

1. Dostarczono do paleniska ciepła W_u <i>kal</i>	7040	<i>kal</i>	100	%
2. Para przejęła $\frac{D}{B} (i - t_o)$ <i>kal/kg</i>	4790	<i>kal</i>	68,1	%
3. Straty wskutek niezupełnego spalania:				
a) strata w popielniku	158,0	<i>kal</i>	2,2	%
b) strata przez sadzę	27,2	<i>kal</i>	0,4	%
c) strata wskutek niespalonego CO	88,8	<i>kal</i>	1,3	%
4. Strata kominowa:				
a) właściwa strata	1415	<i>kal</i>	20,1	%
b) strata przez nieszczelności	225	<i>kal</i>	3,2	%
5. Promieniowanie i t. p.	336	<i>kal</i>	4,7	%
Razem	7040	<i>kal</i>	100	%

II. Badanie parowej maszyny tłokowej.

1. Uwagi ogólne.

Badanie parowego silnika tłokowego czyli t. zw. maszyny parowej może mieć na celu oznaczenie jej mocy i rozchodu pary, poszczególnych strat cieplnych czyli t. zw. bilansu, sprawdzenie stanu jej organów rozrządowych i tłoka oraz zdolności regulacyjnej, pozatem badania mogą mieć na celu rozwiązywanie zagadnień naukowych.

Każde badanie należy dostosować nie tylko do jego celu, ale także do warunków, w których się ono odbywa i do typu silnika. Wszystkie te badania, podczas których odbywa się oznaczanie rozchodu pary lub strat cieplnych, wymagają stanu równowagi maszyny, t. zn. stanu, podczas którego jej obciążenie, temperatury i ciśnienia pary nie podlegają silniejszym wahaniom, których dopuszczalne granice zależą od żądanego stopnia dokładności pomiaru, a więc od jego celu.

Czas trwania pomiaru może być tem krótszy im stan równowagi jest lepszy. Długość tego okresu zależy także od metody stosowanej do oznaczania rozchodu pary, przy oznaczaniu go przy pomocy skraplania pary w skraplaczu powierzchniowym i przy stałym obciążeniu, wyniki dostatecznie dokładne otrzymać można już po upływie godzinowego pomiaru, w innych wypadkach okres ten może się przeciągnąć do 6, a nawet 12 godzin.

Częstość robionych spostrzeżeń również zależy od wahań w odczytywanych wielkościach i od wymaganej dokładności pomiaru, przy dokładnych a względnie krótko trwających badaniach odczytuje się wszelkie charakterystyczne wartości co 5–10 minut, przy pomiarach dłuższych co

10—20 minut, w każdym razie odczytywać się powinno przez cały przeciąg pomiaru w tych samych odstępach czasu.

Na osiągnięcie przy badaniu cyfry duży wpływ wywiera stan maszyny, uwzględniając więc ten czynnik należy przed badaniem doprowadzić silnik do stanu właściwego, w przeciwnym razie otrzymane wyniki służyć mogą tylko do stwierdzenia nieprawidłowego stanu urządzenia i do poszukiwań drogi do jego poprawy, natomiast opieranie w tym wypadku na zebranych materiale cyfrowym ogólniejszych wniosków—jest niewłaściwe.

2. Oznaczanie mocy.

Oznaczanie mocy rzeczywistej silnika odbywać się może w sposób dwojaki: przez obciążanie go prądnicą elektryczną, której moc mierzymy, lub, gdy takiego urządzenia nie posiadamy, przez oznaczanie mocy indukowanej silnika przy jego obciążeniu i przy biegu jałowym. Silniki parowe posiadają zazwyczaj tak znaczną moc, że obciążenie ich przy pomocy hamulców, za wyjątkiem lokomobil, niema tu zastosowania.

Najdogodniejszą i najpewniejszą metodą jest pierwsza, t. j. oznaczanie mocy silnika na podstawie obciążenia elektrycznego prądnicy, wyrażającego się iloczynem natężenia i *Amp* i napięcia e *V* prądu elektrycznego.

O ile urządzenie elektryczne wytwarza prąd stały, moc rzeczywista silnika wyrazi się jako:

$$N_e = \frac{i \cdot e}{736 \cdot \eta_{el}} KM_e,$$

zaś przy prądzie zmiennym trójfazowym:

$$N_e = \frac{\sqrt{3} \cdot i \cdot e}{736 \cdot \eta_{el}} \cos \varphi,$$

gdzie $\cos \varphi$ oznacza przesunięcie faz czyli t. zw. współczynnik mocy.

Przy prądzie zmiennym trójfazowym, o ile prądnica nie pracuje na opór omowy (lampy żarowe lub opór wodny), można znaleźć moc przy uwzględnieniu $\cos \varphi$ zapomocą watomierza, a wobec zazwyczaj niezupełnie równomiernego obciążenia faz, stosuje się t. zw. metodę dwóch watomierzy, przy której ich cewki główne włącza się do dwu faz, a cewki bocznikowe między te same fazy i trzecią, w której watomierza niema.

Sprawność prądnicy η_{el} przyjmuje się z jej charakterystyki w zależności od obciążenia albo też oznacza się bezpośrednio drogą pomiarów elektrycznych.

Przy zawieraniu umów na dostawę urządzeń parowo-elektrycznych wskazane jest odnoszenie gwarancji rozchodu ciepła w silniku parowym do rzeczywistej mocy elektrycznej prądnicy, co daje się zazwyczaj łatwo

stwierdzić; tą drogą unika się potrzeby oznaczania sprawności prądnicy i mechanicznej sprawności silnika.

W tych wypadkach, gdy ma być oznaczona moc rzeczywista silnika drogą indykowania, oblicza się moc indykowaną (wewnętrzną) przy danym obciążeniu N_i i przy biegu jałowym N_o . W wielu wypadkach zadawaliśmy się oznaczeniem mocy rzeczywistej N_e jako:

$$N_e = N_i - N_o$$

jest to jednak nieściśle, gdyż zapotrzebowanie mocy na pokrycie oporów mechanicznych wzrasta z obciążeniem, więc z wywieranymi naciskami na czopy i łożyska czyli

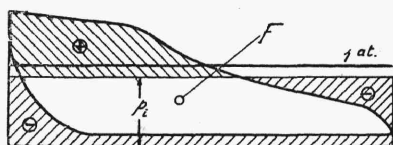
$$N_e = N_i - N_o - \varepsilon \cdot N_e,$$

gdzie ε jest pewnym współczynnikiem, uwzględniającym wzrost tarcia przy wzroście obciążenia.

$$\varepsilon = \frac{N_i - N_e - N_o}{N_e}.$$

Współczynnik ten zależy od typu maszyny i od jej stanu, a oznaczony być może drogą pośrednią.

