

Rozprawa doktorska

**WYDZIAŁ INSTALACJI
BUDOWLANYCH, HYDROTECHNIKI
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA**

mgr inż. Michał Kubrak

**Ciśnieniowy przepływ wody
w rurociągu z umieszczonym
wewnątrz przewodem**



WARSZAWA 2017

Recenzje
1 streszczenie

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ INSTALACJI BUDOWLANYCH,
HYDROTECHNIKI I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Rozprawa doktorska

mgr inż. Michał Kubrak

Ciśnieniowy przepływ wody
w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem

Promotor

prof. dr hab. inż. Marek Mitosek

Promotor pomocniczy

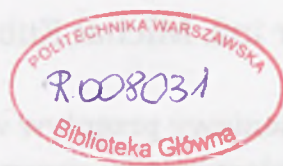
dr inż. Apoloniusz Kodura

WARSZAWA 2017

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ INSTALACJI BUDOWLANYCH
HYDROTECHNIKI I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Rozprawa doktorska



16181052-04

Streszczenie	5
Wstęp	6
1. Wprowadzenie	7
1.1. Cel i zakres pracy	7
1.2. Zakres pracy	7
1.3. Metody	7
1.4. Wyniki	7
2. Literatura	8
2.1. Literatura	8
2.2. Literatura	8
2.3. Literatura	8
2.4. Literatura	8
2.5. Literatura	8
2.6. Literatura	8
2.7. Literatura	8
2.8. Literatura	8
2.9. Literatura	8
2.10. Literatura	8
2.11. Literatura	8
2.12. Literatura	8
2.13. Literatura	8
2.14. Literatura	8
2.15. Literatura	8
2.16. Literatura	8
2.17. Literatura	8
2.18. Literatura	8
2.19. Literatura	8
2.20. Literatura	8
2.21. Literatura	8
2.22. Literatura	8
2.23. Literatura	8
2.24. Literatura	8
2.25. Literatura	8
2.26. Literatura	8
2.27. Literatura	8
2.28. Literatura	8
2.29. Literatura	8
2.30. Literatura	8
2.31. Literatura	8
2.32. Literatura	8
2.33. Literatura	8
2.34. Literatura	8
2.35. Literatura	8
2.36. Literatura	8
2.37. Literatura	8
2.38. Literatura	8
2.39. Literatura	8
2.40. Literatura	8
2.41. Literatura	8
2.42. Literatura	8
2.43. Literatura	8
2.44. Literatura	8
2.45. Literatura	8
2.46. Literatura	8
2.47. Literatura	8
2.48. Literatura	8
2.49. Literatura	8
2.50. Literatura	8
2.51. Literatura	8
2.52. Literatura	8
2.53. Literatura	8
2.54. Literatura	8
2.55. Literatura	8
2.56. Literatura	8
2.57. Literatura	8
2.58. Literatura	8
2.59. Literatura	8
2.60. Literatura	8
2.61. Literatura	8
2.62. Literatura	8
2.63. Literatura	8
2.64. Literatura	8
2.65. Literatura	8
2.66. Literatura	8
2.67. Literatura	8
2.68. Literatura	8
2.69. Literatura	8
2.70. Literatura	8
2.71. Literatura	8
2.72. Literatura	8
2.73. Literatura	8
2.74. Literatura	8
2.75. Literatura	8
2.76. Literatura	8
2.77. Literatura	8
2.78. Literatura	8
2.79. Literatura	8
2.80. Literatura	8
2.81. Literatura	8
2.82. Literatura	8
2.83. Literatura	8
2.84. Literatura	8
2.85. Literatura	8
2.86. Literatura	8
2.87. Literatura	8
2.88. Literatura	8
2.89. Literatura	8
2.90. Literatura	8
2.91. Literatura	8
2.92. Literatura	8
2.93. Literatura	8
2.94. Literatura	8
2.95. Literatura	8
2.96. Literatura	8
2.97. Literatura	8
2.98. Literatura	8
2.99. Literatura	8
2.100. Literatura	8

Serdecznie dziękuję moim Promotorom
 – Panu Profesorowi dr hab. inż. Markowi Mitoskowi
 oraz Panu dr inż. Apoloniuszowi Kodurze
 za cenne wskazówki i wszechstronną pomoc
 udzielaną podczas prowadzenia badań i pisania niniejszej rozprawy.

Spis treści

Streszczenie	9
Spis oznaczeń	13
1. Wprowadzenie	15
1.1. Uzasadnienie podjęcia tematu	15
1.2. Teza i cele pracy	16
1.3. Zakres pracy	16
1.4. Stan wiedzy.....	17
2. Ustalony ciśnieniowy przepływ wody w rurociągu	19
2.1. Opis oporów tarcia w rurociągu	19
2.2. Opis oporów tarcia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o innej chropowatości.....	21
2.3. Teoretyczna analiza ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem	25
2.4. Hydrauliczne badania ustalonego przepływu w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz przewodem	32
2.4.1. Opis stanowiska badawczego.....	32
2.4.2. Metodyka badań	34
2.4.3. Zakres badań	37
2.4.4. Wyniki pomiarów	38
2.5. Analiza wyników pomiarów ustalonego przepływu wody w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz przewodem.....	42
2.6. Numeryczna analiza parametrów ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem obliczonych programem CFD Fluent54	
2.6.1. Opis programu	54
2.6.2. Dane do obliczeń.....	56
2.6.3. Wyniki obliczeń i ich analiza.....	59
2.6.4. Weryfikacja wyników obliczeń w oparciu o wyniki pomiarów	63

3. Nieustalony przepływ wody w przewodach wodociągowych podczas uderzenia hydraulicznego.....	65
3.1. Analityczny opis zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu.....	65
3.2. Analityczny opis zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem	74
3.2.1. Prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem	74
3.2.2. Analiza przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem.	83
3.2.3. Prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz cienkościennym przewodem	87
3.2.4. Analiza przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz cienkościennym przewodem.	89
3.2.5. Prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem	92
3.2.6. Analiza przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem.	96
3.2.7. Analiza porównawcza przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym, cienkościennym oraz grubościennym przewodem.	99
3.3. Hydrauliczne badania uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz przewodem	107
3.3.1. Opis stanowiska badawczego.....	107
3.3.2. Metodyka badań	110
3.3.3. Zakres badań	110
3.3.4. Wyniki pomiarów uderzenia hydraulicznego	111
3.4. Hydrauliczne badania uderzenia hydraulicznego w grubościennym przewodzie silikonowym	113
3.4.1. Opis stanowiska badawczego.....	113
3.4.2. Metodyka badań	116

3.4.3. Wyniki pomiarów uderzenia hydraulicznego i ich analiza	116
3.5. Analiza wyników pomiarów uderzenia hydraulicznego w rurociągu stalowym	118
3.5.1. Analiza wyników pomiarów uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu	118
3.5.2. Analiza wyników pomiarów uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem	119
3.5.3. Analiza wyników pomiarów uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem silikonowym	128
3.6. Numeryczna analiza uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez i z zamocowanym wewnątrz przewodem	137
3.6.1. Opis programu	137
3.6.2. Obliczenia numeryczne	143
3.6.3. Wyniki obliczeń numerycznych i ich analiza	150
4. Wnioski i podsumowanie	155
Spis literatury	158
Załącznik	163

Streszczenie

Tytuł pracy: Ciśnieniowy przepływ wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem

W pracy poddano analizie wpływ umieszczenia przewodu w obszarze ciśnieniowego przepływu wody na parametry hydrauliczne w rurociągu. Sformułowano następującą tezę pracy: „Przewód umieszczony wewnątrz stalowego rurociągu w obszarze ciśnieniowego przepływu wody powoduje niewielki wzrost liniowych strat ciśnienia w ruchu ustalonym oraz ma tłumiące oddziaływanie na przyrosty ciśnienia wody i skraca czas trwania dodatniego uderzenia hydraulicznego”. Celem pracy było wyjaśnienie wpływu umieszczenia przewodu w sieci wodociągowej na jej przepustowość i straty ciśnienia podczas ustalonego przepływu wody oraz sprężystości ścianki wprowadzanego przewodu na przebieg uderzenia hydraulicznego. Rozróżniono trzy rodzaje przewodów – przewody o pełnym przekroju, cienkościenne i grubościenne.

Praca składa się z dwóch zasadniczych części – pierwsza dotyczy ustalonego ciśnieniowego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem, zaś druga odnosi się do nicustalonego przepływu wody, występującego podczas uderzenia hydraulicznego. W każdej z obu części, jako metody badawcze wykorzystano analizy teoretyczne, badania hydrauliczne oraz obliczenia numeryczne. Pomiary hydrauliczne wykonano dla czterech różnych pełnych przewodów w postaci przewodów światłowodowych, oraz dla grubościennego przewodu silikonowego. Badania doświadczalne ograniczono do zakresu zewnętrznych średnic przewodów nieprzekraczających 0,15 wewnętrznej średnicy rurociągu.

Teoretyczną analizę ustalonego przepływu w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem przeprowadzono z wykorzystaniem hipotezy Einsteina. Wykazano, że decydujący wpływ na obliczony współczynnik oporu i straty ciśnienia ma wzrost średnicy zewnętrznej przewodu w stosunku do średnicy wewnętrznej rurociągu. Numeryczną analizę parametrów ustalonego ciśnieniowego przepływu wody przeprowadzono z wykorzystaniem programu CFD Fluent. Stwierdzono, że wprowadzenie przewodu powoduje nieznaczne zmniejszenie obszaru maksymalnej prędkości przepływu wody. W celu weryfikacji teoretycznych zależności opisujących ustalony przepływ wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem, przeprowadzono badania doświadczalne na modelu fizycznym. Pomierzone straty liniowe były zbliżone do obliczonych na podstawie zależności teoretycznych.

W ramach analizy teoretycznej nieustalonego przepływu wody, wyprowadzono trzy zależności pozwalające na analityczne obliczanie prędkości fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym, cienkościennym oraz grubościennym przewodem. Każdą z zależności wyprowadzono metodą bilansu masy oraz metodą bilansu pracy i energii. Obliczenia numeryczne dotyczące nieustalonego przepływu wody podczas uderzenia hydraulicznego w rurociągu z przewodem wykonano za pomocą programu obliczeniowego rozwiązującego równania uderzenia hydraulicznego zmodyfikowaną metodą elementów skończonych. Celem przeprowadzonych symulacji numerycznych było określenie wartości współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia, pozwalających na uzyskanie wysokiej zgodności obliczeń z pomiarami.

Z przeprowadzonych pomiarów uderzenia hydraulicznego wynika, że umieszczenie przewodu światłowodowego w obszarze nieustalonego przepływu wody skraca czas trwania zjawiska uderzenia hydraulicznego tj. sprawia, że kolejne amplitudy ciśnienia wygasają szybciej niż w przypadku rurociągu bez przewodu. Umieszczenie przewodu o podwyższonej odkształcalności ścianek znacząco zmniejsza maksymalne przyrosty ciśnienia wywołane zjawiskiem uderzenia hydraulicznego. Największą redukcję fali ciśnienia względem rurociągu bez przewodu otrzymano dla największego przepływu – przyrost ciśnienia w rurociągu z przewodem silikonowym stanowi 40,7% przyrostu ciśnienia w rurociągu bez przewodu.

Słowa kluczowe: rurociąg, przewód, kabel telekomunikacyjny, uderzenie hydrauliczne.

Abstract

Dissertation title: Pressure water flow in a pipeline with inserted cable or conduit

The thesis consists of two main parts. The first part concerns the steady water flow in the pipeline with inserted cable or conduit. The second part refers to the transient water flow occurring during water hammer phenomenon. In each of the two parts, theoretical analyzes, experimental tests and numerical calculations were used as research methods. Experimental tests were conducted for four different fiber optic cables, and for one thick-walled silicon conduit. Experimental studies were limited to the range of external diameters of cables or conduits not exceeding 0.15 of the inner diameter of the pipeline.

The theoretical analysis of the steady water flow in the pipeline with inserted conduit or cable was carried out using the Einstein hypothesis. It was found that the decisive influence on the calculated friction factors and head losses was the increase in the outer diameter of the conduit or cable in relation to the inner diameter of the pipeline. The numerical analysis of the flow parameters was carried out using CFD Fluent software. It has been established that the insertion of the cable or conduit into the pipeline causes a slight reduction in the area of maximum water flow velocity. In order to verify the theoretical formulas describing the steady water flow in the pipeline with inserted cable or conduit, experimental tests were conducted. The measured head losses were similar to those calculated on the basis of theoretical formulas.

Within the theoretical analysis of the transient water flow, three formulas have been derived which allow to calculate pressure wave velocity in the pipeline with inserted cable, or conduit - both thin-walled and thick-walled. Each of the formulas was derived using mass balance method and the work and energy balance method. Numerical calculations for the transient water flow during water hammer phenomenon in the pipeline with inserted cable or conduit were made using a finite element method software. The purpose of the numerical simulations was to determine the values of the dissipation coefficients, which allow for high compatibility of calculations with measurements.

The experimental tests of water hammer indicate that the insertion of fiber optic cable in the area of transient water flow shortens the water hammer phenomenon duration, ie. it makes pressure amplitudes damp faster than in the pipeline without the cable. Inserting a conduit with increased elasticity of the walls significantly reduces the maximum pressure increase caused by the water hammer phenomenon. The largest reduction in the pressure increase compared to the

pipeline without a conduit was obtained for the largest volumetric water flow rate - the pressure increase in the pipeline with inserted silicone conduit amounts to 40.7% of the pressure increase in the pipeline without the conduit.

Key words: pipeline, conduit, telecommunication cable, water hammer.

Spis oznaczeń

- c – prędkość fali ciśnienia w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu [m/s],
- c_c – prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz cienkościennym przewodem [m/s],
- c_g – prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem [m/s],
- c_p – prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem [m/s],
- D_1 – średnica wewnętrzna rurociągu [m],
- D_2 – średnica zewnętrzna przewodu [m],
- e – grubość ścianki przewodu [m],
- E – moduł Younga [Pa],
- E_k – zmiana energii kinetycznej [J],
- E_{sc} – przyrost energii sprężystej cieczy [J],
- E_{sp1} – przyrost energii sprężystej rurociągu [J],
- E_{sp2} – przyrost energii sprężystej przewodu [J],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s²],
- h_L – wysokość liniowych strat ciśnienia [m],
- I – spadek hydrauliczny [-],
- k – chropowatość bezwzględna powierzchni [m],
- K – moduł ściśliwości wody [Pa],
- L – długość rurociągu [m],
- l – obwód koła [m],
- p – ciśnienie [Pa],
- R – oporność hydrauliczna przewodu [s²/m⁵],
- R_h – promień hydrauliczny [m],
- t – czas [s],
- T – okres fali ciśnienia [s],
- T_p – czas powrotu fali odbitej [s],
- t_z – czas zamykania zaworu [s],
- U – obwód zwilżony [m],

v – średnia prędkość przepływu [m/s],

V – objętość [m³],

β_1, β_2 – współczynniki korygujące prędkość fali ciśnienia [-],

γ – ciężar właściwy [N/m³],

Δp – przyrost ciśnienia wywołany uderzeniem hydraulicznym [Pa],

ε – chropowatość względna [-],

λ – współczynnik oporów liniowych [-],

ν – kinematyczny współczynnik lepkości wody [m²/s],

ρ – gęstość wody [kg/m³],

σ – naprężenie [Pa],

χ – bezwzględne odchylenie procentowe [-],

ω – względny dekrement tłumienia [-].

Indeksy:

1 – parametry dotyczące rurowości,

2 – parametry dotyczące przewodu umieszczonego wewnątrz rurowości.

1. Wprowadzenie

1.1. Uzasadnienie podjęcia tematu

Rozwój usług związanych z przesyłaniem informacji sprawia, że konieczna jest rozbudowa infrastruktury telekomunikacyjnej. Tworzenie nowych sieci telekomunikacyjnych w gęsto zabudowanych obszarach miast stwarza jednak wiele problemów technicznych, ekonomicznych i administracyjnych. Jednym z rozwiązań tej kwestii jest wykorzystanie istniejącej infrastruktury sieci przesyłowych do prowadzenia przewodów w postaci światłowodów telekomunikacyjnych. Do najbardziej rozwiniętych sieci podziemnych należy sieć wodociągowa, która dociera do niemal wszystkich budynków i z powodzeniem może być wykorzystana do poprowadzenia światłowodów telekomunikacyjnych. Zastosowanie tego rozwiązania w praktyce mogłoby rozwiązać problem dostarczania usług telekomunikacyjnych, zwłaszcza na obszarach gęsto zabudowanych, a jednocześnie zabezpieczyć przewody światłowodowe przed zniszczeniem, np. w czasie pożaru. Wprowadzenie światłowodu do istniejącego rurociągu wiąże się ze zmniejszeniem jego pola przekroju czynnego i zmianą kształtu strumienia wody, co ma wpływ na hydrauliczne warunki przepływu wody. Wdrożenie pomysłu wykorzystania sieci wodociągowej do prowadzenia światłowodów telekomunikacyjnych wymaga wyjaśnienia wpływu wprowadzenia przewodu na hydrauliczne warunki przepływu w sieci, zarówno w przypadku ustalonego, jak i nieustalonego przepływu wody. Wyjaśnienie wpływu umieszczenia światłowodu telekomunikacyjnego w sieci wodociągowej na jego przepustowość i na straty ciśnienia, podczas ustalonego przepływu wody oraz wyjaśnienie wpływu sprężystości ścianki wprowadzanego światłowodu na przebieg zjawiska uderzenia hydraulicznego, to dwa istotne zagadnienia, wymagające naukowego rozwiązania. Celem podjętych badań była chęć rozwiązania obu wymienionych problemów.

