ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 19 ENERGETYKA Z. 3 1958

CZESŁAW GRACZYK
Katedra Pomiarów Maszyn Cieplnych

PROJEKT KALORYMETRU PAROWEGO NOWEGO TYPU

Przy wykonywaniu badań cieplnych,kondensacyjnych turbin parowych zachodzi potrzeba wyznaczenia stopnia suchości pary w króćcu wylotowym turbiny. Dławiący kalorymetr parowy można wprawdzie przystosować do pomiaru stosunkowo niskiej wartości stopnia suchości pary o dużym podciśnieniu, wymaga to jednak wielu dodatkowych urządzeń pomiarowych. W artykule przedstawiono zasadę działania prostego w konstrukcji kalorymetru parowego, który mógłby znaleźć zastosowanie do pomiaru pary wylotowej turbin z kondensacją.

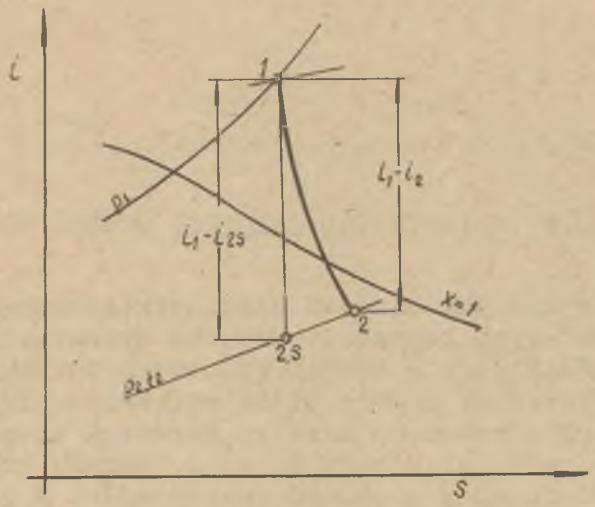
1. Wstęp

Badania cieplne turbin parowych mają na celu między innymi ustalenie sprawności wewnętrznej charakteryzującej stan ołopatkowania wirnika, stan uszczelnień międzystopniowych, działanie regulacji itd. Wyznaczenie sprawności wewnętrznej η_i kondensacyjnych turbin parowych (rys. 1) napotyka w praktyce na znaczne trudności, mimo że wzór określający sprawność [1] jest prosty

$$\eta_i = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2s}} \tag{1}$$

gdzie:
i_1 - właściwa entalpia pary przy dolocie do turbiny,
i_2 - właściwa entalpia pary przy wylocie z turbiny,
i_{2s} - właściwa entalpia pary wylotowej po rozprężeniu izentropowym w turbinie doskonałej.

Trudności ustalenia entalpii i_2 spowodowane są brakiem odpowiedniej metody pomiaru stopnia suchości x_2 pary przy dolocie do kondensatora.



Rys. 1. Przebieg ekspansji rzeczywistej oraz izentropowej w kondensacyjnej turbinie parowej, przedstawiony w układzie (i,s)

Dla wyznaczenia entalpii i_2 można w zasadzie posłużyć się kalorymetrem dławiącym [2], [3], lecz wymaga to uzupełnienia przyrządu. Należy do niego dołączyć separator wilgoci, dwie chłodnice, dwa naczynia do zbierania kondensatu, wagę, urządzenie do wytwarzania wysokiej próżni itd. Wszystkie te dodatkowe urządzenia komplikują znacznie pomiar, którego wyniki wskutek tego obarczone są dużym błędem [4].