Moc indykowaną albo wewnętrzną znajduje się przy pomocy indykatorów, oznaczając t. zw. średnie ciśnienie indykowane p_i na tłok.



Rys. 88

Ciśnienie to jest pojęciem zastępczym, w rzeczywistości działają ciśnienia zmienne na tłok, jako różnice nacisków na obie jego strony. Zamiast tych zmiennych ciśnień przyjmujemy stałe tak jednak dobrane, że w wyniku dają tę samą pracę, a geometrycznie są one wysokością prostokąta o powierzchni pola wykresu F (rys. 88).

Zamiana nieregularnego pola wykresu na prostokąt odbywa się zazwyczaj przy pomocy planimetru i dzielenia otrzymanej powierzchni pola przez podstawę, odciętą między dwiema stycznymi wykresu, prostymi do linii atmosferycznej.

Planimetrowanie odbywa się przy pomocy t. zw. planimetrów biegunowych (patrz str. 98)

W braku planimetru można obliczyć w przybliżeniu powierzchnię wykresu przez podzielenie jej na szereg pasków np. 10 lub 20 o tej samej szerokości i zsumowanie ich pól, obliczonych jako powierzchnie trapezów, lub według reguły Simpsona.

W celu podniesienia dokładności wykresu sprężynę należy dobrać możliwie najsłabszą, w każdym jednak razie o 1—2 at silniejszą niż najwyższe ciśnienie pary w cylindrze.

Mając w ten sposób znalezione średnie ciśnienie p_{iD} od strony dna i p_K od strony korby, obliczamy moc indykowaną silnika przy liczbie obrotów na minutę n jako:

$$N_i = \left(F_D^{cm^2} p_{iD}^{kg/cm^2} + F_K^{cm^2} p_{iK}^{kg/cm^2} \right) \frac{sm \cdot n}{60 \cdot 75} KM$$

F_D i F_K oznaczają czynny przekrój cylindra, t. zn. po potrąceniu przekroju drąga tłokowego, więc $(F-f)$; s oznacza długość skoku tłoka.

Przy badaniu maszyn wielocylindrowych tak samo oblicza się moc każdego z cylindrów oddzielnie, a otrzymane wartości dodaje się. Wobec tego, że proces regulowania się maszyny ma ciągle miejsce, wykresy zdejmowane być powinny z obu stron tłoka i na wszystkich cylindrach jednocześnie.

Chcąc otrzymać w przybliżeniu moc rzeczywistą N_e należy przyjąć na sprawność mechaniczną η_m pewną wartość doświadczalnie oznaczoną dla pokrewnego typu maszyn. Wielkość ta waha się zazwyczaj około wartości 0,80—0,85 obniżając się dla starszych maszyn w gorszym stanie do 0,75 i podnosząc się dla maszyn stojących, bez pomp powietrznych, w doskonałym wykonaniu do 0,90.

Częstokroć odgrywa pewną rolę przy charakterystyce silnika parowego t. zw. moc maksymalna, t. zn. moc jaką jeszcze silnik rozwinąć może w granicznym wypadku przy przeciążeniu. Moc maksymalną oblicza się w ten sposób, że albo zdejmuje się wykres indykatora w chwili puszczenia maszyny w ruch, gdy regulator jest w najniższym położeniu, albo obracając maszynę ręcznie bez dopuszczania pary i obserwując okres otwarcia się stawidła na dopływie. Otwarcie to odpowiada maksymalnemu napełnieniu, gdyż wówczas, przy ręcznym obracaniu maszyny, regulator znajduje się z pewnością w najniższym położeniu. Mając zmierzone napełnienie, konstruuje się dla takiego właśnie napełnienia wykres z zaokrągleniami w charakterystycznych punktach, które przyjmuje się wedle wykresu normalnego, gdyż na organy wypustowe regulator odśrodkowy, nie osiowy, wpływu nie wywiera. Po splanimetrowaniu wykresu i przyjęciu liczby obrotów o 3—5% mniejszej od normalnej, oblicza się, jak poprzednio, moc maksymalną.

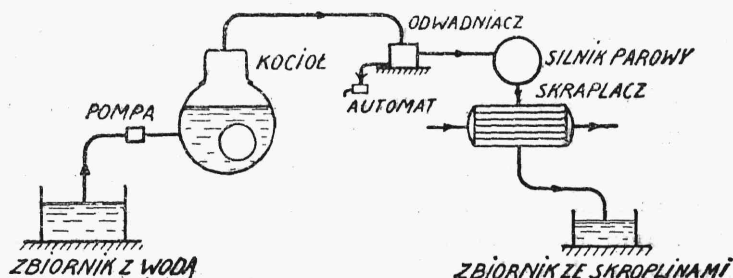
3. Oznaczanie rozchodu pary.

Rozchód pary D czyli ta jej ilość, jaką maszyna zużywa na wytworzenie 1 KMh , oznacza się niemal bez wyjątku doświadczalnie w odniesieniu do wody, z której powstała w kotle para, odpowiadająca właśnie temu rozchodowi albo która utworzyła się w skraplaczu po skropleniu ilości pary, odpowiadającej temuż również rozchodowi.

Istnieją inne metody do oznaczania rozchodu pary, lecz dające tylko

przybliżone i niepewne wyniki i mogące służyć tylko do orientacji. Np. jedna metoda polega na obliczeniu z wykresu indykatora napełnienia cylindra na jeden suw, a stąd — objętości pary, odpowiadającej temu napełnieniu; do tego dodaje się ilość pary skraplaną przy wlocie do cylindra oraz służącą na pokrycie nieszczelności w organach rozrządczych, tłoku i dławnicach. Jeżeli uwzględni się jeszcze niepewność co do stanu pary przy wlocie, jasnym się staje, że metoda ta daje wyniki zaledwie przybliżone. Inna metoda polega na przyjmowaniu dla różnych typów maszyn i warunków pracy cyfr, ujętych w obszerne tablice (Hrabak), ustawione częściowo na zasadzie doświadczeń, częściowo zaś — obliczeń. Ta metoda daje wyniki pewniejsze, jednak tylko w stosunku do silników normalnych, znajdujących się w poprawnym stanie.