Aby odróżnić przewód transportujący wodę od przewodu umieszczonego w obszarze przepływu, w dalszej części pracy przewód ciśnieniowy, w którym płynie woda nazywano rurociągiem. Określenie „przewód”, będzie odnosiło się do przewodu światłowodowego lub elastycznego umieszczonego wewnątrz rurociągu.

1.2. Teza i cele pracy

Umieszczenie przewodu telekomunikacyjnego w rurociągu spowoduje wzrost dyssypacji energii i zmianę parametrów przepływu wody. Nie jest znany wpływ umieszczenia przewodu w rurociągu, ani na parametry ustalonego, ani nieustalonego przepływu wody, występującego podczas uderzenia hydraulicznego.

Na początku procesu badawczego sformułowano następującą tezę pracy: „Przewód umieszczony wewnątrz stalowego rurociągu w obszarze ciśnieniowego przepływu wody powoduje niewielki wzrost liniowych strat ciśnienia w ruchu ustalonym oraz ma tłumiące oddziaływanie na przyrosty ciśnienia wody i skraca czas trwania dodatniego uderzenia hydraulicznego”.

Celami pracy było wyjaśnienie wpływu:

- umieszczenia przewodu w postaci światłowodu telekomunikacyjnego lub przewodu elastycznego w sieci wodociągowej na jej przepustowość i straty ciśnienia podczas ustalonego przepływu wody,
- sprężystości ścianki wprowadzanego przewodu na przebieg uderzenia hydraulicznego.

Do osiągnięcia wymienionych celów wykorzystano analizy teoretyczne, metodę eksperymentu fizycznego i numerycznego.

1.3. Zakres pracy

Praca została podzielona na dwie zasadnicze części – pierwsza dotyczy ustalonego ciśnieniowego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem, zaś druga odnosi się do nieustalonego przepływu wody, występującego podczas uderzenia hydraulicznego. W każdej z obu części, jako metody badawcze wykorzystano analizy teoretyczne, badania hydrauliczne oraz obliczenia numeryczne.

W ramach analizy teoretycznej nieustalonego przepływu wody, występującego podczas uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem, autor pracy wyprowadził trzy zależności pozwalające na analityczne obliczanie prędkości fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym, cienkościennym oraz grubościennym przewodem. Każdą z zależności wyprowadzono metodą bilansu masy oraz metodą bilansu pracy i energii. Wyprowadzenia te są oryginalnym osiągnięciem autora.

Badania hydrauliczne ustalonego i nieustalonego przepływu wody prowadzono na specjalnie zaprojektowanym stanowisku doświadczalnym na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.

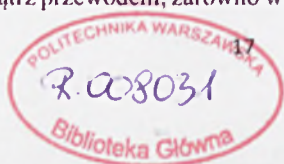
Numeryczną analizę parametrów ustalonego ciśnieniowego przepływu wody przeprowadzono z wykorzystaniem programu CFD Fluent. Obliczenia numeryczne dotyczące nieustalonego przepływu wody podczas uderzenia hydraulicznego w rurociągu z przewodem wykonano za pomocą programu obliczeniowego opracowanego przez prof. dr hab. inż. Romualda Szymkiewicza z Politechniki Gdańskiej.

1.4. Stan wiedzy

Ustalony ruch wody w przewodach pod ciśnieniem

Jednym z podstawowych równań współczesnej dynamiki płynów jest tzw. równanie Darcy'ego-Weisbacha. Zostało ono nazwane imieniem dwóch inżynierów żyjących w połowie XIX w., którzy opublikowali niezależne prace w 1857 i 1845 r. Równolegle prowadzono badania hydrauliczne. J. Poiseuille analizował m.in. wpływ natężenia przepływu na lepkość cieczy (1841). O. Reynolds opisał przejście z ruchu laminarnego w turbulentny (1883). Na początku XX w. L. Prandtl wraz z Th. Von Karmanem, P. Blasiusem i J. Nikuradse podjęli próbę uniwersalnego opisu współczynnika oporów ruchu. Badania J. Nikuradse (1950) są do dzisiaj wykorzystywane do weryfikacji wyników obliczeń. Do wyznaczenia współczynnika oporów ustalonego ruchu w przewodach pod ciśnieniem stosuje się formułę zaproponowaną przez C.F. Colebrooka i C.M. White'a (1939). Równanie Darcy'ego-Weisbacha nie było jednak powszechnie stosowane do momentu opracowania nomogramu Moody'ego (1944) oraz rozwoju technik komputerowych. Równanie Darcy'ego-Weisbacha, w porównaniu z empirycznymi zależnościami, takimi jak równanie Hazena-Williamsa, wymaga wykonywania uciążliwych obliczeń. Mimo to, ze względu na poprawność opisu ciśnieniowego przepływu cieczy, jest ono uznane, jako standardowe równanie dynamiki płynów. Dyskusję nt. stosowalności równań empirycznych w hydraulice przewodów ciśnieniowych prowadzili m.in. Liou C.P. (1998), Christensen B.A. (2000) i Swamee P.K. (2000).

Współcześnie podejmowane hydrauliczne badania ustalonego przepływu wody w przewodach pod ciśnieniem podejmowane są głównie dla weryfikacji obliczeń numerycznych. W literaturze można znaleźć prace dotyczące przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem, zarówno wśród polskich (Siwicki P. i Szeląg B., 2010),



jak i zagranicznych autorów (German J., 2007). Nie znaleziono jednak publikacji na temat hydraulicznych badań podejmowanych w celu weryfikacji wyników analiz teoretycznych i numerycznych z wynikami pomiarów ustalonego ciśnieniowego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem.

Nieustalony ruch wody w przewodach pod ciśnieniem

Za najstarsze publikacje dotyczące przepływów nieustalonych uznaje się prace autorstwa L. F. Menabrea z 1856 r. oraz J. Michaud z 1878 r. Pierwszym badaczem, który podjął hydrauliczne badania zjawiska uderzenia hydraulicznego był N.E. Żukowski. Wyniki jego badań nad rozprzestrzenianiem się fali ciśnienia w moskiewskich wodociągach umożliwiły wyprowadzenie zależności, na przyrost ciśnienia wywołanego uderzeniem hydraulicznym (1889), w której skorzystał ze wzoru wyznaczonego przez D. Kortewega (1878). Podobne badania podjął włoski inżynier L. Allievi, po awarii elektrowni wodnej w Papigno (Terni) w 1902 r. spowodowanej uderzeniem hydraulicznym. Prace L. Allievi'ego (1903, 1913) i N.E. Żukowskiego formułują podstawy teorii uderzenia hydraulicznego. Autorem pierwszej publikacji, w której człon tarcia wyrażono w postaci nieliniowej jest N.R. Gibson (1919). Pierwsze międzynarodowe konferencje, na których została poruszona tematyka uderzenia hydraulicznego odbyły się w 1933 i 1937 r. W drugiej połowie XX w. pojawiały się pierwsze monografie w całości poświęcone zagadnieniu nieustalonego przepływu cieczy, wśród których do najważniejszych należy zaliczyć „*Water hammer analysis*” autorstwa J. Parmakiana (1955). Rozwój komputerowej techniki obliczeniowej sprawił, że na szerszą skalę zaczęto stosować obliczenia numeryczne do analiz nieustalonych przepływów w przewodach ciśnieniowych. Pierwszą pracę, w której wyniki obliczeń numerycznych zweryfikowano w oparciu o wyniki pomiarów hydraulicznych opublikowali V.L. Streeter i Lai Ch. (1962).

Współcześnie badania fizyczne i numeryczne zjawiska uderzenia hydraulicznego prowadzone są na całym świecie, w tym również w Polsce. M. Niełaczny (2002) zajmował się badaniem uderzenia hydraulicznego w istniejącej sieci wodociągowej i analizował wpływ zbiorników wodno-powietrznych na tłumienie fali ciśnienia. R. Szymkiewicz (1975) podał numeryczne rozwiązania m.in. nieustalonego przepływu wody w rozgałęzionych sieciach wodociągowych. M. Mitosek (1997, 2003) analizował zmienność parametrów uderzenia hydraulicznego w przewodach z tworzyw sztucznych. Wspólne prace R. Szymkiewicza

i M. Mitoska (2005, 2007, 2012, 2014) dotyczą modelowania numerycznego uderzenia hydraulicznego. We współczesnych publikacjach na temat nieustalonego przepływu w przewodach ciśnieniowych dominują obliczenia numeryczne. Odnosi się to zarówno do artykułów w czasopismach naukowych (Pezzinga G., 1999, 2000, Bergant A., 2001), jak i monografii (Mambretti S., 2013). W znakomitej większości publikacji dotyczących numerycznego modelowania uderzenia hydraulicznego, podkreśla się niedoskonałość istniejących modeli numerycznych i konieczność dalszego ich rozwijania.

W literaturze nie odnaleziono analiz teoretycznych ani opisu badań hydraulicznych dotyczących wpływu umieszczenia przewodu o innej sprężystości, niż sprężystość rurociągu, na przebieg zjawiska uderzenia hydraulicznego.

2. Ustalony ciśnieniowy przepływ wody w rurociągu

2.1. Opis oporów tarcia w rurociągu

Hydrauliczne obliczenia ustalonego przepływu wody w rurociągu ciśnieniowym polegają na określeniu średniej prędkości przepływu oraz zmian ciśnienia, które powiązane są ze stratami energii strumienia w rurociągu. Średnią prędkość przepływu wody w rurociągu oblicza się zwykle z zależności Darcy'ego-Weisbacha (2.1)

$$v = \sqrt{\frac{8gR_h I}{\lambda}} \quad (2.1)$$

gdzie:

v – średnia prędkość przepływu wody w rurociągu [m/s],

g – przyspieszenie ziemskie [m/s²],

I – spadek hydrauliczny [-],

R_h – promień hydrauliczny przekroju strumienia [m],

λ – współczynnik oporów liniowych [-].

Promień hydrauliczny R_h przekroju strumienia w rurociągu jest stosunkiem pola przekroju strumienia A do obwodu zwilżonego przekroju strumienia U :

$$R_h = \frac{A}{U} \quad (2.2)$$

gdzie:

A – pole przekroju strumienia [m^2],

U – obwód zwilżony przekroju strumienia [m].

Dla całkowicie wypełnionego wodą rurociągu kołowego o średnicy D , promień hydrauliczny jest równy:

$$R_h = \frac{D}{4} \quad (2.3)$$

gdzie: D – średnica rurociągu [m].

Zależność (2.3) umożliwia stosowanie wzoru Darcy'ego-Weisbacha dla rurociągów ciśnieniowych o niekołowym przekroju lub przy częściowym napełnieniu przewodu kołowego przez podstawienie $D = 4R_h$.

Spadek hydrauliczny (spadek linii energii wzdłuż rurociągu) definiuje się, jako stosunek liniowych strat energii w rurociągu h_L do długości odcinka L , na którym ta strata wystąpiła:

$$I = \frac{h_L}{L} \quad (2.4)$$

gdzie:

I – spadek hydrauliczny [-],

h_L - wysokość strat energii [m],

L – długość odcinka rurociągu, na którym wystąpiła liniowa strata energii [m].

Wysokość strat energii na długości rurociągu, wyrażana jest zależnością wynikającą z równoległości linii energii i ciśnień, jako stosunek spadku ciśnienia na długości odcinka rurociągu L do ciężaru właściwego wody γ :

$$h_L = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2.5)$$

gdzie:

p_1 – ciśnienie w początkowym przekroju [Pa],

p_2 – ciśnienie w końcowym przekroju [Pa],

γ – ciężar właściwy wody [N/m^3].

Współczynnik oporów liniowych λ w ustalonym ruchu wody w rurociągu ciśnieniowym jest w ogólnym przypadku funkcją liczby Reynoldsa i chropowatości względnej ε wewnętrznej powierzchni rurociągu $\lambda = \lambda(\text{Re}, \varepsilon)$. Wymienione parametry oblicza się z zależności:

$$\text{Re} = \frac{4R_h v}{\nu} = \frac{vD}{\nu} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon = \frac{k}{4R_h} = \frac{k}{D} \quad (2.7)$$

gdzie:

Re – liczba Reynoldsa [-],

ν – kinematyczny współczynnik lepkości wody [m^2/s],

ε – względna chropowatość powierzchni rurociągu [-],

k – bezwzględna chropowatość powierzchni rurociągu [m].

Chropowatość bezwzględna powierzchni rurociągu (zastępcza chropowatość piaskowa) zależy od średniej wysokości nierówności powierzchni, ich kształtu i rozmieszczenia na powierzchni rurociągu. Współczynnik oporów liniowych λ w turbulentnym ruchu wody zależy:

- od liczby Reynoldsa w strefie rur hydraulicznie gładkich ($\lambda = f(\text{Re})$),
- od liczby Reynoldsa i chropowatości względnej ε w strefie przejściowej ($\lambda = f(\text{Re}, \varepsilon)$),
- od chropowatości względnej w strefie kwadratowej zależności oporów w strefie rur hydraulicznie szorstkich ($\lambda = f(\varepsilon)$).

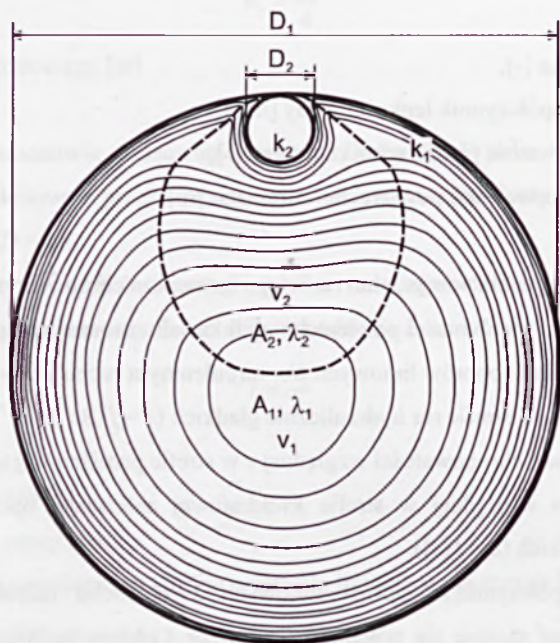
Do obliczania współczynnika oporów liniowych λ w ruchu turbulentnym w każdej z wymienionych stref stosuje się półempiryczny wzór Colebrooka-White'a (2.8) (Gałąj J. i inni, 2016):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,71} \right) \quad (2.8)$$

2.2. Opis oporów tarcia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o innej chropowatości

Wprowadzenie przewodu do rurociągu wpływa na warunki przepływu wody przez zmniejszenie przekroju strumienia, wydłużenie obwodu zwilżonego przekroju strumienia oraz zwiększenie oporów przepływu. Powierzchnia przewodu może mieć chropowatość różną od powierzchni rurociągu. Wartość współczynników oporów liniowych w rurociągu z przewodem wyznaczono wykorzystując hipotezę H.A. Einsteina (1934). Zakłada ona równość średniej

prędkości wody v w całym przekroju strumienia i średniej prędkości v_i w obszarach przekroju, w których warunki przepływu są kształtowane przez jednorodną chropowatość np. wewnętrznej powierzchni rurociągu i zewnętrznej powierzchni przewodu ($v = v_i$). Podziału przekroju poprzecznego strumienia na wspomniane obszary o powierzchni A_i dokonuje się prowadząc linie ortogonalne do izolinii prędkości w przekroju dla powierzchni przewodu/rurociągu o jednorodnej chropowatości k_i – rys. 2.1 (Andrzejewski M., Szela B., 2011).



Rys. 2.1. Podział przekroju poprzecznego strumienia na obszary, w których warunki przepływu są kształtowane przez daną chropowatość powierzchni.

Fig. 2.1. Cross section of the liquid stream divided into areas where the flow conditions are formed by a given surface roughness.

A_1, v_1, λ_1 – parametry kształtowane przez chropowatość powierzchni rurociągu k_1 ,

A_2, v_2, λ_2 – parametry kształtowane przez chropowatość zewnętrznej powierzchni przewodu k_2 .