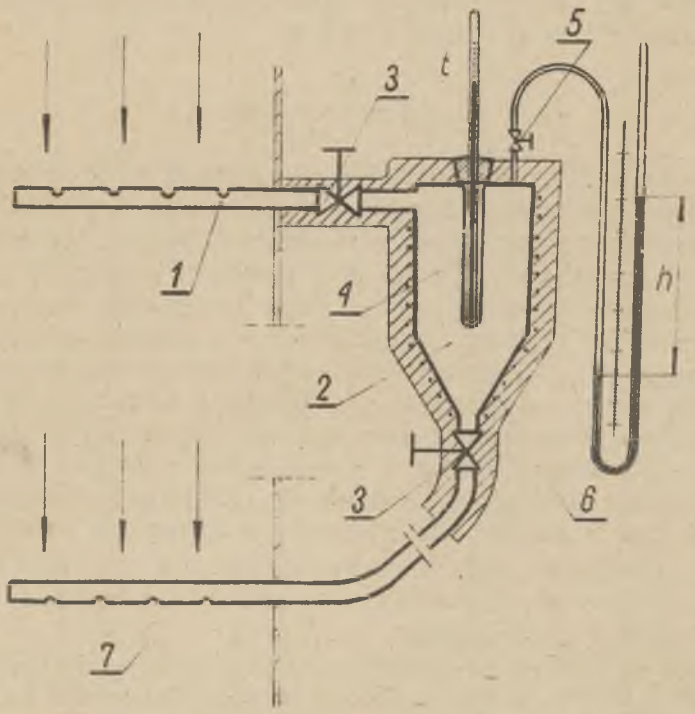
Wobec tych (i innych) trudności, w praktyce częściej używane są dwie metody wyznaczania entalpii i_2, oparte na bilansie cieplnym. Pierwsza z nich polega na sporządzeniu bilansu cieplnego kondensatora. Podług metody drugiej do sprawności wewnętrznej turbiny dochodzi się przez pomiar mocy elektrycznej na zaciskach generatora, pomiar sprawności elektrycznej generatora oraz sprawności mechanicznej zespołu turbina-generator. Obydwie metody są żmudne i dają wyniki obarczone również dużymi błędami, przy czym dokładniejsze wyniki zapewnia sposób drugi [4].

W artykule niniejszym przedstawiono zasadę działania kalorymetru parowego nowego typu, który z powodzeniem może być użyty do pomiaru stopnia suchości pary nasyconej, w króćcu wylotowym turbiny.

2. Zasada działania

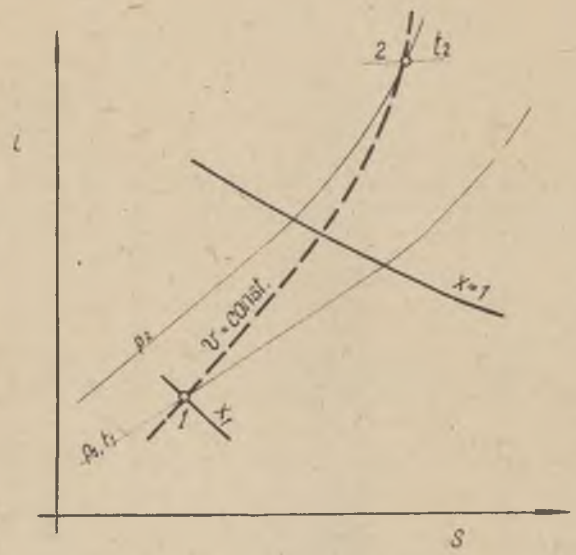
Na rysunku 2 przedstawiono schemat projektowanego kalorymetru parowego. Rurka 1 zabudowana w króćcu wylotowym turbiny służy do poboru próbki pary. Dla wtłoczenia pary wykorzystuje się tu jej znaczną prędkość (około 80 ÷ 100 m/sec i więcej) [5]. Para przepływa zaizolowanym przewodem do również zaizolowanego naczynia kalorymetrycznego. 2. Naczynie jest wyposażone w dwa sprzężone ze sobą kurki odcinające 3, tulejkę termometru 4, końcówkę dla podłączenia manometru 5 oraz grzejnik elektryczny 6. Przez rurkę 7 zabudowaną również w króćcu wylotowym turbiny para powraca do głównego strumienia. Odwrotne jak w rurce 1 usytuowanie otworków względem kierunku przepływu pary zwiększa różnicę ciśnień przed i za kalorymetrem i powoduje zwiększenie natężenia przepływu pary przez upust.