W przeważającej ilości wypadków oznaczamy rozchód bezpośrednio na drodze doświadczalnej tembardziej, że w ten jedynie sposób jednocześnie



Rys. 89.

nie dojść możemy do ocenienia różnych strat cieplnych, z góry przyjmowanych w poprzednich metodach.

Oznaczanie doświadczalnie rozchodu pary odbywa się, jak wspominałem, przez pomiar cieczy, więc przez pomiar odparowywanej wody w kotle albo skraplanej pary w skraplaczu. (Patrz rys. 89.)

W pierwszym wypadku woda wtłaczana do kotła lub systemu kotłów zasilających tylko badaną maszynę parową, jest ważona lub mierzona objętościowo przy uwzględnieniu jej temperatury w celu umożliwienia wprowadzenia odpowiedniej poprawki, a w kotłach utrzymuje się stały poziom wody (patrz str. 149). W tych warunkach, ponieważ stan kotła nie uległa zmianie, cała ilość wody doprowadzonej do kotłów musiała w postaci pary pójść do maszyny. Aby jednak ten wniosek był ściśły wszystkie odgałęzienia boczne rurociągu zasilającego tą wodą kocioł oraz rurociągu parowego, zasilającego badaną maszynę, powinny być odcięte i to w wypadkach, gdy chodzi o pewność pomiaru, nie tylko przy pomocy zaworów, lecz t. zw. zaślepek, t. j. krążków z blachy, wsuniętych między kołnierze.

rze trójników na odgałęzieniach; pozatem para, potrzebna do uruchomienia parowych pomp zasilających, pobierana być musi podczas okresu pomiaru z innych kotłów, a zawory bezpieczeństwa, jak zresztą i wszelkie połączenia, nie powinny przepuszczać pary. Automaty, odprowadzające skroploną wodę, na czas pomiaru wyłączają się, jeżeli to jest możliwe, w przeciwnym wypadku odprowadza się skropliny do zbiorników (beczek) z zimną wodą lub tającym lodem, by uniknąć parowania gorących skroplin i tam są one ważone, a otrzymane wartości odejmuje się od tej ilości wody, która weszła do kotła i doszła do maszyny w postaci pary. Gdy pomiary wykonywa się częściej, korzystnie jest urządzić do chłodzenia skroplin z odwadniaczy specjalne, zanurzone w zbiornikach z przepływającą wodą, miedziane lub żelazne węzownice, skąd wyciekają już zimne skropliny do naczyń ustawionych na wagach.

Skropliny wydzielające się już po za zaworem głównym, znajdującym się przed silnikiem, nie są przy tej metodzie oznaczania rozchodu pary odejmowane, gdyż straty cieplne reprezentowane przez nie stanowią część istotnego rozchodu pary.

Źródłem błędu przy tej metodzie pomiaru, po za drobniejszymi wpływami wskutek możliwych nieszczelności pomp zasilających i rurociągów, jest trudność utrzymania poziomu wody w kotle na jednakowej wysokości, względnie zaobserwowanie powstałych różnic na początku i końcu pomiaru wskutek ciągłego falowania tego poziomu na wodowskazie. Aby wpływ tego błędu zmniejszyć dąży się do utrzymania ciągłego, równomiernego zasilania kotła, a pozatem okres pomiaru nie powinien być krótszy od 6 godzin, jeżeli chodzi o bardziej pewne wyniki. Jeżeli obciążenie silnika jest stałe, a pośrednie odczyty wykonywane podczas okresu pomiaru wykazują zgodne wyniki, czas trwania pomiaru można skrócić. Pomiar należy rozpocząć dopiero po ustaleniu stanu równowagi w całym układzie, t. zn. gdy temperatury i ciśnienia we wszystkich jego częściach nie będą ulegać zmianom.

W tych nielicznych wypadkach, gdy tłokowy silnik parowy posiada skraplacz powierzchniowy, oznaczenie rozchodu pary może być dokonane przez ważenie lub mierzenie ilości skroplin (patrz rys. 89), wypływających ze skraplacza. Ta metoda jest o wiele dokładniejsza, gdyż ustalenie poziomu skroplin i utrzymanie go w skraplaczu w tej samej wysokości, jest łatwe a nawet popełnienie tu pewnej niedokładności pociąga bardzo mały błąd, stąd okres badania w tym wypadku może być krótszy, przy stanie równowagi układu już po godzinie można otrzymać dokładne wyniki. Odwrotnie jak przy metodzie poprzedniej należy tu uwzględnić w rachunku ilości skroplin, które mogły się wydzielić podczas pracy maszyny po za zaworem głównym w obrębie cylindra i skraplacza oraz wziąć pod uwagę

nieszczelności w dławnicach, gdyż tych strat pary wydzielone ze skraplacza skropliny nie obejmują, więc należy je dodać.

Oznaczanie rozchodu pary przy pomocy wodomiarów, paromierzy i t. p. z powodu niepewności rezultatów, stosowane jest tylko do celów bieżącej kontroli ruchu.

Przy pomocy jednej z tych dwóch poprzednio opisanych metod dochodzimy do oznaczenia wartości G kg/h t. j. ilości pary, która przeszła w jednej godzinie przez silnik, a podzieliwszy ją przez moc rzeczywistą lub indykowaną, otrzymamy odpowiednio rozchód pary na konia rzeczywistego $D_e = G/N_e$ lub indykowanego $D_i = G/N_i$.

Jakkolwiek pojęcie rozchodu pary na jednostkę mocy jest bardzo rozpowszechnione, jest ono jednak nieściśle albowiem nie uwzględnia jakości tej pary, co szczególnie przy parze przegrzanej ma duże znaczenie. Proponowane w swoim czasie wprowadzenie do celów porównawczych pojęcia pary normalnej, nie utrzymało się.

