Przechładzanie pary i przegrzewanie cieczy	108
40. Wilgotność powietrza	109

IV. Wpływ czynnika

41. Prędkość wypływu	114
42. Przekrój krytyczny, prędkość i prężność krytyczna	116
43. Wpływ przez dyszę i otwór	117

V. Spalanie

44. Wartość opałowa paliwa	119
45. Ilość powietrza do spalania	125
46. Nadmiar powietrza	127
47. Sprawność paleniska	129
48. Temperatura zapłonu i spalania	130
49. Ilość i skład chemiczny spalin	132
50. Analiza spalin	137

Skorowidz alfabetyczny	140
------------------------------	-----

Treść zadań	147
-------------------	-----

OZNACZENIA

<i>A</i>	ciepłny równoważnik pracy
<i>a</i>	udział wagowy składnika mieszaniny
α	spółczynnik rozszerzalności obj. gazów
<i>B</i>	ilość paliwa w kg
B_0	ciśnienie barometryczne w mm sł. rt.
<i>b</i>	udział objętościowy składnika mieszaniny
<i>C</i>	ciepło właściwe w Kal/m ³
<i>c</i>	„ „ w Kal/kg
δ	gęstość gazu w/m powietrza
ε	spółczynnik sprężania
η	„ sprawności
ζ	„ promieniowania
<i>F</i>	przekrój kanału wypływowego w m ²
<i>G</i>	ciężar w kg
<i>g</i>	przyspieszenie swobodnego spadania w m/sek ²
γ	ciężar właściwy w kg/m ³
<i>i</i>	entalpia w Kal/kg
<i>J</i>	mechaniczny równoważnik ciepła
<i>k</i>	wykładnik adiabaty
<i>L</i>	praca w kgm
λ	spółczynnik nadmiaru powietrza
<i>m</i>	wykładnik politropy
μ	ciężar cząsteczkowy
<i>P, p</i>	prężność (ciśnienie) w kg/m ²
<i>Q</i>	ilość ciepła w Kal
<i>R</i>	stała gazowa
<i>r</i>	ciepło parowania w Kal/kg
<i>q</i>	wewnętrzne ciepło parowania w Kal/kg

s	entropia
T	temperatura bezwzględna
t	„ w $^{\circ}\text{C}$
U	energia wewnętrzna w Kal
u	„ „ w Kal/kg
V	objętość w m^3
v	„ właściwa w m^3/kg
W	wartość opałowa paliwa w Kal/kg
w	wilgotność względna powietrza
w_0	prędkość wypływu czynnika w m/sek
x	suchość pary, zawartość pary wodnej w powietrzu.

I. PODSTAWY TERMODYNAMIKI

Wstęp

Z fizyki wiadomo, że grupa ciał wraz z siłami między nimi działającymi, czyli tzw. układ, o ile jest zachowawczy, tj. taki, w którym ruch nie napotyka oporu, i odosobniony, czyli pozostawiony samemu sobie, posiada pewien stały zapas energii, tj. suma np. energii kinetycznej i potencjalnej układu nie ulega zmianie. Energia w takim układzie może przechodzić tylko z jednej postaci w drugą. Na tym polega zasada zachowania energii w układzie zachowawczym.

Jeżeli na taki układ zaczną działać siły zewnętrzne, przestaje on być odosobnionym i wtedy zapas jego energii może się zwiększyć lub zmniejszyć o tyle, ile wynosi energia pobrana przez układ z zewnątrz, względnie oddana na zewnątrz.

Układów jednak ściśle zachowawczych w naturze nie ma. W każdym z nich działają siły takie, jak tarcie, uderzenie ciał niesprężystych itp., które zmniejszając np. energię kinetyczną układu nie nadają mu jednocz.śnie energii potencjalnej, przez co zachodzi jak gdyby zanik energii w układzie. Zanik energii jest tu jednak pozorny, występuje bowiem w takich wypadkach nowy rodzaj energii — energia cieplna otrzymana kosztem pracy.

Daleko jednak większą rolę w życiu technicznym odgrywa zjawisko odwrotne, czyli otrzymywanie pracy kosztem energii cieplnej. Znajomość tego zjawiska daje człowiekowi możliwość wykorzystania wielkich zapasów energii cieplnej, zawartej w różnego rodzaju ciałach palnych, przez zamienienie jej na energię mechaniczną. Odbywa się to w silnikach tzw. ciepł-

nych, tj. w silnikach parowych i spalinowych. Jak taka zamiana energii cieplnej na mechaniczną się odbywa, uczy nas nauka zwana **termodynamiką**.

§ 1. Przedmiot termodynamiki

Termodynamika w najogólniejszym znaczeniu jest nauką o energii cieplnej. W szczególności termodynamika bada, jakie prawa rządzą przy przechodzeniu energii cieplnej w inne rodzaje energii i odwrotnie oraz jakie zmiany zachodzą, jeżeli do ciała lub grupy ciał będziemy doprowadzali energię cieplną lub ją odprowadzali.

Termodynamika tzw. techniczna obejmuje z tych ogólnych zagadnień tylko te, które mają zastosowanie w technice, czyli inaczej mówiąc bada głównie zamianę ciepła na pracę mechaniczną lub odwrotnie. Przykładem takiej zamiany jest, jak wiadomo, każdy silnik cieplny. Otóż termodynamika techniczna daje nam odpowiedź na pytania, jak odbywa się zamiana ciepła na pracę, ile pracy można otrzymać z określonej ilości ciepła, w jakich warunkach ciepło może wydać maksimum pracy, w jakim stosunku pozostaje ilość energii mechanicznej, otrzymanej w silniku, do energii cieplnej, pobranej przez silnik, czyli jaka jest **sprawność** silnika cieplnego.

§ 2. Równoważność ciepła i pracy

Zależność liczbową między otrzymanym ciepłem a wydaną pracą lub między wydanym ciepłem a otrzymaną pracą została ustalona w połowie zeszłego wieku dzięki pracom Roberta Mayera, lekarza niemieckiego, i Jamesa Joule'a, fizyka angielskiego. Zależność tę można wyrazić tak: jeżeli praca jest jedynym wynikiem wydanego ciepła, to ilość otrzymanej pracy jest wprost proporcjonalna do ilości zużytego ciepła, czyli

$$\boxed{L = JQ} \dots\dots\dots (1)$$

gdzie L = ilość uzyskanej pracy w kgm,

Q = ilość wydanego ciepła w Kal.

i J = stała, zwana mechanicznym równoważnikiem ciepła.

Dla mechanicznego równoważnika ciepła doświadczalnie otrzymano wartość

$$J = 427 \text{ kgm/Kal,}$$

czyli że 1 Kal. jest równoważna 427 kgm pracy.

W termodynamice częściej korzystamy ze wzoru:

$$\boxed{Q = AL,} \dots\dots\dots (2)$$

gdzie stała A jest odwrotnością J i nosi nazwę: cieplny równoważnik pracy.

$$A = \frac{1}{427} \text{ Kal/kgm, czyli że 1 kgm pracy otrzymuje się z } \frac{1}{427}$$

Kal. ciepła.

Równoważnik cieplny A pozwala mierzyć pracę w Kal., tak jak równoważnik mechaniczny J pozwala mierzyć ciepło w kgm.

§ 3. Czynniki termodynamiczne

Zamiana ciepła na pracę może się odbywać z każdym ciałem. Można sobie wyobrazić urządzenie, w którym kolejne rozszerzanie się i kurczenie ciała czy to stałego, czy płynnego pod wpływem doprowadzanego ciepła może być zamienione na pracę. W termodynamice technicznej jako ciało termodynamicznie czynne, tj. takie, którego energia cieplna będzie zamieniana na pracę lub odwrotnie, występuje wyłącznie gaz i para wodna — podstawowe czynniki silników cieplnych. Przy omawianiu jednak podstaw ogólnych termodynamiki przez wyraz „czynniki” będziemy rozumieli jakiekolwiek ciało jednorodne bez względu na stan skupienia.

Czynnik posiada w każdym momencie pewną objętość, znajduje się pod pewnym ciśnieniem lub posiada pewną prężność i ma pewną temperaturę. Te trzy wielkości: objętość, prężność

i temperatura czynnika charakteryzują każdorazowo tzw. stan czynnika i nazywają się jego współzrędnymi lub parametrami termodynamicznymi.

Jeżeli od pewnego stanu początkowego czynnika współrzędne tego stanu zmieniły się — wszystkie lub tylko niektóre — będziemy mówili, że zaszła zmiana stanu czynnika.

Objętość 1 kg czynnika, czyli tzw. objętość właściwą, będziemy wyrażali zawsze w m^3/kg i oznaczali przez v , podczas gdy V będzie oznaczało objętość dowolnej ilości czynnika o ciężarze G kg.

$$\text{Wtedy } v = \frac{V}{G} \text{ m}^3/\text{kg} \dots\dots\dots (3)$$

Odwrotność v , czyli ciężar jednego m^3 czynnika w kg, będziemy nazywali ciężarem właściwym i oznaczali przez γ .

$$\text{Oczywiście } \gamma = \frac{1}{v} = \frac{G}{V} \text{ kg/m}^3$$

Poszczególne wzory i wartości podawać będziemy nie na 1 kg masy, a na 1 kg ciężaru, jak to jest przyjęte w termodynamice technicznej.

Prężność (ciśnienie) mierzyć będziemy w kg/m^2 i oznaczać przez p . Jeżeli prężność wyrażona będzie w atmosferach, należy pamiętać, że:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ata (metryczna)} &= 1 \text{ kg/cm}^2 = 10^4 \text{ kg/m}^2 = 735,5 \text{ mm sł. rtęci przy } 0^\circ = 737,4 \text{ mm sł. rtęci przy } +15^\circ, \\ 1 \text{ Ata (fizyczna)} &= 760 \text{ mm sł. rtęci przy } 0^\circ = 1,0333 \text{ ata.} \end{aligned}$$

Pomiar prężności odbywa się za pomocą:

- a) rurki manometrycznej mierzącej prężność w mm słupa wody lub w mm słupa rtęci;
- b) manometru, który podaje liczbowe wartości prężności w kg/cm^2 lub w atmosferach.

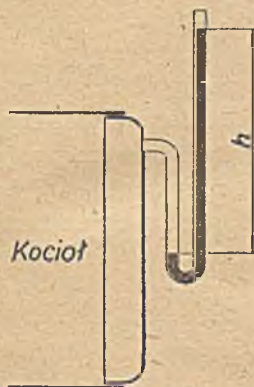
W termodynamice prężność mierzy się w kg/m^2 , gdyż objętość mierzona jest w m^3 .

Mierząc prężność w atmosferach rozróżniamy:

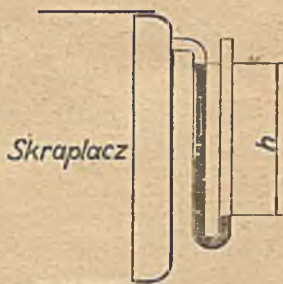
prężność bezwzględną oznaczaną jako p_{ata} , nadprężność, czyli różnicę między prężnością bezwzględną i ciśnieniem atmosferycznym (Rys. 1), i oznaczaną jako p_{atn} , oczywiście

$$p_{ata} = p_{atn} + 1$$

i w wypadku, kiedy prężność w zamkniętym naczyniu jest niższa od ciśnienia atmosferycznego, mówimy, że w naczyniu jest częściowa próżnia (podciśnienie), czyli *vacuum* (Rys. 2).



Rys. 1



Rys. 2

Temperaturę mierzyć będziemy w stopniach skali Celsjusza i oznaczać przez t° , a temperaturę bezwzględną (patrz str. 28 i 38) przez T .

Ilość ciepła mierzyć będziemy w kaloriach kilogramowych (dużych) oznaczając je przez Kal.

U w a g a. Za jednostkę ciepła w angielskim systemie miar przyjęto ilość ciepła potrzebną do ogrzania 1 funta (lbs) wody o 1° F. Jednostka ta nosi nazwę *British Thermal Unit (B. T. U.)* i

$$1 \text{ B. T. U.} = 0,252 \text{ Kal., a}$$

$$1 \text{ Kal.} = 3,96 \text{ B. T. U.}$$

§ 4. Energia wewnętrzna i praca — Pierwsza zasada termodynamiki

Mając na uwadze, że w termodynamice technicznej będziemy mieli do czynienia tylko z dwiema postaciami energii: z energią

cieplną i z pracą mechaniczną, gdyż zakładamy, że podczas zmian termodynamicznych skład chemiczny i fizyczny czynnika nie zmienia się, możemy ustalić, iż w najogólniejszym wypadku pod wpływem doprowadzanego ciepła czynnik rozszerza się czy rozpręża, jednym słowem, powiększa swą objętość i jednocześnie ogrzewa, czyli temperatura jego rośnie. Tylko w szczególnych wypadkach przy istnieniu odpowiednich warunków czynnik może powiększyć swą objętość bez podwyższenia temperatury lub na odwrót — ogrzać się bez przyrostu objętości.

Jeżeli czynnik pomimo dopływu ciepła nie powiększa swej objętości, istnieją bowiem warunki zapobiegające temu, to spostrzegamy, że temperatura czynnika podnosi się. Będziemy mówili, że podwyższanie się temperatury ciała jest objawem powiększania się zapasu jego energii wewnętrznej, rozumiejąc przez tę nazwę zapas energii ukrytej, która dopiero przy istnieniu odpowiednich warunków może być zamieniona na pracę. Opierając się na kinetycznej teorii materii można przez pojęcie energii wewnętrznej rozumieć całokształt sił działających stale między cząsteczkami ciała i powodujących np. zmianę stanu skupienia lub wzrost temperatury ciała.

Bezwzględnych wartości energii wewnętrznej czynnika nie znamy, operujemy jedynie przyrostami energii wewnętrznej — dodatnimi w wypadku powiększania się energii wewnętrznej lub ujemnymi, kiedy zapas energii wewnętrznej maleje, licząc od pewnego stanu początkowego. Energia wewnętrzna zależy zatem od stanów początkowego i końcowego czynnika i nie zależy od przebiegu samej zmiany stanu. Wartości energii wewnętrznej będziemy oznaczali literą U . Mierzyć ją będziemy w Kal.

Jeżeli zaś czynnik pod wpływem doprowadzanego ciepła powiększa swą objętość, to może jednocześnie wykonać pracę, którą będziemy nazywali pracą zewnętrzną. Odwrotnie — zmniejszenie objętości czynnika może się odbyć tylko pod wpływem wydanej z zewnątrz pracy. Czynnik, którego objętość pozostaje bez zmiany, nie wykonywa ani nie pobiera pracy zewnętrznej. Pracę zewnętrzną oznaczać będziemy przez L mierząc ją w kgm albo przez AL — w Kal.

Po wprowadzeniu tych oznaczeń można będzie ująć w formę równania działanie energii cieplnej na czynnik. Jeżeli doprowadzimy do czynnika ΔQ Kal. ciepła, to w ogólnym wypadku część tego ciepła w ilości ΔU Kal. będzie zużyta na powiększenie energii wewnętrznej czynnika, kosztem zaś reszty doprowadzonego ciepła zostanie wykonana praca zewnętrzna w ilości ΔL kgm $\approx A \Delta L$ Kal.

Otrzymamy tak zwane pierwsze równanie termodynamiki

$$\boxed{\Delta Q = \Delta U + A \Delta L} \quad (4)$$

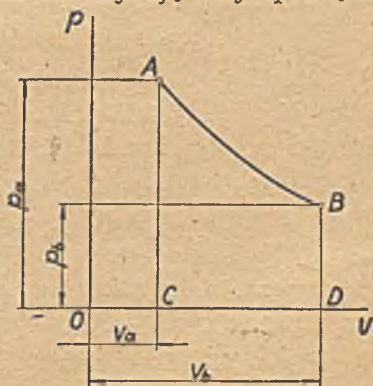
Równanie to jest matematyczną postacią pierwszej zasady termodynamiki, która brzmi: ciepło doprowadzone do układu zostaje w nim przetworzone na inne rodzaje energii, głównie na energię wewnętrzną i na pracę zewnętrzną, zawsze według ściśle określonego prawa uzależnionego od warunków przetwarzania. Zasada ta wynika z ogólnej zasady zachowania energii w układzie odosobnionym i z prawa równoważności ciepła i pracy.

§ 5. Wykres pracy

Jak wiemy, stan czynnika charakteryzują trzy współrzędne termodynamiczne: objętość, prężność i temperatura. Te trzy wielkości nie są niezależne od siebie, istnieje związek między nimi o postaci ogólnej

$$f(v, p, t) = 0,$$

charakterystyczny dla każdego czynnika i zwany równaniem stanu. Z równania tego można zawsze jedną ze zmiennych wyznaczyć, w zależności od obu pozostałych wybranych dowolnie.



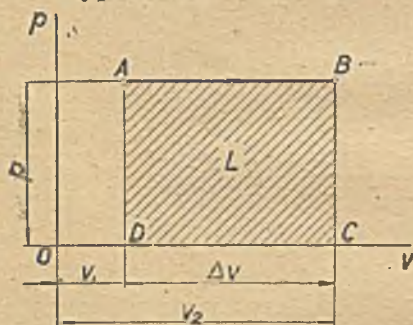
Rys. 3.

Okoliczność ta pozwala stan czynnika wyznaczyć na wykresie. Za zmienne wybieramy prężność i objętość. Spółrzędne p_a i v_a wyznaczają stan A czynnika, spółrzędne p_b i v_b — stan B . Krzywa AB przedstawia zmianę stanu czynnika, przebiegającą od stanu A do stanu B . Taki prostokątny układ osi spółrzędnych, w którym na osi rzędnych odkładamy prężności, a na osi odciętych odpowiednie objętości właściwe czynnika, zwać będziemy wykresem PV albo wykresem pracy.

Wykażemy, że pole figury zamkniętej na wykresie PV oznacza pracę.

Rozpatrzmy dwa wypadki: w jednym — powiększenie objętości czynnika, które jest nieodzownym warunkiem wydania pracy, odbywa się przy stałej prężności, w drugim — przy spadku prężności.

Wypadek 1. 1 kg czynnika o prężności p kg/m² zajmuje



Rys. 4

objętość v_1 m³. Pod wpływem doprowadzonego ciepła objętość czynnika wzrosła do v_2 , dzięki czemu prężność mogła pozostać stałą. Zaszła zmiana stanu $A-B$ połączona z wydaniem pracy (Rys.4). Lecz praca mierzy się iloczynem siły przez przebytą drogę. W danym wypadku siła równa się pF kg, gdzie

F m² przedstawia powierzchnię, na którą czynnik wywiera nacisk p kg/m². Jeżeli pod wpływem tej siły została przebyta droga S m, to praca $L = pFS$ kgm. Lecz FS jest to nic innego jak $v_2 - v_1$, zatem

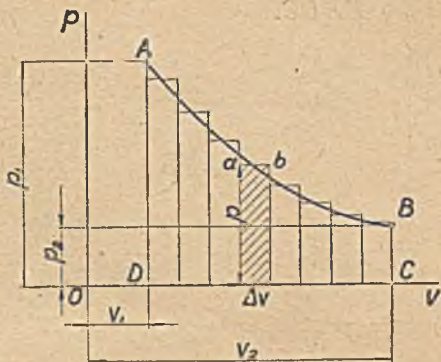
$$L = p(v_2 - v_1) \text{ albo ogólniej: } L = p\Delta v, \dots\dots\dots (5)$$

co oznacza, że uzyskana praca mierzy się iloczynem prężności przez przyrost objętości.

Ponieważ jednocześnie iloczyn $p\Delta v$ mierzy sobą pole prostokąta $ABCD$, to mamy, że pole figury powstałej przy zmianie stanu

od A do B przy stałej prężności jest miarą wykonanej pracy.

Wypadek 2. 1 kg czynnika o prężności p_1 i objętości v_1 (stan A) wykonywa pracę w ten sposób, że prężność czynnika spada do p_2 , objętość zaś wzrasta do v_2 (stan B). Zaszła zmiana stanu $A \rightarrow B$, a przebieg jej przedstawia krzywa AB .



Rys. 5

Zamienimy krzywą AB linią łamaną schodkową, jak na rys.5. Weźmy jeden z jej odcinków ab , któremu odpowiada ciśnienie p i objętość Δv . Na odcinku tym została wykonana praca, którą na zasadzie wypadku 1. możemy oznaczyć $L = p \Delta v$ i która mierzy się polem zakreskowanego prostokąta. Im łamana będzie miała więcej stopni, tym mniejszy popełnimy błąd, zastępując nią naszą krzywą. Oczywiście suma pól wszystkich otrzymanych tym sposobem prostokątów będzie coraz bliższa pola figury $ABCD$, lecz suma pól prostokątów przedstawia sobą pracę wykonaną podczas zmiany wzdłuż linii łamanej. A więc praca ta równoważna jest polu figury ograniczonej krzywą zmiany stanu $A - B$, dwiema rzędnymi AD i BC , poprowadzonymi z końcowych punktów krzywej, i odcietą DC .

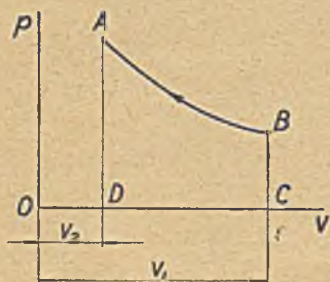
Będziemy oznaczali, że w tym wypadku:

$$L_{AB} = \Sigma p \Delta v$$

Z powyższego widać, że do wyliczenia $\Sigma p \Delta v$ nie wystarczą dane charakteryzujące początkowy i końcowy stan czynnika, lecz potrzebne są wszystkie stany pośrednie uzależnione od przebiegu zmiany stanu, a więc od prawa, któremu zmiana stanu podlega.

Jeżeli przebieg zmiany stanu jest od B do A (Rys. 6), czyli że pod wpływem pracy zewnętrznej zaszło zmniejszenie objętości

czynnika, to wykonana została praca ujemna, równoważna polu figury $BADC$.



Rys. 6

Jeżeli wreszcie założymy, że czynnik od swego początkowego stanu przeszedł różne zmiany po krzywej $ABCD$ (Rys. 7) wracając do swego stanu pierwotnego, to ilość pracy wykonanej przez czynnik, lub pobranej przez czynnik, będzie się wyrażała polem figury zamkniętej $ABCD$ i zależnie od kierunku zmian może być dodatnia ($ABCD$), ujemna ($ADCBA$) lub równa 0 ($ABCB$ albo $ADCD$).

§ 6. Zmiany stanu

Zmiany, jakim poddany jest czynnik przy przejściu pod wpływem doprowadzanego lub odbieranego ciepła z jednego stanu do

drugiego, nie odbywają się przy całkowitej niezależności współrzędnych p i v od siebie, lecz rządzą nimi pewne prawa nadające wyraźny charakter całej zmianie. Zależnie od tych praw, zmiany mogą być rozmaite. Rozpatrzmy z nich te, które mają większe znaczenie i zastosowanie w technice.

1. Zmiana *izochoryczna*, czyli przy stałej objętości.

Jeżeli $v = \text{const.}$, to $\Delta v = 0$.

Wobec $v = \text{const.}$ nie otrzymuje się pracy zewnętrznej, czyli $L = 0$. Pierwsze równanie termodynamiki otrzymuje postać

$$\Delta Q = \Delta U,$$

czyli że wydatek ciepła idzie na przyrost energii wewnętrznej i odwrotnie: przy odbieraniu od czynnika ciepła maleje jego zapas energii wewnętrznej.

Ostatecznie $Q = U_2 - U_1$, gdzie

Q = wydatek ciepła w Kal.,

U_2 = zapas energii wewnętrznej w stanie końcowym w Kal. i

U_1 = zapas energii wewnętrznej w stanie początkowym.

Krzywa przedstawiająca na wykresie PV zmianę izochoryczną, zwana izochorą, jest linią prostą prostopadłą do osi v (Rys. 8).

2. Zmiana izobaryczna, czyli przy stałej prężności.

Zatem $p = \text{const.}$ Pierwsze równanie:

$$\Delta Q = \Delta U + A p \Delta v$$

albo

$$Q = U_2 - U_1 + A p (v_2 - v_1).$$

A więc wydatek ciepła idzie częściowo na powiększenie zapasu energii wewnętrznej ($U_2 - U_1$) czynnika, częściowo na pracę zewnętrzną $A p (v_2 - v_1)$ Kal., gdzie v_2 jest to końcowa objętość czynnika, a v_1 — początkowa.

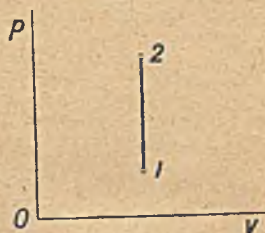
Przy odbieraniu od czynnika ciepła przy stałej prężności wydajemy pracę zewnętrzną (L ujemne), przy czym zapas energii wewnętrznej maleje.

Izobara na wykresie biegnie poziomo (Rys. 9).

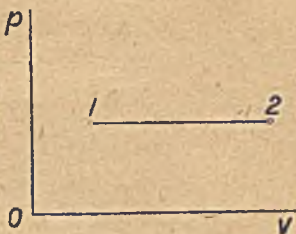
3. Zmiana izotermiczna, czyli przy stałej temperaturze.

$t = \text{const.}$ Pierwsze równanie:

$$\Delta Q = \Delta U + A p \Delta v$$



Rys. 8



Rys. 9

Wnioski co do tego równania mogą być zrobione po uwzględnieniu równania stanu czynnika. Równanie to wobec $t = \text{const.}$ ma postać $f(p, v) = 0$ i zależy od rodzaju czynnika. Np. dla gazów $t = \text{const.}$ oznacza, że energia wewnętrzna nie uległa zmianie, czyli $\Delta U = 0$, a $U = \text{const.}$ Pierwsze równanie termodynamiki przybiera postać

$$\Delta Q = AL,$$

co znaczy, że wydatek ciepła całkowicie idzie na pracę.

4. Zmiana *a d i a b a t y c z n a*, czyli bez doprowadzenia i odprowadzenia ciepła.

$\Delta Q = 0$. Pierwsze równanie:

$$\Delta U = -Ap\Delta v \quad \text{albo} \quad Ap\Delta v = -\Delta U.$$

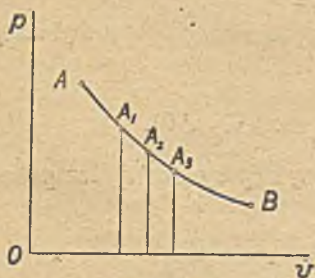
Przy tej zmianie otrzymuje się pracę kosztem energii wewnętrznej albo kosztem pracy otrzymuje się wzrost energii wewnętrznej.

Izoterma i adiabata na wykresie PV biegną po krzywych.

We wszystkich wymienionych zmianach stanu będziemy rozróżniali kierunek przebiegu zmiany nazywając jeden rozprężaniem, a odwrotny — sprężaniem czynnika, z wyjątkiem zmiany izobarycznej, w której wobec $p = \text{const.}$ będziemy używali nazw — rozszerzanie i ściskanie czynnika.

§ 7. Odwracalność zmian termodynamicznych

Odwracalna zmiana stanu jest to taka zmiana, która w każdym



Rys. 10

momencie swego przebiegu może się odbywać w jednym lub drugim kierunku. Np. jeżeli odbywa się pewna zmiana stanu czynnika od stanu A do stanu B przechodząc kolejno przez stany pośrednie A_1, A_2 itd. i jeżeli w każdym punkcie (Rys. 10) krzywej zmiana mogłaby się odbywać w przeciwnym kierunku przez te same stany pośrednie, z drugiej strony, jeżeli

przy zmianie wprost wydatek ciepła na nieskończenie mały

element przebiegu zmiany był ΔQ , a przy zmianie w odwrotnym kierunku podczas tegoż elementu należało odebrać czynnikowi ciepła ΔQ , to zmiana taka będzie odwracalna.

Aby poznać bliżej pojęcie zjawiska odwracalnego, zbadamy następujący przykład. Przecząc błocek przerzucone są dwa walce równego ciężaru wiszące na nieważkiej nitce przesuwającej się po bloczku bez tarcia (Rys. 11). Obciążając prawy walec dodatkowo, spowodujemy ruch i prawy walec z pewną prędkością będzie mijał poziom M . Zjawisko to jest nieodwracalne, gdyż aby walec ten mógł wznieść się do góry, nie wystarczy obciążenie lewego walca tym samym ciężarem, trzeba jeszcze przedtem sprowadzić do zera energię kinetyczną prawego walca.



M

Rys. 11

Zmniejszając stale dodatkowe obciążenia osiągniemy coraz łatwiejsze odwrócenie kierunku ruchu. Jeżeli więc będziemy zmniejszali dodatkowe obciążenia obu walców dążąc do zera, otrzymamy szereg prędkości prawego walca dążący również do zera, skierowanych na dół przy obciążeniu prawego walca i skierowanych do góry przy obciążeniu lewego. W granicy, kiedy obciążenie będzie nieskończenie małe, otrzymamy prędkość nieskończenie małą i walce każdej chwili będą mogły zmienić kierunek ruchu, czyli zjawisko będzie odwracalne. Zatem zjawisko odwracalne jest wspólną granicą dwu szeregów zjawisk nieodwracalnych przebiegających w kierunkach odwrotnych z prędkościami dążącymi do zera. Ale granica prędkości dążącej do zera jest stanem spoczynku, a więc zjawisko odwracalne składa się z szeregu stanów nieskończenie mało różniących się od stanu równowagi. Oczywiście przebieg takiego zjawiska odbywałby się nieskończenie wolno.

Aby zmiana termodynamiczna mogła być odwracalna, muszą być spełnione dwa warunki: 1) różnica temperatur czynnika

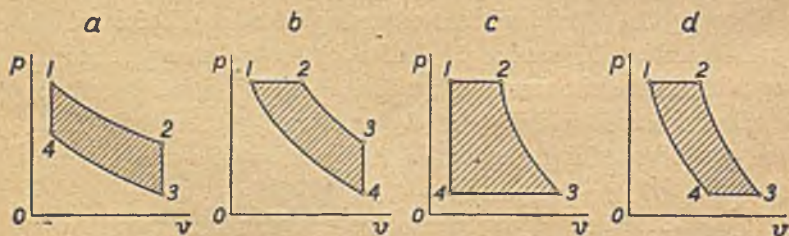
pozbierającego, lub tracącego ciepło i źródła oddającego lub pochłaniającego ciepło powinna być nieskończenie mała (równowaga termiczna) i 2) różnica ciśnień na czynnik i w czynniku, czyli ciśnienia zewnętrznego i prężności wewnętrznej, powinna być też nieskończenie mała (równowaga mechaniczna).

W praktyce nie można osiągnąć zmian odwracalnych, teoretycznie jednak łatwo sobie wyobrazić można następujące np. zmiany jako odwracalne: 1) rozprężanie, lub sprężanie izotermiczne lub adiabatyczne, 2) parowanie, lub skraplanie pary przy temperaturze wrzenia. Natomiast istnieją zmiany typowo nieodwracalne: tarcie we wszelkiej postaci, dławienie w przewodach, niezupełna sprężystość itp.

Pojęcie odwracalności jest pojęciem całkowicie teoretycznym. Ułatwia jednak ono badanie zmian termodynamicznych, gdyż zmiany odwracalne wolne są od wszelkiego rodzaju zakłóceń, jak tarcie, lepkość, przewodnictwo, promieniowanie i unoszenie ciepła, niesprężystość ciał itp., a nieskończenie mała prędkość przebiegu zmiany pozwala pominąć energię kinetyczną cząsteczek czynnika.

§ 8. Obieg

Szereg zmian stanu, po wykonaniu których czynnik powraca do stanu pierwotnego, stanowi obieg. W każdym silniku cieplnym, aby istniała ciągłość pracy kosztem ciepła, musi być wykonany szereg zmian stanu czynnika pracującego, po którym czynnik ten uzyskuje znów swoje początkowe własności, czyli musi być wykonany obieg zamknięty, kołowy (cykl).



Rys. 12

Obieg może się składać z rozmaitych zmian stanu w rozmaitej kolejności po sobie następujących. Oto kilka częściej spotykanych w technice obiegów, których wykresy przedstawia rys. 12: -

Ponieważ w każdym obiegu stan końcowy jest jednocześnie początkowym, przeto ogólna ilość energii wewnętrznej po wykonaniu obiegu nie ulega zmianie, czyli przyrost energii wewnętrznej w obiegu $\Delta U = 0$. Wobec tego pierwsze równanie termodynamiki w zastosowaniu do obiegu ma postać:

$$\Delta Q = A \Delta L$$

Z równania tego widać, że gdyby w obiegu można było zużyć wszystko ciepło, jakie obieg pobrał, to ilość otrzymanej pracy zewnętrznej byłaby równoważna ilości zużytego ciepła, co jest zgodne z prawem równoważności ciepła i pracy.

Jednocześnie równanie to pokazuje, że pracę w obiegu silnika cieplnego otrzyma się tylko po dostarczeniu mu ciepła. Silnik cieplny nie pobierający stale ciepła, nie mógłby stale oddawać pracy. Wszelkie zatem pomysły zbudowania silnika, który raz wprawiony w ruch i nie pobierający nadal energii z zewnątrz mógłby pozostawać w wiecznym ruchu, czyli pomysły zbudowania „perpetuum mobile“ (1 rodzaju) musiały pozostać bezowocnymi, jako przeczące pierwszej zasadzie termodynamiki. Fakt, że pomysły te mimo wysiłków wielu wynalazców nie zostały dotąd urzeczywistnione, jest też jednym z dowodów słuszności zasady zachowania energii.

Pole figury zamkniętej przedstawiającej obieg na wykresie jest miarą pracy otrzymanej w obiegu lub miarą pracy pobranej przez obieg, zależnie od kierunku zmian stanu w obiegu. Np. obieg „c“ rys. 12, o ile odbywa się w kierunku 1-2-3-4-1, oddaje pracę na zewnątrz, obieg ten jednak może mieć kierunek przeciwny 3-2-1-4-3 i wtedy pobiera on pracę z zewnątrz.

Obieg złożony ze zmian odwracalnych nazywa się obiegiem odwracalnym. Jeżeli silnik wykonujący obieg odwracalny pobiera przy ruchu wprost pewną ilość ciepła i wydaje pewną ilość pracy, to tenże silnik przy ruchu wstecz pobiera z zewnątrz tę samą ilość pracy i wydaje tę samą ilość ciepła.

§ 9. Druga zasada termodynamiki

Poprzednio było zaznaczone, że układ, w którym odbywa się stała zamiana energii cieplnej na mechaniczną, zwie się silnikiem cieplnym. W silniku cieplnym czynnik pobiera ciepło z pewnego źródła o temperaturze wyższej, zwanego źródłem górnym; np. palenisko, wybuchające gazy itp. Doświadczenie uczy, że nie wszystko ciepło pobrane z górnego źródła może być w silniku zamienione na pracę. Na pracę idzie tylko niewielka ilość pobranego ciepła, reszta zaś ciepła zostaje oddana tzw. źródłu dolnemu o temperaturze niższej, np. woda chłodząca, powietrze zewnętrzne. Różnica temperatur źródeł — górnego i dolnego — jest nieodzownym warunkiem zamiany energii cieplnej na pracę.

Jak w silnikach wodnych muszą być dwa poziomy wody: górny i dolny — obok siebie, aby woda spadając z jednego na drugi wykonywała pracę mechaniczną, tak też w silnikach cieplnych musi istnieć spadek temperatur źródła górnego i dolnego. Olbrzymie zapasy ciepła zawarte w oceanach są dla zamiany ich na pracę bezużyteczne dla braku w pobliżu odpowiedniego i łatwo dostępnego ciała o temperaturze niższej.

Silnik cieplny nie przetwarza na pracę wszystkiego pobranego ciepła. Jeżeli ilość ciepła pobrana ze źródła górnego podczas jednego obiegu jest Q_g , to z tego na pracę zostało zużyte Q_L i pochłonięte przez źródło dolne Q_d . Oczywiście $Q_g = Q_L + Q_d$. Okoliczność ta nie przeczy pierwszej zasadzie termodynamiki, gdyż Q_L ciepła jest równoważne L kgm pracy, czyli $Q_L = AL$. Ciepło pochłonięte przez źródło dolne jest dla pracy stracone i ulatuje pod postacią np. ciepła w parze odlotowej, w wodzie skroplonej z pary, w gazach wydychowych.

W obiegu silnika cieplnego czynnik przy pobieraniu ciepła styka się ze źródłem górnym o temperaturze wysokiej, dzięki czemu podwyższa się prężność czynnika i powiększa jego objętość. Otrzymuje się pracę zewnętrzną, podczas której prężność czynnika wyrównuje się z otoczeniem. Następnie czynnik styka się ze źródłem o temperaturze niższej i objętość jego maleje. Czynnik jednak nie wrócił jeszcze do stanu pierwotnego, obieg nie został

zamknięty. Aby zamknąć obieg, aby doprowadzić temperaturę czynnika do pierwotnej, należy wydać pewną ilość pracy zewnętrznej na sprężenie czynnika.

Streszczając powyższe rozważania otrzymujemy następujące prawa, które rządzą zamianą ciepła na pracę w obiegu silnika cieplnego:

1. Silnik cieplny może działać tylko przy „spadku ciepła” (Carnot, 1824). Mówiąc tak mamy na myśli różnicę temperatur źródeł i nieuniknioną stratę ciepła pochłanianego przez źródło dolne.
2. „Ciepło nie może samo przez się przejść z ciała zimniejszego do ciała cieplejszego” (Clausius, 1850), przez co rozumie się konieczność wydawania pracy w obiegach silników cieplnych na sprężanie czynnika.

Oba te prawa w całokształcie stanowią drugą zasadę termodynamiki, uznaną jako pewnik.

Zasada ta przeczy istnieniu silnika cieplnego, który by pracował tylko przy jednym źródle ciepła, czyli bez spadku temperatury, przeczy tzw. „perpetuum mobile” drugiego rodzaju.

§ 10. Sprawność silnika

Jak wiadomo, sprawnością jakiegokolwiek mechanizmu nazywamy stosunek energii wydanej przez mechanizm do energii pobranej przez ten mechanizm. Jeżeli silnik cieplny pobrał ze źródła górnego Q_1 ciepła, a oddał źródłu dolnemu Q_2 ciepła, to na pracę zużył $AL = Q_1 - Q_2$, jego sprawność zatem

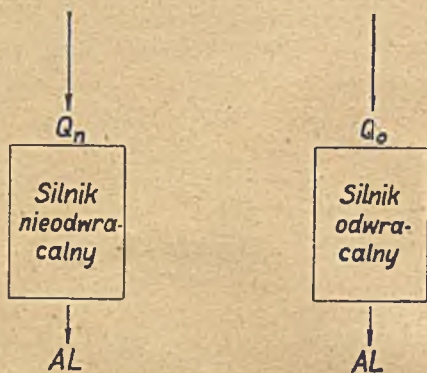
$$\eta = \frac{AL}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \dots\dots\dots (6)$$

Jest to wzór na sprawność każdego silnika cieplnego. Sprawność ta jest zawsze mniejsza od jedności, gdyż $Q_1 > Q_2$.

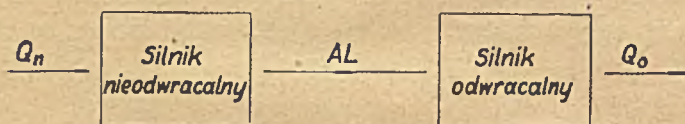
Wykażemy, że sprawność silnika odwracalnego jest większa od sprawności silnika nieodwracalnego.

Mamy dwa silniki, jeden odwracalny, drugi nieodwracalny, tak dobrane, że oba wydają jednakową ilość pracy L . Odwracalny pobiera Q_0 ciepła ze źródła górnego, nieodwracalny — Q_n . Spraw-

ność odwracalnego $\eta_0 = \frac{AL}{Q_0}$, sprawność nieodwracalnego $\eta_n = \frac{AL}{Q_n}$ (Rys. 13).



Rys. 13



Rys. 14

Przypuśćmy, że $\eta_n > \eta_0$,

$$\text{to } \frac{AL}{Q_n} > \frac{AL}{Q_0}, \text{ a więc } Q_n < Q_0.$$

Jeżeli teraz kosztem L pracy otrzymywanej z silnika nieodwracalnego wprowadzimy w ruch wsteczny silnik odwracalny, to ten ostatni, jako odwracalny, wyda nam Q_0 ciepła. Ten wynik otrzymaliśmy wydając na silnik nieodwracalny Q_n ciepła. (Rys. 14) A że $Q_n < Q_0$, to w wyniku ostatecznym $Q_0 - Q_n$ ciepła zostało przeniesione od źródła dolnego do górnego bez jednoczesnego wydania pracy zewnętrznej, co przeczy drugiej zasadzie termodynamiki.

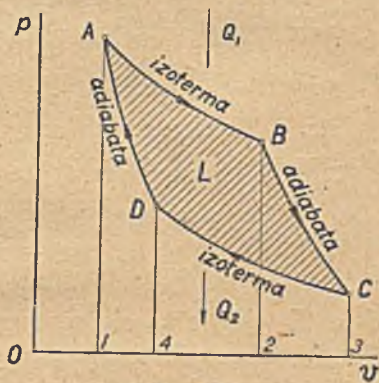
Zatem $\eta_n > \eta_0$ jest założeniem błędnym.

Gdyby $\eta_n = \eta_0$, to $Q_n = Q_0$, oba silniki niczym by się nie różniły, oba byłyby odwracalne, co przeczy założeniu. A zatem musi być $Q_n > Q_0$, czyli

$$\eta_n < \eta_0.$$

§ 11. Obieg Carnota i jego sprawność

Obieg złożony z dwóch izoterm i dwóch adiabat nosi nazwę obiegu Carnota. Dzięki swym własnościom obieg ten odgrywa w termodynamice ważną rolę. Czynnik od początkowego stanu $A(v_a, p_a)$ (Rys. 15) aż do stanu $B(v_b, p_b)$ styka się ze źródłem górnym o nieskończenie wielkiej pojemności cieplnej i stałej temperaturze. Na tej drodze czynnik pobiera Q_1 ciepła. Zmiana AB jest rozprężaniem izotermicznym, gdyż czynnik jest w zetknięciu ze źródłem o stałej temperaturze. Różnica temperatury źródła i czynnika istnieje, aby czynnik mógł pobrać Q_1 ciepła, jest jednak stale nieskończenie mała. Podczas



Rys. 15

czas rozprężania izotermicznego na drodze AB czynnik wykonał pracę zewnętrzną, mierzoną polem $AB21$.

W punkcie B czynnik zostaje odłączony od źródła górnego i pozostawiony samemu sobie. Rozpoczyna się rozprężanie adiabatyczne, które trwa do stanu $C(v_c, p_c)$, w którym czynnik osiąga temperaturę źródła dolnego. Podczas rozprężania adiabatycznego czynnik wydaje $BC32$ pracy kosztem spadku energii wewnętrznej.

W punkcie C czynnik styka się ze źródłem dolnym, pochłaniającym Q_2 ciepła od czynnika. Chłonność źródła dolnego jest nieskończenie wielka, temperatura jego pozostaje zatem bez zmiany. Odbywa się sprężanie kosztem pracy zewnętrznej $CD43$ na drodze CD , sprężanie izotermiczne, podczas którego temperatura czynnika nieskończenie mało się różni od temperatury źródła dolnego.

Czynnik odłączony od źródła dolnego w p. $D(v_d, p_d)$ zostaje adiabatycznie sprężany, póki nie wróci do stanu wyjściowego A . Na to sprężanie zużyto AD_1 pracy. Temperatura czynnika zrównała się z temperaturą źródła górnego i zapas energii wewnętrznej osiągnął początkową wartość.

Podczas obiegu uzyskano pracę w ilości równoważnej polu $ABCD$.

Zmiany, jakim podlega czynnik w obiegu, odpowiadają warunkom odwracalności, są więc odwracalne. Zatem i cały obieg jest odwracalny i można go wykonywać w jednym lub drugim kierunku.

Sprawność obiegu Carnota, jak każdego obiegu silnika cieplnego, może być przedstawiona wzorem $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$. Poniżej (na str. 35) będzie wykazane, że sprawność obiegu Carnota wyraża się również wzorem:

$$\boxed{\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}} \dots\dots\dots (7)$$

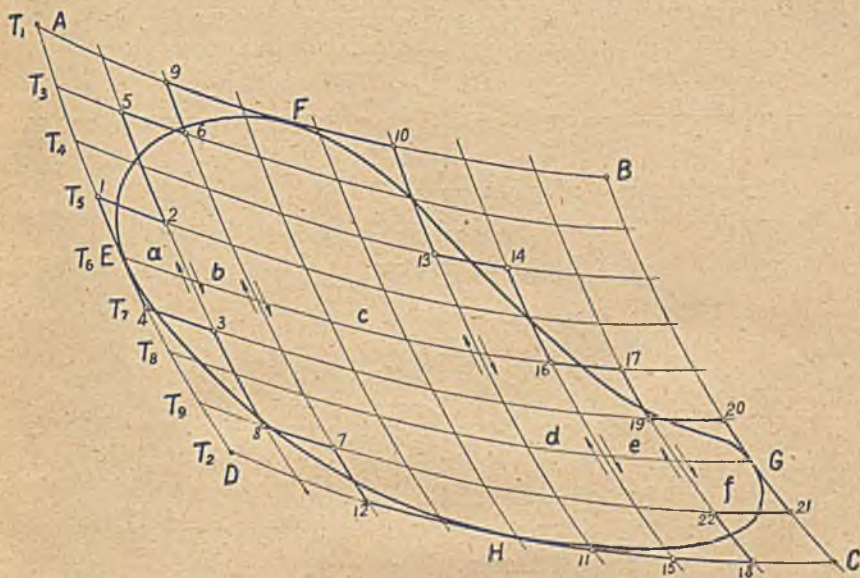
gdzie T_1 lub T_2 są temperaturami źródeł mierzonymi od bezwzględnego zera temperatury (-273°). Wzór ten ma zastosowanie tylko w obiegu Carnota.

Postać tego wzoru $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ wyraźnie wskazuje, że sprawność obiegu Carnota jest niezależna od rodzaju czynnika, to znaczy, że fizyczne własności czynnika, jak np. ciepło właściwe, nie wpływają na wielkość η , które w obiegu Carnota jest jedynie funkcją temperatur źródeł, czyli $\eta = f(T_1, T_2)$.

Udowodnimy, że obieg Carnota ma większą sprawność, niż wszelki inny obieg również odwracalny i pracujący między tymi samymi temperaturami źródeł, lecz złożony nie z izoterm i adiabat.

Zakładamy, że krzywa $EFGH$ (Rys. 16) oznacza obieg odwracalny, pracujący między temperaturami T_1 i T_2 , ale złożony nie

z izoterm i adiabat. Niech AB i CD będą stycznymi izotermami do tej krzywej, a AD i BC — stycznymi adiabatami.



Rys. 16

Powstał nowy obieg $ABCD$ między tymi samymi temperaturami T_1 i T_2 , ale obieg Carnota.

Mamy dowieść, że sprawność obiegu $EFGH$ (η_0) jest mniejsza od sprawności obiegu $ABCD$ (η).

Prowadzimy szereg izoterm T_3, T_4, T_5 itd. między izotermami T_1 i T_2 i szereg adiabat między adiabatami AD i BC oraz zamieniamy obieg $EFGH$ szeregiem obiegów pomocniczych, złożonych z 2 izoterm i 2 adiabat, obiegów a, b, c, d, e, f .

Obieg a , czyli 1-2-3-4, obieg b , czyli 5-6-7-8, obieg c , czyli 9-10-11-12 itd. są to obiegi Carnota. Im więcej będzie tych obiegów, czyli im gęściej poprowadzimy izotermy i adiabaty, tym lepiej obieg $EFGH$ będzie zastąpiony sumą pomocniczych obiegów, obiegów Carnota.

Zauważyć należy, że zmiana 2-3, należąca do obiegu a , lecz zbyt duża w obiegu $EFGH$, przy sumowaniu znosi się ze zmianą 3-2 z obiegu b . Podobnie znoszą się zmiany 6-7 i 7-6 itd.

Na zasadzie równania (7) sprawność obiegu a

$$\eta_a = \frac{T_5 - T_7}{T_5} = 1 - \frac{T_7}{T_5}, \text{ sprawność zaś obiegu } ABCD \quad \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Oczywiście $\eta_a < \eta$, gdyż $\frac{T_7}{T_5} > \frac{T_2}{T_1}$

Podobnie $\eta_b < \eta$, gdyż $\frac{T_9}{T_3} > \frac{T_2}{T_1}$

$$\eta_c = \eta,$$

$$\eta_d < \eta, \text{ gdyż } \frac{T_2}{T_4} > \frac{T_2}{T_1} \text{ itd.}$$

W wyniku ostatecznym mamy, iż sprawność obiegu $EFGH$, która niewątpliwie będzie średnią między η_a , η_b , η_c , η_d , η_e i η_f , wypadnie mniejsza niż η .

Najkorzystniejszy zatem sposób zamiany ciepła na pracę ma miejsce w obiegu Carnota.

§ 12. Uogólnienie drugiej zasady termodynamiki

Porównamy oba wzory (6) i (7) na sprawność obiegu Carnota:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$\text{Stąd wynika, że } \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \dots\dots\dots (8)$$

Uwzględniając kierunek przejścia ciepła, uważamy Q_1 jako ciepło pobrane przez czynnik, za dodatnie, zaś Q_2 , jako ciepło odebrane czynnikowi, za ujemne.

Otrzymujemy, że;

1). dla obiegu Carnota istnieje następująca zależność między temperaturami źródeł i ilościami ciepła, pobieranymi ze źródeł:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

Ponieważ wszelki obieg odwracalny może być zastąpiony szeregiem obiegów Carnota, jak na rys. 16, a dla każdego z tych obiegów Carnota, np. dla obiegu 1-2-3-4 lub 5-6-7-8 itd., można napisać, że:

$$\frac{Q_a}{T_5} + \frac{Q_a}{T_7} = 0; \quad \frac{Q_b}{T_3} + \frac{Q_b}{T_9} = 0 \text{ itd.},$$

zatem sumując te równania otrzymamy,

2). że dla każdego obiegu odwracalnego istnieje równanie:

$$\Sigma \frac{Q}{T} = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

Wykażemy, że

3). dla obiegu nieodwracalnego wielkość $\Sigma \frac{Q}{T}$ jest mniejsza od zera.

Sprawność obiegu nieodwracalnego $\eta_n = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$, a sprawność obiegu Carnota, pracującego w granicach tych samych temperatur źródeł co obieg nieodwracalny $\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

Wiadomo, że $\eta_n < \eta_c$, więc $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}$

$$\text{albo } 1 - \frac{Q_2}{Q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

zatem $\frac{Q_2}{Q_1} > \frac{T_2}{T_1}$. Mnożymy obie strony nierówności przez dodat-

nią wielkość $\frac{Q_1}{T_2}$, otrzymujemy $\frac{Q_2}{T_2} > \frac{Q_1}{T_1}$, czyli $\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} < 0$.

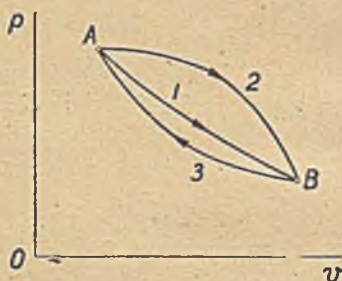
Przyjmując, jak poprzednio Q_1 dodatnie, Q_2 ujemne, otrzymamy dla obiegu nieodwracalnego

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} < 0, \text{ albo } \Sigma \frac{Q}{T} < 0 \dots\dots\dots (11)$$

W tych wzorach (9, 10 i 11) jest zawarta treść drugiego prawa termodynamiki w zastosowaniu do obiegów: Carnota (9), wszelkiego obiegu odwracalnego (10) i wszelkiego obiegu nieodwracalnego (11).

§ 13. Entropia

Dotąd mówiąc o wielkości $\Sigma \frac{Q}{T}$ mieliśmy do czynienia z obie-



Rys. 17

gami, czyli z zamkniętym szeregiem zmian. Weźmy teraz dowolną zmianę, np. ze stanu A do stanu B (Rys. 17). Może się ona odbyć wzdłuż krzywej A1B albo krzywej A2B, wreszcie wzdłuż jakiegokolwiek innej. Zbadamy zmiany w wielkości $\Sigma \frac{Q}{T}$ przy przejściu czynnika ze stanu A do B.

Przypuśćmy, że czynnik wzdłuż nowej krzywej B3A wraca ze stanu B do stanu pierwotnego A. Otrzymaliśmy obieg A1B3A albo obieg A2B3A. Zakładamy, że rozpatrywane zmiany są odwracalne, więc i obiegi są odwracalne i zastosujemy do obiegów równanie (10). Otrzymamy dla pierwszego obiegu $\Sigma_{(1)} \frac{Q}{T} + \Sigma_{(3)} \frac{Q}{T} = 0$, dla drugiego $\Sigma_{(2)} \frac{Q}{T} + \Sigma_{(3)} \frac{Q}{T} = 0$. Stąd wynika, że $\Sigma_{(1)} \frac{Q}{T} = \Sigma_{(2)} \frac{Q}{T}$.

A więc zmiany w wielkości $\Sigma \frac{Q}{T}$ podczas dowolnej odwracalnej zmiany stanu nie zależą od jej przebiegu, a tylko od jej stanu początkowego i końcowego.

Otrzymaliśmy wynik analogiczny do zmian energii wewnętrznej.

Zakładamy, że podczas nieskończonej małej zmiany stanu czynnik pobrał ΔQ ciepła przy temperaturze T źródła.

$$\text{Nazwiemy } \frac{\Delta Q}{T} = \Delta S \dots\dots\dots (12)$$

Otrzymamy, że przy zmianie np. od A do B

$$\sum_{AB} \frac{Q}{T} = S_B - S_A \dots\dots\dots (13)$$

Wielkość S będziemy nazywali e n t r o p i ą. Jest to pojęcie ściśle matematyczne i nie posiada określenia co do swej treści termodynamicznej.

Bezwzględnych wartości entropii nie znamy i możemy wyliczyć jedynie przyrost entropii przy zmianie stanu czynnika, np. z A do B , który to przyrost będzie różnicą wartości entropii w stanie A i entropii w stanie B względem jakiegoś innego stanu, od którego jako od punktu wyjścia entropia będzie obliczana. Podobnie obliczamy czas od pewnego momentu historycznego, wysokość — od poziomu morza itp.

Z równania $\Delta Q = T \Delta S$ widzimy, że entropia jest spółrzedną termodynamiczną (parametrem), pozwalającą wyliczyć ilość ciepła niezależnie od własności ciała, w którym to ciepło się znajduje.

Inny wzór na ilość ciepła $\Delta Q = c \Delta T$ zawiera c , czyli ciepło właściwe ciała, które jest wielkością zależną od rodzaju ciała, od przebiegu zmiany stanu, jak to zobaczymy dalej, a nawet od temperatury, i dlatego do badania podstaw termodynamiki niezależnie od rodzaju czynnika nie nadaje się.

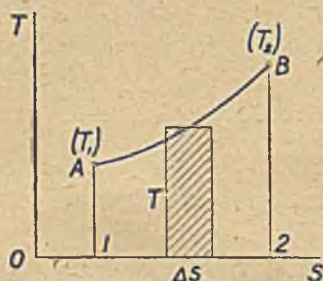
Jednostkę entropii mierzyć będziemy w $\frac{\text{Kal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$.

§ 14. Wykres ciepła

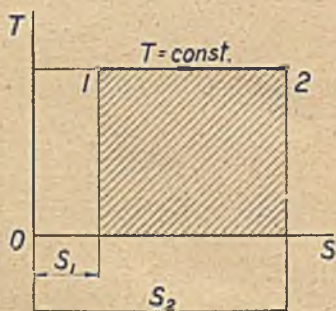
Entropię jako spółrzedną termodynamiczną zastosowano do wykresów w układzie prostokątnym łącznie z inną spółrzedną. Wykresy zawierające entropię noszą nazwę entropowych.

Rozpatrzmy własności wykresu TS , zwanego **wykresem ciepła**.

W nim na osi rzędnych odkłada się temperatury bezwzględne (T), a na osi odciętych — przyrosty entropii (S), pole zaś,



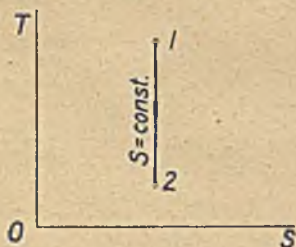
Rys. 18



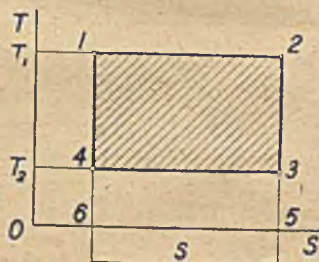
Rys. 19

które tworzy krzywa zmiany stanu, dwie rzędne i oś odciętych (Rys. 18), jest miarą wydanego ciepła. Dowód jak przy wykresie pracy na stronie 16 i 17.

Na wykresie TS izoterma biegnie jako prosta pozioma, gdyż dla niej $T = \text{const.}$ Ilość doprowadzonego podczas zmiany ciepła mierzy się polem prostokąta, gdyż $Q = T(S_2 - S_1)$ (Rys. 19).



Rys. 20



Rys. 21

Zmiana adiabatyczna, dla której $\Delta Q = 0$, a więc i $\Delta S = 0$; odbywa się bez zmiany entropii. Na wykresie TS adiabata przedstawia się jako prosta równoległa do osi temperatur (Rys. 20).

Zmiany izochoryczna i izobaryczna na wykresie TS mają kształt krzywych.

Obieg Carnota na wykresie TS jest prostokątem 1-2-3-4 (Rys. 21). Jednocześnie prostokąt 1-2-5-6 jest miarą ciepła Q_1 doprowadzonego do czynnika ze źródła górnego o temperaturze T_1 , a prostokąt 4-3-5-6 jest miarą ciepła Q_2 pochłoniętego przez źródło dolne o temperaturze T_2 . Wobec tego pole zakreskowane 1-2-3-4 jest równoważne $Q_1 - Q_2$, jest więc miarą wydanej w obiegu pracy zewnętrznej $AL = Q_1 - Q_2$ Kal.

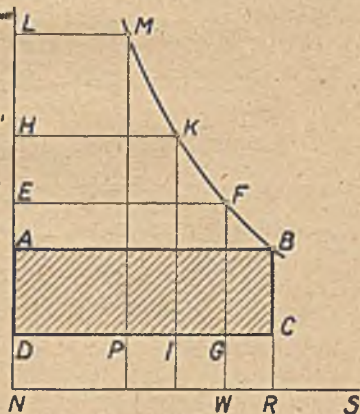
Sprawność obiegu

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_{1s} - T_{2s}}{T_{1s}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Wynik ten już był użyty na str. 28.

Udowodnimy, że zatrzymując temperaturę T_2 źródła dolnego bez zmiany oraz przyjmując, że $T_{1s} = \text{const.}$, czyli że ilość ciepła pobranego ze źródła górnego jest ta sama, osiąga się przy podwyższaniu T_1 zmniejszenie entropii rozprężania i coraz większą sprawność.

Istotnie, z dwóch obiegów T_1^m $EFGD$ i $ABCD$ o jednakowym Q_1 obieg $EFGD$ jest sprawniejszy (Rys. 22), gdyż dla niego Q_2 , czyli T_2^m pole $DGWN$ jest mniejsze od pola $DCRN$. Jeszcze sprawniejszy jest obieg $HKID$, potem $LMPD$ itd. W obiegach tych otrzymujemy coraz więcej pracy, gdyż $Q_1 = \text{const.}$, a Q_2 maleje. Punkty M, K, F, B wobec $T_{1s} = \text{const.}$ leżą na hiperboli równoramiennej, której oś symetrii przechodzi przez D .



Rys. 22

§ 15. Własności entropii

Mając pojęcie entropii możemy treść równania (13) wyrazić tak: wielkość $\sum \frac{Q}{T}$ podczas niezamkniętej odwracalnej zmiany stanu

jest równa przyrostowi entropii podczas tej zmiany, zależnemu tylko od stanu początkowego i końcowego zmiany.

Dla zamkniętego szeregu zmian odwracalnych, czyli dla obiegu odwracalnego, entropia zmianie nie ulega.

We wszechświecie zachodzą jednak tylko obiegi nieodwracalne. Odbywają się one ze skończoną prędkością i przy pewnych skończonych różnicach temperatur źródła i czynnika. Wykażemy, że w układzie odosobnionym (nie mającym wymiany ciepła z otoczeniem), obejmującym i źródła ciepła, i czynnik wykonujący obieg nieodwracalny, zachodzić może tylko wzrost entropii.

Mamy obieg nieodwracalny. Temperatura czynnika podczas pobierania ciepła T_1 , przy oddawaniu T_2 , lecz wobec nieodwracalności obiegu temperatura źródła górnego musi być wyższa od T_1 , a więc np. $T_1 + d_1$, a temperatura źródła dolnego — niższa od T_2 , a więc $T_2 - d_2$.

Ustalimy zmiany entropii w charakterystycznych momentach pracy obiegu.

- 1) Źródło górne oddaje ciepło czynnikowi, ciepło ujemne, przy-

$$\text{rost entropii} = -\Sigma \frac{Q_1}{T_1 + d_1}.$$

- 2) Czynnik pobiera ciepło, przyrost entropii $= \Sigma \frac{Q_1}{T_1}$. Ponieważ ilości ciepła (Q) oddanego przez źródło górne i pobranego przez czynnik są równe, to ogólny przyrost entropii

$$\Sigma \frac{Q_1}{T_1} - \Sigma \frac{Q_1}{T_1 + d_1} \text{ jest dodatni.}$$

- 3) Czynnik traci ciepło do źródła dolnego, przyrost entropii

$$= -\Sigma \frac{Q_2}{T_2}.$$

- 4) Źródło dolne pochłania ciepło, przyrost entropii $= \Sigma \frac{Q_2}{T_2 - d_2}$.

Suma przyrostów entropii $\Sigma \frac{Q_2}{T_2 - d_2} - \Sigma \frac{Q_2}{T_2}$ jest dodatnia.

Ogólny zatem przyrost entropii układu zamkniętego, wykonującego obieg nieodwracalny, jest dodatni.

Z powyższego wynika, że jeżeli układ wykonywa część obiegu nieodwracalnego, a więc zmianę niezamkniętą nieodwracalną, a tylko takie zmiany dokoła nas obserwujemy, to entropia układu wzrasta. Entropia najwyżej może pozostać bez zmiany, ale tylko w obiegach zamkniętych odwracalnych, we wszystkich pozostałych wypadkach rośnie.

O ile dla pewnego układu entropia rosnąc osiągnie najwyższą dla takiego układu wartość, w układzie tym nastąpi stan równowagi, tj. żadne zmiany w nim zajść nie mogą.

Przemiany we wszechświecie zdążają również do stanu równowagi. Widzimy, jak różne rodzaje energii przechodzą stopniowo w ciepło, ciepło przechodzi od ciał bardziej ogrzanych do zimniejszych, skutkiem czego różnice temperatur w przyrodzie stopniowo się zmniejszają. Ogólny zasób energii nie zmienił się, ale energia ta przestała być czynna. Na tym polega prawo rozpraszania energii.