Przy obsłudze kalorymetru obowiązuje następująca kolejność. Przez otwarcie kurków odcinających należy umożliwić przepływ pary przez kalorymetr, aż do momentu ustalenia się równowagi cieplnej przyrządu. Po ustaleniu równowagi cieplnej odczytuje się temperaturę t_1 °C i ciśnienie h_1 Tr w kalorymetrze. Przekręcając równocześnie oba kurki odcinające zamyka się w naczyniu kalorymetrycznym pewną ilość pary o parametrach t_1 , h_1 poprzednio zmierzonych. Z kolei parę zawartą w naczyniu podgrzewa się grzejnikiem elektrycznym, aby uzyskać parę przegrzaną. Po wyłączeniu grzejnika elektrycznego i powtórnym ustaleniu się stanu równowagi cieplnej dokonuje się odczytu temperatury t_2 i ciśnienia h_2 . Przemiana od stanu 1 do 2 przebiega izochorycznie (v = idem). Na rysunku 3 przedstawiono tę przemianę w układzie (i, s). Znając z pomiaru parametry t_2 , h_2 , określające punkt 2 oraz jeden z parametrów t_1 lub h_1 można wyznaczyć położenie punktu 1 na wykresie (i, s), na przecięciu izobary h_1 (izotermy t_1) z izochorą przechodzącą przez punkt 2. W punkcie 1 odczytuje się stopień suchości x_1 pary.



Rys. 2. Schemat kalorymetru parowego 1,7 - rurki poboru pary, 2 - naczynie kalorymetryczne, 3 - zawory odcinające, 4 - tulejka termometru, 5 - końcówka na manometr, 6 - grzejnik elektryczny

Posługiwanie się wykresem (i,S) jest jednak utrudnione z powodu przecinania się izobary z izochorą pod stosunkowo małym kątem. Zmniejsza to znacznie dokładność uzyskanego wyniku. Dlatego zaleca się wyznaczać stopień suchości pary x_1 analitycznie, stosując dla pary przegrzanej o niskim ciśnieniu równanie Clapeyrona słuszne dla gazów doskonałych.



Rys. 3. Izochoryczne podgrzewanie pary

Z warunku stałej objętości wynika zależność następująca

$$v'_1 + x_1 \cdot (v''_1 - v'_1) = R \cdot \frac{T_2}{P_2} \qquad (2)$$

gdzie:

x_1 - mierzony stopień suchości pary,

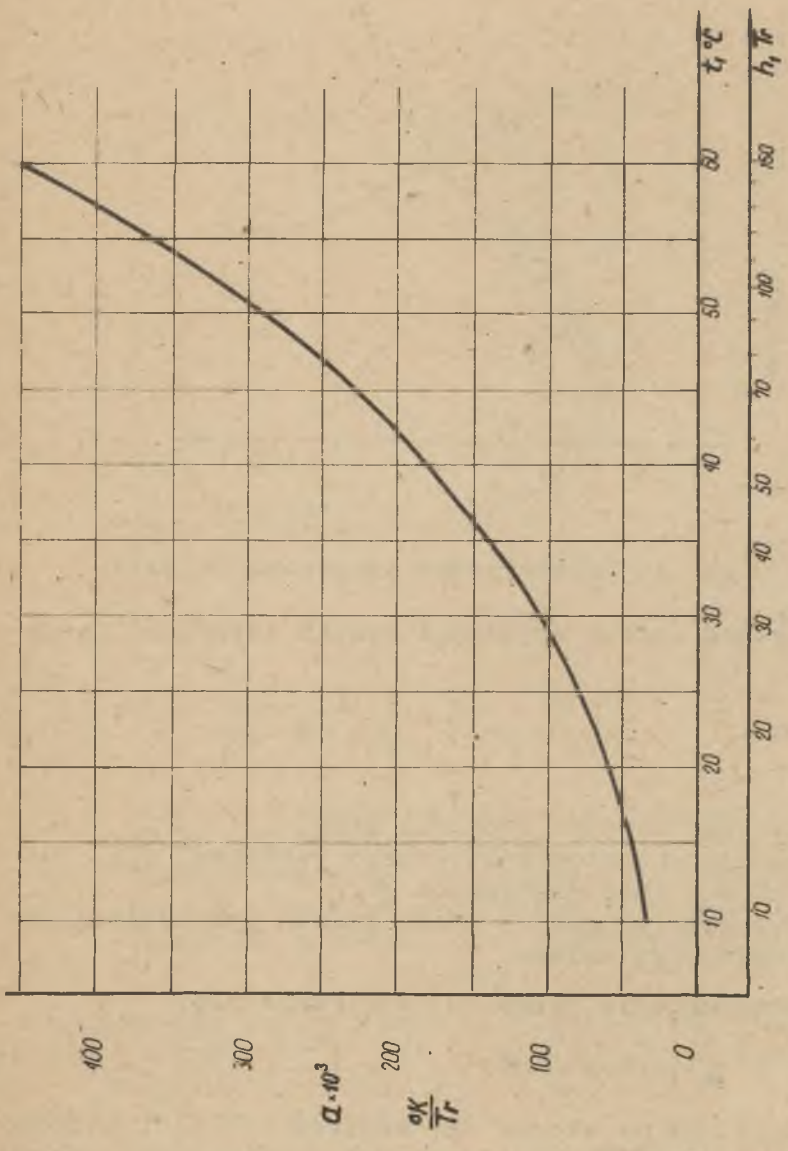
v''_1, v'_1 - graniczne wartości objętości właściwej dla $x = 1$ i $x = 0$ pod ciśnieniem P_1,