4. Wielkości charakterystyczne dla tłokowego silnika parowego.

Tak jak każda maszyna, tak i silnik parowy tłokowy posiada pewne współczynniki, których wartość charakteryzuje stan, jakość i warunki pracy maszyny. Do tych należą:

a) sprawność mechaniczna η_m , o której mowa była poprzednio, a która jest miarą oporów mechanicznych maszyny, związanych z ruchem tłoka w cylindrze, ruchem drąga tłokowego w dławnicach, poruszaniem mechanizmu rozrządczego, tarciami czopów w panewkach i t. p. Sprawność mechaniczna jest stosunkiem mocy rzeczywistej do mocy indukowanej.

b) sprawność ogólna η_o , wyrażająca stosunek pracy rzeczywiście otrzymanej z jednego kilograma pary na obwodzie koła rozprędogo do ciepła oddanego w silniku przez ten kilogram pary. Jeżeli więc rozchód pary o zawartości ciepła i , a wytworzonej z wody o temperaturze t_o na rzeczywistego konia godzinę jest D_e kg, to ponieważ 1 KWh jest równoważny

$$\frac{75 \cdot 60 \cdot 60}{427} = 632 \text{ kal},$$

a zużyto na to $D_e (i - t_o)$ kal, więc sprawność ogólna

$$\eta_o = \frac{632}{D_e (i - t_o)}.$$

Wielkość ciepła całkowitego pary odczytuje się dla danej temperatury, ciśnienia czy stopnia wilgotności z wykresów IS. W braku tych wykresów oblicza się z równań:

dla pary nasyconej $i = i' + xr$

dla pary przegrzanej $i = i'' + c_p (T - \vartheta)$

gdzie pod i' rozumieć należy ciepłik cieczy, r — ciepłik parowania, i'' — ciepłik całkowity pary suchej, ϑ — temperaturę nasycenia pary, T — temperaturę przegrzania °C, x — wilgotność (suchość) pary i c_p — średnie ciepło właściwe pary przegrzanej. Wartości na i' , r , i'' , odczytuje się z odpowiednich tablic, zaś c_p jako zmienne i zależne zarówno od temperatury, jak i od ciśnienia, obliczyć najlepiej z następującej tablicy jako wartość średnią dla danej różnicy temperatur czy ciśnień.

Wartość średniego ciepła właściwego pary wodnej

$p = \text{at abs}$	1	2	6	10	12	14	16	20	30
$\vartheta = \text{temp. nasyc.}$	99,1	119,6	158,1	179,1	187,1	194,1	200,1	211,1	232,3
$T = 120^\circ \text{C}$	0,481	—	—	—	—	—	—	—	—
140	0,478	0,494	—	—	—	—	—	—	—
160	0,476	0,490	—	—	—	—	—	—	—
180	0,474	0,487	0,538	—	—	—	—	—	—
200	0,473	0,485	0,530	0,584	0,615	0,653	—	—	—
220	0,473	0,483	0,524	0,570	0,596	0,625	0,667	0,733	—
240	0,472	0,482	0,519	0,559	0,581	0,606	0,631	0,689	0,893
260	0,472	0,481	0,515	0,551	0,570	0,590	0,611	0,658	0,805
280	0,472	0,480	0,512	0,544	0,562	0,579	0,597	0,639	0,751
300	0,473	0,480	0,510	0,539	0,555	0,570	0,585	0,610	0,714
320	0,473	0,480	0,508	0,535	0,548	0,563	0,577	0,601	0,686

Wartość x , wyrażająca ilość suchej pary zawartej w 1 kg pary wilgotnej albo przyjmuje się, gdyż wartość ta, w warunkach przeciętnych przy krótkich przewodach i dobrym odwodnieniu przed maszyną, waha się zazwyczaj w granicach od 0,94 — 0,99, albo oznacza się przy pomocy kalorymetru przez dławienie próbki pary

Działanie tego kalorymetru polega na tem, że próbkę pary odprowadza się z przewodu parowego bezpośrednio przed maszyną przez wentyl i małeńki otworek do właściwego kalorymetru, gdzie się mierzy jej temperaturę i ciśnienie (patrz rys. 90). Podczas przepływu przez ten mały otwór ciśnienie pary opada dzięki zjawisku dławienia, natomiast następuje jej osuszenie, a w końcu przegrzanie się.

Ponieważ proces dławienia w przybliżeniu jest przemianą, podczas której $i = \text{const}$, więc

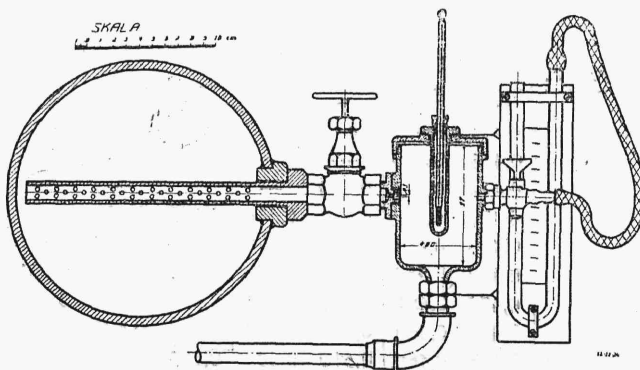
$$\text{stad} \quad i_q' + xr = i_o'' + c_p (T_o - \vartheta_o)$$

$$x = \frac{i_o'' + c_p (T_o - \vartheta_o) - i'}{r}$$

Wielkości z indeksem zero odnoszą się do stanu pary zdławionej, bez indeksu — do stanu pary świeżej, przyczem T_0 oznacza temperaturę pary po przegrzaniu w $^{\circ}\text{C}$, odczytaną na termometrze zanurzonym w kalorymetrze, ϑ_0 — temperaturę nasycenia, odpowiadającą ciśnieniu absolutnemu po zdławieniu pary.

Kalorymetr ten nadaje się do oznaczania wilgotności pary tylko w tych wypadkach, gdy jest ona dosyć suchą, gdyż przy dużej wilgotności para w tym przyrządzie może się nie przegrzać. Całość tego urządzenia powinna być doskonale² otulona azbestem w celu zapobieżenia stratom

LABORATORIUM MASZYN POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
KALORYMETR DO OZNACZANIA WILGOTNOŚCI PARY



Rys. 90.

cieplnym, gdyż tylko wówczas, gdy nic ciepła nie ujdzie nazewnątrz, równanie ostatnie da dokładniejsze wyniki.

Niekiedy to samo, co przez liczbę względną, jaką jest sprawność ogólna, wyrażane jest w innej formie przez liczbę bezwzględną, mianowicie silnik oceniany jest z ilości kalorii, których dostarczyć potrzeba w postaci pary, aby wytworzyć moc jednego koniagodziny czyli

$$D_e (i - t_0) \text{ kal/KMh.}$$

Sprawność ogólna ma znaczenie przy ocenie kosztów ruchu i opartej na tem kalkulacji, jednak, charakteryzując tylko ogólnie silnik, nie wskazuje powodu, dla którego ten współczynnik ma tą lub inną wartość.

