

Czesław Graczyk

Katedra Pomiarów Maszyn Ciepłych

Sprawdzanie szczelności stawideł maszyn parowych na podstawie wykresów indykatorowych

Dla kontroli szczelności stawideł maszyn parowych używana jest graficzna metoda Doerfla. Zasadniczą wadą wymienionej metody jest ograniczenie jej zastosowania tylko dla maszyn parowych zasilanych parą nasyconą. W pracy niniejszej podał autor sposób uogólniający metodę Doerfla również i na parę przegrzaną.

Wstęp

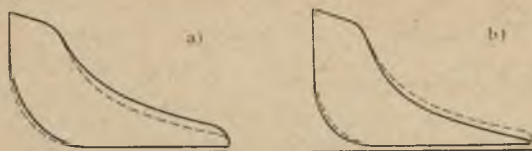
Maszyna parowa, historycznie pierwszy silnik cieplny, do dziś znajduje zastosowanie w mniejszych i większych zakładach przemysłowych (kopalnie, huty) w komunikacji lądowej, rzecznej i morskiej.

Stosunkowo niska sprawność efektywna maszyny parowej w porównaniu z innymi silnikami cieplnymi wyrównywana jest częściowo takimi zaletami jak prostota konstrukcji, długotrwałość działania, możliwość przeciążania oraz łatwość obsługi. W wyniku tych niewątpliwych zalet obsługa maszyny sprowadza się częstokroć jedynie do puszczenia w ruch, smarowania i zatrzymywania silnika. Jednakże, jak wykazało doświadczenie, już po rocznym okresie nieprzerwanego działania, w silniku wystąpić mogą wyraźne nieprawidłowości. Powstałe w wyniku tarcia i wybijania luzy i nieszczelności w zaworach albo suwakach, układzie cylinder-tłok, niedostrzegalne prawie w trakcie oględzin, powodują w znacznie większym stopniu, aniżeli należałoby przypuszczać, zwiększenie zużycia pary, a niekiedy obniżenie mocy.

Jedynie regularne badanie maszyn parowych może dać gwarancję ich ekonomicznego działania. W ramach tych badań maszynę indykuje się, a na podstawie zdjętych wykresów, jeżeli jest to potrzebne, przeprowadza się poprawę rozrządu, sprawdzenie szczelności organów sterujących parę, obserwację działania regulatora oraz biegu jałowego silnika. Wykresy indykatorowe dają możliwość ustalenia przyczyn takich nieprawidłowości, jak stukanie w cylindrze, nierównomierność biegu, niedostateczna próżnia

itd. Wykres indykatorowy jest również podstawą dla obliczenia mocy indykowanej silnika.

„Czytanie“ wykresów indykatorowych nie jest rzeczą łatwą. Często-
kroć to samo zniekształcenie wykresu indykatorowego może mieć przy-
czynę zarówno w wadliwie działającym rozrządzie, właściwościach sil-



Rys. 1. Wykresy indykatorowe maszyny parowej w przypadku istnienia nieszczelności a) w zaworze dolotowym, b) w zaworze wylotowym lub między pierścieniami tłokowymi a gładzią cylindrową

jedynie jednej z częściej spotykanych usterek, a mianowicie nieszczelności w organach sterujących wlot i wylot pary z uwzględnieniem również nieszczelności między pierścieniami tłokowymi a gładzią cylindrową.

W przypadku występowania znacznych nieszczelności wykresy indykatorowe mogą przyjąć kształt przedstawiony na rysunku 1a, b. Wykresy o tak drastycznym zniekształceniu występują bardzo rzadko (podwieszony zawór, znaczne wytarcie pierścieni tłokowych i gładzi cylindrowej).

Wobec stosowania sprężyn indykatorowych z różnymi podziałkami oraz różnych przekładni reduktora skoku trudno jest „na oko“ ocenić kształt krzywej ekspansji świadczącej o istnieniu nieszczelności. Do tego celu używana jest w praktyce konstrukcja Doerfla [1], [2], [3].

I. Metoda wykreślna Doerfla

Podana przez Doerfla [4] metoda wykrywania nieszczelności polega na sprawdzeniu przebiegu krzywej ekspansji przez porównanie jej z hiperbolą równoboczną, przy czym zarówno wykres indykatorowy, jak i sama krzywa ekspansji pozostają czytelne i nie zniekształcone liniami konstrukcji dzięki odwróceniu konstrukcji hiperboli równobocznej [5].