II. GAZ JAKO CZYNNIK TERMODYNAMICZNY

§ 16. Równanie stanu gazów

Przystępujemy do szczegółowego badania własności fizycznych gazów mających zastosowanie w termodynamice. Dla ułatwienia i większej przejrzystości wyników przyjmiemy, iż mamy do czynienia z tzw. gazem doskonałym, tj. takim, który ściśle ulega prawom Gay-Lussaca i Boyle-Mariotte'a.

Prawo Gay-Lussaca. Przy stałej prężności objętości gazu są proporcjonalne do temperatur bezwzględnych.

Niech v_0 będzie objętością 1 kg gazu przy 0^0 ,

$$\begin{array}{ccccccc} \text{,,} & v_1 & \text{,,} & \text{,,} & 1 & \text{,,} & \text{,,} & \text{,,} & t_1 \\ \text{,,} & v_2 & \text{,,} & \text{,,} & 1 & \text{,,} & \text{,,} & \text{,,} & t_2 \end{array}$$

Oczywiście $v_1 = v_0 (1 + \alpha t_1)$ i $v_2 = v_0 (1 + \alpha t_2)$, gdzie α współczynnik rozszerzalności objętościowej gazów $= \frac{1}{273} = 0,003663$.

$$\text{Zatem } v_0 = \frac{v_1}{1 + \alpha t_1} \text{ i } v_0 = \frac{v_2}{1 + \alpha t_2}$$

$$\text{Stąd } \frac{v_1}{1 + \alpha t_1} = \frac{v_2}{1 + \alpha t_2} = \dots = \frac{v}{1 + \alpha t} = v_0 = \text{const.}$$

Podstawiając wartość α , otrzymamy:

$$\frac{v_1}{1 + \frac{t_1}{273}} = \frac{v_2}{1 + \frac{t_2}{273}}, \text{ skąd } \frac{v_1}{273 + t_1} = \frac{v_2}{273 + t_2}$$

Nazwiemy temperaturę — 273 zerem bezwzględnym, a temperatury odmierzane od zera bezwzględnego — temperaturami bezwzględnymi, które będziemy oznaczali T .

Wtedy $T_1 = 273 + t_1$ i $T_2 = 273 + t_2$

$$\text{Ostatecznie } \boxed{\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} = \dots = \frac{v}{T} = \text{const.}} \dots\dots\dots (14)$$

Prawo Boyle-Mariotte'a. Przy stałej temperaturze iloczyn prężności i objętości gazu jest wielkością stałą.

$$\boxed{v_1 p_1 = v_2 p_2 = \dots = v p = \text{const.}} \dots\dots\dots (15)$$

Oba te prawa w zastosowaniu do gazów zwykłych wykazują pewne odchylenia.

Połączenie tych dwóch praw doprowadza nas do r ó w n a n i a stanu gazów.

Zakładamy, że gaz objętości v_1 , prężności p_1 i o temperaturze T_1 doznał zmiany stanu wyrażającej się objętością v_2 , prężnością p_2 i temperaturą T_2 . Zmiana ta przeprowadzona została w ten sposób, że przy niezmienniej początkowo prężności p_1 gaz otrzymał temperaturę końcową T_2 i pewną objętość v_x , a następnie przy niezmienniej już temperaturze T_2 otrzymał objętość v_2 i prężność p_2 . Cały zatem przebieg zmiany stanu został podzielony na dwa okresy:

$$1) \text{ przy stałej prężności: } \begin{cases} v_1 - p_1 - T_1 \\ v_x - p_1 - T_2 \end{cases}$$

$$2) \text{ przy stałej temperaturze: } \begin{cases} v_x - p_1 - T_2 \\ v_2 - p_2 - T_2 \end{cases}$$

Do pierwszego zastosujemy prawo Gay-Lussac'a, według którego

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_x}{T_2}, \text{ skąd } v_x = \frac{v_1 T_2}{T_1},$$

do drugiego — prawo Boyle-Mariotte'a:

$$p_1 v_x = p_2 v_2, \text{ skąd } v_x = \frac{p_2 v_2}{p_1}.$$

Przyrównując wartości v_x otrzymujemy:

$$p_1 v_1 T_2 = p_2 v_2 T_1,$$

$$\text{skąd } \frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = \dots = \frac{p v}{T} = \text{const.} = R$$

$$\text{albo } \boxed{p v = R T} \dots\dots\dots (16)$$

Równanie to nosi nazwę równania stanu gazów i ma zastosowanie do wszelkich zmian stanu gazów.

Wielkość R nazywa się stałą gazową. Jest ona dla każdego gazu inna i określana bywa doświadczalnie lub wyliczana przy pomocy równań podanych niżej lub na str. 42.

Wartości liczbowe R dla różnych gazów, spotykanych w zagadnieniach technicznych, są podane w tablicy na str. 47.

Ponieważ $R = \frac{p v}{T}$, więc wymiar R jest: $\frac{kgm}{1^{\circ}}$.

A zatem stała gazowa R oznacza pracę w kgm , wykonaną przez 1 kg gazu przy podwyższeniu jego temperatury o jeden stopień przy stałej prężności.

Jeżeli gazu jest nie 1 kg, lecz G kg, to ponieważ $v = \frac{V}{G}$,
to $\boxed{pV = GRT}$ (17)

Z równania stanu gazów otrzymuje się uzupełnienie prawa Gay-Lussaca: przy stałej objętości prężności gazu są proporcjonalne do temperatur bezwzględnych.

Mamy bowiem: $v_1 p_1 = RT_1$ i $v_2 p_2 = RT_2$, jeżeli $v_1 = v_2$,
to $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$ (18)

Ponieważ przy stałych p i T objętości właściwe dwóch gazów są odwrotnie proporcjonalne do ciężarów właściwych, czyli

$$\frac{v_a}{v_b} = \frac{\gamma_b}{\gamma_a}, \text{ a } v_a = \frac{R_a T}{p} \text{ i } v_b = \frac{R_b T}{p}, \text{ to } \frac{R_a}{R_b} = \frac{\gamma_b}{\gamma_a}.$$

Lecz ciężary właściwe gazów przy jednakowych p i T są w tym samym stosunku, co ich gęstości (δ) względem powietrza o tym samym p i T .

Zatem $\frac{R_a}{R_b} = \frac{\gamma_b}{\gamma_a} = \frac{\delta_b}{\delta_a}$, czyli że stałe gazowe dwóch gazów są odwrotnie proporcjonalne do ich gęstości względem powietrza.

Równanie powyższe daje możność obliczyć R dla każdego gazu o wiadomej gęstości δ względem powietrza, gdyż dla powietrza $R = 29,27$, a $\delta = 1$.

§ 17. Mol

Na zasadzie prawa Avogadry mamy, że jednakowe objętości różnych gazów o jednakowej prężności i jednakowej temperaturze zawierają jednakowe ilości cząsteczek.

Nazwiemy ciężary cząsteczkowe dwóch gazów μ_1 i μ_2 , ciężary właściwe γ_1 i γ_2 , a ilość cząsteczek w jednakowych objętościach (V) obu gazów przy jednakowej prężności i temperaturze niech będzie n .

Wtedy ciężar jednego gazu $G_1 = \mu_1 n = V\gamma_1$

i „drugiego „ $G_2 = \mu_2 n = V\gamma_2$

Zatem $\frac{G_1}{G_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$ i $\frac{G_1}{G_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$; stąd $\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$, a ponieważ $\gamma_1 = \frac{1}{v_1}$

i. $\gamma_2 = \frac{1}{v_2}$, to $\frac{v_1}{\mu_2} = \frac{v_2}{v_1}$ also $\boxed{\mu_1 v_1 = \mu_2 v_2 = \dots = \mu v = \text{const.},}$

co można wyrazić tak, że objętość μ kilogramów każdego gazu o jednakowej prężności i temperaturze jest dla wszystkich gazów

liczbą stałą. Tę liczbę $\mu v = \frac{\mu}{\gamma}$ będziemy nazywali objętością jednego mola gazu albo objętością jednej kilogramocząsteczki gazu. Mole m więc albo kilogramocząsteczką będzie ilość kg gazu równa jego ciężarowi cząsteczkowemu.

U w a g a. Ciężar cząsteczkowy = stosunek ciężaru 1 cząsteczki danego gazu do $\frac{1}{16}$ ciężaru atomu tlenu przyjętej za jednostkę.

Wyliczymy objętość jednego mola gazu przy 0° i 760 mm sł. rt.
(warunki fizyczne):

Wodór H_2 , $\mu = 2,016$; $\gamma = 0,09$; $\mu v = \frac{\mu}{\gamma} = 22,4 \text{ m}^3/\text{mol}$

Tlen O_2 , $\mu = 32$; $\gamma = 1,429$; $\mu v = 22,4$ m³/mol.

Dwutl. węgla CO_2 ; $u = 44$; $\gamma = 1,964$; $\mu v = 22,4 \text{ m}^3/\text{mol}$.

Przeliczymy objętość jednego mola przy 15° i 737,4 mm sł. rt.
(warunki techniczne);

$$22,4 \times \frac{288}{273} \times \frac{760}{737,4} = 24,4 \text{ m}^3/\text{mol}.$$

Zastosujemy równanie stanu gazów do jednego mola, czyli do μ kg gazu: $pV = \mu R T$.

Jeżeli $p = 1 \text{ ata} = 10^4 \text{ kg/m}^2$, a $T = 288^\circ$, to $V = 24,4 \text{ m}^3$.

Zatem $\mu R = \frac{10^4 \cdot 24,4}{288} = 848$ dla wszystkich gazów, czyli

$$\boxed{R = \frac{848}{\mu}} \dots\dots\dots (19)$$

Wzór (19) daje możliwość obliczenia stałej gazowej dla każdego gazu w zależności od jego ciężaru cząsteczkowego.

Jeżeli dla jednego gazu $R_1 = \frac{848}{\mu_1}$, a dla drugiego $R_2 = \frac{848}{\mu_2}$,

to oczywiście $\frac{R_1}{R_2} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \dots\dots\dots (20)$,

czyli stałe gazowe dwóch gazów są odwrotnie proporcjonalne do ich ciężarów cząsteczkowych.

Równanie stanu gazów w postaci $p v = \frac{848}{\mu} T$ nosi nazwę równania Clapeyrona.

§ 18. Mieszaniny gazów

Jeżeli wypełnimy naczynie o objętości V nie jednym gazem, a mieszaniną kilku gazów o wspólnej temperaturze T i wspólnej prężności p , ważących razem G kg. i jeżeli przyjmiemy, że ciężary poszczególnych gazów wchodzących w skład tej mieszaniny są odpowiednio G_1, G_2, G_3 itd. to oczywiście

$$G_1 + G_2 + G_3 + \dots\dots\dots + G_n = G$$

Stosunek ciężaru każdego gazu do ciężaru mieszaniny, czyli

$$\frac{G_1}{G} = a_1; \quad \frac{G_2}{G} = a_2; \quad \frac{G_3}{G} = a_3 \text{ itd.}$$

nazwiemy udziałem wagowym składnika mieszaniny gazów.

Podobnie, niech objętości poszczególnych gazów — składników mieszaniny, będących w tych samych warunkach co do T i p , co i mieszanina, będą V_1, V_2, V_3 itd., to

$$V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n = V$$

Analogicznie stosunki $\frac{V_1}{V} = b_1, \frac{V_2}{V} = b_2, \frac{V_3}{V} = b_3$ itd. nazwiemy udziałami objętościowymi składników mieszaniny.

Oczywiście $\frac{G_1}{G} + \frac{G_2}{G} + \frac{G_3}{G} + \dots + \frac{G_n}{G} = 1$ i

$$\frac{V_1}{V} + \frac{V_2}{V} + \frac{V_3}{V} + \dots + \frac{V_n}{V} = 1$$

Zbadamy zależność między udziałami wagowymi i objętościowymi mieszaniny.

Jak wyżej $G_1 : G = a_1$, lecz $G_1 = V_1 \gamma_1$, a $G = V \gamma_m$, gdzie γ_m jest to ciężar właściwy całej mieszaniny gazów.

$$\text{Zatem } a_1 = \frac{G_1}{G} = \frac{V_1 \gamma_1}{V \gamma_m} = \frac{V_1 \gamma_1}{V_1 \gamma_1 + V_2 \gamma_2 + \dots + V_n \gamma_n} = \frac{V_1 \gamma_1}{\Sigma V \gamma}$$

Dzieląc i licznik, i mianownik przez V otrzymujemy:

$$a_1 = \frac{b_1 \gamma_1}{b_1 \gamma_1 + b_2 \gamma_2 + \dots + b_n \gamma_n} = \frac{b_1 \gamma_1}{\Sigma b \gamma}$$

Z poprzedniego mamy, że $\mu_1/\mu_2 = \gamma_1/\gamma_2$, a więc

$$a_1 = \frac{b_1 \mu_1}{b_1 \mu_1 + b_2 \mu_2 + \dots + b_n \mu_n} \quad \boxed{a_1 = \frac{b_1 \mu_1}{\Sigma b \mu}} \dots \dots \dots (21)$$

Mając zatem udziały objętościowe składników i ich ciężary cząsteczkowe można obliczyć poszczególne udziały wagowe.

Odwrotnie, przy szukaniu udziałów objętościowych piszemy:

$$b_1 = \frac{V_1}{V}, \quad V_1 = \frac{G_1}{\gamma_1}, \quad V = \frac{G}{\gamma_m}, \quad \text{to } b_1 = \frac{G_1/\gamma_1}{\Sigma G/\gamma}$$

$$\text{albo } b_1 = \frac{a_1/\gamma_1}{\Sigma a/\gamma}. \quad \text{Ostatecznie } \boxed{b_1 = \frac{a_1/\mu_1}{\Sigma a/\mu}} \dots \dots \dots (22)$$

Ciężar właściwy całej mieszaniny γ_m otrzymuje się z równań:

$$\gamma_m = \frac{G}{V} = \frac{V_1 \gamma_1 + V_2 \gamma_2 + \dots + V_n \gamma_n}{V} =$$

$$= b_1 \gamma_1 + b_2 \gamma_2 + \dots + b_n \gamma_n = \Sigma b \gamma, \dots \dots (23)$$

$$\text{albo } \frac{1}{\gamma_m} = \frac{V}{G} = \frac{\frac{G_1}{\gamma_1} + \frac{G_2}{\gamma_2} + \dots + \frac{G_n}{\gamma_n}}{G} =$$

$$= \frac{a_1}{\gamma_1} + \frac{a_2}{\gamma_2} + \dots + \frac{a_n}{\gamma_n} = \Sigma \frac{a}{\gamma},$$

$$\text{skąd } \gamma_m = \frac{1}{\Sigma \frac{a}{\gamma}} \dots \dots \dots (24)$$

Analogicznie:

$$\mu_m = \Sigma b \mu \quad \text{albo} \quad \mu_m = \frac{1}{\Sigma \frac{a}{\mu}}$$

Liczbę μ_m nazywać będziemy pozornym ciężarem cząsteczkowym mieszaniny gazów.

§ 19. Równanie stanu mieszaniny gazów

Według prawa Daltona prężność mieszaniny gazów równa jest sumie poszczególnych prężności, jakie wywierałyby oddzielne gazy wchodzące w skład mieszaniny, gdyby każdy z nich sam zajmował całą objętość mieszaniny.

Jeżeli mamy G kg mieszaniny gazów o objętości V i ciężary poszczególnych gazów są $G_1, G_2, G_3, G_4 \dots G_n$ kg, a prężności $p_1, p_2, p_3, \dots p_n$, gdyby każdy z nich zajmował sam całą objętość V , to $p_1 V = R_1 T G_1, p_2 V = R_2 T G_2$ itd. albo dzieląc obie strony przez G , otrzymamy:

$$p_1 v = R_1 T a_1; \quad p_2 v = R_2 T a_2; \quad \dots \quad p_n v = R_n T a_n,$$

gdzie v jest objętością właściwą mieszaniny.

Po dodaniu tych równań stronami otrzymujemy

$$v\Sigma p = T\Sigma Ra. \text{ Lecz } \Sigma p = p, \text{ zatem } pv = T\Sigma Ra.$$

Jeżeli oznaczymy $\Sigma Ra = R_m$, to otrzymamy r ó w n a n i e s t a n u mieszaniny gazów

$$pv = R_m T \dots\dots\dots (25)$$

R_m nosi nazwę pozornej stałej gazowej mieszaniny gazów.

Mając pozorny ciężar cząsteczkowy μ_m , stałą R_m można otrzymać ze wzoru (19)

$$R_m = \frac{848}{\mu_m}$$

Można również otrzymać wzory na $p_1 \cdot p_2 \cdot p_3$ itd. Dzielimy stronami równania

$$p_1 v = R_1 T a_1 \text{ i } pv = R_m T$$

i otrzymujemy $\frac{p_1 v}{pv} = \frac{R_1 T a_1}{R_m T}$, czyli $\frac{p_1}{p} = \frac{R_1 a_1}{R_m}$

A więc $p_1 = p \frac{R_1 a_1}{R_m}$ itd. $\dots\dots\dots (26)$

§ 20. Ciepło właściwe gazów

Zgodnie z pierwszym równaniem termodynamiki (4) przy doprowadzaniu ciepła do gazów możemy napotkać dwa wypadki.

W pierwszym gaz nie może powiększyć swej objętości, gdyż opór ścianek zamkniętego naczynia z gazem jest temu przeszkodą i ciepło wtedy idzie na podwyższenie temperatury gazu powiększając zapas jego energii wewnętrznej podług równania

$$\Delta Q = \Delta U.$$

W drugim wypadku gaz swobodnie może przy ogrzewaniu powiększać swą objętość, a więc prężność gazu pozostaje stała, ciepło zaś idzie nie tylko na podwyższenie temperatury gazu, jak w wypadku pierwszym, lecz i na pracę zewnętrzną przy powiększaniu się objętości gazu podług równania

$$\Delta Q = \Delta U + A \Delta L$$

Ponieważ ilość ciepła niezbędna do podwyższenia temperatury 1 kg gazu o 1° nazywa się ciepłem właściwym gazu, zatem będziemy rozróżniali dwa ciepła właściwe, stosownie do dwóch wyżej przytoczonych sposobów doprowadzania ciepła do gazu:

c_v — ciepło właściwe przy stałej objętości

c_p — „ „ „ „ „ „ „ „ prężności.

Ciepło właściwe przy stałej prężności gazu c_p musi być większe od ciepła właściwego przy stałej objętości c_v , gdyż prócz wydatku ciepła na ogrzanie gazu o 1° musi być zrobiony wydatek na pracę zewnętrzną powiększenia objętości gazu. Praca ta, jak to już omówione było na str. 40, jest równa R kgm, zatem $c_p = c_v + AR$, czyli

$$\boxed{c_p - c_v = AR} \dots\dots\dots (27)$$

podstawiając za $A = \frac{1}{427}$ i za $R = \frac{848}{\mu}$ otrzymamy

$$c_p - c_v = \frac{848}{427\mu} = \sim \frac{2}{\mu}.$$

Jest jeszcze druga postać zależności c_p i c_v , a mianowicie

$$\boxed{\frac{c_p}{c_v} = k}, \dots\dots\dots (28)$$

gdzie k dla gazu doskonałego wynosi 1, 41.

Z tych dwóch równań (27 i 28) można otrzymać:

$$c_v = \frac{1}{k-1} AR \text{ i } c_p = \frac{k}{k-1} AR \dots\dots\dots (29)$$

Wzory te można uważać za dokładne tylko dla gazu doskonałego, rzeczywiste zaś gazy odchylają się od nich w większym lub mniejszym stopniu.

W zagadnieniach technicznych często jest mowa o cieple właściwym 1 m³ gazu. Oznaczać je będziemy przez C i mając na uwadze, że 1 m³ gazu waży γ kg napiszemy:

$$C_p = c_p \gamma \text{ i } C_v = c_v \gamma \dots (30). \text{ Oczywiście } \frac{C_p}{C_v} = \frac{c_p}{c_v} = k.$$

Tablica gazów

Gaz		Ilość atomów w cząsteczce	Ciężar cząsteczko- wy	Ciężar 1 m³ w kg		Gęstość wzgl. powietrza	Stała gazowa	Ciepło właściw. średnie między 0° i 200° dla 1 kg		$\frac{c_p}{c_v}$ k
				15° i 1 ata	0° 760 mm			c_p	c_v	
			μ	δ	R					
Hel	He	1	3,99	0,163	0,178	0,137	212, 5	1,25	0,75	1,667
Powietrze			(28,95)	1,186	1,293	1,	29,27	0,24	0,172	1,40
Tlen	O ₂	2	32	1,310	1,429	1,105	26,50	0,218	0,156	1,40
Azot	N ₂	2	28,03	1,147	1,251	0,967	30,26	0,249	0,178	1,40
Wodór	H ₂	2	2,016	0,083	0,090	0,07	420, 6	3,405	2,42	1,407
Tlenek węgl.	CO	2	28	1,147	1,250	0,967	30,29	0,250	0,179	1,398
Dwutl. węgl.	CO ₂	3	44	1,801	1,964	1,518	19,27	0,21	0,165	1,28
Para wodna	H ₂ O	3	18,02	0,738	0,804	0,622	47,06	0,50	0,39	1,28
Dwutl. siark.	SO ₂	3	64,07	2,624	2,860	2,212	13,24	0,154	0,123	1,25
Amoniak	NH ₃	4	17,03	0,697	0,760	0,588	49,79	0,53	0,41	1,29
Acetylen	C ₂ H ₂	4	26,02	1,066	1,162	0,899	32,59	0,37	0,29	1,26
Metan	CH ₄	5	16,03	0,656	0,715	0,553	52,90	0,59	0,46	1,28

Ciepło właściwe mieszaniny gazów wyraża się wzorami:

$$\left. \begin{aligned} c_{p_m} &= \Sigma c_p a \text{ i } c_{v_m} = \Sigma c_v a, \\ c_{p_m} &= \Sigma C_p b \text{ i } c_{v_m} = \Sigma C_v b. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (31)$$

Otrzymane doświadczalnie wartości liczbowe ciepła właściwych gazów używanych w technice pozwalają połączyć te gazy w pewne grupy różniące się liczbą atomów w jednej cząsteczce. Tak dla gazów jednoatomowych, jak argon i hel, stosunek $c_p : c_v = 1,67$, dla gazów dwuatomowych, jak tlen, azot, (powietrze), wodór, tlenek węgla $c_p : c_v = 1,40$, wreszcie dla gazów o większej liczbie atomów w cząsteczce niż dwa, jak dwutlenek węgla (CO_2) bezwodnik siarkawy (SO_2), amoniak (NH_3), para wodna

$$\frac{c_p}{c_v} = 1,25 - 1,29.$$

§ 21. Energia wewnętrzna gazów

Na zasadzie doświadczeń Joule'a przeprowadzonych wspólnie z W. Thomsonem zostało ustalone, że energia wewnętrzna gazów nie zmienia się, o ile zmiana stanu gazu odbywa się izotermicznie, tj. przy niezmiennej temperaturze bez względu na zmiany objętości i prężności gazu. Tym sposobem powstało prawo, które nosi w termodynamice nazwę prawa Joule-Thomsona i które brzmi: energia wewnętrzna gazów jest funkcją tylko temperatury gazu. Jeżeli zatem po pewnej zmianie stanu gazu lub po kilku po sobie następujących zmianach temperatura gazu wzrosła jednakowo od T_1 do T_2 , to również jednakowo wzrosła energia wewnętrzna gazu, bez względu na zmiany jego objętości i prężności.

Prawo Joule-Thomsona jest ściśle dla gazu doskonałego, dla gazów zaś rzeczywistych doznaje ono pewnych odchyień, tym mniejszych, im bardziej gaz oddala się od stanu nasycenia.

§ 22. Entalpia

Jeżeli do 1 kg czynnika o prężności p i objętości v doprowadzimy przy stałej prężności Q kal., to dzięki temu w wypadku najogólniejszym początkowy zapas jego energii wewnętrznej u_1

ostanie powiększony i osiągnie wartość u_2 , a objętość wzrośnie do v_2 , wskutek czego zostanie wykonana praca zewnętrzna L kgm.

Ujmując to we wzór otrzymamy zgodnie z pierwszym równaniem termodynamiki:

$$Q = u_2 - u_1 + AL \quad \text{albo} \quad Q = u_2 - u_1 + A p (v_2 - v_1).$$

Powyższe równanie można przedstawić w sposób następujący:

$$Q = (u_2 + A p v_2) - (u_1 + A p v_1)$$

Oznaczmy wyrażenie $u + A p v = i$ (32)

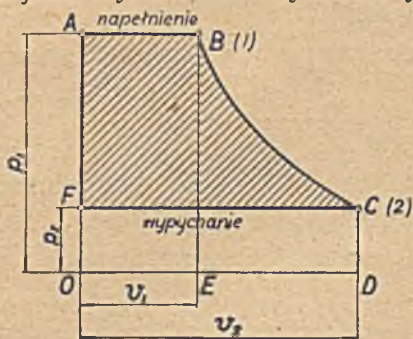
$$\text{Wtedy} \quad Q = i_2 - i_1$$

Ponieważ w danym wypadku Q kal. jest ciepłem potrzebnym do przeprowadzenia czynnika ze stanu pierwszego do stanu drugiego przy $p = \text{const.}$, przeto oczywistym jest, że ciepło to można przyrównać do różnicy dwóch ciepł, liczonych każde od pewnego umówionego stałego początkowego punktu, a niezbędnych do doprowadzenia czynnika do stanów pierwszego (i_1) i drugiego (i_2) przy $p = \text{const.}$

Tę ilość ciepła niezbędną do doprowadzenia czynnika od umówionego stałego początkowego punktu do pewnego stanu końcowego przy $p = \text{const.}$ nazywać będziemy wartością cieplną tego stanu albo entalpią (i). Zwykle entalpię oblicza się od $t = 0^\circ$

§ 23. Praca techniczna

Obieg wykonany przez gaz jako czynnik termodynamiczny silnika cieplnego ma często kształt jak na rys. 23. Na drodze AB czynnik napełnia cylinder silnika, na BC — rozpręża się wzdłuż pewnej krzywej. Jeżeli jest to silnik tłokowy, to podczas zmian AB i BC tłok posuwał się naprzód wykonując pracę zewnętrzną $ABOE + BCDE$. Następnie tłok odbywa ruch powrotny wypychając rozprężony czynnik na drodze CF , kosztem



Rys. 23

zewewnętrznej równoważnej polu $CDOF$. W wyniku końcowym otrzymamy, że silnik wydał po dokonaniu obiegu $ABCF$ pracy. Pracę tę nazywać będziemy pracą techniczną i oznaczać przez L_t . Dotyczy ona zawsze obiegu, a nie pojedynczej zmiany i obejmuje nie tylko pracę zewnętrzną samego rozprężania, lecz i pracę napełniania czynnikiem cylindra i pracę opróżniania cylindra.

Mamy zatem:

$$ABCF = ABEO + BCDE - CDOF, \text{ gdzie}$$

$$ABCF \text{ jest pracą techniczną} = L_t,$$

$$ABEO \text{ ,, ,, napełnienia cylindra 1 kg czynnika}$$

$$\text{o prężności } p_1 \text{ i równa się } p_1 v_1,$$

$$BCDE \text{ jest pracą rozprężania} = L_{BC}$$

$$CDOF \text{ ,, ,, na usunięcie rozprężonego czynnika}$$

$$\text{z cylindra i równa się } p_2 v_2.$$

$$\text{Otrzymujemy } L_t = p_1 v_1 - p_2 v_2 + L_{BC}, \text{ skąd}$$

$$L_{BC} = p_2 v_2 - p_1 v_1 + L_t$$

Jeżeli Q jest ilością ciepła wydaną na rozprężanie czynnika podczas zmiany BC , to na zasadzie 1. równania termodynamiki

$$Q = u_2 - u_1 + AL_{BC},$$

gdzie u_2 i u_1 są wartościami energii wewnętrznej w punktach C i B . Podstawimy do tego równania zamiast L_{BC} otrzymaną wyżej wartość.

Otrzymujemy po uporządkowaniu

$$Q = (u_2 + A p_2 v_2) - (u_1 + A p_1 v_1) + AL_t,$$

$$\text{albo } \boxed{Q = i_2 - i_1 + AL_t} \dots\dots\dots (33)$$

Równanie (33) przedstawia drugą postać 1. równania termodynamiki.

Jeżeli BC jest rozprężaniem adiabatycznym, to $Q = 0$ i wtedy

$$AL_t = i_1 - i_2 \dots\dots\dots (34)$$

Praca techniczna rozprężania adiabatycznego odbywa się kosztem spadku entalpii; odwrotnie, sprężaniu adiabatycznemu towarzyszy wzrost entalpii.

Jeżeli $p = \text{const.}$, wtedy $L_i = 0$ i $Q = i_2 - i_1$, jak to już otrzymaliśmy na str. 49.

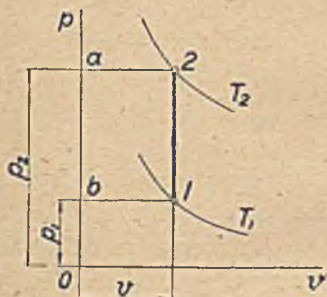
§ 24. Zmiany stanu gazów

Rozpatrzmy szczegółowo ważniejsze zmiany stanu gazów zakładając, że mamy do czynienia z gazem doskonałym. Przy badaniu poszczególnych zmian będziemy trzymali się następującej kolejności: 1) ustalenie warunków zmiany, 2) wykresy, 3) ΔQ . 4) ΔS , 5) L , 6) ΔU , 7) $f(p, v, T)$, 8) odwrócenie kierunku zmiany,

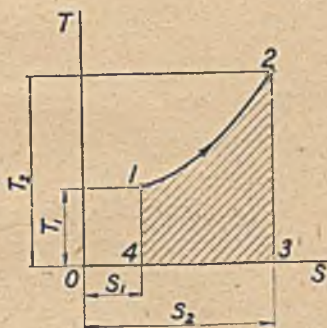
a) Zmiana przy stałej objętości (izochoryczna) gazu.

1) Warunki: $v = \text{const.}$, p i T zmienne.

2) Wykresy: PV (Rys. 24) i TS (Rys. 25).



Rys. 24



Rys. 25

3) Wydatek ciepła na zmianę

$$Q = c_v (T_2 - T_1) \dots\dots\dots (35)$$

równoważny polu 1—2—3—4 na wykresie TS (Rys. 25).

Mając na uwadze wartość c_v z równania (29) oraz wartości T_2 i T_1 z równania stanu gazów można napisać:

$$Q = \frac{1}{k-1} AR (T_2 - T_1) = \frac{A}{k-1} (RT_2 - RT_1) =$$

$$= \frac{Av}{k-1} (p_2 - p_1).$$

$$4) \Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{c_v \Delta T}{T}, \text{ zatem } s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} \dots (36)$$

U w a g a 1. Z wyższej matematyki wiadomo, że o ile ΔT mieści się w granicach od T_1 do T_2 , to wyrażenie $\Sigma \frac{\Delta T}{T} = \ln \frac{T_2}{T_1}$. Wtedy $\Sigma \Delta S = S_2 - S_1$, gdzie s_2 odpowiada T_2 , a $s_1 - T_1$.

U w a g a 2. $\ln$ (logarytm naturalny), tj. logarytm przy zasadzie e , można przy wyliczeniach zastąpić logarytmem dziesiętnym według wzoru: $\ln a = \lg_{10} a$. $\ln 10 = 2,3 \lg a$.

$$5) \text{ Wobec } v = \text{const. } L = 0. \text{ Praca techniczna } L_t = v(p_2 - p_1) = v \Delta p \text{ (obieg } a-2-1-b).$$

$$6) \Delta U = \Delta Q = c_v \Delta T.$$

$$7) \text{ Na zasadzie uzupełnienia prawa Gay-Lussaca (18)}$$

$$\text{piszemy } \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

8) Rysunki 24 i 25 przedstawiają sprężanie izochoryczne. Odwracając kierunek zmian otrzymamy rozprężanie izochoryczne, przy którym będzie niezbędne odbieranie ciepła od gazu przy jednoczesnym spadku jego energii wewnętrznej.

b) Zmiana przy stałej prężności (izobaryczna) gazu.

1) Warunki: $p = \text{const.}$, v i T zmienne.

2) Wykresy: PV (Rys. 26) i TS (Rys. 27).

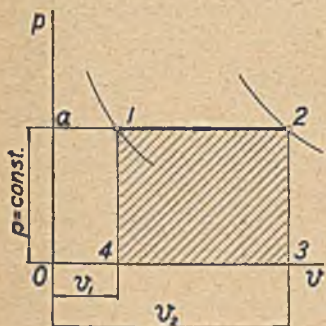
8) Wydatek ciepła na zmianę

$$Q = c_p (T_2 - T_1) \dots \dots \dots (37)$$

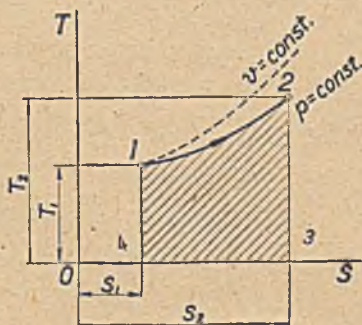
Stosując równanie (27) mamy także:

$$Q = (c_v + AR) (T_2 - T_1).$$

Wydatek ciepła jest równoważny polu (1-2-3-4) na wykresie TS (Rys. 27).



Rys. 26



Rys. 27

$$4) \Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = c_p \frac{\Delta T}{T} = (c_v + AR) \frac{\Delta T}{T}.$$

$$\text{Zatem } s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} \dots\dots\dots (38)$$

- 5) Uzyskana praca zewnętrzna L jest równoważna polu (1-2-3-4) na wykresie PV (Rys. 26).

$$\text{Zatem } L = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1) \dots\dots\dots (39)$$

Praca techniczna $L_t = 0$ (obieg $a-1-2-a$).

- 6) Jeżeli w obu przytoczonych zmianach stanu — izochorycznej i izobarycznej — zaszło jednakowe podwyższenie temperatury od T_1 do T_2 , to na mocy prawa Joule-Thomsona w obu wypadkach energia wewnętrzna wzrosła jednakowo, niezależnie od zmian objętości i pręężności.

Zatem $\Delta U = c_v \Delta T$ albo

$$U_2 - U_1 = c_v (T_2 - T_1) \dots\dots\dots (40)$$

- 7) Przy stałej pręężności rządzi prawo Gay-Lussaca według równania (14).

- 8) Rysunki 26 i 27 przedstawiają rozszerzanie izobaryczne, podczas którego kosztem pobranego ciepła zostaje powiększona energia wewnętrzna gazu i wydana praca

zewnątrzna. Po odwróceniu kierunku zmiany otrzymamy ściskanie izobaryczne, przy którym kosztem pracy zewnętrznej zostaje zmniejszona objętość gazu przy jednoczesnym odprowadzeniu od niego ciepła i zmniejszeniu energii wewnętrznej.

c) Zmiana przy stałej temperaturze (izotermiczna).

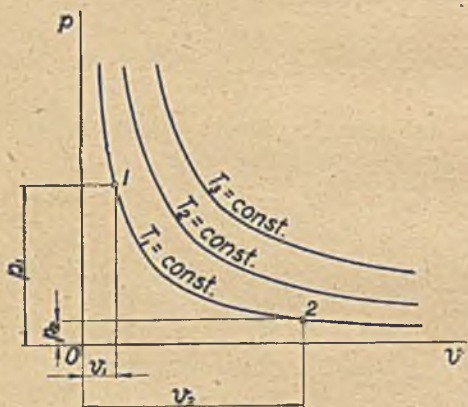
1) Warunki: $T = \text{const.}$, p i v zmienne.

2) Przy stałej temperaturze rządzi prawo Boyle-Mariotte'a według równania

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = \dots = pv = \text{const.}$$

Krzywą, której równanie jest $p v = \text{const.}$, jest hiperbola równoramienna. Krzywa ta będzie przedstawiała

izotermiczną zmianę stanu na wykresie PV i będzie się nazywała izotermą (Rys. 28). Ponieważ $p v = RT$, więc dana krzywa o równaniu np. $p_1 v_1 = \text{const.}$ odpowiada tylko jednej temperaturze T_1 , innej temperaturze odpowiada inna izoterma.

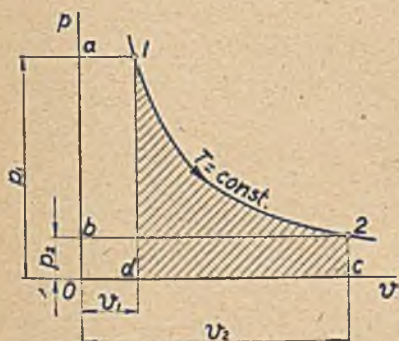


Rys. 28

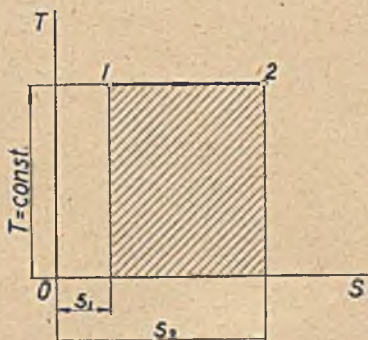
Ramiona izoterm nie przecinają się z osiami współrzędnych, tylko zbliżają się do nich w nieskończoności — niemal styczniwie. Izotermy ze sobą również się nie przecinają.

Na rys. 24 i 26 krzywe przechodzące przez punkty 1 i 2 oznaczają izotermy dla temperatur T_1 i T_2 . Rys. 29 przedstawia zmianę izotermiczną na wykresie PV , a rys. 30 na wykresie TS .

- 3) Wydatek ciepła na zmianę wyliczymy zauważwszy, że na zasadzie prawa Joule-Thomsona wobec $T = \text{const.}$, $\Delta U = 0$.



Rys. 29



Rys. 30

Zatem

$$\Delta Q = A \Delta L = A p \Delta v \text{ i}$$

$$Q = A \sum_1^2 p \Delta v, \text{ lecz } p = \frac{p_1 v_1}{v}, \text{ a więc}$$

$$Q = A p_1 v_1 \sum_1^2 \frac{\Delta v}{v} = A p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \dots\dots\dots (41)$$

Ale $\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2}$ i $p_1 v_1 = p_2 v_2 = RT = \text{const.}$

to $Q = A p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = ART \ln \frac{v_2}{v_1}$

Wydatek ciepła jest równoważny polu (1-2-3-4) na wykresie TS (Rys. 30). Można zatem napisać:

$$Q = (s_2 - s_1) T \dots\dots\dots (42)$$

- 4) $\Delta s = \frac{\Delta Q}{T}$, wobec $T = \text{const.}$ $s_2 - s_1 = \frac{Q}{T}$, gdzie dla Q bierzemy dowolny z wyżej przytoczonych wzorów.

- 5) Ponieważ wobec $T = \text{const.}$ $\Delta Q = A \Delta L$, zatem dla pracy zewnętrznej przy tej zmianie mamy te same wzory, jak i dla pobranego ciepła

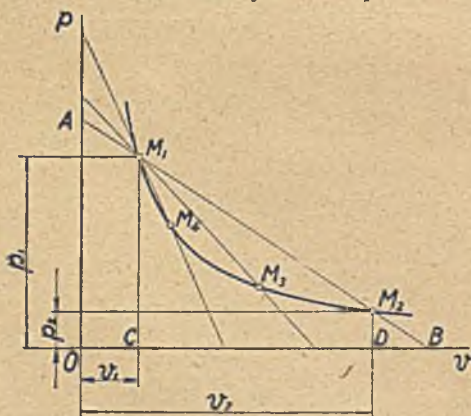
$$L = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} \dots (43)$$

Praca techniczna $L_t = L$. Pole (a-1-2-b) równe polu (1-2-c-d).

- 6) $\Delta U = 0$. 7) $p_1 v_1 = p_2 v_2 = \dots = RT = \text{const.}$
- 8) Rysunki 29 i 30 przedstawiają rozprężanie izotermiczne gazów, przy którym wszystko pobrane przez gaz ciepło idzie na pracę zewnętrzną. Po odwróceniu kierunku zmiany otrzymamy sprężanie izotermiczne, w którym kosztem wydanej pracy zewnętrznej otrzymuje się zmniejszenie objętości gazu przy jednoczesnym odbieraniu od gazu ciepła, aby temperatura się nie podnosiła.

Krzywą zwaną izotermą dla zadanej temperatury można wykreślić po obliczeniu współrzędnych pewnej

ilości punktów krzywej z równania $pv = RT$ przyjmując dowolne p lub v .



Rys. 31

Do wykreślenia izotermi mając jej jeden punkt M_1 o współrzędnych (p_1, v_1) stosuje się następujące sposoby:

I sposób. Przez punkt M_1 prowadzimy dowolną prostą AB przecinającą obie osie współrzędnych. Odmierzamy na niej $BM_2 = AM_1$ (Rys. 31) i otrzymujemy drugi punkt izotermi M_2 . Zmieniając

dowolną prostą otrzymamy dowolną ilość punktów izotermi. Dowód:

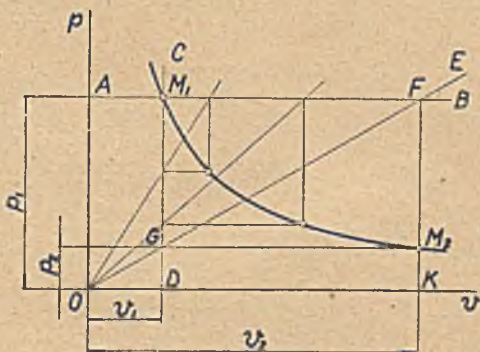
$$\triangle M_1 CB \propto \triangle M_2 DB$$

$$\frac{M_1 C}{M_2 D} = \frac{CB}{DB}, \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

2 sposób. Punkt $M_1 (v_1, p_1)$ jak poprzednio wiadomy (Rys. 32).

Prowadzimy przez M_1 dwie proste AB i CD równoległe do osi współrzędnych. Z początku układu osi współrzędnych prowadzimy dowolną prostą OE , która przecina poprzednie proste w F i G . Proste FM_2 i GM_2 równoległe do osi współrzędnych wyznaczają punkt M_2 leżący na izoterміe.



Rys. 32

Dowód

$$\triangle OFK \propto \triangle OGD; \quad \frac{FK}{GD} = \frac{OK}{OD}; \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}; \quad p_1 v_1 = p_2 v_2$$

d) Zmiana bez odpływu i dopływu ciepła (a d i a b a t y c z n a)

- 1) Warunki: $Q = 0$, p , v i T zmienne, ale tylko dwie z nich są niezależne, trzecią zawsze możemy wyliczyć, np. z równania stanu gazów.

Aby zmiana stanu gazu była adiabatyczna, naczynie, w którym zmiana się odbywa, powinno być nieprzenikliwe dla ciepła. W rzeczywistości jednak naczyń nieprzenikliwych dla ciepła nie ma. Metalowe cylindry silników cieplnych pomimo izolacji i innych środków zapobiegawczych tracą ciepło przez przewodnictwo i promieniowanie. Wobec jednak dużej ilości obrotów, jakie robią silniki cieplne, na zmianę

adiabatyczną przypada zaledwie drobny ułamek sekundy. Można więc bez większego błędu przyjąć, że w tych warunkach zmiana odbywa się bez dopływu i odpływu ciepła.

Adiabatyczną zmianę stanu charakteryzuje prawo Poissona:

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k = \dots = \boxed{pv^k = \text{const.}}, \dots \dots \dots (44)$$

gdzie $k = \frac{c_p}{c_v}$.

Inne zależności wynikające z równania Poissona:

Wiadomo, że $\frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} = \frac{T_2}{T_1}$ i z równania (44), że

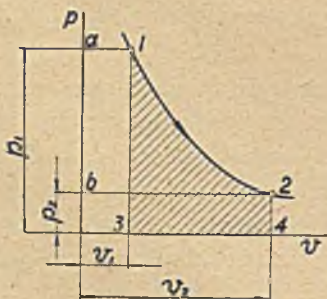
$\frac{p_1 v_1^k}{p_2 v_2^k} = 1$ Po przemnożeniu stronami obu równań otrzymujemy:

$$\frac{p_2 v_2 p_1 v_1^k}{p_1 v_1 p_2 v_2^k} = \frac{T_2}{T_1}; \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ i } \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \dots (45)$$

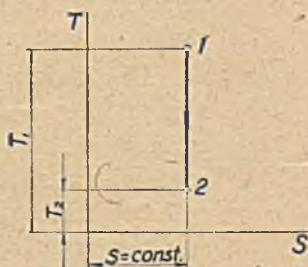
Dalej $\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}}$, a więc:

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_1}{T_2} \text{ i } \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{k}{k-1}} \dots \dots \dots (46)$$

2) Wykresy: PV (Rys. 33) i TS (Rys. 34)



Rys. 33



Rys. 34

- 3) Wydatek ciepła na zmianę: $\Delta Q = 0$
 4) Wobec $\Delta Q = 0$ i $\Delta s = 0$, zatem $s = \text{const.}$, czyli podczas zmiany adiabatycznej wartość entropii nie ulega zmianie.
 5) Uzyskana praca L jest równoważna polu (1-2-3-4) (Rys. 33) na wykresie PV .

Pracę otrzymuje się kosztem energii wewnętrznej $AL = c_v (T_1 - T_2)$.

Podstawimy zamiast $c_v = \frac{AR}{k-1}$; $T_1 = \frac{p_1 v_1}{R}$

i $T_2 = \frac{p_2 v_2}{R}$

Otrzymujemy $AL = \frac{AR}{k-1} \left(\frac{p_1 v_1}{R} - \frac{p_2 v_2}{R} \right)$, skąd

$$L = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{k-1} \dots\dots\dots (47)$$

Ponieważ nie zawsze mamy dane p_1 , v_1 , p_2 i v_2 , przeto używane bywają jeszcze inne wzory.

Wiadomo, że

$$T_1 - T_2 = T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{p_1 v_1}{R} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] =$$

$$= \frac{p_1 v_1}{R} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right]$$

$$\text{i } T_1 - T_2 = T_2 \left(\frac{T_1}{T_2} - 1 \right) = \frac{p_2 v_2}{R} \left[\left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} - 1 \right] =$$

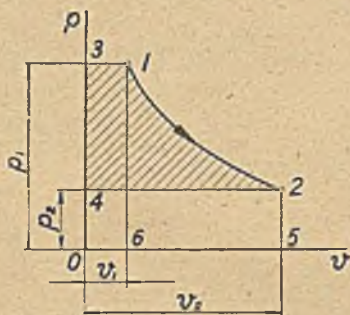
$$= \frac{p_2 v_2}{R} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Otrzymujemy następujące 4 wzory na L ze wzoru

$$L = \frac{c_v (T_1 - T_2)}{A}:$$

$$L = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{p_2 v_2}{k-1} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \dots (48)$$

$$L = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right] = \frac{p_2 v_2}{k-1} \left[\left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} - 1 \right] \dots (49)$$



Rys. 35

Przy pomocy wzoru (47) można wyprowadzić wzór na pracę techniczną L_t równoważną polu (1-2-3-4) na rys. 35.

$$(1-2-3-4) = (1-2-5-6) + (1-3-6-0) - (2-4-0-5).$$

$$L_t = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{k-1} + p_1 v_1 - p_2 v_2.$$

Po dokonaniu redukcji mamy

$$L_t = \frac{k}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2), \dots (50)$$

czyli praca techniczna przy rozprężaniu adiabatycznym jest k razy większa niż praca samego rozprężania adiabatycznego. Inny wzór na L_t otrzymaliśmy na str. 41

$$AL_t = i_1 - i_2$$

$$6) \Delta U = -A \Delta L.$$

7) Zależności między p , v i T zawierają 3 równania Poissona (44), (45) i (46).

8) Rysunki 33 i 34 przedstawiają rozprężanie adiabatyczne, przy którym gaz wydaje pracę kosztem energii wewnętrznej przy jednoczesnym spadku temperatury. Po odwróceniu kierunku zmiany otrzymamy sprężanie adiabatyczne, w którym kosztem pracy zewnętrznej otrzymuje się wzrost energii wewnętrznej gazu przy jednoczesnym wzroście temperatury.

Wykreślanie adiabaty podane jest w rozdziale o politropach.

Tablica wartości stosunków $\frac{v_2}{v_1}$ i $\frac{T_1}{T_2}$ przy rozprężaniu adiabatycznym dla danego $\frac{p_1}{p_2}$ i dla $k = 1,4$.

$\frac{p_1}{p_2}$	$\frac{v_2}{v_1}$	$\frac{T_1}{T_2}$	$\frac{p_1}{p_2}$	$\frac{v_2}{v_1}$	$\frac{T_1}{T_2}$
1,1	1,070	1,028	4	2,692	1,487
1,2	1,139	1,053	4,5	2,926	1,526
1,3	1,206	1,078	5	3,156	1,583
1,4	1,271	1,101	5,5	3,378	1,627
1,5	1,336	1,123	6	3,598	1,668
1,6	1,399	1,144	6,5	3,809	1,707
1,7	1,461	1,164	7	4,012	1,742
1,8	1,522	1,183	7,5	4,217	1,778
1,9	1,581	1,201	8	4,415	1,811
2	1,641	1,219	8,5	4,612	1,843
2,5	1,924	1,299	9	4,8	1,873
3	2,193	1,369	9,5	4,993	1,903
3,5	2,449	1,431	10	5,188	1,931

§ 25. Zmiana politropowa

W zagadnieniach technicznych doniosłą rolę odgrywają zmiany stanu wyznaczane równaniem

$$pv^m = \text{const.}$$

Zmiany te nazywać będziemy politropowymi, a krzywą zmiany — politropą.

Zmiana politropowa występuje, jeżeli przy doprowadzaniu (lub odprowadzaniu) ciepła do gazu prócz pracy zewnętrznej (dodatniej albo ujemnej) otrzymuje się wzrost (lub spadek) temperatury gazu proporcjonalny do ilości doprowadzonego ciepła,

czyli $\Delta Q = c \Delta T$. Jest to zatem zmiana o stałej wartości ciepła właściwego ($c = \text{const.}$).

W zmianie politropowej obowiązują wszystkie 3 równania Poissona (44), (45) i (46) z zamianą k na wykładnik politropy m . Również wzory na pracę i rozprężania politropowego, jak i na pracę techniczną, mają postać analogiczną.

$$\text{A więc: } L = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{m - 1} \quad \text{ i } \quad L_t = \frac{m}{m - 1} (p_1 v_1 - p_2 v_2).$$

Ilość ciepła doprowadzona do gazu podczas tej zmiany $Q = c (T_2 - T_1)$, gdzie c jest to stałe ciepło właściwe dla danej zmiany politropowej.

$$\text{Wykładnik politropy } m = \frac{c - c_p}{c - c_v}.$$

Wzór ten otrzymuje się w sposób następujący. Mamy dwa równania na ilość ciepła Q :

$$Q = c (T_2 - T_1) \quad \text{ i } \quad Q = c_v (T_2 - T_1) + AL.$$

$$\text{Ponieważ } T_1 = \frac{p_1 v_1}{R}, \quad \text{ a } \quad T_2 = \frac{p_2 v_2}{R},$$

$$\text{przeto } (c_v - c) (p_1 v_1 - p_2 v_2) = ARL$$

$$\text{Podstawimy zamiast } L = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{m - 1} \quad \text{ i po skróceniu otrzymujemy}$$

$$(c_v - c) (m - 1) = AR$$

$$\text{Lecz } AR = c_p - c_v, \quad \text{ więc } c_v - c = \frac{c_p - c_v}{m - 1}; \quad m (c_v - c) =$$

$$= c_p - c_v + c_v - c. \quad \text{ Ostatecznie } m = \frac{c_p - c}{c_v - c} = \frac{c - c_p}{c - c_v}.$$

Nadając wykładnikowi m wartości od $-\infty$ do $+\infty$, możemy wszystkie zmiany stanu gazów sprowadzić do politrop.

W szczególności adiabata jest politropą o wykładniku $m = 1,4$, a izoterma — politropą o wykładniku $m = 1$.

Wykładnik $m = 0$ odpowiada izobarze,

a $m = \pm \infty$ odpowiada izochorze.

Mając m i stosunek $\frac{c_p}{c_v} = k$, można wyliczyć c i Q :

$$mc - mc_v = c - c_p ; \quad c(m-1) = mc_v - kc_v$$

$$c = \frac{(m-k)c_v}{m-1} = \frac{c_p(m-k)}{k(m-1)}$$

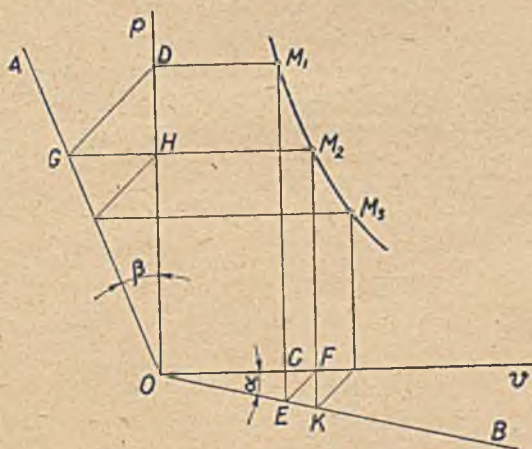
$$\text{Zatem } Q = c_v \frac{m-k}{m-1} (T_2 - T_1),$$

$$\begin{aligned} \text{albo } Q &= \frac{AR}{k-1} \frac{m-k}{m-1} \left(\frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{R} \right) = \\ &= A \frac{k-m}{k-1} \left(\frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{m-1} \right) \end{aligned}$$

$$\text{Ostatecznie } Q = \frac{k-m}{k-1} AL.$$

Entropię oblicza się według wzoru: $\Delta S = S_2 - S_1 = c \ln \frac{T_2}{T_1}$.

Wykreślanie politropy metodą Brauera (Rys. 36).



Rys. 36

Z początku układu osi współrzędnych prowadzimy dwie proste: AO pod kątem β do osi rzędnych i BO pod kątem α do osi odciętych. Kąty te są dobrane tak, że

$$1 + \operatorname{tg} \beta = (1 + \operatorname{tg} \alpha)^m.$$

Jeden z tych kątów jest dowolny, drugi otrzymuje się z powyższego równania.

Punkt $M_1 (v_1, p_1)$; $DM_1 // OV$; $EM_1 // OP$.

Z punktów D i E prowadzę dwie proste równoległe przecinające się z osiami współrzędnych pod kątem 45° . Otrzymuję punkty G i F . Równoległe do osi współrzędnych z tych punktów, czyli GM_2 i FM_2 wyznaczają punkt $M_2 (v_2, p_2)$ leżący na politropie.

To samo z punktów H i K i otrzymuję punkt M_3 itd.

Dowód.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{CE}{OC} = \frac{CF}{OC} = \frac{v_2 - v_1}{v_1}$$

Zatem $v_2 = v_1 (1 + \operatorname{tg} \alpha)$ i $v_2^m = v_1^m (1 + \operatorname{tg} \alpha)^m$

Dalej $\operatorname{tg} \beta = \frac{GH}{OH} = \frac{HD}{OH} = \frac{p_1 - p_2}{p_2}$

zatem $p_1 = p_2 (1 + \operatorname{tg} \beta)$. Po podzieleniu

$$\frac{v_2^m}{p_1} = \frac{v_1^m (1 + \operatorname{tg} \alpha)^m}{p_2 (1 + \operatorname{tg} \beta)}$$

Lecz $1 + \operatorname{tg} \beta = (1 + \operatorname{tg} \alpha)^m$, więc

$$\frac{v_2^m}{p_1} = \frac{v_1^m}{p_2}, \text{ albo } \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^m$$

A więc punkt M_2 istotnie leży na politropie.

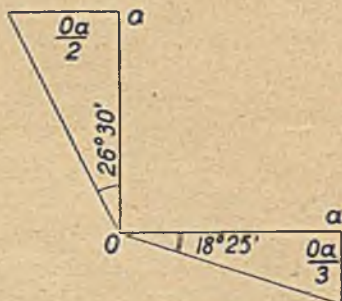
Dla adiabaty, dla której $m = k = 1,41$, jeżeli przyjąć $\alpha = 30^\circ$, to $\beta = 42^\circ$

Jeżeli wziąć $\alpha = 18^\circ 25'$, to $\beta = 26^\circ 30'$. W tym ostatnim wypadku można uniknąć kątomierza zauważywszy, że

$$\operatorname{tg} 18^\circ 25' = \frac{1}{3}$$

$$\text{a } \operatorname{tg} 26^\circ 30' = \frac{1}{2}$$

z dostateczną dla metody wykreślnej ścisłością. Otrzymujemy wtedy konstrukcję, jak na rys. 37.



Rys. 37

Do wyznaczenia wykładnika politropy, której wykres jest wiadomy, możemy użyć następujących sposobów.

- 1) Zmierzyć np. planimetrem pole przedstawiające pracę rozprężania politropowego i pole przedstawiające pracę techniczną tegoż rozprężania i ze stosunku $\frac{L_1}{L} = m$, określi się m .

- 2) Równanie danej politropy $p_1 v_1^m = p_2 v_2^m$ daje

$$\lg p_1 + m \lg v_1 = \lg p_2 + m \lg v_2$$

$$\text{Stąd } m = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg v_2 - \lg v_1}.$$

Z wykresu biorę p_1 , p_2 , v_1 i v_2 w dowolnej podziałce lecz jednakowej dla wszystkich, znajduję ich logarytmy i z powyższego równania wyliczam m .

§ 26. Dławienie

Dławieniem nazywa się przemiana termodynamiczna, w której strumień gazu przepływającego przewodem napotyka na zwężenie przewodu, w wyniku czego gaz doznaje zmniejszenia prędkości przepływu i spadku prężności. Ponieważ przy dławieniu występuje początkowa prędkość w_1 i końcowa w_2 , więc musimy uwzględnić energię kinetyczną gazu $\frac{w_1^2}{2g}$ i $\frac{w_2^2}{2g}$.

Wtedy pierwsze równanie termodynamiki ma postać:

$$Q = u_2 - u_1 + A \frac{w_2^2}{2g} - A \frac{w_1^2}{2g} + A p_2 v_2 - A p_1 v_1,$$

czyli że ciepło zostało zużyte na przyrost energii wewnętrznej, na przyrost energii kinetycznej i na pracę. Przy dławieniu jednak nie wydajemy ani nie odbieramy ciepła, zatem $Q = 0$. Wtedy

$$u_1 + A \frac{w_1^2}{2g} + A p_1 v_1 = u_2 + A \frac{w_2^2}{2g} + A p_2 v_2$$

Wprowadzając oznaczenia jak na str. 49, tj.

$u_1 + A p_1 v_1 = i_1$, a $u_2 + A p_2 v_2 = i_2$ i zauważywszy, że wyrażenia $A \frac{w_1^2}{2g}$ i $A \frac{w_2^2}{2g}$ są wielkościami, które można pominąć, są bowiem drobne i mało się różnią od siebie, otrzymamy:

$$i_1 = i_2 \dots\dots\dots (51)$$

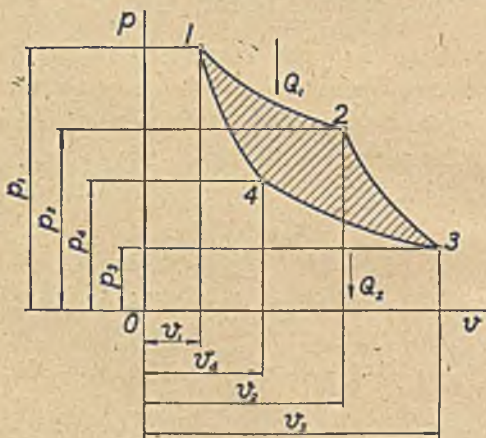
tj., że przy dławieniu wartość ciepła gazu, czyli entalpia, nie ulega zmianie.

Mając stan gazu przed dławieniem i mając stan po dławieniu można określić spadek prężności gazu przy pomocy równania (51).

§ 27. Obieg Carnota dla gazów

Po przestudiowaniu zmian stanu gazów — izotermicznej i adiabatycznej, które, jak wiadomo z § 11, wchodzi w skład obiegu Carnota, możemy wyprowadzić następujące wzory i zależności, dotyczące tego obiegu, o ile on jest wykonany przy pomocy czynnika gazowego.

Węzłowe punkty obiegu Carnota (Rys. 38)



Rys. 38

Z równania (45) zastosowanego:

$$\text{dc adiabaty (2-3)} \quad \frac{v_3}{v_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{\delta-1}}$$

do adiabaty (4-1) $\frac{v_4}{v_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{k-1}}$

Zatem $v_1 v_3 = v_2 v_4$ (52)

Po zastosowaniu do tychże adiabat równania (44) mamy:

$$\frac{v_3}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_3}\right)^{\frac{1}{k}} \text{ i } \frac{v_4}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_4}\right)^{\frac{1}{k}}, \text{ więc } p_1 p_3 = p_2 p_4 \text{ (53)}$$

Słownie: iloczyny prężności lub objętości gazu w przeciwległych punktach obiegu Carnota są sobie równe.

Zależność ta jest potrzebna przy wykreślaniu obiegu Carnota.

Dalej z równania (52) mamy* $\frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3}$ i $\frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_1}$,

czyli że: stopień rozprężania w pierwszej izotermie jest równy stopniowi sprężania w drugiej izotermie, i że stopień rozprężania w pierwszej adiabadzie jest równy stopniowi sprężania w drugiej adiabadzie.

Ciepło dostarczone do obiegu Q_1 i ciepło pochłonięte przez dolne źródło Q_2 otrzymujemy z równania (41)

$$Q_1 = ART_1 \ln \frac{v_2}{v_1}; Q_2 = ART_2 \ln \frac{v_3}{v_4} = ART_2 \ln \frac{v_2}{v_1} \text{ (54)}$$

Praca wykonana w obiegu Carnota (pole 1-2-3-4)

$$L = \frac{Q_1 - Q_2}{A} = R(T_1 - T_2) \text{ (55)}$$

Sprawność obiegu Carnota

Teoretyczna sprawność każdego silnika cieplnego $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$.

Dla obiegu Carnota podstawiając wartości dla Q_1 i Q_2 z równania (54) mamy:

$$\eta = \frac{AR(T_1 - T_2) \ln \frac{v_2}{v_1}}{ART_1 \ln \frac{v_2}{v_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

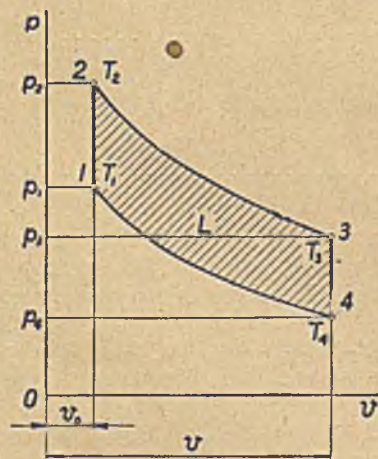
Przedstawimy η w postaci $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$. Z postaci tej widać, że aby otrzymać najwyższą sprawność, dążyć należy do podwyższenia T_1 i zmniejszenia T_2 . Przy $t_2 = -273^\circ$ otrzymujemy η max. Lecz t_2 , jako temperatura źródła dolnego, zwykle niewiele się różni od temperatury powietrza w otoczeniu lub temperatury wody używanej do chłodzenia, a te temperatury dalekie są od -273° . Również cechy wytrzymałościowe metalowych cylindrów silników kładą kres podwyższaniu temperatury górnego źródła. Zatem teoretyczna sprawność silników cieplnych jest dużo mniejsza niż 1.