Wyznaczenia pola powierzchni przekroju strumienia A_i , długości obwodu zwilżonego U_i , umożliwia obliczenie promienia hydraulicznego R_{hi} obszaru przepływu, w którym warunki przepływu są kształtowane przez daną chropowatość powierzchni k_i (rys. 2.1). Równość

średniej prędkości przepływu wody w każdej powierzchni przekroju A_i i całego przekroju strumienia pozwala obliczyć współczynniki oporu w wydzielonym obszarze λ_i wywołane wyodrębnioną chropowatością z przekształconego wzoru Darcy'ego-Weisbacha (2.1):

$$v_i = \sqrt{\frac{8gR_{hi}I}{\lambda_i}} = \sqrt{\frac{8gA_iI}{\lambda_i U_i}} \quad (2.9)$$

Taki sposób określenia współczynnika oporów powierzchni jest kłopotliwy ze względu na konieczność wykreślenia izolinii prędkości w przekroju, wydzielienia obszarów, określenia ich powierzchni, obwodów zwilżonych itd. W praktyce wykorzystuje się iteracyjną metodę obliczeń współczynników oporów opisaną niżej.

Indeks „i” we wzorze (2.9) oznacza, że parametr odnosi się do i-tej powierzchni przekroju poprzecznego strumienia, w której warunki przepływu kształtowane są przez chropowatość powierzchni k_i . Spadek hydrauliczny jest stały, tzn. $I = I_i$. Pole przekroju strumienia jest sumą pól cząstkowych, więc zachodzi związek:

$$A = \Sigma A_i = \Sigma \frac{v_i^2 \lambda_i U_i}{8gI} = \frac{v_i^2}{8gI} \Sigma \lambda_i U_i \quad (2.10)$$

Średnią prędkość przepływu w rurociągu wyraża się wzorem Darcy'ego-Weisbacha (2.1), w którym pole przekroju strumienia A określa się zależnością (2.1), przy średnim współczynniku oporów liniowych w przekroju λ_z :

$$v = \sqrt{\frac{8gIR_h}{\lambda_z}} = \sqrt{\frac{8gI \Sigma A_i}{\lambda_z \Sigma U_i}} = \sqrt{\frac{8gI \frac{v_i^2}{8gI} \Sigma \lambda_i U_i}{\lambda_z \Sigma U_i}} = v_i \sqrt{\frac{\Sigma \lambda_i U_i}{\lambda_z \Sigma U_i}} \quad (2.11)$$

gdzie:

λ_i – współczynnik oporów określony dla części przekroju strumienia A_i na podstawie chropowatości k_i ,

λ_z – średni współczynnik oporów w przekroju strumienia A .

Ponieważ $v = v_i$, więc średni współczynnik oporów liniowych w przekroju strumienia w rurociągu jest równy:

$$\lambda_z = \frac{\Sigma \lambda_i U_i}{\Sigma U_i} = \frac{\Sigma \lambda_i U_i}{U} \quad (2.12)$$

gdzie:

$$U = \Sigma U_i \quad (2.13)$$

Z warunku równości prędkości ($v = v_i$) oblicza się promień hydrauliczny R_{hi} , tzn.:

$$\sqrt{\frac{8gR_h I}{\lambda_z}} = \sqrt{\frac{8gR_{h1} I}{\lambda_1}} \quad (2.14)$$

Stąd:

$$R_{h1} = \frac{\lambda_1 R_h}{\lambda_z} \quad (2.15)$$

Obliczenia wartości promieni hydraulicznych R_{h1} prowadzi się metodą iteracji prostych. W pierwszym przybliżeniu przyjmuje się równość promieni hydraulicznych dla części strumienia o różnych chropowatościach i całego przekroju rurociągu z przewodem:

$$R_{h1} = R_{h2} = R_h \quad (2.16)$$

gdzie:

R_{h1} – promień hydrauliczny części przekroju strumienia, w którym warunki przepływu kształtowane są przez chropowatość rurociągu [m],

R_{h2} – promień hydrauliczny części przekroju strumienia, w którym warunki przepływu kształtowane są przez chropowatość przewodu [m].

Następnie oblicza się współczynnik oporów λ_1 ze wzoru Colebrooka-White'a (2.8) i średni współczynnik oporów z zależności (2.12). Obliczenia kończy się, gdy wartości promieni hydraulicznych oraz współczynników oporu nie zmieniają się w trakcie kolejnych iteracji. Obliczenia współczynników oporu i strat energii w rurociągu z przewodem prowadzi się dla założonej średniej prędkości przepływu wody.

Pole przekroju strumienia w rurociągu o średnicy wewnętrznej D_1 po umieszczeniu w nim przewodu o średnicy wewnętrznej D_2 oblicza się z zależności:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) \quad (2.17)$$

Obwód zwilżony przekroju rurociągu z przewodem wyraża zależność:

$$U = \pi (D_1 + D_2) \quad (2.18)$$

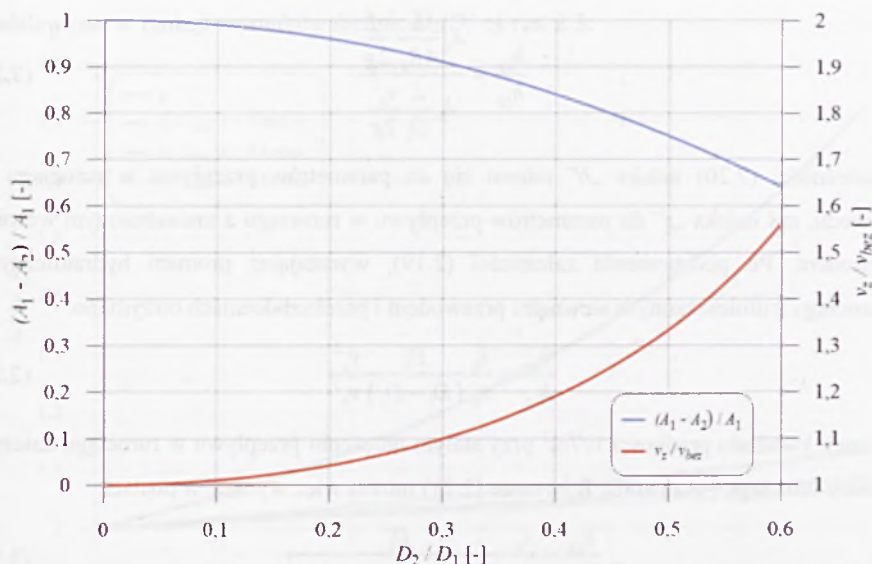
Wtedy promień hydrauliczny jest równy:

$$R_h = \frac{D_1 - D_2}{4} \quad (2.19)$$

Współczynnik oporów liniowych oblicza się ze wzoru Colebrooka-White'a (2.8).

2.3. Teoretyczna analiza ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem

Przewód o średnicy D_2 wprowadzony do rurociągu zmniejsza pole poprzecznego przekroju strumienia wody. Stosunki pola przekroju strumienia po wprowadzeniu przewodu do pola przekroju rurociągu w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 przedstawiono na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Zmienność pola przekroju rurociągu po wprowadzeniu przewodu w stosunku do pola rurociągu bez przewodu oraz prędkości przepływu wody w rurociągu z przewodem do prędkości bez przewodu przy $Q = const.$ w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 .

Fig. 2.2. Variability of the pipeline's cross section area after insertion of the cable in relation to the pipeline area without the cable, and the flow velocity in the pipeline with the cable in relation to the flow velocity in the pipeline without the cable at $Q = const.$ as a function of diameter ratio D_2/D_1 .

Wprowadzenie do rurociągu przewodu np. o średnicy $D_2 = 0,3 D_1$ ($D_2/D_1 = 0,3$) powoduje zmniejszenie pola przekroju strumienia $(A_1 - A_2)/A_1$ do 91% (rys. 2.2). Jeżeli przyjąć, że umieszczenie przewodu w rurociągu nie może wpłynąć na wartość natężenia przepływu wody w rurociągu ($Q = const$), to nastąpić musi wzrost prędkości wody. Stosunek prędkości wody w rurociągu z przewodem do prędkości w rurociągu bez przewodu jest odwrotnością

poprzedniego stosunku, tzn. $v_z/v_{bz} = A_1/(A_1-A_2)$. Wprowadzenie przewodu o średnicy $D_2 = 0,3 D_1$ spowoduje 10% wzrost prędkości wody w przewodzie (rys. 2.2). Należy zauważyć, że stosowanie przewodów D_2 powyżej $0,2 D_1$, wprowadzanych do sieci wodociągowych jest mało prawdopodobne z praktycznego punktu widzenia.

W celu wyjaśnienia, jak wprowadzenie przewodu wpływa na liniowe straty energii w rurociągu pod ciśnieniem, obliczono stosunki liniowych strat energii w rurociągu z i bez umieszczonego wewnątrz przewodu, wykorzystując zależność:

$$\frac{h_{Lz}}{h_{Lb}} = \frac{\lambda_z \frac{L}{4R_b} \frac{v_z^2}{2g}}{\lambda_b \frac{L}{D_1} \frac{v_b^2}{2g}} \quad (2.20)$$

W zależności (2.20) indeks „b” odnosi się do parametrów przepływu w rurociągu bez przewodu, zaś indeks „z” do parametrów przepływu w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem. Po podstawieniu zależności (2.19), wyrażającej promień hydrauliczny R_h w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem i przekształceniach otrzymano:

$$\frac{h_{Lz}}{h_{Lb}} = \frac{\lambda_z}{\lambda_b} \frac{D_1}{(D_1 - D_2)} \frac{v_z^2}{v_b^2} \quad (2.21)$$

Stosunek kwadratu prędkości v_z^2/v_b^2 przy stałym natężeniu przepływu w rurociągu zależy od średnicy rurociągu i przewodu. Równanie (2.21) można więc wyrazić w postaci:

$$\frac{h_{Lz}}{h_{Lb}} = \frac{\lambda_z}{\lambda_b} \frac{D_1^5}{(D_1 - D_2)(D_1^2 - D_2^2)^2} \quad (2.22)$$

Wprowadzając oznaczenie:

$$\kappa = \frac{D_1^5}{(D_1 - D_2)(D_1^2 - D_2^2)^2} \quad (2.23)$$

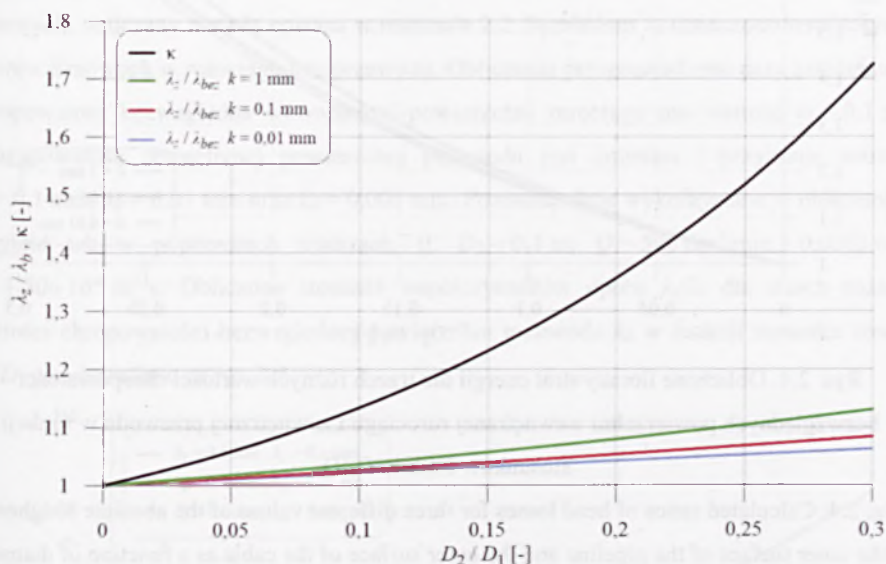
stosunek strat energii w rurociągu z przewodem do strat energii w rurociągu bez przewodu, można zapisać w postaci:

$$\frac{h_{Lz}}{h_{Lb}} = \kappa \frac{\lambda_z}{\lambda_b} \quad (2.24)$$

Wartość ilorazu κ zależy jedynie od średnicy wewnętrznej rurociągu D_1 i średnicy zewnętrznej przewodu D_2 .

W celu przeanalizowania jak parametry hydrauliczne w rurociągu oraz wymiary geometryczne rurociągu i przewodu wpływają na liniowe straty energii obliczono wartości ilorazu κ oraz stosunki λ_z/λ_b , dla różnych średnic D_2 . Przyjęto, że rurociąg ma średnicę

$D_2 = 0,1$ m, płynie w nim woda o natężeniu $Q = 500 \text{ dm}^3/\text{min} = 0,0083 \text{ m}^3/\text{s}$ i kinematycznym współczynniku lepkości $\nu = 1,306 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Dla takiej średnicy rurociągu, prędkość przepływu wody w rurociągu bez przewodu wynosi $v = 1,06 \text{ m/s}$. Współczynnik oporów liniowych po wprowadzeniu przewodu wyznaczano z zależności (2.8), uwzględniając przy tym niekołowy przekrój poprzeczny strumienia (2.19). Założono, że przewód ma tą samą chropowatość bezwzględną powierzchni, co rurociąg $k_1 = k_2 = k$. Obliczenia ilorazów współczynników oporu wykonano dla trzech różnych wartości chropowatości bezwzględnych. Wyniki obliczeń przedstawiono w funkcji stosunków średnic D_2/D_1 na rys. 2.3.



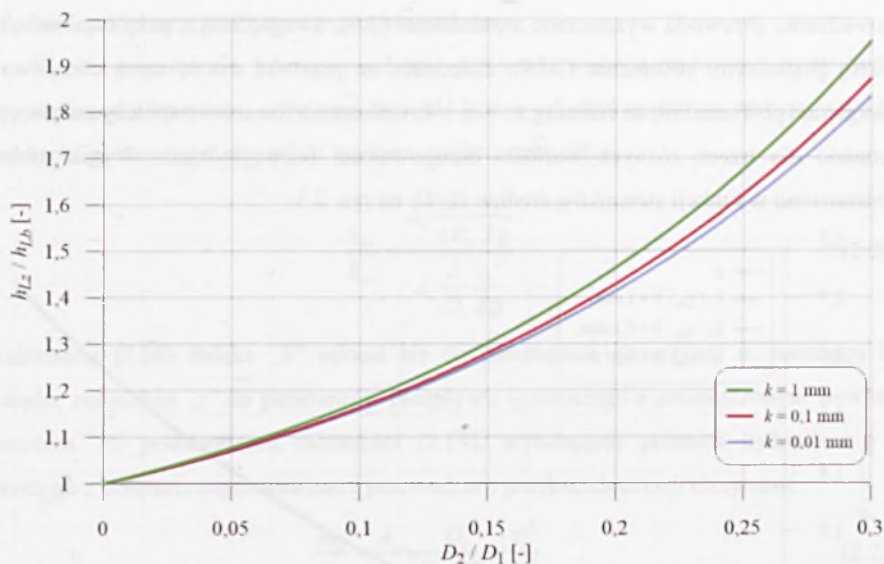
Rys. 2.3. Obliczone ilorazy współczynników oporów liniowych dla trzech różnych wartości chropowatości bezwzględnych powierzchni wewnętrznej rurociągu i zewnętrznej przewodu w funkcji stosunków średnic D_2/D_1 .

Fig. 2.3. Calculated ratios of friction factors for three different values of absolute roughness of the inner surface of the pipeline and outer surface of the cable as a function of diameter ratio D_2/D_1 .

Wartości κ rosną znacznie szybciej niż wartości stosunków λ_z/λ_b wraz ze wzrostem stosunku D_2/D_1 (rys. 2.3). Oznacza to, że większy wpływ na przyrost liniowych strat energii ma stosunek średnicy przewodu i rurociągu, niż przyrost średniego współczynnika oporów liniowych λ_z w stosunku do współczynnika oporów liniowych λ_b . Wartości ilorazów λ_z/λ_b dla stosunków

średnic $D_2/D_1 < 0,15$ są zbliżone dla wszystkich rozpatrywanych chropowatości bezwzględnych.

Na rys. 2.4 przedstawiono także obliczone ilorazy h_{Lz}/h_{Lb} w funkcji D_2/D_1 .

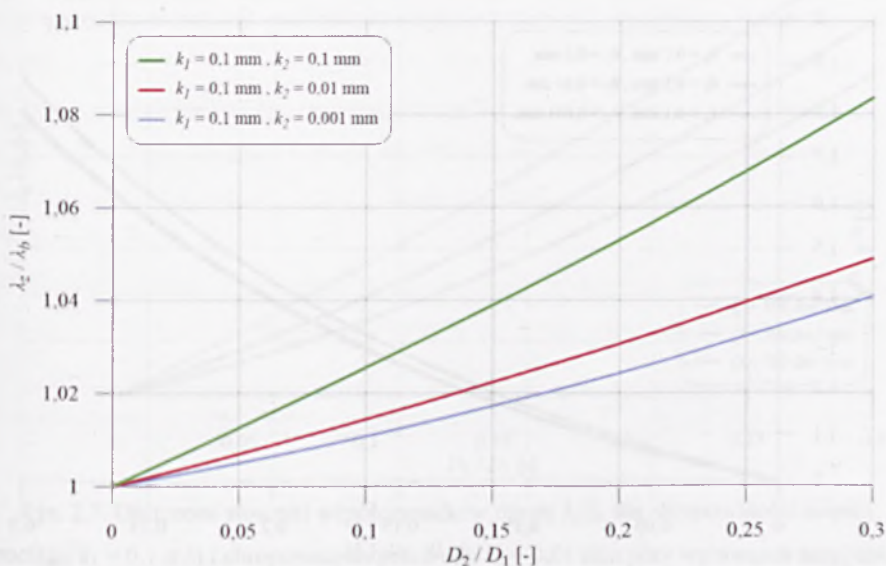


Rys. 2.4. Obliczone ilorazy strat energii dla trzech różnych wartości chropowatości bezwzględnych powierzchni wewnętrznej rurociągu i zewnętrznej przewodu w funkcji stosunków średnic D_2/D_1 .