Pewnem uzupełnieniem tej wielkości jest t. zw.:

c) sprawność indykowana lub wewnętrzna. Jest to stosunek pracy AL_i otrzymanej w cylindrze z 1 kg pary, do pracy AL_t , jaką by ten kilogram pary wykonał w cylindrze silnika doskonałego. Wielkość ta

$$\eta_i = \frac{AL_i}{AL_t}$$

charakteryzuje nam straty wynikłe z niedoskonałości pod względem cieplnym silnika rzeczywistego.

Znając rozchód pary D_i kg/KMh, obliczamy pracę odpowiadającą 1 kg pary, jaką by ten kilogram pary wykonał w cylindrze, ze związku

$$632 = AL_i \cdot D_i$$

czyli

$$AL_i = \frac{632}{D_i}.$$

Pracę teoretyczną 1 kg znaleźć najdogodniej z wykresu IS , odmierzając na pionowej (rys. 91) odcinek, odpowiadający punktom przecięcia się adiabaty z izobarami, między którymi pracuje silnik, przy uwzględnieniu wilgotności lub przegrzania pary, albo ze związku

$$AL_t = i - i_0$$

przyczem i dane jest przez stan pary przed silnikiem, więc przez wilgotność pary, a wówczas

$$i = i' + xr$$

albo przez jej przegrzanie, a więc

$$i = i'' + c_p (T - \vartheta).$$

Wielkość i_0 , przedstawiającą ciepłok całkowity pary po adiabatycznym jej rozprężeniu się do ciśnienia p_0 w silniku doskonałym, znaleźć można, oznaczając wartość na x_0 z równania adiabaty dla pary nasyconej:

$$s' + \frac{xr}{T} = s'_0 + \frac{x_0 r_0}{T_0}.$$

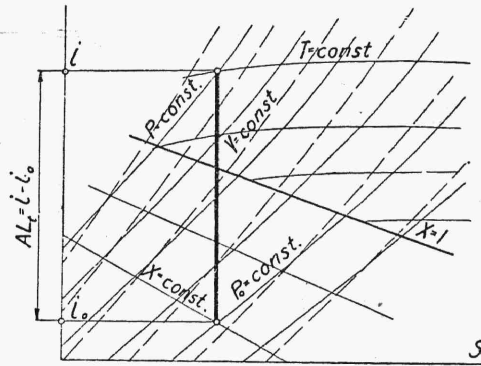
Dla pary przegrzanej:

$$AL_t = i'' + c_p (T - \vartheta) - i'_0 - (s' - s'_0) T_0 - (s - s'') T_0 - r \frac{T_0}{T} {}^1)$$

przyczem indeksy mają takie same znaczenie, jak poprzednio.

Obliczywszy w ten sposób wielkość AL_i oraz AL_t znajdziemy wielkość η_i , która pozwala nam wyciągnąć słuszne wnioski o wartości konstrukcyjnego silnika pod względem cieplnym, gdyż właśnie różnica $(AL_t - AL_i)$ wywołana jest przez straty ciepłne w obrębie cylindra.

Wielkość ta może być także przedstawiona w postaci stosunku mocy indykowanej N_i do mocy teoretycznej silnika N_t



Rys. 91.

¹⁾ B. Stefanowski. Termodynamika techniczna. 1923. str. 229

$$\eta_i = \frac{N_i}{N_t}.$$

d) Sprawność teoretyczna jest miarą strat, które nawet w doskonałym silniku będą mieć miejsce, jest to więc wielkość ważna przy porównywaniu silników o dużym przegrzaniu z silnikami na parę nasyconą, silników ze skraplaczem z silnikami z przeciwpężnością.

Sprawność teoretyczna jest stosunkiem pracy, dającej się osiągnąć w silniku doskonałym do ciepła włożonego w parę przed maszyną, więc:

$$\eta_t = \frac{AL_t}{i-t_0}.$$

Zestawiając te wszystkie współczynniki otrzymamy zależność na sprawność ogólną silnika:

$$\eta_0 = \frac{AL_e}{i-t_0} = \frac{AL_e}{AL} \cdot \frac{AL_i}{AL_t} \cdot \frac{AL_t}{i-t_0} = \eta_m \cdot \eta_i \cdot \eta_t.$$

e) Stopień pełnoty jest to stosunek sumy pól scalonych (zrankinizowanych) wykresów indykatora do pewnego pola porównawczego. Przy określaniu mocy silników parowych wielostopniowych (compound) przez indykowanie otrzymujemy wykresy pracy poszczególnych cylindrów w różnych podziałkach ciśnień i objętości. Różne podziałki pochodzą stąd, że staramy się, by one, ze względu na dokładność, były możliwie największe, a ponieważ bębni indykatorów są jednakie, zaś objętości cylindrów i ciśnienia tam panujące w każdym ze stopni są różne, więc musimy wykres każdego z cylindrów kreślić w różnych podziałkach. Wprawdzie tak otrzymane wykresy pozwalają ocenić moc i sposób pracy każdego z cylindrów, lecz obrazu pracy całego silnika nie dają. Aby otrzymać taki właśnie obraz pracy pary w cylindrach kreślimy wykresy indykatora, jednocześnie zdjęte we wszystkich cylindrach, we wspólnej podziałce ciśnień i objętości.

W tym celu dzielimy pola wykresów, zdjętych indykatorem jednocześnie, na pewną ilość, np. 10 pasków (rys. 92), a odpowiadające tym punktom podziału ciśnienia p_x i p'_x oraz p_y i p'_y , wykreślone w podziałkach np. 1 at = a mm i 1 at = b mm, odcinamy na nowym wykresie w jednakowej, dowolnie obranej podziałce np. 1 at = c mm, licząc ciśnienia oczywiście od linii atmosfery. Podziałkę objętości obieramy również dowolnie np. 1 dcm³ = m mm. Tak otrzymany wykres zwie się s c a l o n y m lub z r a n k i n i z o w a n y m.

