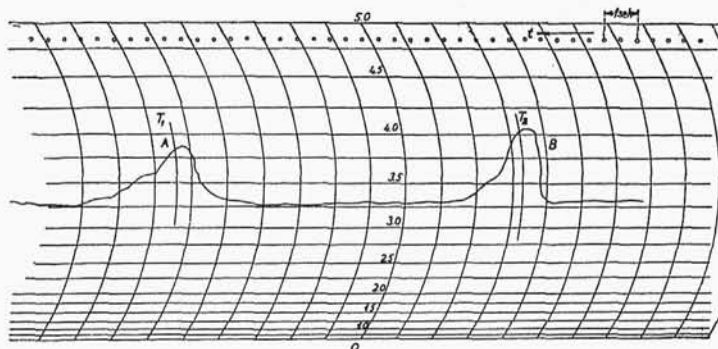


punkty obserwacyjne zaznaczają się na wykresach elektromierzy nie w formie dwóch ostrych wierzchołków lecz wybrzuszeń „A” i „B” (rys. 226). Do ścisłego określenia czasu przebiegu fali soli należy brać środki ciężkości T_1 i T_2 otrzymanych wychyleń.

Wszystkie metody chemiczne mogą być też stosowane do pomiarów przepływu w przewodach zamkniętych.



Rys. 226.

Wykres fali roztworu soli.

6. Metoda chronofotograficzna

Metoda chronofotograficzna używana jest jedynie do określania prędkości przy badaniach w laboratoriach. Polega ona na zmieszaniu z przepływającą wodą lekkich drobnych błyszczących cząstek materiału unoszonego w zawieszeniu przez wodę, a następnie na fotografowaniu przepływającej wody przy przerywanym oświetlaniu. Aparat fotograficzny rejestruje na kliszy przerywane linie przepływu wody. Znając czas trwania naświetlenia i mając jednocześnie na kliszy sfotografowaną podziałkę, możemy określić z dowolną dokładnością szybkość poszczególnych strug wody.

Lampa oświetlająca posiada do naświetlania automatyczne urządzenie w postaci klosza cylindrycznego, obejmującego lampę i obracającego się z odpowiednio nastawioną prędkością. Przy przejściu szpary podłużnej wyciętej w płaszczu cylindra następuje oświetlenie odpowiedniej przestrzeni wodnej.

7. Metoda kolorometryczna¹¹⁰⁾

Zasada pomiaru jest ta sama co w sposobie chemicznym: stwierdzenie wielkości rozcieńczenia roztworu — różnica polega na

¹¹⁰⁾ B. Esterer, Das Farbverdünnungsverfahren für Wassermessungen. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1937, Nry 10/11 i 12.

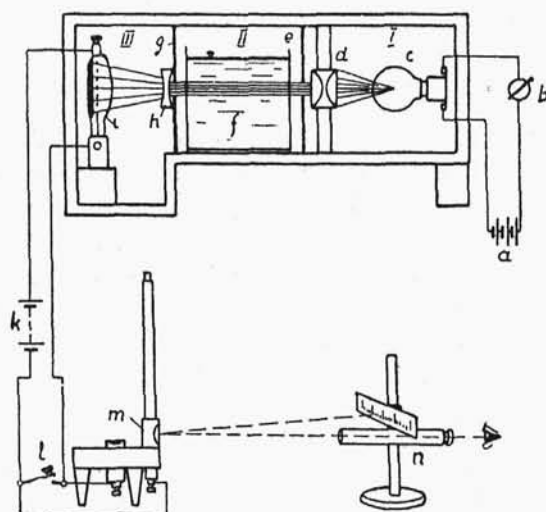
tym, że zamiast roztworu soli używa się roztworu barwnika, którego rozcieńczenie w mierzonym przepływie bada się sposobem optycznym.

Jeśli do wody, przepływającej w ilości Q m³/sek, będziemy wprowadzali przez pewien przeciąg czasu stałe q m³/sek skoncentrowanego roztworu barwnika i po kilku minutach z przekroju, położonego w dostatecznej odległości (gwarantującej należyte wymieszanie barwnika z wodą płynącą), weźmiemy próbkę stwierdzając rozcieńczenie $\frac{1}{n}$, to przepływ mierzony określimy z zależności

$$\frac{q}{Q+q} = \frac{1}{n}$$

Celem określenia rozcieńczenia n roztworu barwnika należy pobrać trzy próbki:

1. skoncentrowanego roztworu barwnika,
2. niezabarwionej przepływającej wody,
3. zabarwionej wody z przekroju pomiarowego.



Rys. 227.

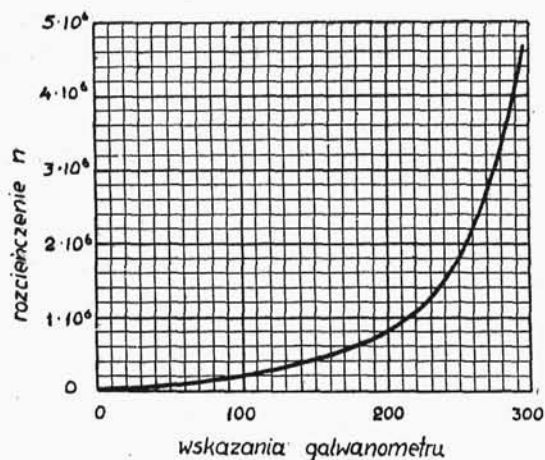
Przyrząd do określania rozcieńczenia barwnika.

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------|
| a — bateria akumulatorów | g — przesłona |
| b — wyłącznik | h — soczewka rozpraszająca |
| c — żarówka | i — komórka fotoelektryczna |
| d — soczewka skupiająca | k — bateria anodowa |
| e — przesłona | l — wyłącznik |
| f — naczynie szklane z badaną wodą | m — galwanometr lusterkowy |
| | n — lunetka. |

Jako barwnika używa się fluoresceiny ($C_{20}H_{10}O_5Na_2$), do określenia zaś rozcieńczenia stosuje się przyrząd z komórką fotoelektryczną. Schemat takiego przyrządu pokazano na rys. 227.

