

W. CHRAMIEC i Z. STEFANKO

POMIARY OPORÓW PRZEPŁYWU WODY W RUROCIĄGACH
O DUŻYCH ŚREDNICACH I Z RÓŻNYCH MATERIAŁÓW

Obliczenie oporów przepływu wody w rurociągach, w szczególności magistralnych o dużych średnicach natrafia wciąż u nas na trudności, gdyż stosowane metody obliczeń nie dają zadowalających rezultatów. Zagadnienie to, mające wpływ na wymiarowanie rurociągów, ma duże znaczenie w projektowaniu, a co za tym idzie wpływ na koszt budowy rurociągów. Te względy zdecydowały, że w ramach prac naukowo-badawczych Katedra Wodociągów i Kanalizacji Politechniki Śląskiej podjęła w/w temat do opracowania na zlecenie Ministerstwa Gospodarki Komunalnej w ramach Uchwały Nr 2 Prezydium Rządu.

Dla obliczeń oporów przepływu wody w rurociągach stosowane są u nas najczęściej wzory empiryczne Manniga, Kuttera i Pawłowskiego. Wzory te przy normalnie stosowanych współczynnikach ($K = 80$ przy wzorze Manniga, $m = 0,25$ przy wzorze Kuttera, $n = 0,012$ przy wzorze Pawłowskiego) dają wyniki różniące się między sobą o około 10%.

W porównaniu z wynikami uzyskanymi w oparciu o wzory, których budowa oparta jest na teorii przepływu cieczy, wspomniane powyżej wzory empiryczne dają przy prędkościach przepływu w granicach od 1,0 - 2,0 m/sek wyniki większe o około 20 - 50%.

Wzory empiryczne zbudowane są przy założeniu, że opory przepływu wznoszą się proporcjonalnie do kwadratu prędkości. Założenie to jest nieścisłe, gdyż wzrost ten jest nieco słabszy i tym tłumaczyć należy różnice między rzeczywistymi oporami przepływu, a wielkością oporów obliczonych wzorami empirycznymi, w szczególności przy większych prędkościach przepływu.

Wspomniane na wstępie badania wykonano na rurociągach eksploatowanych przez Wojewódzkie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w Katowicach oraz Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w Bielsku Białej. Celem ich było ustalenie rzeczywistych strat ciśnienia w rurociągach

eksploatowanych jak również przeprowadzenie w oparciu o wyniki wykonanych pomiarów analizy wzorów do obliczenia oporów przepływu wody w rurociągach i zaleceń odnośnie ich stosowalności.

Wybór rurociągów nadających się do takich badań był bardzo ograniczony. Należało bowiem wybrać rurociągi magistralne o znacznych średnicach, zbudowane z różnych materiałów, o odpowiednich długościach i pracujące przy odpowiednich ciśnieniach statycznych i dynamicznych. Rurociągi te winny były mieć możliwie najmniejszą ilość odgałęzień, zniekształcających wyniki pomiarów, oraz mieć odpowiednią aparaturę pomiarową.

Biorąc pod uwagę w/w momenty zdecydowano pomiary przeprowadzić na rurociągach:

1. Żelbetowym - grawitacyjnym \emptyset 1480 mm
o długości 15,55 km
2. Stalowym - tłocznym \emptyset 1200 mm
o długości 9,75 km
3. Żeliwnym - tłocznym \emptyset 800 mm
o długości 15,8 km
4. Żeliwnym - tłocznym \emptyset 500 mm
o długości 9,1 km

Zgodnie z opracowanym w odniesieniu do każdego z w/w rurociągów programem badań:

- a) przeprowadzono kontrolę przyrządów pomiarowych,
- b) zainstalowano dodatkowe aparaty pomiarowe,
- c) wykonano pomiary ciśnienia, wydatku i prędkości przepływu oraz w oparciu o uzyskane i opracowane wyniki pomiarów, dokonano analizy wyników i opracowano wnioski.

Wykonanie pomiarów poprzedziły pomocnicze prace przygotowawcze obejmujące opracowanie tabel oraz wykresów do obliczenia przepływu w rurociągach o średnicach, odpowiadających dymensjom badanych rurociągów według stosowanych powszechnie wymienionych na wstępie wzorów.

Znacznym utrudnieniem w pracach badawczych była konieczność dostosowania się do warunków eksploatacyjnych, które w dużym stopniu ograniczały możliwość przeprowadzenia pomiarów. Istotą wykonanych badań był pomiar ciśnienia w określonych przekrojach i pomiar prędkości przy znanej wewnętrznej średnicy rurociągów.

Rurociągi \varnothing 1480 mm i 1200 mm połączone są ze sobą bezpośrednio poprzez stację pomp. Rurociąg żelbetowy posiada złącza kielichowe uszczelnione gumą, a rurociąg stalowy posiada nasuwki kompensacyjne co 60 = 90 m. Profil hydrauliczny obu rurociągów daje wyraźny obraz całego układu Rys. Nr 2.

Do wykonywanych pomiarów wykorzystano następujące urządzenia pomiarowe:

1. Rurkę piezometryczną na rurociągu zbiorczym wody filtrowanej wskazującą poziom wody w początkowym przekroju rurociągu grawitacyjnego \varnothing 1480 mm,

2. Przepływomierze na rurociągach tłocznych z poszczególnych pomp, określające ilości pompowanej wody w czasie dokonywania pomiaru ciśnienia,

3. Manometr membranowy na początku rurociągu tłoczego zbiorczego \varnothing 1200 mm,

4. Manometr na rurociągu odpływowym ze zbiorników. Urządzenia te uzupełniono przez założenie:

- a) rurki piezometrycznej na rurociągu \varnothing 1480 mm za studzienką spiętrzającą (gdyż opory przepływu na pierwszym odcinku o długości 160 m były zniekształcone),
- b) manometru na końcu rurociągu grawitacyjnego w pobliżu wieży ulgi,
- c) manometru na końcu rurociągu tłoczego \varnothing 1200 mm przed zbiornikami.

Na załączonym profilu oznaczono liczbami i literami wymienione urządzenia. Poprawność wskazań manometrów kontrolowano nie tylko przy pomocy manometrów kontrolnych, ale również przez odczyt manometrów podczas postoju pomp.

Odczyty ciśnienia w punktach "a" i "b" oraz "3" i "c" przy znanych odległościach między tymi punktami wynoszących 15,37 km i 9,28 km pozwoliły na określenie strat ciśnienia. Regulacja dopływu wody na pompy rurociągiem grawitacyjnym przeprowadzona przez dławienie przepływu na filtrach pozwoliła na ustalenie w punktach "a" i "b" zwierciadła wody na niezmiennym poziomie w czasie wykonywania pomiarów. W tych warunkach można było przyjąć, że wydatek rurociągu grawitacyjnego był w okresie dokonywania pomiarów taki sam jak rurociągu tłoczego. Zainstalowane przyrządy pomiarowe

do pomiaru ciśnienia pozwoliły na uzyskanie dokładności w granicach 1,2 - 1,4%.