Fig. 2.4. Calculated ratios of head losses for three different values of the absolute roughness of the inner surface of the pipeline and the outer surface of the cable as a function of diameter ratio D_2/D_1 .

Chropowatość powierzchni rurociągu i przewodu ma niewielki wpływ na przyrost liniowych strat energii spowodowanych umieszczeniem przewodu wewnątrz rurociągu (rys. 2.4). Wzrost liniowych strat energii jest tym większy, im większa jest średnica przewodu w stosunku do średnicy rurociągu. Przyrost stosunków h_{Lz}/h_{Lb} w funkcji D_2/D_1 ma charakter potęgowy. Dla średnicy przewodu $D_2 = 0,15 D_1$ względny przyrost linowych strat energii dla wszystkich rozpatrywanych chropowatości bezwzględnych wynosi ok. 30%. Przy dwukrotnie większej średnicy przewodu, tj. $D_2 = 0,30 D_1$, liniowe straty energii są aż o ponad 80% wyższe niż w rurociągu bez przewodu.

W dotychczasowych rozważaniach przyjmowano tą samą wartość chropowatości bezwzględnej powierzchni wewnętrznej rurociągu i zewnętrznej przewodu. Zwykle przewód umieszczony wewnątrz rurociągu jest wykonany z innego materiału. Zakładając, że rurociąg jest stalowy, zaś umieszczony wewnątrz przewód jest wykonany z tworzywa sztucznego, można przyjąć, że chropowatość powierzchni przewodu jest niższa od chropowatości powierzchni rurociągu. W celu przeanalizowania jak chropowatość zewnętrznej powierzchni przewodu wpływa na wartość współczynnika oporów liniowych, obliczono stosunki λ_z/λ_b dla różnych średnic przewodu D_2 . Symbolem λ_z oznaczono średni współczynnik oporów liniowych, obliczany metodą opisaną w rozdziale 2.2. Symbolem λ_b oznaczono współczynnik oporów liniowych w rurociągu bez przewodu. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że chropowatość bezwzględna wewnętrznej powierzchni rurociągu ma wartość $k_1 = 0,1$ mm, a chropowatość zewnętrznej powierzchni przewodu jest zmienna i przyjmuje wartości $k_2 = 0,1$ mm, $k_2 = 0,01$ mm oraz $k_2 = 0,001$ mm. Pozostałe dane wykorzystane w obliczeniach przyjęto jak w poprzednich analizach, tj. $D_2 = 0,1$ m, $Q = 500$ dm³/min = 0,0083 m³/s, $v = 1,306 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Obliczone stosunki współczynników oporu λ_z/λ_b dla trzech różnych wartości chropowatości bezwzględnej powierzchni przewodu k_2 w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 przedstawiono na rys. 2.5.

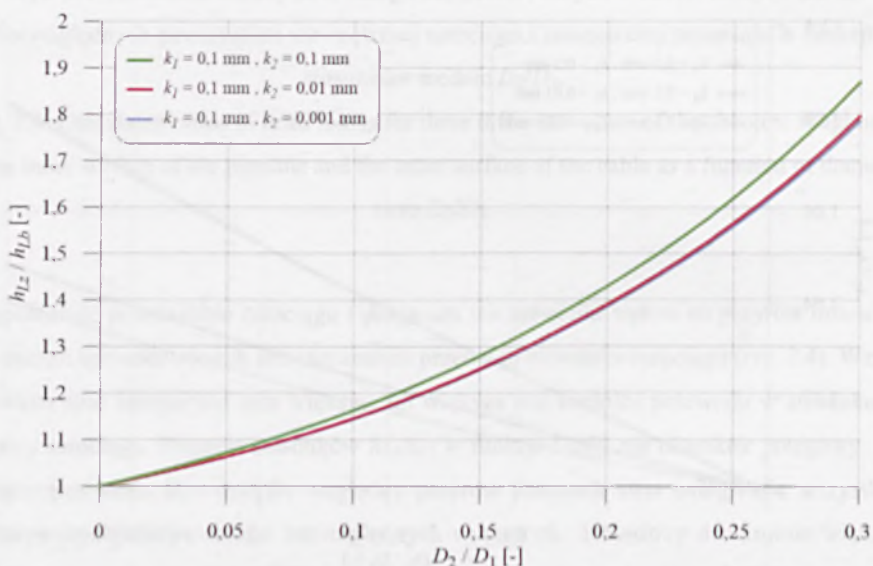


Rys. 2.5. Obliczone stosunki współczynników oporu λ_z/λ_b dla trzech różnych wartości chropowatości bezwzględnej powierzchni przewodu k_2 w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 .

Fig. 2.5. Calculated ratios of friction factors λ_z/λ_b for three different values of the absolute surface roughness of the conduit k_2 as a function of diameter ratio D_2/D_1 .

Współczynnik oporów liniowych dla rurociągu bez przewodu jest mniejszy od średniego współczynnika oporów liniowych dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem, tzn. $\lambda_z/\lambda_h > 1$ (rys. 2.5). Stosunki współczynników oporów liniowych są tym mniejsze, im mniejsza jest chropowatość bezwzględna powierzchni przewodu. Wartości stosunków współczynników oporów liniowych λ_z obliczone dla $k_2 = 0,001$ mm oraz $k_2 = 0,01$ mm przyjmują bardzo zbliżone wartości. Różnice pomiędzy wartościami ilorazów λ_z/λ_h dla danej chropowatości powierzchni przewodu k_2 rosną wraz ze wzrostem średnicy zewnętrznej przewodu. Przyrosty średnich współczynników oporów liniowych w rurociągu z przewodem względem współczynników oporów liniowych dla rurociągu bez przewodu są niewielkie. Dla chropowatości powierzchni przewodu $k_2 = 0,01$ mm i stosunku średnic $D_2/D_1 = 0,3$, średni współczynnik oporów liniowych jest o 4% większy niż współczynnik oporów liniowych w rurociągu bez przewodu.

W celu przeanalizowania jak chropowatość powierzchni przewodu umieszczonego wewnątrz rurociągu wpływa na liniowe straty energii, obliczono stosunki h_{Lz}/h_{Lh} , przyjmując takie same dane, jak w analizie stosunków współczynników oporów. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 2.6 w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 .

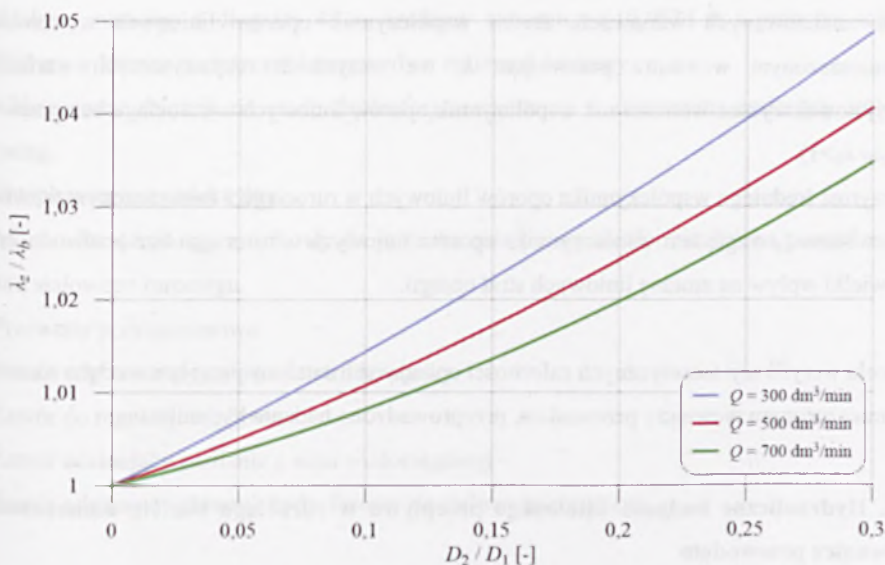


Rys. 2.6. Obliczone stosunki liniowych strat energii h_{Lz}/h_{Lh} dla trzech różnych wartości chropowatości bezwzględnej powierzchni przewodu k_2 w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 .

Fig. 2.6. Calculated ratios of head losses h_{Lz}/h_{Lh} for three different values of the absolute surface roughness of the cable k_2 as a function of diameter ratio D_2/D_1 .

Z rys. 2.6 wynika, że dla chropowatości powierzchni przewodu $k_2 = 0,001$ mm oraz $k_2 = 0,01$ mm otrzymano zbliżone wartości ilorazów h_{Lz}/h_{Lb} . Nieco większe wartości ilorazów h_{Lz}/h_{Lb} otrzymano przy chropowatości przewodu $k_2 = 0,1$ mm, czyli w przypadku, gdy chropowatość powierzchni rurociągu i przewodu jest taka sama. Przyjmowanie większej wartości chropowatości powierzchni przewodu do wyznaczania współczynnika oporów liniowych i strat energii nie ma praktycznego uzasadnienia. Dla stosunku średnic $D_2/D_1 = 0,15$ i chropowatości powierzchni przewodu $k_2 = 0,001$ mm, wartość ilorazu h_{Lz}/h_{Lb} wynosi 1,25, zaś w przypadku, gdy przyjmie się tą samą wartość chropowatości bezwzględnej powierzchni rurociągu i przewodu ($k_1 = k_2 = 0,1$ mm), stosunek h_{Lz}/h_{Lb} jest równy 1,28.

W celu przeanalizowania jak prędkość przepływu wody w rurociągu wpływa na wartość średniego współczynnika oporów liniowych, dla trzech różnych wydatków obliczono wartości stosunków λ_z/λ_b , przyjmując chropowatość bezwzględną powierzchni rurociągu $k_1 = 0,1$ mm, zaś chropowatość bezwzględną powierzchni przewodu $k_2 = 0,01$ mm. Obliczone stosunki współczynników oporu przedstawiono na rys. 2.7 w funkcji D_2/D_1 .



Rys. 2.7. Obliczone stosunki współczynników oporu λ_z/λ_b dla chropowatości ścianki rurociągu $k_1 = 0,1$ mm i chropowatości przewodu $k_2 = 0,01$ mm przy wybranych natężeniach przepływu wody w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 .

Fig. 2.7. The calculated ratios of friction factor λ_z/λ_b for the roughness of the inner surface of the pipeline $k_1 = 0,1$ mm and the roughness of the outer surface of the cable $k_2 = 0,01$ mm for the selected water flow rates as a function of diameter ratio D_2/D_1 .

Obliczone wartości ilorazów λ_z/λ_h są tym większe, im mniejsze są prędkości wody i natężenie przepływu w rurociągu. Oznacza to, że względne przyrosty liniowych strat energii w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem w stosunku do rurociągu bez przewodu maleją wraz ze wzrostem natężenia przepływu. Dla rozpatrywanych przepływów, przyrosty λ_z względem λ_h są niewielkie i nie przekraczają 5% przy $D_2/D_1 = 0,3$.

Podsumowanie

Przeprowadzone analizy, wykonane przy wykorzystaniu hipotezy Einsteina, wykazują, że:

- istotny wpływ na obliczone straty energii ma wzrost średnicy przewodu w stosunku do średnicy rurociągu,
- chropowatość powierzchni przewodu ma niewielki wpływ na zmianę współczynnika oporów liniowych i straty energii względem przepływu wody w rurociągu bez przewodu,
- przyrost strat liniowych w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem jest tym większy im mniejsze jest natężenie przepływu w rurociągu,
- w analizowanych warunkach, średni współczynnik oporów liniowych w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem λ_z we wszystkich rozpatrywanych wariantach przyjmował wyższe wartości niż współczynnik oporów liniowych w rurociągu bez przewodu λ_h ($\lambda_z/\lambda_h > 1$)
- przyrost średniego współczynnika oporów liniowych w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem λ_z względem współczynnika oporów liniowych w rurociągu bez przewodu λ_h ma niewielki wpływ na zmianę liniowych strat energii.

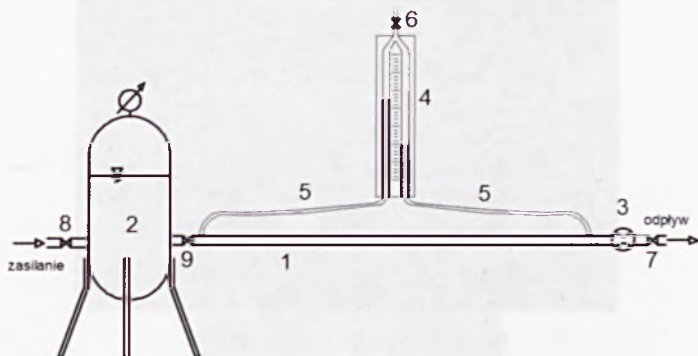
W celu weryfikacji teoretycznych zależności opisujących ustalony przepływ wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem, przeprowadzono badania hydrauliczne.

2.4. Hydrauliczne badania ustalonego przepływu w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz przewodem

2.4.1. Opis stanowiska badawczego

Do badań charakterystyk ustalonego przepływu wody w rurociągu bez i z umieszczonymi, wewnątrz przewodem zaprojektowano i zbudowano stanowisko

badawcze w piwnicy budynku Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. Schemat stanowiska badawczego pokazano na rys. 2.8.



Rys. 2.8. Schemat stanowiska pomiarowego do badania ustalonego przepływu wody.

Fig. 2.8. Scheme of the measuring stand for studying a steady water flow.

Stanowisko badawcze składa się z następujących elementów:

1. Stalowy rurociąg o długości 48 m, średnicy wewnętrznej 0,0531 m i grubości ścianki 0,0035 m, w którym umieszczano przewody o zmiennej średnicy.
2. Ciśnieniowy zbiornik na wodę (hydrofor) zaopatrzony w manometr, zasilający stalowy rurociąg.
3. Przepływomierz indukcyjny.
4. Manometr różnicowy π -rurkowy do pomiaru różnicy wysokości ciśnień na początku i na końcu stalowego rurociągu.
5. Przewody przyłączeniowe.
6. Zawór odpowietrzający manometr różnicowy.
7. Zawór do regulacji odpływu.
8. Zawór odcinający zasilanie z sieci wodociągowej
9. Zawór odcinający zbiornik hydroforowy do stalowego rurociągu

Stalowy rurociąg o długości 48 m składał się z 16 równych odcinków o długości 3 m. Ze względu na umieszczanie w rurociągu przewodów o różnych średnicach, został połączony przy pomocy szybkozłączy typu Camlock (fot. 2.1), co umożliwiało jego szybki demontaż.



Fot. 2.1. Złączka typu Camlock.

Photo 2.1. Camlock fitting.

Wewnątrz rurociągu zostały przyspawane pierścienie, wykorzystywane do mocowania i unieruchamiania przewodu. Pierścienie miały średnicę zewnętrzną ok. 9 mm i były mocowane do powierzchni na początku i w środku każdego 3-metrowego odcinka rurociągu (rys. 2.9).



Rys. 2.9. Schemat umiejscowienia pierścieni mocujących w rurociągu.

Fig. 2.9. Scheme of the mounting rings in the pipeline.

2.4.2. Metodyka badań

Straty ciśnienia na długości rurociągu mierzono przy pomocy manometru różnicowego wypełnionego wodą i powietrzem. Rurociąg wyposażono w trzy króćce, w które wkręcano czujniki ciśnienia do badań zmian ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego. Króćce na początku i na końcu rurociągu umożliwiały podłączenie przezroczystych przewodów przyłączeniowych do ramion manometru. Manometr wyposażony był w zawór

odpowietrzający oraz w miarkę, która pozwalała na odczyt różnicy wysokości ciśnienia z dokładnością do 1 mm (fot. 2.2).



Fot. 2.2. Miarka do odczytu wysokości różnicy ciśnień w rurociągu.

Photo 2.2. Liquid column gauge.

Natężenie przepływu wody w rurociągu mierzono przepływomierzem indukcyjnym w zakresie od 0 do 63 dm³/min. z dokładnością do 0,1 dm³/min.

Przewody przewlekano przez przyspawane wcześniej pierścienie w każdej z szesnastu sekcji rurociągu (fot. 2.3).



Fot. 2.3. Proces przewlekania przewodów przez uchwyty w rurociągu.

Photo 2.3. The process of inserting the cable through the mounting rings in the pipeline.

