

Identification of roughness coefficients based on recycled steel pipes using various mathematical models

Identyfikacja współczynników chropowatości bezwzględnej na przykładzie rur stalowych z recyklingu z zastosowaniem różnych modeli matematycznych

DOI: 10.15199/33.2024.10.10

Abstract. This paper presents the results of a detailed comparative analysis of the inverse problem, focusing on the identification of surface roughness coefficients for steel pipes. Various formulas were utilized and discussed to calculate the linear resistance coefficient. Among these formulas, only about half could be transformed into an explicit form, enabling direct application in engineering practice. The results obtained from the calculations were then compared with the outcomes derived from the widely used and recommended Colebrook-White equation in technical literature. The analysis demonstrated that the obtained results show a high degree of agreement with those obtained using the Colebrook-White equation. For some research models, the difference was less than 0.1%, indicating very high accuracy and consistency with this standard computational tool.

Keywords: pipe roughness; darcy friction factor; flow; head loss.

The calculation of hydraulic parameters for pressurized water supply pipes is a crucial aspect of the design process for such systems, significantly influencing the efficiency and optimization of technical solutions like water supply networks and irrigation systems. Through precise hydraulic calculations, pipe dimensions are determined to accommodate the specified flow rate at optimal velocities, while pressure losses and the required water lift height are also estimated.

The relationships between fundamental hydraulic parameters are expressed in the widely recognized Darcy-Weisbach equation [1]. This equation indicates that energy losses along a pipe depend on the hydraulic resistance coefficient. The value of this coefficient is a function of the Reynolds number, the roughness of the pipe's internal surface, and its diameter.

Changes in the hydraulic resistance coefficient, resulting from the physical characteristics of the pipes, such as their diameter and the degree of roughness of their internal surface, are critical for accurately predicting pressure losses and the overall efficiency of the system.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki szczegółowej analizy porównawczej problemu odwrotnego, koncentrując się na identyfikacji współczynników chropowatości powierzchni rur stalowych. W celu przeprowadzenia tej analizy wykorzystano i omówiono różne formuły obliczania wartości współczynnika oporów liniowych. Spośród tych formuł, większość mogła zostać przekształcona do postaci jawnej, co umożliwia bezpośrednie zastosowanie w praktyce inżynierskiej. Wyniki uzyskane z przeprowadzonych obliczeń zostały następnie porównane z rezultatami pochodzącymi z powszechnie stosowanego i rekomendowanego w literaturze technicznej równania Colebrooka-White'a. Analiza wykazała, że uzyskane wyniki charakteryzują się dużą zgodnością z wynikami otrzymywanymi przy użyciu równania Colebrooka-White'a. W przypadku niektórych modeli różnica była mniejsza niż 0,1%, co wskazuje na bardzo dużą zgodność z tym narzędziem obliczeniowym.

Słowa kluczowe: chropowatość bezwzględna przewodu; współczynnik oporów liniowych; przepływ; straty ciśnienia.

Obliczanie parametrów hydraulicznych ciśnieniowych przewodów wodociągowych jest kluczowym aspektem procesu projektowania tych systemów, wpływającym w istotny sposób na efektywność i optymalizację rozwiązań technicznych, takich jak wodociągi i systemy irygacyjne. Na podstawie dokładnych obliczeń hydraulicznych określone są wymiary przewodów dostosowane do zadanego strumienia objętości przy optymalnej prędkości, a także szacowane są straty ciśnienia oraz wymagana wysokość podnoszenia wody. Relacje między podstawowymi parametrami hydraulicznymi są przedstawione w powszechnie uznanym równaniu Darcy-Weisbacha [1]. Z równania tego wynika, że straty energetyczne wzdłuż przewodu zależą od współczynnika oporu hydraulicznego. Wartości tego współczynnika są funkcją liczby Reynoldsa, chropowatości wewnętrznej powierzchni rur oraz ich średnicy. Zmiana wartości współczynnika oporu hydraulicznego, wynikająca z parametrów fizycznych przewodów, takich jak ich średnica oraz stopień chropowatości wewnętrznej powierzchni, ma kluczowe znaczenie w przypadku precyzyjnego przewidywania strat ciśnienia oraz efektywności całego systemu.

W wyniku przeprowadzonych badań osiągnięto duży postęp w dziedzinie hydrauliki przewodów zamkniętych. Mimo tych

¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska; robert.manko@zut.edu.pl

Research conducted in this field has led to significant advances in the hydraulics of closed conduits. However, despite these achievements, it has not yet been possible to fully establish the physical principles needed to precisely determine the hydraulic resistance coefficient λ for turbulent flow, which is the most common in engineering practice. Therefore, there remains a need to rely on empirical and semi-empirical formulas.

According to engineering practice [2], to calculate pressure losses in pipelines, it is recommended to use the Colebrook-White equation (1). This equation, presented in 1952 at the 2nd International Water Supply Congress, has been recognized as the most effective tool for identifying the linear resistance coefficient [1]. However, this equation is problematic due to its implicit form concerning the linear resistance coefficient, which requires the use of various iterative methods, nomograms, or tables.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,71D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (1)$$

Explanations of symbols:

λ – linear resistance coefficient [-]; g – gravity [m/s^2]; h – head loss [m]; k – absolute roughness coefficient [m]; v – average velocity on cross-section [m/s]; D – pipe inner diameter [m]; Re – Reynolds number [-]

Transforming this equation to express the value of the absolute roughness coefficient:

$$k = 3,71D \left(10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (2)$$

The internal structure of a pipeline has a significant impact on the nature of the flow, leading to the classification of pipe walls as either hydraulically smooth or hydraulically rough. The roughness of the wall is determined by the average height of the surface irregularities (both protrusions and depressions), as well as their shape and distribution. The ratio of absolute roughness to the pipe diameter serves as a measure of relative roughness.

$$\varepsilon = \frac{k}{D} \quad (3)$$

A characteristic feature of steel pipelines is the decrease in their flow capacity after several years of operation compared to new pipes. This is caused by incrustation and corrosion. Salts and other substances precipitated from the water accumulate on the internal surface of the pipe walls, increasing the pipe's roughness and reducing its effective cross-sectional area. As a result, hydraulic resistance increases. To maintain the required flow and pressure under these altered conditions, more energy is needed to pump the water [2].

To properly select the diameters of designed steel pipelines, it is necessary to understand the nature and intensity of the processes that affect the pipe's capacity during operation. However, this task is exceptionally difficult and cannot be solved precisely [3, 4]. Numerous studies indicate that sediment accumulation in pipelines depends both on the pipe material and the physical and chemical properties of the flowing liquid. Therefore, the identification of installation

osiągnięć nie udało się jednak dotychczas ustalić podstaw fizycznych umożliwiających precyzyjne określenie współczynnika oporu hydraulicznego λ podczas przepływu burzliwego, który jest najbardziej powszechny w praktyce inżynierskiej. W tej sytuacji nadal trzeba korzystać z wzorów empirycznych i półempirycznych.