Wstępny pomiar wielkości przepływu przeprowadzono przy użyciu przepływomierzy zainstalowanych na rurociągach tłocznych poszczególnych pomp, doprowadzających wodę do rurociągu zbiorczego \varnothing 1200 mm.

Przeprowadzona kontrola przepływomierzy wykazała pewne rozbieżności wskazań tarczy, mechanizmu rejestrującego i mechanizmu sumującego.

Oporo przepływu w rurociągach trzeba było określić możliwie dokładnie. Wskazania przepływomierzy były tu niewystarczające. Dlatego oparto się na bezpośrednich pomiarach z wyłączeniem mechanicznych urządzeń pomiarowych, a mianowicie pomierzono dokładnie wewnętrzną średnicę rur \varnothing 1480 mm i \varnothing 1200 mm, z których badane rurociągi były wybudowane, a prędkość przepływu pomierzono przy pomocy zwiększonej dawki chloru. Okazało się, że za pomocą chloru można określić prędkość przepływu na długościach 3,5, 10 i 15 km z dokładnością jednej minuty dla przepływu trwającego od 100 do 250 minut. Metoda postępowania jest prosta i wygodna, gdyż wystarczyło zwiększyć nieco dawkę chloru, a następnie w obranych miejscach rurociągu badać wodę na zawartość chloru za pomocą orthotolidyny. Metodę tę zastosowano przy wszystkich badanych rurociągach. Badania oporów przepływu na rurociągu \varnothing 800 mm, wykonanym z rur żeliwnych kielichowych uszczelnionych gumą przeprowadzono dla odcinka o długości 15,8 km. Urządzenia pomiarowe zainstalowano w studziencie zasuwowej na stacji wodociągowej oraz w studziencie zasuwowej przed połączeniem z rurociągiem \varnothing 600 mm. Objętość przepływu, ustalona przy pomocy wodomierzy zainstalowanych na poszczególnych studniach ujmujących wodę wgłębną sprawdzono analogicznie jak dla rurociągu \varnothing 1200 mm.

Pomiary na rurociągu tłocznym \varnothing 500 mm zbudowanym z rur żeliwnych kielichowych uszczelnionych na sznur i ołów przeprowadzono na odcinku o długości 9 km, przy czym pomiar ciśnienia wykonano w studziencie na terenie stacji wodociągowej oraz w pobliżu zbiornika.

Metody pomiaru zastosowano analogicznie jak w omawianych uprzednio przypadkach.

Przeprowadzone badania wykazały, że opory przepływu w rurociągu \varnothing 1480 mm są większe od oporów wyliczonych przy użyciu wzorów Manninga.

Powodem wysokich oporów jest w tym wypadku duże zapiaśnienie rurociągu grawitacyjnego.

Dla rurociągu \varnothing 1200 mm wyniki pomiarów dają wartości oporów leżące między krzywymi wykreślonymi wg wzorów Prandtl - Colebrooka dla $k = 0,1$ mm i Manninga dla $k = 80$.

Skrajne wartości różnią się o 17% od krzywej Prandtl - Colebrooka dla $k = 0,4$ mm.

Badania przeprowadzone na rurociągu \varnothing 800 mm wykazują, że występujące tu straty ciśnienia również przekraczają wartości obliczone wzorem Manninga. Tak wysokie opory tłumaczą się tu silną inkrustacją rurociągu, spowodowaną tłoczeniem wody niedostatecznie odżelazionej, co stwierdzono podczas wymiany pewnego odcinka rurociągu.

Opory pomierzone na rurociągu \varnothing 500 mm wykazują zbieżność z wynikami uzyskanymi wzorami Manninga. Jak z powyższego wynika, najmniejsze różnice między pomierzonymi oporami, a wyliczonymi ze wzorów wypadają w porównaniu z wynikami uzyskanymi wzorem Manninga. Takie stwierdzenie jednak nie pozwala jeszcze na wysuwanie ostatecznych wniosków, jeżeli uwzględni się przyczyny, które wywołują tak wysokie straty ciśnienia. Omawiając opory przepływu nie można pominąć wieloletnich badań i doświadczeń naukowców w skali światowej, które doprowadziły już do uzgodnionych sformułowań.

Spadek ciśnienia przy przepływie cieczy określony jest wzorem $p = \frac{L}{d} \times \frac{\lambda}{2g} v^2$, w którym λ zależy od liczby Reynoldsa, uwzględniającej kinematyczny współczynnik lepkości. Badania więc dla rur bezwzględnie gładkich stają się zbędne. W praktyce mamy jednak do czynienia z rurami o ścianach mniej lub więcej szorstkich.

Na międzynarodowym Kongresie wodociągów w Londynie w 1955 roku przyjęto wzory Prandtl - Colebrooka, które w formułach na " λ " wprowadzają wartość szorstkości " k ". Na powyższym Kongresie uznano, że dla nowych magistralnych rurociągów stalowych, żeliwnych i azbestocementowych z wewnętrzną gładką izolacją należy przyjmować wartość $k = 0,1$ mm natomiast dla nowej sieci miejskiej $k = 0,4$ mm. Uznano ponadto, że wartość szorstkości " k " może być określona niedwuznacznie tylko dla nowych rurociągów, natomiast brak na razie danych dla jednoznacznego określenia szorstkości dla rur starych z różną wewnętrzną korozją. Postanowienia Kongresu znalazły swój wyraz w artykułach ogłoszonych w 1957 r. przez miesięcznik francuski L'eau Nr 2 i niemiecki G.W.F. Nr 28. Zachodzi pytanie jak ustosunkować się do postanowień Kongresu londyńskiego i czy uznać wzory Prandtla - Colebrooka za miarodajne, skoro wyniki badań przeprowadzonych na czterech różnych rurociągach zbliżają się do wyników otrzymanych ze

wzorów Manninga. Wzory Manninga są u nas bardzo rozpowszechnione i propozycje stosowania nowych wzorów będą przyjmowane opornie.

Idąc jednak z postępowaniem nauki należy zagadnienie rozpatrzyć z pełnym obiektywizmem. Wzory Prandtl - Colebrooka są wynikiem wieloletniej pracy naukowców i ustalone zostały w oparciu o bardzo duży materiał doświadczalny. Wzory te oparte są na teorii przepływu cieczy w przewodach zamkniętych i jako takie powinny być uznane za miarodajne dla określenia oporów przepływu wody w rurociągach.