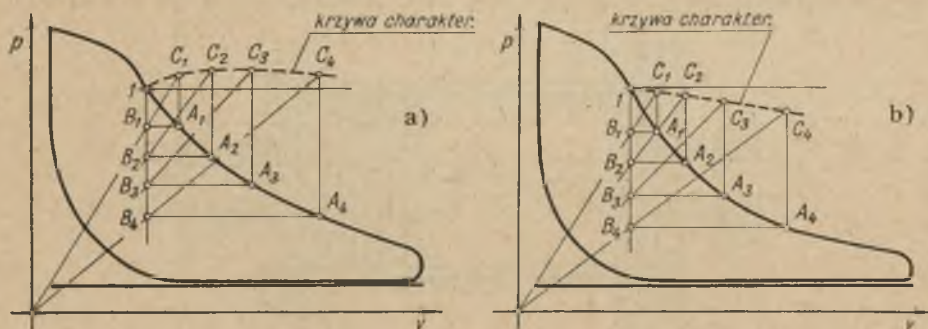
Na wykresie indykatorowym (rys. 2a, b) po wykreśleniu obu osi współrzędnych układu p, V wybiera się na początku krzywej ekspansji punkt I oraz kolejno kilka innych A_1, A_2, A_3, \dots w możliwie równych od siebie odstępach. Przez punkt I przeprowadza się prostą prostopadłą do osi V . Rzut punktów A_1, A_2, A_3, \dots na nią wyznacza punkty B_1, B_2, B_3, \dots . Z kolei przez punkty B_1, B_2, B_3, \dots wykreśla się pęk prostych z początku układu współrzędnych. Rzut punktów A_1, A_2, A_3, \dots na odpowiednie,

nika, cieplnym oddziaływaniu ścian cylindra — jak i błędnym działaniu przyrządów mierniczych czy niewłaściwej ich obsłudze. Ogromne zróżnicowanie typów rozrządów maszyn parowych znacznie poszerza zakres różnorodności błędów.

Treścią artykułu jest omówienie metody wykrywania

poszczególne półproste pęku wyznacza punkty C_1, C_2, C_3, \dots . Łącząc poszczególne punkty I, C_1, C_2, C_3, \dots otrzymuje się tzw. krzywą charakterystyczną. W przypadku hiperboli równobocznej krzywa charakterystyczna jest prostą poziomą ($pV = \text{const}$).

Jeżeli ekspansja przebiega na wykresie powyżej hiperboli równobocznej, to krzywa charakterystyczna również wznosi się powyżej linii poziomej



Rys. 2. Konstrukcja krzywej charakterystycznej sposobem Doerfla

(rys. 2a), w przypadku przeciwnym – krzywa charakterystyczna znajduje się poniżej linii poziomej (rys. 2b).

Przypadek pierwszy występuje, jeżeli organy sterujące wlot pary są nieszczelne lub też jeśli zachodzi zjawisko wtórnego „przegrzewu“ pary w cylindrze; przypadek drugi jest wynikiem nieszczelności organów sterujących wylot pary z cylindra albo wyrobienie pierścieni tłokowych.

II. Sposoby wyznaczania przestrzeni szkodliwej

Przy posługiwaniu się konstrukcją Doerfla konieczne jest wykreślenie na wykresie indykatorowym obu osi współrzędnych układu $p-V$.

O ile wyznaczenie osi odciętych na podstawie znajomości ciśnienia barometrycznego oraz podziałki sprężyny indykatorowej nie przedstawia specjalnej trudności, to do wykreślenia osi rzędnych potrzebna jest znajomość wielkości przestrzeni szkodliwej