Zgodnie z praktyką inżynierską [2], w celu obliczenia strat ciśnienia w rurociągach, zaleca się stosowanie równania Colebrooka-White'a (1). To równanie, zaprezentowane w 1952 r. na II Międzynarodowym Kongresie Zaopatrzenia w Wodę, zostało uznane za najskuteczniejsze narzędzie do identyfikacji współczynnika oporów liniowych [1]. Jest ono jednak problematyczne ze względu na jego uwikłaną formę w odniesieniu do współczynnika oporu liniowego, co wymaga stosowania różnych metod iteracyjnych, nomogramów lub tablic.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,71D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (1)$$

Objaśnienia symboli we wzorach:

λ – współczynnik oporów liniowych [-]; g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2]; h – wysokość strat liniowych [m]; k – współczynnik chropowatości bezwzględnej [m]; v – średnia prędkość wody w przekroju [m/s]; D – średnica wewnętrzna rurociągu [m]; Re – liczba Reynoldsa [-]

Przekształcając ten wzór na wartość współczynnika chropowatości bezwzględnej, otrzymujemy:

$$k = 3,71D \left(10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (2)$$

Struktura wewnętrzna przewodu rurociągu ma istotny wpływ na charakter przepływu, co prowadzi do klasyfikacji ścian przewodów jako hydraulicznie gładkich lub hydraulicznie szorstkich (chropowatych). Chropowatość ściany jest określana przez średnią wysokość nierówności (zarówno wzniesień, jak i wgłębień), a także przez ich kształt i rozmieszczenie. Stosunek chropowatości bezwzględnej do średnicy przewodu stanowi miarę chropowatości względnej:

$$\varepsilon = \frac{k}{D} \quad (3)$$

Charakterystyczną cechą stalowych przewodów jest spadek ich zdolności przepustowej po kilkuletnim okresie eksploatacji w porównaniu z nowymi rurami. Jest to spowodowane inkrustacją oraz korozją. Na wewnętrznej powierzchni ścian rur osadzają się wytrącone z wody sole i inne substancje, co zwiększa chropowatość rur oraz zmniejsza ich przekrój użytkowy. W rezultacie wzrastają opory hydrauliczne. Chcąc utrzymać założony przepływ i ciśnienie w zmienionych warunkach, konieczne jest zużycie większej ilości energii na pompowanie wody [2].

W celu właściwego doboru średnicy projektowanych rurociągów stalowych konieczne jest zrozumienie charakteru i intensywności procesów wpływających na przepustowość przewodów podczas ich eksploatacji. Zadanie to jest wyjątkowo trudne i nie można go precyzyjnie wykonać [3, 4]. Z licznych doświadczeń wynika, że gromadzenie się osadów w rurociągach zależy zarówno od materiału rur, jak i od fizycznych

parameters, such as roughness, must be based on measurements of flow and pressure, leading to the need to formulate an inverse problem in the context of identifying roughness coefficients. This study focuses on identifying roughness coefficient values.

The research used 19 theoretical formulas to predict the roughness of hydraulic pipes. The theoretical results were compared with data obtained from experiments on pipes after disassembly and cleaning. The uncertainty in determining the values for each formula was calculated as the arithmetic mean of the absolute differences between the values obtained from the Colebrook-White equation and the others.

Aim, Scope and Methodology

Scientific objective of this study is to thoroughly understand and evaluate the variability of the roughness coefficient in hydraulic pipes after prolonged operation and cleaning. The research focuses on steel pipes that were in service for 37 years in a water supply system, analyzing changes in roughness both before and after cleaning. An additional aim is to assess the effectiveness of various theoretical formulas for predicting roughness and their practical applicability in engineering.

The pipes were retrieved from the renovation of a residential building in the center of Szczecin, where the last renovation took place in 1985, during which steel pipes were installed. DN50 pipes were used for the water riser, while DN20 pipes were used for the branch lines. In 2022, 9.50 meters of DN50 pipes and 31 meters of DN20 pipes were recovered. Table 1 provides detailed data on the pipes under study. A key issue was determining the internal diameter of the pipes. Due to the current state of corrosion, accurate measurements with a caliper were challenging. The study aimed to determine the roughness coefficients of the pipes both with visible corrosion and after mechanical cleaning. Therefore, the diameters were measured after cleaning.

Initially, tests were conducted on the pipes in their post-demolition state, followed by cleaning and diameter measurements. The cleaning of the internal surface from deposits was carried out using a lathe and a wire brush.

For each pipe, diameter measurements were taken at several points using a caliper, and the average value was calculated for each pipe size. The caliper had an accuracy of 0.01 mm. The diameter values shown in Table 1 represent only the averaged results from all measurements. It should be noted that in further calculations, the precisely measured diameter for the specific section where pressure losses were measured was used. The pipe diameters ranged from 48.14 mm to 48.30 mm for DN50 pipes and

oraz chemicznych właściwości przepływającej cieczy. W związku z tym, identyfikacja parametrów instalacji w postaci chropowatości musi bazować na pomiarach przepływu i ciśnienia, co prowadzi do konieczności formułowania problemu odwrotnego w kontekście identyfikacji współczynników chropowatości. W artykule skupiono się na identyfikacji wartości współczynników chropowatości. W badaniach wykorzystano 19 teoretycznych wzorów do prognozowania chropowatości przewodów hydraulicznych. Wyniki teoretyczne porównano z danymi uzyskanymi w drodze eksperymentów na rurach po demontażu i oczyszczeniu. Niepewność wyznaczenia wartości w przypadku każdego wzoru obliczono jako średnią arytmetyczną wartości bezwzględnych różnic między wartościami uzyskanymi z równania Colebrooka-White'a a pozostałymi.

Cel, zakres i metoda badań

Celem naukowym przedstawionych badań jest dokładne zrozumienie i ocena zmienności współczynnika chropowatości przewodów hydraulicznych po długotrwałej eksploatacji oraz procesie oczyszczania. Badania skupiają się na rurach stalowych, które były eksploatowane przez 37 lat w instalacji wodociągowej, i ocenie zmiany chropowatości przed oraz po ich oczyszczeniu. Dodatkowym celem jest analiza skuteczności różnych wzorów teoretycznych w prognozowaniu chropowatości oraz ocena ich przydatności w praktyce inżynierskiej.

Rury pochodziły z remontowanej kamienicy w centrum Szczecina, gdzie ostatni remont odbył się w 1985 r., kiedy zainstalowano rury stalowe. W pionie wodociągowym zastosowano rury DN 50, a podejście wykonano z rur DN20. W 2022 r. odzyskano 9,5 m rur DN50 i 31 m rur DN20. W tabeli 1 zestawiono szczegółowe dane dotyczące badanych przewodów. Kluczową kwestią było określenie wewnętrznej średnicy rur. Ze względu na obecny stan korozji, dokładny pomiar przy użyciu suwmiarki był utrudniony. Badania miały na celu określenie współczynników chropowatości rur zarówno z widoczną korozją, jak i po czyszczeniu mechanicznym. W związku z tym średnica była mierzona po czyszczeniu.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania stanu rur po demontażu, a następnie wyczyszczono je i zmierzono średnicę. Czyszczenie wewnętrznej powierzchni rur z osadów przeprowadzono za pomocą tokarki i wyciora. W przypadku każdej rury pomiary średnicy wykonano w kilku miejscach za pomocą suwmiarki, a następnie obliczono wartość średnicę. Dokładność suwmiarki wynosi 0,01 mm. Przedstawione w tabeli 1 wartości średnicy rury stanowią wyłącznie uśrednione wyniki ze wszystkich pomiarów. Należy zaznaczyć, że w dalszych obliczeniach stosowano średnicę dokładnie zmie-

Table 1. Specification of pipes

Tabela 1. Specyfikacja rur użytych do badania

No/ Lp	Pipe designation/ Oznaczenie rury	Average internal diameter [mm]/ Uśredniona średnica wewnętrzna rury [mm]	Length [mm]/ Długość [mm]	Pieces/ Liczba sztuk
1	DN50	48,2	2400	1
2			1950	1
3			1850	2
4			1550	1
5	DN20	18,8	1800	4
6			1500	9
7			1250	2
8			1000	8

from 18.38 mm to 19.78 mm for DN20 pipes. Differences in diameter measurements for individual pipes did not exceed 0.6 mm, which accounts for less than 0.2% of the determined diameter.