Idzie tu tylko o ustalenie, jaki współczynnik szorstkości "k" byłby w naszych warunkach wykonawstwa najbardziej odpowiedni. Jeżeli uprzednio mówiliśmy, że opory otrzymane z pomiarów były większe od oporów wg wzorów Prandtl - Colebrooka, to odnośne porównania dotyczyły wartości szorstkości 0,1 mm i 0,4 mm. Przy przyjęciu jednak innych wartości "k", otrzymamy dla różnych średnic i prędkości wyniki zgodne z rzeczywistością. Zgodności takiej nie otrzymamy przy wzorach empirycznych Manninga i innych. Zmieniając odnośne współczynniki w tych wzorach uzyskamy, ściśle rzecz biorąc, zgodność tylko dla pewnej jednej średnicy i pewnej jednej prędkości. Aby jednak ustalić odpowiednie współczynniki szorstkości dla naszych warunków do wzorów Prandtl - Colebrooka nie można poprzestać na omówionych w niniejszej pracy pomiarach, wykonanych tylko na czterech rurociągach. Należałoby pomiary rozszerzyć i przeprowadzić badania na szeregu innych rurociągów stosując jednolitą metodą badań.

Dla opracowania jednolitej metody badań można by przyjąć metodę obraną w niniejszej pracy, tj. pomiar prędkości przepływu wody w rurociągu przy pomocy 3 kolejnych nieco zwiększonych dawek chloru i pomiar strat ciśnienia przy użyciu dostatecznie czułych manometrów przynajmniej na 3 punktach badanego rurociągu.

W dotychczasowej praktyce odbiór nowych rurociągów polegał na próbie ich szczelności przy odpowiednim ciśnieniu. Uznając wzory Prandtl - Colebrooka uzyskujemy nowy ważny sprawdzian należytego wykonawstwa rurociągów, a następnie właściwej ich eksploatacji.

Przeprowadzone badania oraz analiza zagadnienia oporów przepływu w rurociągach pozwalają na podstawie następujących wniosków:

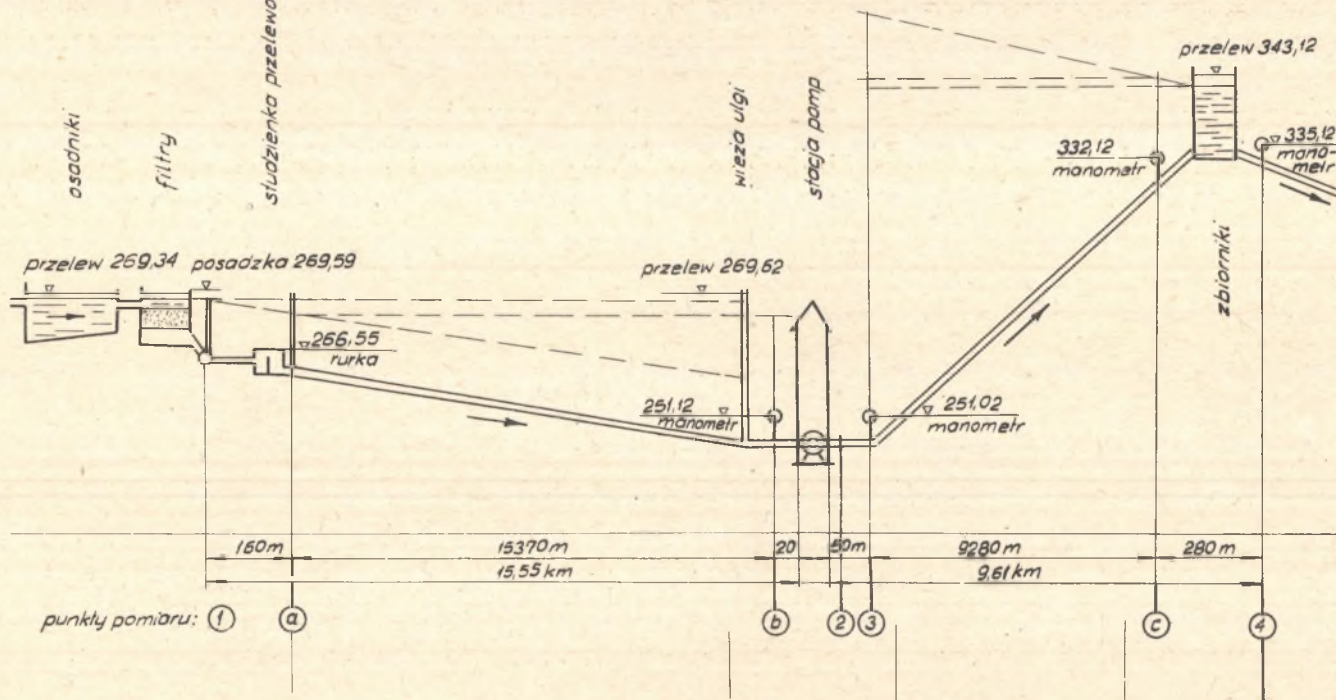
1. Jednym z kryteriów przy odbiorze rurociągów przez Inwestora powinno być stwierdzenie, jaką wartość osiągają opory przepływu. Należy dążyć do tak porządnego wykonawstwa

rurociągów, (gładkość wewnętrznych ścian, czystość rur, czyste złącza itp.), aby dla rurociągów magistralnych wartość szorstkości wynosiła $k = 0,1$ mm, a dla sieci $k = 0,4$ mm przy stosowaniu wzorów Prandtl - Colebrooka.