Przewód od strony zbiornika hydroforowego (od wlotu) był zakończony nakrętką, aby uniemożliwić wysunięcie się kabla z uchwytu. Kolejne odcinki rurociągu były spinane tak, aby naciągnięty przewód przylegał do ścianki stalowego przewodu (fot. 2.4).



Fot. 2.4. Przewód światłowodowy umocowany wewnątrz rurociągu.

Photo 2.4. Fiber optic cable inserted inside the pipeline.

Po połączeniu odcinków rurociągu przy pomocy złączy Camlock, przewód był naciągany, a następnie blokowany nakrętką. Przed przystąpieniem do pomiarów przeprowadzano próbę szczelności rurociągu, polegającą na wypełnianiu go wodą i obserwacji połączeń kolejnych odcinków rurociągu. Jeśli nie stwierdzono występowania wycieków na całej długości rurociągu, przystępowano do „wyzierowania” manometru różnicowego, tzn. sprawdzenia, czy przy braku przepływu w rurociągu, zwierciadła wody w obu ramionach manometru były na tym samym poziomie. Gdy warunek ten nie był spełniony, rurociąg odpowietrzano, aż do wystąpienia jednakowej wysokości zwierciadeł wody w obu ramionach manometru.

Dla zadanych natężeń przepływu wody mierzono różnicę wysokości ciśnień na początku i na końcu rurociągu. Różnica wysokości ciśnień w manometrze odpowiada wysokości liniowych strat energii na długości rurociągu. Wykonywanie pomiarów ciśnienia podczas ustalonego ruchu wody w stalowym rurociągu bez i z przewodem wymagało współpracy trzech osób. Pierwszy uczestnik pomiarów kontrolował stałość ciśnienia w hydroforze. Druga osoba odczytywała i zapisywała natężenie przepływu wody z wyświetlacza przepływomierza indukcyjnego. Trzecia osoba notowała wskazanie manometru. Odczyty rozpoczynano, gdy stwierdzono występowanie ruchu ustalonego, tj. w momencie ustabilizowania się wysokości zwierciadła wody w manometrze różnicowym oraz wartości wydatku pokazywanej przez przepływomierz. Dla każdego przewodu umieszczonego wewnątrz rurociągu dokonano 15

pomiarów w zakresie przepływów od 10 do 63 dm³/min. Temperaturę wody mierzono po odpowietrzeniu rurociągu, przy pomocy termometru rtęciowego umieszczonego w naczyniu pojemnościowym znajdującym się na końcu rurociągu.

2.4.3. Zakres badań

Pomiary hydrauliczne prowadzono w sześciu różnych wariantach:

- dla rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu,
- dla czterech różnych światłowodów telekomunikacyjnych o średnicach zewnętrznych 5,3 mm, 6,0 mm, 6,5 mm i 7,0 mm umieszczanych wewnątrz przewodu,
- dla grubościennego elastycznego przewodu silikonowego o średnicy zewnętrznej 8,0 mm i grubości ścianki 1,0 mm umieszczonego wewnątrz przewodu.

Przewody zastosowane w badaniach pokazano na fot. 2.5. Na zdjęciu widoczne od lewej: światłowod o średnicy zewnętrznej 5,3 mm, światłowod o średnicy zewnętrznej 6,0 mm, światłowod o średnicy zewnętrznej 6,5 mm, światłowod o średnicy zewnętrznej 7,0 mm, elastyczny przewód silikonowy o średnicy zewnętrznej 8,0 mm i grubości ścianki 1,0 mm.



Fot. 2.5. Przewody umieszczane w rurociągu wykorzystane w badaniach hydraulicznych.

Photo 2.5. Cables and conduit used in the experimental tests.

Dla każdego wymienionego wariantu badań przeprowadzono 15 doświadczeń, polegających na pomiarze liniowych strat energii przy różnych natężeniach przepływu wody w rurociągu. Wszystkie wykorzystane w badaniach światłowody zostały wyprodukowane przez firmę Optix i są przeznaczone do instalacji w kanalizacji teletechnicznej metodami pneumatycznymi (wdmuchiwanie) i mechanicznymi (zaciąganie).

Warianty badań oraz liczbę przeprowadzonych doświadczeń zestawiono w tab. 2.1.

Tab. 2.1. Zestawienie doświadczeń wykonanych w wariantach badań.

Table 2.1. A summary of the research variants.

Numer wariantu	Wariant badań	Liczba doświadczeń
1	Rurociąg bez przewodu	15
2	Rurociąg ze światłowodem o $D_2 = 5,3$ mm	15
3	Rurociąg ze światłowodem o $D_2 = 6,0$ mm	15
4	Rurociąg ze światłowodem o $D_2 = 6,5$ mm	15
5	Rurociąg ze światłowodem o $D_2 = 7,0$ mm	15
6	Rurociąg z przewodem silikonowym o $D_2 = 8,0$ mm	15

2.4.4. Wyniki pomiarów

Pomierzone wysokości strat ciśnienia w ruchu ustalonym wody w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz przewodem zestawiono w tabelach 2.2-2.7. Symbolami h_1 i h_2 oznaczono wysokości położenia zwierciadła wody w lewym (początek rurociągu) i prawym ramieniu manometru (koniec rurociągu). Różnica obu wysokości jest równa wysokości liniowych strat energii na długości rurociągu. Straty energii w rurociągu bez przewodu oznaczono symbolem h_{Lb} , a w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem oznaczono jako h_{Lz} .

Tab. 2.2. Straty energii pomierzone podczas ustalonego przepływu wody w rurociągu bez przewodu.

Table 2.2. Head losses measured during steady water flow in the pipeline without inserted cable.

Rurociąg bez umieszczonego wewnątrz przewodu						
Temp.	Lp.	Q	$10^{-3} \cdot Q$	h_1	h_2	h_{Lb}
[°C]		[dm ³ /min]	[m ³ /s]	[cm]	[cm]	[m]
12	1	10,1	0,168	134,9	133,7	0,012
	2	14,3	0,238	139,7	137,5	0,022
	3	20,4	0,340	136,4	132,5	0,039
	4	24,7	0,412	139,7	134,3	0,054
	5	29,0	0,483	130,8	123,6	0,072
	6	30,3	0,505	138,9	130,9	0,080
	7	35,5	0,592	141,8	131,2	0,106
	8	36,3	0,605	131,4	120,8	0,106
	9	39,1	0,652	117,7	105,4	0,123
	10	39,8	0,663	150,2	137,3	0,129
	11	46,2	0,770	146,4	129,9	0,165
	12	48,0	0,800	151,9	134,3	0,176
	13	49,4	0,823	153,7	135,0	0,187
	14	54,0	0,900	127,7	105,9	0,218
	15	60,2	1,003	125,3	98,8	0,265

Tab. 2.3. Straty energii pomierzone podczas ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym o średnicy 5,3 mm.

Table 2.3. Head losses measured during steady water flow in the pipeline with inserted fiber optic cable with diameter of 5.3 mm.

Rurociąg z przewodem światłowodowym o średnicy $D_2 = 5,3$ mm						
Temp.	Lp.	Q	$10^{-3} \cdot Q$	h_1	h_2	h_{Lz}
[°C]		[dm ³ /min]	[m ³ /s]	[cm]	[cm]	[m]
13	1	15,2	0,253	152,4	149,7	0,027
	2	19,7	0,328	127,5	123,2	0,043
	3	19,9	0,332	128,5	124,4	0,041
	4	24,7	0,412	124,0	117,6	0,064
	5	27,5	0,458	124,4	116,9	0,075
	6	30,0	0,500	123,2	114,4	0,088
	7	34,8	0,580	129,2	118,3	0,109
	8	38,2	0,637	124,9	112,1	0,128
	9	41,0	0,683	125,5	111,0	0,145
	10	45,5	0,758	128,6	110,9	0,177
	11	49,6	0,827	127,0	106,7	0,203
	12	54,7	0,912	127,7	103,5	0,242
	13	57,7	0,962	128,1	101,7	0,264
	14	59,9	0,998	129,0	100,7	0,283
	15	60,6	1,010	128,5	99,6	0,289

Tab. 2.4. Straty energii pomierzone podczas ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym o średnicy 6,0 mm.

Table 2.4. Head losses measured during steady water flow in the pipeline with inserted fiber optic cable with diameter of 6.0 mm.

Rurociąg z przewodem światłowodowym o średnicy $D_2 = 6,0$ mm						
Temp.	Lp.	Q	$10^{-3} \cdot Q$	h_1	h_2	h_{Lz}
[°C]		[dm ³ /min]	[m ³ /s]	[cm]	[cm]	[m]
14	1	10,0	0,167	138,5	136,9	0,016
	2	14,7	0,245	129,3	126,2	0,031
	3	18,7	0,312	117,2	112,9	0,043
	4	20,7	0,345	113,0	107,8	0,052
	5	23,3	0,388	111,0	105,3	0,057
	6	25,2	0,420	111,2	103,7	0,075
	7	29,5	0,492	113,7	104,5	0,092
	8	36,1	0,602	132,1	119,4	0,127
	9	40,0	0,667	130,4	114,9	0,155
	10	46,0	0,767	149,6	130,4	0,192
	11	50,9	0,848	149,4	125,2	0,242
	12	52,1	0,868	149,8	125,4	0,244
	13	56,8	0,947	150,0	122,7	0,273
	14	59,6	0,993	155,4	124,7	0,307
	15	59,8	0,997	156,3	125,2	0,311

Tab. 2.5. Straty energii pomierzone podczas ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym o średnicy 6,5 mm.

Table 2.5. Head losses measured during steady water flow in the pipeline with inserted fiber optic cable with diameter of 6.5 mm.

Rurociąg z przewodem światłowodowym o średnicy $D_2 = 6,5$ mm						
Temp.	Lp.	Q	$10^{-3} \cdot Q$	h_1	h_2	h_{Lz}
[°C]		[dm ³ /min]	[m ³ /s]	[cm]	[cm]	[m]
14	1	16,0	0,267	99,2	96,3	0,029
	2	19,7	0,328	96,1	91,9	0,042
	3	25,0	0,417	103,6	97,2	0,064
	4	28,2	0,470	98,9	91,0	0,079
	5	29,8	0,497	99,1	90,6	0,085
	6	34,6	0,577	98,5	87,3	0,112
	7	36,3	0,605	98,4	86,1	0,123
	8	39,8	0,663	97,5	83,2	0,143
	9	40,9	0,682	98,3	83,1	0,152
	10	45,8	0,763	102,5	84,4	0,181
	11	49,4	0,823	100,0	79,3	0,207
	12	54,1	0,902	98,7	74,4	0,243
	13	55,2	0,920	104,4	79,4	0,250
	14	56,5	0,942	105,0	78,7	0,263
	15	60,2	1,003	111,3	82,3	0,290

Tab. 2.6. Straty energii pomierzone podczas ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym o średnicy 7,0 mm.

Table 2.6. Head losses measured during steady water flow in the pipeline with inserted fiber optic cable with diameter of 7.0 mm.

Rurociąg z przewodem światłowodowym o średnicy $D_2 = 7,0$ mm						
Temp.	Lp.	Q	$10^{-3} \cdot Q$	h_1	h_2	h_{Lz}
[°C]		[dm ³ /min]	[m ³ /s]	[cm]	[cm]	[m]
14	1	19,2	0,320	67,2	62,6	0,046
	2	25,6	0,427	95,5	88,8	0,067
	3	30,5	0,508	92,3	83,4	0,089
	4	32,0	0,533	87,9	78,1	0,098
	5	36,7	0,612	82,3	69,9	0,124
	6	37,0	0,617	82,6	70,0	0,126
	7	42,1	0,702	83,1	67,3	0,158
	8	44,4	0,740	84,6	67,4	0,172
	9	46,0	0,767	86,5	68,1	0,184
	10	51,7	0,862	90,5	68,1	0,224
	11	53,4	0,890	91,5	67,8	0,237
	12	55,7	0,928	92,7	66,9	0,258
	13	56,4	0,940	100,8	74,4	0,264
	14	58,8	0,980	97,8	69,6	0,282
	15	62,0	1,033	96,5	65,5	0,310

Tab. 2.7. Straty energii pomierzone podczas ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym o średnicy 8,0 mm.

Table 2.7. Head losses measured during steady water flow in the pipeline with inserted conduit with diameter of 8.0 mm.

Rurociąg z przewodem silikonowym o średnicy $D_2 = 8,0$ mm						
Temp.	Lp.	Q	$10^{-3} \cdot Q$	h_1	h_2	h_{Lz}
[°C]		[dm ³ /min]	[m ³ /s]	[cm]	[cm]	[m]
14	1	20,8	0,347	139,5	134,8	0,047
	2	24,5	0,408	135,3	128,9	0,064
	3	30,1	0,502	141,5	132,2	0,093
	4	35,7	0,595	141,0	128,1	0,129
	5	40,0	0,667	141,0	125,8	0,152
	6	41,4	0,690	139,9	123,3	0,166
	7	43,8	0,730	140,1	121,9	0,182
	8	46,5	0,775	142,9	123,0	0,199
	9	49,5	0,825	144,0	121,6	0,224
	10	51,5	0,858	143,8	120,0	0,238
	11	53,1	0,885	143,1	117,8	0,253
	12	56,4	0,940	123,9	96,0	0,279
	13	58,9	0,982	136,8	106,8	0,300
	14	61,8	1,030	136,4	103,5	0,329
	15	63,1	1,052	122,9	87,7	0,352

2.5. Analiza wyników pomiarów ustalonego przepływu wody w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz przewodem

Wyznaczenie hydraulicznych parametrów przepływu wody w rurociągu i niepewności pomiarowych

W celu analizy otrzymanych wyników pomiarów, wyznaczono wartości hydraulicznych parametrów przepływu wody rurociągu. Średnią prędkość przepływu obliczono z zależności $v = Q/A$ (A – pole przekroju strumienia wyrażone zależnością (2.17)). Liczbę Reynoldsa obliczono z zależności (2.6). W wariantcie badań rurociągu bez umieszczonego przewodu, wartości współczynników oporów liniowych w rurociągu obliczono z zależności (2.5). Na ich podstawie możliwe było obliczenie chropowatości bezwzględnej ścianki rurociągu z przekształconej względem k zależności (2.8). W wariantach badań rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem, średnicę przekroju strumienia w rurociągu z przewodem występującą w zależności (2.6) wyrażono przy pomocy promienia hydraulicznego określonego zależnością (2.19).

Aby ocenić dokładność wyznaczonych wartości parametrów przepływu wody, przyjęto następujące wartości niepewności systematycznych:

- niepewność pomiaru wysokości zwierciadła wody w manometrze różnicowym $\Delta h_1 = \Delta h_2 = 0,001$ m, stąd $\Delta h_L = 0,002$ m,
- niepewność pomiarowa przepływomierza indukcyjnego $\Delta Q = 0,01 \cdot 63,0 \text{ dm}^3/\text{min} = 1,05 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$,
- niepewność pomiaru średnicy rurociągu i przewodu $\Delta D_1 = \Delta D_2 = 0,0001$ m,
- niepewność pomiaru długości rurociągu $\Delta L = 0,05$ m,
- niepewność doboru wartości kinematycznego współczynnika lepkości wody na podstawie pomiaru temperatury termometrem rtęciowym $\Delta \nu = 0,03 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Wartości maksymalnych bezwzględnych niepewności pomiarowych wyznaczono metodą różniczki zupełnej.

Maksymalną niepewność pomiarową pola przekroju strumienia ΔA obliczono z zależności:

$$\Delta A = \left| \frac{\partial A}{\partial D_1} \right| \Delta D_1 + \left| \frac{\partial A}{\partial D_2} \right| \Delta D_2 = \frac{\pi}{2} (D_1 \Delta D_1 + D_2 \Delta D_2) \quad (2.25)$$

Maksymalną bezwzględną niepewność pomiarową średniej prędkości przepływu Δv wody wyraża zależność:

$$\Delta v = \left| \frac{\partial v}{\partial Q} \right| \Delta Q + \left| \frac{\partial v}{\partial A} \right| \Delta A = \frac{1}{A} \Delta Q + \frac{Q}{A^2} \Delta A \quad (2.26)$$

Maksymalną bezwzględną niepewność pomiarową liczby Reynoldsa ΔRe obliczono z zależności:

$$\Delta Re = \left| \frac{\partial Re}{\partial v} \right| \Delta v + \left| \frac{\partial Re}{\partial D} \right| \Delta D + \left| \frac{\partial Re}{\partial \nu} \right| \Delta \nu = \frac{D}{\nu} \Delta v + \frac{v}{\nu} \Delta D + \frac{vD}{\nu^2} \Delta \nu \quad (2.27)$$

W wariantach badań z rurociągiem z umieszczonym wewnątrz przewodem, średnicę rurociągu wyrażano przy pomocy promienia hydraulicznego. Stąd maksymalną bezwzględną niepewność pomiarową promienia hydraulicznego ΔR_h obliczono z zależności:

$$\Delta R_h = \left| \frac{\partial R_h}{\partial D_1} \right| \Delta D_1 + \left| \frac{\partial R_h}{\partial D_2} \right| \Delta D_2 = \frac{1}{4} (\Delta D_1 + \Delta D_2) \quad (2.28)$$

W wariantach badań z rurociągiem bez przewodu, wartości maksymalnych bezwzględnych niepewności pomiarowych średniego współczynnika oporów liniowych można wyrazić zależnością:

$$\Delta \lambda = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial h_L} \right| \Delta h_L + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial R_h} \right| \Delta R_h + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial L} \right| \Delta L + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial v} \right| \Delta v \quad (2.29)$$

Stąd:

$$\Delta \lambda = \frac{8R_h g}{Lv^2} \Delta h_L + \frac{8h_L g}{Lv^2} \Delta R_h + \frac{8h_L R_h g}{L^2 v^2} \Delta L + \frac{4h_L R_h g}{Lv^3} \Delta v \quad (2.30)$$

Wartości obliczonych parametrów przepływu wraz z odpowiadającymi im względnymi niepewnościami pomiarowym zestawiono w tabelach 2.8-2.13.