The objective of the research is to compare equations for calculating linear resistance coefficients in the context of the inverse problem. This involves determining the actual roughness of recycled steel pipes and assessing how cleaning the internal surface of the pipes affects their roughness reduction. The studies were conducted at the Water Laboratory of the West Pomeranian University of Technology in Szczecin. The schematic of the measurement setup is presented in Figure 1.

The pipeline [2] exits from the “upper tank” [1], which facilitates the flow. The “upper tank” is equipped with a side overflow, ensuring a constant inlet pressure to the system, independent of the flow rate. For the measurement of the average flow rate in pipeline [2], an ultrasonic flow meter, the “Prosonic Flow 93T” [3], was utilized. The maximum measurement error associated with this flow meter is approximately 2% of the current flow rate, while its measurement resolution is 0.005 dm³/s. The measurement range of the differential manometer is 3500 mm H₂O. To isolate the water supply during the replacement of pipeline [7], valve [4] was employed, whereas valve [8] is utilized to regulate the flow through the measurement apparatus.

Impulse hoses [5] were connected directly before and after the tested pipeline [7] to a two-channel differential manometer [6], model CEM DT-8890. This manometer has an accuracy of $\pm 0.5\%$, with a resolution of 1 mm H₂O. Upon passing through the regulating valve [8], water enters the control measuring tank [9], which facilitates the determination of flow values via the volumetric method (every twentieth flow measurement was validated using the volumetric method to correct for any potential 2% measurement error as stipulated by the manufacturer of the ultrasonic meter). Subsequently, the water flows into the “lower tank” [11], from which pipeline [12] conveys the water using pump [13], transferring it from the “lower tank” to the “upper tank”. The measurement setup maintains an internal water circulation. Given that the pump operates continuously, a side overflow is installed in the “upper tank” [1] to discharge excess water through pipeline [14]. The total volume of water in circulation is 14 m³, which serves to stabilize the temperature during measurements.

The process of installing the pipes involved creating an external thread on the pipe surface, followed by the attachment of a long nut fitted with an outlet for the impulse hose. These nuts were meticulously crafted to ensure that the internal diameter of the pipeline was minimally altered. This careful

rzoną w przypadku danego odcinka, na którym mierzone straty ciśnienia. Średnica rur mieściła się w przedziałach 48,14 – 48,30 mm oraz 18,38 – 19,78 mm. Różnica w pomiarach średnicy pojedynczej rury nie przekraczały 0,6 mm, co stanowi mniej niż 0,2% wyznaczonej średnicy.

Celem badań jest porównanie równań do obliczania współczynników oporów liniowych w kontekście problemu odwrotnego. Polega to na określeniu rzeczywistej chropowatości stalowych rur pochodzących z recyklingu oraz ocenie, w jaki sposób czyszczenie wewnętrznej powierzchni rur wpływa na jej zmniejszenie. Badania przeprowadzono w Laboratorium Wodnym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Schemat stanowiska pomiarowego został przedstawiony na rysunku 1.

Rurociąg [2] wychodzi ze „zbiornika górnego” [1], który wymusza przepływ. „Zbiornik górny” jest wyposażony w przelew boczny, zapewniający ustalone ciśnienie wejściowe do instalacji, niezależnie od przepływu. Do pomiaru średniego przepływu na rurociągu [2] zastosowano ultradźwiękowy przepływomierz „Prosonic Flow 93T” [3]. Maksymalny błąd pomiaru tego przepływomierza wynosi ok. 2% aktualnego przepływu, a rozdzielczość pomiaru to 0,005 dm³/s. Zakres pomiarowy manometru różnicowego wynosi 3500 mm H₂O. W celu

zamknięcia dopływu wody podczas wymiany rurociągu [7] wykorzystano zawór [4], natomiast zawór [8] służy do regulacji przepływu przez stanowisko pomiarowe. Bezpośrednio przed i za badanym rurociągiem [7] podłączono węże impulsowe [5], które są połączone z dwukanałowym manometrem różnicowym [6] modelu CEM DT-8890. Dokładność tego manometru wynosi $\pm 0,5\%$, a jego rozdzielczość to 1 mm H₂O. Po przejściu przez zawór regulacyjny [8], woda trafia do kontrolnego zbiornika pomiarowego [9], który pozwala na wyznaczenie wartości przepływu metodą objętościową (co dwudziesty pomiar przepływu był kontrolowany metodą objętościową, aby skorygować ewentualny błąd pomiarowy 2%, deklarowany przez producenta miernika ultradźwiękowego). Następnie woda płynie do „zbiornika dolnego” [11], skąd wychodzi rurociąg [12], prowadzący wodę za pomocą pompy [13] ze „zbiornika dolnego” do „zbiornika górnego”. W stanowisku pomiarowym zachowany jest obieg wewnętrzny wody. W związku z tym, że pompa pracuje w sposób ciągły, w „zbiorniku górnym” [1] zainstalowany jest przelew boczny, który odprowadza nadmiar wody przez rurociąg [14]. Objętość wody w obiegu wynosi ok. 14 m³, co stabilizuje temperaturę podczas pomiarów.

Proces instalowania rur polegał na wykonaniu gwintu zewnętrznego na powierzchni rury, po czym nakręcano długą nakrętkę z przygotowanym wyjściem na wąż impulsowy. Nakrętki zostały rzemieślniczo wytoczone i nagwintowane w taki sposób, aby minimalizować zmianę średnicy wewnętrznej

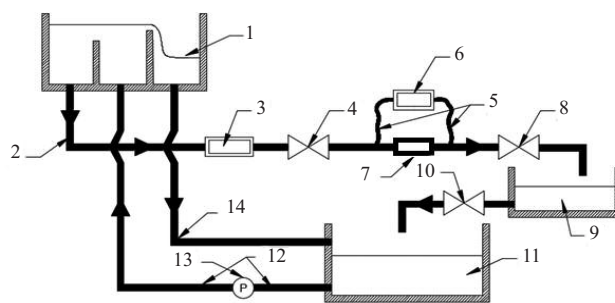


Fig. 1. Schematic of head loss determination (description in the article)

Rys. 1. Schemat stanowiska do badania strat liniowych (opis w tekście)

approach allowed for the mitigation of any influence the connection might exert on the resulting pressure loss.

The linear resistance coefficient is determined from the rearranged Darcy-Weisbach equation [3]:

$$\lambda = \Delta h \frac{D}{L} \frac{2g}{v^2} \quad (4)$$

Having determined the linear resistance coefficient, it is feasible to address the inverse problem by identifying the value of the absolute roughness coefficient. Below are the equations in which the linear resistance coefficient is presented explicitly. These equations have been transformed into a form that facilitates the calculation of the absolute roughness coefficient.