§ 28. Obieg w silniku spalinowym wybuchowym

Obieg ten składa się z 2 izochor i 2 adiabat (Rys. 39).

Ciepło Q_1 zostaje doprowadzone do czynnika w punkcie 1 (v_0, p_1) przy stałej objętości, wskutek czego prężność wzrasta z p_1 do p_2 . Potem następuje rozprężanie adiabatyczne (2-3) z wydaniem pracy. Osiągamy stan 3 (v_3, p_3). Następnie odprowadzamy Q_2 ciepła przy stałej objętości v i przy spadku prężności z p_3 do p_4 . Wreszcie sprężamy czynnik do pierwotnego stanu.

Równania charakterystyczne dla tego obiegu:



Rys. 39

$$\frac{p_1}{p_4} = \left(\frac{v}{v_0}\right)^k \text{ i } \frac{p_2}{p_3} = \left(\frac{v}{v_0}\right)^k, \text{ skąd}$$

$$p_1 p_3 = p_2 p_4.$$

$$\text{Dalej } p_1 v_0 = RT_1, \quad p_3 v = RT_3,$$

$$p_2 v_0 = RT_2 \text{ i } p_4 v = RT_4$$

$$\text{Zatem } \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ i } \frac{p_3}{p_4} = \frac{T_3}{T_4} \text{ a więc}$$

$$T_1 T_3 = T_2 T_4$$

Iloczyny prężności, albo temperatur bezwzględnych w punktach przeciwległych obiegu są sobie równe.

$$\text{Ciepło } Q_1 = c_v (T_2 - T_1), \quad Q_2 = c_v (T_3 - T_4),$$

$$\text{Praca } AL = Q_1 - Q_2 = c_v (T_2 - T_1 - T_3 + T_4).$$

Sprawność

$$\begin{aligned} \eta = \frac{AL}{Q_1} &= \frac{T_2 - T_1 - T_3 + T_4}{T_2 - T_1} = 1 - \frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1} = \\ &= 1 - \frac{T_3 (1 - \frac{T_4}{T_3})}{T_2 (1 - \frac{T_1}{T_2})} = 1 - \frac{T_3}{T_2} \end{aligned}$$

$$\text{Lecz } \frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{v_0}{v}\right)^{k-1} \text{ z równ. (45), również } \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$$

$$\text{ i } \frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{p_4}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\text{Ostatecznie } \eta = 1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^{k-1} \text{ albo } \eta = 1 - \left(\frac{p_4}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Stąd widać, że w powyższym obiegu zamiana ciepła na pracę jest tym korzystniejsza, im mniejszy jest stosunek v_0 — przestrzeni dawkowej, do v — przestrzeni przedstawiającej objętość cylindra wraz z przestrzenią dawkową lub im mniejsza jest początkowa, a większą końcowa prężność sprężania.

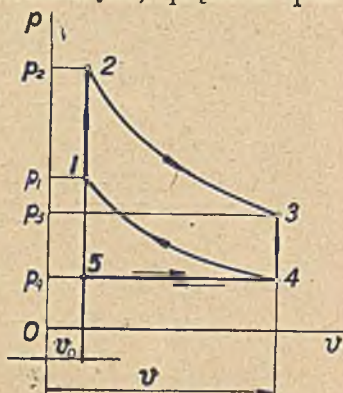
Odwrotność $\frac{v_0}{v}$, czyli $\frac{v}{v_0}$ nazywa się współczynnikiem sprężania ϵ , który bywa od 3,5 do 15. Zwykle dla silników benzynowych $\epsilon = 4 \div 6$, dla gazowych $6 \div 7$.

Według tego obiegu pracuje silnik spalinowy wybuchowy.

W martwym punkcie tłoka (1) (Rys. 40) przestrzeń dawkowa v_0 jest wypełniona mieszaniną wybuchową o prężności p_1 . Pod wpływem iskry następuje raptowny wybuch mieszaniny prawie przy stałej objętości i prężność wzrasta do p_2 ; potem odbywa się rozprężanie spalin, objętość powiększa się do v , a prężność spada do p_3 . W przeciwległym martwym punkcie otwiera się zawór wy-

pustowy, przez który spaliny ulatują na zewnątrz, i prężność spada do p_4 . Następnie tłok wraca, zawór wypustowy zostaje zamknięty, a mieszanina, którą już cylinder został wypełniony, spręża się do prężności początkowej p_1 . Obieg zostaje zamknięty w ciągu dwóch suwów tłoka: 1-2-3 ruch wprost i 3-4-1 ruch powrotny.

Silniki spalinowe wybuchowe bywają również czterosurowe, pracujące wg schematu, jak na rys. 40.

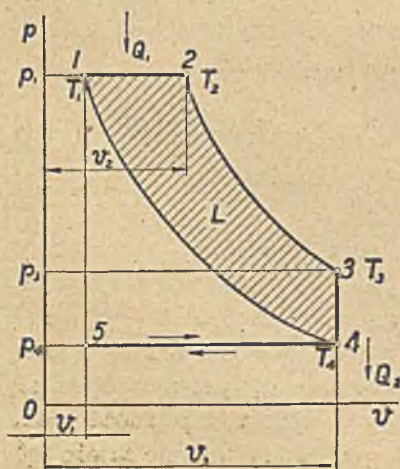


Rys. 40

- 1 suw 5-4 zasysanie mieszanki (gaz i powietrze)
- 2 „ 4-1 sprężenie i 1-2 wybuch,
- 3 „ 2-3 rozprężenie i 3-4 wylot i
- 4 „ 4-5 wypychanie spalin.

§ 29. Obieg w silniku spalinowym Diesla

Obieg ten składa się z izobary, dwóch adiabat i izochory (Rys. 41).



Q_1 ciepła doprowadzamy przy stałej prężności p_1 , wskutek czego objętość czynnika wzrasta z v_1 do v_2 . Następuje rozprężanie adiabatyczne, przy którym prężność spada z p_2 do p_3 . Odprowadzenie ciepła Q_2 odbywa się przy stałej objętości v_3 i spadku prężności do p_4 . Wreszcie czynnik zostaje sprężony adiabatycznie do stanu pierwotnego (1).

Rys. 41

Ciepło doprowadzone $Q_1 = c_p (T_2 - T_1)$,

Ciepło oddane $Q_2 = c_v (T_3 - T_4)$,

Praca uzyskana $AL = Q_1 - Q_2$,

Sprawność $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ albo

$$\eta = 1 - \frac{c_v (T_3 - T_4)}{c_p (T_2 - T_1)} = 1 - \frac{1}{k} \frac{T_4 \left(\frac{T_3}{T_4} - 1 \right)}{T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)};$$

Lecz dla adiabaty 4—1 $\frac{T_1}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_1} \right)^{k-1}$

„ 2—3 $\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_3} \right)^{k-1}$

i dla izobary 1—2 $\frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v_1};$

Mnożąc te trzy równania otrzymamy

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_3} \right)^{k-1} \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k, \text{ a że } v_3 = v_4,$$

$$\text{zatem } \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k.$$

$$\text{Ostatecznie } \eta = 1 - \frac{1}{k} \left(\frac{v_1}{v_4} \right)^{k-1} \frac{\left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k - 1}{\frac{v_2}{v_1} - 1},$$

skąd widać, że w silniku Diesla sprawność zależy nie tylko od stosunku przestrzeni dawkowej do objętości cylindra $\frac{v_1}{v_4}$, jak w silniku wybuchowym, lecz również i od stosunku $\frac{v_2}{v_1}$. Spół-

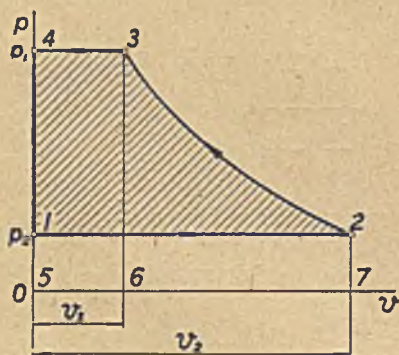
czynnik sprężania $\varepsilon = \frac{v_3}{v_1}$ w tych silnikach waha się w granicach $12 \div 16$, stosunek zaś $\frac{v_2}{v_1} = \varphi = 1 \div 5$ zwykle nie przekracza 3.

W czterosurowym silniku Diesla przytoczony obieg wykonany jest w sposób następujący. Suw pierwszy (5-4) (Rys. 41) — zasysanie powietrza, suw drugi (4-1) — adiabatyczne sprężanie powietrza. W martwym położeniu tłoka (1) doprowadza się z zewnątrz paliwo płynne rozpylone, które zetknąwszy się z powietrzem sprężonym, a przez to mającym odpowiednio wysoką temperaturę, zapala się i spala przy stałej prężności na drodze (1-2). Dalszy ciąg ruchu tłoka (2-3) przedstawia adiabatyczne rozprężanie spalin w cylindrze silnika. W drugim martwym położeniu tłoka otwiera się zawór wypustowy i spaliny przy stałej objętości na drodze (3-4) wyrównują swą prężność z atmosferą. Jest to suw trzeci (1-2, 2-3 i 3-4). Wreszcie na drodze (4-5) stanowiącej suw czwarty spaliny zostają usunięte na zewnątrz.

§ 30. Obieg w sprężarce gazowej

Sprężanie gazów znajduje coraz częstsze zastosowanie w technice. Cały szereg narzędzi zwanych pneumatycznymi, jak młoty, wiertła, świdry jest napędzany sprężonym powietrzem, także powietrze porusza wozy lub lokomotywy górnicze, służy do rozpylania paliwa płynnego w paleniskach kotłów lub w silnikach spalinowych, sprężanie gazów jest stosowane w urządzeniach chłodniczych itd. Do sprężania gazów najczęściej są używane sprężarki (kompresory) tłokowe napędzane przy pomocy mechanizmu korbowego i silnika.

Obieg w sprężarce gazowej jest obiegiem odwróconym.



Rys. 42

Rozpatrzmy obieg w sprężarce powietrznej tłokowej (Rys. 42) Powietrze zewnętrzne jest zasysane przy ruchu tłoka naprzód (1-2), następnie jest sprężane adiabatycznie lub izotermicznie przy powrotnym ruchu tłoka (2-3), a po osiągnięciu potrzebnej prężności (p_3) albo wypychane do zbiornika, albo skierowane do miejsca zapotrzebowania. W obu wypadkach prężność gazu podczas pozostałego ruchu tłoka pozostaje stałą (3-4). Po osiągnięciu martwego punktu (4) następuje odcięcie sprężarki przy pomocy kłapy od zbiornika czy sieci przewodów ze sprężonym powietrzem i połączenie z atmosferą (4-1).

Praca L zużyta na zasysanie, sprężanie i wypychanie 1 kg powietrza mierzy się polem figury 1-2-3-4-1, w skład której wchodzi:

$$\begin{array}{r} \text{praca sprężania } L_1 \dots \text{ pole 2-3-6-7 } + \\ + \text{ praca wypychania } L_3 \text{ pole 3-4-5-6 } - \\ - \text{ praca zasysania } L_2 \dots \text{ pole 1-2-7-5} \\ \hline \text{Razem } L = L_1 + L_3 - L_2 \end{array}$$

a) Sprężanie a d i a b a t y c z n e.

Praca $L = L_1 + L_3 - L_2$ równoważna polu 1-2-3-4 jest pracą techniczną, dla której przy zmianie adiabatycznej otrzymaliśmy wzór (50). W zastosowaniu do rys. 42 mamy:

$$L = L_t = \frac{k}{k-1} (p_3 v_3 - p_2 v_2),$$

czyli całkowita praca na sprężanie 1 kg powietrza w sprężarce o sprężaniu adiabatycznym jest k razy większa niż praca samego adiabatycznego sprężania.

Z powyższego równania wypada, że

$$L = \frac{k}{k-1} p_2 v_2 \left(\frac{p_3 v_3}{p_2 v_2} - 1 \right),$$

$$\text{lecz } \frac{v_3}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{1}{k}}, \text{ zatem } \frac{p_3 v_3}{p_2 v_2} = \frac{p_3 p_2^{\frac{1}{k}}}{p_2 p_3^{\frac{1}{k}}} = \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Otrzymujemy wzór wolny od v_3

$$L = \frac{k}{k-1} p_2 v_2 \left[\left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right].$$

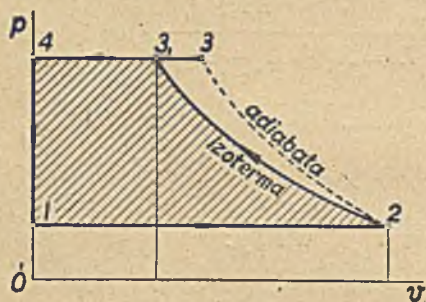
Ponieważ 1 kg zassanego powietrza zajmuje objętość v_2 , więc praca sprężarki adiabatycznej, sprowadzona do 1 m³ zasysanego gazu:

$$L_{1m} = \frac{k}{k-1} p_2 \left[\left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right].$$

b) Sprężanie izotermiczne.

Jeżeli sprężanie gazu odbywa się nie adiabatycznie, lecz izotermicznie (Rys. 43), to

$$L = L_{izot.} = p_2 v_2 \ln \frac{p_3}{p_2}, \text{ gdyż } L_3 - L_2 = p_3 v_3 - p_2 v_2 = 0.$$



Rys. 43

Z wykresu widać, że pracy zewnętrznej na sprężanie 1 kg powietrza izotermicznie mniej się zużywa. W rzeczywistości jednak sprężanie izotermiczne mogłoby być osiągnięte tylko przy ruchach tłoka dostatecznie wolnych, co jest niewykonalne. Również niewykonalne jest sprężanie ści-

śle adiabatyczne. W sprężarkach więc sprężanie odbywa się wzdłuż politropy o wykładniku $m = 1,2 \div 1,25$.

Aby jednak zaoszczędzić na pracy sprężarki, zbliżamy się do sprężania izotermicznego chłodząc sprężany gaz wodą, która pochłania powstające przy sprężaniu ciepło i podtrzymuje temperaturę gazu możliwie jednostajną.

Ciepło, które należy odprowadzić przy sprężaniu izotermicznym $Q = AL$. Ilość wody w litrach do odprowadzenia ciepła

$$w = \frac{AL}{t - t_0}, \text{ gdzie } t_0 \text{ początkowa temperatura wody, a } t \text{ — końcowa.}$$

III. PARA JAKO CZYNNIK TERMODYNAMICZNY

Para — czynnik termodynamiczny w grupie silników parowych tłokowych i turbin parowych — mimo iż na równi z gazami przedstawia ciało o najmniej-zym skupieniu cząsteczek, różni się jednak od gazów pod wielu względami. Różnica ta wypływa głównie z tego, że para zwykle występuje w silnikach cieplnych w dwóch stanach skupienia — ciekłym i gazowym, przy czym stan gazowy jest niezbyt daleki od przejścia do stanu ciekłego, a nawet często oba te stany znajdują się obok siebie, podczas gdy techniczne gazy występują w silnikach w stanie bardzo odległym od stanu większego skupienia.

§ 31. Para nasycona

Wrzenie

Stopniowe podwyższanie temperatury cieczy przy niezmiennym ciśnieniu na ciecz doprowadza ją do wrzenia. Wrzenie jest to parowanie zachodzące w całej masie cieczy. Doświadczenie wykazuje, że temperatura cieczy podczas wrzenia, czyli temperatura wrzenia i ciśnienie na ciecz są ze sobą ściśle związane, czyli że każdemu ciśnieniu na ciecz odpowiada inna temperatura wrzenia. Np. woda pod ciśnieniem $p = 1$ ata ma temperaturę wrzenia $t = 99,1^{\circ}$, przy $p = 10$ ata $t = 179^{\circ}$, przy $p = 150$ ata $t = 340,5^{\circ}$ itd. Jeżeli ogrzewamy wodę w naczyniu, w którym wytworzona została częściowa próżnia, czyli ciśnienie na ciecz zostało zmniejszone, to i wrzenie następuje przy temperaturze niższej, np. przy $p = 0,5$ ata $t = 80,9^{\circ}$, przy $p = 0,02$ ata $t = 17,1^{\circ}$. Tablica pary wodnej umieszczona na str. 83 zawiera temperatury wrzenia wody odpowiadające ciśnieniom na wodę od $p = 0,02$.

do $p = 225$ ata, zaś wykresy podane na str. 80 zawierają krzywe zmienności temperatury wrzenia wody w zależności od ciśnienia.

Dalej stwierdzono doświadczalnie, że wytwarzająca się podczas wrzenia para ma prężność równą ciśnieniu na ciecz i że temperatura pary jest równa temperaturze wrzenia. Dopóki wszystka ciecz nie wyparuje, nie podobna podwyższyć jej temperatury ponad temperaturę wrzenia i bardziej intensywne doprowadzanie ciepła do cieczy nie wpłynie ani na podwyższenie temperatury cieczy czy pary, ani na podwyższenie prężności pary, jedynie wpłynie na szybkość zmiany stanu skupienia cząsteczek cieczy — ze stanu ciekłego na gazowy.

Ponieważ podczas parowania objętość pary wzrasta, prężność zaś i temperatura pozostają stałe, stąd wynika, że dla pary nasyconej równanie postaci $f(p, v, t) = 0$, czyli równanie stanu, nie istnieje.

Podczas wrzenia cieczy oba stany — ciekły i gazowy — są obok siebie w równowadze. Będziemy nazywali parę znajdującą się w równowadze z cieczą, z której para się tworzy, parą nasyconą. Z chwilą, kiedy ostatnia cząsteczka cieczy zostanie zamieniona na parę i jednocześnie ustanie dopływ ciepła, otrzymamy parę, którą będziemy nazywali parą nasyconą suchą.

O ile po odparowaniu cieczy dopływ ciepła nie ustanie, to temperatura pary będzie wzrastała powyżej temperatury wrzenia. Para, której temperatura przy stałej prężności albo stałej objętości jest wyższa niż temperatura pary nasyconej, nazywa się parą przegrzaną.

Odwrotnie, jeżeli parze suchej nasyconej będziemy odbierali ciepło przy stałym ciśnieniu zewnętrznym, to rozpocznie się skraplanie pary przy niezmienniej temperaturze i prężności pary, dopóki ostatnia cząsteczka pary nie zostanie skroplona. Dalsze odbieranie ciepła pociągnie za sobą spadek temperatury cieczy.

Objętość pary nasyconej

1 kg pary suchej nasyconej posiada objętość właściwą v'' m³/kg ściśle określoną, uzależnioną od prężności pary. Ze wzro-

stem prężności pary suchej nasyconej jej objętość właściwa szybko maleje. Odwrotność objętości właściwej, czyli ciężar właściwy γ'' kg/m³, tj. ciężar 1 m³ pary suchej nasyconej, wzrasta wraz ze wzrostem prężności pary.

Para nasycona przed osiągnięciem stanu pary nasyconej suchej, czyli przed wyparowaniem całego kilograma cieczy, zawsze jest w zetknięciu z wrzącą cieczą i zawsze zawiera rozpyloną ciecz, która jeszcze nie wyparowała. W technice przyjęto nazywać taką parę, parą wilgotną albo mokrą, w przeciwstawieniu do pary nasyconej suchej. Objętość właściwą pary mokrej nazywamy v , jest ona mniejsza od v'' , gdyż ciecz w niej zawarta ma objętość dużo mniejszą niż para. Objętość właściwą samej cieczy nazwiemy v' . Oczywiście $v' < v < v''$.

U w a g a . Wszelkie oznaczenia dotyczące się cieczy będą zaopatrzone w indeks ', dotyczące się pary suchej nasyconej — w indeks'', a dotyczące się pary mokrej — bez indeksu.

Jeżeli w 1 kg pary mokrej znajduje się x kg pary suchej nasyconej i $(1 - x)$ kg cieczy, to liczbę x będziemy nazywali stopniem suchości pary albo suchością pary. Wtedy liczba $(1 - x)$ byłaby miarą wilgotności pary. Oczywiście dla pary mokrej $x < 1$ dla pary nasyconej suchej $x = 1$, a dla samej cieczy $x = 0$.

Mając v , v' i v'' można wyliczyć x . Z określenia suchości mamy: $v = v'(1 - x) + v''x$ albo $v = v' + x(v'' - v')$, skąd

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} \dots \dots \dots (56)$$

Przy korzystaniu z tego wzoru przy parze wodnej objętość właściwą wody można brać $v' = 0,001$ m³ bez względu na temperaturę wody. Obliczenia dokładne wymagają uwzględnienia rozszerzalności wody.

Wartość cieplna (entalpia)

Aby ogrzać 1 kg cieczy o temperaturze t^0 do temperatury wrzenia t^0 , musimy wydać i' Kal. Liczbę i' będziemy nazywali wartością cieplną cieczy albo entalpią cieczy. Ciepło to idzie na podwyższenie temperatury cieczy, a więc na powiększenie zapasu jej energii wewnętrznej, na pracę zewnętrzną powiększania objętości cieczy przy ogrzewaniu i w znikomej ilości na pracę

doprowadzenia ciśnienia na ciecze do prężności parowania, czyli na tzw. pompowanie cieczy, o ile chodzi o stałe wytwarzanie pary np. w kotle parowym.

Przy mniejszych prężnościach ciepło wydane na pracę jest tak małe, że $i' = ct$, a wobec $c = 1$, $i' = t$. W miarę wzrostu prężności i' jest większe od t .

Aby z cieczy ogrzanej już do temperatury wrzenia otrzymać parę suchą nasyconą, należy w dalszym ciągu doprowadzać ciepło w ilości r Kal/kg, zwane całkowitym ciepłem parowania. Ciepło to zostaje zużyte w dwóch kierunkach. Większa część tego ciepła idzie na powiększenie energii wewnętrznej potrzebnej do zmiany ugrupowania cząsteczek przy zamianie cieczy na parę, czyli na zmianę stanu skupienia. Tę część całkowitego ciepła parowania będziemy nazywali wewnętrznym ciepłem parowania i oznaczali przez q . Pozostała część całkowitego ciepła parowania — zewnętrzne ciepło parowania — idzie na wykonanie pracy niezbędnej przy powiększaniu objętości 1 kg cieczy (v') na objętość 1 kg pary suchej nasyconej (v'') o tej samej temperaturze i prężności. Zewnętrzne ciepło parowania równa się $Ap(v'' - v')$. Stąd $r = q + Ap(v'' - v')$ (57)

Jeżeli mamy zatem 1 kg cieczy o temperaturze 0° i pragniemy go zamienić na 1 kg pary suchej nasyconej żądanej prężności, to należy wydać ciepła $\boxed{i'' = i' + r}$ (58)

Tę ilość ciepła i'' nazywamy będziemy wartością cieplną albo entalpią pary nasyconej suchej.

Jeżeli mamy do czynienia z parą nasyconą mokrą o zawartości x kg pary suchej w 1 kg pary mokrej, to ponieważ tym razem z 1 kg cieczy zamieniono na parę suchą tylko x kg, więc całkowite ciepło parowania takiej pary wynosi rx i entalpia (wartość cieplna) pary mokrej, którą oznaczать będziemy przez i , wyniesie

$$\boxed{i = i' + rx}$$
 (59)

Energia wewnętrzna

Energią wewnętrzną 1 kg pary suchej nasyconej będziemy nazywali u'' . Składa się ona z energii wewnętrznej cieczy u' i z wewnętrznego ciepła parowania q .

$$\text{Zatem} \quad u'' = u' + q \dots\dots\dots (60)$$

Przy mniejszych prężnościach $u' = i'$, przy większych nieco mniejsze.

Energia wewnętrzna 1 kg pary nasyconej mokrej jest

$$u = u' + q x = u'' - q (1 - x).$$

E n t r o p i a

Z równania (12) mamy $\Delta s = \frac{\Delta Q}{T}$. Dla cieczy $\Delta Q = c \Delta T$.

A więc $\Delta s = \frac{c \Delta T}{T}$. Wyrażenie to w granicach temperatur

od 0° do t° , czyli od 273° do T , równa się (por. równ. 38)

$$s'_t - s'_0 = c \ln \frac{T}{273},$$

gdzie s'_t i s'_0 są to entropie cieczy (dlatego indeks') przy temperaturach t° i 0° względem pewnego stanu początkowego. Tym stanem początkowym, od którego będziemy obliczali przyrosty entropii cieczy czy pary, będzie temperatura 0° . Zatem zakładając, że entropia cieczy przy temperaturze 0° $s'_0 = 0$ i że ciepło właściwe cieczy c można uważać za stałe, o ile chodzi o przeciętne zagadnienia techniczne, otrzymujemy wzór do obliczenia entropii cieczy

$$s' = c \ln \frac{T}{273^\circ} \dots\dots\dots (61)$$

Ponieważ podczas parowania temperatura T pozostaje stałą, przeto nazywając entropię pary nasyconej suchej s'' , mamy:

$$s'' = s' + \frac{r}{T} \dots\dots\dots (62)$$

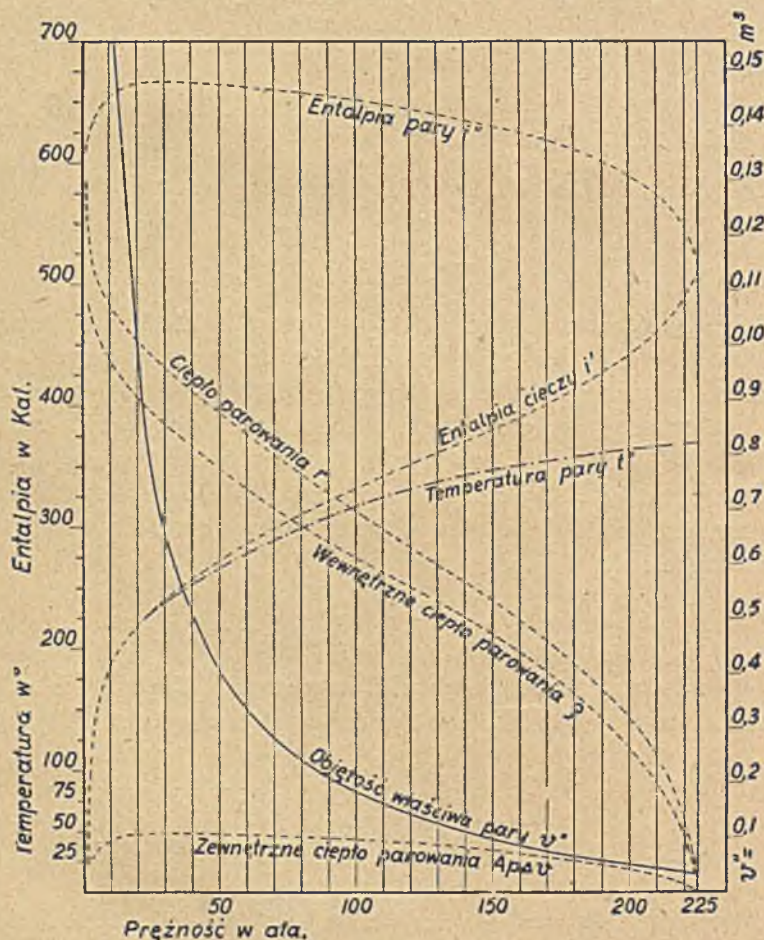
Dla pary nasyconej mokrej o suchości x piszemy:

$$s = s' + x \frac{r}{T} = s'' x + s' (1 - x) \dots\dots\dots (63)$$

Tablice pary

Dla użytku praktycznego opracowane są przez fizyków Zeu-nera i Moliera i innych tablice zawierające dane co do prężności, temperatury, objętości właściwej, ciężaru właściwego pary suchej

*Wykres zmienności entalpii, ciepła parowania,
temperatury i objętości pary suchej nasyconej.*



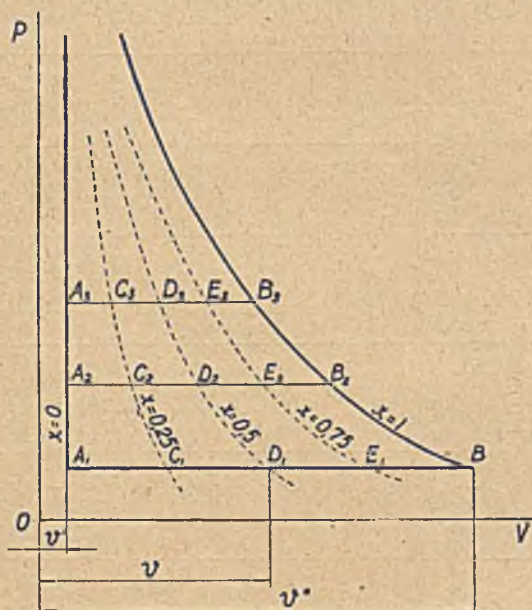
nasyconej. W tablicach tych podane są też wartości cieplne wody i pary, energia wewnętrzna pary nasyconej suchej, ciepło parowania — całkowite, wewnętrzne i zewnętrzne i entropia cieczy i pary. Dane z tych tablic są zdobyte doświadczalnie lub ze wzorów empirycznych i stale są kontrolowane i uzupełniane (str. 82 i 83).

Na podstawie tych tablic opracowany został wykres zmienności entalpii, temperatury, objętości właściwej i ciepła parowania dla pary wodnej w zależności od temperatury, z którego w sposób bardzo przejrzysty widać, jaki przebieg mają zmiany w tych wielkościach przy wzroście prężności pary do 225 ata (str. 80).

§ 32. Wykresy parowania

Zjawisko parowania może być przedstawione na wykresie PV (Rys. 44).

Oznaczamy na osi V objętość 1 kg wody (v'). Objętość ta pozostaje prawie bez zmiany przy ogrzewaniu wody. Niech A ,



Rys. 44

Tablica pary wodnej nasyconej

Energia wewnętrzna wody $Kal/kg \cdot u' = u'' - q$; Entropia $\frac{Kal}{kg}$ pary nasyconej w/m wody o temp. wrzenia $\frac{T}{T} = s'' - s'$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Prężność (abs) kg/cm^2	Tempera- tura nasyconia	Objęt. właś- ciwa pary m^3/kg	Ciepł. właś- ciwa pary kg/m^3	Entalpia kal/kg		Energia wewn. pary kal/kg	Ciepło parowania Kal/kg			Entropia $\frac{Kal}{kg}$	
p	t^0	v''	γ''	wody	pary		całkowite $i'' - i'$	wewn.	zewn.	wody	pary
p	t^0	v''	γ''	i'	i''	u''	r	q	$\Delta p \Delta v$	s'	s''
0,02	17,1	68,25	0,01465	17,1	604,4	572,4	587,3	555,3	31,97	0,0607	2,0852
0,05	32,5	28,71	0,03483	32,5	611,0	577,4	578,5	544,9	33,62	0,1123	2,0059
0,10	45,4	14,94	0,06693	45,4	616,6	581,6	571,2	536,2	34,99	0,1537	1,9477
0,20	59,7	7,794	0,12830	59,6	622,8	586,3	563,2	526,7	36,50	0,1974	1,8902
0,50	80,9	3,302	0,30285	80,9	631,6	592,9	550,7	512,0	38,66	0,2593	1,8154
0,80	93,0	2,128	0,46992	93,0	636,5	596,6	543,5	503,6	39,85	0,2931	1,7781
1,0	99,1	1,727	0,57904	99,2	638,9	598,5	539,7	499,3	40,42	0,3097	1,7601
1,2	104,2	1,466	0,68681	104,3	640,9	600,0	536,6	495,7	40,89	0,3236	1,7462
1,4	108,7	1,261	0,79302	108,8	642,6	601,3	533,8	492,5	41,30	0,3354	1,7339
1,5	110,8	1,182	0,84602	110,9	643,4	601,9	532,5	491,0	41,49	0,3408	1,7282
1,6	112,7	1,113	0,89847	112,9	644,1	602,4	531,2	489,5	41,65	0,3460	1,7232
1,8	116,3	0,997	1,00301	116,5	645,4	603,4	528,9	486,9	41,96	0,3554	1,7140
2,0	119,6	0,903	1,07420	119,8	646,6	604,3	526,8	484,5	42,25	0,3638	1,7056
2,5	126,8	0,7339	1,36258	127,1 ₅	649,1	606,2	521,95	479,15	42,84	0,38205	1,6876
3,0	132,9	0,6176	1,61917	133,4	651,2	607,8	517,8	474,5	43,32	0,3975	1,6732
3,5	138,2	0,5349	1,86951	138,7 ₅	652,9	609,1	514,15	470,45	43,725	0,4108	1,66115
4,0	142,9	0,4714	2,12134	143,6	654,4	610,2	510,8	466,7	44,06	0,4224	1,6506
4,5	147,2	0,4220	2,36967	148,0	655,7	611,2	507,7	463,3	44,36	0,4330	1,6412
5,0	151,1	0,3822	2,61643	152,0	656,9	612,1	504,9	460,2	44,63	0,4424	1,6329

5,5	154,7	0,3494	2,86205	155,7	657,9	612,9	502,2	457,3	44,86	0,4511	1,6253
6,0	158,1	0,3219	3,10655	159,2	658,8	613,6	499,6	454,5	45,07	0,4592	1,6181
6,5	161,2	0,2984	3,35121	162,4	659,7	614,3	497,3	452,1	45,26	0,4667	1,6120
7,0	164,2	0,2782	3,59454	165,5	660,5	614,9	495,0	449,6	45,43	0,4737	1,6059
7,5	167,0	0,2607	3,83583	168,5	661,2	615,4	492,7	447,1	45,59	0,4803	1,6001
8,0	169,6	0,2452	4,07830	171,2	661,8	615,9	490,6	444,9	45,73	0,4865	1,5949
8,5	172,1	0,2315	4,31965	173,8	662,4	616,3	488,6	442,7	45,86	0,4924	1,5901
9,0	174,5	0,2193	4,55996	176,3	662,9	616,7	486,6	440,6	45,99	0,4980	1,5854
9,5	176,8	0,2083	4,80077	178,7	663,5	617,1	484,8	438,6	46,10	0,5033	1,5811
10	179,0	0,1984	5,04032	181,0	663,9	617,4	482,9	436,7	46,21	0,5085	1,5769
11	183,2	0,1812	5,51876	185,4	664,8	618,1	479,4	433,0	46,38	0,5181	1,5689
12	187,1	0,1667	5,99880	189,6	665,5	618,7	475,9	429,4	46,52	0,5270	1,5613
13	190,7	0,1543	6,48088	193,4	666,2	619,2	472,8	426,1	46,64	0,5353	1,5549
14	194,1	0,1437	6,95894	197,0	666,8	619,6	469,8	423,0	46,74	0,5430	1,5488
15	197,4	0,1345	7,43494	200,6	667,3	620,1	466,7	419,9	46,83	0,5504	1,5425
18	206,2	0,1127	8,87311	210,1	668,4	620,9	458,3	411,3	47,01	0,5702	1,5266
20	211,4	0,1017	9,83284	215,7	669,0	621,4	453,3	406,3	47,08	0,5819	1,5177
25	222,9	0,0818	12,2249	228,35	669,8	621,95	441,45	394,3	47,10	0,6073	1,4975
30	232,8	0,0681	14,6843	239,4	670,0	622,1	430,6	383,6	46,99	0,6292	1,4805
35	241,4	0,0584	17,1424	249,25	669,75	621,95	420,5	373,7	46,765	0,64815	1,46555
40	249,2	0,05085	19,6657	258,2	669,2	621,6	411,0	364,6	46,47	0,6652	1,4522
50	262,7	0,04029	24,8201	274,1	667,4	620,2	393,3	347,6	45,68	0,6947	1,4289
75	289,2	0,02584	38,6997	307,0	660,5	615,1	353,5	310,5	43,00	0,7533	1,3821
100	309,5	0,01840	54,3478	334,4	651,2	608,1	316,8	277,1	39,71	0,7995	1,3434
150	340,5	0,01058	94,5180	383,9	625,9	588,7	242,0	210,6	31,39	0,8793	1,2738
200	364,0	0,00594	168,350	442,3	582,9	555,1	140,6	122,1	18,54	0,9696	1,1903
225	374,0	0,00310	322,581	515,5	515,5	499,1	0	0	0	1,0817	1,0817

oznacza stan 1 kg wody o temperaturze wrzenia przy ciśnieniu 1 ata. Pozostawiamy ciśnienie bez zmiany nie przerywając dopływu ciepła. Rozpocznie się parowanie przy 1 ata i objętość otrzymywanej pary będzie wzrastała. Nastąpi wyparowanie całego kg wody. Punkt B_1 przedstawia stan pary suchej nasyconej o prężności 1 ata, a prosta $A_1 B_1$ — przebieg parowania 1 kg wody od $x = 0$ w punkcie A_1 do $x = 1$ w punkcie B_1 . Podzielmy prostą $A_1 B_1$ na 4 części równe. Wtedy punkt C_1 będzie odpowiadał stanowi pary nasyconej po wyparowaniu $\frac{1}{4}$ kg wody, punkt D_1 — $\frac{1}{2}$ kg, punkt E_1 — $\frac{3}{4}$ kg, czyli w punktach $C_1 D_1$ i $E_1 x$ będnie 0,25, 0,5, 0,75.

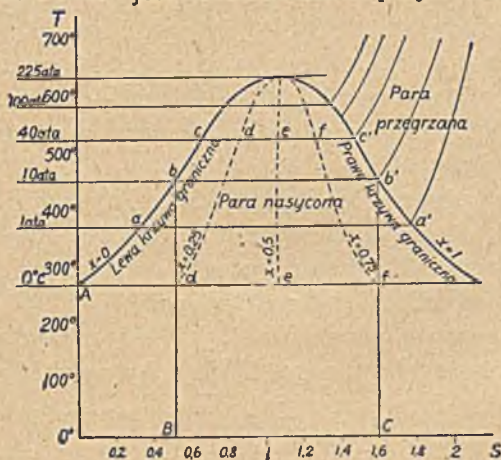
Podobnie proste $A_2 B_2$, $A_3 B_3$ itd. przedstawiają przebieg parowania przy innych prężnościach, coraz wyższych, a punkty C_2 , D_2 i C_3 , D_3 itd. stany o wymienionych wyżej stopniach suchości. Łącząc krzywymi punkty odpowiadające stanom o jednakowym stopniu suchości otrzymujemy krzywe stałej suchości: $C_1 C_3$ dla $x = 0,25$; $D_1 D_3$ dla $x = 0,5$ itd.

Linia $A_1 A_2 A_3$ odpowiada stanom wody ogrzanej do temperatury wrzenia przy różnych ciśnieniach i nazywa się lewą krzywą graniczną, zaś krzywa $B_1 B_2 B_3$ odpowiada stanom pary suchej nasyconej o różnych prężnościach i nazywa się prawą krzywą graniczną. Obszar między krzywymi granicznymi odpowiada parze nasyconej mokrej, obszar zaś na prawo od prawej krzywej granicznej odpowiada parze przegrzanej, między zaś osią prężności i lewą krzywą graniczną znajduje się obszar cieczy.

Wykres parowania na osiach TS

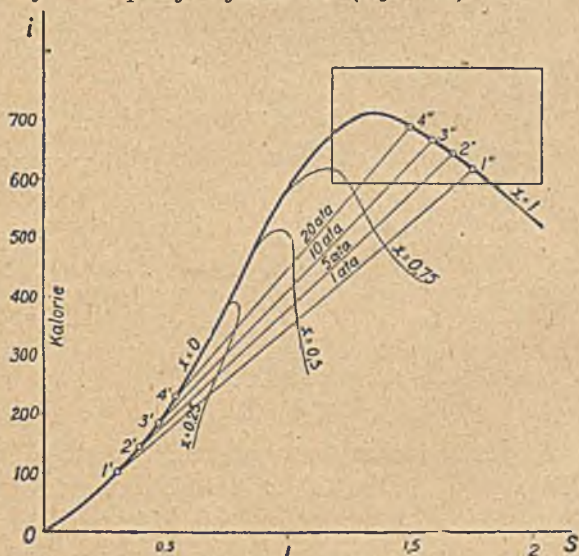
Częściej bywa używany wykres parowania TS . Woda o temperaturze 0° ($s = 0$, $T = 273^\circ$) punkt A . Krzywa $Aabc$ przedstawia wodę o temperaturze wrzenia przy różnych ciśnieniach: 1 ata ($s = 0,31$, $T = 373^\circ$), 10 ata ($s = 0,51$, $T = 452^\circ$), 40 ata ($s = 0,67$, $T = 522^\circ$) itd. Proste aa' , bb' , cc' przedstawiają przebieg parowania, podczas którego temperatura jest stała, a entropia rośnie. Krzywa $a'b'c'$ jest prawą krzywą graniczną $x = 1$, para sucha nasycona. Krzywe dd , ee , ff — krzywe stałej suchości: $x = 0,25$; $x = 0,5$; $x = 0,75$.

Pole $Bbb'C$ jest miarą ciepła parowania przy $p = 10$ ata. Podobnie pole $OAbB$ jest równoważne i' przy 10 ata.



Rys. 45

W zagadnieniach dotyczących silników parowych najczęściej jest używany entropowy wykres iS (Rys. 46). Na osi rzędnych



Rys. 46

odmierza się entalpię (i), a na osi odciętych — entropię (s). Punkty $1', 2', 3', 4'$ oznaczają entalpie i entropie wody o temperaturze wrzenia, zaś punkty $1'', 2'', 3'', 4''$ entalpie i entropie pary suchej nasyconej odpowiadające różnym prężnościom. Przebieg parowania otrzymamy łącząc punkty $1' - 1'', 2' - 2''$ itd. prostymi. Dzielimy te proste na równe części, łączymy otrzymane punkty krzywymi stałej suchości.

Część tego wykresu objęta prostokątem, odpowiednio powiększona i posiadająca krzywe temperatur, suchości, objętości i prężności, poprowadzone dla pary nasyconej i przegrzanej, jest wielce pomocna przy badaniach zmian stanu pary.

Prócz wykresu dla pary wodnej, przygotowanego w powyższym sposób do użytku praktycznego, istnieją wykresy IS dla części używanych w technice gazów, jak dla CO_2 , NH_4 , SO_2 i dla powietrza.

§ 33. Zmiany stanu pary nasyconej

a) Zmiana przy stałej objętości (izochoryczna).

1) Wobec $v = \text{const}$. $L = 0$, a wydatek ciepła idzie na powiększenie energii wewnętrznej:

$$\Delta Q = u_2 - u_1 = u'_2 - u'_1 + x_2 \varrho_2 - x_1 \varrho_1, \text{ a że } u' = u'' - \varrho, \\ \text{to } \Delta Q = u''_2 - \varrho_2 (1 - x_2) - u''_1 + \varrho_1 (1 - x_1) \dots\dots\dots (64)$$

2) Zależność między x_1 i x_2 (Rys. 47)

Dla stanu 1: $v = v'_1 + x_1 (v''_1 - v'_1)$,

dla stanu 2: $v = v'_2 + x_2 (v''_2 - v'_2)$,

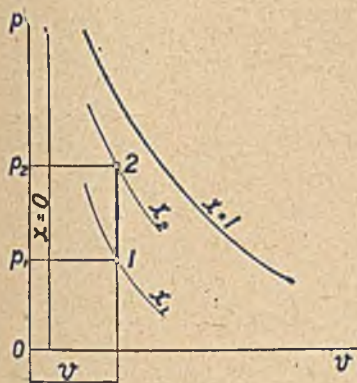
ale $v'_1 = v'_2$, zatem $x_1 (v''_1 - v'_1) = x_2 (v''_2 - v'_2)$ albo

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{v''_1 - v'_1}{v''_2 - v'_2} \dots\dots (65)$$

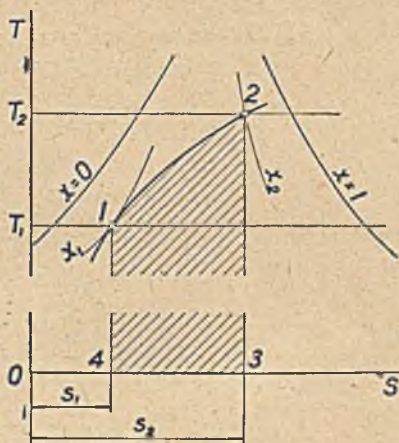
Jeżeli jest szukana prężność p_2 lub p_1 , to określwszy v''_2 , albo v'_1 z tablic, odnajdziemy odpowiednie p stosując interpolację, o ile zajdzie potrzeba.

3) Wykres TS zmiany izochorycznej przedstawia krzywą (Rys. 48), którą się wykreśla wyliczając kilka punktów

na niej przy pomocy równania (63). Pole 1-2-3-4 przedstawia ciepło Q .



Rys. 47



Rys. 48

Z wykresów widać, że przy sprężaniu izochorycznym para przesyca i może się stać przegrzaną. Przy rozprężaniu izochorycznym, któremu towarzyszy odbieranie ciepła, para wilgotnieje i częściowo się skrapla.

- b) Zmiana przy stałej prężności i temperaturze (izobaryczna i izotermiczna).

Zmiana ta odbywa się jednocześnie przy stałej prężności i przy stałej temperaturze, gdyż para nasycona przy danej prężności ma zawsze określoną stałą temperaturę.

- 1) Wydatek ciepła

$$Q = i_2 - i_1 = r(x_2 - x_1) \dots \dots \dots (66)$$

gdzie i_2 entalpia pary w punkcie 2, i_1 entalpia pary w punkcie 1. Ciepło Q zostało wydane na odparowanie $(x_2 - x_1)$ kg pary (Rys. 49).

- 2) Przyrost objętości $(v_2 - v_1)$:

$$v_1 = v'_1 + x_1(v'_1 - v'_1) \quad \text{ i } \quad v_2 = v'_2 + x_2(v'_2 - v'_2),$$

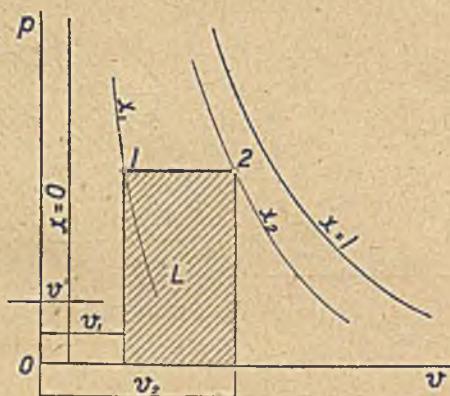
lecz $v'_1 = v'$ i $v''_1 = v''_2$, zatem

$$v_2 - v_1 = (x_2 - x_1) (v'' - v') \dots\dots\dots (67)$$

3) Praca zewnętrzna L :

Przy rozszerzaniu otrzymamy

$$L = p (v_2 - v_1) = p (x_2 - x_1) (v'' - v')$$



Rys. 49

Można również napisać:

$$AL = Ap (v_2 - v_1) = \text{ciepło zewnętrzne parowania.}$$

4) Energia wewnętrzna:

W tej zmianie wydatek ciepła idzie nie tylko na pracę zewnętrzną pary, ale i na powiększenie jej energii wewnętrznej.

$$u_2 - u = Q - AL = (x_2 - x_1) (r - Ap (v'' - v')) = \\ = \varrho (x_2 - x_1) \dots\dots\dots (68)$$

5) Entropia i wykres TS (Rys. 50)

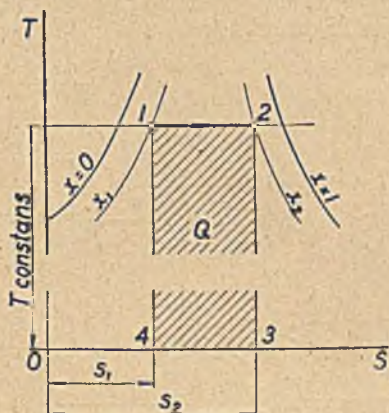
$$s_2 - s_1 = \frac{r}{T} (x_2 - x_1) \dots (69)$$

Pole 1-2-3-4 oznacza ciepło Q , które się równa

$$T (s_2 - s_1) = r (x_2 - x_1).$$

Przy odbieraniu ciepła i jednoczesnym wydatku pracy zewnętrznej przy stałej prężności otrzymamy ściskanie

izobaryczno-izotermiczne, przy którym para może być całkowicie skroplona.



Rys. 50

c) Zmiana bez dopływu i odpływu ciepła (a d i a b a t y c z n a).

Podczas adiabatycznego rozprężania pary nasyconej ciecz zawarta w parze wobec spadku prężności będzie parowała, a para wobec spadku temperatury będzie się skraplała. Oczywiście, jeżeli para nasycona będzie zawierała więcej cieczy niż pary, to suchość jej wzrośnie, a przy układzie odwrotnym — suchość pary zmaleje. Z tego wynika, że przy adiabatycznym rozprężaniu pary nasyconej para o suchości początkowej $x_1 > 0,5$ wilgotnieje, czyli $x_2 < x_1$, a para o suchości $x_1 < 0,5$ przesycha, czyli $x_2 > x_1$, (Rys. 51).

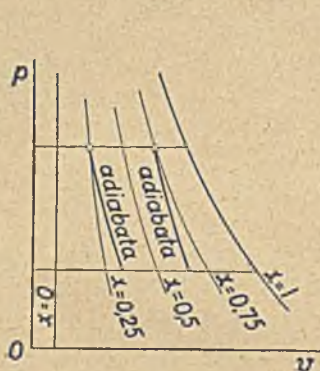
Równanie adiabaty dla pary nasyconej otrzymuje się zważywszy, że w zmianie adiabatycznej $\Delta s = 0$, czyli $s_1 = s_2$. Stosując równanie (63) dla obu stanów 1 i 2 (Rys. 52) piszemy:

$$s'_1 + \frac{x_1 r_1}{T_1} = s'_2 + \frac{x_2 r_2}{T_2} \dots\dots\dots (70)$$

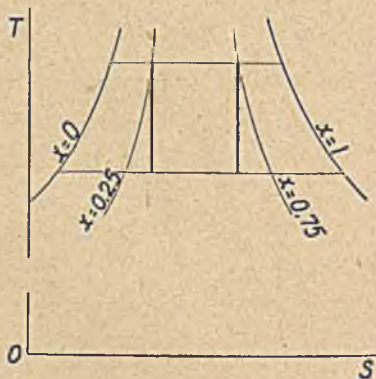
Wzór ten dla pary wodnej można przedstawić tak:

$$s_1 + (s'_1 - s'_1) x_1 = s'_2 + (s'_2 - s'_2) x_2 \dots\dots\dots (71)$$

Inne równanie adiabaty dla pary wodnej nasyconej przedstawia wzór Rankina $p v^a = \text{const.}$, gdzie o ile $x > 0,7$, to (wg Zeunera) wykładnik $a = 1,035 + 0,1x$. Równanie to daje wyniki przybliżone.



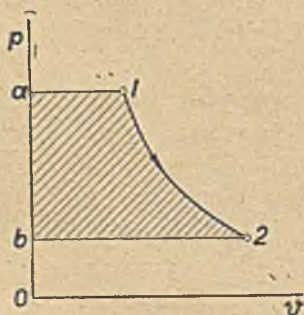
Rys. 51



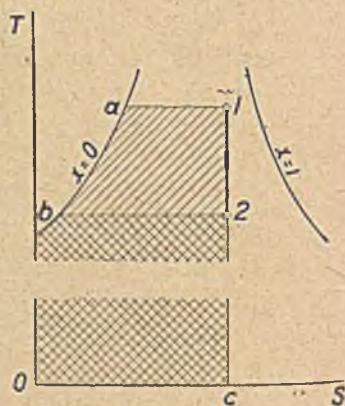
Rys. 52

Ponieważ w zmianie adiabatycznej wydatek ciepła jest $Q = 0$, zatem praca zewnętrzna L powstaje kosztem energii wewnętrznej. A więc:

$$\begin{aligned} AL &= u_1 - u_2 = u'_1 - u'_2 + x_1 \varrho_1 - x_2 \varrho_2 = \\ &= u'_1 - \varrho_1 (1 - x_1) - u'_2 + \varrho_2 (1 - x_2) \dots\dots\dots (72) \end{aligned}$$



Rys. 53



Rys. 54

Oczywiście wzory 47, 48 i 49 na pracę przy zmianie adiabatycznej gazów mogą tu być stosowane z zamianą k na a , które wobec zmienności x będziemy brali średnie między a dla początkowego i a dla końcowego stanu adiabaty.

Pole figury $a-1-2-b$ (Rys. 53) jest równoważne pracy technicznej. Pole to odpowiada polu $a-1-2-b$ na wykresie TS (rys. 54)

Ponieważ pole $0-a-1-c = i_1$, a pole $0-b-2-c = i_2$, przeto pole $a-1-2-b = (0-a-1-c) - (0-b-2-c) = i_1 - i_2$.

Zatem $AL_t = i_1 - i_2 \dots\dots\dots (73)$

Ten sam wynik otrzymuje się ze wzoru (33), jeżeli $Q = 0$. Różnicę entalpii najłatwiej otrzymuje się z wykresu IS .

§ 34. Para przegrzana

Para przegrzana, której określenie podane zostało na str. 76, posiada następujące zalety w porównaniu z parą nasyconą: 1) nie zawiera w sobie zupełnie kropelek cieczy, której obecność w cylindrach silników parowych, a zwłaszcza w wirnikach turbin parowych, jest wysoce niepożądana, 2) posiada większą objętość właściwą, czyli 1 m^3 pary przegrzanej mniej waży niż 1 m^3 pary nasyconej tej samej prężności, 3) ma większą wartość cieplną i 4) skrapla się dopiero wtedy, gdy temperatura jej spadnie poniżej temperatury nasycenia. Wszystkie te zalety występują w sposób wyraźny w praktyce silników parowych.

W kotle, w którym para styka się z wrzącą cieczą, otrzymać pary przegrzanej nie można. Otrzymuje się ją w przegrzewaczach, do których kieruje się parę z kotłów.

Różnica temperatury pary przegrzanej (t_{pp}) i pary nasyconej tej samej prężności (t) świadczy o wysokości przegrzania i nazywa się przegrzaniem. We współczesnych przegrzewaczach otrzymuje się temperaturę pary przegrzanej (t_{pp}) do 500° .

Ciepło właściwe pary przegrzanej o stałej prężności nie jest wielkością stałą, lecz zmienia się w zależności nie tylko od prężności pary, ale i od jej temperatury. W praktyce technika korzysta z tablic zawierających średnie ciepło właściwe (c_{pp}) pary wodnej przegrzanej. Tablica taka jest podana na stronie 93.

Entalpia pary przegrzanej:

$$i_{pp} = i'' + c_{pp} (t_{pp} - t) \quad \dots\dots\dots (74)$$

gdzie i'' i t odpowiadają parze nasyconej tej samej prężności, co przegrzana.

Para przegrzana w miarę wzrostu przegrzania oddala się od stanu nasycenia i staje się coraz bardziej podobna w swych właściwościach do gazów. Te ostatnie bowiem, wobec bardzo niskiej temperatury wrzenia w stanie ciekłym, nie są niczym innym, jak wysoko przegrzаныmi parami odpowiednich cieczy.

Ponieważ objętość pary przegrzanej pewnej prężności większa się w miarę podwyższania przegrzania, wnioskujemy, że dla pary przegrzanej istnieje równanie stanu. Postaci tego równania nie znamy i korzystamy z empirycznych wzorów różnych autorów, z których wzór Callendara cieszy się większym rozpowszechnieniem. Zawiera on jednak szereg stałych i poprawek, dla których niezbędne są specjalne tablice. Dużo prostszy i dla zagadnień technicznych dostatecznie dokładny, zwłaszcza przy mniejszych prężnościach, jest wzór Lindego:

$$pv = RT - 0,016 p \quad \dots\dots\dots (75)$$

w którym stała $R = 47,1$, p — prężność pary przegrzanej, v — jej objętość właściwa, a T — temperatura.

Entropię pary przegrzanej oblicza się ze wzoru:

$$s_{pp} = s' + \frac{r}{T} + c_{pp} \ln \frac{T_2}{T_1} = s'' + c_{pp} \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad \dots\dots (76)$$

gdzie T_2 temperatura pary przegrzanej,
 T_1 „ pary nasyconej tej samej prężności.

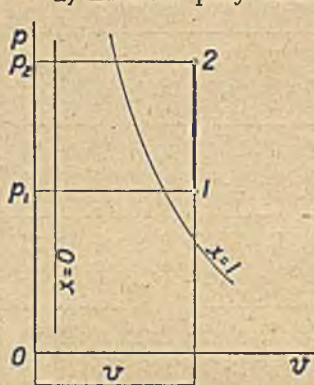
Średnie ciepło właściwe (Cpp) pary wodnej przegrzanej

(Knoblauch, Raisch & 1923)

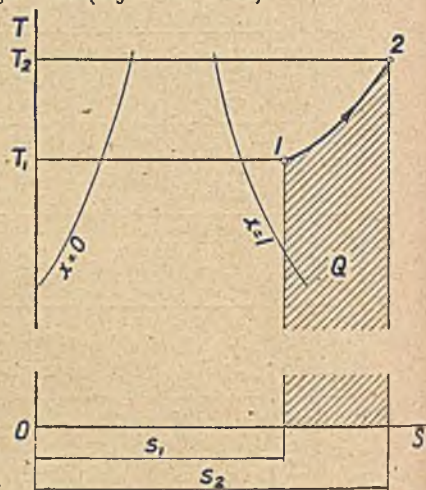
$p\text{-ata}$	0,5	1,0	2,0	6,0	8,0	10	12	14	16	20	30
$t^{\circ}\text{C}$	80,87	99,08	119,6	158,1	169,6	179,0	187,1	194,1	200,4	211,4	232,8
t	0,475	0,484	0,498	0,552	0,579	0,607	0,635	0,664	0,695	0,760	0,940
120	0,467	0,476	—	—	—	—	—	—	—	—	—
140	0,464	0,472	0,488	—	—	—	—	—	—	—	—
160	0,464	0,470	0,482	0,550	—	—	—	—	—	—	—
180	0,464	0,469	0,479	0,529	0,562	0,604	—	—	—	—	—
200	0,465	0,469	0,477	0,516	0,540	0,568	0,602	0,645	—	—	—
220	0,467	0,470	0,476	0,507	0,525	0,546	0,570	0,597	0,629	0,710	—
240	0,468	0,471	0,476	0,502	0,516	0,531	0,549	0,568	0,590	0,640	0,855
260	0,470	0,473	0,477	0,498	0,509	0,522	0,535	0,548	0,564	0,598	0,716
$t_{pp} = 280$	0,472	0,475	0,478	0,496	0,505	0,516	0,526	0,536	0,548	0,572	0,648
300	0,474	0,477	0,481	0,495	0,503	0,511	0,519	0,527	0,537	0,555	0,608
320	—	0,479	0,483	0,496	0,502	0,509	0,515	0,522	0,529	0,543	0,582
340	—	0,482	0,485	0,496	0,502	0,508	0,513	0,518	0,524	0,536	0,565
360	—	0,485	0,487	0,497	0,502	0,507	0,512	0,516	0,521	0,530	0,554
380	—	0,488	0,490	0,498	0,503	0,507	0,511	0,515	0,519	0,527	0,546
400	—	0,491	0,493	0,500	0,504	0,508	0,511	0,515	0,518	0,525	0,541
450	—	—	0,500	0,505	0,508	0,511	0,514	0,517	0,520	0,524	0,534
500	—	—	0,508	0,512	0,514	0,517	0,519	0,521	0,523	0,526	0,534

§ 35. Zmiany stanu pary przegrzanej

a) Zmiana przy stałej objętości (Rys. 55 i 56)



Rys. 55



Rys. 56

Stosujemy wzór Lindego:

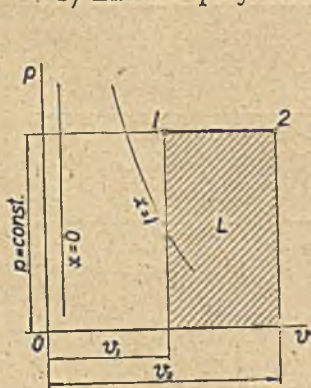
$$\text{Stan (1)} \quad p_1 v = RT_1 - 0,016 p_1$$

$$\text{(2)} \quad p_2 v = RT_2 - 0,016 p_2$$

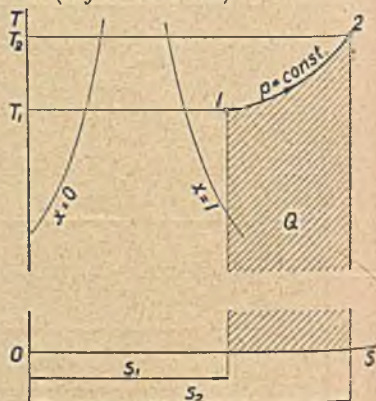
$$Q = c_{vp} (T_2 - T_1), \text{ gdzie } c_{vp} = c_{pp} - AR$$

$$s_2 - s_1 = c_{vp} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

b) Zmiana przy stałej prężności (Rys. 57 i 58)



Rys. 57



Rys. 58

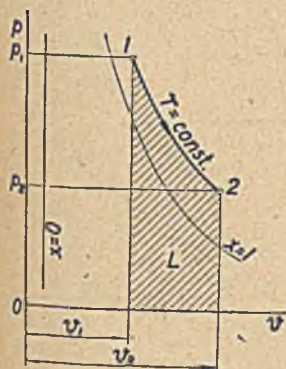
Dla stanu (1) $p v_1 = RT_1 - 0,016 p$

(2) $p v_2 = RT_2 - 0,016 p$

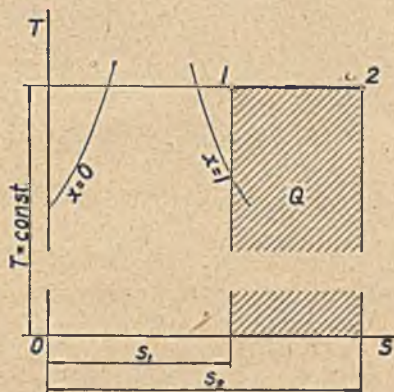
$Q = C_{pp} (T_2 - T_1); L = p (v_2 - v_1) = R (T_2 - T_1).$

$$s_2 - s_1 = c_{pp} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

c) Zmiana przy stałej temperaturze (Rys. 59 i 60).



Rys. 59



Rys. 60

Ponieważ dla stanu (1) $p_1 v_1 = RT - 0,016 p_1$,

a dla stanu (2) $p_2 v_2 = RT - 0,016 p_2$,

więc $p_2 v_2 - p_1 v_1 = 0,016 (p_1 - p_2)$

$$\text{albo } \frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1 + 0,016}{v_2 + 0,016}.$$

Równanie to będzie równaniem izotermy dla pary przegrzanej.