Przyrząd składa się ze szczelnej, nieprzepuszczającej światła skrzynki, podzielonej na trzy komory. W pierwszej znajduje się żarówka umieszczona na ścianie zewnętrznej. Światło rzucane przez nią przechodzi przez soczewkę skupiającą, wprawioną w ścianę dzielącą pierwszą komorę od drugiej. W drugiej komorze umieszcza się naczynie szklane o ścianach pionowych wypełnione próbką cieczy. W ścianie działowej komory drugiej i trzeciej umieszczona jest znowu soczewka, przez którą smuga światła idąca od żarówki skierowana jest na komórkę fotoelektryczną. Ta zaś włączona jest w obwódprądu elektrycznego łącznie z galwanometrem lusterkowym wysokiej czułości.

Dla roztworu, powstałego przez rozpuszczenie 1000 g fluoresceiny w 1 litrze destylowanej wody, odchyłki na skali galwanometru w zależności od zmiany koncentracji barwnika wykazuje krzywa przedstawiona na rys. 228, wykreślona dla rozcieńczenia od 1:50 000 do 1:4 500 000.



Rys. 228.

Odchyłki na skali galwanometru w zależności od zmiany koncentracji barwnika.

Z wykresu widzimy, że mamy możliwość dokładnego pomiaru nawet przy stosunkowo bardzo dużych rozcieńczeniach. Przy dużym rozcieńczeniu zależność odczytu na skali instrumentu — jeśli brać będziemy dość krótkie odcinki krzywej — jest prawie liniowa w stosunku do rozcieńczenia. Ten przebieg krzywej pozwala na łatwe określanie nieznanego rozcieńczenia n z dwóch porównawczych odczytów na skali galwanometru a_1 i a_2 dla znanych rozcieńczeń roztworu n_1 i n_2 .

W razie odczytania wskazania α galwanometru w czasie badania pewnego rozcieńczenia n otrzymujemy:

$$n = n_1 - (n_1 - n_2) \frac{\alpha_1 - \alpha}{\alpha_1 - \alpha_2} \quad (94)$$

Określenie rozcieńczenia odbywa się zwykle drogą pomiarów z odpowiednio dobranymi próbkami o znanym rozcieńczeniu (nawet w granicach krzywej o dużej krzywiznie przez odpowiednie dobranie zbliżonych rozcieńczeniem roztworów). Badanie takie jest potrzebne wówczas, jeśli nie określiliśmy uprzednio dla stosowanego skoncentrowanego roztworu barwnika zależności, zobrazowanej krzywą na rys. 228.

Ze względu na dopuszczalne duże rozcieńczenia można dla doprowadzenia skoncentrowanego roztworu barwnika stosować niewielkie podręczne naczynie o małej pojemności (zaledwie 5 litrów). Schematycznie przedstawione jest ono na rysunku 229. Aby w ciągu całego czasu wypływu roztworu utrzymać wewnątrz naczynia stałe ciśnienie niezależne od wypełnienia naczynia, zbudowane jest ono jak flaszka Mariotte'a. Rura wypływowa zaopatrzona jest w zamknięcie i dyszę, która musi być starannie wycechowana dla roztworów o różnej koncentracji i temperaturze. Na wykresie (na rys. 230) przedstawiono kilka krzywych jako wynik wzorcowania dyszy wypływowej, przy czym stwierdzono, że w czasie opróżniania naczynia wypływ zmieniał się w granicach $\pm 0,3\%$.

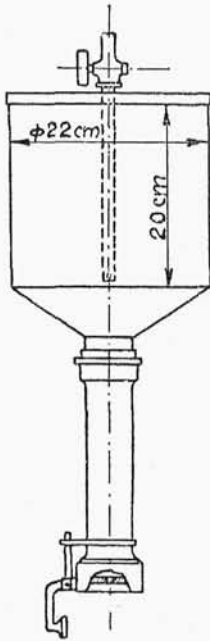
Próbek z miejsca pomiarowego nie powinno się pobierać wcześniej niż po upływie 2 minut od rozpoczęcia wprowadzania roztworu. Umieszczoną na kiju flaszkę o pojemności $\frac{1}{2}$ litra porusza się w czasie napełniania po całym przekroju. Z przekroju tego bierze się zwykle dwie próbki po $\frac{1}{2}$ litra, z naczynia — jedną próbkę o pojemności 15 cm³, a z przekroju, w którym wprowadza się roztwór, bierze się 3 próbki (po $\frac{1}{2}$ litra) niezabarwionej wody.

Opisana metoda, wypróbowana w Zakładzie Doświadczalnych Pomiarów w Obernach, okazała się nadzwyczaj dokładna. Przy zastosowaniu roztworu 0,00025 g/l można było stosować rozcieńczenia dochodzące do 1 : 4 000 000.

Sposób ten w porównaniu z chemiczną metodą rozcieńczania roztworu ma tę dużą zaletę, że znakomicie zmniejsza wielkość przyborów (a przez to ich ciężar), pozwala na optyczne śledzenie przebiegu pomiaru oraz na określenie rezultatów prostą metodą fizykalną.

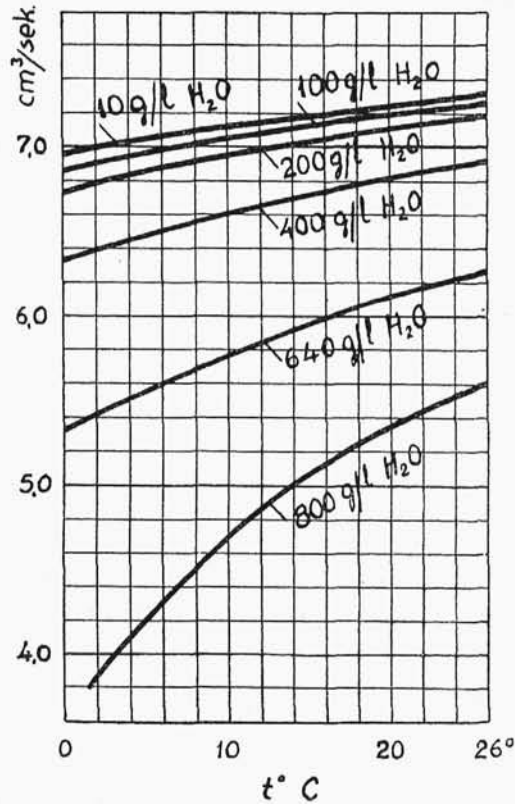
Oczywiście tylko wówczas otrzymuje się dobre rezultaty, gdy następuje dobre przemieszanie się dopływającego roztworu z przepływającą wodą, o co należy się starać przez takie doprowadzenie barwnika, by już w miejscu doprowadzenia rozdzielony był on rów-

nomiennie w całym przekroju. Jak wykazały doświadczenia, nawet przejście wody przez turbinę nie powoduje należytego wymieszania, zwłaszcza w zakładach niskiego spadu z turbinami propelerowymi



Rys. 229.