Tab. 2.8. Hydrauliczne parametry przepływu wody obliczone dla wariantu doświadczeń w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu.

Table 2.8. Water flow parameters calculated for the variant of experiment without the cable or conduit inserted into the pipeline.

Rurociąg bez umieszczonego wewnątrz przewodu								
Temp.	Lp.	$10^{-3} \cdot Q$	v	$\Delta v/v$	Re	$\Delta Re/Re$	λ	$\Delta \lambda/\lambda$
[°C]		[m ³ /s]	[m/s]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
12	1	0,168	0,076	6,6	3 286	9,2	0,045	30,1
	2	0,238	0,108	4,8	4 652	7,4	0,041	18,8
	3	0,340	0,154	3,5	6 636	6,1	0,036	12,2
	4	0,412	0,186	2,9	8 035	5,6	0,034	9,8
	5	0,483	0,218	2,5	9 434	5,2	0,033	8,1
	6	0,505	0,228	2,5	9 857	5,1	0,033	7,6
	7	0,592	0,267	2,2	11 548	4,8	0,032	6,4
	8	0,605	0,273	2,1	11 809	4,7	0,031	6,3
	9	0,652	0,294	2,0	12 719	4,6	0,031	5,8
	10	0,663	0,300	2,0	12 947	4,6	0,031	5,7
	11	0,770	0,348	1,7	15 029	4,4	0,030	4,9
	12	0,800	0,361	1,7	15 615	4,3	0,029	4,7
	13	0,823	0,372	1,7	16 070	4,3	0,029	4,6
	14	0,900	0,407	1,5	17 567	4,2	0,029	4,2
	15	1,003	0,453	1,4	19 583	4,1	0,028	3,8

Tab. 2.9. Hydrauliczne parametry przepływu wody obliczone dla wariantu doświadczeń w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy $D_2 = 5,3$ mm.

Table 2.9. Water flow parameters calculated for the variant of experiment with inserted cable of diameter $D_2 = 5.3$ mm.

Rurociąg z przewodem światłowodowym o średnicy $D_2 = 5,3$ mm						
Temp.	Lp.	$10^{-3} \cdot Q$	v	$\Delta v/v$	Re	$\Delta Re/Re$
[°C]		[m ³ /s]	[m/s]	[%]	[-]	[%]
13	1	0,253	0,116	4,6	4 628	7,5
	2	0,328	0,150	3,6	5 998	6,5
	3	0,332	0,151	3,6	6 059	6,5
	4	0,412	0,188	3,0	7 521	5,9
	5	0,458	0,209	2,7	8 373	5,6
	6	0,500	0,228	2,5	9 134	5,4
	7	0,580	0,265	2,2	10 596	5,2
	8	0,637	0,291	2,1	11 631	5,0
	9	0,683	0,312	2,0	12 484	4,9
	10	0,758	0,346	1,8	13 854	4,7
	11	0,827	0,377	1,7	15 102	4,6
	12	0,912	0,416	1,6	16 655	4,5
	13	0,962	0,439	1,5	17 568	4,4
	14	0,998	0,456	1,5	18 238	4,4
	15	1,010	0,461	1,5	18 451	4,4

Tab. 2.10. Hydrauliczne parametry przepływu wody obliczone dla wariantu doświadczeń w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy $D_2 = 6,0$ mm.

Table 2.10. Water flow parameters calculated for the variant of experiment with inserted cable of diameter $D_2 = 6.0$ mm.

Rurociąg z przewodem światłowodowym o średnicy $D_2 = 6,0$ mm						
Temp.	Lp.	$10^{-3} \cdot Q$	v	$\Delta v/v$	Re	$\Delta Re/Re$
[°C]		[m ³ /s]	[m/s]	[%]	[-]	[%]
14	1	0,167	0,076	6,7	3 097	9,7
	2	0,245	0,112	4,7	4 552	7,7
	3	0,312	0,143	3,8	5 790	6,8
	4	0,345	0,158	3,5	6 410	6,5
	5	0,388	0,178	3,1	7 215	6,1
	6	0,420	0,192	2,9	7 803	5,9
	7	0,492	0,225	2,6	9 135	5,6
	8	0,602	0,275	2,2	11 178	5,2
	9	0,667	0,305	2,0	12 386	5,0
	10	0,767	0,351	1,8	14 244	4,8
	11	0,848	0,388	1,7	15 761	4,7
	12	0,868	0,397	1,6	16 133	4,6
	13	0,947	0,433	1,5	17 588	4,5
	14	0,993	0,455	1,5	18 455	4,5
	15	0,997	0,456	1,5	18 517	4,5

Tab. 2.11. Hydrauliczne parametry przepływu wody obliczone dla wariantu doświadczeń w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy $D_2 = 6,5$ mm.

Table 2.11. Water flow parameters calculated for the variant of experiment with inserted cable of diameter $D_2 = 6.5$ mm.

Rurociąg z przewodem światłowodowym o średnicy $D_2 = 6,5$ mm						
Temp.	Lp.	$10^{-3} \cdot Q$	v	$\Delta v/v$	Re	$\Delta Re/Re$
[°C]		[m ³ /s]	[m/s]	[%]	[-]	[%]
14	1	0,267	0,122	4,4	4 913	7,4
	2	0,328	0,151	3,6	6 049	6,7
	3	0,417	0,191	2,9	7 676	6,0
	4	0,470	0,216	2,7	8 659	5,7
	5	0,497	0,228	2,5	9 150	5,6
	6	0,577	0,264	2,2	10 624	5,3
	7	0,605	0,277	2,2	11 146	5,2
	8	0,663	0,304	2,0	12 221	5,1
	9	0,682	0,313	2,0	12 558	5,0
	10	0,763	0,350	1,8	14 063	4,9
	11	0,823	0,378	1,7	15 168	4,8
	12	0,902	0,414	1,6	16 612	4,7
	13	0,920	0,422	1,6	16 949	4,6
	14	0,942	0,432	1,5	17 349	4,6
	15	1,003	0,460	1,5	18 485	4,5

Tab. 2.12. Hydrauliczne parametry przepływu wody obliczone dla wariantu doświadczeń w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy $D_2 = 7,0$ mm.

Table 2.12. Water flow parameters calculated for the variant of experiment with inserted cable of diameter $D_2 = 7.0$ mm.

Rurociąg z przewodem światłowodowym o średnicy $D_2 = 7,0$ mm						
Temp.	Lp.	$10^{-3} \cdot Q$	v	$\Delta v/v$	Re	$\Delta Re/Re$
[°C]		[m ³ /s]	[m/s]	[%]	[-]	[%]
14	1	0,320	0,147	3,7	5 846	6,7
	2	0,427	0,196	2,9	7 795	5,9
	3	0,508	0,234	2,5	9 287	5,5
	4	0,533	0,245	2,4	9 744	5,4
	5	0,612	0,281	2,1	11 175	5,2
	6	0,617	0,284	2,1	11 266	5,1
	7	0,702	0,323	1,9	12 819	4,9
	8	0,740	0,340	1,8	13 520	4,9
	9	0,767	0,353	1,8	14 007	4,8
	10	0,862	0,396	1,6	15 743	4,7
	11	0,890	0,409	1,6	16 260	4,6
	12	0,928	0,427	1,6	16 961	4,6
	13	0,940	0,432	1,5	17 174	4,6
	14	0,980	0,451	1,5	17 905	4,5
	15	1,033	0,475	1,4	18 879	4,5

Tab. 2.13. Hydrauliczne parametry przepływu wody obliczone dla wariantu doświadczeń w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy $D_2 = 8,0$ mm.

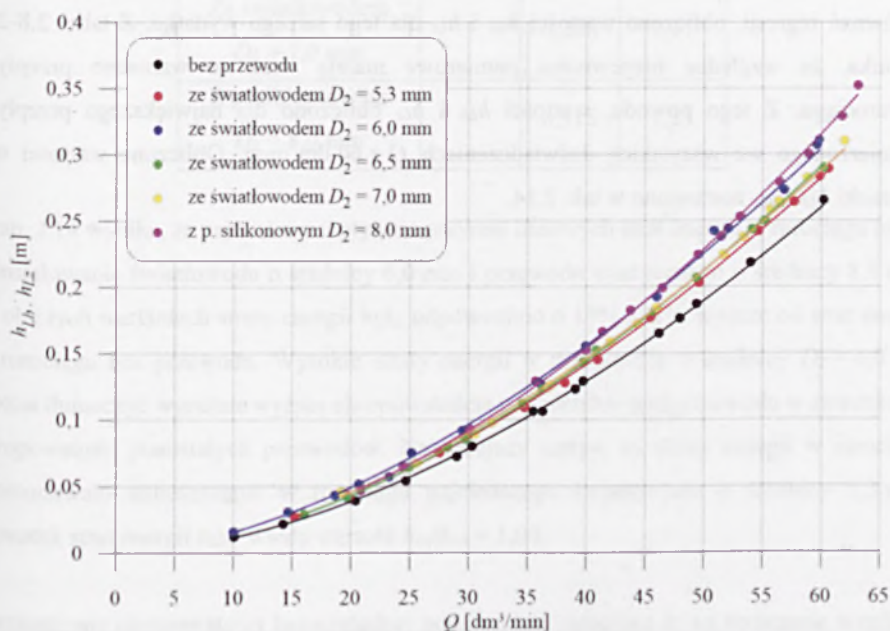
Table 2.9. Water flow parameters calculated for the variant of experiment with inserted conduit of diameter $D_2 = 8.0$ mm.

Rurociąg z przewodem silikonowym o średnicy $D_2 = 8,0$ mm						
Temp.	Lp.	$10^{-3} \cdot Q$	v	$\Delta v/v$	Re	$\Delta Re/Re$
[°C]		[m ³ /s]	[m/s]	[%]	[-]	[%]
14	1	0,347	0,160	3,5	6 230	6,5
	2	0,408	0,189	3,0	7 338	6,0
	3	0,502	0,232	2,5	9 015	5,5
	4	0,595	0,275	2,2	10 693	5,2
	5	0,667	0,308	2,0	11 981	5,0
	6	0,690	0,319	1,9	12 400	5,0
	7	0,730	0,337	1,9	13 119	4,9
	8	0,775	0,358	1,8	13 927	4,8
	9	0,825	0,381	1,7	14 826	4,7
	10	0,858	0,397	1,6	15 425	4,7
	11	0,885	0,409	1,6	15 904	4,6
	12	0,940	0,435	1,5	16 893	4,6
	13	0,982	0,454	1,5	17 641	4,5
	14	1,030	0,476	1,4	18 510	4,5
	15	1,052	0,486	1,4	18 899	4,5

Porównanie liniowych strat ciśnienia w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz przewodem

W teoretycznych rozważaniach dotyczących ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem wykazano, że przyrost średniego współczynnika oporów liniowych λ_z względem współczynnika oporów w rurociągu bez przewodu λ_h ma niewielki wpływ na wysokość strat liniowych. Z tego powodu, analizy wyników pomiarów ograniczono do porównania liniowych strat energii uzyskanych we wszystkich wariantach badań. W rozważaniach pominięto kwestię wartości współczynników oporów liniowych obliczonych na podstawie pomiarów.

W celu zilustrowania jak umieszczenie przewodu wewnątrz rurociągu wpływa na liniowe straty energii w każdym wariancie badań, pomierzone wysokości strat przedstawiono na wykresie w funkcji natężenia przepływu w rurociągu (rys. 2.10). Wyniki pomiarów wyrównano potęgowymi równaniami regresji w postaci $h_L = a \cdot Q^b$ (gdzie a i b są parametrami równania regresji). Ze względu na dużą liczbę wyników, na wykresie nie naniesiono słupków niepewności pomiarowych.



Rys. 2.10. Pomierzone wysokości strat w różnych wariantach badań w funkcji natężenia przepływu wody w rurociągu.

Fig. 2.10. Measured head losses in various variants of experiment as a function of the volumetric water flow rate in the pipeline.

Wykładniki potęgowych równań linii regresji przyjmowały wartości od 1,72 do 1,78 we wszystkich wariantach badań. Są one zgodne z danymi literaturowymi podawanymi dla strefy przejściowej ruchu turbulentnego (Wyszkowski K., 1979). Świadczy to o poprawnie wyznaczonych wartościach strat energii w przeprowadzonych badaniach ustalonego przepływu wody. Najmniejsze liniowe straty energii uzyskano w wariancie badań ustalonego przepływu wody w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu (linia czarna na rys. 2.10). Największe straty energii zmierzono w wariancie badań z rurociągiem z umieszczonym wewnątrz światłowodem o średnicy zewnętrznej $D_2 = 6,0$ mm (linia niebieska) oraz w wariancie z umieszczonym wewnątrz elastycznym przewodem silikonowym o średnicy zewnętrznej $D_2 = 8,0$ mm (linia fioletowa).

Współczynniki determinacji dla wszystkich utworzonych równań regresji przyjmują wartości $R^2 > 0,99$, co świadczy o bardzo dobrym ich dopasowaniu do wyników pomiarów. Wyznaczone równania linii regresji umożliwiają obliczenie wysokości liniowych strat energii dla dowolnego natężenia przepływu wody z przedziału określonego w badaniach. W celu porównania liniowych strat energii w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz przewodem, korzystając z równań regresji, obliczono wartości h_{Lb} i h_{Lz} dla tego samego wydatku. Z tabel 2.8-2.13 wynika, że względne niepewności pomiarowe maleją wraz ze wzrostem przepływu w rurociągu. Z tego powodu, wartości h_{Lb} i h_{Lz} obliczono dla największego przepływu pomierzonego we wszystkich doświadczeniach $Q = 60$ dm³/min. Obliczone wartości oraz stosunki h_{Lb} i h_{Lz} zestawiono w tab. 2.14.

Tab. 2.14. Wartości strat energii w rurociągu bez przewodu h_{Lb} oraz z umieszczonym wewnątrz przewodem h_{Lz} obliczone na podstawie równań regresji dla $Q = 60 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Table 2.14. The values of head losses in the pipeline without cable or conduit h_{Lb} and with inserted h_{Lz} cable or conduit, calculated on the basis of regression equations for $Q = 60 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Wariant badań	h_{Lb}	h_{Lz}	h_{Lz}/h_{Lb}
	[m]	[m]	[-]
Bez przewodu	0,260	-	-
Ze światłowodem $D_2 = 5,3 \text{ mm}$	-	0,282	1,09
Ze światłowodem $D_2 = 6,0 \text{ mm}$	-	0,304	1,17
Ze światłowodem $D_2 = 6,5 \text{ mm}$	-	0,291	1,12
Ze światłowodem $D_2 = 7,0 \text{ mm}$	-	0,288	1,11
Z p. silikonowym $D_2 = 8,0 \text{ mm}$	-	0,315	1,21

Z tab. 2.14 wynika, że największy wpływ na przyrost liniowych strat energii w rurociągu miało zainstalowanie światłowodu o średnicy 6,0 mm i przewodu elastycznego o średnicy 8,0 mm. W obu tych wariantach straty energii były odpowiednio o 17% i 21% wyższe od strat energii w rurociągu bez przewodu. Wysokie straty energii w przewodzie o średnicy $D_2 = 6,0 \text{ mm}$ można tłumaczyć wyraźnie wyższą chropowatością powierzchni tego przewodu w stosunku do chropowatości pozostałych przewodów. Najmniejszy wpływ na straty energii w rurociągu spowodowało umieszczenie w rurociągu najcieńszego światłowodu o średnicy 5,3 mm. Stosunek strat energii miał wtedy wartość $h_{Lz}/h_{Lb} = 1,09$.

Wyznaczenie chropowatości bezwzględnej powierzchni rurociągu k_1 na podstawie wyników pomiarów

Chropowatość bezwzględną powierzchni rurociągu k_1 wyznaczono z przekształconej względem chropowatości względnej ϵ zależności Colebrooka-White'a. Wykorzystano wyniki

pomiarów hydraulicznych w rurociągu bez przewodu (tab. 2.2). Wartości liczby Reynoldsa obliczano z zależności (2.4).