$$\varepsilon_e = \frac{V_e}{V_s} \cdot 100\%, \quad (1)$$

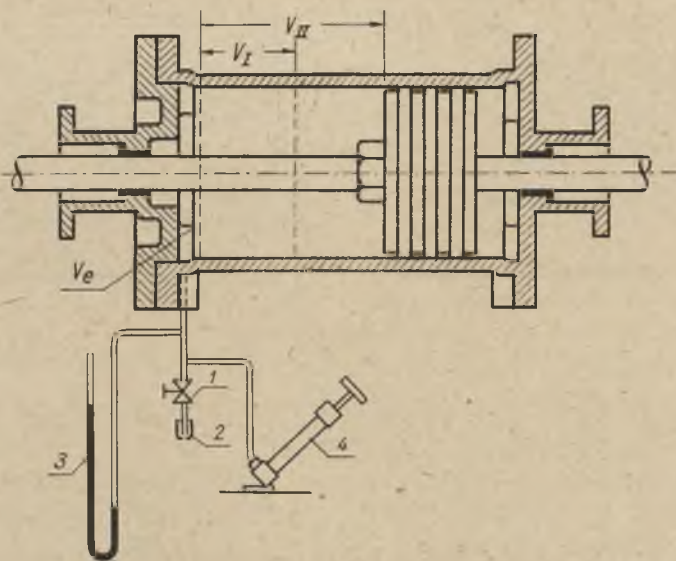
V_e – przestrzeń szkodliwa,

V_s – przestrzeń skokowa.

Jakkolwiek wielu autorów podaje przeciętne wartości przestrzeni szkodliwej w zależności od rodzaju rozrządu, wielkości silnika oraz stosunku s/D – dane te należy traktować jedynie jako orientacyjne, a wielkość przestrzeni szkodliwej V_e wyznaczać każdorazowo drogą pomiaru.

Najbardziej znaną, a równocześnie najmniej dokładną, jest metoda wyznaczania przestrzeni szkodliwej cylindra przez wypełnianie jej cieczą. Wadą tej metody jest wyciekanie cieczy przez nieszczelności podczas pomiaru.

Znacznie dokładniejsze wyniki daje tzw. metoda wypływowa [6]. Metoda ta może być stosowana w dwu układach pomiarowych.



Rys. 3. Pierwszy układ pomiarowy wypływowej metody wyznaczania przestrzeni szkodliwej. 1 — zawór odcinający, 2 — dyszka kalibrowana, 3 — manometr cieczowy, 4 — pompka ręczna z zaworkiem zwrotnym

Urządzenie pomiarowe układu pierwszego (rys. 3) składa się z U-rurki o wysokości około 750 mm, kalibrowanej dyszki mierniczej, pompki ręcznej z zaworkiem zwrotnym, zaworów odcinających i przewodów łączących. Tłok silnika ustawia się w położeniu I. Do cylindra wtlacza się powietrze aż do chwili, gdy ciśnienie osiągnie wartość 400–600 mm H₂O. Z kolei przekręca się zaworek otwierając przepływ powietrza przez dyszę i równocześnie uruchamia stoper. Czas wypływu τ_1 mierzy się stoperem do momentu, gdy ciśnienie w cylindrze spadnie do wartości 5 mm H₂O. Podobnie postępuje się dla drugiego zmienionego położenia tłoka II, przy czym zarówno ciśnienie początkowe jak i końcowe wypływu musi być identyczne jak w poprzednim pomiarze. Objętość przestrzeni szkodliwej wyraża się wzorem

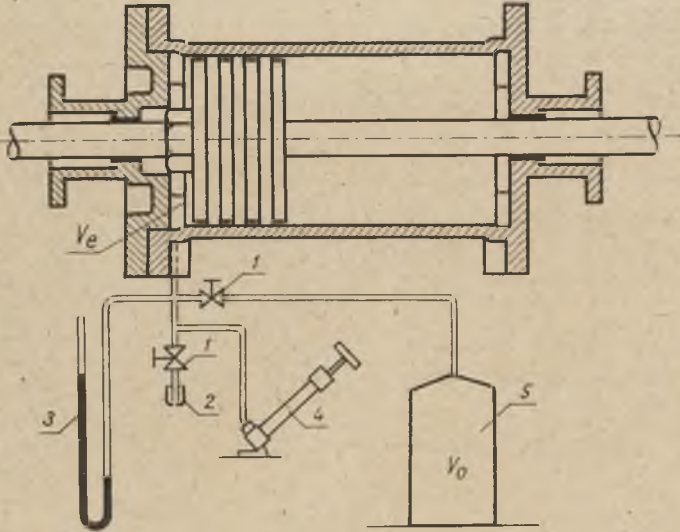
$$V_e = \frac{V_{II} \cdot \tau_1 - V_I \cdot \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \quad (2)$$

V_1, V_2 — objętości zawarte pomiędzy martwym położeniem tłoka a jego położeniami *I* i *II*,

τ_1, τ_2 — czasy wypływu powietrza.