1. 1947 Moody [5]:

$$k = D \left[\frac{\left(\frac{\lambda}{0,0055} - 1 \right)^3 - \frac{10^6}{Re}}{2 \cdot 10^4} \right] \quad (5)$$

2. 1952 Altshul: [6]:

$$k = D \left[\left(\frac{\lambda}{0,11} \right)^4 - \frac{68}{Re} \right] \quad (6)$$

3. 1973 Eck [7]:

$$k = 3,71D \left(10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{15}{Re} \right) \quad (7)$$

4. 1973 Churchill-1 [8]:

$$k = 3,71D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad (8)$$

5. 1976 Jain [9]:

$$k = 3,715D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \left(\frac{6,943}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad (9)$$

6. 1976 Swamee and Jain [10]:

$$k = 3,7D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \left(\frac{5,74}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad (10)$$

7. 1977 Churchill-2 [11]:

$$k = 3,7D \left[e^{\frac{\left[\left(\frac{\lambda}{8} \right)^{12} - \left(\frac{8}{Re} \right)^{12} \right]^{-\frac{2}{3}} - \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}}{-2,457}} - \left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad (11)$$

8. 1980 Round [12]:

$$k = 7,4D \left[10^{-\frac{1}{1,8\sqrt{\lambda}}} - \frac{6,5}{Re} \right] \quad (12)$$

9. 1980 Shacham [6]:

$$k = \frac{3,71D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} + \frac{72,79}{Re^2} \right]}{\left(1 - \frac{5,02}{Re} \right)} \quad (13)$$

urociagu. Dzięki temu możliwe było pominięcie wpływu połączenia na wartość strat ciśnienia.

Współczynnik oporów liniowych wyznaczono, przekształcając znany wzór Darcy'ego-Weisbacha [3] do postaci:

$$\lambda = \Delta h \frac{D}{L} \frac{2g}{v^2} \quad (4)$$

Mając wyznaczony współczynnik oporów liniowych, możliwe jest rozwiązanie problemu odwrotnego przez identyfikację wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej. W przedstawionych wzorach 5 ÷ 23, współczynnik oporów liniowych jest w postaci jawnej. Przekształcono je do postaci, z której możliwe jest obliczenie współczynnika chropowatości bezwzględnej.

1. 1947 Moody [5]:

$$k = D \left[\frac{\left(\frac{\lambda}{0,0055} - 1 \right)^3 - \frac{10^6}{Re}}{2 \cdot 10^4} \right] \quad (5)$$

2. 1952 Altshul: [6]:

$$k = D \left[\left(\frac{\lambda}{0,11} \right)^4 - \frac{68}{Re} \right] \quad (6)$$

3. 1973 Eck [7]:

$$k = 3,71D \left(10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{15}{Re} \right) \quad (7)$$

4. 1973 Churchill-1 [8]:

$$k = 3,71D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad (8)$$

5. 1976 Jain [9]:

$$k = 3,715D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \left(\frac{6,943}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad (9)$$

6. 1976 Swamee i Jain [10]:

$$k = 3,7D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \left(\frac{5,74}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad (10)$$

7. 1977 Churchill-2 [11]:

$$k = 3,7D \left[e^{\frac{\left[\left(\frac{\lambda}{8} \right)^{12} - \left(\frac{8}{Re} \right)^{12} \right]^{-\frac{2}{3}} - \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}}{-2,457}} - \left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad (11)$$

8. 1980 Round [12]:

$$k = 7,4D \left[10^{-\frac{1}{1,8\sqrt{\lambda}}} - \frac{6,5}{Re} \right] \quad (12)$$

9. 1980 Shacham [6]:

$$k = \frac{3,71D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} + \frac{72,79}{Re^2} \right]}{\left(1 - \frac{5,02}{Re} \right)} \quad (13)$$

10. 1981 Pavlov and others [6]:

$$k = 3,7D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad (14)$$

11. 1983 Haaland [13]:

$$k = 3,7D \left[10^{-\frac{1}{1,8\sqrt{\lambda}}} - \frac{6,9}{Re} \right]^{0,9} \quad (15)$$

12. 1997 Manadilli [14]:

$$k = 3,7D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{95}{Re^{0,983}} + \frac{96,82}{Re} \right] \quad (16)$$

13. 2007 Rao and Kumar [15, 16]:

$$k = 0,5D \frac{Re \left[1 - 0,55e^{-0,33 \left(\ln \frac{Re}{6,5} \right)^2} \right]}{0,444 + 0,135Re} 10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} \quad (17)$$

14. 2007 Swamee and Swamee [17]:

$$k = 3,7D \left[e^{\left[0,8686 \left[\lambda^8 - \left(\frac{64}{Re} \right)^8 \right]^{\frac{1}{16}} + \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]} - \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right] \quad (18)$$

15. 2010 Evangelides and others [18]:

$$k = 3,615D \left[10^{\left[\frac{0,2479 - 0,0000947(7 - \log Re)^4}{\lambda} \right]^{0,5}} - \frac{7,366}{Re^{0,9142}} \right] \quad (19)$$

16. 2011 Brkić [19]:

$$k = 3,71D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{2,18 \ln \frac{Re}{1,816 \ln \frac{1,1Re}{\ln(1 + 1,1Re)}}}{Re} \right] \quad (20)$$

17. 2011 Fang [20]:

$$k = 3,74D \left[e^{\frac{1}{1,27\sqrt{\lambda}}} + 1,613 \frac{60,525}{Re^{1,1105}} - \frac{56,291}{Re^{1,0712}} \right]^{0,903} \quad (21)$$

18. 2011 Li [21]:

$$k = 3,71D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{1,2563}{Re \sqrt{\frac{-0,0015702}{\ln Re} + \frac{0,39442031}{(\ln Re)^2} + \frac{2,5341533}{(\ln Re)^3}}} \right] \quad (22)$$

19. 2021 Mileikovskiy and Tkachenko [22]:

$$\lambda = \left(\frac{8,128943 + a}{8,128943b - 0,86859209a \cdot \ln \frac{a}{3,7099535Re}} \right)^2 \quad (23)$$

where:

$$a = Re \frac{k}{D} + 9,3120665b \quad (23a)$$

$$b = -0,79638 \ln \left(\frac{k}{8,208D} + \frac{7,3357}{Re} \right) \quad (23b)$$

10. 1981 Pavlov i inni [6]:

$$k = 3,7D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad (14)$$

11. 1983 Haaland [13]:

$$k = 3,7D \left[10^{-\frac{1}{1,8\sqrt{\lambda}}} - \frac{6,9}{Re} \right]^{0,9} \quad (15)$$

12. 1997 Manadilli [14]:

$$k = 3,7D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{95}{Re^{0,983}} + \frac{96,82}{Re} \right] \quad (16)$$

13. 2007 Rao i Kumar [15, 16]:

$$k = 0,5D \frac{Re \left[1 - 0,55e^{-0,33 \left(\ln \frac{Re}{6,5} \right)^2} \right]}{0,444 + 0,135Re} 10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} \quad (17)$$

14. 2007 Swamee i Swamee [17]:

$$k = 3,7D \left[e^{\left[0,8686 \left[\lambda^8 - \left(\frac{64}{Re} \right)^8 \right]^{\frac{1}{16}} + \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]} - \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right] \quad (18)$$