Naczynie do wprowadzania
roztworu barwnika.



Rys. 230.

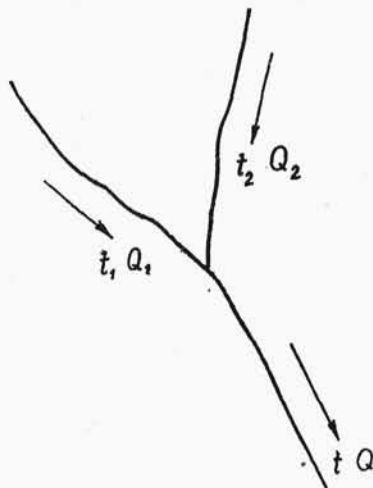
Krzywe wzorcowania dyszy wypływowej.

o dużym przełyku, jeśli roztwór już w miejscu doprowadzenia nie był równomiernie rozdzielony w przekroju.

8. Metoda termometryczna

W okolicach, gdzie znajdują się termy, można obliczać przepływ przy pomocy pomiaru temperatur, o ile chodzi o oznaczenie wartości przepływów Q_1 i Q_2 (rys. 231), składających się na znany przepływ Q .

Mając z pomiaru średnią temperaturę t przepływającej wody, a także temperatury t_1 i t_2 , możemy z dwóch zależności $Q = Q_1 + Q_2$ i $Qt = Q_1 t_1 + Q_2 t_2$ obliczyć wartość Q_1 i Q_2 , lub w ogóle możemy obliczyć dwa przepływy znając trzeci.



Rys. 231.

Pomiar rzadko stosowany, możliwy tylko przy małych przepływach ze względu na trudności ścisłego określenia średnich wartości temperatur płynącej wody. Pomiaru takie były przeprowadzane z dobrym wynikiem w Ragaz w Szwajcarii.

9. Obliczenie przepływu na podstawie spadku ciśnienia (metoda Jakob-Erka)

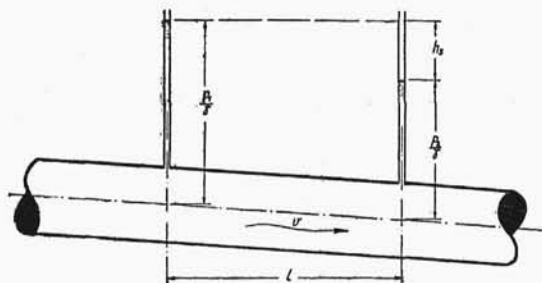
Bardzo dobre rezultaty pomiarów przepływu daje się osiągnąć przy niewielkich średnicach i gładkich rurach przez użycie wzoru na spadek ciśnienia (rys. 232):

$$h_s = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \lambda \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} = (\lambda_R + \lambda_B) \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (95)$$

Współczynnik strat λ składa się z dwóch składników: λ_R zależnego od oporów tarcia i λ_B spowodowanego przyspieszeniem płynącej w rurze cieczy. Współczynnik λ_R jest funkcją cyfry Reynoldsa $\left(R = \frac{v d}{\nu}\right)$. Dla tej funkcji ustalili Reynolds zależność empiryczną

$$\lambda_R = c_1 \left(\frac{v}{\nu d}\right)^{c_2} \quad (96)$$

W równaniach (95) i (96) $p_1 - p_2$ oznacza spadek ciśnienia w g/cm^2 , γ — średnią gęstość płynu w g/cm^3 , l — długość odcinka przewodu w cm , v — średnią prędkość w przewodzie w cm/sek , ν — lepkość kinematyczną w cm^2/sek , c_1 i c_2 — stałe wyznaczone doświadczalnie.



Rys. 232.

Spadek ciśnienia w rurze.

Wartość λ_B dla wody (cieczy) równa się zero, zaś wartości c_1 i c_2 są zestawione w Tab. 30 takie, jak je znaleźli Blasius, Ombeck, Jakob i Schiller.

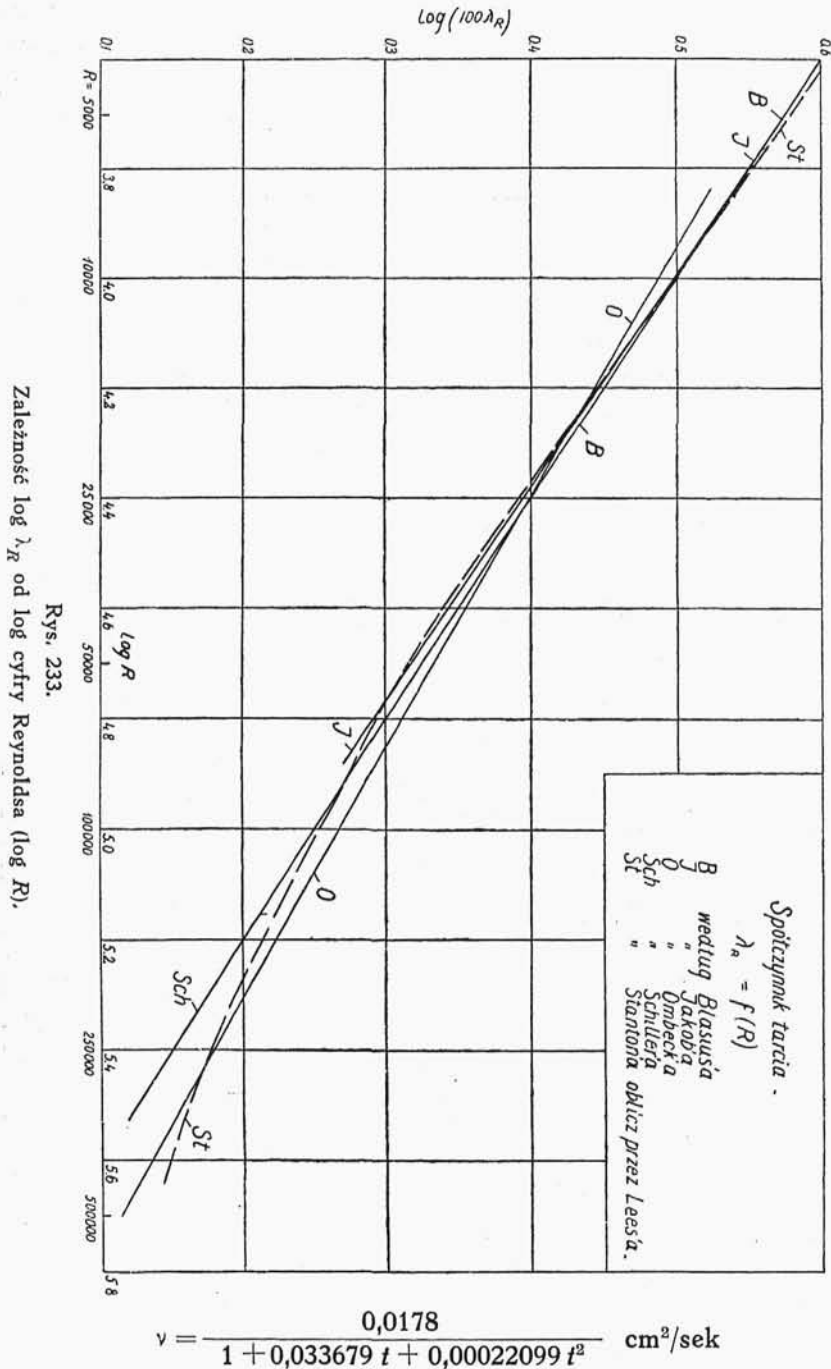
Tabela 30.