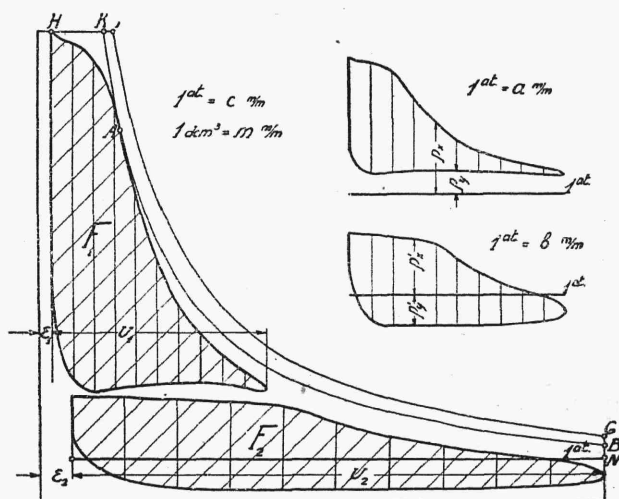
Wykres zrankinizowany daje możliwość oceny sposobu pracy pary w silniku. Jeżeli poprowadzimy przez punkt A (rys. 92), jako początek roz-

prężania się pary, politropę, odpowiadającą linii rozprężania się pary w cylindrze, więc np. dla pary nasyconej $Pv = \text{const}$, to linja ta AB w stosunku do pola F_2 zobrazuje nam straty wskutek skraplania się pary w przelotni oraz w cylindrze niskoprężnym. Jeżeli przelotnie ogrzewamy, to straty te mogą zniknąć albo nawet pole F_2 może przeciąć linję AB , jeżeli zaś pobieramy z przelotni parę do celów ogrzewniczych, to straty te będą większe i linja AB będzie od pola F_2 bardziej odsunięta. Stosunek powierzchni pól ($F_1 + F_2$) do wykresu teoretycznego F , zawartego pod linją KB nazywamy stosunkiem pełnoty:

$$\xi = \frac{F_1 + F_2}{F}.$$

Chcąc otrzymać w wykresie zrankinizowanym obraz strat pary przez skraplanie się także w cylindrze wysokoprężnym, musimy porównać wykres otrzymany przez scalanie z wykresem teoretycznym, ograniczonym linią FG , wykreśloną jako politropa dla ilości pary rzeczywiście do cylindra doprowadzonej na 1 skok.

Wykresy zrankinizowane powinny być rysowane z wykresów indykatora, zdjętych podczas okresu zupełnej równowagi silnika, kiedy obciążenie było stałe i wszystkie wielkości charakterystyczne nie ulegały zmianom.

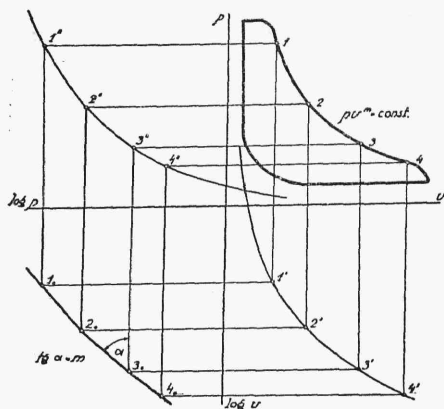


Rys. 92.

Z tego wykresu można również obliczyć napełnienie zredukowane, t. j. stosunek objętości pary świeżej, doprowadzanej na każdy skok do cylindra — do objętości końcowej. Popełniamy tu jednak świadomie pewną nieścisłość, mianowicie za objętość pary przyjmujemy nie objętość rzeczywiście do cylindra wysokoprężnego doprowadzoną, względnie istotną objętość pary w cylindrze niskoprężnym, ale objętości pokazane na wykresie i przedstawione odcinkami HK i $V_2 = MN$. Napełnienie zredukowane będzie więc $\epsilon_r = HK/MN$.

f) Wykładnik krzywej rozprężania się pary. Wielkością charakterystyczną dla przebiegu zamiany ciepła na pracę podczas rozpręż-

zania się pary w cylindrze jest wartość wykładnika krzywej w układzie PV . Przyjmujemy ją jak politropę, t. j. krzywą o równaniu $Pv^m = \text{const}$, o wykładniku $m = \text{const}$. (dla pary nasyc. $m = 1,0$, dla pary przegrz. $m = 1,1 - 1,3$).



Rys. 93.

Z wielkości więc tego wykładnika sądzić można o stanie pary i charakterze przemiany. Poza tym przy normalnych nawet, pod względem cieplnym, warunkach pracy pary w cylindrze, przy nieszczelności tłoka lub organów rozrządzących wykładnik wykazuje zmianę swej wartości czyli odwrotnie, z jego wartości sądzić można o stanie szczelności cylindra.

Wobec zmienności wykładnika najlepiej jego wartość oznaczać wykreślnie metodą „logarytmik” przez przedstawianie politropy w układzie logarytmicznym przy pomocy dwóch logarytmik 1'—4' oraz 1—4' (rys. 93).

Logarytmując wykreślnie ciśnienia i objętości poszczególnych punktów krzywej rozprężania lub sprężania otrzymujemy nowy szereg punktów 1—4 wykreślonych w skali logarytmicznej, które połączone dadzą linię. Tangens jej kąta nachylenia do osi rzędnych daje wykładnik m ¹⁾.

5. Bilans ciepła parowego silnika.

Chcąc otrzymać obraz zużytkowania ciepła, dostarczonego do silnika, ustala się drogą pomiarów t. zw. bilans cieplny silnika, t. j. cyfrowe wartości poszczególnych pozycji, na które rozdziela się doprowadzone ciepło; doprowadzamy do silnika ciepło w postaci pary, zaś odprowadzamy w postaci energii mechanicznej, wywiązanej w cylindrze, w postaci ciepła uchodzącego do skraplacza i t. d.

Wyobrażając sobie schematycznie maszynę parową na rys. 94, możemy strzałkami oznaczyć poszczególne pozycje ciepła: doprowadzamy ciepła w parze i kcal/kg oraz w formie tarcia C_1 , odprowadzamy AL_i jako pracę mechaniczną, C_2 na promieniowanie oraz i_0 kcal/kg do skraplacza. Pracę indykowaną możemy wyrazić jako:

$$AL_i = \frac{632}{D_i},$$

gdzie przez D_i oznaczamy rozchód pary na 1 KMh .

¹⁾ B. Stefanowski. Termodynamika techniczna. 1923. str. 109.

Bilans ciepła wyrazi się równaniem:

$$i = \frac{632}{D_i} + i_o + (C_1 + C_2).$$

Dla pary nasyconej i określa się ze związku:

$$i = i' + x(i'' - i') = i' + xr,$$

zaś dla pary przegrzanej:

$$i = i'' + c_p (t - \vartheta),$$

przyczem $t > \vartheta$, a ϑ jest temperaturą nasycenia.