Metoda ta jest niezależna od nieszczelności cylindra pod warunkiem, że są one takie same w obu położeniach tłoka.

Dla uniezależnienia się od ewentualnego nierównego wyrobienia lub smarowania gładzi cylindrowej można stosować drugi wariant metody



Rys. 4. Drugi układ pomiarowy wypływowej metody wyznaczania przestrzeni szkodliwej. 1 — zawór odcinający, 2 — dyszka kalibrowana, 3 — manometr cieczowy, 4 — pompka ręczna z zaworkiem zwrotnym, 5 — zbiornik dodatkowy

wypływowej (rys. 4). Polega on na uzupełnieniu urządzenia pomiarowego dodatkowym zbiornikiem o znanej objętości V_0 . Sposób postępowania jest prawie identyczny z opisanym poprzednio z tą różnicą, że początkowo mierzy się czas τ_1 wypływu powietrza tylko z przestrzeni szkodliwej V_e , a następnie τ_2 z połączonych objętości ($V_0 + V_e$), przy zachowaniu tych samych wartości ciśnień na początku i końcu ekspansji. Wzór na obliczenie przestrzeni szkodliwej przedstawia się następująco

$$V_e = \frac{V_0}{\frac{\tau_2}{\tau_1} - 1} \quad (3)$$

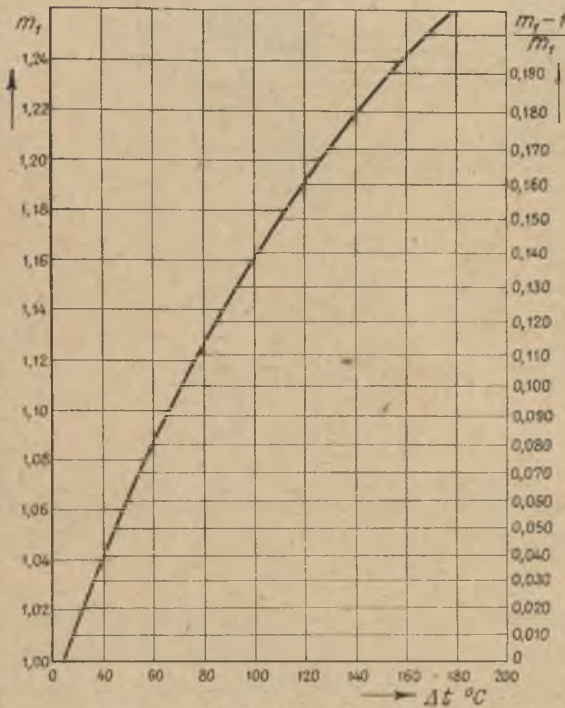
Wedle danych zaczerpniętych z literatury technicznej wielkość V_e wyznaczana wg metody wypływowej obciążona jest błędem nie większym od $\pm 0,5\%$.

III. Uogólnienie metody Doerfla

Zasadniczą wadą konstrukcji Doerfla jest ograniczenie jej zastosowania tylko do maszyn zasilanych parą nasyconą. Ekspansja pary przegrzanej przebiega według krzywej bardziej stromej niż hiperbola równoboczna.

Dla napędu maszyn parowych stosuje się obecnie prawie wyłącznie parę przegrzaną.

Badania laboratoryjne nad maszynami zasilanymi silnie przegrzaną parą przeprowadzone między innymi przez naukowe instytuty radzieckie



Rys. 5. Wykładnik m_1 na początku krzywej ekspansji oraz stosunek przesunięcia układu $\frac{m_1 - 1}{m_1}$ jako funkcja temperatury przegrzewu pary Δt °C

wykazały, że krzywa ekspansji pary przegrzanej nie może być traktowana jako politropa. Aby równanie tej krzywej przedstawić w postaci

$$pV^m = \text{const},$$

należałoby wprowadzić do tego równania wartość wykładnika m zmienną i malejącą w miarę postępu ekspansji.