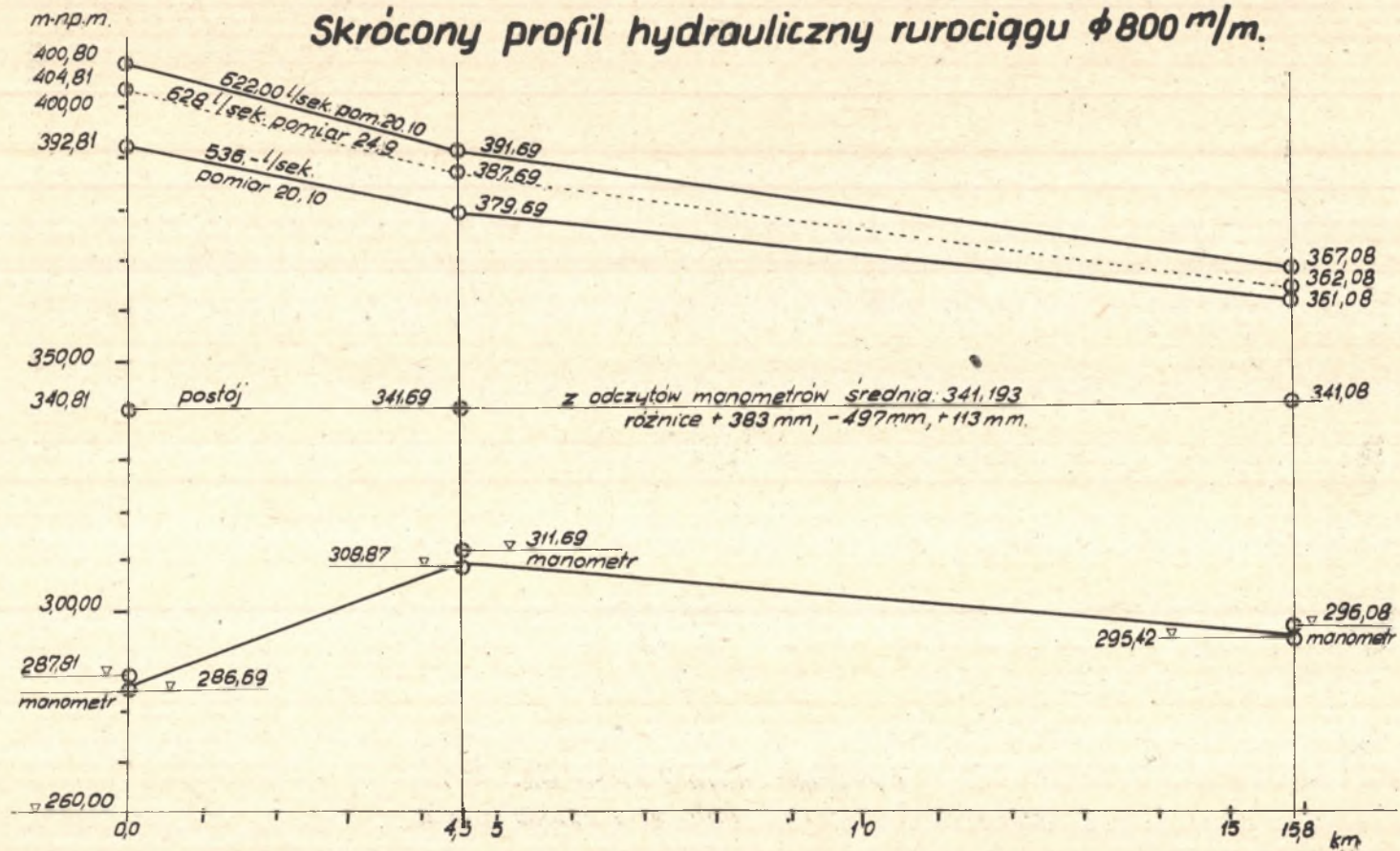
2. Użytkownik wodociągów powinien być zobowiązany do utrzymania rurociągów w czasie eksploatacji w należytej czystości. Stwierdzone przy odbiorze wartości szorstkości "k" mogą ulegać tylko powolnym zawyżeniom, odpowiadającym normalnej inkrustacji rur.
3. Projekt rurociągów winien przewidywać i umożliwiać:
 - a) skuteczne płukanie rurociągu z osadów,
 - b) przeprowadzenie pomiarów przepływu wody i strat ciśnień dla ustalenia oporów przepływu w rurociągach.
4. Należy przeprowadzić pomiary oporów przepływu wg jednolitej metody na rurociągach obecnie opracowanych i na innych, w pierwszym rzędzie na rurociągach:
 - a) \varnothing 600 mm,
 - b) \varnothing 750 mm,
 - c) \varnothing 800 mm,
 - d) \varnothing 800 mm.
5. Na podstawie powyższych pomiarów należy ustalić, jakie w naszych warunkach wykonawstwa i eksploatacji, powinny być normalne opory jednostkowe.
Dla tak ustalonych oporów, wyliczone wartości szorstkości "k" dla wzorów Prandtl - Colebrooka byłyby miarodajne dla obliczeń hydraulicznych w projektach wodociagowych.
6. Poprzez stałe, w pewnych odstępach, np. co rok prowadzone kontrolne pomiary oporów przepływu będzie można uzyskać bardzo poważne oszczędności w użyciu energii elektrycznej na stacjach pomp. Jest możliwe, że oszczędności te wyniosą około 10% w poborze obecnego zużycia energii elektrycznej, co oznacza duże oszczędności w skali krajowej.

Schematyczny profil hydrauliczny rurociągów $\phi 1480 \text{ m/m}$ i 1200 m/m .

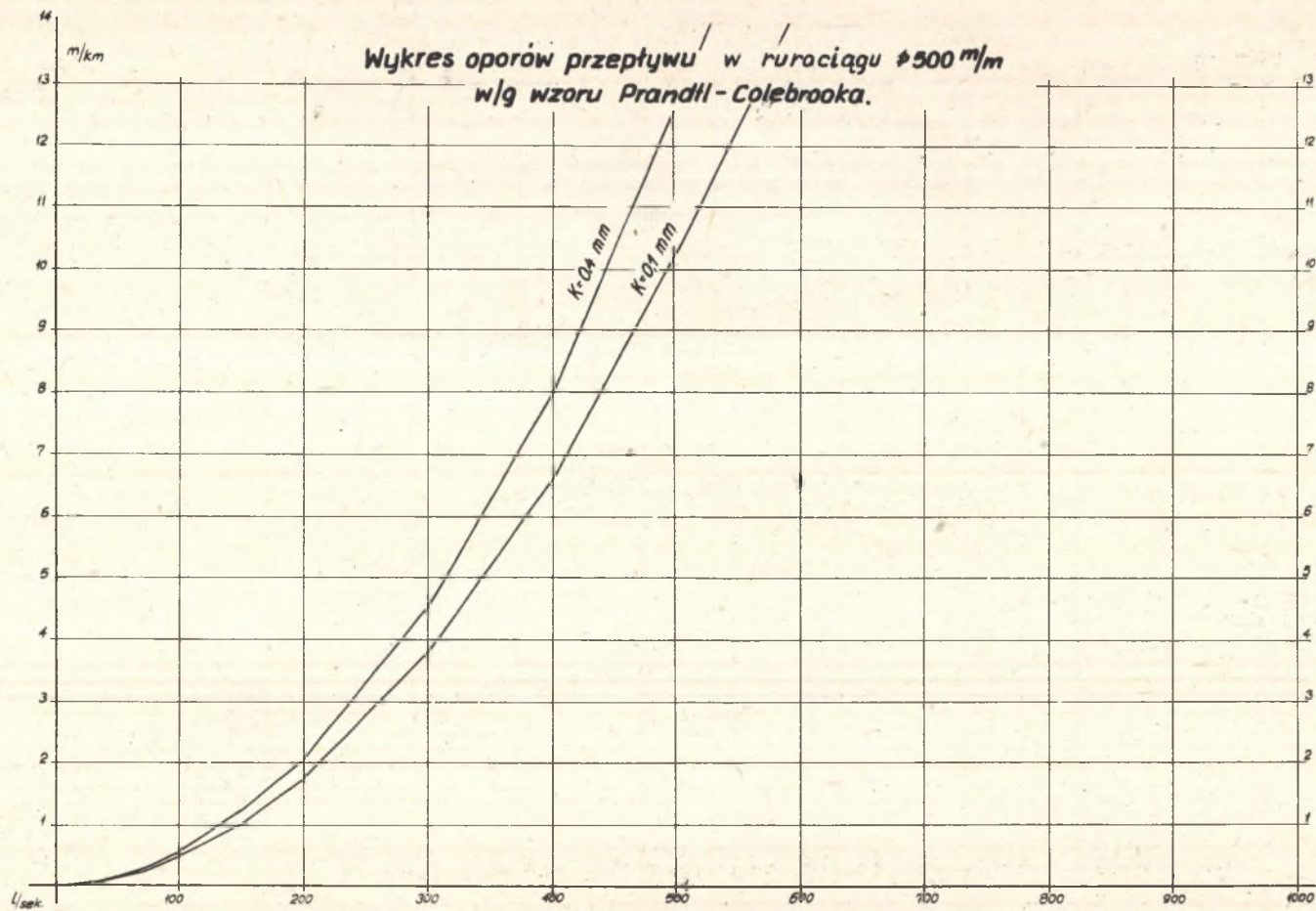
/podane rzędne są skorygowane wg odczytów
manometrów w czasie postoju pomp/.