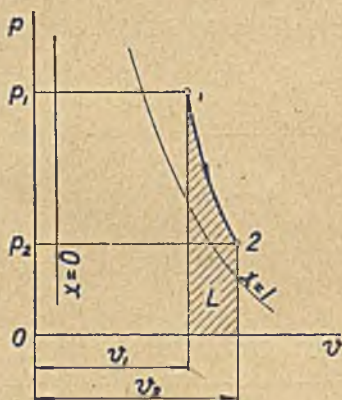
$$Q = ART \ln \frac{p_1}{p_2}; L = RT \ln \frac{p_1}{p_2};$$

$$s_2 - s_1 = \frac{Q}{T} = AR \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

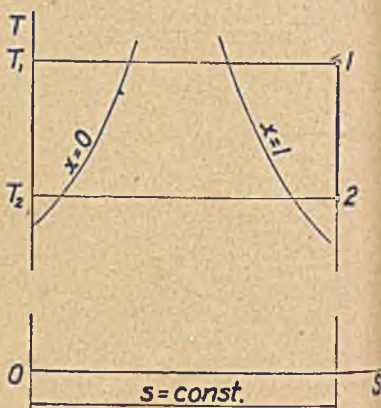
d) Zmiana adiabatyczna (Rys. 58 i 59)

Jako równanie adiabaty dla pary przegrzanej służy wzór $p v_a = \text{const.}$, w którym wykładnik a równa się 1,33.

$$L = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{a - 1}; \quad AL_i = i_1 - i_2;$$



Rys. 61



Rys. 62

Prócz tego wzór Lindego w zastosowaniu do stanu (1) i (2).

e) Dławienie pary

Dławienie pary występuje zawsze, kiedy para przechodzi przez przyrządy do regulacji przepływu, jak zawory, zasuwy, — przez przyrządy służące do zmniejszania jej prężności, jak zawory redukcyjne, — przez przyrządy sterujące rozrządem pary w cylindrach silników tłokowych itp. Objawem dławienia jest spadek prężności pary.

Jak było już zaznaczone w § 25, przy dławieniu stosujemy równanie (51), że $i = \text{const.}$ Na wykresie entropowym IS zmiana stanu przy $i = \text{const.}$ przedstawia się jako prosta pozioma. Kierunek tej prostej wskazuje, że przechodzi ona do suchości coraz większych, a nawet przy dostatecznie dużym spadku prężności może wkroczyć w obszar pary przegrzanej.

Stąd wnioskujemy, że przy dławieniu:

- 1) para przesyca pozostając po dławieniu jeszcze wilgotną:
 $i'_1 + x_1 r_1 = i'_2 + x_2 r_2$, gdzie $x_2 > x_1$,
- 2) para przesycając dochodzi do stanu pary suchej nasyconej: $i'_1 + x_1 r_1 = i''$ i wreszcie
- 3) para przechodzi w stan pary przegrzanej:
 $i'_1 + x_1 r_1 = i'' + c_{pD} (t_{pD} - t_2) = i_D$.

Wszelkie zagadnienia dotyczące zmian stanu pary wodnej czy to nasyconej, czy przegrzanej rozwiązuje się łatwo, prędko i ze ścisłością dostateczną dla potrzeb technicznych przy pomocy wykresów entropowych TS i IS .

§ 36. Silnik parowy teoretyczny

Z drugiego prawa termodynamiki wiemy, że silnik teoretyczny, tj. pracujący bez strat, nie zamienia jednak na pracę wszystkiego pobranego z górnego źródła ciepła i że sprawność jego

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \text{ jest mniejsza od 1.}$$

W silniku rzeczywistym sprawność jest jeszcze mniejsza, występuje w nim bowiem cały szereg strat. Pragnąc ustalić stopień dokładności pracy pary w silniku parowym rzeczywistym należałoby mieć możliwość porównania jego pracy z pracą silnika teoretycznego, pracującego w takich samych warunkach.

Taki silnik parowy teoretyczny, który będzie służył do porównywania pracy silnika parowego rzeczywistego z pracą silnika teoretycznego, będzie się nazywał silnikiem doskonałym.

Silnik parowy doskonały powinien odpowiadać następującym warunkom:

- 1) aby sprawność jego była możliwie najwyższa,
- 2) aby był możliwy do urzeczywistnienia praktycznego z zastrzeżeniem pełnej celowości
- 3) i aby dawał możliwość porównywania ze sobą silników parowych wszelkich typów.

Silnika doskonałego, odpowiadającego wszystkim tym warunkom, nie posiadamy, możemy jednak wybrać kilka rodzajów

silników parowych teoretycznych, rozpatrzyć kolejno ich obiegi i wybrać jeden jako wzór.

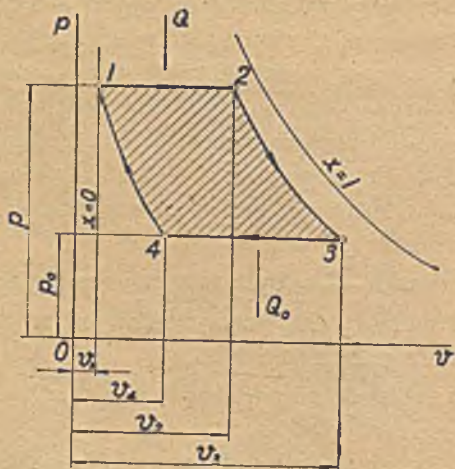
a) Obieg Carnota

Poprzednio było udowodnione (str. 28), że z termodynamicznego punktu widzenia obieg Carnota jest najsprawniejszy. W zastosowaniu do pary wodnej obieg ten będzie się składał z następujących zmian:

Zmiana (1-2) (Rys. 63). Pobieranie ciepła (Q) ze źródła górnego pod postacią pary z kotła o prężności p i temperaturze T . Zmiana ta jest izotermiczna, ponieważ jest to obieg Carnota i zarazem — izobaryczna, gdyż pobieranie pary z kotła w silniku parowym odbywa się przy p -const. Pobrano z kotła 1 kg pary, który zajął objętość v_2 .

Zmiana (2-3). Adiatatyczne rozprężanie do prężności końcowej pary p_0 o temperaturze T_0 i objętości v_3 .

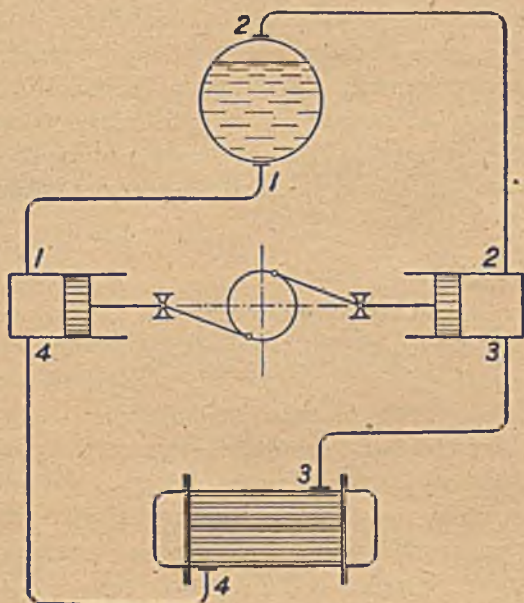
Zmiana (3-4). Skraplanie pary w skraplaczu pod ciśnieniem p_0 i przy temperaturze T_0 wraz z odebraniem parze Q_0 ciepła. Ścisłanie izotermiczno-izobaryczne, dla przyczyn jak w zmianie (1-2), doprowadzone do objętości v_4 , czyli że w skraplaczu nie wszystka para została skroplona.



Rys. 63

Zmiana (4-1). Adiabatyczne sprężanie skroplonej wody i reszty pary do początkowej prężności p , temperatury T i objętości v' 1 kg wody w kotle.

Urzeczywistnić powyższy obieg można by w układzie składającym się (Rys. 64) z kotła parowego — zmiana (1-2), z cylindra



Rys. 64

objętości v_3 do adiabatycznego rozprężania pary — zmiana (2-3), ze skraplacza — zmiana (3-4) i drugiego cylindra objętości v_4 do sprężania pary adiabatycznie — zmiana (4-1).

Oczywiście

$$Q = r(x_2 - x_1), \text{ lecz } x_1 = 0, \text{ zatem } Q = r x_2;$$

$$Q_0 = r_0(x_3 - x_4); \quad \eta = \frac{Q - Q_0}{Q} = \frac{T - T_0}{T};$$

$$AL = Q - Q_0 = \eta Q.$$

W obiegach rzeczywistych silników parowych nie znalazł zastosowania cylinder sprężający, gdyż straty mechaniczne podczas jego pracy są znaczne i przewyższają korzyści, wobec czego można powiedzieć, że silnik pracujący według obiegu Carnota nie może być urzeczywistniony praktycznie, zatem silnik nie odpowiada drugiemu z warunków stawianych silnikowi doskonałemu.

Silnik według obiegu Carnota nie odpowiada również i warunkowi trzeciemu, nie nadaje się bowiem dla pary przegrzanej, gdyż izoterma pary przegrzanej nie jest jednocześnie izobarą, a tymczasem podczas pobierania pary w cylindrze $p = \text{const}$.

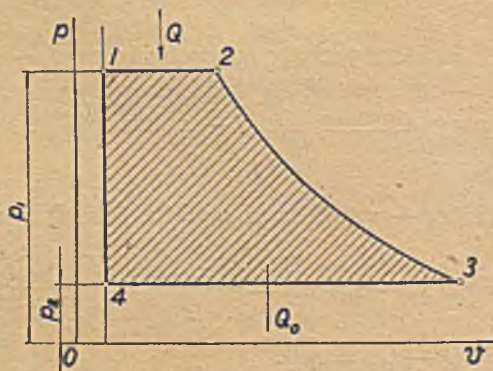
Dla tych przyczyn obieg Carnota jako obieg doskonały, nie znajduje zastosowania i do porównania pracy silników parowych rzeczywistych służą inne obiegi.

b) Obieg Rankina

Jak i w obiegu Carnota obieg Rankina zawiera adiabatyczne rozprężanie doprowadzone do temperatury źródła dolnego, natomiast różni się od obiegu Carnota tym, że doprowadzenie i odprowadzenie ciepła odbywa się tylko izobarycznie i że w skraplaczu skrapla się wszystka para, a wodę skroploną przepompowuje się do kotła przy pomocy pompy. Widzimy z tego, że obieg Rankina jest już bardzo zbliżony do obiegu w silniku parowym rzeczywistym.

Rys. 65 przedstawia obieg Rankina na wykresie PV . Praca 1 kg pary mierzona polem 1-2-3-4 równa się

$$AL = Q - Q_0.$$



Rys. 65

Zatem $AL = Q - Q_0 = i - i_0$.

$$\text{Sprawność } \eta = \frac{AL}{Q} = \frac{i - i_0}{i - i'_0}.$$

Rys. 66

Obieg Carnota — pole abcd:

$Q \approx$ polu abfg

$$Q_0 \approx \text{polu dcfg}$$

$$\eta_c = \frac{abcd}{abfg}$$

Obieg Rankina — pole abce:

$Q \approx$ polu abfhe

$Q_0 \approx pqlu \text{ } ecfh$

$$\eta_R = \frac{abce}{abfhe}$$

Oczywiście:

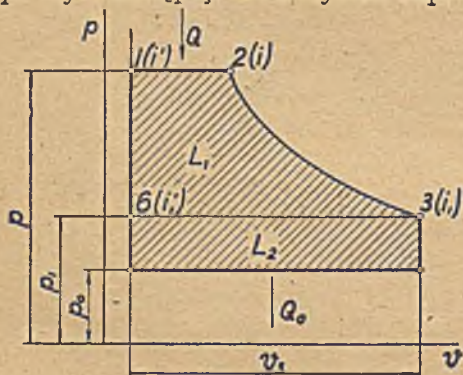
$$\frac{abce}{abfhe} < \frac{abcd}{abig}, \text{ czyli } \eta_R < \eta_c.$$

Obieg Rankina może być stosowany tak dla pary nasyconej jak i dla pary przegrzanej, gdyż pobieranie i oddawanie ciepła odbywa się tylko izobarycznie.

Wadą jego jest to, że rozprężanie adiabatyczne doprowadzone jest do końca, czyli do temperatury źródła dolnego T_0 (punkt 3), przez co długość cylindra wypada dość znaczna przy bardzo nieznacznym przyroście pracy.

c) Obieg Meyera

W obiegu Meyera w celu skrócenia długości cylindra silnika rozprężanie doprowadzone jest tylko do prężności p_1 (Rys. 67), po czym następuje izochoryczne odprowadzanie ciepła aż do osiągnięcia temperatury skraplania T_0 (zmiana 3—4). Pozostałe zmiany, jak w obiegu Rankina.



Rys. 67.

$$\text{Praca } L = L_1 + L_2,$$

$$\text{lecz } L_1 = \frac{i - i_1}{A},$$

$$\text{zaś } L_2 = (p_1 - p_0) v_3$$

$$\text{Sprawność } \eta = \frac{AL}{-i_0'}$$

Obieg Meyera najbardziej się zbliża do obiegu stosowanego w rzeczywistym silniku parowym, jednak i on nie odpowiada w całej rozciągłości wymaganiom stawianym obiegowi doskonałemu.

A mianowicie: niecałkowite rozprężanie uniemożliwia zastosowanie obiegu Meyera do turbin parowych.

Przykład. Teoretyczny silnik parowy tłokowy pracuje przy prężności wlotowej $p = 15$ ata i $\pi = 0,95$ i prężności wylotowej $p_0 = 0,2$ ata.

Wyliczyć pracę 1 kg pary oraz sprawność dla obiegów Carnota, Rankina i Meyera, przyjmując dla obiegu Meyera prężność w końcu rozprężania $p_1 = 1$ ata.

1. Obieg Carnota (Rys. 63)

$$\eta = \frac{T - T_0}{T} = \frac{470,4 - 332,7}{470,4} = 0,2927$$

$$Q = x_2 r = 0,95 \times 466,7 = 443,4 \text{ Kal.}$$

$$AL = \eta Q = 443,4 \cdot 0,2927 = \underline{129,8 \text{ Kal/kg}}$$

Można również obliczyć pracę ze wzoru $AL = Q - Q_0$. Do tego trzeba mieć x_3 i x_4 . Z równania (70) dla adiabaty rozprężania:

$$s'_2 + \frac{x_2 r}{T} = s' + \frac{x_3 r_0}{T_0}; s'_2 = 0,5508; s'_3 = 0,1976;$$

$$\frac{r}{T} = 0,9924; \frac{r_0}{T_0} = 1,6916.$$

$$0,5508 + 0,95 \cdot 0,9924 = 0,1976 + x_3 \cdot 1,6916$$

$$1,4936 - 0,1976 = 1,6916 x_3; x_3 = 0,766.$$

Dla adiabaty sprężania mamy wobec $x_1 = 0$

$$s'_1 = 0,5508; s'_4 = 0,1976;$$

$$0,5508 = 0,1976 + x_4 \cdot 1,6916; x_4 = 0,208.$$

$$\text{Wtedy } Q_0 = (x_3 - x_4) r_0 = (0,766 - 0,208) 562,7 = 313,7 \text{ Kal.}$$

$$\text{Zatem } AL = Q - Q_0 = 443,4 - 313,7 = \underline{129,7 \text{ Kal/kg.}}$$

$$\text{zas } \eta = \frac{r x_2 - r_0 (x_3 - x_4)}{r x_2}; \begin{array}{l} r x_2 = 443,4 \\ x_3 - x_4 = 0,558 \\ r_0 (x_3 - x_4) = 314,3 \end{array}$$

$$\eta = \frac{443,4 - 314,3}{443,4} = \frac{129,1}{443,4} = \underline{0,295.}$$

2. Obieg Rankina (Rys. 65)

$$i = 200,7 + 0,95 \cdot 466,7 = 644,1 \text{ Kal.}$$

Dla znalezienia i_0 potrzebne jest x_3 , które, jak w obiegu Carnota, $= 0,766$

$$i_0 = 59,7 + 0,766 \cdot 562,7 = 490,7$$

$$AL = i - i_0 = 644,1 - 490,7 = 153,4 \text{ Kal/kg}$$

$$\eta = \frac{i - i_0}{i - i'_0} = \frac{153,4}{644,1 - 59,7} = \frac{153,4}{584,4} = \underline{0,263}$$

3. Obieg Meyera (Rys. 67)

$$L = L_1 + L_2; AL = i - i_1; L_2 = (p_1 - p_0) v_3$$

Dla znalezienia v_3 użyjemy równania

$$p_2 v_2^a = p_3 v_3^a. \text{ Lecz } v_2 = v_2' \cdot 0,05 + v_2'' \cdot 0,95,$$

$$\text{gdzie } v_2' = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}, v_2'' = 0,1346 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = 0,1279$$

Wykładnik a w punkcie (2)

$$a = 1,035 - 0,1 \cdot 0,95 = 1,13$$

Dla znalezienia wykładnika a w p. (3) trzeba mieć x_3 , które otrzymamy z równania (70), gdzie $p_1 = 15 \text{ ata}$, a $p_3 = 1 \text{ ata}$

$$0,5508 + 0,95 \cdot 0,9924 = 0,3096 + x_3 \cdot 1,4511$$

$$1,4936 - 0,3096 = x_3 \cdot 1,4511 \quad x_3 = 0,815$$

$$\text{Wtedy } a \text{ dla p. (3)} \quad a = 1,035 + 0,1 x_3 = 1,117$$

$$\text{Ostatecznie } 15 \cdot 10^4 \cdot 0,1279^{1,13} = 1 \cdot 10^4 \cdot v_3^{1,117}$$

$$1,4688 = v_3^{1,117}; v_3 = 1,411 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Teraz } AL_2 = \frac{(1 - 0,2) 10^4 \cdot 1,411}{427} = 26,4 \text{ Kal.}$$

$$AL_1 = i - i_1 = 644,1 - (99,1 + 539,9 \cdot 0,81) = 107,7 \text{ Kal.}$$

$$AL = 107,7 + 26,4 = 134,1 \text{ Kal.}$$

$$\eta = \frac{AL}{i - i_0'} = \frac{134,1}{584,4} = \underline{0,23}$$

Wynik v_2 , v_3 i x_3 może być sprawdzony na wykresie $I S$.

§ 37. Sprawność silnika parowego rzeczywistego

Sprawność silnika doskonałego, omówioną w poprzednim paragrafie, nazywać będziemy sprawnością teoretyczną i oznaczać przez

$$\eta_t = \frac{Q - Q_0}{Q} = \frac{AL_t}{Q}$$

Sprawność ta w silnikach tłokowych w najkorzystniejszych warunkach dochodzi zaledwie do 30 %. Np. sprawność obiegu Rankina pracującego parą o $p = 20 \text{ ata}$ przegrzaną do 400° przy $p_0 = 0,2 \text{ ata}$ (warunki krańcowe dla silnika tłokowego) wynosi

$$\eta_t = \frac{225}{716,4} = 0,311$$

Tenże silnik wykonywujący obieg Carnota w tych samych warunkach, lecz parą suchą nasyconą wykazuje $\eta_i = \frac{151,7}{484,4} = 0,314$.

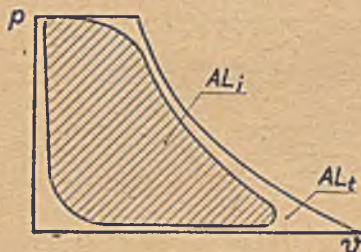
Aby otrzymać η_i większe, należałoby powiększyć Q i zmniejszyć Q_0 . Powiększenie Q mogłoby się odbyć tylko drogą powiększenia prężności wlotowej pary, jak również stopnia jej przegrzania. Względy wytrzymałościowe i potrzeba smarowania cylindra silnika stawiają granice możliwościom w tym kierunku. Jeszcze mniejsze wyniki osiągnie się przy usiłowaniu zmniejszenia Q_0 , gdyż temperatura źródła dolnego jest poza naszym wpływem.

Zbudowany według obiegu doskonałego silnik parowy *r z e c z y w i s t y* pracuje ze sprawnością dużo mniejszą dla następujących przyczyn.

Praca pary w cylindrze silnika rzeczywistego AL_i , po zmierzeniu jej indykatorom (jest to przyrząd do mierzenia pracy AL , w cylindrach silników cieplnych, pracy tzw. indykowanej) okaże się mniejsza od AL_t , gdyż pracy tej w silniku rzeczywistym towarzyszy szereg strat, a mianowicie:

- 1) niezupełne rozprężanie pary,
- 2) przestrzeń szkodliwa,
- 3) sprężanie pary,
- 4) dławienie przy wlocie i przy wylocie i
- 5) straty ciepłe przez ścianki metalowe cylindra.

Straty te widać na rys. 68 przedstawiającym obieg doskonały Rankina i wykres pracy silnika zdjęty indykatorom.



Rys. 68

Zmniejszenie tych strat jest do pewnego stopnia w naszej mocy. Stosunek

$$\eta_i = \frac{AL_i}{AL_t}$$

nazywamy sprawnością i n d y k o w a n ą. η_i waha się od 0,7 do 0,8.

Praca AL_i uzyskana w cylindrze silnika rzeczywistego z powodu mechanicznych strat, jak przede wszystkim tarcie, nie może być całkowicie zużyta do celów mechanicznych. Na wale silnika uzyskać można pracę AL_e , którą nazywać będziemy pracą e f e k t y w n ą i która będzie mniejsza od pracy AL_i . Stosunek

$$\eta_m = \frac{AL_e}{AL_i}$$

nazywamy sprawnością m e c h a n i c z n ą silnika.

Sprawność ta wynosi $\eta_m = 0,9$ i przy dzisiejszym stanie budowy silników nie wiele jest do poprawienia.

Iloczyn tych trzech współczynników da nam sprawność o g ó l n ą silnika rzeczywistego

$$\eta_0 = \eta_t \cdot \eta_i \cdot \eta_m = \frac{AL_t \cdot AL_i \cdot AL_e}{Q \cdot AL_t \cdot AL_i} = \frac{AL_e}{Q}$$

Ponieważ całość urządzenia cieplnego składa się poza silnikiem jeszcze z kotła, który aby oddać silnikowi Q ciepła, pobrał B kg paliwa o wartości opałowej W , czyli pobrał BW Kal, do-

chodzi więc tu jeszcze sprawność kotła $\eta_k = \frac{Q}{BW}$, która w przeciętnym kotle wynosi od 0,65 do 0,75.

Otrzymujemy wreszcie η współczynnik sprawności całkowitego urządzenia silnika cieplnego:

$$\eta = \eta_0 \cdot \eta_k = \frac{AL_e \cdot Q}{Q \cdot BW} = \frac{AL_e}{BW}$$

§ 38. Stan ciągłości gazowociekłej

Przebieg parowania cieczy uwidoczniony na rys. 44 i 45 wskazuje, że ze wzrostem prężności długości poziomych odcinków przedstawiających parowanie cieczy przy różnych prężnościach maleją, że obie krzywe graniczne — prawa i lewa — zbliżają się ku sobie, aż wreszcie schodzą się w jednym punkcie *K*. Poniżej tego punktu ciecz znajduje się w dwóch różniących się od siebie stanach skupienia cząsteczek — ciekłym i gazowym — znajdujących się obok siebie w równowadze. Powyżej tego punktu jest już tylko jednolita materia o wspólnym stanie skupienia. Punktowi temu odpowiada pewna temperatura i pewna prężność. Punkt ten i odpowiadającą mu temperaturę i prężność nazywamy krytycznymi.

Doświadczalnie określono dla różnych cieczy ich temperatury krytyczne i prężności krytyczne.

Temperatury i prężności krytyczne.

Ciało	t° wrzenia przy 760 mm sl. rt.	Punkt krytyczny	
		temperatura	prężność ata
Woda	100	374,1	225,5
Amoniak	— 33,7	133	116
Dwutl. węgla	— 78	31	75,3
Tlen	— 182,8	— 119	51,4
Wodór	— 252,8	— 240	13,2

Z powyższych określeń wynika, że powyżej punktu krytycznego niemożliwe jest istnienie pary nasyconej i niemożliwe jest skroplenie pary, nie ma już różnicy między stanem ciekłym a stanem gazowym materii, istnieje stan ciągłości gazowociekłej.

§ 39. Przechładzanie pary i przegrzewanie cieczy

Przez nazwę przechładzania pary rozumiemy zjawisko polegające na tym, że para przy bardzo szybkim wypływie z dyszy, pomimo iż osiągnęła temperaturę niższą od temperatury nasycenia, czasem nie skrapla się. Zjawisko to nie jest jeszcze w całej rozciągłości zbadane i występuje zwykle w parze bardzo czystej, nie posiadającej części stałych, dokoła których zaczęłaby osiadać ciecz. Również i szybkość wypływu odgrywa pewną rolę w powstawaniu przechładzania, gdyż na utworzenie się kropeł cieczy jest potrzebny czas.

Odwrotnie — ciecz można przegrzać powyżej punktu wrzenia. Warunkiem koniecznym; aby nastąpiło przegrzanie cieczy, jest, żeby ciecz była zupełnie pozbawiona rozpuszczonych w niej gazów, poza tym aby ciecz znajdowała się w całkowitym spoczynku i aby ogrzewanie jej odbywało się wolno. W tych warunkach udaje się przegrzać ciecz dość łatwo. Wystarczy jednak wstrząśnienie cieczą, aby nadmiar ciepła zawartego w cieczy wyładował się w jednej chwili pod postacią momentalnego wytworzenia się wielkiej ilości pary. Ze zjawiskiem przegrzewania trzeba się liczyć w technice. Przegrzewanie wody łatwo może nastąpić w kotle zasilanym wodą odgazowaną albo dystylowaną, zwłaszcza po przerwaniu pobierania pary, kiedy parowanie całkowicie się uspokoi, a woda pobiera ciepło przez pewien czas z rozgrzanego obmurowania. Dobra cyrkulacja wody w kotle najlepiej zapobiega przegrzewaniu się wody.

Zjawiskiem podobnym do przegrzewania cieczy jest stan sferoidalny. Polega on na tym, że ciecz nie zwilża mocno rozżarzonych płyt metalowych. Jeżeli więc na taką płytę puścimy kroplę wody, to między płytą a kroplą utworzy się warstewka pary; kropla będzie się poruszała po płycie, a parowanie będzie się odbywało bardzo wolno. Skoro kropla dotknie się płyty, momentalnie wyparuje.

Stan sferoidalny tworzy się w kotle, w którym nastąpiło miejscowe rozżarzenie się blach czy to z powodu braku wody, czy też z powodu grubej warstwy kamienia kotłowego.

§ 40. Wilgotność powietrza

W powietrzu zawsze znajduje się pewna ilość pary wodnej, której prężność stanowi pewną niewielką część ciśnienia atmosferycznego. Rządzi tu prawo Daltona, o którym była mowa w § 19 i które w zastosowaniu do par brzmi: prężność pary w jakimkolwiek gazie nie zależy od obecności tego gazu, jeżeli tylko on nie działa chemicznie na parę. A więc przy danej temperaturze prężność pary będzie taka sama w powietrzu, jak i w próżni. Prawo to nie jest zupełnie ścisłe, zwłaszcza przy prężnościach dużych.

Najwyższa wagowa zawartość pary wodnej w 1 m³ powietrza może osiągnąć wartość ciężaru właściwego pary wodnej o prężności odpowiadającej temperaturze powietrza. Mówimy wtedy, że powietrze jest nasycone parą. Analogicznie najwyższa prężność pary wodnej zawartej w powietrzu o pewnej temperaturze jest równa prężności pary wodnej nasyconej przy tej temperaturze.

Jeżeli ciśnienie atmosferyczne wynosi H , ciśnienie powietrza suchego F , a prężność pary zawartej w powietrzu p , to

$$H = F + p$$

Jeżeli powietrze jest nasycone parą wodną, to $H = F + P$, gdzie P jest prężność pary nasyconej o temperaturze równej temperaturze powietrza.

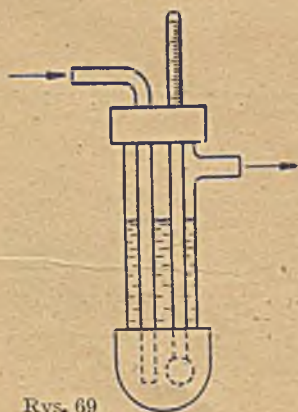
Stosunek $\frac{p}{P} = \frac{\gamma}{\gamma''} = w$, gdzie γ ciężar pary wodnej zawartej

w 1 m³ powietrza (wilgotność bezwzględna), a γ'' ciężar pary wodnej zawartej w 1 m³ powietrza w stanie nasycenia, czyli maksymalny ciężar pary wodnej przy tej samej temperaturze, nazywamy wilgotnością względną powietrza. Jest to stosunek prężności (albo ciężaru) pary znajdującej się w 1 m³ powietrza do prężności (albo ciężaru) pary nasycającej 1 m³ powietrza przy tej samej temperaturze. P i γ'' bierzemy z tablic pary wodnej nasyconej.

Tablica prężności pary wodnej przy najwyższej zawartości jej w 1 m³ powietrza.

Tempera- tura	Prężność pary P		Maks. zawartość pary wod. γ'' w g/m ³
	w kg/cm ²	w mm st. rt.	
— 25	0.00073	0.54	0.64
— 20	0.0012	0.91	1.05
— 15	0.0019	1.40	1.58
— 10	0.0028	2.093	2.31
— 5	0.0042	3.113	3.37
0	0.0062	4.60	4.89
+ 5	0.0089	6.534	6.82
+ 10	0.0125	9.165	9.39
+ 15	0.0173	12.70	12.82
+ 20	0.0236	17.39	17.22
+ 25	0.0319	23.55	22.93
+ 30	0.0428	31.543	30.21
+ 35	0.0568	41.827	39.41
+ 40	0.0745	54.90	50.91

Do określania wilgotności względnej służą przyrządy zwane higrometrami. Opiszemy sposób działania higrometru Regnaulta (ulepszenie higrometru Daniela).



Rys. 69

Do rurki szklanej zakończonej u dołu srebrnym naczynkiem nalewa się eteru i zanurza w nim termometr. Następnie przedmucha się przez eter powietrze za pomocą oddzielnej rurki. Eter wówczas szybko paruje, skutkiem czego temperatura eteru, naczynka i przylegającej do niego warstwy powietrza obniża się i na powierzchni srebrnej

po pewnym czasie pojawia się rosa (Rys. 69). Jest to dowodem, że powietrze otaczające naczynko zostało nasycone parą wodną. Należy zauważyć wtedy temperaturę (t_1) eteru, której będzie odpowiadała prężność p pary wodnej. Jednocześnie notujemy temperaturę (t) w pomieszczeniu, której odpowiada prężność P pary wodnej nasycającej powietrze. Niech np. $t_1 = 5^\circ$, wtedy $p = 0,0089 \text{ kg/cm}^2$, jednocześnie $t = 10^\circ$, zatem $P = 0,0125$: Wilgotność względna w

$$w = \frac{89}{125} \cdot 100 = \sim 71,2\%$$

Do wyliczania entalpii powietrza o temp. t° składającego się z 1 kg powietrza suchego i x kg pary wodnej służy wzór

$$i = 0,24 t + 0,46 t x + 595 x,$$

gdzie $0,24 = c_p$ dla powietrza suchego, $0,46$ — średnie ciepło właściwe pary wodnej, 595 Kál/kg — ciepło parowania wody przy 0° i x — zawartość pary wodnej w kg w 1 kg powietrza, czyli wilgotność bezwzględna.

Ciężar 1 m^3 powietrza suchego przy t° i B_0 mm sł. rt. oblicza się ze wzoru

$$G_s = \frac{1,293}{1 + \alpha t} \frac{B_0}{760} \text{ kg}$$

Ciężar 1 m^3 powietrza wilgotnego przy t° i B_0 mm sł. rt. oraz przy p mm sł. rt. prężności pary wodnej zawartej w powietrzu oblicza się ze wzoru

$$G_w = \frac{1,293}{1 + \alpha t} \cdot \frac{B_0 - p}{760} \text{ kg}$$

Przy rozwiązywaniu zagadnień, w których występuje powietrze wilgotne, szeroko stosuje się metodę wykreślną, tzw. wykres I—X (Rys. 70), przy pomocy którego można odczytać: temperaturę powietrza, wilgotność względną, entalpię, zawartość (x) pary wodnej w 1 kg powietrza w g i prężność pary wodnej w mm sł. rt.

Przykład zastosowania wykresu I—X.

Dane: temperatura powietrza 15° , wilgotność 70%, stan barometru $B_0 = 760$ mm.

1. Prężność pary wodnej zawartej w powietrzu.

Prosta temperatury 15° w przecięciu się z krzywą wilgotności 70% daje punkt a .

Prostopadła z tego punktu na oś odciętych odcina prostokątną bc , która odpowiada prężności $p = 8,9$ mm sł. rt. Istotnie: P dla $t = 15^{\circ}$ wynosi 12,7 mm sł. rt., to przy $w = 70\%$

$$p = 12,7 \times 0,7 = 8,89 \text{ mm sł. rt.}$$

2. Ilość pary wodnej w 1 kg powietrza.

Ta sama prostopadła daje drugą przyprostokątną $x - c$, odpowiada jąca wilgotności bezwzględnej $x = 7,5$ g/kg. Istotnie: w 1 m³ powietrza $\gamma'' = 12,82$ g, a przy $w = 70\%$ $\gamma = 12,82 \times 0,7 = \sim 9$ g/m³.

Ciężar 1 m³ tego powietrza

$$G_w = \frac{1.293.273 \cdot (760 - 8.9)}{288 \cdot 760} = 1,2 \text{ kg}$$

A więc

$$x = \frac{9}{1.2} = 7,5 \text{ g/kg}$$

3. Temperatura, przy której powietrze to będzie nasycone znaleziona ilością pary.

Ta sama prostopadła przecina krzywą 100% wilgotności przy temperaturze $\sim 10^{\circ}$

4. Stan powietrza po oziębieniu do $t = 5^{\circ}$ i ponownym ogrzaniu do 15° . Przy $t = \sim 10^{\circ}$ powietrze jest nasycone parą wodną i przy dalszym oziębianiu nadmiar wody zostanie strącony. Posuwamy się wzdłuż krzywej 100% wilgotności aż do $t = 5^{\circ}$ i z tego punktu wystawiamy prostopadłą do góry, do przecięcia się z prostą temperatury 15° . Otrzymujemy wilgotność $\sim 50\%$.

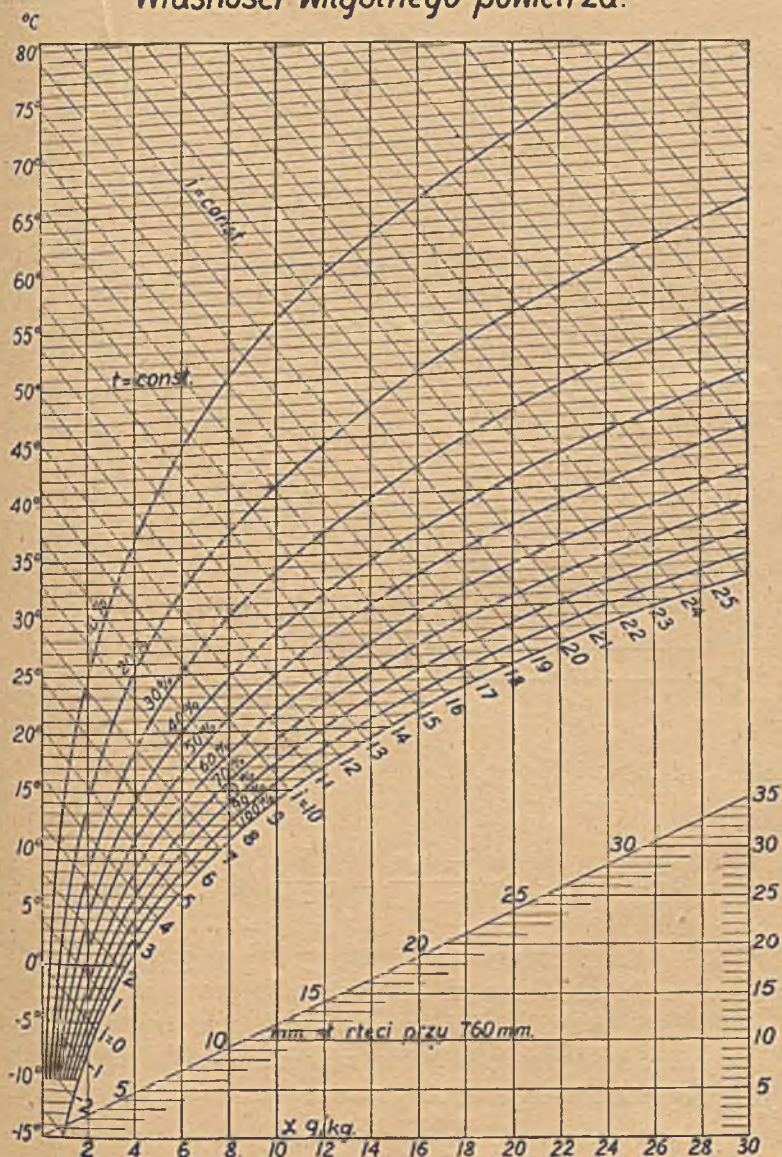
5. Entalpia powietrza początkowa po ochłodzeniu i po ponownym ogrzaniu.

Początkowa 8,1 Kal/kg.

po ochłodzeniu do 5° 4,4 Kal/kg i

po ponownym ogrzaniu do $15^{\circ} \sim 7$ Kal/kg

Własności wilgotnego powietrza.

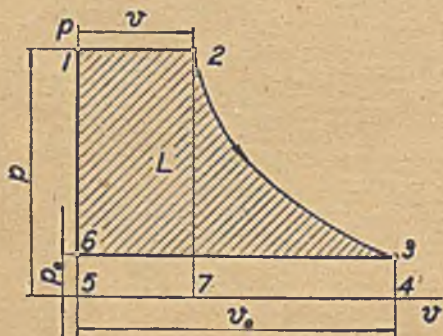


Rys. 70

IV. WYPLÝW CZYNNIKA

§ 41. Prędkość wypływu

1 kg czynnika o objętości v (1—2) (Rys. 71) rozprężając się adiabatycznie (2—3) od



Rys. 71

prężności p do prężności p_0 , wykonuje pracę L składającą się z pracy napelniania przy prężności p (pole 1-2-7-5) równej $p v$, z pracy rozprężania (pole 2-3-4-7)

równej $\frac{p v - p_0 v_0}{k - 1}$ i z ujemnej

pracy wypychania czynnika przy prężności p ,

(pole 6-3-4-5) równej $p_0 v_0$.

Razem

$$L = p v - p_0 v_0 + \frac{p v - p_0 v_0}{k - 1} = \frac{k}{k - 1} (p v - p_0 v_0) \dots (77)$$

Jeżeli jednak czynnik rozprężający się w powyższy sposób wypływa przez otwór, to on nie wykonuje pracy, tylko energia rozprężania się, jeżeli pominiemy straty na tarcie strumienia czynnika o ścianki otworu, całkowicie zamieni się na energię ruchu, czyli energię kinetyczną według wzoru

$$L = \frac{m v_0^2}{2}$$

Jeżeli m jest masą 1 kg czynnika, to wzór powyższy przybiera postać

$$L = \frac{w_o^2}{2g} \text{ kgm} \dots\dots\dots (78)$$

gdzie g przyspieszenie siły ciężkości = 9,81 m/sek², a w_o prędkość wypływu czynnika w m/sek.

Porównując L ze wzorów (77) i (78) otrzymujemy wzór na prędkość w_o , z którą wypływać będzie 1 kg/sek. czynnika po rozprężaniu się adiabatycznym z p do p_o , o ile jego początkowa prędkość w będzie przyjęta jako równa 0.

$$w_o = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} (p v - p_o v_o)} \dots\dots\dots (79)$$

Jeżeli mamy do czynienia z parą, to ponieważ praca L (Rys. 71) jest pracą techniczną (L_t) 1 kg pary, która została rozprężona adiabatycznie z p do p_o , więc na zasadzie wzoru (34) piszemy,

$$AL_t = i - i_o,$$

gdzie i i i_o — entalpie pary o prężnościach p i p_o .

Dla pary otrzymamy

$$w_o = \sqrt{\frac{2g(i - i_o)}{A}} \dots\dots\dots (80)$$

a po podstawieniu zamiast stałych $g = 9,81$ i $A = \frac{1}{427}$

$$\boxed{w_o = 91,5 \sqrt{i - i_o}} \dots\dots\dots (81)$$

Spadek entalpii $i - i_o$ odczytujemy bezpośrednio z wykresu IS. Wykresy IS często zawierają dodatkowy wykres prędkości, z którego, mając $i - i_o$ jako odcinek, odrazu otrzymuje się odnośne w_o .

Stosując wzór (79) do pary nadajemy wykładnikowi k wartości:

przy parze nasyconej $k = 1,035 + 0,1 \pi$,
 przy parze przegrzanej $k = 1,33$.

Jeżeli G jest ciężarem w kg czynnika przepływającego w 1 sek przez kanał wypływowy o przekroju F m², to $Gv_o = F_o w_o$, gdzie v_o objętość właściwa, odpowiadająca prężności czynnika w przekroju F_o w m³/kg i w_o prędkość wypływu w przekroju F_o w m/sek.

Z powyższego równania otrzymuje się wzór na ilość czynnika

$$G = \frac{F_o w_o}{v_o} \text{ kg/sek} \dots\dots\dots (82)$$

§ 42. Przekrój krytyczny, prędkość i prężność krytyczna

Podczas rozprężania się czynnika przy przepływie rośnie i prędkość wypływu (w) i objętość właściwa czynnika (v). Ale (w) w miarę spadku prężności rośnie z początku szybko, a potem dużo wolniej. Widać to z poniższej tabelki ułożonej dla pary na podstawie wzoru (81).

$i - i_o$	50	100	150	200	250	300 Kal.
w_o	650	925	1130	1305	1460	1600 m/sek.

Natomiast objętość właściwa (v) pary przy spadku prężności wzrasta początkowo nieznacznie, a potem bardzo szybko, co widoczne jest z wykresu objętości właściwych pary (str. 80). Wobec powyższego stosunek w/v początkowo będzie rósł, osiągnie swą wartość największą i potem będzie szybko malał. Oczywiście przekrój F , przez który przepływa stała ilość czynnika G kg/sek.,

będzie wielkością zmienną, gdyż $G = F \frac{w}{v}$, i będzie się zmieniał odwrotnie, tj. z początku będzie malał, osiągnie swą wartość najmniejszą i potem będzie wzrastał.

Ten najmniejszy przekrój kanału przepływowego nazywać będziemy przekrojem krytycznym, a odpowiadającą mu prędkość — prędkością krytyczną i prężność — prężnością krytyczną.

Tabliczka wartości liczbowych prężności i prędkości krytycznych, i ilości przepływu

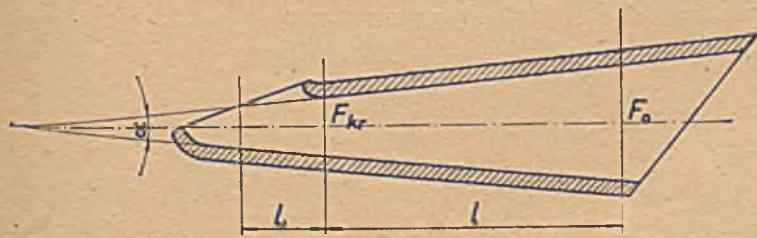
	K	$w_{kr.}$	$\frac{p_{kr}}{p}$	G
gaz dwuatom.	1,4	$3,38 \sqrt{pv}$	0,530	$2,14 F_{kr} \sqrt{p/v}$
para przegrz.	1,33	$3,33 \sqrt{pv}$	0,545	$2,09 F_{kr} \sqrt{p/v}$
para sucha nas.	1,135	$3,23 \sqrt{pv}$	0,577	$1,99 F_{kr} \sqrt{p/v}$

§ 43. Wypływ przez dyszę i otwór

Wypływ czynnika przez kanał, połączony z jednoczesnym rozprężaniem się i nadaniem tym samemu czynnikowi znacznej prędkości wylotowej, występuje w niektórych silnikach cieplnych, np. w turbinach parowych. Kanał taki zwie się *dyszą*.

Aby uzyskać przy wypływie z dyszy możliwie największą prędkość, jaką osiągnąć można przy adiabatycznym rozprężaniu z prężności p do p_o , musimy na zasadzie wyżej przytoczonych rozważań nadać dyszy kształt taki, aby przekrój dyszy F początkowo malał, a po osiągnięciu przekroju krytycznego wzrastał.

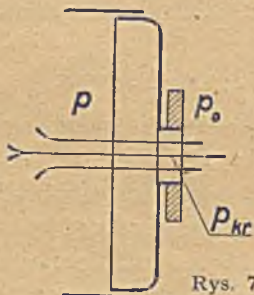
Przy obliczaniu wymiarów dyszy ustalamy p i p_o , obliczamy prężność krytyczną p_{kr} i prędkość krytyczną w_{kr} , a następnie mając G obliczamy przekrój krytyczny F_{kr} i przekrój wypływu F_o (Rys. 72), długość zaś dyszy l , liczoną od przekroju krytycznego, otrzymamy mając F_{kr} i F_o i przyjmując kąt rozszerzania się dyszy $\alpha = 8^\circ \div 12^\circ$.



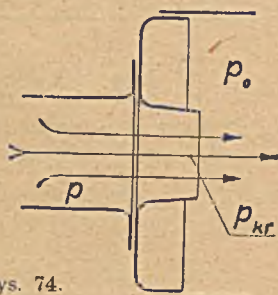
Rys. 72

Jeżeli wypływ odbywa się bez dyszy lub przez wylot nie doprowadzony do przekroju krytycznego, to rozprężanie czynnika nastąpi tylko do p_{kr} i prędkość wypływu osiągniemy tylko w_{kr} , niezależnie od p_o (Rys. 73).

Jeżeli $p_o > p_{kr}$, to dysza jest zbyteczna. Jeżeli zaś $p_o < p_{kr}$, to dysza jest konieczna i jeżeli przy wybranym kącie rozszerzenia dyszy będzie ona czy to za krótka, czy za długa lub przekrój F_o będzie wykonany zbyt mały lub zbyt duży, to wypływ będzie połączony ze stratami zmniejszającymi prędkość wypływu w_o .



Rys. 73.



Rys. 74.

Przekrój dyszy prostopadły do kierunku wypływu bywa okrągły lub kwadratowy, lecz najczęściej prostokątny o jednym wymiarze stałym.

Podczas przepływu przez dyszę czynnik musi pokonać opór tarcia cząsteczek tak o siebie, jak i o ścianki dyszy, wskutek tego rzeczywista prędkość wypływu jest mniejsza od wyliczonej (o 3—8%).

V. SPALANIE

§ 44. Wartość opałowa paliwa

Paliwa używane w przemyśle bywają:

stałe — drzewo, torf, węgiel brunatny, węgiel kamienny, brykiety z torfu, węgla brunatnego i kamiennego, wreszcie węgiel drzewny i koks jako produkty destylacji, i pył węglowy;

płynne — ropa naftowa i jej tzw. frakcje: benzyna, nafta, oleje gazowe i smarne, i odpadki naftowe oraz spirytus;

i gazowe, jak: gaz ziemny, gaz świetlny, gaz wielkopiecowy, koksowniany, generatorowy, wodnoczadowy itp.

Stosownie do postaci, pod jaką paliwa te bywają używane w przemyśle, można je podzielić na trzy grupy: paliwa naturalne, jak węgiel, torf, gaz ziemny; paliwa sztuczne, jak koks, brykiety, pył, benzyna i paliwa odpadkowe, jak trociny, odpadki naftowe itp.

We wszystkich tych paliwach jako główne pierwiastki palne występują: węgiel (C) i wodór (H) oraz w nieznacznych ilościach siarka (S). Prócz tych pierwiastków paliwa zawierają tlen (O), azot (N), wodę (H_2O) i części mineralne stanowiące popiół.

Wartość paliwa zależy od ilości energii cieplnej wytwarzającej się podczas spalania. Przy obliczaniu tej energii zakładamy, że spalanie było zupełne, czyli że otrzymane po spaleniu związki chemiczne już są całkowicie niepalne. Tę ilość energii cieplnej, którą otrzymujemy teoretycznie przy spalaniu zupełnym 1 kg paliwa, nazywać będziemy ciepłem spalania. Ciepło spalania zależne jest od składu chemicznego paliwa i według Dulonga

równa się sumie ciepł uzyskanych przy spalaniu się poszczególnych składników palnych paliwa, przy czym od wodoru należy odjąć część niezbędną do zamiany na wodę wszystkiego tlenu zawartego w paliwie.

Ponieważ ciepło spalania 1 kg (C) jest 8100 Kal.

1 kg (H) 34400 „

1 kg (S) 2500 „ ,

zatem otrzymujemy wzór na ciepło spalania (C_{sp}) 1 kg paliwa zawierającego C, H i S kg pierwiastków palnych:

$$C_{sp} = 8100 C + 34400 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S \text{ Kal.} \dots\dots\dots (83)$$

We wzorze tym $\left(H - \frac{O}{8} \right)$ jest to tzw. wolny albo rozporządzalny wodór, gdyż $O/8$ wodoru jest związane z tlenem (O) zawartym w paliwie.

Ciepło spalania przedstawia teoretyczną ilość ciepła, w rzeczywistości bowiem wobec tego, że produktem spalania wodoru jest woda, więc na odparowanie tej wody potrzebna jest pewna ilość ciepła, które zostanie pobrane z ciepła spalania. Ciepło parowania tej wody jest stracone, gdyż najniższa temperatura gazów spalinyowych w urządzeniach technicznych jest znacznie wyższa od 100° .

Po uwzględnieniu ciepła parowania wody wytworzonej podczas spalania otrzymujemy wartość opałową paliwa rozumując, że wartość opałowa $W = C_{sp} - hr$, gdzie h jest to ilość wody utworzonej podczas spalania, a r — ciepło parowania wody. Do obliczeń przyjmuje się, że $r = 600$ Kal.

Jak wiadomo, 1 kg wodoru spalając się tworzy 9 kg wody, zatem przy spalaniu $\left(H - \frac{O}{8} \right)$ kg wodoru powstanie wody $9 \left(H - \frac{O}{8} \right)$ 9 kg, prócz tego paliwo zawiera w 1 kg (w) kg wody pod postacią wilgoci. Ogółem do odparowania jest $9 \left(H - \frac{O}{8} \right) + w$ kg wody, na co zużyje się ciepła $5400 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 600 w$ Kal. Odejmując

tę ilość Kal. od ciepła spalania otrzymujemy wzór na wartość opałową kg paliwa.

$$W = 8100 C + 29000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S - 600 w \dots\dots\dots (84)$$

We wzorze tym C , H , O , S i w są to ciężary w kg składników 1 kg paliwa.

Wzór (84) jest dostatecznie dokładny dla ustalenia wartości opałowej węgla kamiennego, dla innych paliw daje wyniki mniej dokładne.

U w a g a 1 a. Właściwie do odparowania jest $9H + W$ kg wody, gdyż i wodór związany z tlenem paliwa utworzy wodę.

U w a g a 2 a. W angielskim systemie miar wartość opałową paliwa podaje się w B. T. U./lbs.

A więc 1 B. T. U./lbs = 0,556 Kal./kg

i 1 Kal./kg = 1,8 B. T. U./lbs.

Wartość opałową gazów często daje się dla 1 m³ objętości gazu, sprowadzonej albo do warunków fizycznych (0° i 760 mm sł. rt.) i wtedy taki m³ będziemy oznaczać nm³ mówiąc „normalny metr sześcienny gazu“, albo do warunków technicznych (15° i 737,4 mm sł. rt.). Wartość opałową mieszaniny gazów można otrzymać, wg zasady Dulonga, sumując wartości opałowe składników, o ile ich udziały wagowe lub objętościowe są wiadome. Dokładniejsze jednak wyniki otrzymuje się za pomocą spalania próbki paliwa w kalorymetrze.

Metoda określania wartości opałowej za pomocą kalorymetru jest szeroko stosowana dla różnego rodzaju paliw. Dla paliw stałych i płynnych używa się tzw. bomby kalorymetrycznej (pomysłu Berthelota, a ulepszonej przez Mahlera i zwłaszcza Kröckera). Spala się w niej próbkę paliwa w atmosferze tlenu o prężności 20—25 atm., aby mieć pewność, że spalanie się odbyło i odbyło się momentalnie. Próbka waży g_0 kg zwykle 1 g. Wytworzone przy spalaniu ciepło pochłania G kg wody zawartej w kalorymetrze ogrzewając się o Δt° . Część tego ciepła traci się na ogrzanie samej bomby i kalorymetru. Gdyby tej straty nie było, to dodatkowa ilość wody G_0 mogła być ogrzana o te same Δt° .

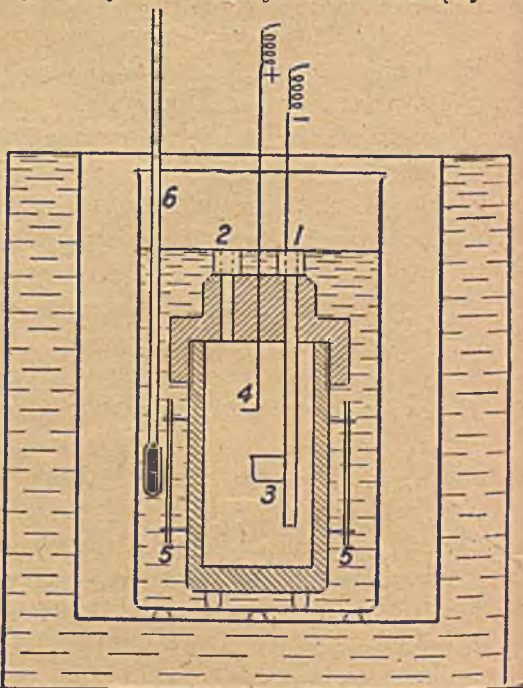
G_0 jest to tzw. wartość wodna kalorymetru. Z powodu strat ciepła na promieniowanie Δt^0 należy powiększyć o Δt_0^0 . Ciepło z 1 kg paliwa równa się

$$Q = \frac{(G + G_0) (\Delta t^0 + \Delta t_0^0)}{g_0} \text{ Kal/kg.}$$

Otrzymaliśmy tu właściwie ciepło spalania, gdyż para wodna powstała przy spalaniu została skroplona i ciepło parowania poszło na podwyższenie temperatury wody w kalorymetrze. Aby otrzymać wartość opałową, należy od Q odjąć 600 h , jak na str. 120.

G_0 można wyznaczyć spalając ciało o znanej wartości opałowej. Dawniej w tym celu spalano cukier trzcinowy, obecnie kwas benzoesowy ($W = 6324$ Kal.).

Bomba kalorymetryczna jest to naczynie ze stali (Rys. 75) pojemności ok. 300 cm^3 , wewnątrz emaliowane i zamknięte pokrywą szczelną. Przez pokrywę wchodzi do bomby dwa przewody — jeden (1) do wprowadzania do bomby tlenu z butli, drugi (2) — do usuwania z bomby powietrza. Oba przewody zamykane są zaworami. Od otworu (1) idzie prawie do dna naczynia rurka doprowadzająca tlen i na niej wisi tygielek porcelanowy (3) na próbce



Rys. 75.

paliwa. Próbkę paliwa jest sprasowana na kształt pastylki i ma wpuszczony w siebie drucik albo nitkę do zaczepienia do przewodu (4). Drugim przewodem jest rurka do tlenu. Włączając prąd spowodujemy raptowne spalanie próbki. Zakreconą bombę wstawia się w naczynie zawierające ~ 2 litry wody, aby bomba zanurzyła się aż po głowice zaworów. Pęcherzyki tlenu wydostające się z bomby byłyby dowodem jej szczelności, która musi być usunięta. W wodzie jest mieszkadło (5—5) i termometr (6) z podziałką na $0,02^\circ$ lub $0,01^\circ$. Dla usunięcia niepożądanego ciepła na zewnątrz cały kalorymetr jest wstawiony w naczynie o podwójnych ściankach wypełnionych wodą, która ma temperaturę pokojową. Przed spalaniem należy notować przez 10 minut temperaturę co minutę (okres wstępny), po włączeniu prądu przez 5—6 minut co pół minuty, a potem — co minutę aż do chwili, kiedy temperatura wody przestanie się podwyższać (okres główny) i jeszcze przez 10 minut co minutę (okres końcowy). Okresy wstępny i końcowy są potrzebne dla stwierdzenia, że żadne uboczne wpływy nie spowodowały wzrostu lub spadku temperatury wody, która w okresie wstępnym powinna być jednakowa, a w końcowym powinna równomiernie spadać.

Przykład. $G = 2000$ g, $G_o = 356$ g, $g_o = 0,9844$ g. Początkowa temperatura wody $16,599^\circ$, najwyższa $19,829^\circ$, $\Delta t = 3,23^\circ$, $\Delta t^\circ = 0,058^\circ$. Wytworzone ciepło $2356 \times 3288 = 7746,5$ kal. (gramowych). Od tego odjąć ciepło spalania nitki, wytwarzania się kwasów itp. $51,8$ kal., zostaje $7694,7$ kal. Na 1 g $7694,7 : 0,9844 = 7816$ kal.

W bombie stwierdzono przy pomocy specjalnego aparatu obecność $0,48$ g wody, co stanowi $48,8\%$ ciężaru węgla. Ciepło na odparowanie tej wody

$$600 \frac{48,8}{100} = 292 \text{ kal.}$$

$$W = 7816 - 292 = 7542 \text{ Kal./kg.}$$

Wartość opałową gazów określa się przy pomocy kalorymetru Junkersa. Gaz spala się w palniku Bunzenowskim. Ciepło wytworzone przy spalaniu gazu pochłania woda podczas przepływu spalin kanałami otoczonymi wodą do wylotu. Objętość gazu V m³, wody ogrzano G kg o Δt° , wtedy

$$C_{sp} = \frac{G \cdot \Delta t^\circ}{V} \text{ Kal/m}^3$$

Powstała w gazach spalinowych woda w ilości (w) kg.

Wartość opałowa gazu

$$W = \frac{G \Delta t^{\circ} - 600 w}{V} \text{ Kal/m}^3$$

Ilość spalonego gazu mierzy się za pomocą gazomierza, a wodę się czerpie i zbiera w kalibrowanych naczyniach. Objętość gazu trzeba zredukować do normalnych warunków fizycznych (0° i 760 mm sł. rt.).

Ciepło spalania i wartość opałowa
ważniejszych ciał palnych
(absolutnie suchych)

	Ciepło spalania		Wartość opałowa		
	1 kg	1 m ³ (w. tech.)	1 kg	1 m ³ (w. tech.)	1 nm ³ (war. iz.)
C	8100				
Antracyt			7800		
Węgiel kamienny			5200—7000		
Koks gazowy			6900		
Węgiel brunatny			4200—5000		
Brykiety z węgla br.			4800—5100		
Torf			3600—4600		
Drzewo			4500		
Nafta			10600		
Benzyna			10500		
Olej gazowy			10000		
Benzol	10000		9590		
Alkohol	7100		6400		
Tlenek węgla CO	2440	2800	2440	2800	3040
Wodór H_2	34400	2800	28700	2360	2565
Metan CH_4	13250	8700	11900	7820	8530
Etylen C_2H_4	12000	13800	11230	12920	14040
Acetylen C_2H_2	12000	12800	11600	12360	13430

§ 45. Ilość powietrza do spalania

Spalanie jest to łączenie się pierwiastków palnych paliwa z tlenem. Przy tej reakcji chemicznej wytwarza się ciepło i światło pod postacią płomienia. Rozpatrzmy bliżej reakcje zachodzące przy paleniu się.

Węgiel łącząc się z tlenem daje dwa związki:

1) $C + O_2 = CO_2$, inaczej

$$1 \text{ mol } C + 1 \text{ mol } O_2 = 1 \text{ mol } CO_2, \text{ to znaczy}$$

$$12 \text{ kg } C + 32 \text{ kg } O_2 = 44 \text{ kg } CO_2 \text{ albo}$$

$$1 \text{ kg } C + 2,667 \text{ kg } O_2 = 3,667 \text{ kg } CO_2.$$

Biorąc stosunek objętościowy otrzymujemy:

$$12 \text{ kg } C + 22,4 \text{ nm}^3 O_2 = 22,4 \text{ nm}^3 CO_2, \text{ co można wyrazić tak: } 1 \text{ kg } C \text{ łącząc się z } \frac{22,4}{12} = 1,867 \text{ nm}^3 O_2 \text{ daje } 1,867 \text{ nm}^3 CO_2.$$

W powyższym związku zaszło całkowite i zupełne spalanie, gdyż otrzymany produkt (CO_2) jest gazem niepalnym.

2) $2 C + O_2 = 2 CO$, inaczej

$$2 \text{ mole } C + 1 \text{ mol } O_2 = 2 \text{ mole } CO,$$

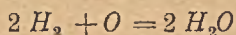
$$24 \text{ kg } C + 32 \text{ kg } O_2 = 56 \text{ kg } CO,$$

$$1 \text{ kg } C + 1,333 \text{ kg } O_2 = 2,333 \text{ kg } CO, \text{ albo}$$

$$1 \text{ kg } C + 0,933 \text{ nm}^3 O_2 = 1,867 \text{ nm}^3 CO.$$

Ten związek zachodzi przy spalaniu niezupełnym, gdyż CO jest gazem palnym.

Wodór z tlenem daje związek:



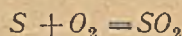
albo $2 \text{ mole } H_2 + 1 \text{ mol } O_2 = 2 \text{ mole } H_2O$

$$4 \text{ kg } H_2 + 32 \text{ kg } O_2 = 36 \text{ kg } H_2O$$

$$1 \text{ kg } H_2 + 8 \text{ kg } O_2 = 9 \text{ kg } H_2O \text{ albo}$$

$$1 \text{ kg } H_2 + 5,6 \text{ nm}^3 O_2 = 11,2 \text{ nm}^3 H_2O.$$

Siarka z tlenem daje związek:



$$1 \text{ mol } S + 1 \text{ mol } O_2 = 1 \text{ mol } SO_2$$

$$32 \text{ kg } S + 32 \text{ kg } O_2 = 64 \text{ kg } SO_2$$

$$1 \text{ kg } S + 1 \text{ kg } O_2 = 2 \text{ kg } SO_2 \text{ albo}$$

$$1 \text{ kg } S + 0,7 \text{ nm}^3 O_2 = 0,7 \text{ nm}^3 SO_2.$$

Mając powyższe związki można obliczyć teoretyczne zapotrzebowanie tlenu (O_{min}) niezbędnego do całkowitego i zupełnego spalania 1 kg paliwa o wiadomym składzie chemicznym, uwzględniając tlen zawarty w paliwie.

A więc

$$O_{min} \text{ kg} = (2,667 C + 8 H_2 + S - O_2) \text{ kg na kg paliwa} . \quad (85)$$

$$\text{ i } O_{min} \text{ m}^3 = \left(\frac{22,4}{12} C + \frac{22,4}{4} H_2 + \frac{22,4}{32} S - \frac{22,4}{32} O_2 \right) \text{ nm}^3 \text{ na kg pal.}$$

$$O_{min} \text{ m}^3 = 22,4 \left[\frac{C}{12} + \frac{H - \frac{O}{8}}{4} + \frac{S}{32} \right] \text{ nm}^3 \text{ na kg pal.} \quad (86)$$

We wzorze na O_{min} często pomija się siarkę ze względu na jej nieznaczną zazwyczaj ilość.