W uogólnieniu szeregu doświadczeń opracowano w formie wykresu zależność pomiędzy wykładnikiem politropy m_1 na początku krzywej ekspansji a temperaturą Δt , przegrzewu pary (nadwyżka ponad temperaturą nasycenia) zasilającej silnik (rys. 5). Zależność, wedle której nastę-

puje zmniejszanie się wykładnika politropy w trakcie ekspansji pary przegrzanej w maszynie parowej, dotychczas nie została ustalona.

Ł. P. Smirnow [7] podaje, że krzywe ekspansji pary przegrzanej można aproksymować z dostateczną dokładnością hiperbolą nakreśloną w układzie współrzędnych przesuniętym równoległe w kierunku osi V .

Dzięki zastąpieniu krzywej ekspansji tak nakreśloną hiperbolą można konstrukcję Doerfla zastosować również dla pary przegrzanej.

Aby wyznaczyć położenie początku układu współrzędnych przesuniętej hiperboli przeprowadza się rozumowanie następujące: Przez punkt 1 na rys. 6 ma przechodzić hiperbola aproksymująca politropę o zmiennym i zmniejszającym się wykładniku m .

Dla punktu 1 odpowiadającego początkowi krzywej ekspansji wykładnik m_1 ustala się w zależności od temperatury przegrzewu pary zasilającej silnik na podstawie wykresu (rys. 5).

Różniczkując równanie politropy $p \cdot V^m = \text{const}$, otrzymuje się

$$d(p \cdot V^m) = V^m \cdot dp + m \cdot p \cdot V^{m-1} \cdot dV,$$

stąd

$$\frac{dp}{dV} = -m \cdot \frac{p}{V}. \quad (4)$$

Analogiczny związek dla hiperboli przesuniętej w kierunku osi V ma postać następującą

$$\frac{dp}{dV} = -\frac{p}{V'}. \quad (5)$$

V' – odcięta przesuniętego układu współrzędnych.

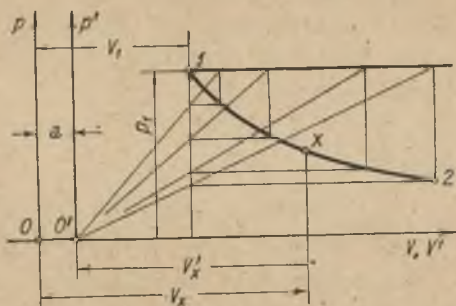
Z porównania wzorów (4) i (5) wynika

$$-m \cdot \frac{p}{V} = -\frac{p}{V'};$$

stąd

$$V - V' = V \cdot \frac{m-1}{m}. \quad (6)$$

Ostatnia wielkość wyraża odległość początków układów współrzędnych. Dla punktu początkowego krzywej ekspansji $m = m_1$, wobec czego hiper-



Rys. 6. Konstrukcja krzywej charakterystycznej w przesuniętym układzie współrzędnych

boleę aproksymującą należy nakreślić w układzie przesuniętym o odcinek

$$a = V_1 \cdot \frac{m_1 - 1}{m_1}. \quad (7)$$

Wartość wykładnika m łatwo można skontrolować w oparciu o równanie (4) prowadząc przez żądany punkt politropy prostą prostopadłą do osi V . Wówczas wykładnik politropy dla punktu X wyraża stosunek

$$m_X = \frac{V_X}{V'_X}, \quad (8)$$

gdzie:

V_X — odcięta w początkowym układzie współrzędnych,

V'_X — odcięta w przesuniętym układzie współrzędnych.

Jak widać z rys. 6 wykładnik politropy posiada dla przesuniętej hiperboli wartość malejącą i zdążającą w miarę ekspansji pary w cylindrze do jedności.

Aby na podstawie wykresu indykatorowego skontrolować, czy podczas ekspansji masa pary w cylindrze nie ulega zmianie, należy porównać linię ekspansji rzeczywistej z linią ekspansji zamkniętej, a więc z opisaną wyżej przesuniętą hiperbolą. Porównanie to wykonuje się podobnie jak w klasycznej metodzie Doerfla za pomocą krzywej charakterystycznej.