c_1	c_2	Obliczone przez	Według doświadczeń z	$R = \frac{v d}{\nu}$
0,3164	0,250	Blasius	wodą	100000
0,242	0,224	Ombeck	powietrzem	500000
0,327	0,254	Jakob	powietrzem i wodą	70000
0,3164	0,250	Schiller	wodą	250000

Stosownie do stałych powyższej tabeli na rys. 233 przedstawiono $\log \lambda_R$ jako funkcję $\log R$. Zależność (96) wyraża się liniami prostymi. Na rysunku przedstawiono również — stosownie do doświadczeń Stanton i Panella z powietrzem i wodą — w postaci lekko wygiętej linii zależność $\lambda_R = 0,0072 + 0,6104 \left(\frac{v d}{\nu} \right)^{-0,35}$. Późniejsze doświadczenia Jakob - Erka¹¹⁾ są zgodne z doświadczeniami Stanton - Pannella i dają w wyniku wzór

$$\lambda_R = 0,00714 + 0,6104 \left(\frac{v d}{\nu} \right)^{-0,35} \quad (97)$$

¹¹⁾ M. Jakob & S. Erk. Der Druckabfall in glatten Rohren und die Durchflussziffer von Normaldüsen. Forschungsarbeiten, Zeszyt 267. Berlin. 1924.



Rys. 233.
Zależność $\log \lambda_R$ od \log cyfry Reynoldsa ($\log R$).

przy $t = 0 \quad 4 \quad 6 \quad 8 \quad 10 \quad 12 \quad 14 \quad 16 \quad 18 \quad 20 \quad ^\circ\text{C}$
 $\nu = 1,78 \quad 1,56 \quad 1,47 \quad 1,39 \quad 1,30 \quad 1,24 \quad 1,18 \quad 1,12 \quad 1,06 \quad 1,02 \quad 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sek}$

W celu obliczenia przepływu na podstawie zmierzonej straty ciśnienia rozwiązujemy równanie (95) względem ν otrzymując prędkość średnią jako funkcję spadku ciśnienia $h_s = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}$. Znając przekrój rury A określimy przepływ z równania $Q = A \nu \text{ m}^3/\text{sek}$.

Metoda ta (która może być zresztą stosowana również i do rur szorstkich) przy rurach gładkich daje na tyle dużą dokładność, że może służyć do cechowania urządzeń stosowanych przy innych metodach pomiaru przepływów wody.

10. Metoda Gibsona

W roku 1923 podał N. R. Gibson¹¹²⁾ nową metodę pomiaru w przewodach zamkniętych o niezbyt dużej długości, który to sposób opierając się na teoretycznych podstawach i będąc bardzo prosty stanowi cenne uzupełnienie metod dotychczas stosowanych, w wielu wypadkach posiada duże zalety w stosunku do innych metod, głównie dlatego że umożliwia bardzo szybką pracę. Pomiar opiera się na zasadzie zmiany ilości ruchu. Siłę, która działa na masę wody w przewodzie rurowym, określa się ze wzrostu ciśnienia, powstającego przy zamykaniu przepływu. Pomiar więc przepływu sprowadza się do pomiaru ciśnienia w ciągu pewnego czasu. Dokładność metody zależy głównie od konstrukcji i wykonania przyrządu notującego ciśnienie. Gibson używał manometru rtęciowego, którego wskazania były notowane fotograficznie. Obecnie stosuje się doskonalsze przyrządy. Dokładność takiego pomiaru, jak sprawdzono w zakładzie Walchensee (gdzie dla porównania dokonano pomiarów za pomocą czterech metod: rurkami Pitota, metodą Allena, Gibsona i młynkami hydrometrycznymi), równa się dokładności dobrze zrobionego pomiaru młynkowego. Zaletą pomiaru Gibsona jest jego duża szybkość wykonania, przez co przy pomiarach na przewodach zakładów wodnych przerwa w pracy poszczególnych zespołów turbin jest bardzo krótkotrwała. Pomiary dokonane w celach odbioru turbin mocy 70 000 KM w Queenstown Hydroelectric Power Corporation w Ontario zrobione były w ciągu niespełna jednego dnia: 20 kompletnych pomiarów jednej grupy wykonano w ciągu

¹¹²⁾ N. R. Gibson. The Gibson method and apparatus for measuring the flow of water in closed conduits. Odczyt wygłoszony na dorocznym zebraniu American Society of Mechanical Engineers i ogłoszony drukiem w grudniu 1923 r.

2 godz 40 min, następne 17 kompletnych pomiarów drugiej grupy trwało 2 godz 30 min.