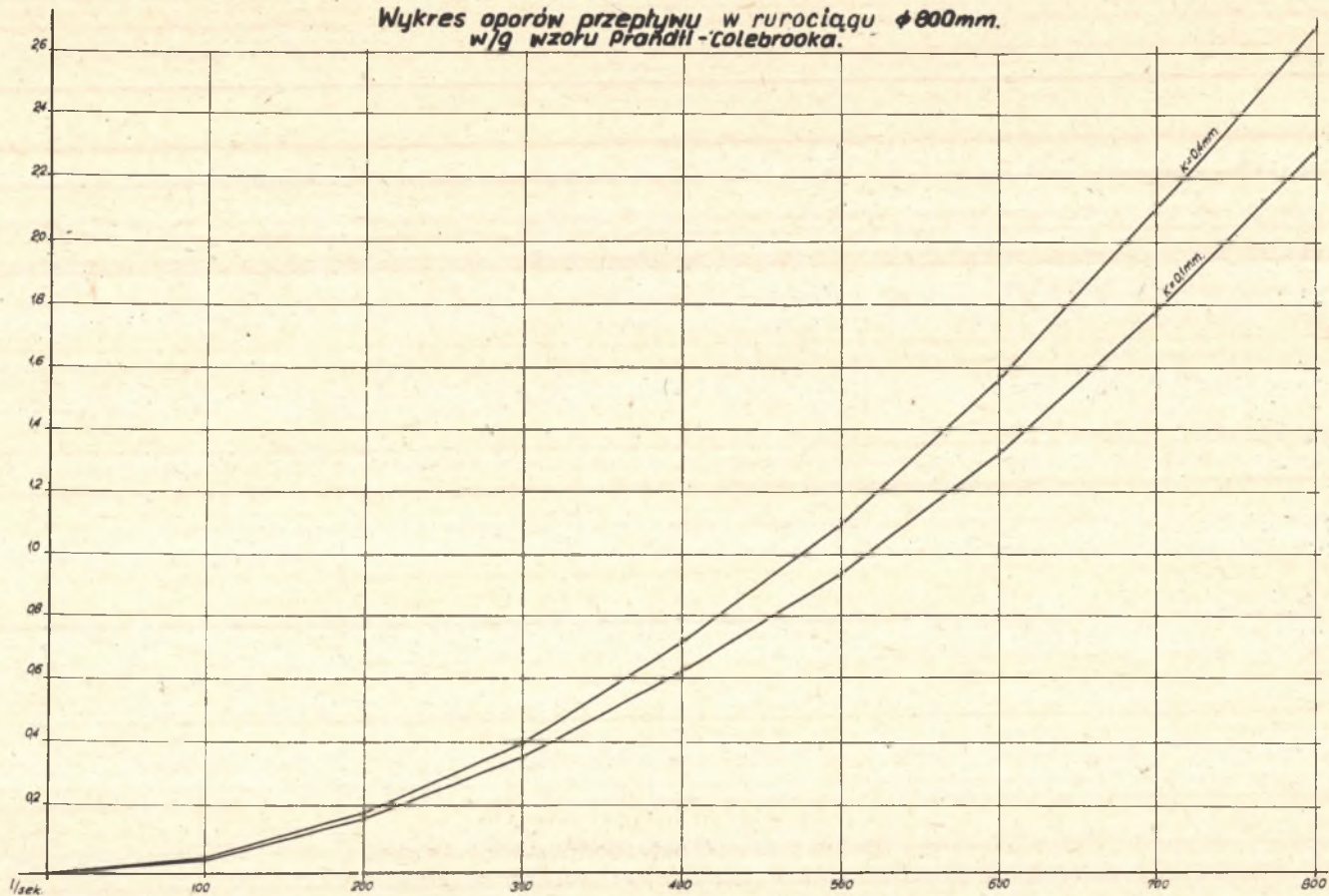
Skrócony profil hydrauliczny rurociągu $\phi 800 \text{ m/m}$.