Obliczone bezwzględne chropowatości powierzchni rurociągu zestawiono w tab. 2.15. Aby ocenić dokładność wyznaczonych wartości wyznaczono maksymalną niepewność pomiarową metodą różniczki zupełnej. Wartości błędów bezwzględnych przyjęto jak przy wyznaczaniu niepewności pomiarowych współczynnika oporów liniowych. Pochodne cząstkowe potrzebne do wyznaczenia niepewności pomiarowej chropowatości bezwzględnej powierzchni rurociągu obliczono programem Mathematica. Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 2.15.

Tab. 2.15. Obliczone chropowatości powierzchni rurociągu.

Table 2.15. Calculated values of absolute roughness of the pipeline surface.

Lp.	Q	Re	$\Delta Re/Re$	k_1	$\Delta k_1/k_1$
	[dm ³ /min]	[-]	[%]	[mm]	[%]
1	10,1	3 286	9,2	0,158	116,8
2	14,3	4 652	7,4	0,153	61,8
3	20,4	6 636	6,1	0,058	88,1
4	24,7	8 035	5,6	0,044	83,7
5	29,0	9 434	5,2	0,051	55,3
6	30,3	9 857	5,1	0,086	30,5
7	35,5	11 548	4,8	0,083	24,5
8	36,3	11 809	4,7	0,040	49,9
9	39,1	12 719	4,6	0,057	31,0
10	39,8	12 947	4,6	0,074	23,3
11	46,2	15 029	4,4	0,053	26,3
12	48,0	15 615	4,3	0,050	26,7
13	49,4	16 070	4,3	0,058	22,0
14	54,0	17 567	4,2	0,052	21,7
15	60,2	19 583	4,1	0,051	18,9

Wyznaczone w omówiony sposób niepewności pomiarowe chropowatości bezwzględnej rurociągu k_1 maleją wraz ze wzrostem natężenia przepływu (tab. 2.15). Do dalszych rozważań wyznaczono średnią arytmetyczną z tych wartości chropowatości bezwzględnej rurociągu, których maksymalna względna niepewność pomiarowa spełniała warunek $\Delta k_1/k_1 < 30\%$. Wyznaczona w ten sposób wartość chropowatości bezwzględnej rurociągu wynosi $k_1 = 0,055$ mm i jest zgodna z wartościami podawanymi w literaturze dla rurociągów stalowych (Mitosek M. i inni, 2017).

Weryfikacja wyników pomiarów strat energii z wartościami teoretycznymi

Jak wykazano w rozdziale 2.3, stosunek wysokości liniowych strat energii w rurociągu z przewodem h_{Lz} i bez przewodu h_{Lb} , można wyrazić zależnością (2.23). W celu porównania wyników pomiarów z zależnościami teoretycznymi, wartości stosunków h_{Lz}/h_{Lb} zestawiono z wartościami κ obliczonymi z zależności (2.24) dla danej średnicy przewodu. Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 2.16.

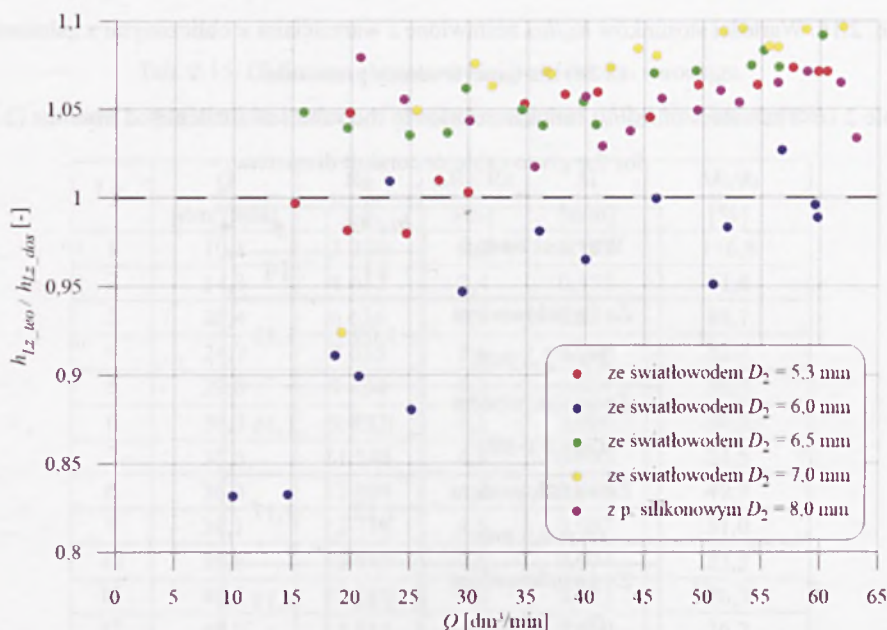
Tab. 2.16. Wartości stosunków h_{Lz}/h_{Lb} zestawione z wartościami κ obliczonymi z zależności (2.24) dla danej średnicy przewodu.
Table 2.16. The values of h_{Lz}/h_{Lb} ratios in relation to the values of κ calculated from the (2.24) for the given cable or conduit diameter.

Wariant badań	h_{Lz}/h_{Lb}	κ
	[-]	[-]
Zc światłowodem $D_2 = 5,3 \text{ mm}$	1,09	1,13
Zc światłowodem $D_2 = 6,0 \text{ mm}$	1,17	1,16
Zc światłowodem $D_2 = 6,5 \text{ mm}$	1,12	1,17
Zc światłowodem $D_2 = 7,0 \text{ mm}$	1,11	1,19
Z p. silikonowym $D_2 = 8,0 \text{ mm}$	1,21	1,23

Z tab. 2.16 wynika, że obliczone z zależności (2.23) wartości ilorazu κ są zbliżone do wartości stosunków h_{Lz}/h_{Lb} . Wartości κ nie zależą od wyników pomiarów hydraulicznych, a jedynie od średnicy wewnętrznej rurociągu i średnicy zewnętrznej przewodu. Dodatkowo, obliczenie ilorazu κ nie wymaga znajomości chropowatości bezwzględnej powierzchni ścianki rurociągu i przewodu.

W celu weryfikacji obliczonych wysokości strat energii z zależności teoretycznych $h_{Lz_{teo}}$ z pomierzonymi wysokościami strat energii $h_{Lz_{dos}}$ obliczono stosunki tych wysokości strat. W teoretycznych obliczeniach wysokości strat energii przyjęto wyznaczoną na podstawie

pomiarów chropowatość powierzchni rurociągu $k_1 = 0,055$ mm. Wykorzystane w badaniach przewody światłowodowe mają powłokę wykonaną z HDPE. Przyjęto, że przewody umieszczone wewnątrz rurociągu mają chropowatość powierzchni ścianki $k_2 = 0,01$ mm (Kotowski A., 2010, Janson L. E., 1995). Obliczenia przeprowadzono dla lepkości wody jak w pomiarach. Wyniki obliczeń w funkcji objętościowego natężenia przepływu pokazano na rys. 2.11. Przerywaną linią zaznaczono stosunek $h_{Lz_teo} / h_{Lz_dos} = 1$, oznaczający zgodność pomiarów z obliczeniami teoretycznymi.



Rys. 2.11. Stosunki teoretycznych i pomierzonych wartości wysokości liniowych strat energii w rurociągu z przewodem w funkcji natężenia przepływu wody.

Fig. 2.11. Ratios of the calculated and measured values of head losses in a pipeline with inserted cable or conduit as a function of volumetric water flow rate.

Obliczone na podstawie teoretycznych zależności wartości wysokości liniowych strat energii są w większości przypadków wyższe od pomierzonych, tzn. $h_{Lz_teo} / h_{Lz_dos} > 1$. Względna różnica pomiędzy wartościami uzyskanymi z pomiarów i wartościami obliczonymi (teoretycznymi) dla przewodów o średnicach 5,3, 6,5, 7,0 i 8,0 mm nie przekracza 10%. Jedynie dla przewodu o średnicy 6,0 mm (niebieskie znaczki na rys. 2.11), pomierzone wysokości liniowych strat energii są w większości przypadków niższe od tych, obliczonych z zależności

teoretycznych. Dla tego wariantu badań, zgodność pomiarów z obliczeniami różnie wraz z natężeniem przepływu w rurociągu.

Podsumowanie

Największe straty energii zmierzono w wariantcie badań przepływu w rurociągu z umieszczonym wewnątrz światłowodem o średnicy zewnętrznej $D_2 = 6,0$ mm oraz w rurociągu z umieszczonym wewnątrz elastycznym przewodem silikonowym o średnicy zewnętrznej $D_2 = 8,0$ mm. W obu tych wariantach straty energii były odpowiednio o 17% i 21% wyższe od strat energii w rurociągu bez przewodu. Światłowod o średnicy zewnętrznej $D_2 = 6,0$ mm (pomarańczowy przewód na fot. 2.5) posiada powłokę wykonaną z materiału o wyczuwalnie wyższej chropowatości powierzchni od pozostałych światłowodów. Najmniejszy wpływ na przyrost strat energii spowodowało umieszczenie w rurociągu najcieńszego światłowodu o średnicy 5,3 mm. Stosunek strat energii miał wtedy wartość $h_{Lz}/h_{Lb} = 1,09$.

Obliczone na podstawie zależności teoretycznych strat liniowe były zbliżone do pomierzonych. W ogólnym przypadku, obliczone wysokości strat liniowych były wyższe od uzyskanych w badaniach doświadczalnych, przy czym względna różnica pomiędzy tymi wartościami nie przekraczała 10%.

Dla przebadanego zakresu przepływów wykazano wysoką zgodność strat energii obliczonych z zależności (2.24) z pomierzonymi w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem względem rurociągu bez przewodu. Ponieważ umieszczenie przewodu wewnątrz rurociągu powoduje zanedbywalnie małe zmiany współczynnika oporów liniowych, wyznaczenie stosunku h_{Lz}/h_{Lb} sprowadza się do obliczenia ilorazu κ wyrażonego zależnością (2.23). Oznacza to w praktyce ułatwienie obliczeń przyrostu strat energii wywołanego umieszczeniem przewodu wewnątrz rurociągu, ponieważ wartość ilorazu κ zależy jedynie od stosunku średnic przewodu i rurociągu.

2.6. Numeryczna analiza parametrów ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem obliczonych programem CFD Fluent

2.6.1. Opis programu

Program CFD Fluent jest komercyjnym oprogramowaniem, umożliwiającym numeryczne modelowanie i analizę zagadnień związanych z przepływem. Obliczenia program Fluent pozwalają uzyskać informacje dotyczące wartości parametrów i warunków ruchu płynu. Dodatkową korzyść stanowi możliwość uzyskania wartości parametrów fizycznych w całym analizowanym obszarze przepływu. Program Fluent należy do tzw. programów CFD (Computational Fluid Dynamics – numeryczna mechanika płynów). Do rozwiązywania trójwymiarowych równań zachowania masy, pędu i energii strumienia płynu Fluent wykorzystuje metodę objętości skończonych. Polega ona na całkowaniu równań różniczkowych po każdej objętości kontrolnej wydzielonej w obszarze przepływu, w wyniku czego otrzymuje się równania, spełniające wymienione prawa zachowania w obrębie przestrzennego elementu.

Numeryczne modelowanie przepływu wody w przewodach ciśnieniowych programem Fluent składa się z trzech etapów. Pierwszy etap polega na generacji siatki obliczeniowej obejmującej obszar przepływu. W pracy wykorzystywano program Fluent w wersji 6.3.26, w której do tworzenia siatki obliczeniowej wykorzystuje się program GAMBIT w wersji 2.3.16. Drugi etap modelowania numerycznego stanowi wykonanie obliczeń parametrów przepływu. W trzecim etapie dokonywana jest prezentacja uzyskanych wyników. Funkcję procesora i postprocesora pełni program Fluent.

Geometria modelu odwzorowuje objętość strumienia wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem. W pracy zastosowano podział przekroju poprzecznego strumienia na elementy trójkątne. Siatka została wygenerowana przy pomocy schematu 'Cooper', w którym dyskretyzacja obszaru jest tworzona poprzez przemieszczanie układu węzłów wskazanej ścianki "źródłowej" wzdłuż kierunku przepływu.

Ruch lepkich, nieściśliwych płynów opisany jest równaniem Naviera- Stokesa (2.32), które wraz z równaniem ciągłości (2.31) stanowią układ równań, którego rozwiązanie określa ciśnienie oraz prędkość przepływu:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2.31)$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_m - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{\nu}{3} \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{v} \quad (2.32)$$

gdzie:

p – ciśnienie [Pa],

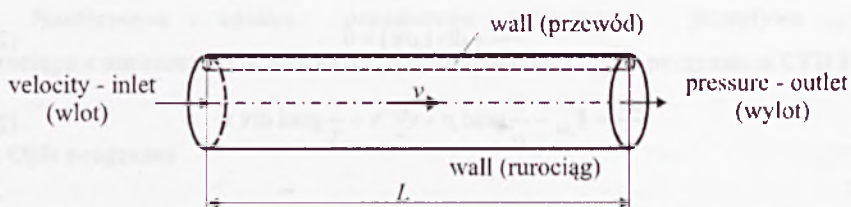
t – czas [s],

ρ – gęstość płynu [kg/m³],

$\mathbf{F}_m$ – jednostkowa siła masowa [m/s²],

ν – kinematyczny współczynnik lepkości [m²/s].

Rozwiązując równania (2.31) i (2.32) dla laminarnego ustalonego ruchu w przewodzie kołowym otrzymuje się równanie Hagen-Poiseuille'a. W związku z występowaniem turbulentnego ruchu wody w analizowanym rurociągu, należało zastosować model obliczeniowy pozwalający uwzględnić wpływ chropowatości ścian rurociągu i przewodu na wielkość strat energii i zmian ciśnienia. Klasyczne modelowanie turbulencji oparte jest na koncepcji O. Reynoldsa, zgodnie z którą każda wielkość opisująca przepływ turbulentny może być traktowana jako suma wielkości uśrednionej w czasie oraz składowej fluktuacyjnej. Zastosowanie tej koncepcji do równań Naviera-Stokesa sprawia, że układ równań (2.31) i (2.32) staje się nie zamknięty i problem jego domknięcia jest domeną hipotez domykających (Bogusławski A., 2008). Z tego powodu w programach CFD, wykorzystujących metodę objętości skończonych, stosuje się równania zwane modelami turbulencji. Wersja programu Fluent, którą wykorzystano w niniejszej pracy, oferuje osiem różnych modeli turbulencji. W obliczeniach zastosowano najczęściej wykorzystywane uśrednienie w przypadku występowania rozwiniętego ruchu turbulentnego, zwane standardowym modelem k - ε . W przekroju początkowym (wlotowym) rurociągu założono warunek brzegowy typu „velocity-inlet”, a w przekroju końcowym „pressure-outlet”. Na ściankach rurociągu i przewodu zadawano warunek brzegowy typu „wall” (rys. 2.12).



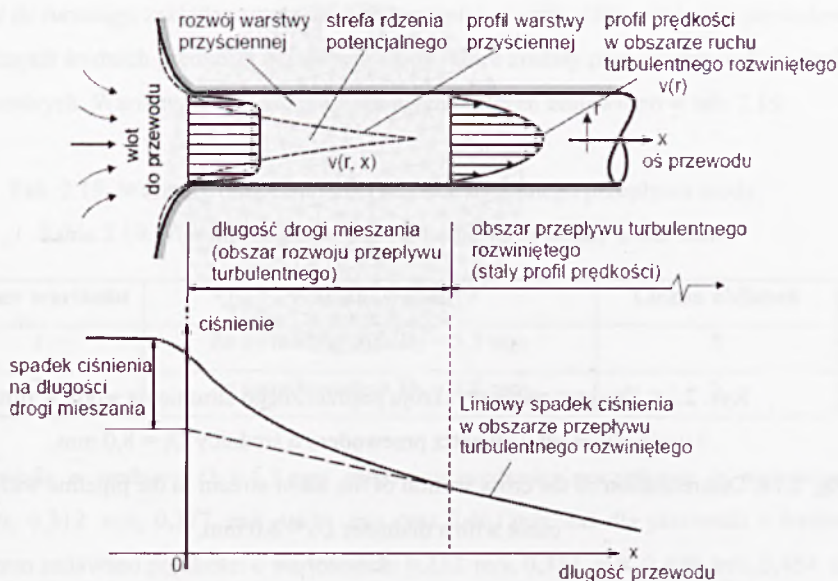
Rys. 2.12. Schemat obszaru przepływu w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem z zaznaczonymi typami warunków brzegowych.

Fig. 2.12. Scheme of the water stream in the pipeline with inserted cable or conduit with marked types of boundary conditions.

Uwzględnienie tych warunków brzegowych wymagało podania chropowatości powierzchni wewnętrznej rurociągu i zewnętrznej powierzchni przewodu oraz stałej prędkości wody w przekroju początkowym rurociągu. W obliczeniach sił masowych uwzględniono przyspieszenie ziemskie. Przyjęty w rozprawie model obliczeniowy został wykorzystany w pracy Kubrak M. i Kodura A. (2013).