Tlen potrzebny do spalania bierzemy z powietrza, a ponieważ 1 kg powietrza zawiera:

na wagę 23 % tlenu i 77 % azotu lub

na objętość 21 % tlenu i 79 % azotu,

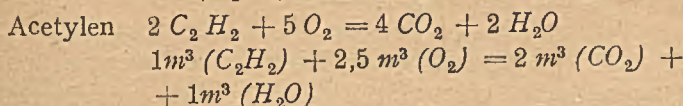
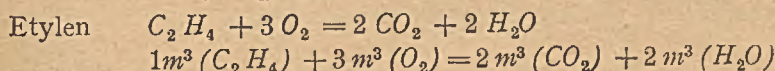
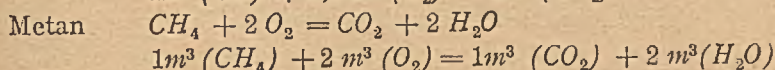
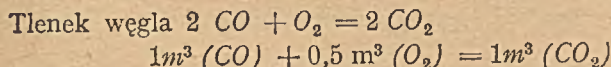
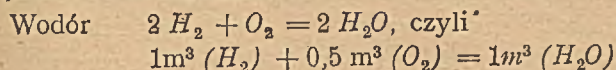
to aby otrzymać żadaną wyżej ilość tlenu, należy rozporządzać ilością powietrza:

$$\text{na wagę } L_{min} = \frac{O_{min} / \text{kg}}{0,23} \text{ kg/kg paliwa} \dots\dots\dots (87)$$

$$\text{na objętość } V_{min} = \frac{L_{min}}{1,293} = \frac{O_{min} \text{ kg}}{0,3} \text{ nm}^3 / \text{kg paliwa, gdyż ciężar}$$

$$1 \text{ nm}^3 \text{ powietrza wynosi } 1,293 \text{ kg.} \dots\dots\dots (88)$$

Przy obliczeniach ilości tlenu do spalania gazów będziemy korzystali z następujących wzorów chemicznych:



Ogólne zapotrzebowanie tlenu do spalania zupełnego gazu, którego składniki mają udziały objętościowe h (wodór), t (tlenek węgla), m (metan), e (etylen) i a (acetylen) i który zawiera tlen o udziale objętościowym q , będzie

$$O_{min} m^3 = (0,5 h + 0,5 t + 2 m + 3 e + 2,5 a - 2) \text{ } nm^3 / nm^3 \text{ gazu.} \dots\dots\dots (89)$$

Odpowiednia ilość powietrza

$$V_{min} = \frac{O_{min} m^3}{0,21} \text{ } nm^3 \text{ powietrza na } nm^3 \text{ gazu} \dots\dots\dots (90)$$

§ 46. Nadmiar powietrza

Ilość powietrza wyliczona w sposób wyżej podany byłaby wystarczająca, aby osiągnąć spalanie zupełne, gdybyśmy byli w możności dostarczyć każdej cząsteczce paliwa odpowiednią ilość tlenu i w odpowiedniej chwili.

W praktyce jest to niemożliwe i wskutek tego doprowadzając do paleniska tylko V_{min} powietrza otrzymamy spalanie niezupełne, a więc połączone z dużymi stratami ciepła. Tak np. węgiel przy niedostatecznej ilości tlenu spali się na CO zamiast na CO_2 , przez co stracimy $8100 - 2440 = 5660$ Kal/kg C, a powstały tlenek węgla uleci niespalony do komina.

Pewien więc nadmiar powietrza jest niezbędny i tym większy, im paliwo jest ściślej, czyli trudniej je przemieszać z powietrzem. Węgiel kamienny w dużych bryłach wymaga największego nadmiaru powietrza, a pył węglowy, paliwo płynne rozpylone lub paliwa gazowe spalają się przy nadmiarze powietrza bardzo niewielkim.

Jeżeli L_{rs} będzie oznaczało rzeczywistą ilość powietrza w kg, niezbędną do zupełnego spalania 1 kg danego paliwa, a L_{min} — takąż ilość powietrza teoretyczną, to

$$\lambda = \frac{L_{rs}}{L_{min}}$$

będziemy nazywali współczynnikiem nadmiaru powietrza. W paleniskach kotłowych λ waha się od 1,1 do 2 zależnie od rodzaju paliwa, a mianowicie:

węgiel kam.	1,5 — 2	koks	1,4 — 1,5
drzewo	1,7 — 2	ropa	1,3 — 1,4
torf	1,8 — 2	gaz, pył wgl.	1,1 — 1,3

Opierając się na analizie gazów spalinowych można określić λ w sposób następujący.

Zamiast brać stosunek L_{rs}/L_{min} , czyli stosunek L_{rs}/L_t , weźmiemy stosunek n_{rs}/n_t , gdzie n_{rs} oznacza objętościowy udział azotu w 1 m³ spalin, znaleziony przy analizie spalin. Wynik będzie ten sam, gdyż azot w spalaniu udziału nie bierze. Brak nam n_t . Lecz analiza wykazała w spalinach $[o]$ m³ tlenu, który mógł się znaleźć tylko z powodu nadmiaru powietrza. Tej ilości $[o]$ m³ tlenu odpowiada $(79/21 o)$ m³ azotu. Zatem

$$n_t = n_{rs} - \frac{79}{21} o$$

Jeżeli więc analiza spalin wykazała obecność $[n]$ części objętościowych azotu i (o) części tlenu, to

$$\lambda = \frac{n}{n - \frac{79}{21} o} \dots \dots \dots (91)$$

Jeżeli jednak analiza spalin wykaże obecność także CO, co jest dowodem niezupełnego spalania, wtedy nie wszystkie tlen znajdujący się w spalinach należy uważać za nadmiar tlenu. Jeżeli spaliny zawierają na objętość $[co]/m^3$ tlenku węgla, to $(co/2) m^3$ tlenu jest potrzebne do spalania CO na CO_2 . Nadmiar tlenu wtedy wynosi $\left(o - \frac{co}{2}\right)$ i współczynnik nadmiaru powietrza λ równa się:

$$\lambda = \frac{n}{n - \frac{79}{21} \left(o - \frac{co}{2}\right)} \dots\dots\dots (92)$$

§ 47. Sprawność paleniska

Prawidłowy przebieg spalania byłby wtedy, gdybyśmy wykorzystali całkowicie wartość opałową paliwa i spalając je przy minimalnym nadmiarze powietrza otrzymali jak najmniej spalin, które byłyby ogrzane do najwyższej możliwej w danych warunkach temperatury.

Wykorzystać w zupełności wartość opałową paliwa w palenisku przemysłowym jest niemożliwe. Zawsze wystąpią większe lub mniejsze straty, wskutek których ciepło wytworzone w palenisku (Q_p) z 1 kg paliwa będzie mniejsze od jego wartości opałowej (W).

Stosunek $\eta = \frac{Q_p}{W}$ nazywamy sprawnością paleniska. Przy czym, dla których $\eta < 1$ są: niecałkowite i niezupełne spalanie i promieniowanie ciepła na zewnątrz paleniska.

Niecałkowite spalanie otrzymujemy, jeżeli drobne paliwo przelatuje przez szczeliny rusztowin przed spaleniem. Strata ta występuje tylko przy paliwie stałym. Dostosowanie konstrukcji paleniska do paliwa, jak i odpowiedni dobór wymiarów paliwa, może tę stratę wydatnie zmniejszyć.

Niezupełne spalanie występuje wskutek braku tlenu lub braku należytej temperatury do zapłonu. Wskutek braku tlenu węgiel spala się na CO, a z powodu niskiej temperatury część węglo-

wodorów powstałych podczas spalania ulata nie spalona albo spala się sam wodór, a węgiel (C) uchodzi pod postacią sadzy. Straty tej uniknąć można tylko przy właściwym nadmiarze powietrza i dobrym przemieszaniu paliwa i gazów wytwarzających się przy spalaniu z powietrzem.

Promieniowanie ciepła do otoczenia obniża ilość ciepła, którą mają pobrać gazy spalinowe, i obniża temperaturę w palenisku. Prawidłowa konstrukcja paleniska, jego dobry stan i należyta obsługa mogą nieco zmniejszyć tę stratę.

Sprawność palenisk przemysłowych waha się w granicach $\eta = 0,85 \div 0,95$.

§ 48. Temperatura zapłonu i spalania

Aby pierwiastki palne paliwa mogły połączyć się z tlenem, czyli ulec spalaniu, trzeba kosztem ciepła pobranego z innego źródła doprowadzić ich temperaturę do temperatury zapłonu. Temperatura ta wg Marcarda jest: dla torfu, drzewa i młodych węgli brunatnych $250^{\circ} \div 300^{\circ}$, dla węgla kamiennego $300^{\circ} \div 500^{\circ}$, dla koksu $650^{\circ} \div 700^{\circ}$, dla gazów palnych $500^{\circ} \div 800^{\circ}$, dla paliw płynnych $300^{\circ} \div 600^{\circ}$.

Wywiązujące się przy spalaniu ciepło podtrzymuje pewną temperaturę — różną w różnych częściach paleniska, której wartość przeciętną będziemy nazywali temperaturą spalania (t), właściwiej temperaturą paleniska.

Teoretyczną temperaturę spalania można otrzymać ze wzoru $W = Gc_p(t - t_o)$, gdzie W jest to wartość opałowa 1 kg paliwa, G — ciężar gazów spalinowych wytworzonych z 1 kg paliwa, t — temperatura spalania, t_o — temperatura powietrza doprowadzanego do paleniska, c_p — ciepło właściwe (średnie) gazów spalinowych.

Temperatura otrzymana z tego wzoru jest teoretyczna, nie uwzględnia bowiem strat przy spalaniu, nadmiaru powietrza i promieniowania ciepła.

Dla otrzymania temperatury rzeczywistej spalania ułożymy dwa równania na ilość ciepła, którą pobrały z paliwa gazy spalinowe.

Jedno równanie; $Q = \eta W (1 - \zeta)$, gdzie ηW jest ilością ciepła wytworzoną z 1 kg paliwa w palenisku, z tej ilości jednak przez promieniowanie część ciepła $\zeta \eta W$ została bezpośrednio przy powstawaniu ciepła pochłonięta przez ogrzewane ciało, np. wodę w kotle, tak że na ogrzanie gazów spalinowych zostało $(1 - \zeta) \eta W$, gdzie ζ współczynnik tzw. promieniowania wewnętrznego $= 0,15 \div 0,30$, zależnie od konstrukcji paleniska.

Drugie równanie: $Q = (1 + \lambda L_{min}) c_p (t - t_o)$, gdzie λ — współczynnik nadmiaru powietrza, L_{min} — teoretyczna ilość powietrza do spalania 1 kg paliwa, $(1 + \lambda L_{min})$ — ciężar gazów spalinyowych z 1 kg paliwa, c_p , t i t_o , jak wyżej.

Z obu tych równań otrzymujemy:

$$t = \frac{\eta W (1 - \zeta)}{(1 + \lambda L_{min}) c_p} + t_o \dots \dots \dots (93)$$

Wartość c_p można obliczyć z równania (31) przyjmując średnie c_p dla poszczególnych gazów jako składników spalin w granicach temperatur od 0° do 1200° z poniższej tabelki.

Gaz	c_p dla 1 kg	C_p dla 1 m ³	
		0° i 760	15° i 737,4
CO ₂	0,265	0,521	0,478
H ₂ O	0,507	0,408	0,374
O ₂	0,235	0,336	0,308
CO, N	0,269	0,337	0,309
Powietrze	0,260	0,336	0,308
H ₂	3,713	0,334	0,307
CH ₄	1,080	0,772	0,707
C ₂ H ₄	0,805	1,009	0,923

Dla spalin z węgla kamiennego c_p bywa: przy $\lambda = 2$ $c_p = 0,26$, przy $\lambda = 1$ $c_p = 0,3$ dla 1 kg spalin; lub przy $\lambda = 2$ $C_p = 0,35$, przy $\lambda = 1$ $C_p = 0,38$ dla 1 m³ spalin.

U w a g a. W paleniskach przemysłowych często zachodzi potrzeba posiadania wyższych temperatur spalania.

Można to uzyskać:

1. przez wdmuchiwanie powietrza przez warstwę paliwa stałego lub gazowego; spalanie wtedy odbywa się na malej przestrzeni i wskutek tego otrzymuje się wyższą temperaturę;
2. stosując do paliwa gazowego podgrzewanie powietrza, np. gazami spalinowymi;
3. spalając paliwo w tlenie, przez co unika się podgrzewania dużych ilości azotu;
4. stosując specjalne dmuchawki, np. tlenowodorową itp.

§ 49. Ilość i skład chemiczny spalin

Mając współczynnik nadmiaru powietrza (λ) otrzymujemy prosty wzór na ilość ciężarową spalin z 1 kg paliwa:

$$G_{kg} = 1 + \lambda L_{min} \dots \dots \dots (94)$$

Chcąc dokładniej wyznaczyć skład i ilość spalin musimy się opierać na analizie spalin (§ 50), która zwykle wykazuje procentową zawartość objętościową dwutlenku węgla (k_s) i tlenu (q) w spalinach suchych przy spalaniu zupełnym.

Zawartość % azotu wypadnie wtedy

$$n = [100 - (k_s + q)] \%$$

Objętość suchych spalin można przedstawić wzorem:

$$V'_{nm} = 22,4 \frac{C}{2} + \frac{79}{21} \lambda O_{min} + \underbrace{\lambda O_{min} - O_{min}}_{\text{nadmiar tlenu}}$$

dwutl. w gla azot

$$\text{albo } V'_{nm} = 22,4 \frac{C}{12} + \left(\frac{100}{21} \lambda - 1 \right) O_{min}$$

Ponieważ 1 kg paliwa zawiera H kg wodoru i w kg wody, musimy uwzględnić w spalinach obecność pary wodnej, której objętość wyniesie

$$22,4 \left(\frac{H}{2} + \frac{w}{18} \right) \text{ m}^3 \text{ na 1 kg paliwa}$$

Całkowita zatem objętość spalin będzie:

$$V_{nm} = 22,4 \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{2} + \frac{w}{18} \right) + \frac{79}{21} \lambda O_{min} + (\lambda - 1) O_{min} \dots (95)$$

azot tlen

W tej objętości jest $22,4 \frac{C}{12} \text{ m}^3$ dwutlenku węgla i $(\lambda - 1) O_{\min}$ tlenu.

A więc procentowa zawartość dwutlenku węgla (k_s) w suchych spalinach:

$$k_s = \frac{22,4 \frac{C}{12} \cdot 100}{22,4 \frac{C}{12} + \left(\frac{100}{21} \lambda - 1 \right) O_{\min}} \% \dots\dots\dots (96)$$

Procentowa zawartość tlenu (q) w suchych spalinach:

$$q = \frac{(\lambda - 1) O_{\min} \cdot 100}{22,4 \frac{C}{12} + \left(\frac{100}{21} \lambda - 1 \right) O_{\min}} \% \dots\dots\dots (97)$$

Ilość dwutlenku węgla zwiększa się w miarę zmniejszania się współczynnika nadmiaru powietrza (λ). Przy $\lambda = 1$ otrzymuje się $k_{s, \max}$

$$k_{s, \max} = \frac{\frac{22,4 \cdot C}{12} \cdot 100}{22,4 \frac{C}{12} + \frac{79}{21} O_{\min}} \% = \frac{100 C}{C + 2 O_{\min}} \% \dots\dots (98)$$

Pominęliśmy przy wyprowadzaniu powyższych równań SO_2 , zawartość azotu w paliwie i pary wodnej w powietrzu użytym do spalania, gdyż związki te wywierają na wyniki wpływ bardzo mały oraz przyjęliśmy, że spalanie jest zupełne, czyli że w spalinach nie ma CO.

W praktyce w zagadnieniach dotyczących spalin szeroko jest stosowana metoda wykreślna.

W wypadku spalania zupełnego metoda ta pozwala na podstawie posiadanej zawartości CO_2 ustalić zawartość w spalinach O_2 oraz wyznaczyć λ .

W razie spalania niezupełnego przy pomocy wykresu będziemy mogli z czterech wielkości (CO_2 , O_2 , CO i λ) mając dwie, zwykle CO_2 i O_2 , ustalić CO i λ .

Zasadę metody wykreślnej i sposób korzystania z niej przedstawimy na przykładzie.

Paliwo — węgiel kamienny: $C = 75\%$, $H_2 = 6\%$, $O_2 = 8\%$ i $H_2O = 4\%$.

Analiza spalin wykazała dwutlenku węgla $k_z = 13\%$ i tlenu $q = 6\%$ na objętość w nm^3 .

Podstawę wykresu AB (Rys. 76), na której odmierzać będziemy $\% O_2$, dzielimy na 21 części równych, gdyż najwyższa $\%$ zawartość tlenu w spalinach (przy $\lambda = \infty$) wynosić może tyle, co w powietrzu (na objętość), tj. 21%.

Na osi rzędnych AC odmierzamy tyle części równych, ile wynosi najwyższa zawartość CO_2 w spalinach (przy $\lambda = 1$), którą obliczymy z równania (98) wyliczywszy przedtem O_{min} z równania na str. 126.

$$O_{min} = 22,4 \left[\frac{C}{12} + \frac{H - \frac{O}{8}}{4} \right] = 22,4 \left[\frac{0,75}{12} + \frac{0,06 - \frac{0,08}{8}}{4} \right] = 1,68 \text{ nm}^3$$

$$k_{zmax} = \frac{100 \cdot 0,75}{0,75 + 3,36} = 18,2\%$$

Jak widać z przebiegu czynności, dla każdego rodzaju paliwa musi być sporządzany oddzielny wykres.

Zatem na osi AC odmierzamy 18,2 części równych odcinkom na osi AB . Łączymy C z B i dzielimy odcinek CB na 10 części nierównych odpowiednio do wartości k i q otrzymanych ze wzorów (96) i (97) po podstawieniu zamiast $\frac{1}{\lambda} = 1, 0,9, 0,8, 0,7$ itd.

Dla poprowadzenia osi dla CO niezbędne jest wyliczenie procentowej zawartości w spalinach CO i O_2 przy założeniu, że mimo doprowadzenia tlenu w ilości jak poprzednio, tj. λO_{min} wszystek węgiel (C) został spalony na CO zamiast na CO_2 . Spalanie pozostałych składników palnych przebiega bez zmiany.

Przy takim założeniu teoretyczna ilość tlenu do spalania 1 kg paliwa równa się:

$$\Omega_{min} = 22,4 \frac{C}{12,2} + 22,4 \frac{H - \frac{O}{8}}{2,2} = 0,933 C + 5,6 \left(H - \frac{O}{8} \right) \text{ m}^3$$

Objętość suchych spalin z 1 kg paliwa:

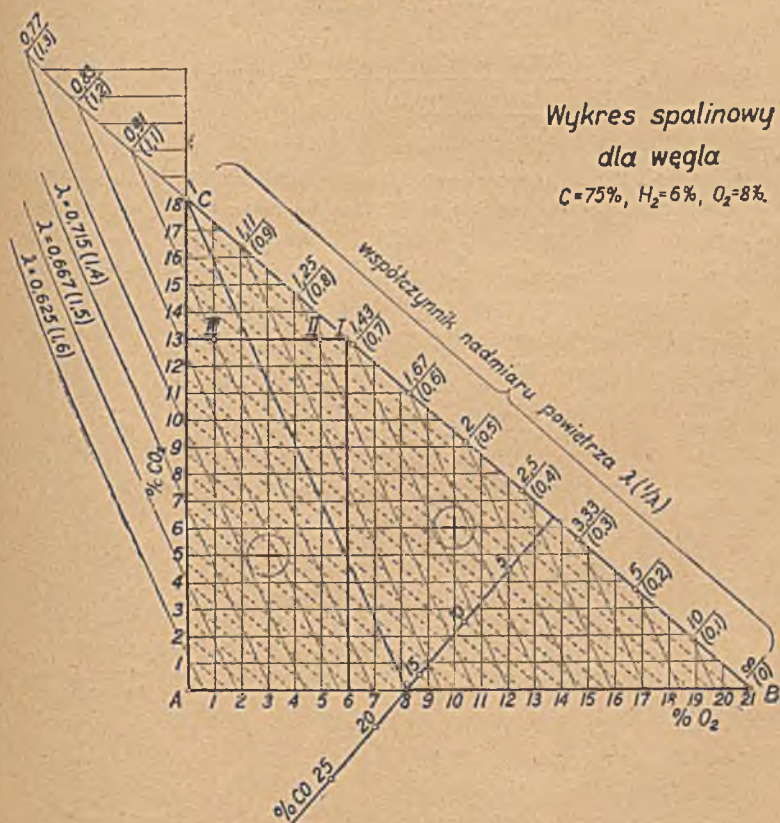
$$V' = 22,4 \frac{C}{12} + \frac{79}{21} \lambda O_{min} + \underbrace{\lambda O_{min} - \Omega_{min}}_{\text{nadmiar tlenu}}$$

$\frac{79}{21}$ — objętość suchych spalin z 1 kg powietrza
 λO_{min} — ilość tlenu doprowadzona do spalania
 Ω_{min} — ilość tlenu zużyta na spalanie

$$V' = 22,4 \frac{C}{12} + \frac{100}{21} \lambda O_{min} - \Omega_{min}$$

Procentowa zawartość w suchych spalinach tlenku węgla (t)

$$t_n = \frac{22,4 \frac{C}{12} \cdot 100}{22,4 \frac{C}{12} + \frac{100}{21} \lambda O_{min} - \Omega_{min}} \dots \dots \dots (99)$$



Rys 76

Procentowa zawartość w suchych spalinach tlenu (q_n)

$$q_n = \frac{100 (\lambda O_{min} - \Omega_{min})}{22,4 \frac{C}{12} + \frac{100}{21} \lambda O_{min} - \Omega_{min}} \% \dots \dots \dots (100)$$

Z tych równań (99) i (100) obliczymy t_n i q_n przy $\lambda = 1$.

Przedtem należy mieć Ω_{min} .

$$\Omega_{min} = 0,933 \cdot 0,75 + 5,6 \cdot 0,05 = 0,98 \text{ nm}^3$$

$$t_n = \frac{22,4 \cdot \frac{0,75}{12} \cdot 100}{22,4 \cdot \frac{0,75}{12} + \frac{100}{21} \cdot 1,68 - 0,98} = 16,7\% \text{ (CO)}$$

$$q_n = \frac{100 (1,68 - 0,98)}{22,4 \cdot \frac{0,75}{12} + \frac{100}{21} \cdot 1,68 - 0,98} = 8,3\% \text{ (O}_2\text{)}$$

Na odcinku AB oznaczamy punkt D odpowiadający 8,3% O_2 , prowadzimy $DE \perp CB$ i dzielimy odcinek DE na 16,7 części stosownie do wartości k i q z równań (99) i (100) przy $\frac{1}{\lambda} = 1, 0,9, 0,8, 0,7$ itd.

Proste odpowiadające 13% zawartości CO_2 i 6% O_2 otrzymanych z analizy gazów przecinają się na przeciwprostokątnej CB , a więc zawartość $CO = 0$ spalanie zupełne, $1/\lambda = 0,73$, czyli $\lambda = 1,37$.

Mając λ obliczymy $V'm^3$ (objętość suchych spalin)

$$V' = 22,4 \frac{C}{12} + \frac{79}{21} \lambda O_{min} + \lambda O_{min} - O_{min} = 22,4 \frac{C}{12} + O_{min} \left(\frac{100}{21} \lambda - 1 \right); \quad V' = 1,4 + 9,28 = 10,68 \text{ nm}^3$$

Spaliny zatem zawierają:

	Ciężar
$CO_2 = 13\% = 0,13 \cdot 10,68 = 1,39 \text{ nm}^3$	2,73 kg
$O_2 = 6\% = 0,06 \cdot 10,68 = 0,64 \text{ nm}^3$	0,92 kg
$N_2 = 81\% = 0,81 \cdot 10,68 = 8,65 \text{ nm}^3$	10,85 kg
100%	10,68 nm ³
	14,50 kg

Dochodzi pary wodnej $22,4 \left(\frac{H}{2} + \frac{w}{18} \right)$,

gdzie (w) odpowiada 4% H_2O ; $22,4 \left(\frac{0,06}{2} + \frac{0,04}{18} \right) = 0,72 \text{ nm}^3$

Ogólna objętość spalin $10,68 + 0,72 = 11,4 \text{ nm}^3$

„ ciężar „ $14,5 + 0,58 = 15,08 \text{ kg}$.

Gdyby przy 13% CO_2 analiza wykazała 5% O_2 , otrzymalibyśmy na wykresie punkt II, któremu odpowiada $1/\lambda = 0,8$ i $\lambda = 1,25$. Spalanie niezupełne (1,5% CO), ale nie dla braku powietrza, lecz dla innych przyczyn (niedostateczna temperatura, niedostateczne przemieszanie się paliwa z powietrzem).

Gdybyśmy zaś przy 13% CO_2 mieli tlenu np. 1%, otrzymalibyśmy punkt III, $1/\lambda = 1,1$, czyli $\lambda = 0,91$. Niedostateczna ilość powietrza, spalanie niepełne, 6,5% CO .

Prosta CD dzieli wykres na dwa obszary; jeden oznaczony $+$ odpowiada nadmiarowi powietrza, drugi oznaczony $-$ odpowiada niedomiarowi powietrza.

Opisany wykres nosi nazwę wykresu Ostwalda.

§ 50. Analiza spalin

Analiza spalin ma na celu stwierdzenie w spalinach procentowej zawartości objętościowej. CO_2 , O_2 , CO i N_2 . Suma $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{CO}$ łącznie z wytworzoną parą wodną powinna dać 21 % objętości spalin, reszta, czyli 79 % — azot. Ponieważ para wodna po skropleniu się zajmuje objętość bardzo małą, przeto jej miejsce zajmują pozostałe gazy i stosunek % ich się powiększa. Otrzymujemy zatem azotu często więcej niż 79 %.

Aparaty do analizy spalin dzielimy na automatyczne, które służą głównie do kontroli przebiegu spalania, i na nieautomatyczne, z których najczęściej jest używany aparat Orsata oparty na pochłanianiu składników spalin.

Aparat Orsata składa się (Rys. 77):

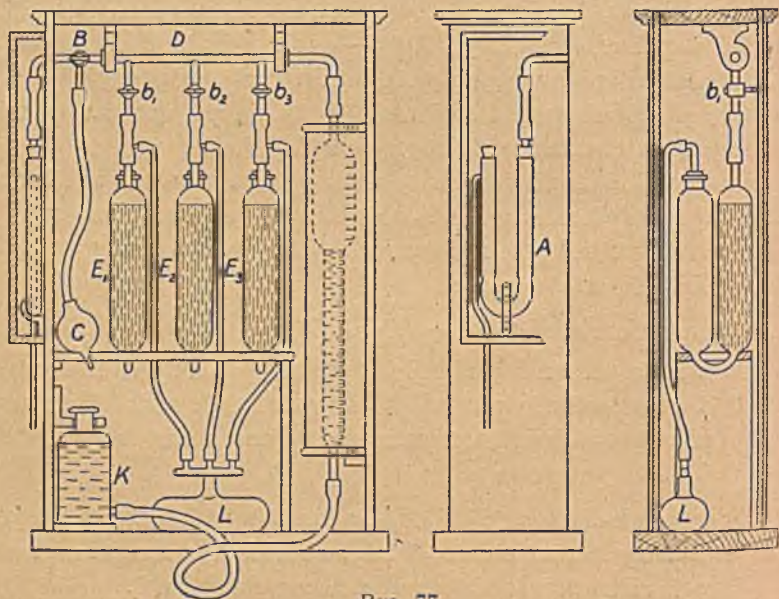
- 1) z rurki szklanej zagiętej (A) do czerpania spalin,
- 2) z rurki szklanej prostej (D) do połączenia rurki A z miernicą i chłonicami, zaopatrzonej w kurek trzydrogowy (B) i ssawkę gumową (C),
- 3) z trzech chłonic (E_1 E_2 E_3) każda w kształcie litery U , połączonych kurkami (b_1 , b_2 , b_3) z rurką D , a drugim końcem połączonych wspólnie z workiem gumowym L .
- 4) z miernicy w kształcie rury podzielonej na cm^3 , połączonej jednym końcem z rurką D a drugim z butelką K .

Przygotowanie aparatu do analizy:

- 1) napełnienie chłonic odczynnikami do połowy ich pojemności, pierwszej chłonicy do pochłaniania CO_2 — ługiem potasowym, drugiej — do pochłaniania tlenu roztworem wodnym

kwasu pyrogallusowego z dodatkiem ługu potasowego i trzeciej — do pochłaniania tlenku węgla amoniakalnym roztworem chlorku miedziawego,

- 2) napełnienie wodą butelki *K* do takiej wysokości, aby poziom wody w butelce stojącej na stole, na którym spoczywa aparat, był równy z kreską *O* na miernicy,
- 3) zamknąć kurki b_1 , b_2 i b_3 i podnosząc butelkę *K* do góry przy otwartym kurku *B* usunąć powietrze z miernicy i wypełnić ją wodą z butelki *K*,



Rys. 77

- 4) zamknąć kurek *B*, otworzyć b_1 i przez opuszczanie butelki *K* spowodować podniesienie się odczynnika w chłonicy E_1 do kreski poniżej kurka b_1 i zamknąć kurek b_1 , płyn pozostanie na kresce,
- 5) to samo z chłonicą E_2 i E_3 ,

- 6) przy zamkniętych kurkach B , b_1 , b_2 i b_3 napełnić miernicę wodą do kreski 100 cm^3 i założyć zacisk sprężynowy na rurze gumowej łączącej miernicę z butelką, woda zostanie na kresce 100 w miernicy,
- 7) połączyć rurkę A przy pomocy rurki gumowej z rurką założoną w kanale spalinowym przed zasuwą kominową.

Przebieg analizy: 1) otworzywszy kurek B , przy pomocy ssawki gumowej wielokrotnie naciskanej usunąć powietrze z rurki D i wypełnić ją spalinami, po czym zdjąć zacisk z rurki łączącej miernicę z butelką, opuścić butelkę, żeby woda w miernicy opadła do kreski O i zamknąć kurek B , rurka D i miernica są napełnione spalinami w ilości 100 cm^3 ; 2) otworzyć kurek b_1 i podnosząc kilkakrotnie butelkę K , przepompować spaliny do chłonicy E_1 , gdzie zostanie pochłonięty CO_2 , po czym doprowadzić odczynnik znów do kreski i zamknąć kurek b_1 , następnie zrównać poziomy wody w miernicy i w butelce K i odczytać, jak wysoko woda w miernicy podniosła się powyżej zera, będzie to od razu $\%$ stosunek pochłoniętego CO_2 ze spalin; 3) to samo z chłonicą E_2 i E_3 . Analizowanie skończone.

Zwykle bierze się analizy na CO_2 i O_2 określając CO za pomocą wykresu.



SKOROWIDZ ALFABETYCZNY

	Str.
Aparat Orsata	137
Atmosfera fizyczna	12
„ metryczna	12
Ciepły równoważnik pracy	11
Ciepło parowania, wewnętrzne i zewnętrzne	78
Ciepło właściwe mieszaniny	48
„ „ przy $v = \text{const.}$	46
„ „ przy $p = \text{const.}$	46
Ciepło spalania	119
Ciężar powietrza wilgotnego	111
„ właściwy	12
Czynnik termodynamiczny	11
Dławienie gazów	65
„ pary	96
Energia wewnętrzna	14
„ „ cieczy	78
„ „ pary suchej nasyconej	78
„ „ pary mokrej	78
Entalpia	48
„ cieczy	77
„ pary suchej nasyconej	77
„ pary mokrej	77
„ pary przegrzanej	92
Entalpia powietrza wilgotnego	111
Entropia	32
„ cieczy	79
„ pary suchej nasyconej	79
„ pary mokrej	79
„ pary przegrzanej	92
Gaz doskonały	38

	Str.
Higrometr Regnaulta	110
Ilość wypływu	116
Kaloria	13
Kalorymetr Mahlera	122
Krzywe graniczne	84
„ stałej suchości	84
Mechaniczny równoważnik ciepła	11
Mol	41
Nadprężność	13
Obieg	22
„ Carnota	27
„ „ dla gazów	66
„ „ dla pary	98
„ Rankina	100
„ Meyera	102
„ w silniku spalin. wybuchow.	68
„ „ „ „ Diesla	70
„ „ sprężarce gazowej	72
Objętość właściwa	12
„ mola	41
„ pary nasyconej	76
„ spalin	132
Odwracalność zmian	20
Paliwa	119
Para nasycona	75
„ przegrzana	76, 91
Perpetuum mobile 1 rodzaju	23
„ „ 2 rodzaju	25
Pierwsze równanie termodynamiki 1 postać	15
„ „ „ 2 postać	50
Pozorny ciężar cząsteczkowy mieszaniny	44
Praca zewnętrzna	14
„ techniczna	49
Prawo równoważn. ciepła i pracy	10
„ Gay-Lussaca	38
„ Boyle-Mariotte'a	39
„ Avogadry	41
„ Daltona	44
„ Joule-Thomsona	48
Prędkość wypływu pary	115
„ krytyczna	116

	Str.
Prężność	12
„ cząstkowa składn. miesz.	45
Prężność krytyczna wypływu	116
Próżnia (vacuum)	13
Przechładzanie pary	108
Przegrzewanie cieczy	108
Równanie stanu	15
„ „ gazów	40
„ „ mieszaniny	44
„ Clapeyrona	42
Równania Poissona	58
Silnik parowy doskonały	97
Spalanie	125
„ gazów	127
Spółczynnik nadmiaru powietrza	128
Spółrządne termodynamiczne	12
Sprawność silnika cieplnego	25
„ „ odwracalnego i nieodwracalnego	25, 26
„ obiegu Carnota	28
„ silnika parowego teoret.	104
„ „ „ rzeczyww.	105
„ indykowana	106
„ efektywna	106
„ ogólna	106
„ całkowita	106
„ paleniska	129
Stan ciągłości gazowociekłej	107
Straty w silniku parowym rzeczyw.	105
Suchość pary	77
Tablice:	
gazów	47
$\frac{P_1}{P_2} \frac{V_2}{V_1} i \frac{T_1}{T_2}$ przy zmianie adiab.	61
pary wodnej nasyconej	83
ciepła właściw. pary przegrzanej	93
temperatur i prężności krytycznych	107
prężności pary wodnej zawartej w powietrzu	110
ciepło spalania i wartości opałowych	124
ciepło właściw. gazów przy spalaniu	131
Temperatura zapłonu	130
„ paleniska	131
„ wrzenia	75

ZADANIA

TREŚĆ ZADAŃ

	Str.
1. Równowartość ciepła i pracy, pierwsze równanie termodynamiki. Sprawność silnika	149
2. Prawo Gay-Lussaca i Boyle-Mariotte'a. Równanie stanu gazów . .	153
3. Mol, mieszaniny gazów, ciepło właściwe gazów	159
4. Zmiany stanu gazów	170
5. Obiegi	189
6. Para nasycona	204
7. Zmiany stanu pary nasyconej	209
8. Para przegrzana	219
9. Silnik parowy teoretyczny	229
10. Wilgotność powietrza	235
11. Wpływ pary	239
12. Spalanie	241

1. Równoważność ciepła i pracy, pierwsze równanie termodynamiki — Sprawność silnika (§ 1 — § 4)

Zadanie 1

Jaki jest teoretyczny wydatek ciepła w ciągu godziny na pracę silnika o mocy : a) 1 KM,
b) 1 KW ?

Rozwiązanie

a) $1 \text{ KM} = 75 \text{ kgm/sek.}$

Szukamy $Q = AL$

$$L = 75 \cdot 60 \cdot 60 = 270\,000 \text{ kgm}$$

$$Q_{KM} = \frac{270000}{427} = \sim 632 \text{ kal.}$$

$$\text{b) } 1 \text{ KWh} = \frac{1 \text{ KWh}}{0,736}.$$

$$\text{Zatem } Q_{KW} = \frac{632}{0,736} = \sim 860 \text{ kal.}$$

Zadanie 2

a) Ile teoretycznie pracy można otrzymać w silniku zużywając 1,756 Kal?

b) Jakiej mocy silnik zużywa teoretycznie powyższą ilość ciepła na sekundę ?

Rozwiązanie

a) Szukamy $L = \frac{Q}{A}$

$$L = 427 \cdot 1,756 = 750 \text{ kgm}$$

b) $750 \text{ kgm/sek.} = 10 \text{ KM}$

$$1 \text{ KW} = \sim 1,36 \text{ KM, to } 10 \text{ KM} = 7,36 \text{ KW.}$$

Zadanie 3

Kocioł silnika parowego o mocy 50 KM zużywa na godzinę 45 kg węgla o wartości opałowej 6800 Kal/kg. Wyliczyć, jaki % wartości opałowej węgla został w silniku przetworzony na pracę.

Rozwiązanie

Równowartość cieplna pracy silnika na godzinę: $632 \text{ Kal} \times 50 = 31600 \text{ Kal.}$ (energia uzyskana).

Rozchód ciepła w kotle: $6800 \text{ Kal} \times 45 = 306000 \text{ Kal.}$ (energia włożona).

Pierwszy iloczyn stanowi $\frac{31600 \cdot 100}{306000} = 10,3 \%$ iloczynu drugiego, czyli sprawność silnika $\eta = 0,103$.

U w a g a. Sprawnością silnika będziemy nazywali stosunek energii w nim uzyskanej do włożonej.

Zadanie 4

Stukonny silnik parowy wraz z kotłem pracuje ze sprawnością $\eta = 0,12$. Ile należy spalić pod kotłem torfu na godzinę, jeżeli wartość opałowa torfu jest 3600 Kal/kg ?

Rozwiązanie

$$\eta = 0,12 = \frac{Q \text{ uzyskane}}{Q \text{ włożone}}$$

$$Q \text{ uzyskane} = 632 \text{ Kal} \times 100 = 63200 \text{ Kal/godz.}$$

$$Q \text{ włożone} = \frac{Q \text{ uzysk.}}{0,12} = \frac{63200}{0,12} = 526700 \text{ Kal/godz.}$$

$$\text{Rozchód torfu } B = \frac{526700}{3600} = 146,3 \text{ kg/godz.}$$

Zadanie 5

Jakiej mocy silnik będzie potrzebował na godzinę 80 kg ropy o wartości opałowej 10500 Kal/kg, jeżeli sprawność całego urządzenia tego silnika jest $\eta = 0,15$?

Rozwiązanie

$$Q \text{ włoż.} = 10500 \text{ Kal} \times 80 = 840000 \text{ Kal/godz.}$$

$$Q \text{ uzysk.} = Q \text{ wł.} \cdot \eta = 840000 \cdot 0,15 = 125000 \text{ Kal/godz.}$$

$$N = \frac{126000}{632} = \sim 200 \text{ KM}$$

Zadanie 6

Na 1 tn surowca otrzymuje się z wielkiego pieca niewyzyskanych 2400 m³ gazu o wartości opałowej 900 Kal/m³. Ile energii mechanicznej można uzyskać z tego gazu, jeżeli wielki piec ma produkcję 250 tn surowca na dobę i gaz spala się w silnikach spalinyowych o sprawności ogólnej $\eta = 0,18$.

Rozwiązanie

$$Q \text{ wł.} = \frac{900 \cdot 2400 \cdot 250}{24 \cdot 60 \cdot 60} = 6250 \text{ Kal/sek.}$$

$$Q \text{ uzysk.} = Q \text{ wł.} \cdot \eta = 6250 \cdot 0,18 = 1125 \text{ Kal/sek.}$$

$$N = \frac{1125 \times 427}{75} = 6400 \text{ KM}$$

U w a g a . Można rozwiązać inaczej korzystając z wyników, otrzymanych w zadaniu 1.

Zadanie 7

Wyrazić słowami treść pierwszego równania termodynamiki zakładając, że :

a) $\Delta U = 0$,

b) $\Delta L = 0$,

c) $\Delta Q = 0$.

Rozwiązanie

Pierwsze równanie termodynamiki $\Delta Q = \Delta U + A \Delta L$

a) Jeżeli $\Delta U = 0$, to $\Delta Q = A \Delta L$, czyli ciepło zostało całkowicie przetworzone tylko na pracę.

b) Jeżeli $\Delta L = 0$, to $\Delta Q = \Delta U$, czyli ciepło zostało całkowicie przetworzone tylko na energię wewnętrzną.

c) Jeżeli $\Delta Q = 0$, to

albo $\Delta U = -A \Delta L$, czyli zaszedł wzrost energii wewnętrznej kosztem pracy bez wydatku ciepła,

albo $A \Delta L = -\Delta U$, czyli została uzyskana praca bez wydatku ciepła, a kosztem energii wewnętrznej.

Zadanie 8

Wyrazić w kg/m^2 ciśnienie atmosferyczne wynoszące 750 mm sł. rt. przy $t = 10^\circ$.

Rozwiązanie

Wiadomo, że 10^4 kg/m^2 odpowiada 735,5 mm sł. rt. przy 0° . Zredukujemy 750 mm sł. rt. do $t = 0^\circ$. Będzie to ciśnienie

równe $\frac{750}{(1 + \alpha \cdot 10)}$, gdzie α — praktyczny współczynnik roz-

szerzalności rtęci mieszczącej się w szklanej rurce barometrycznej, a więc współczynnik uwzględniający również i rozszerzalność szkła. Obliczyć go można wiedząc, że 735,5 mm sł. rt. przy 0° jest równoważne 737,4 mm sł. rt. przy 15° , czyli $735,5 (1 + \alpha \cdot 15) = 737,4$, skąd $\alpha = 0,000172$.

Wtedy $\frac{750}{(1 + \alpha \cdot 10)} = 748,7 \text{ mm sł. rt. przy } 0^\circ$.

Jeżeli 735,5 mm sł. rt. przy 0° odpowiada 10^4 kg/m^2 , to 748,7 mm sł. rt. przy 0° odpowiada $x = \frac{748,7 \cdot 10^4}{735,5} = 10180 \text{ kg/m}^2$.

2. Prawo Gay-Lussaca i Boyle-Mariotte'a — Równanie stanu gazów (§ 16)

Zadanie 9

Obliczyć objętość właściwą i ciężar właściwy powietrza (suchego): a) przy 0° i 1 ata,
b) przy 0° i 1 Ata,
c) przy 15° i 1 ata.

Rozwiązanie

$$pv = RT; \quad v = \frac{RT}{p}.$$

$$\text{a) } v = \frac{29,27 \times 273}{10^4} = 0,789 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\gamma = \frac{1}{v} = \frac{1}{0,789} = 1,268 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{b) } v = \frac{29,27 \times 273 \times 735,5}{760} = 0,773 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\gamma = \frac{1}{0,773} = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{c) } v = \frac{29,27 \times 288}{10^4} = 0,843 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\gamma = \frac{1}{0,843} = 1,186 \text{ kg/m}^3$$

Zadanie 10

Podgrzewacz powietrza do paleniska kotłowego podgrzewa je od $+25^{\circ}$ do $+150^{\circ}$. W jakim stosunku powiększy się objętość powietrza po ogrzaniu?

Rozwiązanie

Mamy dwa stany:

$$1. \quad p - V_1 - T_1$$

$$2. \quad p - V_2 - T_2$$

Wobec $p = \text{const.}$ zastosujemy prawo Gay-Lussaca

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{423}{298} = 1,45.$$

Zadanie 11

Rozchód gazu w silniku gazowym wynosi 1 m^3 (0° i 760 mm sł. rt.) na 1 KM/godz. Ile silnik zużywa gazu przy $+20^\circ$ i przy 740 mm sł. rt?

Rozwiązanie

Zatrzymując temperaturę 0° prężność zmniejszam z 760 mm do 740 mm sł. rt. Na zasadzie prawa Boyle-Mariotte'a otrzymuję :

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

$$760 \cdot 1 = 740 \cdot V_2 \quad V_2 = 1,027 \text{ m}^3$$

Następnie przy $p = 740 \text{ mm}$ sł. rt. przechodzę do temperatury $+20^\circ$. Na zasadzie prawa G. L. mam :

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} \quad V_3 = \frac{1,027 \times 293}{273} = 1,1 \text{ m}^3$$

U w a g a. Bezpośredni sposób rozwiązania za pomocą równania stanu gazów — patrz zadania 16, 17, 18.

Zadanie 12

Obliczyć objętość $0,42 \text{ kg}$ powietrza (suchego) o prężności 1 Ata i temperaturze $+35^\circ$.

Rozwiązanie

$$V = \frac{GRT}{p}, \quad T = 308^\circ$$

$$V = \frac{0,42 \times 29,27 \times 308}{1,0333} = 0,367 \text{ m}^3$$

albo zważywszy, że 1 Ata = $\frac{760}{735,5}$ ata przy 0°,

$$V = \frac{0,42 \times 29,27 \times 308 \times 735,5}{760 \times 10^4} = 0,367 \text{ m}^3$$

Zadanie 13

Obliczyć stałą gazową (R) dla powietrza, mając że 1 nm^3 (tj. przy 0° i 760 mm sł. rt.) powietrza waży 1,293 kg.

Rozwiązanie

Mam tu prężność 1 Ata, a w kg/m^2 $p = \frac{760}{735,5} \times 10^4$. Jeżeli

$\gamma_{\text{nm}^3} = 1,293 \text{ kg/m}^3$, to $v = \frac{1}{1,293} = 0,773 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Po podstawieniu do równania stanu

$$\frac{760}{735,5} \times 10^4 \times 0,773 = R \times 273$$

$$R = 29,27$$

albo od razu

$$10333 \times 0,773 = R \times 273$$

$$R = 29,27$$

Zadanie 14

Obliczyć prężność powietrza, którego 0,46 kg zajmuje 44 l i którego temperatura jest 15°.

Rozwiązanie

$$p = \frac{RTG}{V}; \quad p = \frac{29,27 \times 288 \times 0,46}{0,044} =$$

$$= 88200 \text{ kg/m}^2 = 8,82 \text{ ata.}$$

Zadanie 15

Wyliczyć ciężar tlenu zawartego w butli w ilości 40 l i o prężności 150 ata i temperaturze 15°.

Rozwiązanie

$$G = \frac{pV}{RT}; \quad G = \frac{150 \times 10^4 \times 0,04}{26,5 \times 288}$$

$$G = 7,86 \text{ kg}$$

Zadanie 16

Wentylator ma wtłaczać do wielkiego pieca przy -10° i 750 mm sł. rt. 500 m³ powietrza na minutę, aby piec otrzymał pewną wagowo stałą ilość tlenu. Wyliczyć, jaka ma być wydajność wentylatora, aby w najgorszych warunkach swej pracy, tj. przy $+25^\circ$ i 720 mm sł. rt., dostarczał tę samą ilość tlenu.

Rozwiązanie

W zadaniu tym chodzi o wyliczenie, jaką ilość powietrza (w m³) wentylator ma wtłaczać przy $+25^\circ$ i 720 mm sł. rt.

Mamy dwa stany:

$$(1) \quad p_1 = 750 \text{ mm sł. rt.} \quad V_1 = 500 \text{ m}^3 \quad T_1 = 263^\circ$$

$$(2) \quad p_2 = 720 \text{ mm sł. rt.} \quad V_2 = x \quad T_2 = 298^\circ$$

$$\frac{p_1 V_1}{p_2 V_2} = \frac{GRT_1}{GRT_2} \quad \text{skąd} \quad V_2 = V_1 \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1}$$

$$V_2 = 500 \frac{750 \cdot 298}{720 \cdot 263} = \sim 591 \text{ m}^3/\text{min.}$$

Zadanie 17

W przestrzeni dawkowej silnika Diesla mamy 0,046 kg powietrza zajmującego 4,4 l i sprężonego do 36 ata. Jaka jest temperatura powietrza?

Rozwiązanie

Z równania stanu gazów :

$$T = \frac{pV}{GR} = \frac{36 \times 10^4 \times 0,0044}{0,046 \times 29,27} = 1176^\circ$$

$$t = 1176 - 273 = 903^\circ.$$

Zadanie 18

Do spalania 1 kg węgla w palenisku kotłowym potrzeba 8 m³ powietrza przy 0° i 760 mm sł. rt. Jaka będzie objętość tego powietrza przy 16° i 740 mm sł. rt.?

Rozwiązanie

Mamy dwa stany :

$$(1) \quad p_1 = 760 \text{ mm sł. rt.} \quad V_1 = 8 \text{ m}^3 \quad T_1 = 273^\circ$$

$$(2) \quad p_2 = 740 \text{ mm sł. rt.} \quad V_2 = x \quad T_2 = 289^\circ$$

$$V_2 = V_1 \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} = 8 \frac{760 \cdot 289}{740 \cdot 273} = 8,7 \text{ m}^3$$

Zadanie 19

Do spalania 1 kg ropy w palenisku kotłowym potrzeba 15 m³ powietrza przy 25° i 1 ata. Jaka będzie objętość tego powietrza w nm³ ?

Rozwiązanie

Mamy dwa stany :

$$(1) \quad p_1 = 10^4 \cdot 1,0333 \text{ kg} \quad V_1 = x \quad T_1 = 273^\circ$$

$$(2) \quad p_2 = 10^4 \text{ kg} \quad V_2 = 15 \text{ m}^3 \quad T_2 = 298^\circ$$

$$V_1 = V_2 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} = 15 \frac{273}{1,0333 \times 298} = 13,3 \text{ nm}^3$$

Zadanie 20

Wyliczyć ciężar właściwy azotu przy ciśnieniu atmosferycznym 720 mm sł. rt. i temperaturze 50°, jeżeli dla azotu

$$\gamma_{(0^\circ, 760)} = 1,251.$$

Rozwiązanie

Mamy dwa stany :

$$(1) \quad p_1 = 760 \text{ mm} \quad v_1 \quad T_1 = 273^\circ$$

$$(2) \quad p_2 = 720 \text{ mm} \quad v_2 \quad T_2 = 323^\circ$$

$$p_1 v_1 = RT_1, \quad p_2 v_2 = RT_2. \quad \text{Stąd } \frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}; \quad \text{lecz } v_1 = \frac{1}{\gamma_1}$$

$$\text{i } v_2 = \frac{1}{\gamma_2}, \quad \text{to } \frac{p_1}{T_1 \gamma_1} = \frac{p_2}{T_2 \gamma_2}$$

$$\text{Więc } \gamma_2 = \gamma_1 \frac{T_1 p_2}{T_2 p_1} = \frac{1,251 \cdot 273 \cdot 720}{323 \cdot 760} = \sim 1 \text{ kg/m}^3$$

Zadanie 21

Wyliczyć ciężar właściwy powietrza o prężności 3,5 ata i temperaturze 15° , jeżeli dla powietrza $\gamma_{(0^\circ, 760)} = 1,293$.

Rozwiązanie

Jak w zadaniu 20 :

$$\gamma_2 = \gamma_1 \frac{T_1 p_2}{T_2 p_1} = 1,293 \frac{273 \cdot 3,5 \cdot 10^4}{288 \cdot 10333} = 4,15 \text{ kg/m}^3$$

Zadanie 22

Silnik spalinowy zużywa gazu $0,9 \text{ m}^3/\text{KM}/\text{godz.}$ o temperaturze 15° i ciśnieniu 740 mm sł. rt. Jaki jest wydatek tego gazu na 1 KW/godz. w nm^3 ?

Rozwiązanie

Obliczymy wydatek gazu w nm^3 najpierw na 1 KM/godz.

$$(1) \quad p_1 = 740 \text{ mm} \quad V_1 = 0,9 \text{ m}^3 \quad T_1 = 288^\circ$$

$$(2) \quad p_2 = 760 \text{ mm} \quad V_2 = x \quad T_2 = 273^\circ$$

$$V_2 = V_1 \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} = 0,9 \frac{740 \cdot 273}{760 \cdot 288} = 0,83 \text{ nm}^3/\text{KM}/\text{godz.}$$

$$\text{albo } \frac{0,83 \cdot 1000}{736} = 1,13 \text{ nm}^3/\text{KW}/\text{godz.}$$

Zadanie 23

Sprężarka zasysa przy ciśnieniu 740 mm sł. rt. 8 m³ powietrza i spręża je do prężności wyższej o 500 mm sł. wody.

Wyliczyć objętość powietrza po sprężaniu, jeżeli temperatura pozostała bez zmiany.

Rozwiązanie

Wobec temperatury stałej zastosujemy prawo Boyle-Mariotte'a sprowadziwszy prężności do mm sł. wody.

$$p_1 = \frac{10^4}{735,5} 740 = 10^4 \cdot 1,007 \text{ mm sł. w.}$$

$$p_2 = 10070 + 500 = 10570 \text{ mm sł. w.}$$

Mamy :

$$(1) \quad p_1 = 10070 \text{ mm} \quad V_1 = 8 \text{ m}^3$$

$$(2) \quad p_2 = 10570 \text{ mm} \quad V_2 = x$$

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{10070 \cdot 8}{10570} = 7,62 \text{ m}^3.$$

3. Mol — mieszaniny gazów — ciepło właściwe gazów (§ 17 — § 20)

Zadanie 24

Obliczyć objętość właściwą tlenku węgla (CO) dla 0° i 760 mm sł. rt. mając μ .

Rozwiązanie

μ dla CO = 28. Objętość 28 kg CO wynosi (0° i 760) 22,4 m³

Zatem

$$v = \frac{V}{G} = \frac{22,4}{28} = 0,8 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Zadanie 25

Obliczyć ciężar właściwy tlenu (O_2) dla warunków technicznych (15° , 737,4 mm), mając μ .

Rozwiązanie

$$\mu \text{ dla } O_2 = 32; \mu v = \frac{\mu}{\gamma} = 24,4 \text{ m}^3$$
$$\gamma = \frac{32}{24,4} = 1,31 \text{ kg/m}^3.$$

Zadanie 26

Obliczyć stałą gazową (R) dla amoniaku (NH_3) mając μ .

Rozwiązanie

$$\mu \text{ dla } NH_3 = 17,03$$
$$R = \frac{848}{\mu} = \frac{848}{17,03} = 49,79.$$

Zadanie 27

Sprawdzić wartość dla μR przy $p = 1 \text{ Ata}$ i $t = 0^\circ$.

Rozwiązanie

$$\mu R = \frac{pV}{T}. \text{ Przy } t = 0^\circ p = 1 \text{ Ata} = 10333 \text{ kg } V = 22,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Zatem } \mu R = \frac{10333 \cdot 22,4}{273} = 848.$$

Zadanie 28

Obliczyć stałą gazową (R) dla wodoru (H_2)

a) mając jego gęstość w/m powietrza $\delta_H = 0,0696$,

b) mając μ .

Rozwiązanie

$$\text{a) } \frac{R_{\text{wodoru}}}{R_{\text{powietrza}}} = \frac{1}{\delta_H}; R_{\text{wodoru}} = \frac{29,27}{0,0696} = 420,6,$$

$$\text{b) } R_{\text{wodoru}} = \frac{848}{\mu} = \frac{848}{2,016} = 420,6.$$

Zadanie 29

Mamy 2 m³ tlenu o prężności 3 ata i $t = 100^{\circ}$.

Obliczyć jego ciężar, ciężar cząsteczkowy i ilość moli zawartą w tej ilości gazu.

Rozwiązanie

$$G = \frac{pV}{RT} = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot 2}{26,5 \cdot 373} = 6,07 \text{ kg}$$

$$R = \frac{848}{\mu}; \mu = \frac{848}{R} = \frac{848}{26,5} = 32$$

$$\text{Ilość moli } M = \frac{G}{\mu} = \frac{6,07}{32} = 0,19 \text{ mola.}$$

Zadanie 30

Ile moli zawiera 2,4 m³ azotu o prężności 3 ata i $t = 27^{\circ}$, jeżeli $R_{az} = 30,26$.

Rozwiązanie

$$\text{Ilość moli } M = \frac{G}{\mu}$$

$$G = \frac{pV}{RT} = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot 2,4}{30,26 \cdot 300} = 7,92 \text{ kg}$$

$$\mu = \frac{848}{30,26} = 28; M = \frac{7,92}{28} = 0,283 \text{ mola.}$$

Zadanie 31

1 kg powietrza zawiera 0,231 kg tlenu i 0,769 kg azotu. Wyliczyć:

- stałą gazową powietrza,
- udziały objętościowe składowych gazów,
- pozorny ciężar cząsteczkowy.

Rozwiązanie

$$a) R_m = \Sigma R\alpha$$

	α	R	μ
(1)	0,231 kg (O_2)	26,5	32
(2)	0,769 (N_2)	30,26	28
	<u>1 kg</u>		

$$a_1 R_1 = 0,231 \times 26,5 = 6,12$$

$$a_2 R_2 = 0,769 \times 30,26 = 23,27$$

$$\Sigma R\alpha = R_m = 29,39.$$

Wynik różni się nieco od 29,27, gdyż w zadaniu nie uwzględniono pełnego składu powietrza zaniedbując argon, hel itd.

$$b) b_1 = \frac{a_1/\mu_1}{a_1/\mu_1 + a_2/\mu_2} \quad b_2 = \frac{a_2/\mu_2}{a_1/\mu_1 + a_2/\mu_2}$$

$$a_1/\mu_1 = \frac{0,231}{32} = 0,00722$$

$$a_2/\mu_2 = \frac{0,769}{28} = 0,0275$$

$$\Sigma a/\mu = 0,03472$$

$$b_1 = \frac{0,00722}{0,03472} = 0,208; \quad b_2 = \frac{0,0275}{0,03472} = 0,792$$

$$c) \mu_m = \Sigma b\mu = b_1\mu_1 + b_2\mu_2$$

$$b_1\mu_1 = 0,208 \times 32 = 6,66$$

$$b_2\mu_2 = 0,792 \times 28 = 22,18$$

$$\mu_m = 28,84.$$

$$\text{albo } \mu_m = \frac{1}{\Sigma a/\mu} = \frac{1}{0,03472} = 28,84$$

Zadanie 32

Znaleźć stałą gazową (R_m), pozorny ciężar cząsteczkowy (μ_m), ciężar właściwy i udziały wagowe spalin o składzie objętościowym CO_2 — 10 %, O_2 — 11 %, N_2 — 79 %.

Rozwiązanie

Mamy:	R	b	μ	γ ($0^\circ, 760$)
CO_2	19,27	0,1	44	1,964
O_2	26,5	0,11	32	1,429
N_2	30,26	0,79	28	1,251

$$\begin{aligned}
 1. \quad & b_1 \mu_1 = 0,1 \times 44 = 4,4 \\
 & b_2 \mu_2 = 0,11 \times 32 = 3,52 \\
 & b_3 \mu_3 = 0,79 \times 28 = 22,12 \\
 & \mu_m = \Sigma b \mu = 30,04
 \end{aligned}$$

$$2. \quad R_m = \frac{848}{\mu_m} = \frac{848}{30,04} = 28,2$$

$$\begin{aligned}
 3. \quad \gamma_m &= \Sigma b \gamma = b_1 \gamma_1 + b_2 \gamma_2 + b_3 \gamma_3 = \\
 &= 0,1 \times 1,964 + 0,11 \times 1,429 + 0,79 \times 1,251 = \\
 &= 1,341 \quad \gamma_m = 1,34 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

$$4. \quad a_1 = \frac{b_1 \mu_1}{\Sigma b \mu}; \quad a_2 = \frac{b_2 \mu_2}{\Sigma b \mu}; \quad a_3 = \frac{b_3 \mu_3}{\Sigma b \mu}$$

$$a_1 = \frac{4,4}{30,04} = 0,147$$

$$a_2 = \frac{3,52}{30,04} = 0,117$$

$$a_3 = \frac{22,12}{30,04} = 0,736$$

$$\underline{\quad 1,0 \quad}$$

Zadanie 33

Objętościowy skład procentowy gazu świetlnego jest:

H_2 — 48 %, CH_4 — 22 %, CO — 19 %

N_2 — 6 % i CO_2 — 5 %.

Obliczyć:

- skład wagowy (a),
- pozorny ciężar cząsteczkowy i stałą gazową (μ_m i R_m),
- ciężar właściwy (γ_m),
- prężność cząstkową każdego gazu przy 1 Ata.

Rozwiązanie

Mamy:	b	R	μ	$\gamma(0^{\circ}, 760)$
H_2	0,48	420,5	2,016	0,09
CH_4	0,22	52,9	16,03	0,715
CO	0,19	30,29	28	1,25
N_2	0,06	30,26	28,03	1,251
CO_2	0,05	19,27	44	1,964
	<u>1</u>			

$$a) \quad a_1 = \frac{b_1 \mu_1}{\Sigma b \mu} \text{ itd.}$$

$$b_1 \mu_1 = 0,48 \times 2,016 = 0,97$$

$$b_2 \mu_2 = 0,22 \times 16,03 = 3,53$$

$$b_3 \mu_3 = 0,19 \times 28 = 5,32$$

$$b_4 \mu_4 = 0,06 \times 28,03 = 1,68$$

$$b_5 \mu_5 = 0,05 \times 44 = 2,20$$

$$\underline{\Sigma b \mu = 13,70}$$

$$(H_2) \quad a_1 = \frac{0,97}{13,7} = 0,0708 \times 420,6 = 29,81$$

$$(CH_4) \quad a_2 = \frac{3,53}{13,7} = 0,2575 \times 52,9 = 13,65$$

$$(CO) \quad a_3 = \frac{5,32}{13,7} = 0,3882 \times 30,29 = 11,61$$

$$(H_2) \quad a_4 = \frac{1,68}{13,7} = 0,1227 \times 30,26 = 3,71$$

$$(CO_2) \quad a_5 = \frac{2,2}{13,7} = 0,1608 \times 19,27 = 3,12$$

$$\underline{1,0}$$

Ra

$$b) \quad \mu_m = \Sigma b \mu = 13,7$$

$$R_m = \frac{848}{\mu_m} = \frac{848}{13,7} = 61,9$$

$$c) \quad b_1 \gamma_1 = 0,48 \times 0,09 = 0,0432$$

$$b_2 \gamma_2 = 0,22 \times 0,715 = 0,1573$$

$$b_3 \gamma_3 = 0,19 \times 1,25 = 0,2375$$

$$b_4 \gamma_4 = 0,06 \times 1,251 = 0,0751$$

$$b_5 \gamma_5 = 0,05 \times 1,964 = 0,0922$$

$$\gamma_m = \Sigma b \gamma = 0,6113 \text{ kg/m}^3$$

$$d) \quad p_1 = \frac{29,81}{61,9} \cdot 760 = 366 \text{ mm sl. rt.}$$

$$p_2 = \frac{13,65}{61,9} \cdot 760 = 167 \quad ,, \quad ,, \quad ,,$$

$$p_3 = \frac{11,61}{61,9} \cdot 760 = 143 \quad ,, \quad ,, \quad ,,$$

$$p_4 = \frac{3,71}{61,9} \cdot 760 = 45,6 \quad ,, \quad ,, \quad ,,$$

$$p_5 = \frac{3,12}{61,9} \cdot 760 = 38,4 \quad ,, \quad ,, \quad ,,$$

$$\quad \quad \quad \frac{760, \quad ,, \quad ,, \quad ,,}{760, \quad ,, \quad ,, \quad ,,}$$

Zadanie 34

Mając c_v dla powietrza $= 0,172 \text{ Kal/kg}$ obliczyć A .

Rozwiązanie

$$c_v = 0,172; \quad \frac{c_p}{c_v} = k = 1,4$$

$$c_p = 0,172 \times 1,4 = 0,2408$$

$$c_p - c_v = 0,0688 = AR$$

$$A = \frac{0,0688}{29,27} = \frac{1}{427}.$$

Zadanie 35

Wyliczyć ciepła właściwe c_p i c_v dla tlenu mając $k = 1,4$ i $R = 26,5$.

Rozwiązanie

$$c_v = \frac{AR}{k-1} = \frac{26,5}{427 \cdot 0,4} = 1,555 \text{ Kal./kg}$$

$$c_p = 1,555 \times 1,4 = 2,18 \text{ Kal/kg.}$$

Zadanie 36

Wyliczyć ciepło właściwe 1 m³ tlenu dla war. fizyczn. (0°, 760)
i dla war. techn. (15°, 737,4).