Wartość i_o zależy od x_o , gdy para uchodzi do skraplacza jako nasycona, wówczas

$$i_o = i'_o + x_o (i''_o - i'_o) = i'_o + x_o r_o$$

albo od t_o , gdy para uchodzi z cylindra jako przegrzana czyli

$$i_o = i''_o + c_p (t_o - \vartheta_o).$$

W tym drugim wypadku zmierzenie temperatury przegrzania t_o oraz ciśnienia p_o wystarcza do określenia i_o , podczas gdy dla wypadku pary nasyconej znaleźć można i_o drogą pośrednią, choćby mierząc ilość wody użytej do skraplania pary w skraplaczu G_o i jej ogrzanie się $(t'' - t')$

$$i_o = G_o (t'' - t').$$

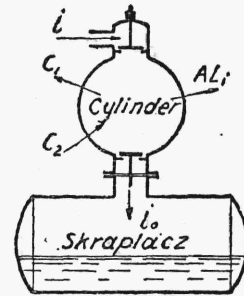
Wyraz $(C_1 + C_2)$ łączy w sobie także błędy pomiaru i pozostaje jako reszta.

Zestawiając bilans silnika parowego, posiadającego cylinder parowy z ogrzewkiem (rys. 95), należy mieć na uwadze, że z doprowadzonego do silnika 1 kg pary do cylindra dostaje się tylko φ , zaś do ogrzewka μ , przyczem przyjmujemy

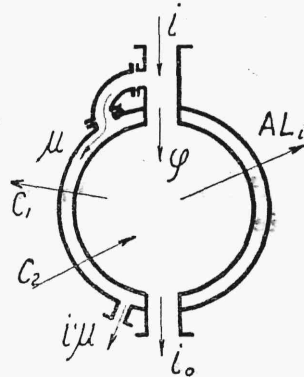
$$\varphi + \mu = 1$$

wobec tego bilans przedstawi się jako

$$i = \frac{632}{D_i} + \varphi i_o + \mu i' + (C_1 + C_2)$$



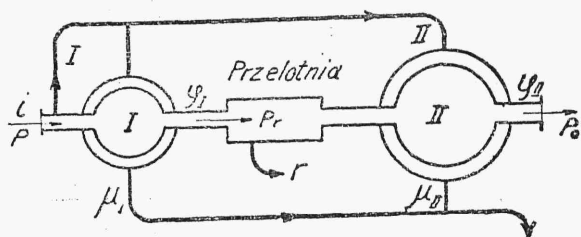
Rys. 94.



Rys. 95.

gdzie $\mu i'$ oznacza ilość ciepła odprowadzoną z ogrzewka ze skroplinami.

Bilans silnika dwustopniowego (compound) przedstawi się podobnie (rys. 96), a mianowicie, jeżeli oznaczymy ilość



Rys. 96.

jeżeli oznaczymy ilość pary wchodzącej do cylindra wysokoprężnego (I) przez φ_I , do niskoprężnego (II) przez φ_{II} , do ogrzewków odpowiednio przez μ_I i μ_{II} , wreszcie tarcie i promieniowanie przez $C_1 = C_I + C_{II}$ oraz $C_2 =$

$C'_I - C'_{II}$, przez ν ilość skroplin, odprowadzonych z przelotni, to otrzymamy bilans w postaci równania:

$$i = AL_{iI} + AL_{iII} + \varphi_{II} i_o + (\mu_I + \mu_{II}) i' + \nu i'_r + (C_1 + C_2)$$

przytem

$$AL_{iI} = \frac{632}{D_{iI}} \quad \text{zaś} \quad AL_{iII} = \frac{632}{D_{iII}}$$

gdzie

$$D_{iI} = D_i \frac{N_i}{N_I} \quad \text{oraz} \quad D_{iII} = D_i \frac{N_i}{N_{II}}$$

Przez N_I i N_{II} oznaczona jest tu moc obu cylindrów oddzielnie tak, że

$$N_i = N_I + N_{II}.$$

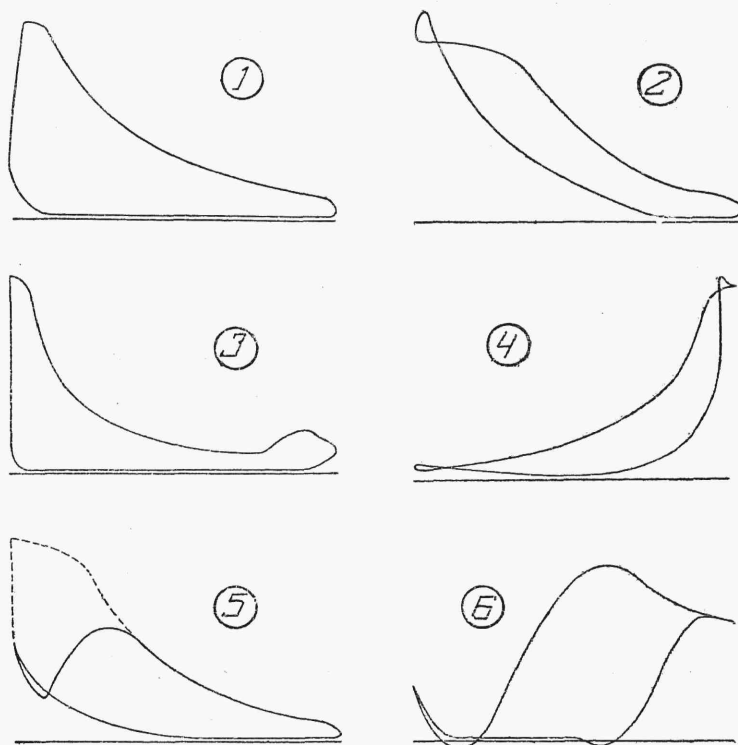
6. Badanie stanu silnika z wykresów indykatora.

Wykres indykatora służy nie tylko do oznaczenia mocy silnika, ale także do jego oceny jakościowej pod względem działania organów rozrządczych, co w inny sposób da się tylko z trudnością wykonać, oraz do oceny zachowania się silnika przy zmianie obciążenia.

Wykres indykatora użyty do celu musi być nakreślony prawidłowo, t. zn. indykator dawać powinien proporcjonalne odchylenia rysika do zmiany prężności i objętości; sposób kreślenia wykresu oraz zamocowanie indykatora powinno być bez błędu (Patrz str. 99).