15. 2010 Evangelides i inni [18]:

$$k = 3,615D \left[10^{\left[\frac{0,2479 - 0,0000947(7 - \log Re)^4}{\lambda} \right]^{0,5}} - \frac{7,366}{Re^{0,9142}} \right] \quad (19)$$

16. 2011 Brkić [19]:

$$k = 3,71D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{2,18 \ln \frac{Re}{1,816 \ln \frac{1,1Re}{\ln(1 + 1,1Re)}}}{Re} \right] \quad (20)$$

17. 2011 Fang [20]:

$$k = 3,74D \left[e^{\frac{1}{1,27\sqrt{\lambda}}} + 1,613 \frac{60,525}{Re^{1,1105}} - \frac{56,291}{Re^{1,0712}} \right]^{0,903} \quad (21)$$

18. 2011 Li [21]:

$$k = 3,71D \left[10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{1,2563}{Re \sqrt{\frac{-0,0015702}{\ln Re} + \frac{0,39442031}{(\ln Re)^2} + \frac{2,5341533}{(\ln Re)^3}}} \right] \quad (22)$$

19. 2021 Mileikovskiy i Tkachenko [22]:

$$\lambda = \left(\frac{8,128943 + a}{8,128943b - 0,86859209a \cdot \ln \frac{a}{3,7099535Re}} \right)^2 \quad (23)$$

gdzie:

$$a = Re \frac{k}{D} + 9,3120665b \quad (23a)$$

$$b = -0,79638 \ln \left(\frac{k}{8,208D} + \frac{7,3357}{Re} \right) \quad (23b)$$

Results and Uncertainty Analysis

Figures 2 and 3 illustrate the relationship between pressure losses per linear meter and the Reynolds number. The analyzed data encompass a broad range of measurements, and due to the substantial volume of data, it was necessary to limit the presentation to ensure clarity and readability.

In the process of result selection, which involved the elimination of duplicate values, care was taken to adequately represent the measurement points, thus capturing key trends and patterns within the examined samples. To ensure the reliability and accuracy of the presented data, outlier values that significantly deviated from the overall trend were also discarded, as these could have been the result of measurement errors.

As can be observed and is widely known, with an increase in water flow through the system, there is also an increase in pressure loss. For both DN 20 and DN 50 pipes, the mechanical cleaning process resulted in a reduction of pressure losses at the corresponding flow rates. In the subsequent phase of the research, roughness coefficients were determined. For example, Figure 4 presents the roughness coefficient values obtained using the Colebrook-White equation.

The mechanical cleaning of the pipes had a significant impact on reducing flow resistance, which is clearly evident in the measurements of pressure losses taken before and after cleaning. Figure 4 demonstrates a considerable reduction in the value of absolute roughness.

Despite the fact that the roughness coefficient is a parameter independent of flow, it has been observed that its value changes with an increase in flow rate. The highest values of the roughness coefficient are noted when mechanical cleaning of the pipes has not yet occurred. Larger values are observed for the DN 50 pipeline. After cleaning, the coefficient values

Wyniki oraz analiza niepewności

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono zależność między stratami ciśnienia na metr a liczbą Reynoldsa. Analizowane dane obejmują szeroki zakres pomiarów i ze względu na bardzo dużą ich liczbę konieczne było ograniczenie prezentacji danych w celu zapewnienia czytelności i przejrzystości. W procesie selekcji wyników, polegającym na eliminacji powtarzających się wartości, zadbano o odpowiednią reprezentację punktów pomiarowych, co umożliwiło uchwycenie kluczowych trendów i wzorców w badanych próbkach. W celu zapewnienia wiarygodności i dokładności przedstawionych danych odrzucono również skrajne wartości, które znacznie odbiegały od ogólnej tendencji, co mogło być wynikiem błędów pomiarowych.

Jak można zaobserwować oraz co jest powszechnie wiadome, wraz ze wzrostem przepływu wody przez układ zwiększa się również strata ciśnienia. W przypadku rur o średnicy DN20 i DN50, proces mechanicznego czyszczenia spowodował spadek strat ciśnienia przy odpowiadających im przepływach. W kolejnym etapie badań wyznaczono współczynniki chropowatości, np. na rysunku 4 przedstawiono wartości współczynników chropowatości uzyskane za pomocą równania Colebrooka-White'a. Mechaniczne czyszczenie rur miało istotny wpływ na zmniejszenie oporów przepływu, co wyraźnie widać w wynikach pomiarów strat ciśnienia przed i po czyszczeniu. Na rysunku 4 zaobserwowano znaczną redukcję wartości chropowatości bezwzględnej.

Pomimo tego, że współczynnik chropowatości jest parametrem niezależnym od przepływu, zaobserwowano, że wraz ze wzrostem przepływu jego wartość się zmienia. Największe wartości współczynnika chropowatości stwierdzono w przypadku, gdy nie doszło jeszcze do mechanicznego czyszczenia przewodów. Ponadto większe wartości obserwuje się

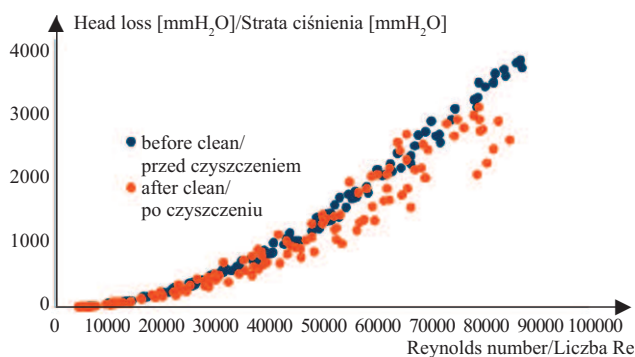


Fig. 2. Pressure loss results as a function of Reynolds number for DN20 pipes

Rys. 2. Wyniki strat ciśnienia w przewodach DN20 w funkcji liczby Reynoldsa

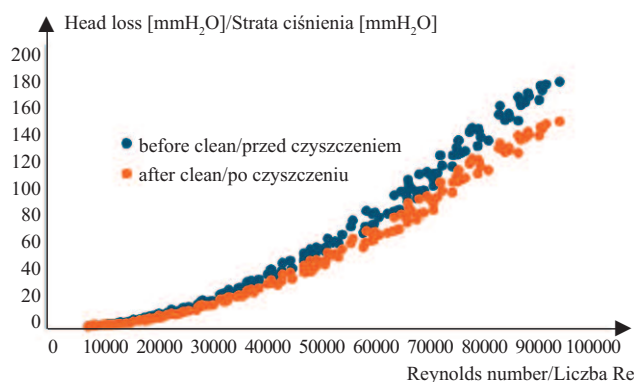


Fig. 3. Pressure loss results as a function of Reynolds number for DN50 pipes

Rys. 3 Wyniki strat ciśnienia w przewodach DN50 w funkcji liczby Reynoldsa

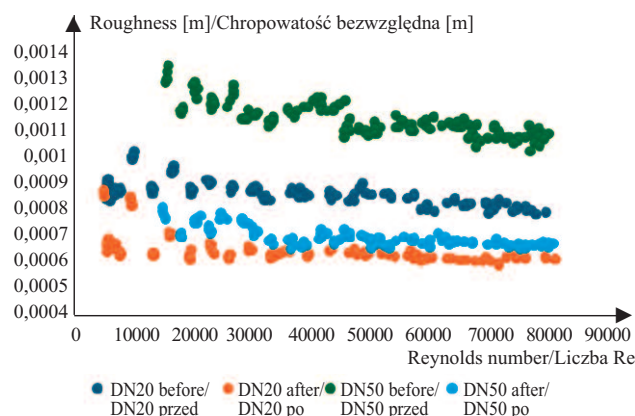


Fig. 4. Colebrook-White's roughness coefficient values

Rys. 4. Wartości współczynnika chropowatości wg równania Colebrooka-White'a

decrease, with DN 50 experiencing a reduction of nearly 50%, while for DN 20, the decrease is approximately 30%. Although the cleaning process was identical for pipes of different diameters, it can be inferred that the cleaning process itself significantly affects the effectiveness of roughness coefficient reduction.