Rozwiązanie

Warunki fizyczne:

$$C_{p \frac{m^3}{m^3}} = c_p \gamma = 0,218 \times 1,429 = 0,3115 \text{ Kal/m}^3, 1^\circ$$

$$C_{v \frac{m^3}{m^3}} = c_v \gamma = 0,156 \times 1,429 = 0,2229 \text{ Kal/m}^3, 1^\circ$$

Warunki techniczne: -

$$C_{p \frac{m^3}{m^3}} = c_p \gamma = 0,218 \times 1,31 = 0,2865 \text{ Kal/m}^3, 1^\circ$$

$$C_{v \frac{m^3}{m^3}} = c_v \gamma = 0,156 \times 1,31 = 0,2044 \text{ Kal/m}^3, 1^\circ$$

W obu wypadkach

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{0,3105}{0,2229} = \frac{0,2865}{0,2044} = 1,4$$

Zadanie 37

Wyliczyć stałą gazową dla wodoru mając jego $c_p = 3,405$.

Rozwiązanie

$$c_p = 3,405, \text{ to } c_v = \frac{3,405}{1,407} = 2,42$$

$$c_p - c_v = 0,985 = AR$$

$$R = 427 \times 0,985 = 420,6.$$

Zadanie 38

Wyliczyć ciepła właściwe dla 1 m³ przy 740 mm sł.st. i $t = 20^\circ$
a) metanu, b) acetyleny.

Rozwiązanie

$C = c\gamma$, lecz γ musi odpowiadać prężności i temperaturze m^3 gazu.

Ponieważ ciężar właściwy gazów zmienia się wprost proporcjonalnie do prężności i odwrotnie proporcjonalnie do temperatury gazów, otrzymujemy:

a) dla metanu

$$\gamma_{(0^\circ, 760)} = 0,715; \gamma_{(20^\circ, 740)} = \frac{0,715 \cdot 740 \cdot 273}{760 \cdot 293} = 0,649 \text{ kg/m}^3.$$

$$C_{p,m^3} = 0,59 \times 0,649 = 0,383 \text{ Kal./m}^3, 1^\circ$$

$$C_{v,m^3} = 0,46 \times 0,649 = 0,2987 \text{ Kal/m}^3, 1^\circ,$$

b) dla acetyleny

$$\gamma_{(0^\circ, 760)} = 1,162; \gamma_{(20^\circ, 740)} = \frac{1,162 \cdot 740 \cdot 273}{760 \cdot 293} = 1,054 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{p,m^3} = 0,37 \times 1,054 = 0,39 \text{ Kal/m}^3, 1^\circ$$

$$C_{v,m^3} = 0,29 \times 1,054 = 0,306 \text{ Kal/m}^3, 1^\circ$$

Zadanie 39

Wyliczyć średnie ciepło właściwe gazów spalinowych mając ich udziały objętościowe:

$$CO_2 - 10\%, O_2 - 11\% \text{ i } N_2 - 79\%$$

a) dla 1 kg, b) dla 1 nm^3 .

Rozwiązanie

$$a) c_p = \Sigma c_p a$$

Udziały wagowe bierzemy z zadania nr 32:

	a	c_p	
(CO_2)	$0,147 \times 0,21$	$= 0,03087$	
(O_2)	$0,117 \times 0,218$	$= 0,02551$	
(N_2)	$0,736 \times 0,249$	$= 0,18326$	
			<u>$0,23964$</u>

$$c_{p_m} = 0,24$$

$$c_{v_m} = \Sigma c_v a$$

	a	c_v	
(CO_2)	$0,147 \times 0,165$	$= 0,02426$	
(O_2)	$0,117 \times 0,156$	$= 0,01825$	
(N_2)	$0,736 \times 0,178$	$= 0,13101$	
			<u>$0,17342$</u>

$$c_{v_m} = 0,173$$

$$b) \quad C_{p_{m^2 m}} = \Sigma c_p \gamma b \quad (0^0,760 \text{ mm sł. rt})$$

	b	γ	c_p	
(CO_2)	$0,10 \times 1,964 \times 0,21$	$= 0,04125$		
(O_2)	$0,11 \times 1,429 \times 0,218$	$= 0,03428$		
(N_2)	$0,79 \times 1,251 \times 0,249$	$= 0,24620$		
				<u>$0,32173$</u>

$$C_{p_{m^2 m}} = 0,32$$

$$C_{v_{m^2 m}} = \Sigma c_v \gamma b$$

	b	γ	c_v	
(CO_2)	$0,10 \times 1,964 \times 0,165$	$= 0,0324$		
(O_2)	$0,11 \times 1,429 \times 0,156$	$= 0,02453$		
(N_2)	$0,79 \times 1,251 \times 0,178$	$= 0,1763$		
				<u>$0,23329$</u>

$$C_{v_{m^2 m}} = 0,23$$

Zadanie 40

Obliczyć prężność cząstkową tlenu i azotu w powietrzu mając ich udziały objętościowe:

$$O_2 = 0,208 \text{ i } N_2 = 0,792.$$

Rozwiązanie

Prężność cząstkowa tlenu p_1 azotu p_2 .

$$p_1 = p \frac{R_1 a_1}{R_m}, \text{ a że } a_1 = \frac{b_1 \mu_1}{\Sigma b \mu},$$

$$\text{to } p_1 = p \frac{R_1 b_1 \mu_1}{R_m \Sigma b \mu}$$

$$\text{Analogicznie dla azotu } p_2 = p \frac{R_2 b_2 \mu_2}{R_m \Sigma b \mu}$$

$$p_1 = 10^5 \frac{26,5 \times 0,208 \times 32}{29,27 (0,208 \times 32 + 0,792 \times 28,03)}$$
$$\begin{array}{r} 0,208 \times 32 = 6,656 \\ 0,792 \times 28,03 = 22,2 \\ \hline 28,856 \end{array}$$

$$p_1 = 10^5 \frac{26,5 \times 6,656}{29,27 \times 28,856} = 2080 \text{ kg/m}^2$$

$$p_2 = 10^5 \frac{30,26 \times 22,2}{29,27 \times 28,856} = 7920 \text{ kg/m}^2$$
$$\underline{10\,000 \text{ kg/m}^2}$$

Zadanie 41

Mając dla azotu $R = 30,26$, $c_p = 0,249$ i $k = 1,4$ obliczyć wartość liczbową cieplnego równoważnika pracy (A).

Rozwiązanie

$$\text{Mamy } c_p = 0,249 \text{ i } k = 1,4, \text{ to } c_v = \frac{0,249}{1,4}$$

$$c_v = 0,178; \quad c_p - c_v = 0,071 = AR,$$

$$\text{to } A = \frac{0,071}{30,26} = \frac{1}{427}$$

4. Zmiany stanu gazów (§ 21 — § 25)

Zadanie 42

Powietrze w zamkniętej butli objętości $0,2 \text{ m}^3$, o temperaturze 17° i prężności 1 ata , ogrzane zostało do 320° . Określić końcową prężność powietrza i teoretyczny wydatek ciepła.

Rozwiązanie

Mamy	V	p	T	
(1)	0,2	$1,10^4$	290°	Sprężanie
(2)	0,2	p_2	593°	izochoryczne

$$p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1} = \frac{593}{290} = 2,04 \text{ ata}$$

$$Q = c_v (T_2 - T_1) G, \text{ gdzie } c_v = 0,172$$

$$T_2 - T_1 = 303$$

$$\text{Szukamy } G. \quad G = \frac{pV}{RT} = \frac{1 \cdot 10^4 \cdot 0,2}{29,27 \times 290} = 0,235 \text{ kg}$$

$$Q = 0,172 \cdot 303 \cdot 0,235 = 12,25 \text{ Kal.}$$

Zadanie 43

Od 100 l tlenu o temperaturze 76° i prężności $14,5 \text{ ata}$ odebrano 15 Kal ciepła. Jaki był stan końcowy tlenu przy $v = \text{const.}$?

Rozwiązanie

Mamy	V	p	T	
(1)	0,1	14,5	349°	Rozpręż. izochor.
(2)	„	p_2	T_2	

$$G = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{14,5 \cdot 10^4 \cdot 0,1}{26,5 \cdot 349} = 1,57 \text{ kg}$$

$$Q = 15 = c_v (T_1 - T_2) G \quad c_v = 0,156,$$

stąd

$$T_1 - T_2 = \frac{15}{0,156 \cdot 1,57} = 61; \quad T_2 = 349 - 61 = 288^\circ; \quad t_2 = 15^\circ$$

$$p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1} = \frac{14,5 \cdot 288}{349} = 11,95 \text{ ata.}$$

Zadanie 44

W zbiorniku objętości 14 m^3 z powietrzem o $p = 70 \text{ ata}$ i $t = 30^\circ$ doprowadzono kosztem wydanego ciepła prężność do $74,6 \text{ ata}$. Ile wydano ciepła i jaką osiągnięto temperaturę powietrza?

Rozwiązanie

Mamy V p T

(1) 14 m^3 70 ata 303 Spręż. izochor.

(2) 14 „ $74,6$ „ T_2

$$G_1 = \frac{p_1 V_1}{R_1 T_1} = \frac{14 \cdot 70 \cdot 10^4}{29,27 \cdot 303} = 1105 \text{ kg}$$

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{R \cdot G} = \frac{74,6 \cdot 10^4 \cdot 14}{1105 \cdot 29,27} = 323^\circ; \quad t_2 = 50^\circ.$$

$$Q = c_v (T_2 - T_1) G = 0,172 \cdot 20 \cdot 1105 = 3800 \text{ Kal.}$$

Zadanie 45

Do cylindra zawierającego 20 l dwutlenku węgla o temperaturze 17° i $p = 15 \text{ ata}$ doprowadzono ciepła w ilości 12 Kal. Obliczyć stan końcowy gazu przy $v = \text{const.}$

Rozwiązanie

Mamy V p T

(1) $0,02$ 15 290 Sprężanie izochoryczne

(2) „ p_2 T_2

$$G = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{15 \cdot 10^4 \cdot 0,02}{19,27 \cdot 290} = 0,5375 \text{ kg}$$

$$T_2? \quad Q = 12 = c_v (T_2 - T_1) G$$

$$T_2 - T_1 = \frac{12}{0,165 \cdot 0,5375} = 135$$

$$T_2 = 425^\circ; \quad t_2 = 152^\circ$$

$$p_2, p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1} = \frac{15 \cdot 425}{290} = 22 \text{ ata.}$$

Zadanie 46

W zamkniętej butli mamy 50 l azotu o temperaturze -13° i $p=4$ ata. Ile ciepła należy dodać do gazu, aby prężność jego wzrosła do 8 ata i jaka będzie wtedy temperatura gazu?

Rozwiązanie

Mamy V p T

(1) 0,05 4 260° Sprężanie izochoryczne

(2) „ 8 T_2

$$T_2? \quad T_2 = \frac{T_1 p_2}{p_1} = 260 \cdot 2 = 520^{\circ}; \quad t_2 = 247^{\circ}$$

$$Q? \quad Q = G c_v (T_2 - T_1)$$

$$G = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{4 \cdot 10^4 \cdot 0,05}{30,26 \cdot 260} = 0,254 \text{ kg}$$

$$Q = 0,254 \cdot 0,178 \cdot 260 = 11,8 \text{ Kal.}$$

Zadanie 47

W nagrzewnicy powietrznej ogrzewane jest powietrze w ilości 2000 m³/godz. od -5° do $+50^{\circ}$ przy ciśnieniu 1 ata. Obliczyć wydatek ciepła i wyznaczyć, ile z tego ciepła idzie na podwyższenie temperatury powietrza, a ile na pracę rozszerzania.

Rozwiązanie

Mamy V p T

(1) 2000 $1 \cdot 10^4$ 268° Rozszerzanie izobaryczne

(2) V_2 „ 323°

$$G = \frac{p V_1}{R T_1} = \frac{10^4 \cdot 2000}{29,27 \cdot 268} = 2550 \text{ kg}$$

$$Q? \quad Q = G c_p (T_2 - T_1) = 2550 \cdot 0,24 \cdot 55 = 33660 \text{ Kal}$$

$$U? \quad U = G c_v (T_2 - T_1) = 2550 \cdot 0,172 \cdot 55 = 24060 \text{ Kal}$$

$$L? \quad L = p (V_2 - V_1); \quad V_2 = \frac{V_1 T_2}{T_1} = \frac{2000 \cdot 323}{268} = 2410 \text{ m}^3$$

$$L = 10^4 \cdot 410 = 41 \cdot 10^5 \text{ kgm}; \quad AL = 9600 \text{ Kal.}$$

Zadanie 48

1 kg wodoru o temperaturze 200° i prężności 5 ata rozprężono przy stałej objętości do 1 ata odbierając mu pewną ilość ciepła, kosztem której następnie rozszerzono go przy stałej prężności. Obliczyć końcową objętość, uzyskaną pracę i końcową temperaturę.

Rozwiązanie

I. Mamy v p T Rozprężanie izochoryczne

$$(1) \quad v_1 \quad 5 \cdot 10^4 \quad 473 \quad T_2, \Delta Q \text{ i } v_1 ?$$

$$(2) \quad ,, \quad 1 \cdot 10^4 \quad T_2$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{p_1}{p_2}; T_2 = \frac{10^4 \cdot 273}{5 \cdot 10^4} = 94,6^\circ$$

$$\Delta Q = c_v (T_2 - T_1) = 2,42 (94,6 - 473) = -915,73 \text{ Kal.}$$

Odebrano gazowi 915,73 Kal.

$$v_1 p_1 = RT_1; V_1 = \frac{420,6 \cdot 473}{5 \cdot 10^4} = 3,98 \text{ m}^3/\text{kg}$$

II. Mamy v p T
(2) 3,98 $1 \cdot 10^4$ $94,6^\circ$ Rozszerzanie izobaryczne

$$(3) \quad v_3 \quad ,, \quad T_3 \quad T_3, v_3, L ?$$

$$\Delta Q = c_p (T_3 - T_2)$$

$$915,73 = 3,405 (T_3 - 94,6^\circ); T_3 = 363,5^\circ$$

$$v_3 p_3 = RT_3; v_3 = \frac{420,6 \cdot 363,5}{10^4} = 15,29 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$L = p \Delta v = 10^4 (15,29 - 3,98) = 113100 \text{ kgm}$$

$$AL = 264,8 \text{ Kal.}$$

Zadanie 49

Kosztem 1840 Kal. rozszerzono 2 kg wodoru o początkowej temperaturze 95° przy stałej prężności $p = 1,2$ ata. Obliczyć stan końcowy L i ΔU .

Rozwiązanie

Mamy V | p | T $G = 2 \text{ kg}$
 (1) V_1 | $1,2 \cdot 10^4$ | 368° Rozszerzanie izobaryczne
 (2) V_2 | „ | T_2 $V_1, T_2, V_2, L, \Delta U$?

$$V_1 = \frac{G \cdot R \cdot T_1}{p} = \frac{2 \cdot 420,6 \cdot 368}{1,2 \cdot 10^4} = 25,8 \text{ m}^3$$

$$T_2 ? \Delta Q = Gc_p (T_2 - T_1); T_2 - T_1 = \frac{1840}{2 \cdot 3,405} = 270^\circ;$$

$$T_2 = 638^\circ$$

$$V_2 ? V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1}; V_2 = \frac{25,8 \cdot 638}{368} = 44,8 \text{ m}^3$$

$$L ? L = p (V_2 - V_1) = 1,2 \cdot 10^4 (44,8 - 25,8) = 228000 \text{ kgm}$$

$$AL = 535 \text{ Kal.}$$

$$\Delta U ? \Delta U = Gc_v (T_2 - T_1)$$

$$\Delta U = 2 \cdot 2,42 \cdot 270 \quad \Delta U = 1305 \text{ Kal.}$$

$$\Delta Q = AL + \Delta U = 1840 \text{ Kal.}$$

Zadanie 50

Wykreślić izotermę dla powietrza o temperaturze 27° .

Rozwiązanie

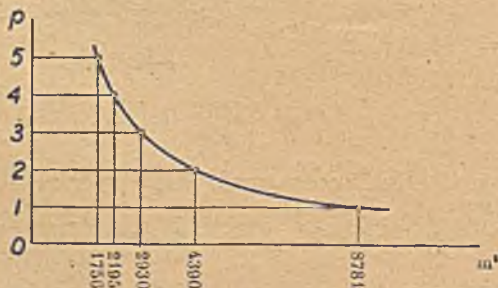
$$pv = RT; T = 300^\circ; pv = 29,27 \cdot 300 = 8781 \text{ kgm}$$

Niech $p = 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \text{ ata,}$

wtedy $v = 8781 \quad 4390 \quad 2930 \quad 2195 \quad 1756 \text{ m}^3$

Podziałka dla p : 1 kratka 1 ata.

„ „ v : 1 „ 1000 m^3



Zadanie 51

2 m³ azotu o temperaturze 300° ściśnięto izobarycznie do 1,5 m³ objętości, a następnie oziębiono izochorycznie do 15°, przy czym osiągnięto prężność 1 ata. Obliczyć prężność początkową azotu, temperaturę w końcu ściskania oraz ilość ciepła odebraną gazowi przy tych zmianach.

Rozwiązanie

I.	Mamy	V	p	T	Ściskanie izobaryczne
(1)		2	p_1	573°	$G, p_1, T_2, Q_1 ?$
(2)		1,5	„	T_2	
II.	(2)	„	$p_2 = p_1$	T_2	Rozprężanie izochoryczne
(3)		„	$1 \cdot 10^4$	288°	$Q_2 ?$

$$G ? \quad G = \frac{p_3 V_3}{R T_3} = \frac{10^4 \cdot 1,5}{30,26 \cdot 288} = 1,72 \text{ kg}$$

$$p_1 ? \quad p_1 = \frac{G R T_1}{V_1} = \frac{1,72 \cdot 30,26 \cdot 573}{2} = 1,54 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^2 =$$

$$= 1,54 \text{ ata}$$

$$T_2 ? \quad T_2 = \frac{p_2 T_3}{p_3} = \frac{1,54 \cdot 288}{1} = 444^\circ.$$

Odebrano ciepła :

$$Q_1 = G c_p (T_1 - T_2) = 1,72 \cdot 0,249 (573 - 444) = 55,4 \text{ Kal.}$$

$$Q_2 = G c_v (T_2 - T_3) = 1,72 \cdot 0,178 (444 - 288) = 47,8 \text{ Kal.}$$

$$\text{Razem } 103,2 \text{ Kal.}$$

Zadanie 52

2 m³ powietrza rozpręża się izotermicznie od 5 ata do 4 ata. Obliczyć objętość końcową, otrzymaną pracę zewnętrzną i wydatek ciepła na zmianę.

Rozwiązanie

Mamy	V	p	T	Rozprężanie izotermiczne
(1)	2	$5 \cdot 10^4$	—	
(2)	V_2	$4 \cdot 10^4$	—	$V_2, L, Q ?$

$$V_2 ? \quad V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = 2,5 \text{ m}^3$$

$$L ? \quad L = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 2,3 \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot \lg 1,25 = 22290 \text{ kgm}$$

$$Q = AL = 52,2 \text{ Kal.}$$

Zadanie 53

4 kg powietrza o $t = 15^\circ$ i $p = 1$ ata sprężono izotermicznie do $p_2 = 6$ ata. Obliczyć V_1 i V_2 , L i ΔQ .

Rozwiązanie

Mamy V p T Sprężanie izotermiczne

$$(1) \quad V_1 \quad 1 \cdot 10^4 \quad 288$$

$$(2) \quad V_2 \quad 6 \cdot 10^4 \quad ,,$$

$$V_1 ? \quad V_1 = \frac{GRT}{p_1} = \frac{4 \cdot 29,27 \cdot 288}{10^4} = 3,37 \text{ m}^3$$

$$V_2 ? \quad V_2 = \frac{V_1 p_1}{p_2} = \frac{3,37}{6} = 0,56 \text{ m}^3$$

$$L ? \quad L = GRT \ln \frac{p_2}{p_1} = 4 \cdot 2,3 \cdot 29,27 \cdot 288 \cdot 0,77815 = 60400 \text{ kgm}$$

$$\Delta Q ? \quad \Delta Q = AL = 141,5 \text{ Kal.}$$

Zadanie 54

Sprężono izotermicznie 10 kg powietrza o $t = 15^\circ$ przy $p = 4$ ata do objętości $0,7 \text{ m}^3$. Obliczyć V_1 , p_2 oraz ile kgm pracy wydano na sprężanie i ile odebrano ciepła ?

Rozwiązanie

Mamy V p T Sprężanie izotermiczne

$$(1) \quad V_1 \quad 4 \cdot 10^4 \quad 288 \quad G = 10 \text{ kg}$$

$$(2) \quad 0,7 \quad p_2 \quad ,,$$

$$V_1 ? \quad V_1 = \frac{GRT}{p_1} = \frac{10 \cdot 29,27 \cdot 288}{4 \cdot 10^4} = 2,1 \text{ m}^3$$

$$p_2 ? \quad p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2} = \frac{4 \cdot 2,1}{0,7} = 12 \text{ ata}$$

$$L ? \quad L = p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = 2,3 \cdot 4 \cdot 10^4 \cdot 2,1 \cdot 0,47712 = 92170 \text{ kgm}$$

$$\Delta Q ? \quad \Delta Q = AL = 216 \text{ Kal. odebrano ciepła.}$$

Zadanie 55

Ile należy odebrać ciepła sprężając izotermicznie przy $t = 0^\circ$ i $p = 1$ ata 125 l dwutlenku węgla do objętości 500 cm³ ?

Rozwiązanie

Mamy	V	p	T	Sprężanie izotermiczne
(1)	0,125	$1 \cdot 10^4$	273	
(2)	0,0005	p_2	„	

$$G ? \quad G = \frac{p_1 V_1}{RT} = \frac{10^4 \cdot 0,125}{19,27 \cdot 273} = 0,2375 \text{ kg}$$

$$Q ? \quad Q = GRTA \ln \frac{V_1}{V_2} = \frac{2,3 \cdot 0,2375 \cdot 19,27 \cdot 273 \cdot 2,39794}{427} = 16,15 \text{ Kal. odebrano.}$$

Zadanie 56

1 kg bezwodnika siarkawego (SO₂) o $t = 25^\circ$ sprężono izotermicznie przy prężności 1 ata do objętości 10 razy mniejszej od pierwotnej. Obliczyć pracę użytą na sprężanie, ilość odprowadzonego ciepła i prężność końcową.

Rozwiązanie

Mamy	v	p	T	Sprężanie izotermiczne
(1)	v_1	$1 \cdot 10^4$	298°	
(2)	$\frac{v_1}{10}$	p_2	„	

$$L ? \quad L = RT \ln 10 = 2,3 \cdot 13,24 \cdot 298 = 9100 \text{ kgm zużyto pracy.}$$

$$Q ? \quad \Delta Q = AL = 21,3 \text{ Kal. odebrano ciepła.}$$

$$p_2 ? \quad p_2 = \frac{v_1 p_1}{v_2} = 10 p_1 = 10 \text{ ata.}$$

Zadanie 57

Cylinder zawiera $0,8 \text{ m}^3$ powietrza o $t = 20^\circ$ i $p = 1 \text{ ata}$, które zostało sprężone do 4 atn. izotermicznie. Ciepło wywiązane przy sprężaniu pochłania 5 l wody. Do jakiej temperatury woda zostanie ogrzana?

Rozwiązanie

Mamy	V	p	T	
(1)	$0,8$	$1 \cdot 10^4$	293°	Sprężanie izotermiczne
(2)	V_2	$5 \cdot 10^4$	„	

$$\Delta Q ? \quad \Delta Q = A p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{10^4 \cdot 0,8 \cdot 2,3 \cdot 0,69897}{427} = 30,1 \text{ Kal.}$$

$$\Delta t = \frac{30,1}{5} = \sim 6^\circ \text{ przyrostu temperatury wody.}$$

Zadanie 58

Cylinder zawiera $0,233 \text{ m}^3$ powietrza o prężności 5 ata i $t = 20^\circ$. Powietrze rozpręża się adiabatycznie do 1 ata . Określić stan końcowy powietrza i uzyskaną pracę.

Rozwiązanie

Mamy	V	p	T	
(1)	$0,233$	$5 \cdot 10^4$	293	Rozprężanie adiabatyczne.
(2)	V_2	$1 \cdot 10^4$	T_2	

$$G ? \quad G = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{0,233 \cdot 5 \cdot 10^4}{29,27 \cdot 293} = 1,36 \text{ kg}$$

$$V_2 ? \quad \text{Ponieważ } \frac{p_1}{p_2} = 5, \text{ to z tabliczki podanej w podręczniku:}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = 3,156, \text{ a } \frac{T_1}{T_2} = 1,584.$$

$$\text{Zatem } V_2 = V_1 \times 3,156 = 0,735 \text{ m}^3$$

$$T_2 ? \quad T_2 = T_1 : 1,584 = 185^\circ$$

$$L ? \quad L = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{k-1} = \frac{10^4}{0,4} (5 \cdot 0,233 - 0,735) = 10750 \text{ kgm.}$$

Zadanie 59

Sprężamy adiabatycznie 1200 m³ powietrza na godzinę do 333 m³. Ile teoretycznie KM należy zużyć na to sprężanie i jaka będzie końcowa pręężność powietrza, jeżeli początkowa była 1 ata?

Rozwiązanie

Mamy	V	p	Sprężanie adiabatyczne
(1)	1200	$1 \cdot 10^5$	
(2)	333	p_2	

$$p_2? \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = \left(\frac{1200}{333} \right)^{1,4} = 3,6^{1,4}; p_2 = 6 \text{ ata.}$$

$$L? \quad L = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{k-1} = 10^5 \frac{1200 - 1998}{0,4} = \sim -2 \cdot 10^7 \text{ kgm}$$

$$N? \quad N = \frac{L}{3600 \cdot 75} = \frac{2 \cdot 10^7}{3600 \cdot 75} = \sim 75 \text{ KM.}$$

Zadanie 60

Sprężono adiabatycznie przez godzinę 1800 m³ powietrza o $t = 15^\circ$ od 1 ata do 5 ata.

Jakiej teoretycznie mocy potrzebny jest silnik do wykonania pracy sprężania i jaki będzie stan końcowy powietrza?

Rozwiązanie

Mamy	V	p	T	Sprężanie adiabatyczne
(1)	0,5	$1 \cdot 10^5$	288	
(2)	V_2	$5 \cdot 10^5$	T_2	

Ilość sprężanego powietrza sprowadzamy do 1 sek. Otrzymuje się $V_1 = 0,5 \text{ m}^3$.

$$V_2? \quad \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = 5^{\frac{1}{1,4}}; V_2 = 0,159 \text{ m}^3$$

Można również użyć tabliczki.

$$T_2? \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 5^{0,2857}$$

$$T_2 = \frac{1,584}{T_1} = 456^\circ$$

$$L_{\text{sek.}} \quad L = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{k-1} = \frac{10^4}{0,4} (0,5 - 5 \cdot 0,159) = \\ = -0,7375 \cdot 10^4 \text{ kgm}$$

$$N \quad N = \frac{L}{75} = \sim 98 \text{ KM.}$$

Zadanie 61

2,4 m³ powietrza o $t = 15^\circ$ rozpręża się adiabatycznie od $p_1 = 5$ ata do $p_2 = 4$ ata. Obliczyć stan końcowy i uzyskaną pracę.

Wyniki

$$V_2 = 2,82 \text{ m}^3; \quad T_2 = 270^\circ; \quad L = 18000 \text{ kgm.}$$

Zadanie 62

5 kg powietrza o $p = 8$ ata i $t = 220^\circ$ rozpręża się adiabatycznie do 1 ata. Obliczyć stan końcowy i uzyskaną pracę.

Wyniki

$$V_1 \text{ z równania stanu gazów} = 0,902 \text{ m}^3, \\ V_2 = 4 \text{ m}^3, \quad T_2 = 273^\circ \text{ i } L = 80800 \text{ kgm.}$$

Zadanie 63

1 kg wodoru rozpręża się adiabatycznie od $p_1 = 4$ ata i $t_1 = 100^\circ$ do $t_2 = 15^\circ$ Obliczyć stan końcowy i wydaną pracę.

Wyniki

$$v_1 = 3,992 \text{ m}^3, \quad v_2 = 7,485 \text{ m}^3, \quad p_2 = 1,62 \text{ ata i } L = 88 \text{ 000 kgm.}$$

Zadanie 64

1 m³ powietrza o $p_1 = 0,95 \text{ kg/cm}^2$ i $t_1 = 20^\circ$ został sprężony adiabatycznie do $p_2 = 1,9 \text{ kg/cm}^2$. Określić stan końcowy i pracę sprężania.

Wyniki

$$V_2 = 0,61, \quad T_2 = 357^\circ, \quad L = -5225 \text{ kgm.}$$

Zadanie 65

20 kg powietrza o $t_1 = 100^\circ$ rozpręża się izotermicznie od objętości 1 m^3 do objętości 3 m^3 , a następnie adiabatycznie do $t_3 = 0^\circ$. Obliczyć stan końcowy powietrza, wydatek ciepła i całość uzyskanej pracy.

Rozwiązanie

Mamy	V	p	T	
(1)	1	p_1	373°	} Rozprężanie izotermiczne,
(2)	3	p_2	373°	
(3)	V_3	p_3	273°	} Rozprężanie adiabatyczne

$$G = 20 \text{ kg}$$

$$p_1? \quad p_1 = \frac{RT_1 G}{V_1} = 21,8 \text{ ata}$$

$$p_2? \quad p_2 = \frac{RTG_2}{V_2} = 7,27 \text{ ata}$$

$$p_3? \quad \frac{p_2}{p_3} = \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\frac{k}{k-1}}; \left(\frac{373}{273}\right)^{3,5} = 2,981$$

$$p_3 = 2,43 \text{ ata}$$

$$V_3? \quad \frac{V_3}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(\frac{373}{273}\right)^{2,5} = 2,182$$

$$V_3 = 6,5 \text{ m}^3$$

$$Q_{iztr.?} \quad Q_{iz.} = GART_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{2,3 \cdot 20 \cdot 29,27 \cdot 373 \cdot 0,4771}{427} =$$

$$= 554 \text{ Kal.}$$

$$L_{iz.} = \frac{Q}{A} = 23620 \text{ kgm}$$

$$L_{ad.?} \quad L_{ad.} = \frac{p_2 V_2 - p_3 V_3}{k - 1} = \frac{10^4}{0,4} (7,27 \cdot 3 - 2,43 \cdot 6,55)$$

$$L_{ad.} = 147500 \text{ kgm}$$

$$L = L_{iz.} + L_{ad.} = 171120 \text{ kgm.}$$

U w a g a. Ponieważ $\frac{373}{273} = 1,367$, a w tablicze jest

$$\frac{T_2}{T_3} = 1,369, \text{ można skorzystać, że } \frac{p_2}{p_3} = 3$$

$$\text{i że } \frac{V_3}{V_2} = 2,193.$$

Zadanie 66

1 m³ powietrza o $t = 15^\circ$ i $p = 5$ ata rozpręża się: 1) izobarycznie, 2) izotermicznie, 3) adiabatycznie i 4) wzdłuż politropy o wykładniku $m = 1,25$ osiągając za każdym razem objętość końcową 2 m³.

Obliczyć dla każdej zmiany p_2 , t_2 , L i Q i zestawzić wyniki graficznie i liczbowo.

Rozwiązanie Mamy:

	V	p	T
(1)	1	$5 \cdot 10^4$	288°
(2)	2	p_2	T_2

$$G? \quad G = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{10^4 \cdot 5}{29,27 \cdot 288} = 5,94 \text{ kg}$$

I. Rozprężanie izobaryczne

$$p_2 = p_1 = 5 \text{ ata}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{2}; \quad T_2 = 576^\circ \quad t_2 = 303^\circ$$

$$L = p(V_2 - V_1) = 50\,000 \text{ kgm}; \quad AL = 117 \text{ Kal}$$

$$Q = Gc_p(T_2 - T_1) = 5,94 \cdot 0,24 \cdot 288 = 411 \text{ Kal}$$

$$\Delta U = Gc_v(T_2 - T_1) = 5,94 \cdot 0,172 \cdot 288 = 294 \text{ Kal.}$$

II. Rozprężanie izotermiczne

$$p_1 V_1 = p_2 V_2; \quad p_2 = 2,5 \text{ ata}; \quad T_2 = 288^\circ, \quad t_2 = 15^\circ$$

$$L = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 5 \cdot 10^4 \cdot 2,3 \cdot 0,30103 = 34600 \text{ Kal.}$$

$$Q = AL = 81 \text{ Kal.}$$

III. Rozprężanie adiabatyczne

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^k = \frac{p_1}{p_2}; 2^{1,4} = \frac{5}{p_2} = 2,639; p_2 = 1,9 \text{ ata}$$

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = \frac{T_1}{T_2}; 2^{0,4} = \frac{288}{T_2} = 1,32; T_2 = 218^\circ \text{ } t_2 = -55^\circ$$

$$L = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{k - 1} = \frac{10^4}{0,4} (5 - 1,9 \cdot 2) = 30000 \text{ kgm}$$

$$\Delta U = -70 \text{ Kal.}$$

IV. Rozprężanie politropowe

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^m = \frac{p_1}{p_2}; 2^{1,25} = 2,378 = \frac{5}{p_2}; p_2 = 2,1 \text{ ata}$$

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{m-1} = \frac{T_1}{T_2}; 2^{0,25} = 1,189 = \frac{288}{T_2}; T_2 = 243^\circ \text{ } t_2 = -30^\circ$$

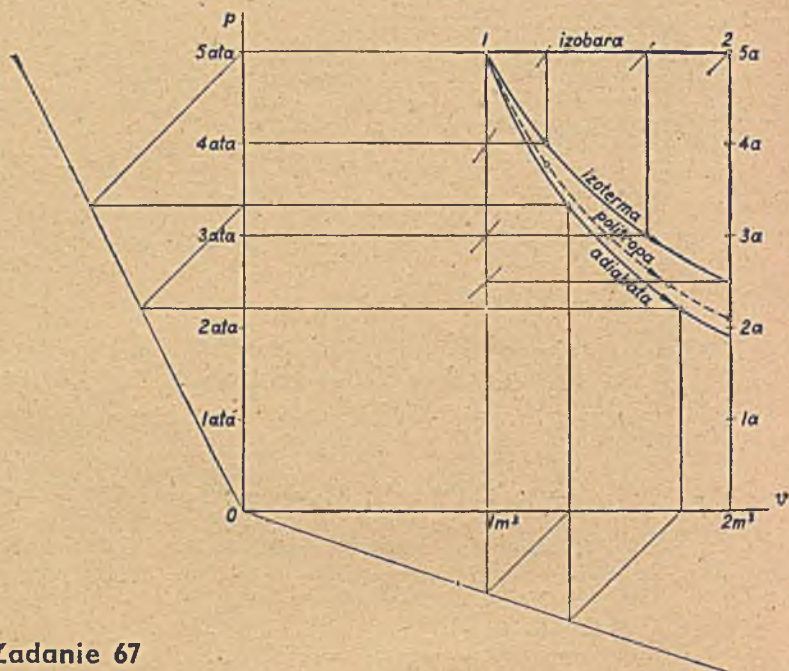
$$L = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{m - 1} = \frac{10^4}{0,25} (5 - 2,1 \cdot 2) = 32000 \text{ kgm}$$

$$Q = \frac{k - m}{k - 1} AL = \frac{0,15}{0,4} 75 = 28,1 \text{ Kal}$$

$$\Delta U = Gc_v (T_2 - T_1) = -46 \text{ Kal.}$$

Zestawienie wyników:

	V_1 m ³	V_2 m ³	p_1 ata	p_2 ata	t_1	t_2	Wydane ciepło Q kal	Uzysk. praca L kgm	Przy- rost U kal
Izobar. $m = 0$	1	2	5	5	15 ⁰	303 ⁰	411	50000 117 Kal	294
Izoterm. $m = 1$	1	2	5	2,5	15 ⁰	15 ⁰	81	34600 81 Kal	0
Politrop. $m = 1,25$	1	2	5	2,1	15 ⁰	-30 ⁰	29	32000 75 Kal	-46
Adiabat. $m = 1,4$	1	2	5	1,9	15 ⁰	-55 ⁰	0	30000 70 Kal	-70



Zadanie 67

Obliczyć c dla politropy o $m = 1,25$ i wyjaśnić sens otrzymanego wyniku powołując się na zadanie nr 66.

Rozwiązanie

$$\text{Zc wzoru } c = \frac{c_p (m - k)}{k (m - 1)} = \frac{0,24 \cdot (-0,15)}{1,4 \cdot 0,25} = -0,103 \text{ Kal/l}^0$$

Wartość ujemna dla ciepła właściwego oznacza, że dla podwyższenia temperatury gazu przy rozprężaniu politropowym przy $m = 1,25$ należy odbierać ciepło. Widać to z zestawienia wyników zadania nr 66. Wydając ciepło na rozprężanie politropowe otrzymujemy temperaturę coraz niższą.

Zadanie 68

Sprężono politropowo 1 m^3 powietrza o $p_1 = 1 \text{ ata}$ i $t_1 = 18^0$ do $p_2 = 1,4 \text{ ata}$ i $V_2 = 0,75 \text{ m}^3$. Znaleźć t_2 i wykładnik politropy m oraz obliczyć wydatek ciepła.

Rozwiązanie

	V	p	T
1	1	1	291°
2	0,75	1,4	T_2

$$G = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = 1,174 \text{ kg}$$

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{GR} = 308^\circ; \quad t_2 = 35^\circ$$

$$m? \quad m = \frac{\lg p_2 - \lg p_1}{\lg V_1 - \lg V_2} = \frac{0,1461}{0,1249} = 1,17$$

$$Q? \quad Q = Gc (T_2 - T_1), \text{ lecz } c = c_v \frac{m-k}{m-1} = 0,172 \frac{-0,23}{0,17} = -0,233 \text{ Kal/l}^\circ$$

$$Q = 1,174 \cdot (-0,233) (308 - 291)$$

$Q = -4,64 \text{ Kal}$. Ujemny wynik oznacza, że przy danym sprężaniu politropowym ciepło było odprowadzane, a temperatura się podnosiła.

$$L? \quad L = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{m-1} = \frac{10^4}{0,17} (1 - 1,4 \cdot 0,75) = -2940 \text{ kgm}$$

wydano pracy na sprężanie; $AL = -6,9 \text{ Kal}$.

Sprawdzenie

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} = \frac{T_2}{T_1}; \quad T_2 = 291 \cdot 1,4^{0,145} = 291 \cdot 1,06 = 308^\circ$$

$$Q = AL \frac{k-m}{k-1} = -6,9 \frac{0,23}{0,4} = -4,64 \text{ Kal.}$$

Zadanie 69

Mając wzór dla ciepła właściwego przy zmianie politropowej

$$c = \frac{(m-k) c_v}{m-1}$$

przedstawić graficznie przebieg zmienności c w zależności od wykładnika politropy m , który ma się zmieniać w granicach od $-\infty$ do $+\infty$.

Otrzymane wyniki zastosować do uogólnienia zmian stanu gazów.

Rozwiązanie

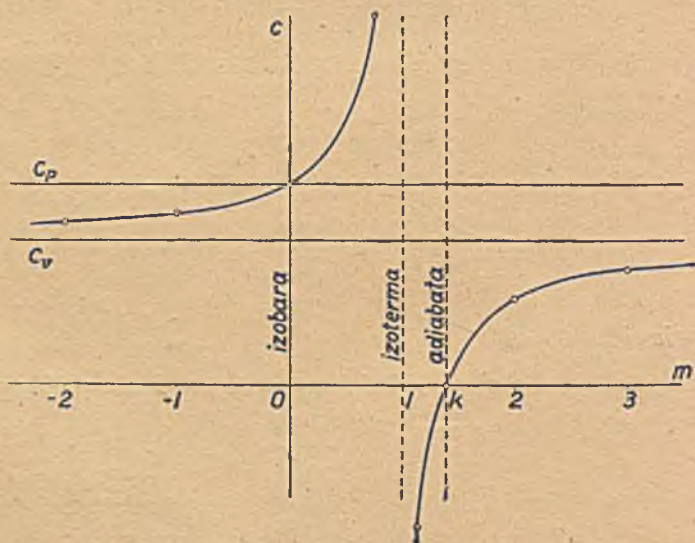
Nadając dla m szereg charakterystycznych wartości, jak $m = -\infty, 0, 1, k, +\infty$, otrzymujemy dla c wyniki jak poniżej:

$$\begin{array}{c|c} m & -\infty \quad 0 \rightarrow 1 \quad k \rightarrow \infty \\ \hline c & c_v \rightarrow c_p \quad | \rightarrow 0 \rightarrow c_v \end{array}$$

Przyjmujemy $c_v = 1.9$

Wtedy przy	$m = -2$	$c = 1,133 c_v = 2,15$
	$m = -1$	$c = 1,2 c_v = 2,28$
	$m = 0$	$c = 1,4 c_v = 2,66 = c_p$
	$m = 0.75$	$c = 2,6 c_v = 4,94$
	$m = 1.2$	$c = -c_v = -1,9$
	$m = 2$	$c = 0,6 c_v = 1,14$
	$m = 3$	$c = 0,8 c_v = 1,52$

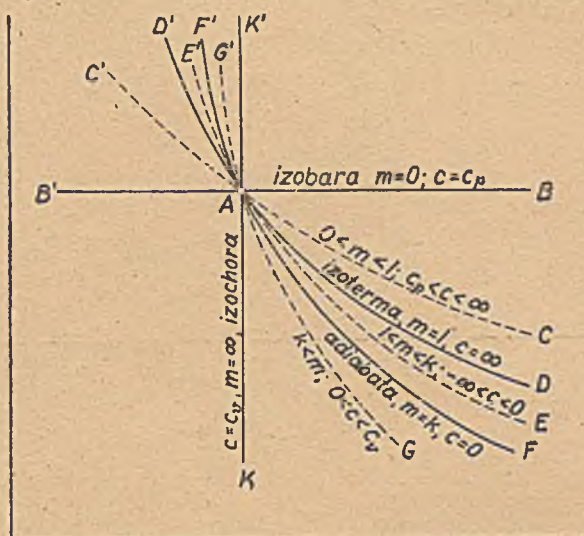
Otrzymane wartości dla c wykreślamy na osiach współrzędnych.



Z wykresu widać, że otrzymaliśmy hiperbolę o asymptotach:

$$c = c_v \text{ i } m = 1.$$

Uogólnienie zmian stanu gazów graficznie przedstawia się jak poniżej.

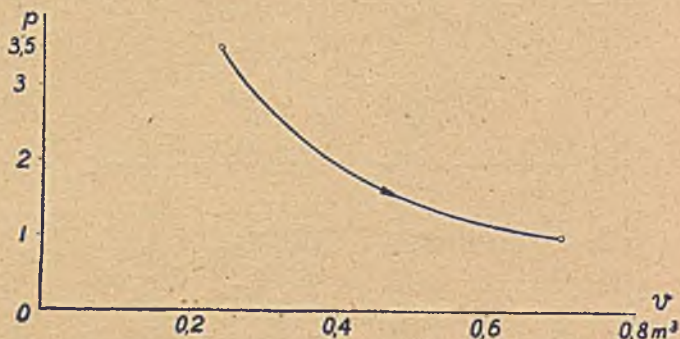


1. Zmiana AB . Rozszerzanie izobaryczne
 $m = 0$ i $c = c_p$; $0 < \Delta Q$ i $T_A < T_B$.
2. „ AC . Rozprężanie politropowe
 $0 < m < 1$ i $c_p < c < \infty$; $0 < \Delta Q$ i $T_A < T_c$.
3. „ AD . Rozprężanie izotermiczne
 $m = 1$ i $c = \infty$; $0 < \Delta Q$ i $T_A = T_D$.
4. „ AE . Rozprężanie politropowe
 $1 < m < k$ i $-\infty < c < 0$; $0 < \Delta Q$, $T_E < T_A$.
5. „ AF . Rozprężanie adiabatyczne
 $m = k$ i $c = 0$; $\Delta Q = 0$ i $T_F < T_A$.
6. „ AG . Rozprężanie politropowe
 $k < m < \infty$ i $0 < c < c_v$; $\Delta Q < 0$ i $T_G < T_A$.
7. „ AK . Rozprężanie izochoryczne
 $m = \infty$ i $c = c_v$; $\Delta Q < 0$ i $T_K < T_A$.

Zadanie 70

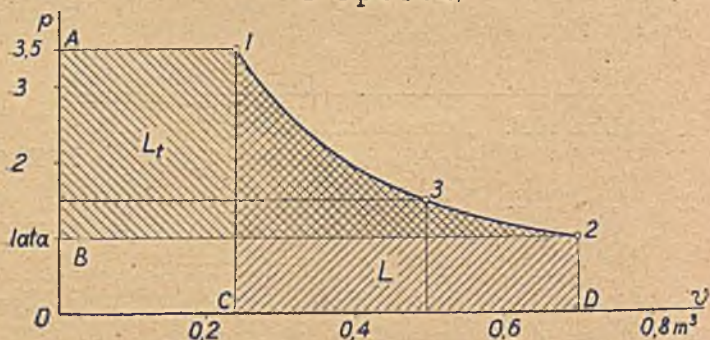
1 kg powietrza $0^\circ \text{C} = 18^\circ$ i $p = 3,5$ ata rozpręża się wzdłuż niżej podanej politropy. Określić wykładnik m politropy oraz

przeprowadzić pomiary prac L_i i L w kgm przy rozprężaniu od $p_1 = 3,5$ ata do $p_2 = 1$ ata.



Rozwiązanie

1 sposób.



$$m = \frac{\text{pole } A \text{ } 12 \text{ } B}{\text{pole } 12 \text{ } D \text{ } C} = \frac{105,5}{88} = 1,2$$

Pola zmierzono planimetrem: $A \text{ i } B = 1050 \text{ mm}^2$

$$12 DC = 880 \text{ mm}^2.$$

2 sposób

$$v_c \approx v = \frac{RT}{p} = \frac{29,27 \times 291}{3,5 \times 10^4} = 0,244 \text{ m}^3.$$

Mamy punkt (1) o współrz. $p_1 = 3,5$ i $v_1 = 0,244$.

Dowolny punkt (3) $p_3 = 1,5 \quad v_3 = 0,495$ wg podziałki.

$$\text{Zatem } m = \frac{\lg p_1 - \lg p_3}{\lg v_3 - \lg v_1} = \frac{0,5441 - 0,1761}{0,6946 - 0,3863} = 1,2.$$

Pomiary pracy L i L_i w kgm

Podziałka: $1,10^4 = 10 \text{ mm}$; $0,2 \text{ m}^3 = 20 \text{ mm}$

$10^3 = 1 \text{ mm}$; $0,01 \text{ m}^3 = 1 \text{ mm}$

$1 \text{ mm}^2 = 10^3 \cdot 0,01 = 10 \text{ kgm}$

$L_i = 10500 \text{ kgm}$

$L = 8800 \text{ kgm}$.

5. Obiegi (§ 27, 28, 29 i 30)

Zadanie 71

Wykreślić obieg Carnota, jaki wykonywa 1 kg powietrza w granicach temperatur 300° i 100° i w granicach prężności 10 ata i 1 ata.

Rozwiązanie

Należy określić p i v we wszystkich węzłowych punktach obiegu,

$$T_1 = T_2 = 573^\circ; \quad T_3 = T_4 = 373^\circ$$

$$v_1 = \frac{29,27 \cdot 573}{10^5} = 0,1675 \text{ m}^3$$

$$v_3 = \frac{29,27 \cdot 373}{10^4} = 1,09 \text{ m}^3.$$

$$\text{Ponieważ } \frac{p_2}{p_3} = \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{573}{373}\right)^{3,5} = 4,5,$$

więc $p_2 = 4,5 \text{ ata}$, gdyż $p_3 = 1 \text{ ata}$.

Pozostałe spółrzędne v_2 , v_4 i p_4 obliczymy ze wzorów

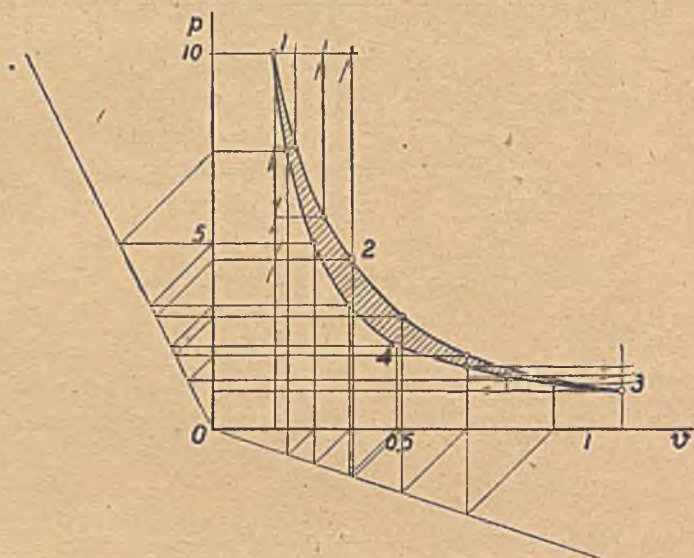
$$v_1 v_3 = v_2 v_4, \quad p_1 p_3 = p_2 p_4$$

$$\text{oraz } p_1 v_1 = p_2 v_2 \text{ i } p_3 v_3 = p_4 v_4.$$

Otrzymamy wyniki:

	1	2	3	4	
p	10	4,5	1	2,2	ata
v	0,1675	0,372	1,09	0,492	m ³

Według otrzymanych danych wykreślmy obieg Carnota.



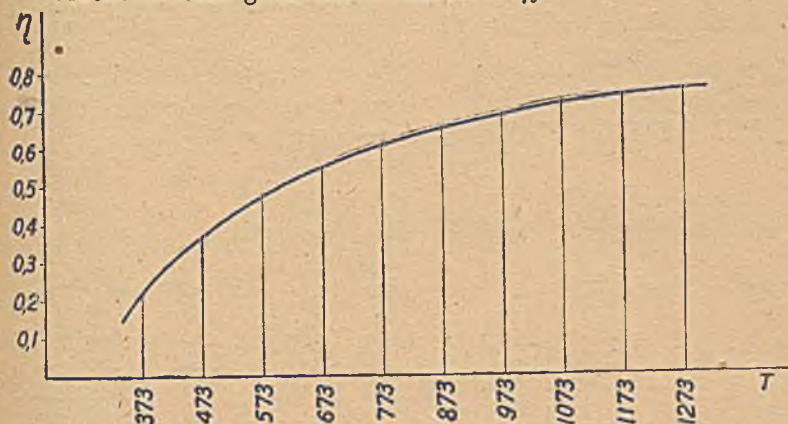
Zadanie 72

Przedstawić wpływ na sprawność obiegu Carnota temperatury górnego źródła zmieniającej się co 100° od 100° aż do 1000° , podczas gdy temperatura dolnego źródła pozostaje stała: 20° .

Rozwiązanie

$$\text{Sprawność obiegu Carnota } \eta_c = \frac{T - T_0}{T}$$

T żr. g	373°	473°	573°	673°	773°	873°	973°	1073°	1173°	1273°
T_0 żr. d	293°	293°	293°	293°	293°	293°	293°	293°	293°	293°
η	0,214	0,38	0,49	0,56	0,62	0,665	0,7	0,725	0,75	0,77



Zadanie 73

W punkcie 4 obiegu silnika wybuchowego w cylindrze znajduje się 1 kg mieszaniny o $t_4 = 100^\circ$ i $p_4 = 1$ ata, która zostaje sprężona do $p_1 = 6$ ata. Przyjmując $R = 30$, $k = 1,4$ obliczyć prężność i temperaturę we wszystkich węzłowych punktach obiegu, pracę i sprawność, jeżeli po wybuchu osiągnięta została prężność $p_2 = 20$ ata.

Rozwiązanie

Mamy:

	4	1	2	3
T	373°	T_1	T_2	T_3
p	1 ata	6	20	p_3

$$T_1? \quad \frac{T_1}{T_4} = \left(\frac{p_1}{p_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 6^{0,286} = 1,67$$

$$T_1 = 623^\circ \quad t_1 = 350^\circ.$$

$T_2?$ Do obliczenia T_2 potrzebne jest $v_0 = v_1 = v_2$.

$$p_1 v_0 = RT_1; \quad v_0 = \frac{30 \cdot 623}{6 \cdot 10^4} = 0,3115 \text{ m}^3.$$

$$\text{Wtedy } p_2 v_0 = RT_2; T_2 = \frac{20 \cdot 10^4 \cdot 0,3115}{30} = 2077^\circ$$

$$t_2 = 1804^\circ.$$

$$T_3? \quad T_1 T_3 = T_2 T_4; T_3 = \frac{2077 \cdot 373}{623} = 1240^\circ$$

$$t_3 = 967^\circ.$$

Do obliczenia Q i Q_0 potrzebne jest c_v

$$c_v (k-1) = AR; \quad c_v = \frac{30}{427 \cdot 0,4} = 0,175 \text{ Kal/kg/}^\circ.$$

$$Q? \quad Q = c_v (T_2 - T_1) = 0,175 (2077 - 623) = 254,8 \text{ Kal}$$

$$Q_0 = c_v (T_3 - T_4) = 0,175 (1240 - 373) = 151,8 \text{ Kal}$$

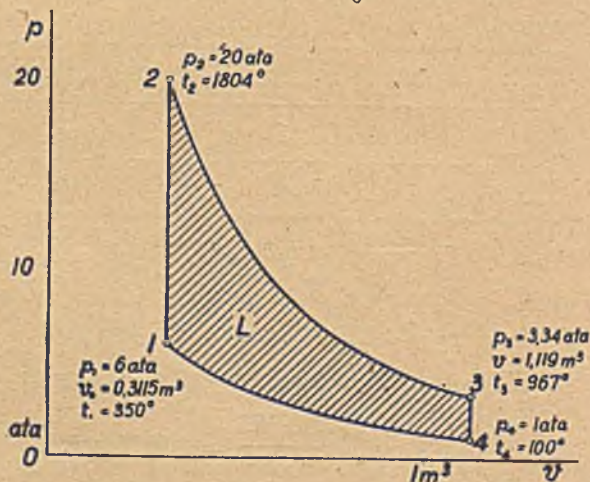
$$AL = 103 \text{ Kal}$$

$$\eta? \quad \eta = \frac{103}{254,8} = 0,404; \text{ Albo } \eta = 1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^{k-1}$$

$$p_4 v = RT_4; v = \frac{30 \cdot 373}{10^4} = 1,119 \text{ m}^3$$

$$\eta = 1 - \left(\frac{0,3115}{1,119}\right)^{0,4} = 0,4.$$

$$p_3? \quad p_1 p_3 = p_2 p_4; p_3 = \frac{20}{6} = 3,34 \text{ ata.}$$



Zadanie 74

Przestrzeń dawkowa w silniku wybuchowym stanowi $7\frac{1}{2}\%$, 10% , 15% , 20% , 25% , $33\frac{1}{3}\%$ i 40% objętości cylindra. Jak się zmienia teoretycznie sprawność silnika?

Rozwiązanie Jeżeli objętość cylindra bez przestrzeni dawkowej przyjmiemy jako 100% , a przestrzeń dawkową — $7\frac{1}{2}\%$, to $v_0 = 7\frac{1}{2}$, a $v = 107\frac{1}{2}$.

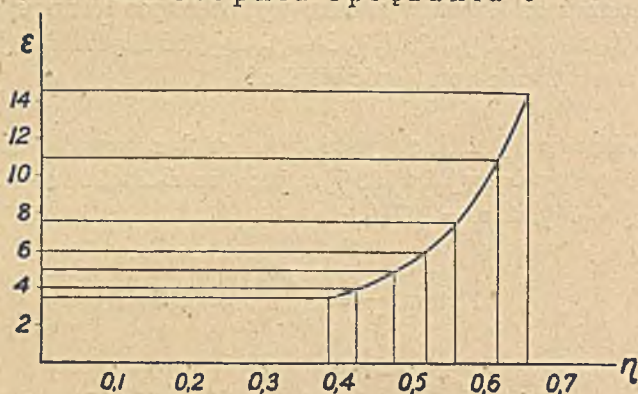
$$\text{Zatem } \frac{v_0}{v} = \frac{7\frac{1}{2}}{107\frac{1}{2}} = 0,07$$

$$\eta = 1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^{k-1} = 1 - 0,345 = 0,655.$$

Wyniki zawiera tabliczka:

$\frac{V_0}{\pi D^2 S \frac{4}{4}}$	$7\frac{1}{2}\%$	10%	15%	20%	25%	$33,3\%$	40%
v_0/v	0,07	0,091	0,13	0,166	0,2	0,25	0,286
$\left(\frac{v_0}{v}\right)^{0,4}$	0,345	0,383	0,442	0,476	0,525	0,575	0,61
η	0,655	0,617	0,558	0,524	0,475	0,425	0,39
$\varepsilon = v/v_0$	14,3	11	7,7	6	5	4	3,5

Przedstawienie graficzne zależności η od stopnia sprężania ϵ



Zadanie 75

W martwym położeniu tłoka w silniku Diesla w przestrzeni dawkowej znajduje się 1 kg powietrza o prężności $p = 35 \text{ ata}$ i $t_1 = 527^\circ$. Do przestrzeni wtrysnięto 30 g oleju gazowego o wartości opałowej 10500 Kal/kg.

O ile wzrośnie temperatura powietrza, jeżeli 12 % doprowadzonego ciepła pochłania woda chłodnicza? Ile ciepła idzie na podwyższenie temperatury powietrza, a ile na pracę?

Rozwiązanie

Mamy:	v	p	T
(1)	v_1	$35 \cdot 10^4$	800°
(2)	v_2	$35 \cdot 10^4$	T_2

$$W ? \quad W = 10500 \times 0,03 = 315 \text{ Kal}$$

$$Q ? \quad Q = 0,88 W = 277 \text{ Kal}$$

$$T_2 ? \quad Q = c_p (T_2 - T_1); \quad T_2 - T_1 = \frac{277}{0,24} = 1153$$

$$T_2 = 1953^\circ, \quad t_2 = 1680^\circ$$

$$L \quad L = R (T_2 - T_1) = 29,27 \cdot 1153 = 33750 \text{ kJm}$$

$$AL = 79 \text{ Kal}$$

$$U \quad U = c_v (T_2 - T_1) = 0,172 \cdot 1153 = 198 \text{ Kal}$$

$$277 \text{ Kal}$$

$$v_1 \quad v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{29,27 \cdot 800}{35 \cdot 10^4} \quad V_1 = 0,0668 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 \quad v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{29,27 \cdot 1953}{35 \cdot 10^4} = 0,1632 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Zadanie 76

Silnik Diesla o wymiarach cylindra: $D = 300 \text{ mm } \varnothing$ i $S = 420 \text{ mm}$ skoku zużywa na każdy roboczy suw tłoka $1,2 \text{ g}$ oleju gazowego o wartości opałowej 10000 Kal/kg , który spala się przy stałej prężności 35 ata i przy temperaturze zapłonu $t = 600^\circ$. Jaka będzie temperatura w końcu spalania i jaki % skoku będzie trwało spalanie, jeżeli przestrzeń dawkowa silnika stanowi $7,5 \%$ jego objętości?

Rozwiązanie

W przestrzeni dawkowej, która wynosi $0,075 \frac{\pi D^2}{4} S =$

$$= \frac{0,075 \cdot 3,14 \cdot 0,3^2 \cdot 0,42}{4} = 0,00223 \text{ m}^3, \text{ mamy powietrze}$$

sprężone do 35 ata , którego $t_1 = 600^\circ$ i którego $V_1 = 0,00223 \text{ m}^3$.

Ilość doprowadzonego ciepła Q równa się

$$Q = 10000 \cdot 0,0012 = 12 \text{ Kal.}$$

Temperaturę końcową otrzyma się z równania

$$Q = G c_p (T_2 - T_1), \text{ gdzie } G = \frac{p V_1}{RT_1} =$$

$$= \frac{35 \cdot 10^4 \cdot 0,00223}{29,27 \cdot 873} = 0,0306 \text{ kg}$$

$$\text{Zatem } T_2 - T_1 = \frac{12}{0,0306 \cdot 0,24} = 1635,$$

$$\text{to } T_2 = 1635 + 873 = 2508^\circ$$

V_2 odnajdziemy z równania $V_2 = \frac{V_1 T_2}{T_1}$

$$V_2 = \frac{0,00223 \cdot 2508}{873} = 0,0064 \text{ m}^3.$$

Odejmując przestrzeń dawkową otrzymamy $V_2 - V_1$, czyli część objętości cylindra, w której się odbywało spalanie

$$0,0064 - 0,00223 = 0,00417 \text{ m}^3,$$

$$\text{co stanowi } \frac{0,00417 \cdot 4 \cdot 100}{\pi \cdot 0,3^2 \cdot 0,42} = \sim 14 \%$$

objętości cylindra, a więc i skoku.

Zadanie 77

W silniku Diesla o wymiarach cylindra: $D = 300 \text{ mm} \varnothing$ i $S = 420 \text{ mm}$ skoku odbywa się sprężanie powietrza od $p_1 = 1 \text{ ata}$ i $t_1 = 15^\circ$ do $p_2 = 35 \text{ ata}$ przy doprowadzeniu tłoka do odkorbowego martwego położenia.

Określić przestrzeń dawkową (V_2), temperaturę w końcu sprężania i pracę sprężania.

Rozwiązanie

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} S + V_2 = 0,0297 + V_2.$$

Z prawa Poissona:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k; 35^{\frac{1}{k}} = \frac{V_1}{V_2} = 12,66$$

$$\text{a więc } 0,0297 + V_2 = 12,66 V_2,$$

$$\text{stąd } V_2 = 0,00246 \text{ m}^3,$$

$$\text{co stanowi } \frac{0,00246 \cdot 100}{0,0297} = 8,3\% \text{ objętości cylindra.}$$

T_2 obliczy się z równania:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; T_2 = 796^\circ.$$

$$L = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{k - 1}, \text{ gdzie } V_1 = 0,03216 \text{ m}^3$$

$$L = -1350 \text{ kgm.}$$

Zadanie 78

W punkcie 4 obiegu silnika Diesla w cylindrze znajduje się 1 kg powietrza o $t_4 = 20^\circ$ i $p_4 = 1$ ata, które zostaje sprężone do $p_1 = 35$ ata i po spalaniu dawki osiąga na początku rozprężania $t_2 = 2000^\circ$. Przyjmując $c_p = 0,22$ i $k = 1,4$ obliczyć prężność i temperaturę we wszystkich węzłowych punktach obiegu, pracę i sprawność.