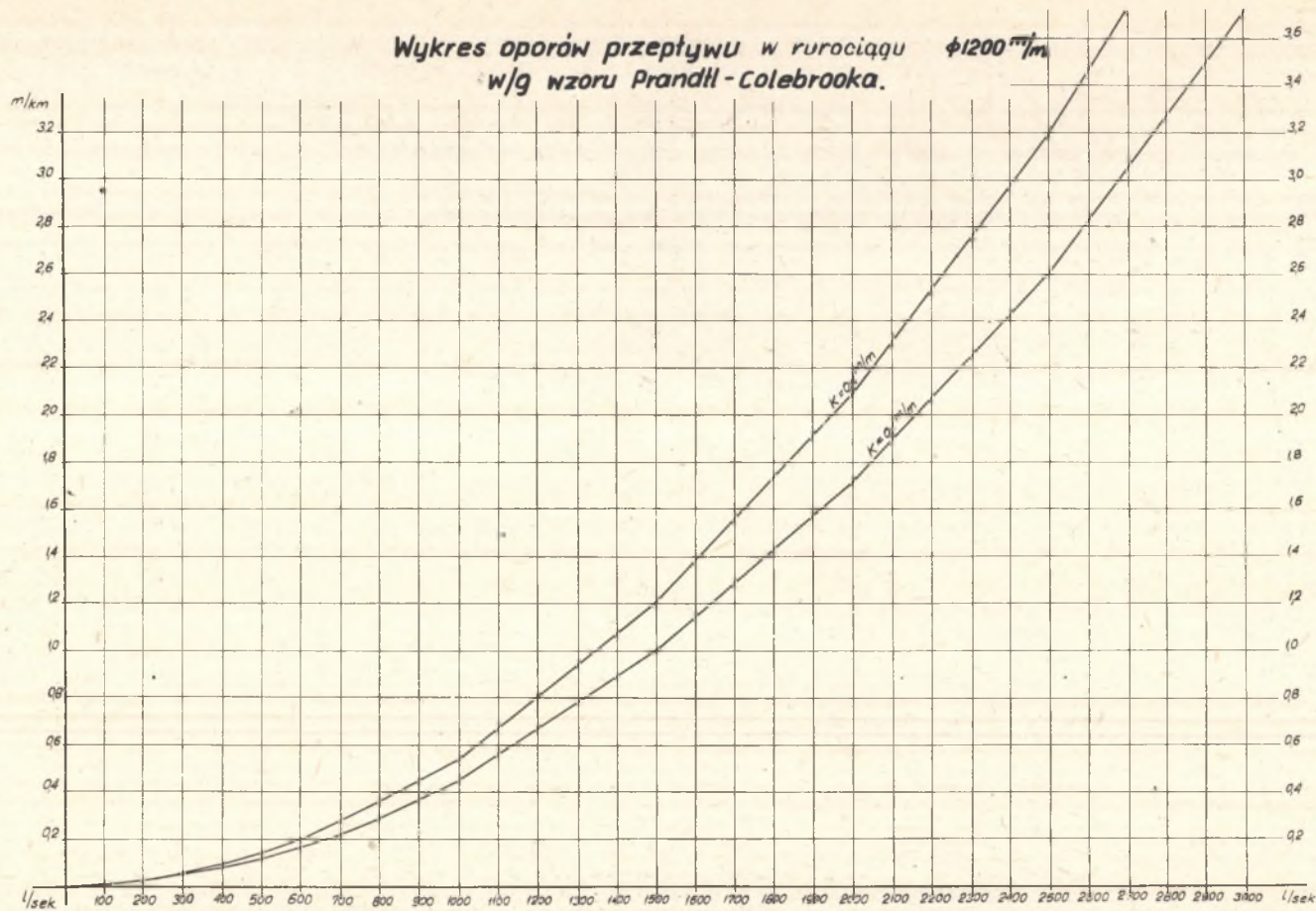


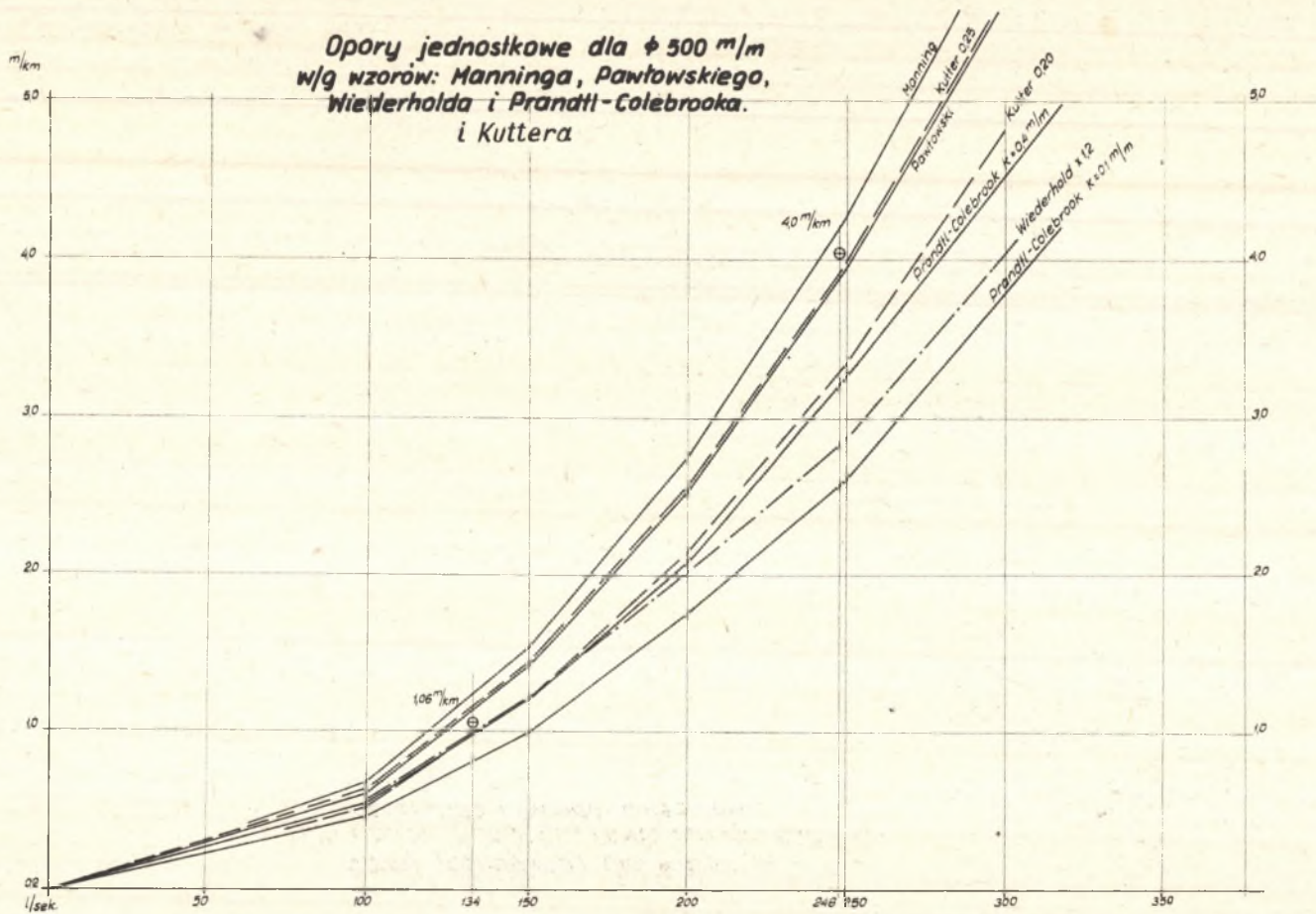
Pondary oporów przepływu wody ...