$R = 47{,}1$ kGm/(kg grd) - stała gazowa pary wodnej pod niskim ciśnieniem.

Po przekształceniu wzoru (2) otrzymuje się:

$$x_1 = \left(\frac{R \cdot T_2}{P_2} - v'_1\right) \cdot \frac{1}{v''_1 - v'_1} \qquad (3)$$

Występująca we wzorze (3) wielkość v'_1 jest znikomo mała ($v' = 0{,}001$ m^3/kg) i można ją pominąć bez wpływu na dokładność obliczeń. Ponadto, ze względu na stosowany przy pomiarze manometr rtęciowy, wygodniej jest ciśnienie wyrażać w torach. Wówczas równanie (3) przyj-



Rys. 4. Wykres zależności współczynnika α od parametrów t lub h_1 pary nasyconej

muje następującą postać, dogodną dla obliczeń praktycznych:

$$x_1 = a \cdot \frac{273 + t_2}{h_2} \qquad (4)$$

gdzie:

$$a = \frac{R}{13{,}6\ v_1''} \qquad (5)$$

W tabeli 1 oraz na wykresie 4 przedstawiono wartości współczynnika a w zależności od jednego z parametrów pary mokrej t_1 lub h_1.

Tabela 1

Współczynnik a
w zależności od temperatury t_1 i ciśnienia h_1

t_1 °C	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
h_1 Tr	9,2	12,8	17,5	23,6	31,8	42,2	55,3	71,9	92,5	118,1	149,3
$a \cdot 10^3 \frac{Tr}{grd}$	32,6	44,5	59,8	79,8	105,2	137,4	177,1	226,5	287,5	361,5	451,0

3. Wnioski

Opisany kalorymetr parowy jest w zasadzie przeznaczony do pomiaru pary o ciśnieniu niższym od 1 at a, jakkolwiek może być również stosowany przy ciśnieniach wyższych. Jego dokładność w zakresie ciśnień mniejszych od 1 at a jest większa aniżeli dokładność kalorymetru dławiącego. Główną przyczyną błędu będzie przypuszczalnie osadzanie się filmu wodnego na ściankach naczynia kalorymetrycznego. Aby temu zapobiec, wypolerowane ścianki naczynia powinny posiadać na początku pomiaru tę samą temperaturę, co para mokra lub nawet nieco wyższą. Można by również spróbować powlec ścianki naczynia kalorymetrycznego lakierem silikonowym, przeciwdziałającym osadzaniu się wilgoci. Oddzielnym problemem byłoby zagadnienie wzorcowania kalorymetru dla wyznaczenia poprawek. Duże trudności wystąpiłyby tu przy budowie urządzenia do wytwarzania i namierzania pary wodnej niskiego ciśnienia o określonym stopniu suchości.

Otrzymano 15 grudnia 1957 r.

BIBLIOGRAFIA

[1] S. Ochęduszko, Teoria maszyn cieplnych, cz. II, str. 89.

[2] Instrukcja obsługi kalorymetru dławiącego firmy Dobbies M. Innes L.T.D. Glasgow.

[3] W. Barnab, F, Ellenwood, C. Hirshfeld, Heat-Power Engineering, cz.I, str. 300 - 305.

[4] W. Sobotkowski, "Gospodarka węglem", nr 13 grudzień 1955 r., str. 270 - 276.

[5] В.П. Елизаров, Конденсационные устройства паровых турбин, ГЕИ 1951.