Przypuśćmy, że mamy przewód rurowy o przekroju jednostajnym, przez który płynie woda z prędkością v_0 . Jeżeli przewód zamykamy w ciągu czasu T , nastąpi wzrost ciśnienia (sprężystość wody i rurociągu w następujących rozważaniach pominięto). Pod koniec zamykania woda znajdzie się w spoczynku, a ciśnienie, które ustali się po zamknięciu przewodu jest od pierwotnego ciśnienia piezometrycznego, odpowiadającego początkowemu stanowi, wyższe

o wartość wysokości prędkości $\frac{v_0^2}{2g}$ i o wysokość straconą na pokonanie oporów tarcia γh_s . Jeżeli oznaczymy przez P siłę, która działa opóźniająco na słup wody, to stosownie do zasady ilości ruchu:

$$P dt = -m dv \quad (98)$$

Przez całkowanie w granicach od $t = 0$ (początek przamykania) do $t = T$ (moment całkowitego zamknięcia) otrzymujemy

$$\int_0^T P dt = m (v_0 - v_T)$$

Zasadniczo po zamknięciu $v_T = 0$, w wielu jednak wypadkach, np. po zamknięciu przepływu przez łopatki kierujące turbiny, nie osiąga się nigdy zupełnie szczelnego zamknięcia, woda przeciekająca, którą trzeba dodatkowo zmierzyć, wywołuje pewną szybkość $v_p = v_T$, tak że

$$\int_0^T P dt = m (v_0 - v_p) \quad (99)$$

Siła opóźniająca odpowiada dynamicznemu nadciśnieniu p w punkcie pomiarowym, tak że można napisać $P = p A$, gdzie A oznacza pole przekroju rury (jednakowe na całej długości). Ciśnienie opóźniające w powyższym sensie jest większe od ciśnienia statycznego w każdym punkcie o wartość ciśnienia koniecznego do pokonania oporów ruchu i wywołania prędkości. Przy przeprowadzaniu obliczenia muszą być uwzględnione te ostatnie wartości.

Odpowiednio do wyżej podanych zależności po podstawieniu wyrażenia na masę: $m = A \frac{L \gamma}{g}$, gdzie L oznacza długość rurociągu od miejsca zamknięcia do miejsca pomiaru, napiszemy:

$$A \int_0^T p dt = A \frac{L \gamma}{g} (v_0 - v_p) \quad (99a)$$

przebiegu wartości b potrafimy jednak szybkim sposobem dojść do dokładnych wartości b . Jeżeli narysujemy jakąkolwiek linię zamykającą, wyczuwając jej przebieg na oko, to dla upływu czasu t_1 (rys. 234), gdy prędkość osiągnie wartość v_1 , stosownie do równania (99) otrzymamy

$$A \int_0^{t_1} p \, dt = m (v_0 - v_1) \quad (a)$$

Dla całego okresu od $t = 0$ do $t = T$ mamy — pomijając bardzo mały wpływ, jaki woda wyciekająca wywiera na przebieg linii zamykającej:

$$A \int_0^T p \, dt = m v_0 \quad (b)$$

Wartość $A \int_0^T p \, dt$ jest całkowitą powierzchnią wykresu: F_c , wartość $A \int_0^{t_1} p \, dt$ jest zakreskowaną częścią wykresu: F_1 . Przez podzielenie (a) przez (b) otrzymujemy:

$$\frac{F_1}{F_c} = \frac{mv_0 - mv_1}{mv_0} = 1 - \frac{v_1}{v_0}$$

albo

$$v_1 = v_0 \left(1 - \frac{F_1}{F_c} \right)$$

Ponieważ, jak wspomniano, obydwie składowe wartości b_1 , mianowicie wysokość prędkości $\left(\frac{v_1^2}{2g} \right)$ i wysokość oporów, są proporcjonalne do kwadratu prędkości, to jeśli linię zamykającą narysowaliśmy prawidłowo, musi być:

$$b_1 = b_0 \left(1 + \frac{F_1}{F_c} \right)^2 \quad (c)$$

Obliczenie b przeprowadzamy, stosownie do wymaganej dokładności, dla paru wartości czasu (od $t = 0$ do $t = T$). Ze znalezionych w pierwszym przybliżeniu (na podstawie na oko opracowanej linii zamykającej) wartości b rysuje się nową linię i powtarza rachunek dopóty, dopóki nie będzie spełniony warunek wyrażony równaniem (c). Zwykle wystarczy jedno powtórzenie. W ten sposób znajduje się wartość F_c a tym samym wartość $A \int_0^T p \, dt$, przez co

otrzymujemy poszukiwaną wielkość prędkości

$$v_0 = \frac{F_c g}{L \gamma} + v_p \quad \text{m/sek}$$

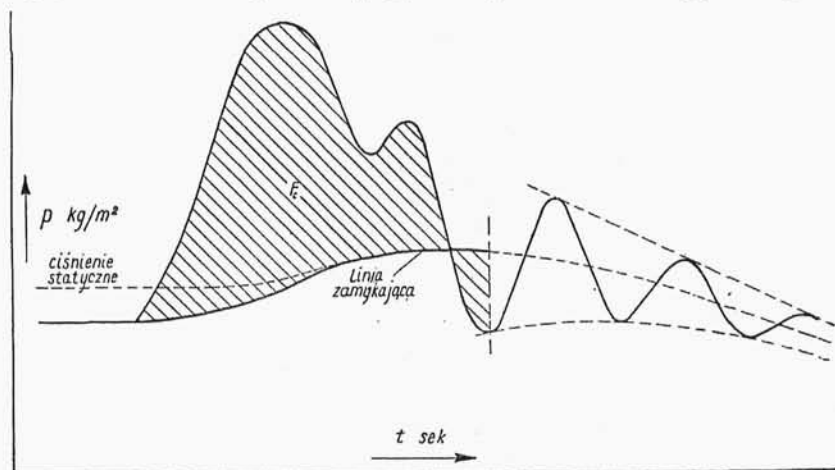
oraz początkowy przepływ sekundowy wody

$$Q = v_0 A = A \frac{F_c g}{L \gamma} + Q_p \quad \text{m}^3/\text{sek} \quad (100)$$

przy czym przy określaniu wartości F_c należy uwzględnić podziałkę czasu i ciśnienia w kg sek/m^2 . Wartość Q_p oznacza przepływ po całkowitym zamknięciu przewodu (przeciekanie). Jeżeli rurociąg posiada średnicę niejednostajną to

$$Q = \frac{F_c g}{\gamma \sum \frac{\Delta L}{A}} + Q_p \quad \text{m}^3/\text{sek}. \quad (100a)$$