Similar changes in the values of the roughness coefficient are observed with other mathematical formulas not presented in the figure. Figure 4 illustrates a decrease in the roughness coefficient as the Reynolds number increases. Despite the clear trend in the changes, there is no necessity to establish a mathematical model for these variations; rather, it is important to examine the impact of fully developed turbulent flow on its value.

The analysis of functional relationships between the linear resistance coefficient and the Reynolds number indicates that above a value of 50,000, the roughness coefficient stabilizes. For this range of Reynolds numbers (> 50,000), the average roughness value is calculated, which can serve as a reference point for comparisons with computational results.

Table 2 presents a summary of the average roughness coefficients for the applied models. Additionally, information is included regarding whether the individual formulas overestimate or underestimate the results in comparison to the Colebrook-White equation, with the percentage of results that overstate values also provided. Table 2 further details the average relative error between the values obtained from the

w przypadku rurociągu DN50 niż DN20. Po wyczyszczeniu jego wartości współczynnika chropowatości maleją, w przypadku DN50 prawie o 50%, a DN20 o ok. 30%. Proces czyszczenia wpływa więc w znacznym stopniu na skuteczność redukcji współczynnika chropowatości. Podobne zmiany wartości tego współczynnika obserwuje się w przypadku innych formuł matematycznych. Na rysunku 4 widoczny jest spadek wartości współczynnika chropowatości wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa. Nie ma jednak potrzeby określania matematycznego modelu tych zmian, a jedynie warto sprawdzić wpływ pojawienia się w pełni rozwiniętego przepływu turbulenta na wartość współczynnika chropowatości.

Analiza zależności funkcyjnych między współczynnikiem oporów liniowych a liczbą Reynoldsa wskazuje, że powyżej wartości 50 000 współczynnik chropowatości stabilizuje się. W przypadku liczby Reynoldsa > 50 000 oblicza się średnią wartość chropowatości, która może służyć jako punkt odniesienia w porównaniach z wynikami obliczeń. W tabeli 2 zestawiono średnie wartości współczynników chropowatości obliczone wg różnych wzorów. Ponadto podano informacje, czy poszczególne wzory zawyżają, czy zaniżają wyniki w porównaniu z wzorem Colebrooka-White'a oraz procentowy udział wyników zawyżających wartości. W tabeli 2 przedstawiono również średni błąd względny między wartościami uzyskanymi z równania Colebrooka-White'a a wynikami uzyskanymi innymi metodami. Te różnice pozwalają na ocenę, jak dobrze poszczególne modele odwzorowują warunki hydrau-

Table 2. Comparison of average absolute roughness coefficient values obtained from different formulas

Tabela 2. Porównanie średnich wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej uzyskanych z różnych formuł

Equation/Równanie	Roughness coefficient [m]/Chropowatość bezwzględna [m]				% of results bigger/ % wyników większych	σ_w [%]
	DN 20 befor/ DN 20 przed	DN 20 after/ DN 20 po	DN 50 befor/ DN 50 przed	DN 50 after/ DN 50 po		
Coolebrook-White	0,000797	0,000592	0,000956	0,000585	–	–
Moody	0,001285	0,000885	0,001163	0,000629	100	40,7
Altuszul	0,002294	0,001429	0,00123	0,000275	0	156,9
Eck	0,000791	0,000586	0,000947	0,000579	0	2,4
Churchil_1	0,000789	0,000584	0,000941	0,000572	0	2,7
Jain	0,00079	0,000585	0,000943	0,000573	100	2,5
Swamee and/i Jain	0,00079	0,000585	0,000945	0,000578	19	1,6
Churchil 2	0,000787	0,000582	0,000939	0,000571	100	2,9
Round	0,000968	0,000701	0,00107	0,000623	53	15,9
Schacham	0,000808	0,000604	0,000983	0,000615	100	5,8
Pavlov	0,000787	0,000583	0,00094	0,000572	0	2,8
Haland	0,000794	0,00059	0,000954	0,000585	100	0,4
Mandalini	0,000786	0,000582	0,000937	0,00057	0	3
Rao i Kumar	0,000806	0,000602	0,000982	0,000614	0	5,5
Swamee and/i Swamee	0,000788	0,000583	0,00094	0,000572	0	2,7
Evangelides	0,000798	0,000592	0,000954	0,000582	100	0,4
Brkic	0,000788	0,000583	0,000939	0,000571	19	2,8
Fang	0,000812	0,000608	0,000991	0,000624	100	9,6
Li	0,000788	0,000583	0,00094	0,000571	0	2,7
Mileikovskiy and/i Tkachenko	0,000797	0,000592	0,000956	0,000585	0	0

Colebrook-White equation and those obtained using other methods.

$$\sigma_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{k_i - k_{C-W,i}}{k_{C-W,i}} \right| * 100\% \quad (24)$$

These differences allow for an assessment of how well individual models replicate hydraulic conditions in comparison to the well-established Colebrook-White equation. As observed, both before and after mechanical cleaning, the values of the roughness coefficients are greater for pipelines with a diameter of DN50.

An uncertainty analysis of the obtained results was conducted in this study, employing the error propagation method for uncorrelated values. For illustration, the uncertainty calculations for the Colebrook-White equation are presented for a selected case. Table 3 summarizes the assumptions made for this analysis.

Calculation:

– Reynolds number:

$$Re = \frac{4Q}{v \pi D} = 29651$$

– linear resistance coefficient:

$$\lambda = \Delta h \frac{D^5 \pi^2 g}{L 8Q^2} = 0,0638$$

– Colebrook-White roughness:

$$k = 3,71D \left(10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) = 0,000713 \text{ m}$$

– uncertainty of Reynolds number:

$$\sigma_{Re} = \sqrt{\left(\frac{4}{v \pi d} \sigma_Q \right)^2 + \left(-\frac{4Q}{v \pi D^2} \sigma_d \right)^2 + \left(-\frac{4Q}{v^2 \pi d} \sigma_v \right)^2} \approx 161$$

– uncertainty of linear resistance coefficient:

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\left(\frac{D^5 \pi^2 g}{L 8Q^2} \sigma_{\Delta h} \right)^2 + \left(\frac{\Delta h D^4 5 \pi^2 g}{L 8Q^2} \sigma_D \right)^2 + \left(-\frac{\Delta h D^5 \pi^2 g}{L^2 8Q^2} \sigma_L \right)^2 + \left(-\frac{\Delta h D^5 \pi^2 g}{L 4Q^3} \sigma_Q \right)^2} \approx 0,00073$$