Rozwiązanie

4	1	2.	3
$T_4 = 293^\circ$	T_1	2273°	T_3
$p_4 = 1$ ata	$p_1 = 35$ ata	T_1 $p_2 = 35$ ata	p_3
v_4	v_1	v_2	$v_3 = v_4$

$$R ? \quad c_p - c_v = AR; \quad c_p \left(\frac{k-1}{k} \right) = AR; \quad c_v = \frac{0,22}{1,4} = 0,157 \frac{\text{Kal}}{\text{kg}, 1^\circ}$$

$$R = \frac{c_p}{A} \frac{k-1}{k} = \frac{0,22 \cdot 427 \cdot 0,4}{1,4} = \underline{\underline{29,5}}$$

$$v_1 ? \quad v_4 p_4 = RT_4; \quad v_4 = \frac{29,5 \cdot 293}{10^4} = \underline{\underline{0,864 \text{ m}^3/\text{kg}}}$$

$$v_1 ? \quad \frac{v_4}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_4} \right)^{1/k}; \quad v_1 = \frac{0,864}{35^{0,715}} = \frac{0,864}{12,64}$$

$$v_1 = \underline{\underline{0,0684 \text{ m}^3/\text{kg}}}$$

$$T_1 ? \quad \frac{T_1}{T_4} = \left(\frac{p_1}{p_4} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad T_1 = 293 \cdot 35^{0,286} = 293 \cdot 2,765$$

$$T_1 = \underline{\underline{811^\circ}}$$

$$v_2 ? \quad v_2 p_2 = RT_2; \quad v_2 = \frac{29,5 \cdot 2273}{35 \cdot 10^4} = \underline{\underline{0,1918 \text{ m}^3}}$$

$$p_3 ? \quad \frac{p_2}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^k; \quad p_3 = \frac{35}{\left(\frac{0,864}{0,1918} \right)^{1,4}} = \frac{35}{8,22} = \underline{4,26 \text{ ata}}$$

$$T_3 ? \quad p_3 v_3 = RT_3; \quad T_3 = \frac{4,26 \cdot 10^4 \cdot 0,864}{29,5} = \underline{1248^\circ}$$

$$Q ? \quad Q = c_p (T_2 - T_1) = 322 \text{ Kal}$$

$$Q_0 = c_v (T_3 - T_4) = 150 \text{ Kal}$$

$$\underline{AL = 172 \text{ Kal}}$$

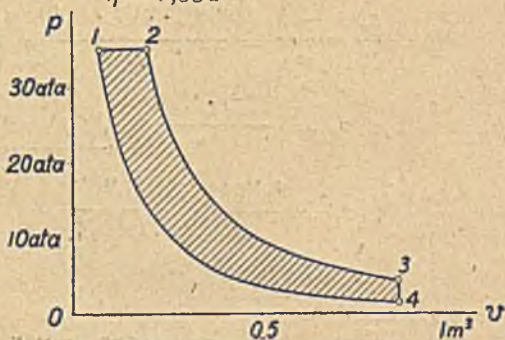
$$\eta = \frac{172}{322} = 0,534$$

$$\text{albo } \eta = 1 - \frac{1}{k} \left(\frac{v_1}{v_4} \right)^{k-1} \frac{\left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k - 1}{\frac{v_2}{v_1} - 1};$$

$$\frac{1}{k} = 0,715; \quad \left(\frac{v_1}{v_4} \right)^{k-1} = 0,364; \quad \frac{v_2}{v_1} = 2,8; \quad 2,8^{1,4} = 4,23$$

$$\eta = 1 - 0,75 \cdot 0,364 \frac{3,23}{1,8} = 1 - 0,466$$

$$\eta = 0,534$$



	4	1	2	3
T	293°	811°	2273	1248°
p	1 ata	35 ata	35 ata	$4,26 \text{ ata}$
v	$0,864$	$0,084$	$0,1918$	$0,864$

Zadanie 79

Wyliczyć i przedstawić graficznie zmienność η dla teoretycznego silnika Diesla zakładając, że ε jest 12, 13, 14, 15, 16, a $\varphi = 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 4$ i 5, jeżeli $k = 1,3$.

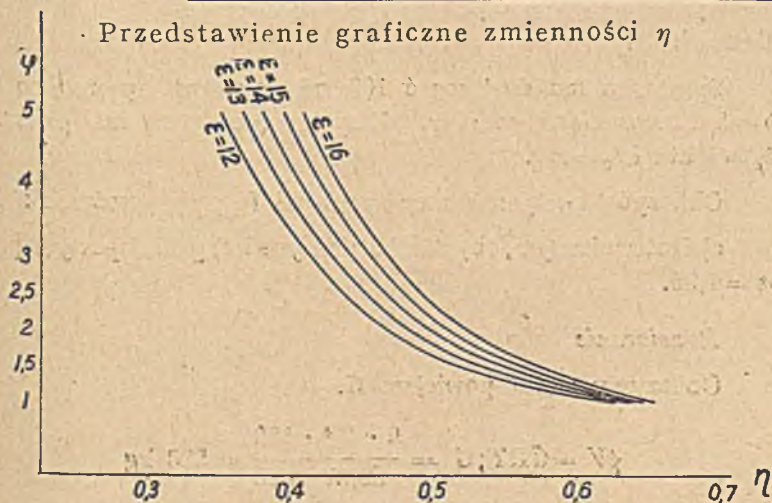
Rozwiązanie

$$\varepsilon = \frac{v_4}{v_1}; \quad \varphi = \frac{v_2}{v_1}; \quad \text{wtedy } \eta = 1 - \frac{1}{k} \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{k-1} \cdot \frac{\varphi^k - 1}{\varphi - 1}.$$

Wyniki podane w tabliczce.

$\frac{1}{k} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{0,3}$		φ	1	1,5	2	2,5	3	4	5
0,365	$\varepsilon = 12$	η	0,635	0,492	0,468	0,440	0,420	0,385	0,351
0,356	$\varepsilon = 13$	η	0,644	0,508	0,480	0,454	0,436	0,402	0,367
0,347	$\varepsilon = 14$	η	0,653	0,517	0,494	0,467	0,450	0,416	0,384
0,342	$\varepsilon = 15$	η	0,658	0,525	0,502	0,475	0,457	0,425	0,392
0,335	$\varepsilon = 16$	η	0,665	0,535	0,511	0,486	0,469	0,436	0,405
$\frac{\varphi^k - 1}{\varphi - 1}$	φ^k		1	1,694	2,46	3,3	4,17	6,05	8,11
				1,39	1,46	1,534	1,585	1,68	1,777

Przedstawienie graficzne zmienności η



Z biegu krzywych na wykresie widać, że ε niewiele wpływa na η , natomiast najkorzystniej wybierać φ od 1 do 2.

Zadanie 80

Sprężarka spręża 50 l powietrza na sekundę o $t=10^\circ$ i ciśnieniu atmosferycznym 760 mm sł. rt. izotermicznie do 3,5 ata. Obliczyć 1) V_2 , 2) pracę sprężania L , 3) ilość odprowadzonego ciepła Q i 4) teoretyczną moc silnika sprężarki N .

Rozwiązanie

Mamy	V	p	T	1) V_2 ? $V_1 p_1 = V_2 p_2$
(1)	0,05	760 mm	283°	
(2)	V_2	3,5 ata	„	$V_2 = \frac{0,05 \cdot 1,03}{3,5} = 0,0147 \text{ m}^3$
	$10^4 - 0^0 - 735,5 \text{ mm}$			
	$10^4 - 15^0 - 737,4$			2) $L = p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$
	$10^4 - 10^0 - 736,7$			$L = 1,03 \cdot 10^4 \cdot 0,05 \cdot 2,3 \lg \frac{p_2}{p_1}$
	$p_1 = \frac{10^4 \cdot 736,7}{760} = 10300 \text{ kg/m}^3$			$L = 630 \text{ kgm}$
3) $Q = AL = 1,475 \text{ Kal.}$			4) $N = \frac{630}{75} = 8,4 \text{ KM.}$	

Zadanie 81

Sprężarka ma dostarczać 100 m³ powietrza sprężonego do $p=5 \text{ ata}$ w ciągu godziny. Zasysane powietrze ma prężność $p_0=1 \text{ ata}$ i $t_0=20^\circ$.

Obliczyć teoretyczną moc sprężarki N przy sprężaniu :

a) izotermicznym, b) adiabatycznym i c) politropowym przy $m=1,25$.

Rozwiązanie

Obliczymy ciężar powietrza G .

$$pV = GRT; G = \frac{5 \cdot 10^4 \cdot 100}{29,27 \cdot 293} = 583 \text{ kg}$$

a) Sprężanie izotermiczne

Praca na 1 m³ sprężonego powietrza.

$$L_{izot.} = p \ln \frac{p}{p_0} = 5 \cdot 10^4 \cdot 2,3 \lg 5 = 80385 \text{ kgm/m}^3$$

$$N_{izot.} = \frac{100 \cdot 80385}{3600 \cdot 75} = 29,8 \text{ KM.}$$

$$\text{na 1 kg powietrza } \frac{29,8}{583} = 0,051 \text{ KM.}$$

b) Sprężanie adiabatyczne

Praca na 1 kg powietrza

$$L_{adj.} = \frac{k}{k-1} (pv - p_0 v_0) = \frac{k}{k-1} p v \left(1 - \frac{p_0 v_0}{p v} \right),$$

a że $\frac{v_0}{v} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/k}$, to $\frac{p_0 v_0}{p v} = \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}}$ i praca na 1 m³

sprężonego powietrza

$$L_{adj. (m^3)} = \frac{k}{k-1} p \left[1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right].$$

Lecz po sprężaniu adiabatycznym powietrze będzie miało temperaturę T zamiast T_0 . Po ostygnięciu okaże się, że

powietrza sprężonego zamiast V będzie $V \cdot \frac{T_0}{T}$. Musimy

zatem objętość powietrza powiększyć $\frac{T}{T_0}$ razy i tyle razy powiększyć pracę sprężania.

$$\text{Obliczymy } \frac{T}{T_0}; \frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 5^{0,286} = 1,583,$$

$$\text{więc } L_{adj. (m^3)} = \frac{1,4}{0,4} 5 \cdot 10^4 \left[1 - \left(\frac{1}{5} \right)^{0,286} \right] \cdot 1,583$$

$$L_{adj. (m^3)} = 64600 \cdot 1,583 = 102400 \text{ kgm/m}^3$$

$$N_{adj.} = \frac{102400 \cdot 100}{3600 \cdot 75} = 37,9 \text{ KM; na 1 kg 0,065 KM.}$$

c) Sprężanie politropowe

$$m = 1,25.$$

$$\text{Zgodnie z poprzednim } \frac{T}{T_0} = 5^{\frac{m-1}{m}} = 1,38$$

$$L_{pol. (m^3)} \frac{1,25}{0,25} 5 \cdot 10^4 \left[1 - \left(\frac{1}{5} \right)^{0,2} \right] \cdot 1,38$$

$$L_{pol. (m^3)} = 67400 \cdot 1,38 = 93200 \text{ kgm/m}^3$$

$$N_{pol.} = \frac{93200 \cdot 100}{3600 \cdot 75} = 34,5 \text{ KM; na 1 kg 0,0593 KM.}$$

Zadanie 82

W sprężarce sprężono 1 m³ powietrza o prężności 1 ata i $t = 15^\circ$ do 6 ata. Określić stosunek prac izotermicznego i adiabatycznego sprężania oraz stosunek objętości otrzymanych po sprężeniu powietrza uwzględniając spadek temperatury powietrza sprężonego adiabatycznie do 15°.

Rozwiązanie

Praca sprężania izotermicznego :

$$L_{izot.} = p_0 \ln 6 = \sim 17900 \text{ kgm}$$

Praca sprężania adiabatycznego :

$$L_{adj.} = \frac{k}{k-1} p_0 \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = 3,5 \cdot 10^4 \left(6^{0,286} - 1 \right)$$

$$L_{adj.} = 23620 \text{ kgm}$$

$$\text{Stosunek } \frac{L_{iz.}}{L_{adj.}} = \frac{17900}{23620} = 0,76$$

$$\text{Objętość } V_{is.} = \frac{V_0 p_0}{p} = \frac{1}{6} = 0,167 \text{ m}^3$$

$$\text{Objętość } V_{ad.} = V_0 \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{\kappa}} = \left(\frac{1}{6} \right)^{0,715} = 0,278 \text{ m}^3$$

Temperatura V_{ad} po sprężaniu T ?

$$\text{Jeżeli } \frac{p}{p_0} = 6, \text{ to z tabliczki } \frac{T}{T_0} = 1,668$$

$$\text{Zatem } T = 288 \cdot 1,668 = 483^{\circ}$$

Na zasadzie prawa G. L. $V_{ad.}$ po spadku temperatury z 483° na 288° zmniejszy się do $V'_{ad.}$

$$\text{i } \frac{V_{ad.}}{V'_{ad.}} = \frac{483}{288}; \text{ stąd } V'_{ad.} = \frac{0,278 \cdot 288}{483} = 0,167 \text{ m}^3.$$

$$\text{Stosunek } \frac{V_{is.}}{V'_{ad.}} = 1.$$

Zadanie 83

Sprężarka spręża izotermicznie na minutę 200 m^3 powietrza od $p_0 = 1 \text{ ata}$ do $p = 2,5 \text{ ata}$. Obliczyć teoretyczne zapotrzebowanie mocy na poruszanie sprężarki oraz zapotrzebowanie wody na godzinę do odprowadzania ciepła przy wzroście temperatury wody o 15° .

Wyniki

$$N = \sim 407 \text{ KM}; \text{ Wody } W = \sim 17,4 \text{ m}^3/\text{godz.}$$

Zadanie 84

Obliczyć moc silnika do poruszania sprężarki sprężającej 3600 m^3 powietrza na godzinę od 1 ata do 5 ata a) adiabatycznie, b) izotermicznie.

Wyniki

$$N_{ad.} = 272 \text{ KM}; \text{ } N_{is.} = 214 \text{ KM}$$

6. Para nasycona (§ 31 i § 32)

Zadanie 85

Ile waży 3 m³ pary suchej nasyconej o prężności 12 ata ?
Odp. 1.8 kg.

Zadanie 86

Ile waży 0,6 m³ pary o prężności 15 ata i suchości $x = 0,9$?

Rozwiązanie

$$G = \frac{V}{v} = \frac{V}{v''x + v'(1-x)} = 4,95 \text{ kg.}$$

Zadanie 87

Jaką objętość zajmuje 3 kg pary o prężności 9 ata i $x = 0,97$?

Rozwiązanie

$$V = 3 (v''x + v'(1-x)) = 0,639 \text{ m}^3.$$

Zadanie 88

Jak się zmienia objętość właściwa pary o prężności 10 ata przy zmianie suchości x od 0 do 1 co 0,1 ?

Rozwiązanie

m ³		x	0	0,1	0,2	0,3	0,4
		v	0,0010	0,0207	0,0405	0,0602	0,0801
m ³	x	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	v	0,0997	0,1194	0,1392	0,1589	0,1786	0,1984

Zadanie 89

Jak się zmienia ciężar 1 m³ pary o $p = 10$ ata przy zmianie suchości od 0 do 1 co 0,1 ?

Rozwiązanie

$$\gamma = \frac{1}{v}$$

kg	x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	
	y	1000	48,25	24,72	16,61	12,49	
kg	x	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	y	10,03	8,38	7,18	6,29	5,61	5,4

Zadanie 90

1 kg pary o $p = 20$ ata ma objętość $0,1 \text{ m}^3$. Jaka jest suchość x pary ?

Rozwiązanie

$$x = \frac{0,1 - 0,001}{0,1017 - 0,001} = 0,983.$$

Zadanie 91

2,5 kg pary o $p = 11$ ata ma objętość $0,42 \text{ m}^3$. Jaka jest suchość pary ?

Rozwiązanie

$$v = \frac{0,42}{2,5} = 0,168 \text{ m}^3/\text{kg} \quad x = 0,923.$$

Zadanie 92

Entalpia 1 kg pary $p = 18$ ata i $x = 0,96$?

Od p. $i = 650,1 \text{ Kal/kg}$.

Zadanie 93

Jak się zmienia ciepło parowania 1 kg pary o $p = 8$ ata przy zmianie suchości od 0 do 1 co 0,1 ?

Rozwiązanie

Kal/kg	x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	
	rx	0	49,06	98,12	147,18	196,24	
Kal/kg	x	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	rx	245,3	294,36	343,42	392,48	441,54	490,6

Zadanie 94

Energia wewnętrzna 1 kg pary o $p=0,5$ atn i $x=0,85$?

Rozwiązanie

$$p=0,5 \text{ atn} = 1,5 \text{ ata};$$

$$u = u' + \varrho x, \quad u' = u'' - \varrho, \quad u = u'' - \varrho (1 - x)$$

$$u = 528,25 \text{ Kal/kg.}$$

Zadanie 95

Entropia pary o $p=2$ ata i $x=0,7$?

Rozwiązanie

$$s = s' + \frac{r}{T} x, \quad \frac{r}{T} = s'' - s', \quad s = s' + (s'' - s') x = s'' x + s' (1 - x)$$

$$s = 1,293 \text{ Kal/kg, } 1^\circ.$$

Zadanie 96

Entropia pary o $p=6$ ata i $x=0,9$ względem wody o temperaturze wrzenia?

Rozwiązanie

$$\text{Mamy wyliczyć } \frac{rx}{T}, \text{ czyli } (s'' - s') x$$

$$\frac{rx}{T} = (1,6181 - 0,4592) 0,9 = 1,043 \text{ Kal/kg, } 1^\circ$$

Zadanie 97

Entalpia 1 m³ pary o $p=18^\circ$ i $x=0,96$.

Rozwiązanie

W zadaniu 92 znaleźliśmy entalpię tej pary dla 1 kg :

$i = 650,1 \text{ Kal/kg}$. Należy obliczyć ciężar 1 m³ tej pary. $\gamma = \frac{1}{v}$;

$v = v'' x + v' (1 - x) = 0,1082 \text{ m}^3/\text{kg}$, zatem $\gamma = 9,22 \text{ kg/m}^3$.

A więc $i_{m3} = 650,1 \cdot 9,22 = \sim 6000 \text{ Kal/m}^3$.

Zadanie 98

Teoretyczny wydatek ciepła, aby z wody o $t = 86^\circ$ otrzymać 1 m³ pary o $p = 15$ ata i $x = 0,95$?

Rozwiązanie

Entalpia tej pary :

$$i = i' + rx - t = 644 - 80 = 564 \text{ Kal/kg}$$

Ciężar 1 m³ pary:

$$\gamma = \frac{1}{v}; \quad v = 0,1345 \cdot 0,95 + 0,001 \cdot 0,05 = 0,128 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\gamma = 7,8 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Zatem } i_{m3} = 564 \cdot 7,8 = 4400 \text{ Kal/m}^3$$

Zadanie 99

Kocioł wytwarzający parę o $p = 9$ atn zasilany jest wodą o temperaturze 70° . Ile ciepła należy wydać na 1 kg pary, jeżeli kocioł pracuje ze sprawnością $\eta = 0,7$ i daje parę o $x = 0,92$.

Rozwiązanie

$$p = 9 \text{ atn} = 10 \text{ ata}$$

$$i = 181 + 479,4 \cdot 0,92 - 70 = 552 \text{ Kal/kg}$$

$$Q = \frac{i}{\eta} = 789 \text{ Kal/kg.}$$

Zadanie 100

Kocioł wytwarzający parę o $p = 11$ atn przy $x = 0,95$ zasilany jest wodą o temperaturze pary. Ile kg pary przypada na 1 kg zużytego w palenisku węgla, jeżeli wartość opałowa węgla jest 6100 Kal/kg i sprawność kotła $\eta = 0,7$?

Rozwiązanie

$$p = 11 \text{ atn} = 12 \text{ ata}; t_{\text{wrzenia}} = 187,1^{\circ}$$

$$i = i' + rx - t = 454,6 \text{ Kal/kg}$$

Z 1 kg węgla otrzymuje się:

$$6100 \cdot 0,7 = 4270 \text{ Kal/kg}$$

$$\frac{4270}{454,6}$$

$$= 9,4 \text{ kg pary z 1 kg węgla}$$

(odparowalność paliwa).

Zadanie 101

Mamy dwa naczynia po 1 m³ pojemności. Jedno z parą suchą nasyconą o $p = 1,5$ ata, drugie z wodą o tejże temperaturze co i para.

Ile ciepła zawiera każde z naczyń licząc od 0° i jaki jest stosunek tych ilości ciepła?

Rozwiązanie

Naczynie z parą $p = 1,5$ ata

$$i'' = 643,4 \text{ Kal/kg}; \gamma'' = 0,84602 \text{ kg/m}^3$$

$$Q_{\text{pary}} 643,4 \times 0,84602 = 544 \text{ Kal/m}^3$$

Naczynie z wodą o $t = 110,9^{\circ}$

$$i' = 110,9 \text{ Kal/kg}$$

1 m³ wody o takiej temperaturze waży 951 kg

(Mechanik I, str. 245)

$$Q_{\text{wody}} 110,9 \cdot 951 = 105500 \text{ Kal/m}^3$$

$$\frac{Q_{\text{wody}}}{Q_{\text{pary}}} = 194$$

$$Q_{\text{pary}}$$

Wniosek: woda gorąca jest znacznie lepszym zasobnikiem ciepła niż para tejże temperatury.

Zadanie 102

Kocioł walczakowy zawierający 7 m^3 wody wytwarza 600 kg pary na godzinę o $p = 7 \text{ atn.}$ Wskutek dużego zapotrzebowania pary ciśnienie w kotle raptownie spadło do 6 atn. Nadmiar ciepła cieczy spowoduje jej dalsze odparowanie.

Ile kg pary zostało w ten sposób dodatkowo odparowane i jaki to będzie odsetek od ilości normalnej?

Rozwiązanie

$$i' = 171,2$$

8 ata

$$i' = 165,5$$

7 ata

$5,7 \text{ Kal/kg}$ idzie na dodatkowe odparowanie wobec spadku prężności.

Odparowanie odbywa się stopniowo od 7 ata do 8 ata , zatem i'' należy wziąć średnie.

$$i'' = 661,8$$

8 ata

$$i'' = 660,5$$

7 ata

$$1322,3 : 2 = 661,2 \text{ Kal/kg.}$$

Odparowało dodatkowo $y \text{ kg}$ wody.

$$y \cdot 661,2 = 5,7 \cdot 7000$$

$y \sim 60 \text{ kg}$ wody, co stanowi 10% wydajności kotła na g .

7. Zmiany stanu pary nasyconej (§ 33)

Zadanie 103

Do zamkniętego naczynia pojemności 500 l z parą o $p = 5 \text{ ata}$ i $x = 0,7$ doprowadzono ciepła aż do całkowitego wysuszenia pary ($x = 1$).

Wyliczyć:

- 1) prężność pary suchej nasyconej,
- 2) wydatek ciepła na wysuszenie.

Rozwiązanie

1) Ze wzoru $\frac{x_2}{x_1} = \frac{v''_1 - v'_1}{v''_2 - v'_2}$ mamy

$$\frac{1}{0,7} = \frac{0,3812}{v''_2 - 0,001}, \text{ skąd } v''_2 = 0,2678 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Szukamy p odpowiadającego v''_2 stosując interpolację

Dla 7 ata $v'' = 0,2782$

7,5 0,2607

+ 0,5 - 0,0175

0,1 ata - 0,0035 m³/kg

$$0,2678 - 0,2607 = 0,0071; 0,0071 : 0,0035 = 2.$$

$$\text{Zatem } p_2 = 7,5 - 0,2 = 7,3 \text{ ata}.$$

2) $\Delta Q = u'_2 + x_2 q_2 - u'_1 - x_1 q_1$, a że $u' = u'' - q$,
to $\Delta Q = u''_2 - q_2 (1 - x_2) - u''_1 + q_1 (1 - x_1)$.

Należy uprzednio wyliczyć drogą interpolacji u''_2 i q_2 dla $p_2 = 7,3$ ata:

p	u''	q
7	614,9	449,6
7,5	615,4	447,1
+ 0,5	+ 0,5	- 2,5
0,1	0,1	- 0,5
0,3	0,3	- 1,5
7,3	615,2	448,1

$$\Delta Q = 615,2 - 612,1 + 460,2 \cdot 0,3 = 141,16 \text{ Kal/kg}.$$

$$\text{Ciężar pary } G = \frac{V}{[v''x + v'(1-x)]} = 1,87 \text{ kg/m}^3$$

$$G \cdot \Delta Q = 141,16 \times 1,87 = 265 \text{ Kal}.$$

Zadanie 104

W zbiorniku pojemności 120 l jest para o $p = 2$ ata w ilości 0,2 kg. Określić prężność po wprowadzeniu do pary 32 Kal przy $v = \text{const}$.

Rozwiązanie

Sprężanie izochoryczne.

Stan początkowy: $v_1 = \frac{V}{G} = 0,6 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$x = \frac{0,6 - 0,001}{0,903 - 0,001} = 0,665$$

$$\Delta Q = 32 : 0,2 = 160 \text{ Kal/kg}$$

$$u_1 = u''_1 - \frac{1 \text{ kg}}{G} \Delta Q = u_2 - u_1$$
$$u_1 = u''_1 - q_1 (1 - x_1) = 604,3 - 484,5 \cdot 0,335 =$$
$$= 441,7 \text{ Kal/kg}$$

$$u_2 = \Delta Q + u_1 = 441,7 + 160 = 601,7 \text{ Kal/kg.}$$

Według wartości u_2 będziemy szukali odpowiedniego p_2 drogą prób.

Niech $p_2 = 2,5 \text{ ata}$; $v''_2 = 0,7339$

$$x_2 = 0,665 \frac{0,902}{0,7329} = 0,816$$

$$u_2 = 606,2 - 479,15 \cdot 0,184 = 518 \text{ Kal/kg}$$

za mało o 83,7 Kal.

Niech $p_2 = 3 \text{ ata}$; $v''_2 = 0,6176$

$$x_2 = 0,665 \frac{0,902}{0,6166} = 0,976$$

$$u_2 = 607,8 - 474,5 \cdot 0,024 = 596,4,$$

brak jeszcze 5,3 Kal.

Ponieważ przy wzroście p od 2,5 do 3 ata, czyli o 0,5 ata

u_2 wzrosło o 79,5 Kal, to 1 Kal odpowiada $\frac{0,5}{79,5}$ czyli 0,00629 ata

α 5,3 Kal. 0,033 ata

Zatem $p_2 = 3,033 \text{ ata}$.

Zadanie 105

W kotle walczakowym zawierającym 7,5 m³ pary i 15 m³ wody prężność pary w chwili zaprzestania palenia wynosiła 10 ata. Podczas przerwy nocnej prężność pary wzrosła do 13,5 ata.

Obliczyć ilość ciepła, jaką kocioł pobrał podczas przerwy z obmurowania.

Rozwiązanie

Mamy tu mieszaninę pary i wody o stałej objętości $V = 22,5 \text{ m}^3$. Szukana ilość ciepła $\Delta Q = G(u_2 - u_1) \text{ Kal}$.

Aby znaleźć u_1 i u_2 , należy mieć x_1 i x_2 . Stan początkowy $p = 11 \text{ ata}$.

$$G \text{ pary} = 7,5 \cdot 5,51876 = 41,4 \text{ kg}$$

$$G \text{ wody} = 15 \cdot 887 = \underline{13305 \text{ kg}}$$

(Mech. I, str. 245)

$$G \text{ razem} \quad \quad \quad 13346,4 \text{ kg}$$

Suchość x_1 tej mieszaniny jako całości

$$x_1 = \frac{41,4}{13346,4} = 0,0031.$$

$$\text{Suchość } x_2 = x_1 \frac{v_1'' - v_1'}{v_2'' - v_2'} = 0,0031 \frac{0,1802}{0,1381} = 0,004$$

v_2'' wzięto średnie dla 14 i 15 ata, gdyż $p_2 = 14,5 \text{ ata}$.

$$u_2 = u_2'' - \rho_2(1 - x_2) \quad \quad u_2'' = 619,85$$

$$\rho_2 = 421,25$$

$$u_2 = 199,85 \text{ Kal/kg}$$

$$u_1 = 618,1 - 433 \cdot 0,9969 = 186,1 \text{ Kal/kg}$$

$$\Delta Q = 13346,4 (199,85 - 186,1) = 183500 \text{ Kal}.$$

Zadanie 106

W naczyniu pojemności 300 l znajduje się para o $p_1 = 12 \text{ ata}$ i $x_1 = 0,95$. Określić stan pary po odebraniu jej 240 Kal?

Rozwiązanie

Mamy rozprężanie izochoryczne.

$$v ? \quad v = v'' x + V' (1 - x) = \text{const.}$$

$$v = 0,15851$$

$$G ? \quad G = \frac{V}{v} = \frac{0,3}{0,15851} = 1,8924 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg pary odebrano } \frac{240}{1,8924} = 126,8 \text{ Kal/kg}.$$

$$u_1? \quad u_1 = 598 \text{ Kal/kg}$$

$$u_2? \quad u_2 = 598 - 126,8 = 471,2 \text{ Kal/kg.}$$

p_2 i x_2 określimy drogą prób.

$$\text{Niech } p_2 = 8,5 \text{ ata; } x_2 = 0,685$$

$$u_2 = 476 \text{ Kal/kg, tj. o } 4,8 \text{ Kal. za dużo.}$$

$$\text{Niech } p_2 = 8 \text{ ata; } x_2 = 0,645$$

$$u_2 = 458,2, \text{ tj. o } 13 \text{ Kal za mało.}$$

Interpolacja

$$8,5 \text{ ata} \quad u_2 = 476 \text{ Kal/kg}$$

$$8 \quad 458,2$$

$$0,5 \quad 17,8$$

$$0,0281 \quad 1$$

$$0,134 \text{ ata} \quad 4,8 \text{ Kal}$$

$$\text{odjąć od } 8,5 \text{ ata, } p_2 = 8,366 \text{ ata}$$

$$\text{albo } 0,366 \text{ ata} \quad 13 \text{ Kal}$$

$$\text{dodać do } 8 \text{ ata, } p_2 = 8,366 \text{ ata}$$

$$x_2 = 0,67.$$

Zadanie 107

0,5 kg pary o $p = 3$ ata zajmuje 300 l objętości. Jaki będzie końcowy stan pary po odebraniu jej 80 Kal przy $v = \text{const.}$?

O d p.

$$x_1 = 0,972; u_1 = 594,9 \text{ Kal/kg}$$

$$\Delta Q = 160 \text{ Kal/kg; } u_2 = 434,9 \text{ Kal/kg}$$

$$p_2 = 1,956 \text{ ata; } x_2 = 0,65.$$

Zadanie 108

W zamkniętej rurze pojemności 1 m³ jest para o $p_1 = 9$ ata i $x = 0,92$. Ile ciepła należy doprowadzić do pary, aby otrzymać parę suchą nasyconą i jaka będzie po ogrzaniu jej prężność?

O d p.

$$v = \text{const.} = 0,20202 \text{ m}^3/\text{kg; } G = 4,95 \text{ kg}$$

$$p_2 = 9,8 \text{ ata (interpolacja)}$$

$$u_1 = 582,14 \text{ Kal/kg}$$

$$u_2 = 618,4 \text{ Kal/kg}$$

$$\Delta Q = 36,26 \text{ Kal/kg}; G \Delta Q = 179,5 \text{ Kal.}$$

Zadanie 109

2,02 kg pary o $p_1 = 1$ ata zajmuje $0,4 \text{ m}^3$ objętości. Ile należy doprowadzić ciepła przy $v = \text{const.}$, aby para była sucha nasycona i jaka będzie jej prężność?

O d p.

$$v = \text{const.} = 0,198 \text{ m}^3/\text{kg}; x_1 = 0,114$$

$$p_2 = 10 \text{ ata (z tablicy)}$$

$$u_2 = 617,4 \text{ Kal/kg}; u_1 = 155 \text{ Kal/kg}$$

$$G \Delta Q = \sim 934 \text{ Kal.}$$

Zadanie 110

1,2 kg pary zajmuje przy $p_1 = 5$ ata objętość $0,25 \text{ m}^3$. Ile należy doprowadzić ciepła i jaka będzie wówczas prężność, jeżeli $v = \text{const.}$ i para ma być sucha nasycona?

O d p.

$$v = \text{const.} = 0,208 \text{ m}^3/\text{kg}; x_1 = 0,543$$

$$p_2 \text{ z tablic przyjmujemy} = 9,5 \text{ ata}$$

$$G \Delta Q = 258,5 \text{ Kal.}$$

Zadanie 111

Ile należy wydać ciepła, aby 8 kg pary o $p = 10$ ata i $V_1 = 1,28 \text{ m}^3$ doprowadzić do stanu pary suchej nasyconej tej samej prężności?

Jak wzrośnie energia wewnętrzna pary i jaka będzie jej objętość?

Rozwiązanie

Rozszerzanie izobar.-izoterm.

$$G = 8 \text{ kg, } p = 10 \text{ ata. } V_1 = 1,28 \text{ m}^3$$

$$v_1? \quad v_1 = \frac{1,28}{8} = 0,16 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$x_1? \quad x_1 = \frac{0,159}{0,1974} = 0,804; \quad x_2 = 1$$

$$x_2 - x_1 = 0,196$$

$$\Delta Q? \quad \Delta Q = r (x_2 - x_1) G = 757 \text{ Kal}$$

$$\Delta U? \quad \Delta U = q (x_2 - x_1) G = 684 \text{ Kal}$$

$$v_2? \quad v_2 \text{ z tablicy} = 0,1984 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Można również wyliczyć v_2 ze wzoru:

$$(v_2 - v_1) = (x_2 - x_1) (v'' - v')$$

$$v_2 - v_1 = 0,0387; \quad v_2 = 0,1987 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_2 = 1,59 \text{ m}^3.$$

Zadanie 112

2 kg pary o $p_1 = 12$ ata ściśnięto izotermicznie z objętości 0,28 m³ do 0,14 m³. Określić x na początku i na końcu ściskania; obliczyć pracę, jaką trzeba wydać na ściskanie i ile trzeba z pary odprowadzić ciepła?

Rozwiązanie

Ściskanie izobar.-izoterm.

$$G = 2 \text{ kg}, \quad p = 12 \text{ ata}, \quad V_1 = 0,28 \text{ m}^3, \quad V_2 = 0,14 \text{ m}^3$$

$$v_1 = 0,14 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad v_2 = 0,07 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_1 - v_2 = 0,07 \text{ m}^3$$

$$x_1? \quad x_1 = \frac{0,139}{0,1667} = 0,834$$

$$x_2? \quad v_1 - v_2 = (x_1 - x_2) (v'' - v')$$

$$0,07 = (x_1 - x_2) 0,1667$$

$$x_1 - x_2 = 0,42 \quad x_2 = 0,414$$

$$L? \quad L = Gp (x_2 - x_1) (v'' - v') = Gp (v_2 - v_1)$$

$$L = -2 \cdot 12 \cdot 10^4 \cdot 0,07 = -16800 \text{ kgm}$$

$$Q? \quad \Delta Q = r (x_2 - x_1) = -200 \text{ Kal}$$

$$G\Delta Q = -400 \text{ Kal}.$$

Zadanie 113

4 kg pary o prężności 12 ata i $x=0,45$ zostało rozprężone izotermicznie do dwukrotnej początkowej objętości. Określić stan końcowy pary, pracę zewnętrzną osiągniętą przy rozprężaniu oraz wydane ciepło.

Rozwiązanie

Rozprężanie izoterm.-izobaryczne

$$v_1 ? \quad v_1 = v_1'' x_1 + v_1' (1 - x_1) = (v_1'' - v_1') x_1 + v_1' = \\ = 0,1657 \cdot 0,45 + 0,001 = 0,0756 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 ? \quad v_2 = 2v_1 = 0,1512 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$x_2 ? \quad x_2 = \frac{0,1502}{0,1657} = 0,908$$

$$Q ? \quad \Delta Q = r (x_2 - x_1) = 216 \text{ Kal/kg}$$

$$G\Delta Q = 864 \text{ Kal}$$

$$L ? \quad L = p (x_2 - x_1) (v'' - v') = 9100 \text{ Kal/kg}$$

$$GL = 36400 \text{ Kal.}$$

Zadanie 114

Para sucha nasycona w ilości 4 kg o $p=10$ ata została ściśnięta przy $p=\text{const.}$ do objętości $0,65 \text{ m}^3$. Obliczyć V_1 , x_2 , Q i L .

Rozwiązanie

Ściskanie izobaryczno-izotermiczne

$$v_1 ? \quad v_1'' = v_1 = 0,1984 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ z tablic.}$$

$$v_2 ? \quad v_2 = \frac{0,65}{4} = 0,1625 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$x_2 ? \quad v_1 - v_2 = (x_1 - x_2) (v'' - v')$$

$$x_1 - x_2 = 0,182, \text{ lecz } x_1 = 1$$

$$x_2 = 0,818$$

$$Q ? \quad \Delta Q = r (x_2 - x_1) = -88,8 \text{ Kal/kg}$$

$$G\Delta Q = 355,2 \text{ Kal odebrać.}$$

$$L ? \quad L = p (v_1 - v_2) = 3590 \text{ kgm/kg}$$

$$GL = 14360 \text{ kgm.}$$

$$\text{Albo } L = \frac{Ap \Delta v (x_1 - x_2)}{A} = 3590 \text{ kgm/kg.}$$

Zadanie 115

1 kg pary suchej nasyconej o $p_1 = 7$ ata rozpręża się adiabatycznie do $p_2 = 1$ ata. Obliczyć x w końcu zmiany i pracę L i L_t .

Rozwiązanie

Rozprężanie adiabatyczne

$$x_1 = 1; \quad v_1 = v_1'' = 0,2782$$

$$x_2 ? \quad s_1' + (s_1'' - s_1') x_1 = s_2' + (s_2'' - s_2') x_2$$

$$1,2962 = 1,4504 x_2$$

$$x_2 = 0,895.$$

$$L ? \quad AL = u_1'' - q_1 (1 - x_1) - u_2'' + q_2 (1 - x_2)$$

$$AL = 68,15 \text{ Kal/kg}; \quad L = 28620 \text{ kgm/kg.}$$

$$L_t ? \quad AL_t = i_1 - i_2; \quad i_1 = i_1'' = 660,5 \text{ Kal}$$

$$i_2 = i_2' + r_2 x_2 = 581,5$$

$$AL_t = 79 \text{ Kal/kg} \quad L_t : L = 1,16.$$

Zadanie 116

1,5 m³ pary nasyconej o $p_1 = 1,2$ ata i $x_1 = 0,8$ sprężono adiabatycznie do $p_2 = 4$ ata. Określić stan pary po spiężaniu i wydatek pracy na sprężanie.

Rozwiązanie

Sprężanie adiabatyczne

$$G ? \quad V_1 = G [v_1' x_1 + v_1' (1 - x_1)]; \quad G = 1,29 \text{ kg}$$

$$x_2 ? \quad x_2 = \frac{s_1' + (s_1'' - s_1') x_1 - s_2'}{s_2'' - s_2'} = 0,847$$

$$V_2 ? \quad v_2 = v_2'' x_2 + v_2' (1 - x_2) = 0,4002 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_2 = 0,516 \text{ m}^3$$

$$L ? \quad AL = u_2'' - q_2 (1 - x_2) - u_1'' + q_1 (1 - x_1)$$

$$AL = 38 \text{ Kal/kg}; \quad GAL = 49,1 \text{ Kal.}$$

Zadanie 117

1,4 kg pary suchej nasyconej o $p_1 = 5$ ata rozprężono adiabatycznie do $p_2 = 1,5$ ata i $x_2 = 0,8$. Określić początkowy stan pary oraz osiągniętą pracę.

Rozprężanie adiabatyczne

Wyniki

$$x_1 = 0,85; \quad v_1 = 0,3226 \text{ m}^3/\text{kg}; \quad V_1 = 0,45 \text{ m}^3$$

$$AL = 39,7 \text{ Kal}; \quad L = 23800 \text{ kgm.}$$

Zadanie 118

1 kg pary o $p_1 = 11$ ata rozprężono adiabatycznie do $p_2 = 1,2$ ata i $x_2 = 0,84$. Obliczyć uzyskaną pracę, spadek entalpii pary i przyrost objętości.

Rozprężanie adiabatyczne

Wyniki

$$x_1 = 0,95; \quad i_1 - i_2 = 86,1 \text{ Kal}$$

$$AL = 77,4 \text{ Kal}; \quad L = \sim 33000 \text{ kgm}$$

$$\Delta v = v_2 - v_1 = 1,0518 \text{ m}^3/\text{kg.}$$

Zadanie 119

2 kg pary o $p_1 = 1,5$ ata sprężono adiabatycznie do $p_2 = 8$ ata i do stanu pary suchej nasyconej. Obliczyć objętość początkową i końcową oraz wydatek pracy.

Sprężanie adiabatyczne

Wyniki

$$x_1 = 0,906;$$

$$v_1 = 1,064 \text{ m}^3/\text{kg}; \quad V_1 = 2,128 \text{ m}^3$$

$$v_2 = 0,2452 \text{ m}^3/\text{kg}; \quad V_2 = 0,4904 \text{ m}^3$$

$$AL = 60,5 \text{ Kal/kg}; \quad GAL = 121 \text{ Kal.}$$

Zadanie 120

1 m³ pary o $p_1 = 8$ ata i $x = 0,9$ rozpręża się adiabatycznie do $p_2 = 1$ ata. Znaleźć stan końcowy pary i uzyskaną pracę.

Rozprężanie adiabatyczne

Wyniki

$$v_1 = 0,22096 \text{ m}^3/\text{kg} \quad G = 4,53 \text{ kg}$$

$$x_2 = 0,81; \quad v_2 = 1,4 \text{ m}^3/\text{kg} \quad V_2 = 6,34 \text{ m}^3.$$

$$AL = 68 \text{ Kal/kg}; \quad GAL = 308 \text{ Kal}.$$

U w a g a. Wszystkie zadania zawarte w tym dziale w miarę możliwości sprawdzić na wykresie *IS*.

8. Para przegrzana (§ 34 i § 35)

Zadanie 121

Wyliczyć entalpię, objętość właściwą i entropię pary o $p = 5$ ata i $t = 250^\circ$.

Rozwiązanie

$$i_{pp} ? \quad i_{pp} = i'' + c_{pp} (t_{pp} - t_{pn})$$

$$i_{pp} = 656,9 + 0,5 (250 - 151,5) = 706,65 \text{ Kal/kg}$$

$$v ? \quad v = \frac{RT}{p} - 0,016$$

$$v = \frac{47,1 \cdot 523}{5,10^4} - 0,016 = 0,477 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$s_{pp} ? \quad s_{pp} = s'' + c_{pp} \ln \frac{T_{pp}}{T_{pn}}$$

$$s_{pp} = 1,6329 + 0,5 \cdot 2,3 \lg \frac{523}{424,5} = 1,7371 \frac{\text{Kal}}{\text{kg}, ^\circ}$$

Zadanie 122

Wyliczyć i , v i s pary o $p = 25$ ata i $t = 400^\circ$.

Wyniki

$$i_{pp} = 764,2 \text{ Kal/kg}; c_{pp} = 0,533$$

$$v = 0,111 \text{ m}^3/\text{kg}; S_{pp} = 1,6504 \frac{\text{Kal}}{\text{kg}, 1^\circ}.$$

Zadanie 123

W silniku parowym o wymiarach cylindra $D = 300 \text{ mm } \varnothing$ i skoku $S = 500 \text{ mm}$ napelnienie wynosi 20% skoku. Obliczyć wydatek pary na godzinę przy ilości obrotów silnika $n = 120$ na minutę, jeżeli silnik jest zasilany parą o prężności 12' ata:

- nasyconą o $x = 0,95$,
- przegrzaną do $t = 250^\circ, 300^\circ, 350^\circ$ i 400°
w m^3 i w kg nie uwzględniając strat.

Rozwiązanie

Objętość pary wchodzącej do cylindra podczas napelnienia

$$\frac{\pi \cdot 0,3^2 \cdot 0,5}{4} \cdot 0,2 = 0,0071 \text{ m}^3.$$

Wydatek pary na godzinę w silniku dwustronnego działania przy 120 obrotach na min. w m^3 :

$$V = 0,0071 \times 2 \times 120 \times 60 = 107 \text{ m}^3 \text{ pary.}$$

Wyniesie to w kg :

a) $v_{x=0,95} = 0,1585$	$G_{x=0,95} = 675 \text{ kg/godz.}$
b) $v_{250^\circ} = 0,189$	$G_{250^\circ} = 566 \text{ „}$
$v_{300^\circ} = 0,208$	$G_{300^\circ} = 515 \text{ „}$
$v_{350^\circ} = 0,228$	$G_{350^\circ} = 470 \text{ „}$
$v_{400^\circ} = 0,247$	$G_{400^\circ} = 432 \text{ „}$

Zadanie 124

Obliczyć ciężar 1 m^3 pary o $p = 10 \text{ ata}$

- suchej nasyconej,
- nasyconej o $x = 0,85$,
- przegrzanej do $t = 350^\circ$.

Rozwiązanie

Para sucha nasycona $\gamma = 5,04 \text{ kg/m}^3$

Para mokra $x = 0,85$

$v = 0,1687$ $\gamma = 5,93$ „

Para przegrzana do 350°

$v = 0,2774$ $\gamma = 3,6$ „

Zadanie 125

Ile ciepła potrzeba, aby przegrzać 1 kg pary do $t = 300^\circ$

1) o $p = 20$ ata przy $x = 1$

2) o $p = 1$ ata $x = 0,95?$

Rozwiązanie

1) Ciepło przegrzania:

$$Q_p = c_{pp} (t_{pp} - t_{pn}) = 0,555 \cdot 88,5 = 49,2 \text{ Kal/kg}$$

2) Wysuszenie pary i ciepło przegrzania:

$$Q_p = r(1 - x) + c_{pp} (t_{pp} - t_{pn}) = \\ = 26,99 + 0,477 \cdot 200,9 = 122,82 \text{ Kal/kg.}$$

Zadanie 126

Ile ciepła należy wydać, aby z wody o $t = 15^\circ$ otrzymać:

1) 1 m³ pary suchej nasyconej o $p = 15$ ata,

2) 1 m³ pary przegrzanej o $p = 15$ ata i $t = 350^\circ$

Rozwiązanie

1) 1 m³ pary suchej nasyconej 15 ata waży:

$$\frac{1}{0,1345} = 7,43 \text{ kg} \quad i'' = 667,3 \text{ Kal/kg}$$

Odchodzi ciepło wody $667,3 - 15 = 652,3 \text{ Kal/kg}$:

$$Q = 652,3 \times 7,43 = 4736 \text{ Kal/m}^3.$$

2) Objętość właściwa pary przegrzanej:

$$v = \frac{RT}{p} - 0,016 = \frac{47,1 \cdot 623}{15 \cdot 10^4} - 0,016 =$$

$= 0,1796 \text{ m}^3/\text{kg}$ Ciężar $1 \text{ m}^3 = 5,57 \text{ kg/m}^3$
 $i_{pp} = 667,3 + 0,52 \cdot 152,6 = 746,4 \text{ Kal/kg}$.
 Odchodzi ciepło wody, zostaje $731,4 \text{ Kal/kg}$
 $Q = 4074 \text{ Kal/m}^3$. Oszczędność 14% .

Zadanie 127

Ile ciepła potrzeba, aby 1 m^3 pary mokrej ($x=0,9$) o $p=14$ ata przegrzać do $t=320^\circ$?

Rozwiązanie

$G ? \quad v = 0,12943 \text{ m}^3/\text{kg} \cdot G = 7,73 \text{ kg/m}^3$.

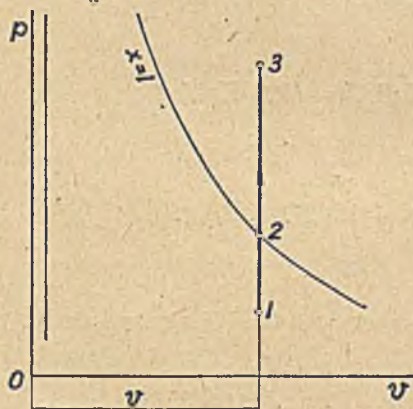
$Q ? \quad Q = [r(1-x) + c_{pp}(t_{pp}-t_{pn})] G = 870 \text{ Kal/m}^3$.

Zadanie 128

$0,5 \text{ kg}$ pary o $p=12$ ata
 zajmuje objętość $0,078 \text{ m}^3$.
 Ile należy doprowadzić ciepła
 przy $v=\text{const.}$, aby otrzymać
 parę przegrzaną o $t=300^\circ$
 i jaka będzie prężność pary?

Rozwiązanie

Sprężanie izochoryczne



Zmiana 1—2. $v = \frac{0,078}{0,5} = 0,156 \text{ m}^3/\text{kg}$

$x_1 = \frac{0,155}{0,1657} = 0,936$

$u = u'' - q(1-x) = 591,2 \text{ Kal/kg}$.

W punkcie (2) $x=1$ i $v=0,156 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Objętość ta odpowiada prężności $p_2=12,85$ ata

i $u''_2 = 619,1 \text{ Kal/kg}$.

Na doprowadzenie pary do stanu suchej nasyconej wydać należy $619,1 - 591,2 = 27,9 \text{ Kal/kg}$.

$$\text{Zmiana } 2-3; p_3? \quad v = 0,156 = \frac{RT}{p} - 0,016$$

$$\text{Stąd } p_3 = 17,3 \text{ ata.}$$

$$\text{Wydatek ciepła } Q_{(2-3)} = (c_{pp} - AR) (T_3 - T_2) = (0,54 - 0,11) (300 - 190) = 47,3 \text{ Kal/kg.}$$

Ogólny rozchód ciepła na 0,5 kg pary

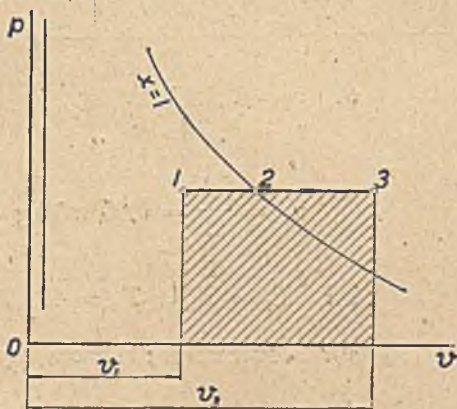
$$Q_{(1-3)} = 0,5 (27,9 + 47,3) = 37,6 \text{ Kal.}$$

Zadanie 129

1 kg pary o $p = 9,5$ ata rozszerza się izobarycznie z objętości 190 l do objętości 270 l. Obliczyć wydatek ciepła, stan pary w końcu zmiany i uzyskaną pracę.

Rozwiązanie

Rozszerzanie izobaryczne



$$\text{W punkcie 1 : } v_1 = 0,19 \text{ m}^3/\text{kg} \\ x_1 = 0,911.$$

$$\text{Wydatek ciepła na zmianę } 1-2: Q_{1-2} = r (x_2 - x_1) = 43,12 \text{ Kal/kg.}$$

$$\text{W punkcie 3: } v_3 = 0,27 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_3 = \frac{(v + 0,016) p}{R} = 577^\circ; t_3 = 304^\circ.$$

Wydatek ciepła na zmianę 2-3:

$$Q_{(2-3)} = c_{pp} (T_3 - T_2) = 65 \text{ Kal/kg}$$

$$\text{Razem } 108,12 \text{ Kal/kg}$$

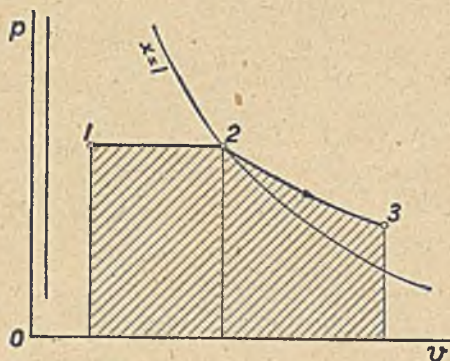
$$L = p (v_3 - v_1) = 7600 \text{ kgm/kg.}$$

Zadanie 130

2 kg pary o $p = 13$ ata i $x = 0,82$ rozpręża się izotermicznie do objętości $0,5 \text{ m}^3$. Obliczyć stan pary w końcu zmiany, wydatek ciepła i osiągniętą pracę

Rozwiązanie

Rozprężanie izotermiczne



$$v? \quad v_1 = 0,1267 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_2 = 0,1543 \quad ,,$$

$$v_3 = \frac{0,5}{2} = 0,25 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T? \quad T_1 = T_2 = T_3 = 463,7^\circ$$

$p_3?$ Z równania dla izotermy 2 — 3 mamy:

$$p_3 (v_3 + 0,016) = p_2 (v_2 + 0,016)$$

$$\text{Skąd } p_3 = 13 \frac{0,17}{0,266} = 8,3 \text{ ata.}$$

$$Q? \quad Q_{1-2} = r (1 - x) = 85,1 \text{ Kal/kg}$$

$$Q_{2-3} = ART \ln \frac{v_3}{v_2} = \frac{47,1 \cdot 463,7 \cdot 2,3 \cdot 0,2095}{427} = 21,76 \text{ Kal/kg}$$

$$GQ = 2 (85,1 + 21,76) = 213,72 \text{ Kal.}$$

$$L? \quad L_{1-2} = p_1 (v_2 - v_1) = 3588 \text{ kgm/kg}$$

$$L_{2-3} = 21,76 \times 427 = 9292 \quad ,,$$

$$12880 \text{ kgm/kg}$$

$$GL = 25760 \text{ kgm.}$$

Zadanie 131

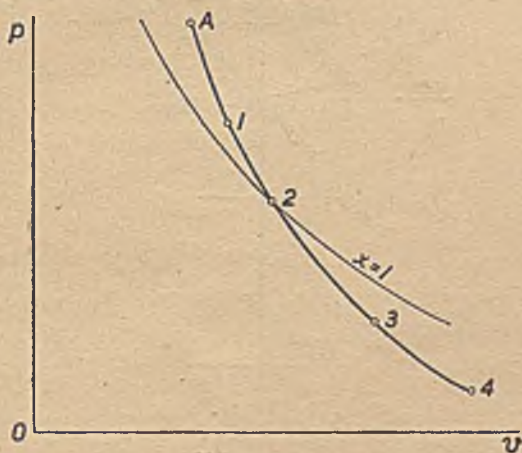
Para o $p = 20$ ata i $t = 280^\circ$ rozpręża się adiabatycznie

- 1) do temperatury 200° ,
- 2) do stanu pary suchej nasyconej,
- 3) do temperatury 140° ,
- 4) do prężności 0,2 ata.

Określić stan pary w końcu zmiany i uzyskaną pracę techniczną.

Rozwiązanie

Rozprężanie adiabatyczne



Tego rodzaju zadanie najłatwiej rozwiązać metodą graficzną, tj. przy pomocy wykresu *IS* jak na załączonym odcinku wykresu *IS*.

Wyliczenie daje następujące wyniki:

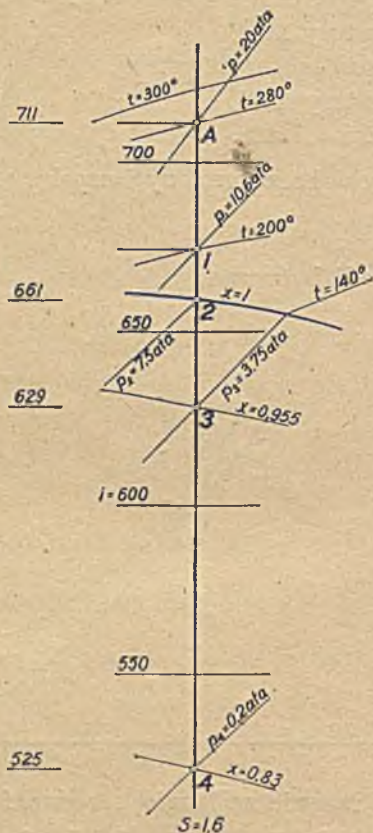
$A - 1.$

Rozprężanie adiabatyczne do $t = 200^\circ$. W punkcie 1 para jest jeszcze przegrzana. Założenie to musi się sprawdzić.

$$p_1? \quad \frac{T}{T_1} = \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{\alpha-1}{\alpha}}; \quad \frac{553}{473} = \left(\frac{20}{p_1}\right)^{0,246} = 1,169$$

$$a = 1,33$$

$$a = 1,33 \quad \frac{20}{p_1} = 1,886; p_1 = 10,6 \text{ ata.}$$



Para o $p_1 = 10,6$ ata i $t = 200^\circ$ jest rzeczywiście przegrzana.

$$\Delta i_{(A-1)} = 711 - 675 = 36 \text{ Kal z wykresu}$$

$$AL_{(d-1)} = 36 \text{ Kal.}$$

Wyliczenie:

$$i_d = 669 + 0,572 (280 - 211,4) = 708,2 \text{ Kal/kg}$$

$$z_1 = 664,4 + 0,568 (200 - 181,5) = 674,9$$

$$ALt_{(1-1)} = 33,3 \text{ Kal/kg}$$

A — 2. Para sucha nasycona:

$$s_A = s'' + c_{pp} \ln \frac{T_A}{211,4} = 1,6024 \text{ (z wykresu 1,6)}$$

$s_2 = 1,6024$ odpowiada z tablic $p_2 = 7,3$ ata
z wykresu 7,5 „

i_2 dla $p = 7,5$ ata = 661,2

$$AL_{(A-2)} = 711 - 661 = 50 \text{ Kal/kg.}$$

A — 3. Para mokra:

$$t = 140^\circ, p_3 = 3,75 \text{ ata}, x_3 = 0,955$$

$$i_3 = 629 \text{ Kal/kg}$$

$$AL_{(A-3)} = 711 - 629 = 82 \text{ Kal/kg.}$$

A — 4. Para mokra:

$$p_4 = 0,2 \text{ ata}, i = 525 \text{ Kal/kg}$$

$$x_4 ? \quad s' + (s'' - s') x = 1,6; x_4 = 0,83$$

$$AL_{(A-4)} = 711 - 525 = 186 \text{ Kal/kg.}$$

Zadanie 132

Para o $p = 11$ ata po przejściu przez zawór redukcyjny osiągnęła prężność $p_2 = 2$ ata i $x = 1$. Jaka była suchość pary początkowa?

Rozwiązanie

Dławienie pary. $i_1 = i_2 = \text{const.}$

$$i_2 = 646,6 \text{ Kal/kg dla } 2 \text{ ata; } i_2 = i'_1 + r_1 x_1 = 646,6 \text{ „ „ 11 ata; stąd } x_1 = 0,963.$$



Zadanie 133

Para o $p_1 = 14$ ata i $t = 340^\circ$ przechodząc do cylindra silnika przez stawidło doznała dławienia i prężność jej obniżyła się 14,5%. Znaleźć wysokość przegrzania po zdławieniu.

Rozwiązanie

Stan początkowy wykazuje wysokość przegrzania $340^\circ - 194,1 = 145,9^\circ$. Stan końcowy $14 - 14,0,145 = \sim 12$ ata
 $i_2 = i_1 = 742,4$ Kal/kg; $i''_2 = 665,5$ Kal/kg.

Zatem $c_{pp} (t_{pp} - t_{pn}) = 742,4 - 665,5 = 76,9$,
skąd wysokość przegrzania $76,9 : 0,513 = 150^\circ$.

Zadanie 134

1 kg pary o $p_1 = 15$ ata i $x = 0,96$ po zdławieniu osiągnął prężność 1,5 ata. Określić końcowy stan pary.

Rozwiązanie

$$i_1 ? \quad i_1 = 200,6 + 466,7 \cdot 0,96 = 648,6 \text{ Kal/kg}$$

Ponieważ i_2 dla $p_2 = 1,5$ ata jest 643,4 Kal/kg, wnosimy, że para będzie przegrzana.

$$t_2 ? \quad c_{pp} (t_{pp} - t_{pn}) = i_1 - i_2 = 5,2 \text{ Kal/kg}$$

$$c_{pp} = 0,485. \text{ Wi\kern-0.08em} \text{c} \quad t_{pp} - t_{pn} = 10,7^\circ$$

$$t_2 = 110,8 + 10,7 = 121,5^\circ.$$

Zadanie 135

1 kg pary o $p_1 = 10$ ata osiągnął po zdławieniu prężności $p_2 = 1,2$ ata i $t_2 = 130^\circ$. Znaleźć początkową suchość pary.

Rozwiązanie

W stanie końcowym para jest przegrzana, gdyż $t_{1,2 \text{ ata}} = 104,2^\circ$. Wysokość przegrzania:

$$130 - 104,2 = 25,8^\circ$$

$$i_2 ? \quad i_2 = 640,9 + 0,48 \cdot 25,8 = 653,3 \text{ Kal/kg}$$

$$i_1 = i_2 = 653,3 = i'_1 + r_1 x_1 = 181 + 482,9 x; x_1 = 0,978.$$



9. Silnik parowy teoretyczny (§ 36 i § 37)

Zadanie 136

Teoretyczny silnik parowy tłokowy pracuje przy prężności wlotowej $p = 15$ ata i $x = 0,95$ i prężności wylotowej $p_0 = 0,2$ ata. Wylczyć pracę 1 kg pary oraz sprawność, jeżeli silnik wykonywa obieg Carnota.

Rozwiązanie

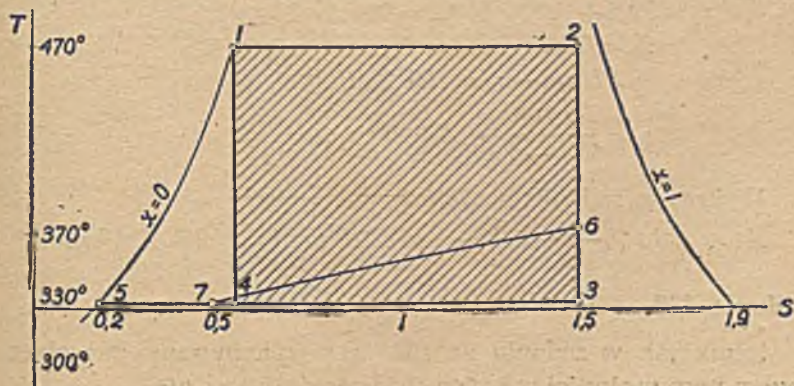
$$p = 15 \text{ ata}, T = 470,4^\circ; p_0 = 0,2 \text{ ata}, T_0 = 332,7^\circ$$

$$\eta = \frac{470,4 - 332,7}{470,4} = 0,2927$$

$$Q = rx_2 = 0,95 \cdot 466,7 = 443,4 \text{ Kal/kg}$$

$$AL = \eta Q = 443,4 \cdot 0,2927 = 129,7 \text{ Kal/kg.}$$

Można również obliczyć pracę AL ze wzoru $AL = Q - Q_0$. Do znalezienia Q_0 trzeba mieć x_3 i x_4 , gdyż $Q_0 = r_0 (x_3 - x_4)$.



Dla adiabaty rozprężania (2—3) mamy:

$$\begin{aligned} s'_2 + (s''_2 - s'_2) x_2 &= s'_3 + (s''_3 - s'_3) x_3 & x_2 &= 0,95 \\ 0,5504 + (1,5425 - 0,5504) 0,95 &= 1,4925 \\ 0,1974 + (1,8902 - 0,1974) x_3 &= 1,4925 & x_3 &= 0,766 \end{aligned}$$

Dla adiabaty sprężania (4—1) mamy:

$$\begin{aligned} s_1 = s'_1 = 0,5504 &= s'_4 + (s''_4 - s'_4) x_4 & x_4 &= 0,2084 \\ Q_0 &= 563,2 (0,766 - 0,2084) = 314 \text{ Kal/kg} \\ AL &= 443,4 - 314 = 129,4 \text{ Kal/kg.} \end{aligned}$$

Skala wykresu TS

Pole prostokąta 1—2—3—4:

$$\begin{aligned} 25 \text{ mm} &= 106^0; & 25 \text{ mm} &= 0,5 \text{ j. entr.} & 46,9 \times 34,5 &= 1618 \text{ mm}^2 \\ 1 \text{ „} &= 4^0; & 1 \text{ „} &= 0,02 & 1618 &= 0,08 = 129,5 \text{ Kal.} \\ 1 \text{ mm}^2 &= 0,08 \text{ Kal.} \end{aligned}$$

Zadanie 137

Silnik jak w zadaniu nr 136, lecz wykonywany jest obieg Rankina.