W wielu wypadkach, mianowicie wówczas gdy pominięta sprężystość wody i rurociągu mają zauważalny wpływ, określenie końcowego punktu wykresu nie jest tak łatwe jak dla wykresu na rysunku 234, gdyż wówczas po skończonej czynności zamykania następują wahania słupa wody (rys. 235). W takim wypadku punkt

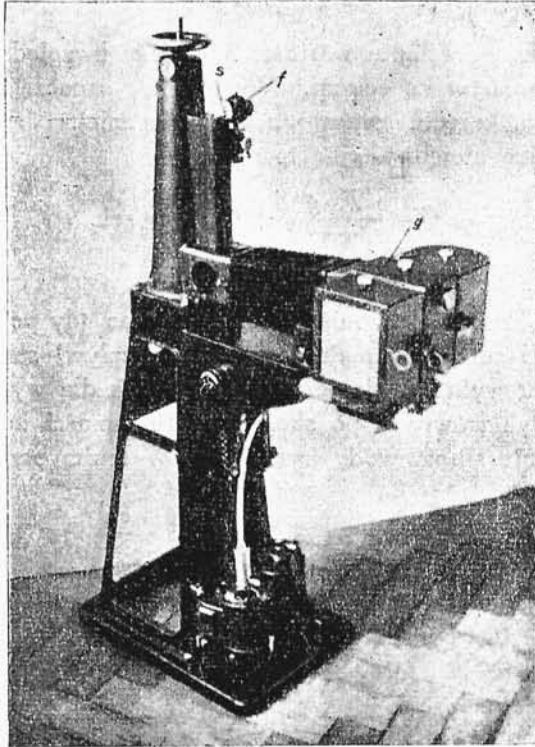


Rys. 235.

Wykres wahań ciśnienia w przewodzie po jego zamknięciu.

końcowy wykresu musi być tak wybrany, by odpowiadał temu momentowi, kiedy słup wody znajduje się pierwszy raz w położeniu równowagi. Warunek ten jest spełniony w pierwszym punkcie zwrotnym, tj. w pierwszym maximum lub minimum ciśnienia po skończeniu zamykania rurociągu.

Ulepszone przyrządy do pomiaru ciśnienia (rys. 236 a i b) są skonstruowane przez Voith'a i Volkhardt'a¹¹³⁾. W przyrządach tych mierzone jest ciśnienie na tłok „b” (rys. 236 b) znajdujący się w cylindrze pomiarowym „a”. Cylinder ten połączony jest z przewodem, w którym pragniemy obliczyć ciśnienie. Część górną cylindra przed



Rys. 236 a.

Przyrząd do pomiaru ciśnienia.

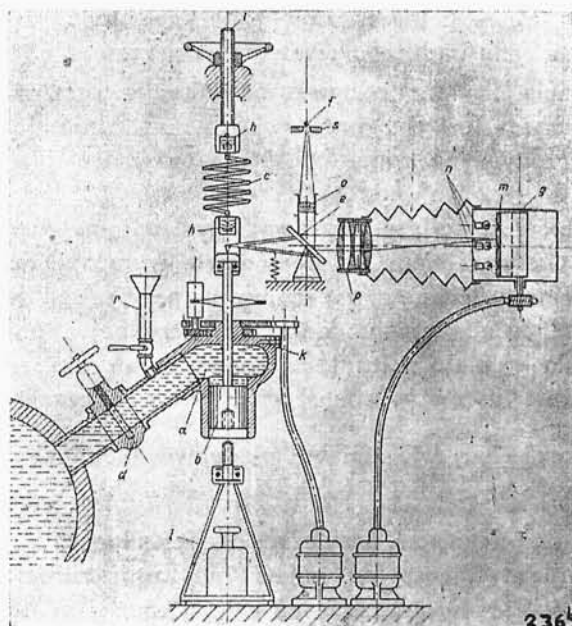
otwarcie zasuw „d” napełnia się oliwą przez rurkę „r” przy otwartym kranie „k”, przez który uchodzi powietrze. Tłok „b” zawieszony jest na sprężynie „c” regulowanej śrubą „i”. Ruchy tłoka przenoszone są na lustro „e”.

¹¹³⁾ P. Volkhardt. Ein neuer Druckschreiber für Wassermessungen nach dem Gibson-Verfahren.

H. Deckel. Druckschreiber und Versuche zur Bestimmung von Wassermengen nach dem Gibson-Verfahren.

Obie publikacje drukowane w Mitteilungen des Hydraulischen Instituts der Technischen Hochschule München. Zeszyt 6 (r. 1933).

Promień świetlny wychodzący z „f” przechodzi przez szparę „s” prostopadłą do płaszczyzny rysunku, a następnie w formie płaskiej wstęgi świetlnej odbija się od lusterka „e” i pada na płaszczyznę „m” (przesłone). W tej przesłonie znajduje się wąska



Rys. 236 b.

Przyrząd do pomiaru ciśnienia.

- a — cylinder pomiarowy,
- b — tłok,
- c — sprężyna,
- d — zasuwa wyłączająca przyrząd pomiarowy,
- e — lusterko przechyłne,
- f — źródło światła,
- g — kamera ze światłoczułą taśmą rejestracyjną,
- h — łożyska,
- i — śruba regulacyjna sprężyny,
- k — otwór do wypuszczania powietrza w czasie napełniania oliwą cylindra pomiarowego,
- l — szalka z odważnikami do obciążania tłoka w czasie wzorcowania aparatu,
- m — przesłona z pionową szczeliną; tuż za nią znajduje się papier fotograficzny przesuwający się w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rysunku,
- n — lampki do wyświetlania na taśmie fotograficznej 3 poziomów porównawczych.
- o — soczewka skupiająca,
- p — obiektyw skupiający odbite od lusterka promienie w płaszczyźnie „m”,
- r — rurka do wlewania oliwy,
- s — szczelina prostopadła do płaszczyzny rysunku.

pionowa szpara, która — przecinając prostopadle smugę światła odbitą od lusterka — wycina z niej bardzo wąski promień świetlny. Szczelina „s” może być regulowana; zwykle ma ona 0,05 mm szerokości. Szczelina w przesłonie „m” ma też 0,05 mm szerokości, więc promień świetlny ma wymiar $0,05 \times 0,05$ mm. Promień ten na przesuwającej się taśmie fotograficznej znaczy wychylenie lusterka „e” wywołane zmianami badanego ciśnienia w przewodzie.