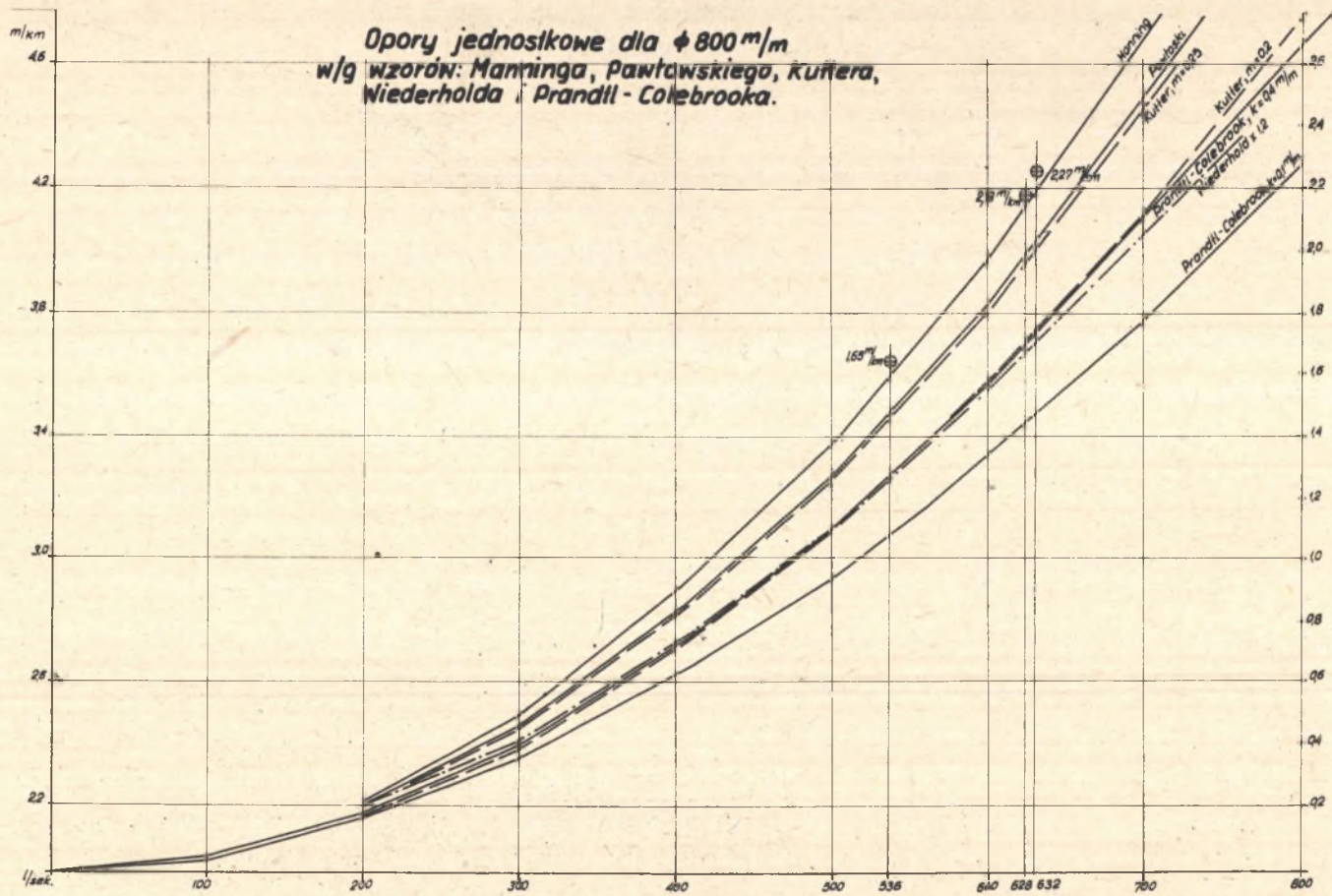


Wykres oporów przepływu w rurociągu $\phi 800\text{mm}$.
w/g wzoru Prandtl-Colebrooka.