Konstrukcja krzywej charakterystycznej jest analogiczna jak w metodzie Doerfla z tym, że należy przy niej wykorzystać nowy układ współrzędnych przesunięty o wielkość $\frac{m_1 - 1}{m_1} \cdot V_1$ w kierunku osi V . Wielkość $\frac{m_1 - 1}{m_1}$ wyznacza się z wykresu przedstawionego na rys. 5 w zależności od temperatury przegrzewu pary zasilającej maszynę parową. Podobnie jak w metodzie Doerfla wznoszenie się krzywej charakterystycznej powyżej linii poziomej świadczy o nieszczelności organów sterujących wlot, a opadanie — o nieszczelności organów sterujących wylot lub o wyrobieniu pierścieni tłokowych.

IV. Przykłady zastosowań

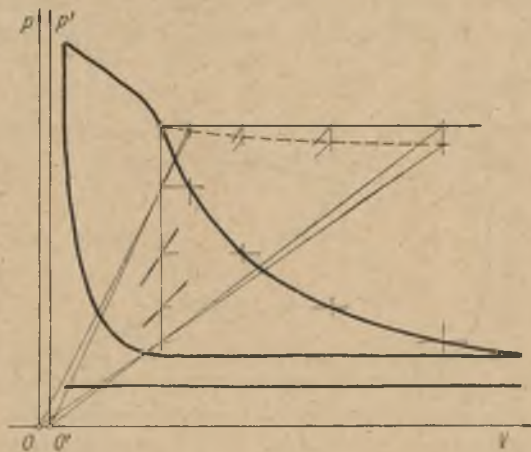
Nowy sposób badania szczelności stawideł maszyn parowych zasilanych parą przegrzaną zastosowany został kilkakrotnie w trakcie badań silników zainstalowanych w przemyśle.

Przykład 1

Badaniu na szczelność poddano cylinder wysokoprężny maszyny parowej, zaworowej, leżącej, dwustopniowej, dwucylindrowej, compound z kondensacją.

Ciśnienie pary na dolocie maszyny	p_d	10,5 ata
Temperatura pary na dolocie do maszyny	t_d	245° C
Temperatura przegrzewu pary	Δt	62° C
Stosunek przesunięcia układu	$\frac{m_1-1}{m_1}$	0,085

			strona dna	strona korby
Podziałka sprężyny indykatorowej	f_{sr}	mm/at	7	7
Objętość skokowa	V_s	1	88,1	88,1
Długość wykresu indykatorowego	l_s	mm	83	88
Objętość szkodliwa	V_e	1	4,5	5,2
Przestrzeń szkodliwa	ε_e	%	5,1	5,9
Odcinek na wykresie indykat. przedstawiający objętość szkodliwą	l_e	mm	4,2	5,2
Odcięta pkt. 1 na wykresie indykatorowym	l_1	mm	22,2	26,0
Przesunięcie układu współrzędnych	$\frac{m_1-1}{m_1} \cdot l_1$	mm	1,9	2,2

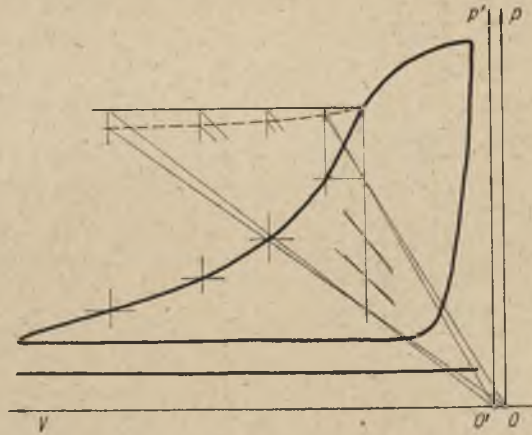


Rys. 7. Wykres indykatorowy strony dna (przykład 1)

Na wykresach indykatorowych odpowiadających obu stronom cylindra wykonano konstrukcję krzywej charakterystycznej bez przesunięcia i z przesunięciem układu współrzędnych (rys. 7, 8). W pierwszym przypadku krzywa charakterystyczna (linia przerywana) przebiega poniżej linii po-

ziomej wskazując na nieszczelność zaworów wylotowych czy wytarcie pierścieni tłokowych, co w badanym silniku nie występuje.