Skalowanie aparatu odbywa się w ten sposób, że bada się wielkość wychyleń lusterka przy znanym obciążeniu tłoka odważnikami umieszczonymi na szalce „l”, którą przymocowuje się od spodu do tłoka.

Na taśmie fotograficznej rysowany jest automatycznie przebieg krzywej wysokości ciśnienia, której odcięte wyrażają czas a rzędne ciśnienie w metrach (znane z wycechowania przyrządu). Jeśli 1 cm na osi odciętej odpowiada x sekundom, a 1 cm rzędnej odpowiada wysokości ciśnienia = y metrów, to 1 cm^2 powierzchni wykresu ciśnienia odpowiada wartości x y (wysokość ciśnienia razy czas). Ten iloczyn

mnożony przez $\frac{g}{\sum \frac{\Delta L}{A}}$ daje zmianę przepływu sekundowego po do-

daniu wody przeciekającej, przy czym ΔL jest długością elementu rury, zaś A odpowiadającym mu polem przekroju rurociągu. Sumowanie musi być przeprowadzone na całej długości od miejsca zamknięcia do miejsca pomiaru. Z wykresu można wziąć bezpośrednio wysokość absolutną ciśnienia.

11. Przepływomierze dynamiczne (oparte na pomiarze różnicy ciśnienia)

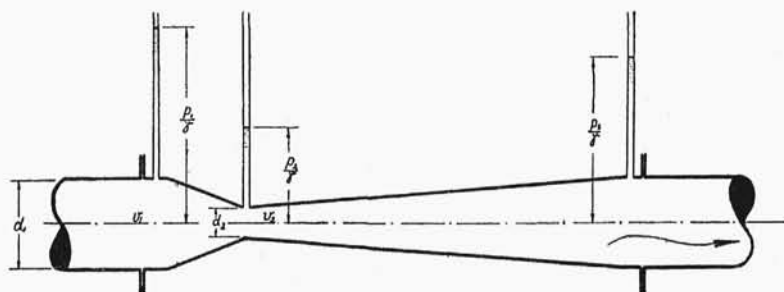
Na tej metodzie polega sposób pomiaru przy pomocy zwężki i dyszy Venturiego oraz przepony. Ciecz mierzona przeprowadzamy przez zwężony przekrój przyrządu, osiągając w ten sposób konieczną do pomiaru różnicę ciśnienia. Przy wszystkich tego rodzaju urządzeniach rośnie ilość przepływu w stosunku do pierwiastka kwadratowego z różnicy ciśnień, albo różnica ciśnień proporcjonalnie do kwadratu ilości przepływu (przy przepływie np. 10 razy mniejszym różnica ciśnień jest 100 razy mniejsza, niż przy przepływie pierwotnym). Właściwość ta nie jest zbyt przyjemna, gdyż rośnie również strata ciśnienia, którą wywołuje w przewodzie przyrząd pomiarowy, a wzrost jej jest proporcjonalny też do kwadratu przepływu. Strata ciśnienia przyrządu pomiarowego jest stratą energii, a strata

ta musi być utrzymana w granicach możliwie niewielkich. Osiągnięta w przyrządzie różnica ciśnień i wywołana przez to strata ciśnienia w przewodzie są ze sobą w określonym związku. Wielkość tego stosunku zależy od rodzaju przyrządu.

Pomiar opiera się na zasadzie równości sumy statycznego i dynamicznego ciśnienia w poszczególnych profilach, co określa równanie (rys. 237):

$$p_1 + \gamma \frac{v_1^2}{2g} = p_2 + \gamma \frac{v_2^2}{2g} \quad (a)$$

Oznaczają tutaj p_1 i p_2 — ciśnienia statyczne w rurociągu w kg/m^2
 v_1 i v_2 — średnią prędkość w przekrojach w m/sek
 γ — ciężar właściwy w kg/m^3 .



Rys. 237.

Zmiana prędkości i ciśnienia spowodowana wbudowaną zwężką.

Posiłkując się równaniem ciągłości $A_1 v_1 \gamma = A_2 v_2 \gamma$ (gdzie A pole przepływu), po skróceniu przez wartość stałą γ oraz oznaczając stosunek $A_2 : A_1 = m$, otrzymamy $v_1 = m v_2$ i następnie z równania (a):

$$p_1 - p_2 = (1 - m^2) \frac{v_2^2}{2g} \gamma$$

Wobec tego prędkość przepływu wyniesie $v_2 = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{\frac{2g(p_1-p_2)}{\gamma}}$

Teoretyczny przepływ wynosi $Q_0 = \varepsilon A_2 \sqrt{2g \Delta H}$ m^3/sek gdzie ΔH jest różnicą ciśnień wyrażoną w metrach słupa wody $\left(\Delta H = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \right)$,

zaś $\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}}$. W rzeczywistości ze względu na opory ruchu

przepływ będzie nieco mniejszy, co uwzględniamy wprowadzając współczynnik wydatku: $Q = \mu Q_0$. Współczynnik wydatku μ musi

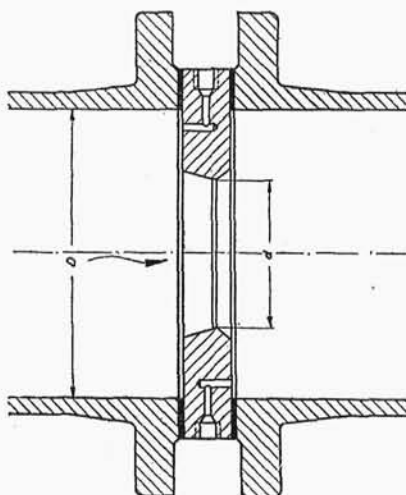
być ustalony przez cechowanie. Ostatecznie, jeśli oznaczamy $\mu \cdot \epsilon = \alpha$, otrzymamy

$$Q = \alpha A_2 \sqrt{2 g \Delta H} = \alpha m A_1 \sqrt{2 g \Delta H} \quad \text{m}^3/\text{sek} \quad (101)$$

Zmianę prędkości można wywołać przez wstawienie do rurociągu a) przepony, b) dyszy, c) zwężki Venturiego.