Gdy już jest pewność, że otrzymane wykresy są nakreślone przez indykator poprawnie, mogą one posłużyć do oceny sposobu pracy organów

rozrządczych. Linje dwóch wykresów, zdjętych jednocześnie z obu stron tłoka, a położonych odwrotnie na sobie i rozpatrywanych pod światło, powinny się w przybliżeniu pokrywać, w przeciwnym wypadku będzie to dowodem nierównomiernego obciążenia obu stron tłoka. Niesymetryczność wykresów można w pewnych granicach usunąć przez odpowiednie nare-



Rys. 97.

gulowanie stawideł. Niekiedy niesymetryczność wywołana jest nieszczelnością zaworów po jednej ze stron cylindra.

Porównując kształt wykresu normalnego ze zdjętym z badanego silnika i analizując różnicę, można wykryć powody nieprawidłowości przebiegu poszczególnych części wykresu. Trudno tutaj podać wszystkie powody zniekształcenia wykresów indykatora, gdyż są one liczne i różne, a niekiedy oddziałują jednocześnie kilka czynników, pozatem odgrywa tu rolę także i właściwość stawidła.

Dla ogólnej orientacji podaję tu kilka przykładów nieprawidłowych wykresów parowego silnika tłokowego, zebranych na rys 97. Wykres 97/1 wykazuje zbyt łagodny wzrost ciśnienia, co świadczy, że należy przyspieszyć przedzwrotowy wlot pary. Na wykresie 97/2 widać zbyt duże spręża-

nie, większe od ciśnienia dolotowego, dzięki czemu tworzy się pętla o pracy ujemnej. Na wykresie 97/3 wskutek złego nastawienia suwaka ma miejsce powtórny dopływ pary przy końcu rozprężania. Wykres 97/4 daje obraz wpływu opóźnionego wylotu przedzwrotowego i zbyt małego przekroju wylotowego. Na wykresie 97/5 widać wpływ bardzo spóźnionego wlotu pary. Wykres 97/6 daje obraz zmian ciśnienia w cylindrze przy złym nastawieniu względem korbowego wału głównego kąta mimośrodów poruszających organa rozrządcze, dzięki czemu poszczególne okresy są przesunięte i silnik pracuje wysoce wadliwie.

Przykład.

Badanie maszyny parowej o potrójnem rozprężaniu.

Czas trwania pomiaru $2h\ 5' = 125'$

Obciążenie elektryczne jednostajne

Temperatura otoczenia 23°C

Sprawność prądnic $\eta_{el} = 0,90$

Ciśnienie barometr. $763,4\text{ mm Hg}$

Silnik posiada skraplacz powierzchniowy.

Wszystkie trzy cylindry i obie przelotnie ogrzewane są parą świeżą.

Wymiary cylindrów:

	I	II	III
średnice	$D = 250$	375	550 mm
skok tłoka	$s = 500$	500	650 mm
średnica tłoczyska	$d = 50$	65	65 mm
stosunek objętości cylindrów	1 : 2,227 : 6,332		

Otrzymane średnie wyniki pomiaru były następujące:

	Cylinder I	Cylinder II	Cylinder III	Wylot do skraplacza
Ciśnienie użyteczne	6,57	1,91	0,93	— 0,948
Ciśnienie absolutne	7,605	2,945	1,965	0,087
Temperatura pary $t\ ^{\circ}\text{C}$	284,1	156,1	132,4	56,6
Temperatura nasycenia ϑ°	167,0	132,2	119,0	39,6
Przegrzanie $(t - \vartheta)$	116,5	24,9	13,4	19,0
Średnie ciśnienie indykowane:				
od strony korby	2,53	1,25	0,549	—
od strony dna	2,16	1,32	0,430	—
Średnie ciśnienie indykowane zredukowane na objętość cylindra niskoprężnego p_{ir}	0,370	0,407	0,4895	—

Zużytkowano na pracę mechaniczną:

$$632 \text{ kal} \quad - \quad 11,3\%$$

Stracono: a) na opory mechaniczne:

$$\frac{(1 - \eta_m) 632}{\eta_m} = 122 \text{ kal} \quad - \quad 2,2\%$$

b) w skraplaczu:

$$\frac{G_o (t'' - t')}{N_e} = 4380 \text{ kal} \quad - \quad 78,7\%$$

c) promieniowanie, przewodzenie i t. p.:

$$466 \text{ kal} \quad - \quad 7,8\%$$

$$\text{Razem } 5600 \text{ kal} \quad 100\%$$

III. Badanie turbin parowych.

Jakkolwiek zasada działania pary na wirnik jest odmienna, niż na tłok maszyny parowej, przecież sposób badania obu rodzajów silników parowych jest bardzo podobny, a również i ich wielkości charakterystyczne są bardzo do siebie zbliżone z tą tylko różnicą, że wobec trudności oznaczenia mocy na obwodzie wirnika, analogicznej do mocy indykowanej, wszystkie charakterystyczne liczby stosunkowe i bezwzględne odnosi się do mocy rzeczywistej turbiny, a nawet do mocy elektrycznej zespołu turbina - prądnica, co daje się łatwo zmierzyć na drodze elektrycznej, albo do mocy turbosprężarki i tu wyraża się je niekiedy w odniesieniu do ilości m^3 sprężanego powietrza (m^3/kWh). Pozatem, wobec tego, że silniki parowe wirnikowe służą do napędu prądnic, moc ich wyraża się przeważnie w kW , co w dziedzinie silników tłokowych ma miejsce dotąd stosunkowo rzadko. Wreszcie charakterystyczne jest dla turbiny stosowanie skraplacza powierzchniowego, jako pozwalającego lepiej wyzyskać próżnię i zachować skropliny do zasilania kotła; ma to również wpływ na metodę badania turbin parowych.

Wobec nieposiadania dla turbin podobnie dogodnego obrazu pracy, jakim jest wykres indykatora dla maszyny tłokowej, ważną bywa również rzeczą zbadanie pośrednie mocy maksymalnej turbiny.

Turbina pracując z reguły ze skraplaczem powierzchniowym i posiadając przeważnie obciążenie elektryczne, którego zmienność daje się z łatwością obserwować i wyrównywać, nie wymaga tak długotrwałego okresu prób, jak przy oznaczaniu rozchodu przez pomiar ilości wody dostarczanej do kotła zasilającego silnik tłokowy. Jeżeli jest dostateczny stan równowagi, jeżeli masy metalu w turbinie są równomiernie nagrzane i tempe-