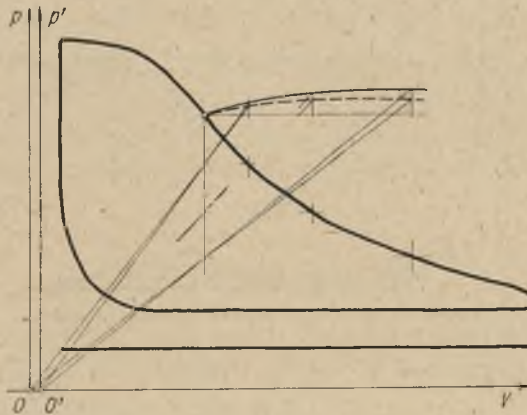
Natomiast krzywa charakterystyczna wykreślona w przesuniętym układzie współrzędnych wykazuje prawie poziomy przebieg świadczący o szczelności zaworów oraz tłoka silnika.



Rys. 8. Wykres indykatorowy strony korby (przykład 1)

Przykład 2

W trakcie badania jednocylindrowej maszyny parowej powstało podejrzenie o istnieniu nieszczelności stawidła. Krzywa charakterystyczna



Rys. 9. Wykres indykatorowy strony dna (przykład 2)

wykresu indykatorowego strony dna wykazała wyraźną nieszczelność, pochodzącą z podwieszania zaworu wlotowego (rys. 9). Linia przerywaną zaznaczono kształt krzywej charakterystycznej kreślonej normalnym sposobem Doerfla.

Ciśnienie pary na dolocie do maszyny	p_d	ata	9,2
Temperatura pary na dolocie do maszyny	t_d	°C	222
Temperatura przegrzewu pary	Δt	°C	46,7
Stosunek przesunięcia układu	$\frac{m_1 - 1}{m_1}$		0,048
Podziałka sprężyny indykatorowej	f_{sr}	mm/at	7
Objętość skokowa	V_s	1	1
Długość wykresu indykatorowego	l_s	mm	87
Objętość szkodliwa	V_e	1	5,95
Przeźrzeń szkodliwa	ε_e	%	6,2
Odcinek na wykresie indykat. przedstawiający objętość szkodliwą	l_e	mm	5,4
Odcięta pkt. I na wykresie indykatorowym	l_1	mm	31,6
Przesunięcie układu współrzędnych	$\frac{m_1 - 1}{m_1} \cdot l_1$	mm	1,5

V. Wnioski

Opisana wyżej metoda wykrywania nieszczelności w stawidłach maszyn przewidziana jest głównie dla silników zasilanych parą silnie przegrzaną. Należy podkreślić, że na wyniki konstrukcji ma duży wpływ dokładność wyznaczenia przestrzeni szkodliwej. Pomiar przestrzeni szkodliwej powinien być wykonany bardzo starannie.

Jakkolwiek przykłady pomiarów podane w artykule potwierdzają słuszność teoretycznych założeń, jednak dla całkowitego sprawdzenia nowej metody należałoby przeprowadzić serię pomiarów laboratoryjnych na silniku parowym posiadającym możliwość sztucznego stwarzania nieszczelności.

Otrzymano 12 stycznia 1955 r.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Wilke W., *Der Indikator und das Indikatordiagramm*, Leipzig 1916, str. 97.
- [2] Schulze, *Praktische Wärmewirtschaft bei der Dampfmaschine*, wyd. H. Maihak, Hamburg.
- [3] Jaroschek K., *Erfahrungen bei der regelmässigen Untersuchung von Dampfmaschinen*, wyd. H. Maihak, Hamburg.
- [4] Doerfel R., *Versuche an einer Eincylinder-Corliss-Maschine*, „Zeitschr. d. Ver. Deutsch. Ing.“ 47 (1889), str. 1114.
- [5] Ochęduszek St., *Teoria maszyn cieplnych*, cz. I, Warszawa 1953, str. 92.
- [6] Praca zbiorowa pracowników Katedry Pomiarów Maszyn Politechniki Wrocławskiej, *Laboratorium Pomiarów Maszyn*, cz. II, PWN 1954 str. 145.
- [7] Смирнов Л. Н., *Теория рабочего процесса в поршневой паровой машине*. Изд. Г. Н. Т. Й. М. Л. Москва 1951, стр. 28, 34.