1. Przepona^{*)}.

Przepona jest najprostszym przyrządem do pomiaru. Zasada jego polega na umieszczeniu w przewodzie blachy z wyciętym pośrodku otworem o średnicy, będącej zwykle w pewnym stosunku do średnicy przewodu. Przepływ zależy od współczynnika wydajności przepony, który jest zmienny w granicach od 0,6 do 1,0 za-



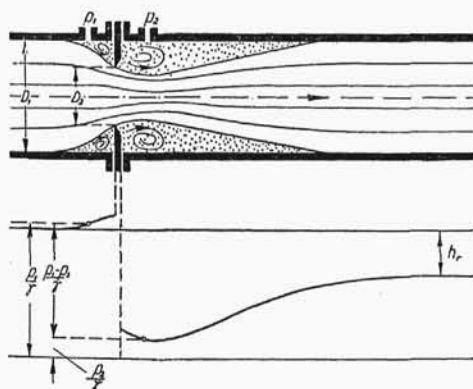
Rys. 238.

Kryza pomiarowa.

leżnie od stosunku otworu przepony do przekroju rury. Zmienna wartość współczynnika wydajności jest wadą tej metody pomiaru i wymaga poprzedniego ścisłego wycechowania urządzenia. Również niekorzystną cechą jest mała dopuszczalna różnica ciśnień w czasie pomiaru, gdyż ta uzyskana różnica ciśnień jako energia jest w swej większej części stracona. Strata energii wynosi tu (zależnie od zwę-

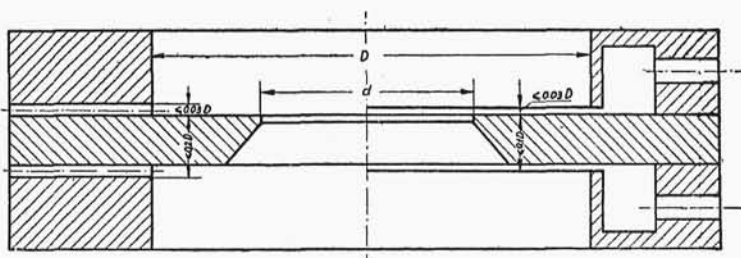
^{*)} Do tego samego rodzaju urządzenia należy flansa pomiarowa (Messflansch rys. 238), która różni się od przepony kształtem przekroju pomiarowego — jest to jakby zgrubiona przepona.

żenia przekroju) 30..... 100% różnicy ciśnienia. Na rys. 239 uwidoczono charakter przepływu. W pewnej odległości od przepony objawia się największe zwężenie strugi; w partiach, gdzie nie ma czynnego ruchu, woda znajduje się w ruchu krążącym (wirowym).



Rys. 239.
Przepływ przez przeponę.

Prawidłowy pomiar różnicy ciśnień jest bardzo trudny. Zwykle pomiaru ciśnienia dokonywa się w dwu punktach: tuż przed i zaraz za przeponą. Zasadniczo powinno się mierzyć w punkcie, gdzie strugi napływającej wody są jeszcze równoległe, oraz w punkcie największego zwężenia.



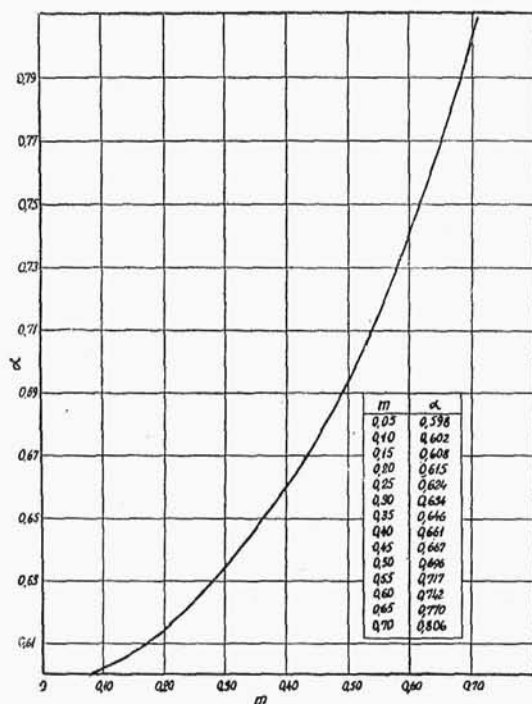
Rys. 240.
Wymiary przepony według norm niemieckich.

Opisywany sposób ma tę zaletę, że bardzo łatwo zmontować całe urządzenie, jednak zasięg stosowalności jest ograniczony. Na rys. 240 podano kształt i wymiary przepony według norm niemieckich.

Objętość przepływu określa się ze wzoru (101), gdzie przez α rozumieć należy współczynnik ustalony doświadczalnie. Według Spitzglassa¹¹⁴⁾ (Chicago) przy odpowiednim umieszczeniu przepony

¹¹⁴⁾ J. M. Spitzglass. Orifice coefficients. Data and results of tests. Mechanical Engineering. 1923, Nr 6.

i otworów pomiarowych dokładność pomiaru może być bardzo duża i błąd utrzymamy w granicach nie dochodzących do $\pm 1\%$. Doświadczenia przeprowadzone przez niego dowodzą, że współczynnik α zmienia się bardzo niewiele dla różnego stosunku przekrojów otworu i rury,



Rys. 241.

Współczynnik wydatku α dla przepon o różnym stosunku pola przekroju otworu i przewodu.

oraz że stosunkowo jest większy przy średnicach mniejszych. Wartości współczynnika α w zależności od $m = A_2 : A_1$ dla przepon normalnych według norm niemieckich¹¹⁵⁾ podano na rys. 241.

2. Dysza.

Przy pomocy dysz łatwiej wykonać pomiar z większą dokładnością; szczególnie praktycznym okazał się ten sposób do mierzenia przepływu w rurociągach zakładów wodnych. W takich wypadkach odwrotnie do wodomierza Venturiego prędkość osiągnięta w miejscu największym zostaje dalej utrzymana. W zakładzie Siebner

¹¹⁵⁾ Regeln für die Durchflussmessung mit genormten Düsen und Blenden. Wydane przez Verein deutscher Ingenieure w 1935 r.