– uncertainty of colebrook-White roughness:

$$\sigma_k = \sqrt{\left(\frac{9,3121D}{Re^2 \sqrt{\lambda}} \sigma_{Re} \right)^2 + \left(3,71 \left(10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \sigma_D \right)^2 + \left(\frac{D \left(2,1356 * 10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} + \frac{4,65605}{Re} \right)}{\lambda^{\frac{3}{2}}} \sigma_\lambda \right)^2} \approx 1,06 * 10^{-6} \text{ m}$$

This indicates that for the given values, the absolute roughness is 0.713 ± 0.00106 mm. The average measurement uncertainty across all analyzed cases using the Colebrook-White method is approximately $5,8 \times 10^{-6}$ m, with the minimum and maximum values in this dataset being

liczne w porównaniu z równaniem Colebrooka-White’a. Stwierdzono, że zarówno przed, jak i po mechanicznym czyszczeniu, wartości współczynników chropowatości są większe w przypadku rurociągów o średnicy DN50.

$$\sigma_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{k_i - k_{C-W,i}}{k_{C-W,i}} \right| * 100\% \quad (24)$$

W artykule przeprowadzono analizę niepewności uzyskanych wyników, wykorzystując metodę propagacji błędów w przypadku wartości nieskorelowanych. W celu ilustracji, przedstawiono obliczenia niepewności pomiaru dla wybranego przypadku na przykładzie równania Colebrooka-White’a. W tabeli 3 zestawiono założenia przyjęte do przeprowadzenia tej analizy.

Obliczenia wyników pomiarów:

– liczba Reynoldsa:

$$Re = \frac{4Q}{v \pi D} = 29651$$

– współczynniki oporów liniowych:

$$\lambda = \Delta h \frac{D^5 \pi^2 g}{L 8Q^2} = 0,0638$$

– chropowatość wg Colebrooka-White’a:

$$k = 3,71D \left(10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) = 0,000713 \text{ m}$$

– niepewność otrzymanej liczby Reynoldsa:

$$\sigma_{Re} = \sqrt{\left(\frac{4}{v \pi d} \sigma_Q \right)^2 + \left(-\frac{4Q}{v \pi D^2} \sigma_d \right)^2 + \left(-\frac{4Q}{v^2 \pi d} \sigma_v \right)^2} \approx 161$$

– niepewność otrzymanej liczby współczynnika oporów liniowych:

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\left(\frac{D^5 \pi^2 g}{L 8Q^2} \sigma_{\Delta h} \right)^2 + \left(\frac{\Delta h D^4 5 \pi^2 g}{L 8Q^2} \sigma_D \right)^2 + \left(-\frac{\Delta h D^5 \pi^2 g}{L^2 8Q^2} \sigma_L \right)^2 + \left(-\frac{\Delta h D^5 \pi^2 g}{L 4Q^3} \sigma_Q \right)^2} \approx 0,00073$$

– niepewność otrzymanej chropowatości wg Colebrooka-White’a:

$$\sigma_k = \sqrt{\left(\frac{9,3121D}{Re^2 \sqrt{\lambda}} \sigma_{Re} \right)^2 + \left(3,71 \left(10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} - \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \sigma_D \right)^2 + \left(\frac{D \left(2,1356 * 10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} + \frac{4,65605}{Re} \right)}{\lambda^{\frac{3}{2}}} \sigma_\lambda \right)^2} \approx 1,06 * 10^{-6} \text{ m}$$

W przypadku podanych wartości chropowatość bezwzględna wynosi $0,713 \pm 0,00106$ mm, natomiast średnia niepewność pomiarowa we wszystkich analizowanych przypadkach obliczeń metodą Colebrooka-White’a, to ok. $5,8 \times 10^{-6}$ m, przy czym najmniejsze i największe wartości w tym zbiorze wynoszą odpowiednio $1,46 \times 10^{-7}$ oraz $1,79 \times 10^{-6}$ m. Tak nie-

Table 3. Assumptions of the calculation example

Tabela 3. Założenia przykładu obliczeniowego

Parameter/Parametr	Value/Wartość	Relative error/Błąd względny	Absolute error/Błąd bezwzględny
Diameter/Średnica	0,0188 m	–	0,00001 m
Flow/Przepływ	0,000448 m ³ /s	2%	2,24×10 ⁻⁶ m ³ /s
Pressure different mH ₂ O/Różnica ciśnień mH ₂ O	0,85613 m	0,5%	0,0043 mH ₂ O
Length/Długość rurociągu	1,950 m	–	0,001 m
Viscosity/Lepkość	1,016×10 ⁻⁶ m ² /s	–	2,07×10 ⁻⁹ m ² /s

$1,46 \times 10^{-7}$ and $1,79 \times 10^{-6}$ m. Such small values of error propagation suggest a high precision in the fitting of the results, indicating that similar accuracy can be expected from other methods as well.

The pipes used in the experiment, despite being made from the same material, may have been contaminated to varying degrees prior to cleaning. It was anticipated that the roughness coefficients post-cleaning would be similar across different types of pipes. However, the results obtained indicated that the DN50 pipes exhibited slightly higher roughness values. These differences may suggest that the cleaning level for these pipes was insufficient.

The analysis of the presented tabular data reveals significant variation in the quality of the models determining the roughness coefficient values, assessed through percentage error. The Mileikovskiy and Tkachenko models, as well as the Evangelides et al. model, demonstrate excellent alignment with the data, exhibiting percentage errors of 0.0% and 0.4%, respectively. In contrast, the Altszul, Moody, and Fang models show markedly lower effectiveness, recording percentage errors of 156.9%, 40.7%, and 9.6%, respectively. The remaining models display average fit, with percentage error rates ranging from 0.4% to 5.8%.

Conclusion

The article focuses on the analysis of pipes derived from the renovation of the water infrastructure in one of the buildings located in the central part of Szczecin. During the renovation in 1985, steel pipes were used, which were the subject of this study. The main objective of the research was to determine the roughness coefficients of these pipes, both in their current state, characterized by visible corrosion, and after mechanical cleaning. The study also aimed to compare various equations for calculating linear resistance coefficients and to identify the absolute roughness coefficient in the context of the inverse problem. The results of the analysis showed significant changes in the roughness coefficient after the mechanical cleaning of the pipes, which influenced flow resistance. It was found that for both DN50 and DN20 pipes, the cleaning process resulted in a reduction of pressure losses corresponding to their respective flow rates. Furthermore, the values of the roughness coefficients were significantly higher for the larger diameter pipes. The analysis demonstrated considerable variation in the effectiveness of models determining the roughness coefficient values, assessed through percentage error. The Mileikovskiy and Tkachenko models, as well as the Evangelides et al. model, achieved excellent fit to the data, while the Altszul, Moody, and Fang models exhibited lower effectiveness. The remaining models showed average fit. The calculations presented suggest the need to update the relationships between the increase in roughness values and the operational time of the installations. It should be emphasized that the results presented pertain to the specific case of the analyzed pipeline. Nevertheless, they can serve as a valuable reference point for future research on pipelines operating under similar conditions, allowing for

wielkie wartości propagacji błędów świadczą o dużej precyzji dopasowania wyników, co sugeruje, że w przypadku innych metod również można oczekiwać dużej dokładności rezultatów.

Rury użyte w eksperymencie, mimo że wykonane z tego samego materiału, mogły być w różnym stopniu zanieczyszczone. Oczekiwano, że wartości współczynnika chropowatości różnych rodzajów rur po procesie czyszczenia będą zbliżone. Uzyskane wyniki wykazały jednak, że rury DN50 miały nieco większą chropowatość, co może sugerować, że poziom czyszczenia w przypadku tych rur był niedostateczny.