Rozwiązanie

$$\begin{aligned} Q &= i - i'_0; & Q_0 &= i_0 - i'_0 \\ i &= 200,6 + 0,95 \cdot 44,7 = 644 \text{ Kal/kg.} \end{aligned}$$

Do znalezienia i_0 potrzebne jest x_3 , które, jak w obiegu Carnota (zadanie nr 136) = 0,766.

$$\begin{aligned} i_0 &= 59,6 + 0,766 \cdot 563,2 = 491 \text{ Kal/kg} \\ i'_0 &= 59,6 \end{aligned}$$

$$AL = i - i_0 = 153 \text{ Kal/kg}$$

$$\eta = \frac{153}{644 - 59,6} = 0,264.$$

Wykres w zadaniu nr 136

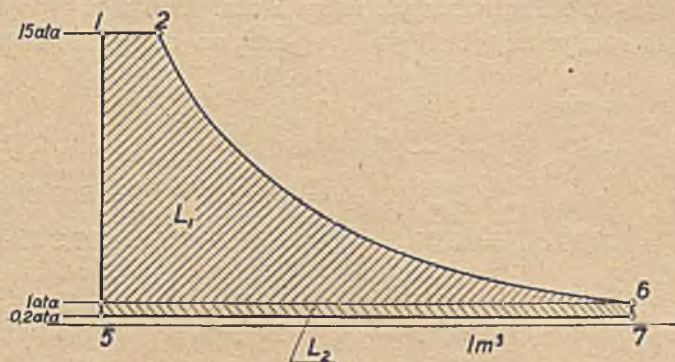
$$AL \approx \text{polu } (1-2-3-4-5) = 1920 \text{ mm}^2 = 153,6 \text{ Kal/kg.}$$

Zadanie 138

Silnik jak w zadaniu nr 136, lecz wykonywany jest obieg Meyera przy prężności w końcu rozprężania $p_1 = 1 \text{ ata}$.

Rozwiązanie

$$L = L_1 + L_2; AL_1 = i_2 - i_6; L_2 = (p_1 - p_0) v_6.$$



Z równania adiabaty (2—6) oblicza się x_6 . Z zadania nr 136

$$s_2 = 1,4925; s_6 = 1,4925 = 0,3097 + (1,7601 - 0,3097) x_6$$

$$\text{Stąd } x_6 = 0,815; v_6 = 1,727 \cdot 0,815 + 0,001 \cdot 0,185 = 1,406 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$AL_1 = 644 - (99,2 + 539,7 \cdot 0,815) = 104,8 \text{ Kal/kg}$$

$$AL_2 = \frac{10^3 (1 - 0,2) 1,406}{427} = 26,34 \text{ Kal/kg}$$

$$AL = 104,8 + 26,34 = 131,14 \text{ Kal/kg}$$

$$\eta = \frac{131,14}{584,4} = 0,225.$$

Do wykresu TS z zadania nr 136

$$s_7 = 0,1974 + (1,8902 - 0,1974) x_7$$

$$v_7 = v_6 = 1,406 = 7,794 x_7 + 0,001 (1 - x_7)$$

$$\text{stąd } x_7 = 0,18 \text{ (na wykresie } x_7 = \frac{16}{88} = \sim 0,18)$$

$$s_7 = 0,505 \frac{\text{Kal}}{\text{kg } 1^\circ}$$

Zadanie 139

Teoretyczny silnik parowy pracuje parą o $p = 15 \text{ ata}$ i $t = 250^\circ$, 300° , 350° i 400° . Prężność wylotowa $0,2 \text{ ata}$. Wyliczyć pracę 1 kg pary oraz sprawność, jeżeli silnik wykonywa obieg Rankina.

Rozwiązanie

$$Q = i - i'_0; \quad Q_0 = i_0 - i'_0$$

$i = i'' + c_{pp} (t_{pp} - t_{pn})$	$p = 15 \text{ ata}$	$t_{pn} = 197,4^\circ$
$t_{pp} = 200^\circ, c_{pp} = 0,57$	$\Delta t = 52,6^\circ$	$i = 697,3 \text{ Kal/kg}$
300°	$0,532$	$102,6$
		$721,9$
350°	$0,52$	$152,6$
		$746,3$
400°	$0,516$	$202,6$
		$771,8$

$$p_0 = 0,2 \text{ ata i } i'_0 = 59,6 \text{ Kal/kg.}$$

Do znalezienia i_0 trzeba mieć stan końcowy rozprężania przy pomocy wyliczenia lub z wykresu *IS*.

Entropia na początku rozprężania?

$$s = s'' + c_{pp} \ln \frac{T_2}{T_{nas.}}; \quad s = 1,5425 + 2,3 \cdot 0,516 \lg \frac{673}{470,4}$$

$$s = 1,727$$

Ta sama wartość s_0 w końcu rozprężania.

$$s_0 = 1,727 = s' + \frac{rx}{T} = 0,1974 + (1,8902 - 0,1974) x$$

$$x = 0,906.$$

Wtedy $i_0 = 59,6 + 563,2 \cdot 0,906 = 568,6 \text{ Kal/kg}$.

Pozostałe wartości dla i_0 odczytujemy z wykresu *IS*.

$$t = 350^\circ, s = s_0 = 1,698; x = 0,889; i_0 = 558 \text{ Kal/kg}$$

$$t = 300^\circ, s = s_0 = 1,656; x = 0,863; i_0 = 543 \quad ,,$$

$$t = 250^\circ, s = s_0 = 1,606; x = 0,844; i_0 = 526 \quad ,,$$

Wyniki:

t_{pp}	Q	Q_0	η	AL
400°	712,2	509	0,285	203,2
350°	686,7	498,4	0,274	188,3
300°	662,3	483,4	0,270	178,9
250°	637,7	466,4	0,267	171,3

Zadanie 140

Teoretyczny silnik parowy wykonywa obieg Rankina pracując parą o $p = 15 \text{ ata}$ i $t = 350^\circ$ przy prężności wylotowej:

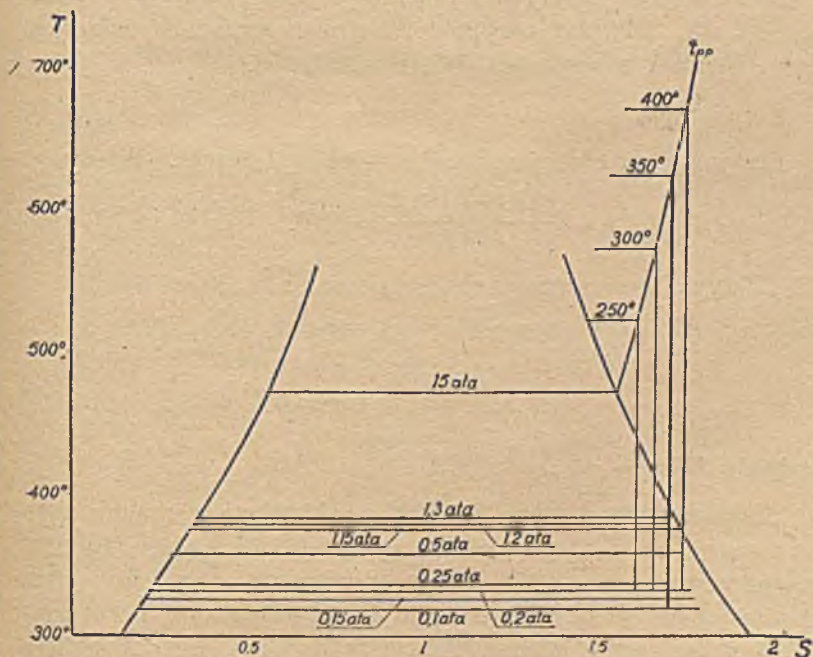
0,1 ata; 0,15 ata; 0,2 ata; 0,25 ata;

0,5 ata; 1,15 ata; 1,2 ata; 1,3 ata.

Wyliczyć pracę 1 kg pary oraz sprawność.

Rozwiązanie

Wykres TS do zadań nr 139 i nr 140



p_0	i'_0	Q	s_0	x	i_0	Q_0	AL	η
0,10	45,4	700,9	1,698	0,862	537	491,6	209,3	0,295
0,15	53,5	692,8	1,698	0,877	548	494,5	198,3	0,286
0,20	59,6	686,7	1,698	0,889	558	498,4	188,3	0,274
0,25	64,5	681,8	1,698	0,897	564	499,5	182,3	0,267
0,50	80,9	666,4	1,698	0,927	588	507,1	159,3	0,240
1,15	103,1	643,2	1,698	0,964	620	516,9	126,3	0,196
1,20	104,3	642	1,698	0,967	624	519,7	122,3	0,191
1,30	106,7	639,6	1,698	0,972	626	519,3	120,3	0,188
ata	Kal/kg	Kal/kg	$\frac{\text{Kal}}{\text{kg l}^\circ}$		Kal/kg	Kal/kg	Kal/kg	

Zadanie 141

Silnik parowy teoretyczny pracuje parą nasyconą o $p = 12$ ata i $p_0 = 1,2$ ata. Obliczyć przypuszczalną jego sprawność ogólną η_0 (obieg Carnota) w wypadku urzeczywistnienia.

Rozwiązanie

Przyjmuję za obieg doskonały — obieg Carnota. Wtedy

$$\eta_t = \frac{187,1 - 104,2}{460,1} = 0,18.$$

W wypadku urzeczywistnienia dojdzie:

$$\eta_i = \sim 0,7 \text{ i } \eta_m = \sim 0,9.$$

$$\text{Wtedy } \eta_0 = \eta_t \cdot \eta_i \cdot \eta_m = 0,1134$$

$$\eta_0 = \sim 11 \ \%.$$

Zadanie 142

Silnik parowy o mocy 200 KM ze skraplaniem pracuje parą przegrzaną $p = 15$ ata i $t = 400^\circ$ przy $p_0 = 0,2$ ata. Obliczyć przypuszczalną sprawność całego urządzenia cieplnego (wraz z kotłem) i przypuszczalny rozchód węgla na godzinę, jeżeli wartość opałowa węgla wynosi $W = 6000$ Kal/kg (obieg Rankina).

Rozwiązanie

Przyjmuję za obieg doskonały — obieg Rankina. Biorąc wyniki z zadania nr 139 otrzymuję

$$\eta_i = 0,285.$$

Dalej zakładam:

$$\eta_i = 0,75$$

$$\eta_m = 0,9$$

$$\eta_h = 0,75.$$

Otrzymuję:

$$\eta = 0,285 \cdot 0,75 \cdot 0,9 \cdot 0,75 = 0,144$$

$$AL_i = 632 \times 200 = 126400 \text{ Kal/godz.}$$

$$AL = \frac{AL_i}{\eta} = \frac{126400}{0,144} = 878\,000 \text{ Kal/g.}$$

$$B = \frac{878\,000}{6000} = 146 \text{ kg węgla na godzinę.}$$

10. Wilgotność powietrza (§ 40)

Zadanie 143

Temperatura powietrza 15° , wilgotność 70 %. Znaleźć prężność pary wodnej zawartej w powietrzu.

Rozwiązanie

Prężność pary wodnej zawartej w powietrzu jest w stanie nasycenia 12,7 mm st. rt. przy $t = 15^\circ$.

Przy wilgotności 70 % prężność pary wodnej będzie

$$12,7 \cdot 0,7 = 8,89 \text{ mm sł. st.}$$

$$\text{albo } 0,0173 \times 0,7 = 0,01211 \text{ kg/cm}^2.$$

Zadanie 144

Para wodna zawarta w powietrzu o $t = 20^\circ$ ma prężność $p = 0,0177 \text{ kg/cm}^2$. Jaka jest wilgotność względna powietrza?

Rozwiązanie

Przy $t = +20^\circ$ w powietrzu nasyconym prężność pary wodnej wynosi $0,0236 \text{ kg/cm}^2 = 17,39 \text{ mm sł. rt.}$

Odp. $\sim 75\%$.

Zadanie 145

Jaka jest temperatura powietrza, jeżeli przy 90% względnej wilgotności prężność pary wodnej zawartej w powietrzu wynosi $p = 0,00252 \text{ kg/cm}^2$?

Rozwiązanie

$$P = \frac{p}{w} = \frac{0,00252}{0,9} = 0,0028 \text{ kg/cm}^2.$$

Prężność ta (w stanie nasycenia) odpowiada temperaturze $t = -10^\circ$.

Zadanie 146

Temperatura powietrza 15° , wilgotność 70% . Znaleźć ciężar pary wodnej zawartej

a) w 1 m^3 powietrza,

b) w 1 kg powietrza

przy stanie barometru $B_0 = 760 \text{ mm sł. rt.}$

Rozwiązanie

a) $\gamma'' = 12,82 \text{ g/m}^3$, to przy $w = 0,7$

$$\gamma = 12,82 \cdot 0,7 = \sim 9 \text{ g/m}^3.$$

b) $G_w = \frac{1,293}{1 + \alpha t} \cdot \frac{B_0 - p}{760} \text{ kg/m}^3$

p jak w zadaniu nr 143 $= 8,89 \text{ mm sł. rt.}$

$$G_w = \sim 1,2 \text{ kg/m}^3. \text{ Zatem } x = \frac{9}{1,2} = 7,5 \text{ g/kg.}$$

Zadanie 147

1 m^3 powietrza o $t = -5^\circ$ waży $1,279 \text{ kg}$. Jaki był stan barometru, jeżeli wilgotność względna powietrza była $w = 0,9$ i jaka była wilgotność bezwzględna?

Rozwiązanie

Przy $t = -5^{\circ}$ $P = 3,113$ mm sł. rt.

Jeżeli $w = 0,9$, to $p = 3,113 \times 0,9 = 2,8$ mm sł. rt.

Mamy równanie:

$$1,279 = \frac{1,293 \cdot 273}{268} \cdot \frac{B_0 - 2,8}{760},$$

skąd $B_0 = \sim 740$ mm sł. rt.

Wilgotność bezwzględna, czyli ciężar pary wodnej w 1 kg powietrza, odnajdziemy jako stosunek ciężaru pary wodnej w g w 1 m³ powietrza do ciężaru w kg 1 m³ powietrza.

$$x = \frac{3,37 \times 0,9}{1,279} = 2,64 \text{ g/kg.}$$

U w a g a: Sprawdzając wynik na wykresie *ix* należy pamiętać, że wykres obejmuje dane odpowiadające ciśnieniu 760 m/m sł. rt. Zatem wynik 2,64 g/kg przy 740 mm sł. rt. należy sprowadzić do 760 mm sł. rt.

Będzie to $\cdot \frac{2,64 \cdot 740}{760} = 2,57 \text{ g/kg.}$

Zadanie 148

Przy jakiej temperaturze powietrze mające $t = 20^{\circ}$ i $w = 0,7$ mogłoby być nasycone tą ilością pary wodnej?

Rozwiązanie

Bezwzględna zawartość pary wodnej w g w 1 m³ powietrza o $t = 20^{\circ}$ i przy wilgotności 70 % wynosi

$$\gamma = 17,22 \times 0,7 = 12,054 \text{ g/m}^3.$$

Z tablicy widać, że przy $t = 15^{\circ}$ $\gamma'' = 12,82$,

a przy $t = 10^{\circ}$ $\gamma'' = 9,39$.

Drogą interpolacji wypadnie, że

$$\gamma'' = 12,054 \text{ g/m}^3 \text{ odpowiada } t = 13,84^{\circ}.$$

Zadanie 149

Powietrze o $t = 15^{\circ}$ i wilgotności 70 % zostało oziębione do $t = 5^{\circ}$ i następnie podgrzane znów do 15° . Jaką otrzymamy wilgotność względną powietrza?

Rozwiązanie

Początkowa zawartość pary wodnej w powietrzu o $t = 15^{\circ}$ i przy $w = 0,7$:

$$\gamma = 12,82 \cdot 0,7 = 8,974 \text{ g/m}^3.$$

Za pomocą interpolacji znajduję, że powietrze to przy $t = 9,19^{\circ}$ będzie tą ilością pary wodnej nasycone:

$\gamma'' = 9,39$	przy	10°	$9,39 - 8,974 = 0,416$
$\frac{6,82}{2,57}$	„	$\frac{5}{5}$	$0,416 : 0,514 = 0,81$
$0,514$		1	$10 - 0,81 = 9,19^{\circ}$

Przy $t = 5^{\circ}$ $\gamma'' = 6,82 \text{ g/m}^3$

$8,974 - 6,82 = 2,154 \text{ g/m}^3$ wody zostanie strącone.

Powietrze będzie zawierało $6,82 \text{ g/m}^3$ pary wodnej, co przy $t = 15^{\circ}$ stanowi:

$$w = \frac{6,82}{12,82} = \sim 53\%.$$

Zadanie 150

Biorąc dane z zadania nr 149 obliczyć entalpię powietrza początkową, po ochłodzeniu i po ponownym ogrzaniu. Stan barometru $B = 760 \text{ mm s\l. rt.}$

Rozwiązanie

$$i = 0,24 t + 0,46 t x + 595 x$$

(w tym wzorze $x \text{ kg/kg}$ powietrza)

1) x z zadania nr 146 $= 7,5 \text{ g/kg}$

$$i_1 = 3,6 + \frac{0,46 \cdot 15 \cdot 7,5}{1000} + \frac{595 \cdot 7,5}{1000} = 8,115 \text{ Kal/kg};$$

2) przy $+5^{\circ}$ stan nasycenia.

$$x = \frac{\gamma''}{G_w} \quad G_w = \frac{1,293 \cdot 273 \cdot (760 - 6,534)}{278 \cdot 760} = 1,259 \text{ kg/m}^3$$
$$\gamma'' = 6,82 \text{ g/m}^3$$

$$x = \frac{6,82}{1,259} = 5,42 \text{ g/kg}$$

$$i_1 = 0,24 \cdot 5 + \frac{0,46 \cdot 5 \cdot 5,42}{1000} + \frac{595 \cdot 5,42}{1000}$$

$$i_1 = 4,438 \text{ Kal/kg};$$

$$3) \quad t = 15^\circ, \quad w = 0,53, \quad \gamma = 12,82 \cdot 0,53 = 6,77 \text{ g/m}^3$$

$$p = Pw = 12,70 \cdot 0,53 = 6,73 \text{ mm sł. rt.}$$

$$G_w = \frac{1,293 \cdot 273 (760 - 6,73)}{288 \cdot 760} = 1,215 \text{ kg/m}^3$$

$$x = \frac{\gamma}{G_w} = \frac{6,77}{1,215} = 5,57 \text{ g/kg}$$

$$i_2 = 0,24 \cdot 15 + \frac{0,46 \cdot 15 \cdot 5,57}{1000} + \frac{595 \cdot 5,57}{1000}$$

$$i_2 = 6,96 \text{ Kal/kg.}$$

U w a g a. Wyniki otrzymane w zadaniach nr 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149 i 150 należy sprawdzić na wykresie I-x.

11. Wyływ pary (§ 41—43)

Zadanie 151

Para sucha nasycona o $p = 5, 7\frac{1}{2}, 10$ i 15 ata i para przegrzana o $p = 10$ ata i $t = 250^\circ, 300^\circ, 350^\circ$ oraz o $p = 15$ ata i $t = 300^\circ, 350^\circ, 400^\circ$ wypływa przez dyszę Laval'a do przestrzeni, w której jest prężność $p_0 = 0,2$ ata. Obliczyć teoretyczną prędkość wypływu.

Rozwiązanie

Teoretyczna prędkość wypływu pary

$$w_0 = 91,5 \sqrt{i - i_0} \text{ m/sek.}$$

1) para sucha nasycona				
p	i	i_0	$i - i_0$	w_0
5	656,9	536	120,9	1005
7,5	661,2	525	136,2	1066
10	663,9	517,5	146,4	1107
15	667,3	506,5	160,8	1160
2) para przegrzana 10 ata				
t	i	i_0	$i - i_0$	w_0
250°	702,7	543,5	159,2	1154
300°	728,6	560,5	168,1	1186
350°	754,2	575,5	178,7	1222
3) para przegrzana 15 ata				
t	i	i_0	$i - i_0$	w_0
300°	725,4	543	182,4	1234
350	751,7	558	193,7	1274
400°	777,7	571,5	206,2	1313
	Kal/kg	Kal/kg	Kal/kg	m/sek

Zadanie 152

Określić wymiary dyszy Laval'a, przez którą przepływa para w ilości 0,25 kg/sek o prężności początkowej 15 ata i $t = 320^\circ$ rozprężając się adiabatycznie bez strat do $p_0 = 3$ ata.

Rozwiązanie

Szukamy przekroju krytycznego F_{kr} i przekroju wylotowego F_0

$$F_{kr} = \frac{G}{2,09 \sqrt{\frac{p}{v}}} \text{ m}^2, \text{ gdzie } G = 0,25 \text{ kg/sek}$$

$$p = 15 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^2.$$

v znajdziemy ze wzoru Lindego:

$$v = \frac{47,1 \cdot 593}{15 \cdot 10^4} - 0,016 = 0,165 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

$$\text{Zatem } F_{kr} = \frac{0,25}{2,09 \sqrt{\frac{15 \cdot 10^4}{0,165}}} = 0,000125 \text{ m}^2 = 126 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dalej } F_0 = \frac{Gv_0}{w_0} \cdot \text{Należy mieć } w_0, v_0.$$

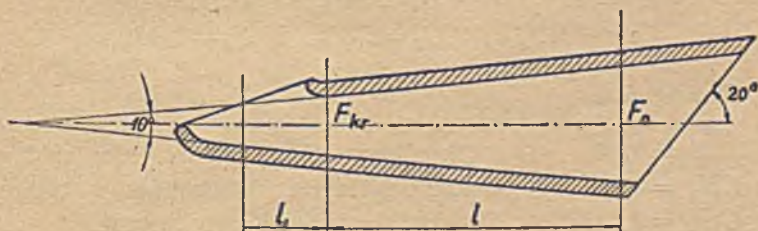
$$\text{Z wykresu } IS \text{ } i_{(15 \text{ at\%, } 320^\circ)} = 736 \text{ Kal/kg}$$

$$\frac{i_0 \text{ (3 at\%, } 138^\circ) = 653 \text{ „}}{i - i_0 = 83 \text{ Kal/kg}}$$

$$w_0 = 91,5 \sqrt{83} = 834 \text{ Kal/kg}$$

$$v_0 = \frac{RT}{p} - 0,016 = \frac{47,1 \cdot 411}{3 \cdot 10^4} - 0,016 = 0,628 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$F_0 = \frac{Gv_0}{w_0} = \frac{0,25 \cdot 0,628}{834} = 0,000188 \text{ m}^2 = 188 \text{ mm}^2.$$



12. Spalanie (§ 44—50)

Zadanie 153

Obliczyć wartość opałową 1 kg węgla o składzie chemicznym:

$$\begin{array}{lll} C = 70\%, & H_2 = 4,4\%, & O_2 = 12\%, \\ N_2 = 1,6\%, & S = 0,6\%, & H_2O = 7\% \\ \text{i Pop.} = 4,4\%. \end{array}$$

Rozwiązanie

$$\begin{array}{rcl}
 C & = & 0,7 \\
 H_2 & = & 0,044 \\
 O_2 & = & 0,12 \\
 N_2 & = & 0,016 \\
 S & = & 0,006 \\
 H_2O & = & 0,07 \\
 P & = & 0,044 \\
 \hline
 & & 1,000
 \end{array}$$

$$H - \frac{O}{8} = 0,044 - 0,015 = 0,029$$

Stosując wzór związkowy otrzymuje się bezpośrednio

$$W = 8100 C + 29000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S - 600 w$$

$$\begin{array}{rccccccc}
 W = 8100 \cdot 0,7 & + & 29000 \cdot 0,029 & + & 2500 \cdot 0,006 & - & 600 \cdot 0,07 = \\
 5670 & + & 841 & + & 15 & - & 42 = \\
 = 6484 \text{ Kal/kg.}
 \end{array}$$

Zadanie 154

Obliczyć wartość opałową 1 m³ gazu o składzie chemicznym objętościowym

$$\begin{array}{lll}
 H_2 = 44 \%, & CH_4 = 36 \%, & C_2H_4 = 4,5 \% \\
 CO = 9,5 \%, & CO_2 = 2,8 \% & \text{ i } N_2 = 3,2 \%.
 \end{array}$$

Rozwiązanie

$$\begin{array}{rcl}
 H_2 & = & 0,44 \\
 CH_4 & = & 0,36 \\
 C_2H_4 & = & 0,045 \\
 CO & = & 0,095 \\
 CO_2 & = & 0,028 \\
 N_2 & = & 0,032 \\
 \hline
 & & 1,000
 \end{array}$$

Określimy W mając wartości opałowe poszczególnych składników z tablicy, biorąc np. warunki techniczne.

$$W = 2360 \cdot 0,44 + 7820 \cdot 0,36 + 12920 \cdot 0,045 + 2800 \cdot 0,09.$$

$$W = 1038,4 + 2815,2 + 581,4 + 266 = 4700 \text{ Kal/m}^3 (15^\circ, 737,4)$$

Zadanie 155

Obliczyć wartość opałową drzewa, którego skład chemiczny w stanie suchym jest: $C = 50 \%$, $H_2 = 6 \%$, $O_2 = 43,5 \%$, $pop. = 0,5 \%$, jeżeli ono zawiera 30 % wody.

Rozwiązanie

$$\begin{array}{l} C = 0,5 \\ H_2 = 0,06 \\ O_2 = 0,435 \\ \underline{p = 0,005} \end{array}$$

$$1,000$$

Po uwzględnieniu
30 % wody otrzy-
muje się:

$$\begin{array}{l} C = 0,35 \\ H_2 = 0,042 \\ O_2 = 0,305 \\ \underline{p = 0,003} \\ w = 0,30 \end{array}$$

$$1,000$$

Zastosujemy wzór związkowy z uwagą, że wszystkich wodór zwiąże się z tlenem tworząc $0,042 \cdot 9 = 0,378$ kg wody. Razem będzie wody $0,678$ kg.

$$\begin{aligned} W &= 8100 \cdot 0,35 - 600 \cdot 0,678 = 2835 - 406,8 = \\ &= 2428,2 \text{ Kal/kg.} \end{aligned}$$

Zadanie 156

Obliczyć teoretyczne zapotrzebowanie tlenu (O_{min}) na wagę i na objętość do spalania torfu o składzie chemicznym;

$C = 50\%$, $H_2 = 4,2\%$, $O_2 = 27\%$ i $pop. = 18,8\%$.

Rozwiązanie

$$\begin{array}{l} C = 0,5 \\ H_2 = 0,042 \\ O_2 = 0,27 \\ \underline{p = 0,188} \\ 1,000 \end{array} \quad \begin{array}{l} O_{min/kg} = 2,667 \cdot 0,5 + 8 \cdot 0,042 - \\ - 0,27 = 1,3995 \text{ kg/kg} \\ O_{min/m^3} = 22,4 \left[\frac{0,5}{12} + \frac{0,042 - \frac{0,27}{8}}{4} \right] \\ nm^3/kg \end{array}$$

$$O_{min/m^3} = 0,9796 \text{ nm}^3/\text{kg}$$

Sprawdzenie: dla tlenu $\gamma_{(0,700)} = 1,429$
 $0,9796 \cdot 1,429 = 1,3998.$

Zadanie 157

Obliczyć teoretyczną ilość powietrza na wagę i na objętość w nm^3 do spalania gazu o składzie jak w zadaniu nr 154.

Rozwiązanie

$$O_{\min/m}^3 = 0,5 \cdot 0,44 + 0,5 \cdot 0,095 + 2 \cdot 0,36 + 3 \cdot 0,045$$

$$O_{\min/m}^3 = 1,1225 \text{ nm}^3/\text{nm}^3. \text{ Wtedy } V_{\min} = \frac{1,1225}{0,21} =$$
$$= 5,345 \text{ nm}^3/\text{nm}^3$$

$$L_{\min} = 1,293 \cdot 5,345 = 6,91 \text{ kg}/\text{nm}^3.$$

Zadanie 158

W palenisku kotłowym spala się na godzinę 720 kg węgla o składzie chemicznym zawierającym 0,75 C, 0,06 H₂ i 0,08 O₂. Obliczyć teoretyczną ilość powietrza do spalania w kg i nm³.

Rozwiązanie

$$O_{\min \text{ kg}} = 2,667 \cdot 0,75 + 8 \cdot 0,06 - 0,08 = 2,4135 \text{ kg na kg tleniu}$$

$$L_{\min} = \frac{2,4135}{0,23} = 10,5 \text{ kg/kg powietrza}$$

$$V_{\min} = \frac{10,5}{1,293} = 8,12 \text{ nm}^3/\text{kg} \quad ,,$$

$$\text{Na godzinę: } 10,5 \cdot 720 = 7560 \text{ kg powietrza}$$
$$8,12 \cdot 720 = 5858 \text{ nm}^3 \quad ,,$$

Zadanie 159

Obliczyć ciepło spalania węgla o składzie chemicznym podanym w zadaniu nr 153 mając jego wartość opalową $W = 6484$ Kal/kg.

Rozwiązanie

Mając W użyjemy wzoru $C_{sp} = W + hr$. Należy mieć h , tj. ilość pary wodnej w kg utworzonej podczas spalania.

$$h = 9H_2 + w \text{ kg} = 9 \cdot 0,044 + 0,07 = 0,466 \text{ kg}.$$

Do odparowania tej ilości wody zużyje się

$$600 \times 0,466 = \sim 280 \text{ Kal}.$$

$$\text{Zatem } C_{sp} = 6484 + 280 = 6764 \text{ Kal/kg}.$$

Zadanie 160

Obliczyć ciepło spalania i wartość opałową gazu wodnociadłego o składzie chemicznym $H_2 = 12\%$, $CO = 28\%$, $CH_4 = 3\%$, $CO_2 = 3\%$ i $N_2 = 54\%$ na objętość.

Rozwiązanie

$$\begin{array}{rcl}
 H_2 & = & 0,12 \\
 CO & = & 0,28 \\
 CH_4 & = & 0,03 \\
 CO_2 & = & 0,03 \\
 N_2 & = & 0,54 \\
 \hline
 & & 1,00
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 C_{sp} = 2800 \cdot 0,12 + 2800 \cdot 0,28 + \\
 \quad + 8700 \cdot 0,03 = 1381 \text{ Kal/m}^3 \\
 W = 2360 \cdot 0,12 + 2800 \cdot 0,28 + \\
 \quad + 7820 \cdot 0,03 = 1301,8 \text{ Kal/m}^3
 \end{array}$$

Zadanie 161

Określić objętość i ciężar pary wodnej wytwarzającej się przy spalaniu gazu świetlnego o składzie objętościowym:

$$\begin{array}{l}
 CO_2 = 4\%, \quad C_2H_4 = 2\%, \quad O_2 = 1\%, \\
 CO = 16\%, \quad H_2 = 48\%, \quad CH_4 = 23\%. \\
 N_2 = 6\%.
 \end{array}$$

Rozwiązanie

$$\begin{array}{rcl}
 CO_2 & = & 0,04 \\
 C_2H_4 & = & 0,02 \\
 O_2 & = & 0,01 \\
 CO & = & 0,16 \\
 H_2 & = & 0,48 \\
 CH_4 & = & 0,23 \\
 N_2 & = & 0,06 \\
 \hline
 & & 1,00
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 \text{Ze wzorów na reakcje zachodzące przy spa-} \\
 \text{laniu mamy:} \\
 1 \text{ m}^3 C_2H_4 \text{ daje pary wodn. } 2 \text{ m}^3 \\
 \quad \quad \quad H_2 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad 1 \text{ m}^3 \\
 \quad \quad \quad CH_4 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad 2 \text{ m}^3 \\
 \text{A zatem ogólna ilość pary wodnej będzie:} \\
 2 \cdot 0,02 + 1 \cdot 0,48 + 2 \cdot 0,23 = 0,98 \text{ m}^3 \text{ na m}^3.
 \end{array}$$

0,98 m³ pary wodnej zawiera $\frac{0,98}{22,4}$ moli.

1 mol pary wodnej waży 18 kg.

Ciężar pary wodnej $\frac{0,98 \cdot 18}{22,4} = \sim 0,8 \text{ kg.}$

Sprawdzenie γ'' przy 1 ata i $99,1^\circ = 0,57904 \text{ kg/m}^3$

To ciężar $0,98 \text{ m}^3$ pary wodnej, sprowadzony do $t = 0^\circ$ i $B_0 = 760 \text{ mm sł. rt.}$, będzie

$$G = \frac{0,57904 \cdot 0,98 \cdot 372,1 \cdot 760}{273 \cdot 735,5} = \sim 0,8 \text{ kg.}$$

Zadanie 162

Znaleźć współczynnik nadmiaru powietrza przy spalaniu oleju gazowego o składzie chemicznym $C = 86,5\%$, $H_2 = 13\%$, pozostałe niepalne składniki $0,5\%$, zużywając do spalania 1 kg $15,35 \text{ m}^3$ powietrza o $t = 15^\circ$ i 1 ata .

Rozwiązanie

Współczynnik nadmiaru $\lambda = \frac{V_{rs}}{V_{teor}}$.

$$V_{teor} = V_{min} = \frac{O_{min}(\text{m}^3)}{0,21}$$

$$\begin{aligned} O_{min}(\text{m}^3) &= 22,4 \left(\frac{C}{12} + \frac{H - \frac{O}{8}}{4} + \frac{S}{32} \right) \text{ nm}^3/\text{kg} = \\ &= 22,4 \left(\frac{0,865}{12} + \frac{0,13}{4} \right) = 2,34 \text{ nm}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$V_{min} = \frac{2,34}{0,21} = 11,14 \text{ nm}^3/\text{kg}$$

$V_{rs} = 15,35 \text{ m}^3$ ($15^\circ, 737,4$). Ilość ta w nm^3 równa się

$$V_{rs}(\text{nm}^3) = \frac{15,35 \cdot 273 \cdot 737,4}{288 \cdot 760} = 14,13 \text{ nm}^3/\text{kg.}$$

$$\text{Zatem } \lambda = \frac{14,13}{11,14} = 1,268.$$

Zadanie 163

Określić skład objętościowy spalin otrzymanych przy zupełnym spalaniu 1 kg węgla zawierającego $C = 73\%$, $H_2 = 4,5\%$, $O_2 = 10\%$, $S = 1\%$, $H_2O = 3,8\%$ i *Pop.* = $7,7\%$, a) jeżeli $\lambda = 1$, b) jeżeli $\lambda = 1,8$.

Rozwiązanie

$$\begin{array}{ll}
 C = 0,73 & \text{a) } \lambda = 1 \\
 H_2 = 0,045 & \\
 O_2 = 0,10 & CO_2 = \frac{22,4}{12} \cdot 0,73 = 1,363 \text{ m}^3 \quad 17,55 \% \\
 S = 0,01 & \\
 H_2O = 0,038 & H_2O = 22,4 \left(\frac{0,045}{2} + \frac{0,038}{18} \right) = 0,551 \text{ m}^3 \quad 7,05 \% \\
 Pop = 0,077 & \\
 \hline
 & 1,000
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 N_2 &= 0,79 \cdot V_{min} \\
 V_{min} &= \frac{O_{min}}{0,21} = \frac{22,4}{0,21} \left(\frac{0,73}{12} + \frac{0,045}{4} - \frac{0,0125}{4} + \frac{0,01}{32} \right) \text{ nm}^3/\text{kg} = 7,41 \text{ nm}^3/\text{kg}
 \end{aligned}$$

$$N_2 = 0,79 \cdot 7,41 = 5,856 \text{ m}^3 \quad 75,40 \%$$

Razem 7,77 m³ spalin, przy czym na utworzenie CO₂ pójdzie 1,363 m³ tlenu, a na utwo-

$$\text{rzenie } H_2O - \frac{22,4 \cdot 0,045}{2 \cdot 2} = 0,254 \text{ m}^3 \text{ tlenu}$$

Razem . 1,617 m³ tlenu.

W tym tlenu z paliwa $\frac{0,1 \cdot 22,4}{32} = 0,07 \text{ nm}^3$, reszta, tj. 1,547 nm³ tlenu, z powietrza.

Istotnie $O_{min} = 7,41 \cdot 0,21 = 1,55 \text{ m}^3$ tlenu.

b) $\lambda = 1,8$

$$V = 1,8 V_{min} = 1,8 \cdot 7,41 = 13,34 \text{ nm}^3 \text{ powietrza.}$$

W spalinach będzie:

CO ₂ jak wyżej	1,363	10 %
H ₂ O jak wyżej	0,551	4,05 %
O ₂ 13,34 · 0,21 — (1,363 + 0,254)	1,184	8,88 %
N ₂ 13,34 · 0,79	10,530	77,27 %
Razem	13,628 m ³	100 %

Zadanie 164

Określić skład objętościowy spalin biorąc dane z zadania nr 162.
Jaki będzie %-wy skład spalin po skropleniu pary wodnej?

Rozwiązanie

$C = 0,865$ W zadaniu nr 162 otrzymaliśmy, że do spalania
 $H_2 = 0,13$ było zużyte $V_{\text{„}} = 14,13 \text{ nm}^3/\text{kg}$.

$$\frac{\text{niepalne} = 0,005}{1,000}$$

W spalinach będzie:

$$CO_2 = \frac{22,4}{12} \cdot 0,865 = 1,616 \text{ m}^3 \quad 10,87 \%$$

$$H_2O = \frac{22,4}{2} \cdot 0,13 = 1,457 \text{ m}^3 \quad 9,81 \%$$

$$O_2 = 14,13 \times 0,21 - \left(1,616 + \frac{1,457}{2}\right) = 0,626 \text{ m}^3 \quad 4,22 \%$$

$$N_2 = 14,13 \times 0,79 = \frac{11,160 \text{ m}^3}{14,859 \text{ m}^3} \quad \frac{75,10 \%}{100 \%}$$

Woda po skropleniu pary wodnej zajmie tak małą objętość, że można jej nie brać pod uwagę.

Wtedy

$$CO_2 = 1,616 \text{ nm}^3 \text{ stanowi } 12,06 \%$$

$$O_2 = 0,626 \text{ „ „ } 4,67 \%$$

$$N_2 = 11,160 \text{ „ „ } 83,27 \%$$

$$\frac{13,402 \text{ nm}^3}{100 \%}$$

Zadanie 165

Spaliny zawierają $CO_2 = 13 \%$, $O_2 = 5 \%$, $CO = 1,5 \%$, $H_2O = 2 \%$
Obliczyć współczynnik nadmiaru powietrza.

Rozwiązanie

$$\begin{array}{l} CO_2 = 13 \% \quad \text{Azotu } 100 - 21,5 = 78,5 \% \\ O_2 = 5 \% \\ CO_2 = 1,5 \% \quad \lambda = \frac{78,5}{78,5 - \frac{79}{21} \left(5 - \frac{1,5}{2} \right)} = \\ \hline H_2O = 2 \% \\ \quad \quad \quad 21,5 \% \\ \quad \quad \quad = \frac{78,5}{62,2} = 1,26. \end{array}$$

Zadanie 166

Nadmiar powietrza $\lambda = 1,75$. W spalinach było $O_2 = 9,5\%$ i $CO = 1\%$.

Ile było CO_2 ?

Rozwiązanie

$$\lambda = \frac{n}{n - \frac{79}{21} \left(O_2 - \frac{CO}{2} \right)}$$

Ponieważ $O_2 = 0,095$, a $CO = 0,01$ to

$$\begin{aligned} 1,75 &= \frac{n}{n - \frac{79}{21} \left(0,095 - \frac{0,01}{2} \right)} \\ (1,75 - 1) n &= 1,75 \cdot 3,76 \cdot 0,09 \\ n &= 0,79 \\ CO_2 &= 100 - (79 + 9,5 + 1) = 10,5 \%. \end{aligned}$$

Zadanie 167

Zbudować wykres spalinowy (wykres Ostwald'a) dla węgla kamiennego zawierającego $C = 74\%$, $H_2 = 4,5\%$, $S = 1\%$, $O_2 = 7\%$, $N_2 = 2\%$, $H_2O = 5\%$ i $Pop = 6,5\%$.

Rozwiązanie

Najpierw obliczymy O_{min} , które będzie potrzebne do wyliczenia najwyższej $\%$ -wej zawartości dwutlenku węgla (CO_2)

w spalinach suchych przy spalaniu zupełnym, przy $\lambda=1$ według równania (98)

$$k_{z_{max}} = \frac{100 C}{C + 2O_{min}};$$

$$O_{min} = 22,4 \left(\frac{0,74}{12} + \frac{0,045 - \frac{0,07}{8}}{4} + \frac{0,01}{32} \right) \text{ nm}^3,$$

$$O_{min} = 1,59 \text{ nm}^3$$

$$\text{Zatem } k_{z_{max}} = \frac{100 \cdot 0,74}{0,74 + 2 \cdot 1,59} = 18,8\%.$$

Oczywiście przy $k_{z_{max}}$, tj. przy $\lambda=1$, zawartość tlenu w spalinach O .

Najwyższa objętościowa zawartość tlenu w spalinach będzie przy nadmiarze powietrza $\lambda=\infty$, a więc w powietrzu. Wynosi ona 21 % tlenu.

Na poziomej osi AB odmierzymy 21 części równych, odpowiadających %-ym zawartościom tlenu w spalinach.

Na pionowej osi AC odkładamy 18,8 takich samych części, które będą wskazywały %-we zawartości dwutlenku węgla w spalinach.

Oczywiście punkt C odpowiada zawartościom $(CO_2)=18,8\%$ i $(O_2)=0\%$, zaś punkt B — $(CO_2)=0\%$ i $(O_2)=21\%$. Na przeciwprostokątnej odmierzamy 10 części równych, które będą odpowiadały odwrotnościom λ , czyli

$$1/\lambda = 1, 0,9, 0,8, 0,7, 0,6, 0,5, 0,4, 0,3, 0,2, 0,1$$

$$\lambda = 1, 1,11, 1,25, 1,43, 1,67, 2, 2,5, 3,33, 5, 10.$$

O ile chodzi o spalanie zupełne, wykres jest gotów i widać z niego, że np. jeżeli $1/\lambda=0,6$, a więc przy $\lambda=1,67$, jeżeli spalanie odbywa się zupełne, w spalinach będzie $\sim 11,5\%$ (CO_2) i $\sim 8,5\%$ (O_2), reszta azot. Oddzielnie uwzględnić należy parę wodną wg ilości zawartego w paliwie wodoru i wilgoci.

W wypadku spalania niezupełnego wykres musi wskazywać zawartą w spalinach ilość tlenu węgla (CO).

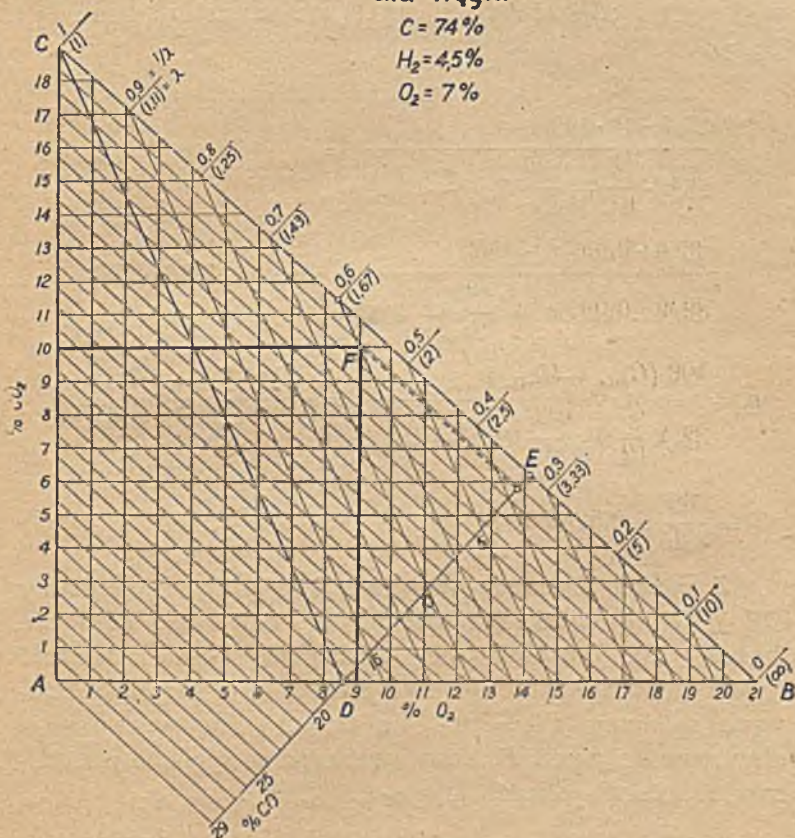
Do wykreślenia linii (CO) zakładamy, że spalanie odbywa się w ten sposób, że wszystek węgiel spalony został tylko na (CO), a (CO_2) w spalinach nie ma wcale, pozostałe zaś składniki

Wykres spalinowy dla węgla

$$C = 74\%$$

$$H_2 = 4,5\%$$

$$O_2 = 7\%$$



spalają się normalnie. Tlenu użyto 10_{min} . Wtedy teoretyczna ilość tlenu do spalania 1 kg paliwa na (CO) będzie :

$$\Omega_{min} = 22,4 \left[\frac{C}{12,2} + \frac{H - \frac{O}{8}}{4} + \frac{S}{32} \right] =$$

$= 22,4 (0,0308 + 0,00906 + 0,00031) = 0,9 \text{ nm}^3$, a objętość suchych spalin

$$V' = 22,4 \frac{C}{12} + \frac{100}{21} \lambda O_{\min} - \Omega_{\min}$$

Najwyższa (przy $\lambda = 1$) %-wa zawartość w spalinach tlenku węgla (t_n) i odpowiadająca jej %-wa zawartość tlenu (q_n) będą:

$$\begin{aligned} t_{n \max} &= \frac{22,4 \cdot \frac{C}{12} \cdot 100}{22,4 \cdot \frac{C}{12} + \frac{100}{21} O_{\min} - \Omega_{\min}} = \\ &= \frac{22,4 \cdot 0,0616 \cdot 100}{22,4 \cdot 0,0616 + \frac{159}{21} - 0,9} = \frac{138}{8,05} = 17,3 \% (CO) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_n &= \frac{100 (O_{\min} - \Omega_{\min})}{22,4 \frac{C}{12} + \frac{100}{21} O_{\min} - \Omega_{\min}} = \frac{100 (1,59 - 0,9)}{8,05} = \\ &= \frac{69}{8,05} = 8,57 \% (O_2). \end{aligned}$$

Z punktu D odpowiadającego $8,57\% (O_2)$ prowadzimy $DE \perp CB$ i odcinek DE dzielimy na 17,3 części równych. Odcinek DE jest linią (CO) wskazującą %-wą zawartość tlenku węgla w spalinach. Np. jeżeli analiza gazów spalinyowych wykazuje $CO_2 = 10\%$, a $O_2 = 9\%$, to na wykresie otrzymuje się punkt F , który wskazuje, że spalanie jest niezupełne i że w spalinach jest $\sim 1,1\% (CO)$.

Zadanie 168

Obliczyć %-wą zawartość tlenku węgla w spalinach otrzymanych z węgla o składzie jak w zadaniu nr 167, jeżeli analiza gazów wykazała:

$$CO_2 - 10\% \text{ i } O_2 - 9\%.$$

Rozwiązanie

Zakładamy, że z 0,74 kg węgla zawartego w 1 kg paliwa danego x kg spalane zostało na CO , a reszta, tj. $(C - x)$ kg — na CO_2 .

Niewiadomy jest również nadmiar λ powietrza, z jakim się spalanie odbywało.

Mamy zatem 2 niewiadome, dla odszukania których ułożymy 2 równania opierając się na wiadomych %-owych zawartościach w spalinach CO_2 i O_2 .

Podane %-owe zawartości dotyczą spalin suchych, taki bowiem tylko wynik otrzymać można z aparatu Orsata.

Objętość spalin suchych z 1 kg paliwa:

$$V_s = \underbrace{\frac{22,4}{12} (C - x)}_{CO_2} + \underbrace{\frac{22,4}{12} x}_{CO} + \underbrace{\frac{79}{21} \lambda O_{min}}_{\text{azot z powietrza}} +$$

$$+ \underbrace{\frac{22,4}{28} N_2}_{\text{azot w paliwie}} + \underbrace{0,7 S}_{SO_2} + \underbrace{\lambda O_{min}}_{\text{rzecz. ilość tlenu}} - \underbrace{\frac{22,4}{12} (C - x)}_{\text{tlen zużyty na } CO_2} -$$

n a d —

$$- \underbrace{\frac{22,4}{24} x}_{\text{tlen zużyty na } CO} - \underbrace{0,7 S}_{\text{tlen zużyty na } SO_2} - \underbrace{\frac{22,4}{4} H_2}_{\text{tlen zużyty na spalenie } H_2} + \underbrace{\frac{22,4}{32} O_2}_{\text{tlen w paliwie}}$$

m i a r t l e n u Po redukcji otrzymuje się:

$$V_s = \frac{100}{21} \lambda O_{min} + 22,4 \left(\frac{N_2}{28} - \frac{H_2}{4} + \frac{O_2}{32} + \frac{x}{24} \right)$$

Po podstawieniu wartości $C = 0,74$, $H_2 = 0,045$, $S = 0,01$,
 $N_2 = 0,02$ i $O_2 = 0,07$ kg

oraz wyniku na $O_{min} = 1,59$ nm³, wyliczonego w zadaniu nr 167, otrzymujemy

$$V_s = 7,57 \lambda + 0,933 x - 0,187 \text{ nm}^3.$$

W tej ilości spalin CO_2 jest $\frac{22,4}{12} (C-x)$, czyli $1,867 \cdot 0,74 - 1,867 x = 1,38 - 1,867 x \text{ nm}^3 CO_2$ i nadmiar tlenu, czyli:

$$\lambda O_{min} - \frac{22,4}{12} (C-x) - \frac{22,4}{24} x - 0,7 S - \frac{22,4}{4} H_2 + \frac{22,4}{32} O_2 =$$

$$= 1,59 \lambda + 0,933 x - 1,592 \text{ nm}^3 O_2.$$

Zatem:

$$\frac{(CO_2) \text{ nm}^3}{V_s \text{ nm}^3} = \frac{1,38 - 1,867 x}{7,57 \lambda + 0,933 x - 0,187} = 0,1$$

$$\text{i } \frac{(O_2) \text{ nm}^3}{V_s \text{ nm}^3} = \frac{1,59 \lambda + 0,933 x - 1,592}{7,57 \lambda + 0,933 x - 0,187} = 0,09.$$

Otrzymujemy 2 równania:

$$\begin{aligned} 1,96 x + 0,757 \lambda &= 1,4 \\ 0,85 x + 0,91 \lambda &= 1,56, \end{aligned}$$

z których

$$\begin{aligned} x &= 0,07 \text{ kg C spala się na CO} \\ \text{i } \lambda &= 1,67. \end{aligned}$$

Ilość otrzymanego tlenku węgla $= 1,867 \cdot 0,07 =$
 $= 0,131 \text{ nm}^3 CO.$

A że V_s po podstawieniu otrzymanych wyników daje:

$$V_s = 7,57 \cdot 1,67 + 0,933 \cdot 0,07 - 0,187 = 12,52 \text{ nm}^3,$$

to %-wa zawartość tlenku węgla w spalinach jest

$$\frac{0,131}{12,52} = 0,0105, \text{ czyli } 1,05 \%.$$

Całkowity skład suchych spalin z 1 kg danego węgla spalnego w wyżej podanych warunkach będzie:

			%
CO_2	1,250	nm^3	10
CO	0,131	„	1,05
SO_2	0,007	„	0,05
N_2	10,036	„	79,90
O_2	1,126	„	9
	12,55	nm^3	100 %

Zadanie 169

Sprawdzić wynik dla λ otrzymany w zadaniu nr 168 podług wzoru ogólnego.

Rozwiązanie

Wzór ogólny na λ :

$$\lambda = \frac{n}{n - \frac{79}{21} \left(o - \frac{co}{2} \right)}, \quad \text{gdzie } n, o \text{ i } co - \text{udziały objętościowe w spalinach azotu, tlenu i tlenku węgla. Podstawiając za}$$

$n = 79,9\%$, $o = 9\%$ i $co = 1,05\%$ otrzymujemy

$$\lambda = \frac{79,9}{79,9 - \frac{79}{21} (9 - 0,525)} = \frac{79,9}{48} = 1,67.$$

Zadanie 170

Analiza spalin otrzymanych przy spalaniu gazu świetlnego o składzie objętościowym $C_2H_4 - 2,2\%$, $CH_4 - 11,3\%$, $CO - 17,6\%$, $H_2 - 50\%$, $O_2 - 0,8\%$, $CO_2 - 9,1\%$ i $N_2 - 9\%$, wykazała zawartość w spalinach $CO_2 - 12\%$ i $O_2 - 4\%$ przy braku gazów palnych. Obliczyć współczynnik nadmiaru powietrza.

Rozwiązanie

Mamy spalanie zupełne.

$$1) O_{min} = 0,5 \times 0,5 + 0,5 \times 0,176 + 2 \times 0,113 + 3 \times 0,022 - 0,008 = 0,622 \text{ nm}^3 \text{ tlenu.}$$

$$V_{min} = \frac{0,622}{0,21} = 2,96 \text{ nm}^3 \text{ powietrza teoret. na nm}^3 \text{ gazu.}$$

W spalinach było CO_2

$$2 \times 0,022 + 0,113 + 0,176 + 0,091 = 0,424 \text{ nm}^3.$$

Ta ilość CO_2 stanowi 12% objętości spalin suchych.

$$\text{Zatem } V_s = \frac{0,424}{0,12} = 3,53 \text{ nm}^3 \text{ spalin suchych.}$$

Jeżeli tlenu w spalinach było 4%, to na objętość było go $3,53 \times 0,04 = 0,1412 \text{ nm}^3$ tlenu. Był to nadmiar tlenu.

Ogółem dostarczono tlenu $0,622 + 0,1412 = 0,7632 \text{ nm}^3$,
co odpowiada rzeczywistej ilości powietrza

$$V = \frac{0,7632}{0,21} = 3,63 \text{ nm}^3.$$

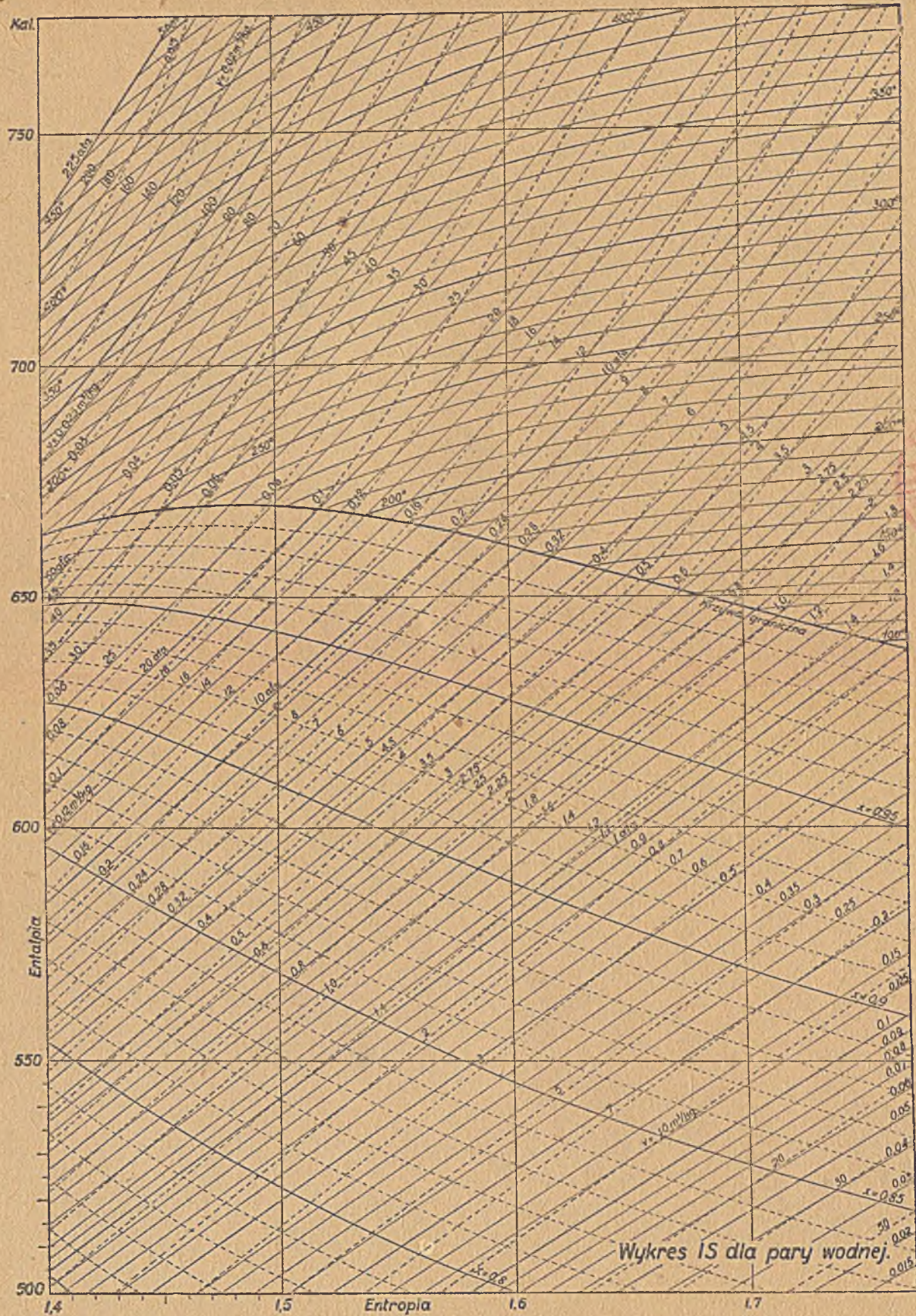
Spółczynnik nadmiaru:

$$\lambda = \frac{V_{\text{reox}}}{V_{\text{teor}}} = \frac{3,63}{2,96} = 1,225.$$

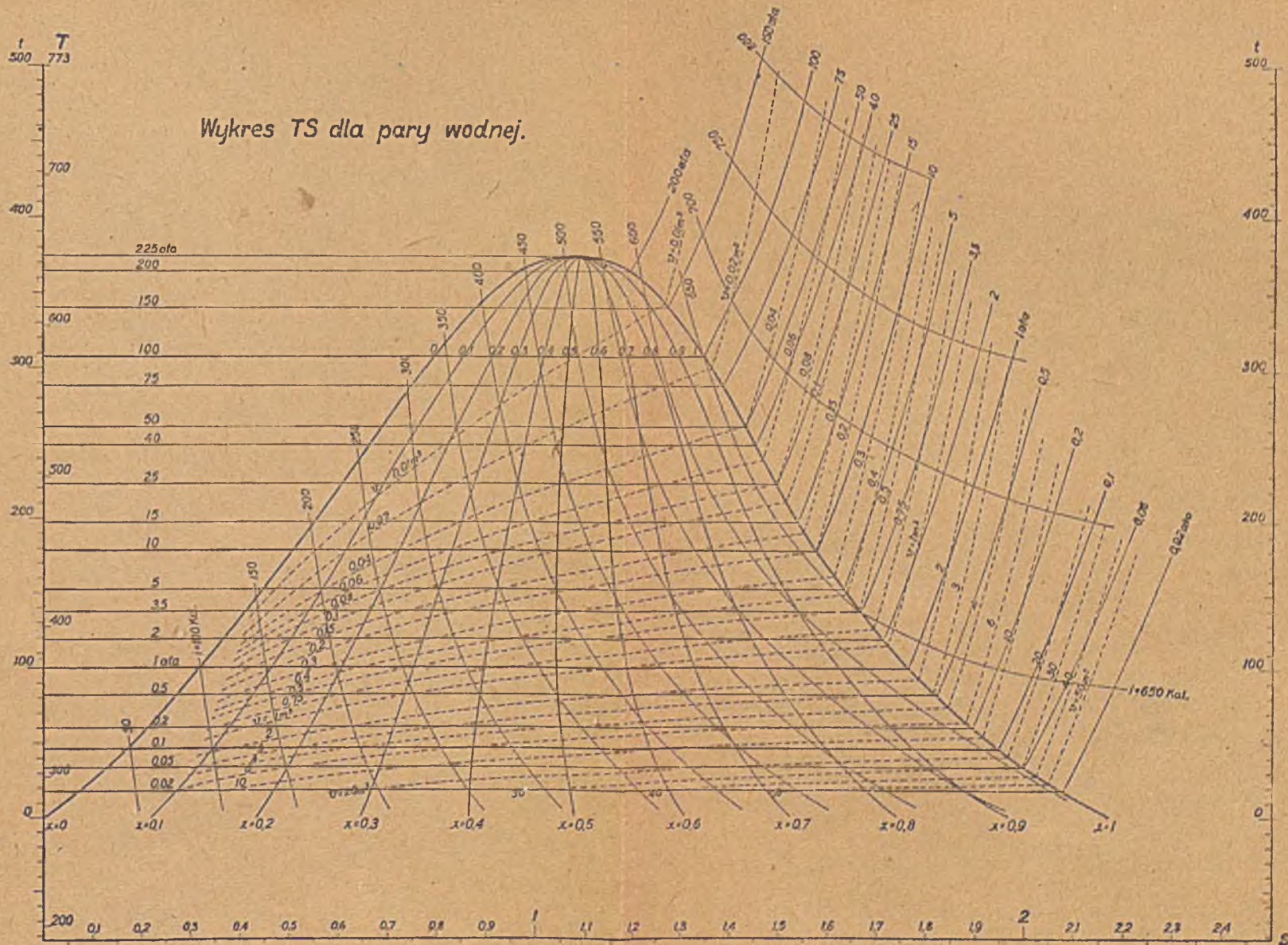
- 2) Jeżeli CO_2 było 12 %, a O_2 — 4 % przy braku gazów palnych, to w spalinach suchych było 84 % azotu.

$$\text{Zatem } \lambda = \frac{84}{84 - \frac{79}{21} \cdot 4} = \frac{84}{68,95} = 1,22.$$





Wykres TS dla pary wodnej.



E R R A T A

Str.	Wiersz	Jest	Powinno być
48	4 od g.	ciepła	ciepl
88	1 od g.	$v'_1 = v'$	$v'_1 = v'_2$
88	8 od d.	$u_2 - u$	$u_2 - u_1$
88	8 od d.	$(r - Ap (v'' - v'))$	$(r - Ap (v'' - v'))$
120	3 od d.	9 kg	kg
187	2 od d.	0	o
204	4 od g.	1.8 kg	18 kg
204	13 od g.	$3 (v'' x + v' (1 - x))$	$3 [v'' x + v' (1 - x)]$

10.50
CENA zł 350.

1. MARZ 1951

BG Politechniki Śląskiej

nr inw.: 102 - 147139



Dyr.1 147139