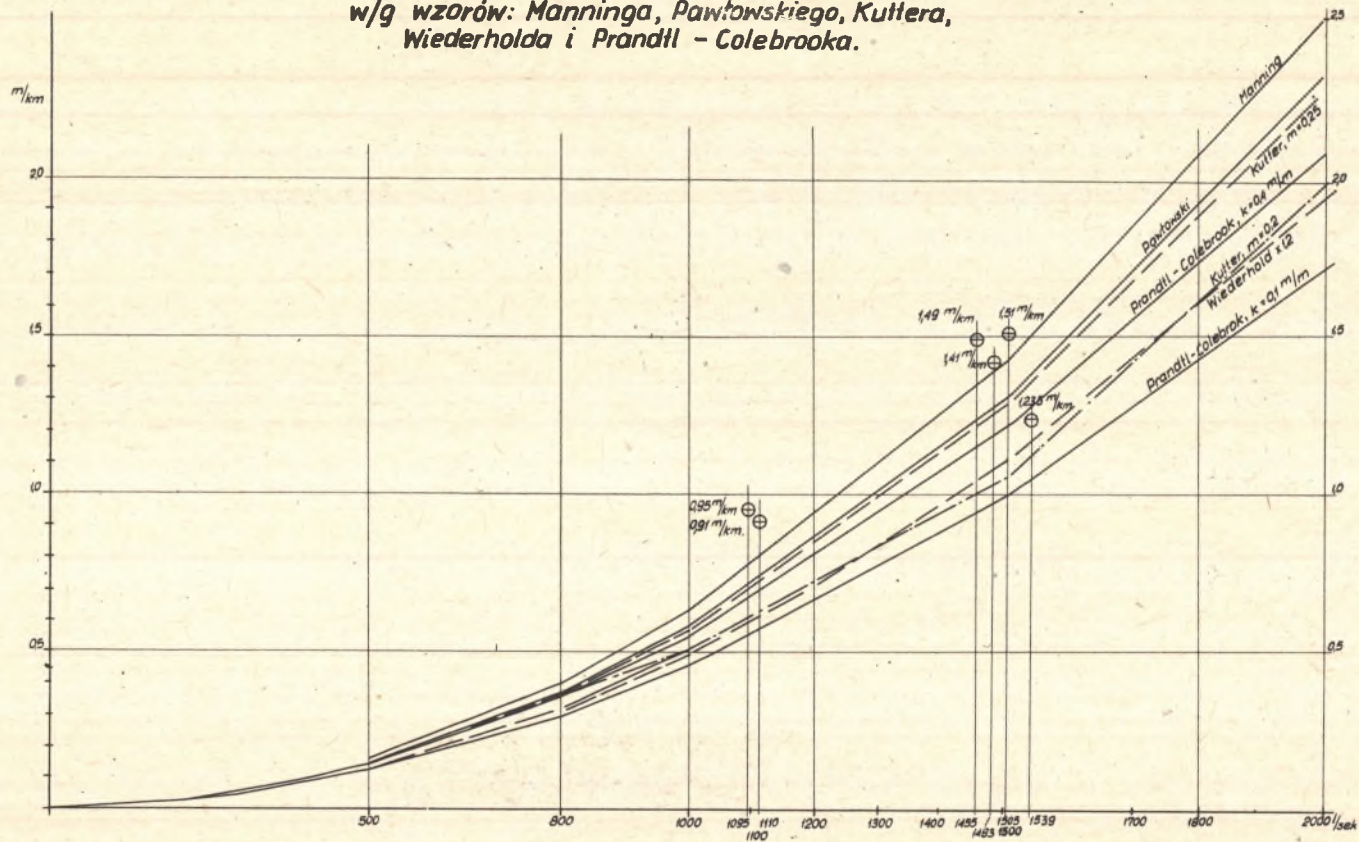




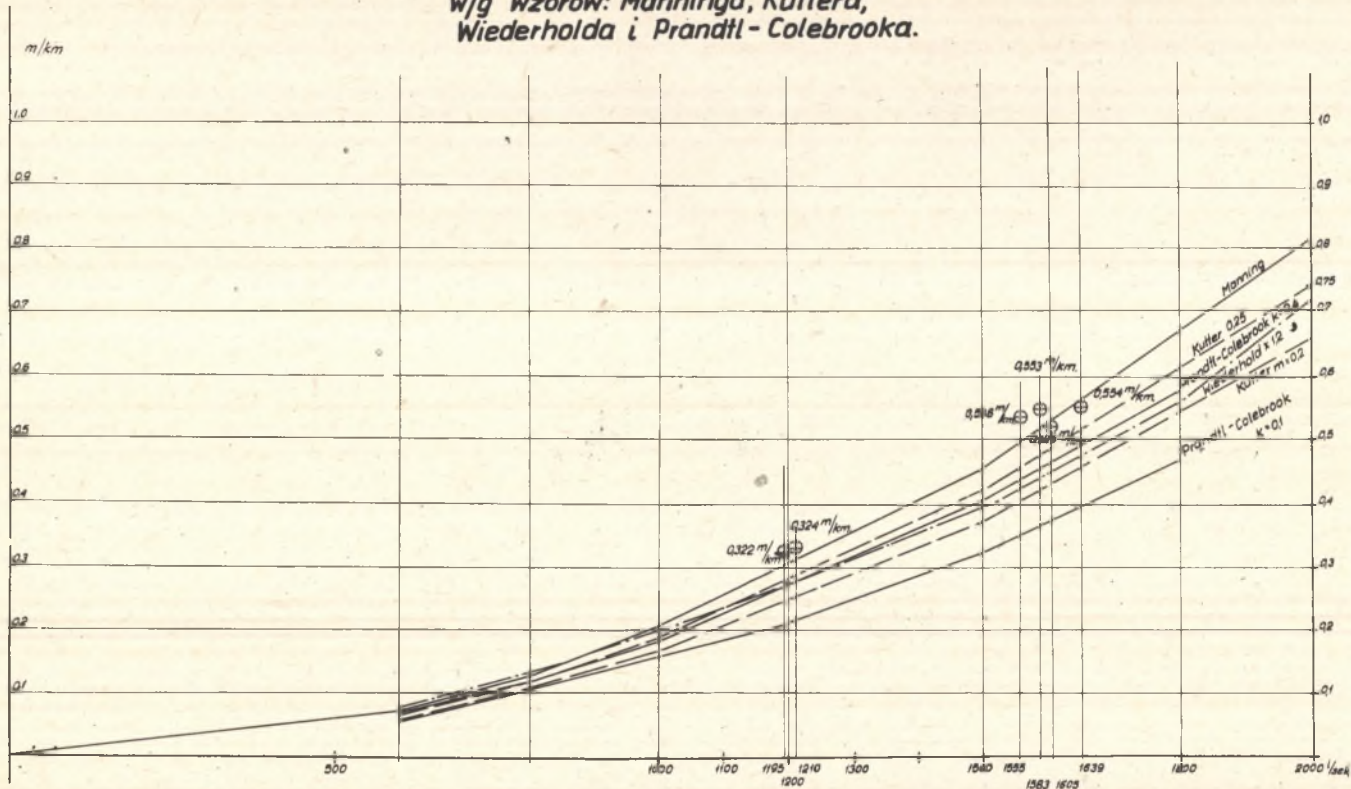




**Opory jednostkowe dla $\phi 1200\text{ m/m}$
w/g wzorów: Manninga, Pawłowskiego, Kuttera,
Wiederholda i Prandtl - Colebrooka.**

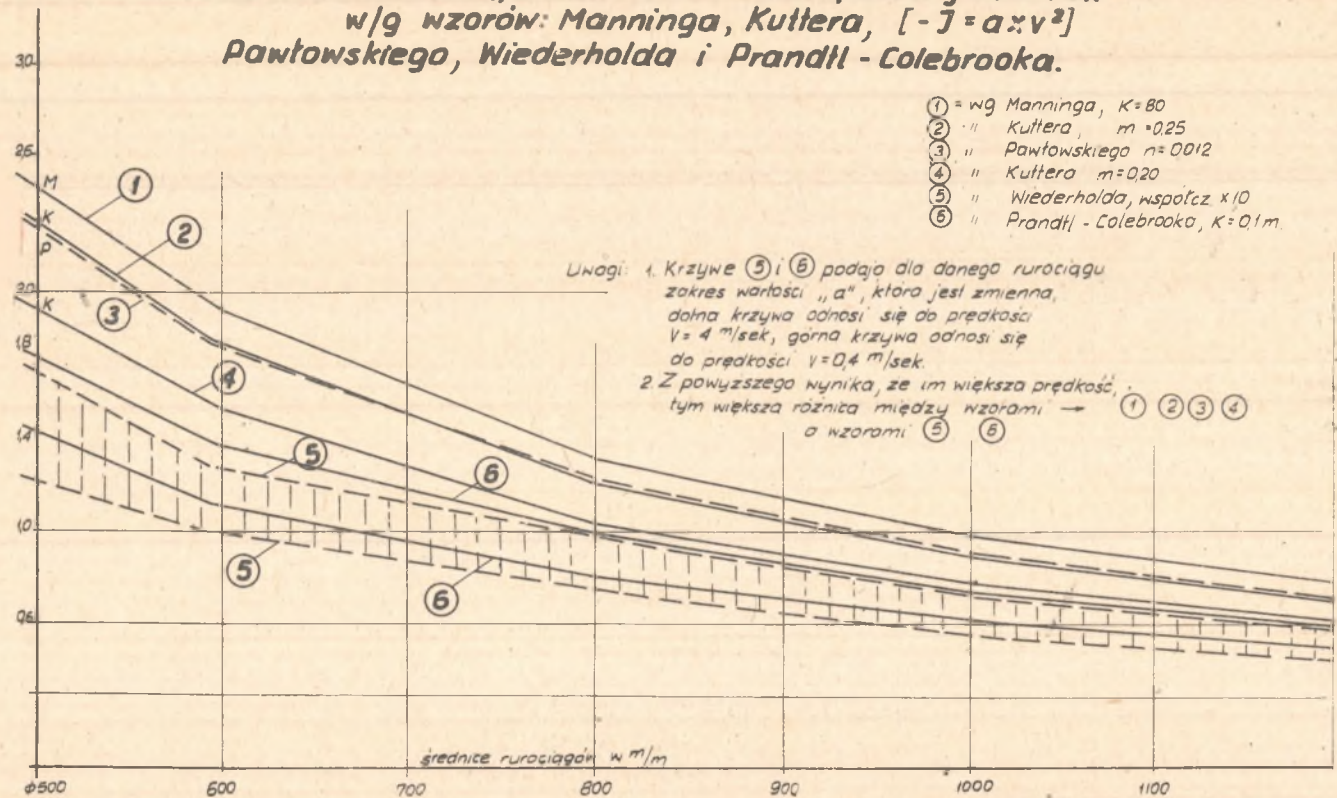


Opory jednostkowe dla $\phi 1480$ m/m
w/g wzorów: Manninga, Kuttera,
Wiederholda i Prandtl - Colebrooka.



wielkość „a”

**Wykres wielkości „a” dla obliczenia oporów jednostk. -
w/g wzorów: Manninga, Kuttera, [-] = $a \times v^2$
Pawłowskiego, Wiederholda i Prandtl - Colebrooka.**



średnice rurociągów w mm