Z analizy danych tabelarycznych wynika istotne zróżnicowanie jakości modeli determinujących wartości współczynnika chropowatości, ocenianej przez błąd procentowy. Modele Mileikovskiy i Tkachenko oraz Evangelides i inni charakteryzują się doskonałym dopasowaniem do danych. Ich błąd procentowy był na poziomie 0,0% oraz 0,4%, natomiast modele Altszul, Moody i Fang mają mniejszą dokładność, ponieważ ich błędy procentowe były na poziomie odpowiednio 156,9%, 40,7% i 9,6%. Pozostałe modele wykazują średnie dopasowanie, ze wskaźnikami błędu procentowego 0,4 – 5,8%.

Wnioski

Artykuł skupia się na analizie rur pochodzących z renowacji infrastruktury wodociągowej jednej z kamienic zlokalizowanych w centralnej części Szczecina. W trakcie remontu w 1985 r. zastosowano rury stalowe. Głównym celem przeprowadzonych badań było określenie współczynników chropowatości tych rur zarówno w ich obecnym stanie, objętym widoczną korozją, jak i po mechanicznym oczyszczeniu. Badania miały także na celu porównanie różnych równań do wyznaczania wartości współczynnika oporów liniowych oraz identyfikację wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej, w kontekście problemu odwrotnego. Wyniki analizy wykazały istotne zmiany wartości współczynnika chropowatości po mechanicznym oczyszczeniu rur, co wpłynęło na opór przepływu. Stwierdzono, że proces czyszczenia zarówno rur o średnicy DN50, jak i DN20, spowodował spadek strat ciśnienia odpowiadających im przepływów. Ponadto, wartości współczynników chropowatości były istotnie większe w przypadku rur o większej średnicy. Analiza wykazała istotne zróżnicowanie skuteczności modeli determinujących wartości współczynnika chropowatości, ocenianej przez błąd procentowy. Modele Mileikovskiy i Tkachenko oraz Evangelides i inni uzyskały doskonałe dopasowanie do danych, podczas gdy modele Altszul, Moody i Fang wykazały mniejszą skuteczność. Pozostałe modele charakteryzowały się średnim dopasowaniem. Przedstawione obliczenia sugerują potrzebę uaktualnienia związków pomiędzy wzrostem wartości chropowatości a czasem eksploatacji instalacji. Należy podkreślić, że przedstawione wyniki odnoszą się do specyficznego przypadku analizowanego rurociągu. Niemniej jednak mogą one stanowić wartościowy punkt odniesienia w przypadku przyszłych badań nad rurociągami eksploatowanymi w analogicznych warunkach, co pozwoli

broader generalization of the obtained conclusions. However, the current results are insufficient as they lack systematic measurement and information regarding the quality of the flowing water, its temperature, and volumetric flow rate. The absence of this data limits the ability to accurately analyze the impact of operational time on changes in roughness and its relationship with operational parameters.

Received: 03.06.2024

Revised: 28.06.2024

Published: 22.10.2024

na uogólnienie uzyskanych wniosków. Obecne wyniki są jednak niewystarczające, gdyż brakuje w nich systematyczności w pomiarach oraz informacji dotyczących jakości przepływającej wody, jej temperatury oraz strumienia objętości. Brak tych danych ogranicza możliwość dokładnej analizy wpływu czasu eksploatacji na zmianę chropowatości i jej związek z parametrami eksploatacyjnymi.

Artykuł wpłynął do redakcji: 03.06.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 28.06.2024 r.

Opublikowano: 22.10.2024 r.

Literature

- [1] Mańko R. Wartości współczynników strat miejscowych w złączkach w systemie zaciskowym. Instal S. 2022. DOI: 10.36119/15.2022.4.2.
- [2] Walden H, Sawicki W. Tablice i nomogramy do obliczania strat ciśnienia w przewodach wodociagowych. Arkady, Warszawa, 1968.
- [3] Troskoleński AT. Hydromechanika techniczna. Tom II Hydraulika. Państwowe Wydawnictwa Techniczne. Warszawa, 1954.
- [4] Malesińska A. Czy wybór wzoru do obliczania λ ma znaczenie? Gaz, Woda, Technika Sanitarna. 2015. DOI: 10.15199/17.2015.1.8.
- [5] Moody ML. An approximate formula for pipe friction factors. Trans. ASME. 1947 p. 1005. DOI.
- [6] Olivares A, Guerra R, Alfaro M, Notte-Cuello E, Puentes L. Experimental evaluation of correlations used to calculate friction factor for turbulent flow in cylindrical pipes. Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing. 2019. DOI: 10.23967/j.rimni.2019.01.001.
- [7] Eck B. Technische Stromungslehre. Springer. New York, 1973.
- [8] Churchill SW. Empirical expressions for the shear stressing turbulent flow in commercial pipe. AIChE Journal. 1973. DOI.
- [9] Jain AK. Accurate explicit equations for friction factor. Proc. ASCE, J. Hydraulics Div. 976. DOI.
- [10] Swamee PK, Jain AK. Explicit equations for pipe-flow problems. Journal of the Hydraulics Division, ASCE 102, HY5. 1976. DOI.
- [11] Churchill SW. Friction factor equation spans all fluid-flow regimes. Chem Eng. 1977. DOI.
- [12] Round GF. An explicit approximation for the friction-factor Reynolds number relation for rough and smooth pipes. Can. J. Chem. Eng. 1980. DOI.
- [13] Haaland SE. Simple and explicit formulas for the friction-factor in turbulent pipe flow. Trans. ASME, JFE. 1983. DOI.
- [14] Manadilli G. Replace implicit equations with signomial functions. Chem. Eng. 1989. DOI.
- [15] Rao AR, Kumar B. Friction factor for turbulent pipe flow. Division of Mechanical Science, Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 2007, Brak DOI.
- [16] Rao AR, Kumar B. Transition of turbulent pipe flow. J. Hydraul. Res. IAHR. 2009. DOI 10.1080/00221686.2009.9522029.
- [17] Swamee PK, Swamee N. Full-range pipe-flow equations. Journal of Hydraulic Research. 2007. DOI: 10.1080/00221686.2007.9521821.
- [18] Evangelides C, Papaevangelou G, Tzimopoulos CA. New Explicit Relation for the Friction Factor Coefficient in the Darcy – Weisbach Equation. PREC, New Jersey, 2010, Brak DOI.
- [19] Brkić D. Review of explicit approximations to the Colebrook relation for flow friction. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2011. DOI 10.1016/j.petrol.2011.02.006.
- [20] Fang X, Xu Y, Zhou Z. New correlations of single-phase friction factor for turbulent pipe flow and evaluation of existing single-phase friction factor correlations. Nuclear Engineering and Design. 2011. DOI 10.1016/j.nucengdes.2010.12.019.
- [21] Li P, Seem JE, Li Y. A new explicit equation for accurate friction factor calculation of smooth pipes. Int. J. Refrig. 2011; <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00343-2>.
- [22] Mileikovskiy V, Tkachenko T. Precise Explicit Approximations of the Colebrook-White Equation for Engineering Systems. Proceedings of EcoComfort. 2020. DOI 10.1007/978-3-030-57340-9_37.