2.6.2. Dane do obliczeń

Geometrię modelu utworzono w taki sposób, aby odwzorowywała wymiary stanowiska pomiarowego wykorzystanego w badaniach hydraulicznych ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla stałej średnicy rurociągu $D_1 = 0,0531$ m oraz dla dwóch różnych średnic zewnętrznych przewodów $D_2 = 5,3$ mm i $D_2 = 8,0$ mm. Aby w rurociągu ukształtował się turbulentny, w pełni rozwinięty przepływ wody po założeniu stałości prędkości w przekroju początkowym/wlotowym konieczna jest pewna odległość (rys. 2.13). Dlatego długość rurociągu ustalono metodą prób, sprawdzając stabilizowanie się rozkładu prędkości w przekroju rurociągu. W ten sposób ustalono długość odcinka rurociągu wykorzystanego w obliczeniach równą 4 m.

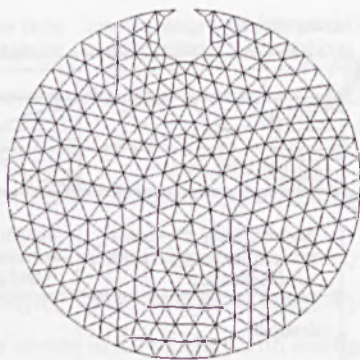


Rys. 2.13. Rozwój turbulentnego przepływu wody w ciśnieniowym przepływie w rurociągu (White F., 2011).

Fig. 2.13. Development of the turbulent water flow in the pipeline (White F., 2011).

Wykonanie obliczeń numerycznych dla dwóch różnych średnic przewodów wymagało wygenerowania dwóch oddzielnych siatek. W większości przypadków zastosowanie gęstszej siatki w całym obszarze przepływu pozwala na uzyskanie lepszych wyników. Wiąże się to jednak ze znacznym wydłużeniem czasu obliczeń. W celu wyeliminowania wpływu dyskretyzacji obszaru przepływu na wyniki, przed przystąpieniem do właściwych obliczeń przeprowadzono szereg prób obliczeń z wykorzystaniem siatek o różnych gęstościach. Spośród nich wybrano te, które pozwalały na uzyskiwanie poprawnych wyników w stosunkowo krótkim czasie.

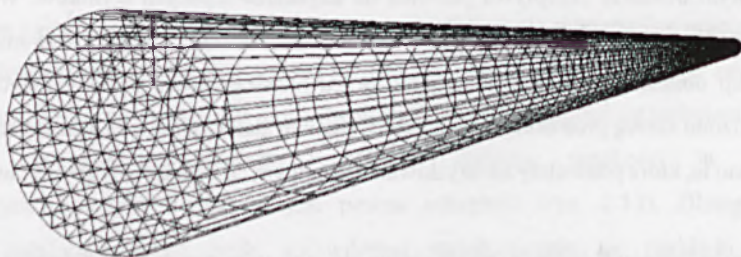
W rozwiązaniach numerycznych zaleca się, aby w rejonach występowania większych gradientów siatka była gęstsza od pozostałego obszaru przepływu. Pozwala to na uzyskiwanie wyników o większej dokładności. Z tego powodu zagęszczono siatki obliczeniowe w miejscu umieszczenia przewodu. Przyjęty schemat dyskretyzacji dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy $D_2 = 8,0$ mm pokazano na rys. 2.14.



Rys. 2.14. Dyskretyzacja przekroju poprzecznego strumienia wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy $D_2 = 8,0$ mm.

Fig. 2.14. Discretization of the cross section of the water stream in the pipeline with inserted cable with a diameter $D_2 = 8.0$ mm.

Siatki obliczeniowe wykonano tak, aby miały podobną ilość objętości skończonych. Podstawowym elementem siatki w przekroju był element trójkątny. Siatka wygenerowana dla przewodu o średnicy 5,3 mm składała się z 46 660 elementów, zaś dla przewodu o średnicy 8,0 mm – 50 720 elementów. Siatkę odwzorowującą obszar przepływu w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy zewnętrznej 5,3 mm pokazano na rys. 2.15.



Rys. 2.15. Siatka obliczeniowa obszaru przepływu w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy $D_2 = 5,3$ mm.

Fig. 2.15. Mesh of the water stream in a pipeline with inserted cable with a diameter $D_2 = 5,3$ mm.

Na wlocie do rurociągu zakładano stałą prędkość przepływu wody. Obliczenia przeprowadzono dla 10 różnych średnich prędkości przepływu wody, które zostały pomierzone podczas badań doświadczalnych. Warianty oraz ilość prowadzonych obliczeń zestawiono w tab. 2.19.

Tab. 2.19. Warianty obliczeń numerycznych ustalonego przepływu wody.

Table 2.19. Variants of numerical calculations of steady water flow.

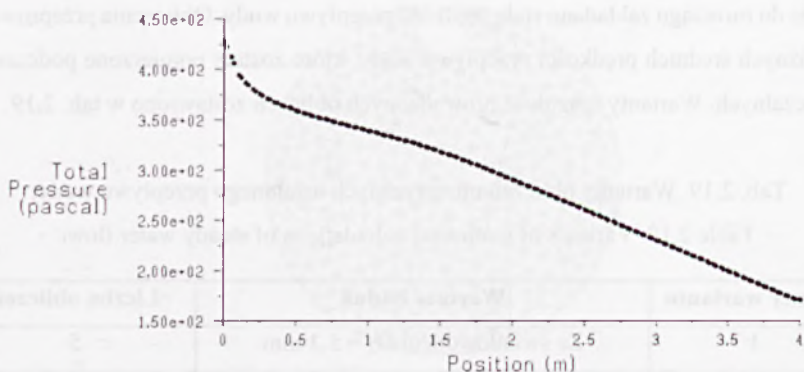
Numer wariantu	Wariant badań	Liczba obliczeń
1	Ze światłowodem $D_2 = 5,3$ mm	5
2	Ze światłowodem $D_2 = 8,0$ mm	5

Dla przewodu o średnicy $D_2 = 5,3$ mm zadawano prędkości początkowe o wartościach: 0,291 m/s, 0,312 m/s, 0,377 m/s, 0,439 m/s oraz 0,461 m/s, zaś dla przewodu o średnicy $D_2 = 8,0$ mm zadawano prędkości o wartościach: 0,232 m/s, 0,337 m/s, 0,409 m/s, 0,454 m/s oraz 0,486 m/s. We wszystkich obliczeniach zakładano chropowatość bezwzględną powierzchni rurociągu wyznaczoną w badaniach hydraulicznych $k_1 = 0,055$ mm. Założono, że chropowatość powierzchni przewodu wynosi $k_2 = 0,010$ mm.

Gęstość i współczynnik lepkości dynamicznej wody wprowadzono do programu uwzględniając temperaturę wody, która występowała podczas pomiarów hydraulicznych (tab. 2.1 i 2.6).

2.6.3. Wyniki obliczeń i ich analiza

Program umożliwia uzyskanie hydraulicznych parametrów przepływu w dowolnym punkcie strumienia wody. W celu obliczenia wysokości liniowych strat energii w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem, dla wszystkich przeprowadzonych obliczeń odczytano zmiany ciśnienia na długości. Spadek linii energii w osi rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy $D_2 = 5,3$ mm dla prędkości początkowej $v = 0,454$ m/s pokazano na rys. 2.16.



Rys. 2.16. Spadek linii energii na długości rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy $D_2 = 5,3$ mm przy prędkości początkowej $v = 0,454$ m/s.

Fig. 2.16. Pressure drop in the pipeline with inserted cable with a diameter $D_2 = 5.3$ mm, at the initial velocity $v = 0.454$ m/s.

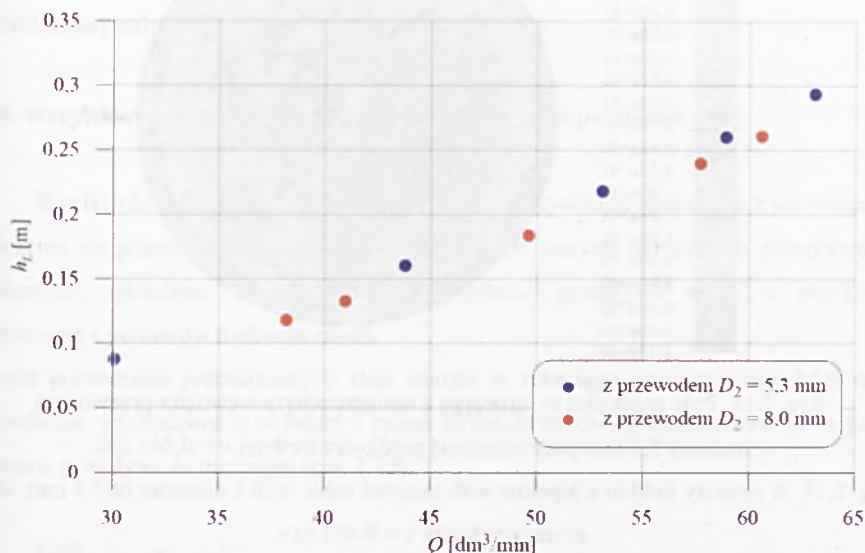
Zmiany ciśnienia pokazane na rys. 2.16 w początkowym odcinku rurociągu nie mają liniowego charakteru ze względu na występowanie nie w pełni rozwiniętego turbulentnego przepływu wody. Turbulentny, rozwinięty przepływ wody występuje w odległości ok. 1,5 m od wlotu. Z tego powodu do obliczeń strat energii wykorzystano różnicę ciśnień między przekrojami na 2 i 4 metrze rurociągu. Liniowe straty energii obliczono z zależności (2.5). Wyniki obliczeń liniowych strat energii na odcinku 2 metrów zestawiono w tab. 2.20.

Tab. 2.20. Obliczone wysokości liniowych strat energii w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem.

Table 2.20. Calculated head losses in the pipeline with inserted cable.

Lp.	D_2	Q	v	h_L
	[mm]	[dm ³ /min]	[m/s]	[m]
1	5,3	38,2	0,291	0,0049
2	5,3	41,0	0,312	0,0055
3	5,3	49,6	0,377	0,0077
4	5,3	57,7	0,439	0,0100
5	5,3	60,6	0,461	0,0109
6	8,0	30,1	0,232	0,0037
7	8,0	43,8	0,337	0,0067
8	8,0	53,1	0,409	0,0091
9	8,0	58,9	0,454	0,0108
10	8,0	63,1	0,486	0,0122

Obliczone wartości liniowych strat energii h_L dla poszczególnych przewodów przedstawiono w funkcji natężenia przepływu w rurociągu na rys. 2.20.

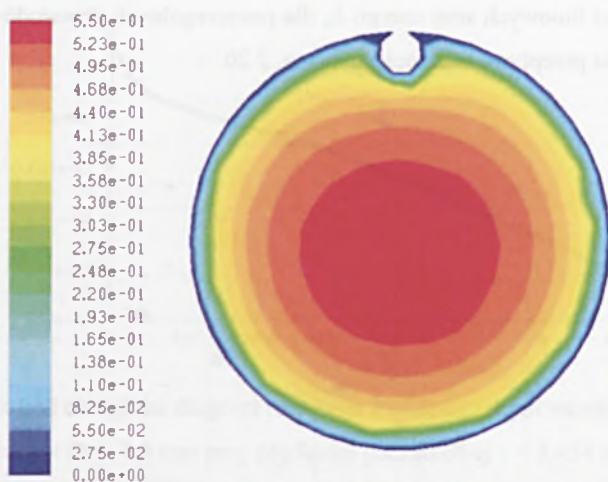


Rys. 2.17. Obliczone programem Fluent wartości liniowych strat energii w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem w zależności od natężenia przepływu wody.

Fig. 2.17. Values of head losses in the pipeline with inserted cable calculated using Fluent as a function of the volumetric water flow.

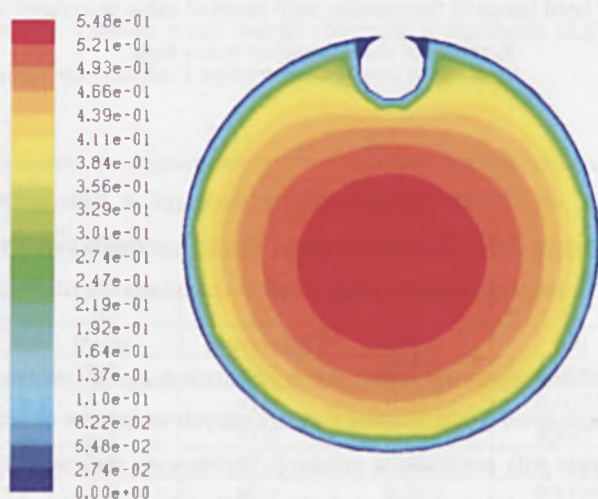
Z rys. 2.17 wynika, że liniowe straty energii w rurociągu z umieszczonymi wewnątrz przewodami o średnicach 5,3 i 8,0 mm uzyskane dla tych samych przepływów przyjmują podobne wartości. Nieznacznie większe straty ciśnienia uzyskano dla rurociągu z przewodem o średnicy 5,3 mm.

W celu określenia wpływu średnicy przewodu umieszczonego wewnątrz rurociągu na rozkład prędkości przepływu wody, dla obu rozpatrywanych wariantów obliczeń sporządzono grafiki przedstawiające pola prędkości w przekroju wylotowym rurociągu (rys. 2.18 i 2.19). Skala po lewej stronie odnosi się do wartości prędkości przepływu wody w m/s. Dla porównania wybrano przypadki, w których średnie prędkości przepływu wody były najbardziej do siebie zbliżone: dla przewodu o średnicy 5,3 mm – $v = 0,461$ m/s, zaś dla przewodu o średnicy 8,0 mm – $v = 0,454$ m/s.



Rys. 2.18. Pole prędkości w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 5,3 mm przy założonej prędkości średniej $v = 0,461$ m/s.

Fig. 2.18. A velocity field in a pipeline with inserted cable with a diameter of 5.3 mm, at an average velocity $v = 0.461$ m/s.



Rys. 2.19. Pole prędkości w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 8,0 mm przy założonej prędkości średniej $v = 0,454$ m/s.

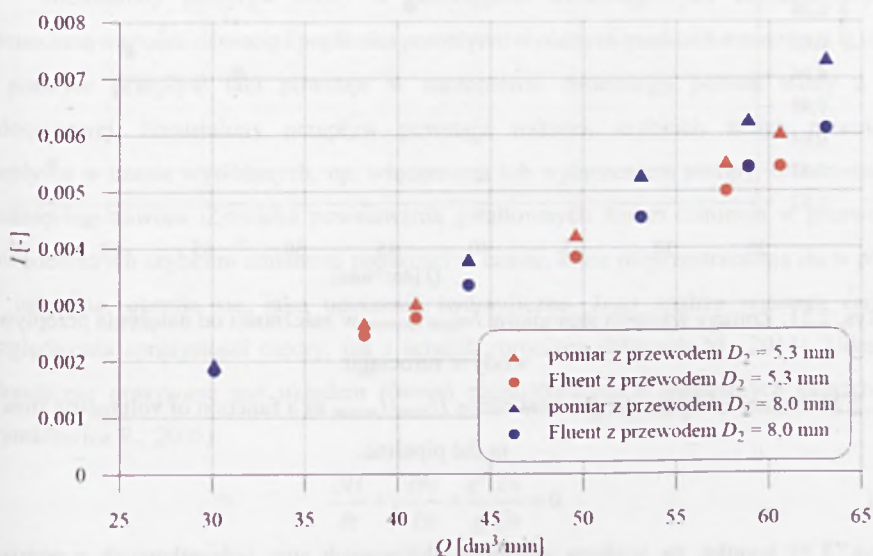
Fig. 2.19. A velocity field in a pipeline with inserted cable with a diameter of 8.0 mm, at an average velocity $v = 0.454$ m/s.

Z rys. 2.18 i 2.19 wynika, że dla rozpatrywanych średnic rurociągu i przewodu, średnica przewodu ma niewielki wpływ na zmianę hydraulicznych warunków przepływu, panujących w rurociągu. Wprowadzenie przewodu o większej średnicy powoduje nieznaczne zmniejszenie obszaru maksymalnych prędkości przepływu wody.

2.6.4. Weryfikacja wyników obliczeń w oparciu o wyniki pomiarów

Wyniki obliczeń (tab. 2.20) zweryfikowano z wynikami pomiarów hydraulicznych. Obliczenia programem Fluent wykonano przy takich samych natężeniach przepływu, jak pomierzone, zakładając wartości średnich prędkości przepływu wody w przekrojach wyznaczone z pomiarów hydraulicznych.

W celu porównania jednostkowych strat energii w rurociągu porównywano dalej spadki hydrauliczne wyznaczone z obliczeń i badań hydraulicznych i przedstawiono je w funkcji natężenia przepływu w rurociągu (rys. 2.20).

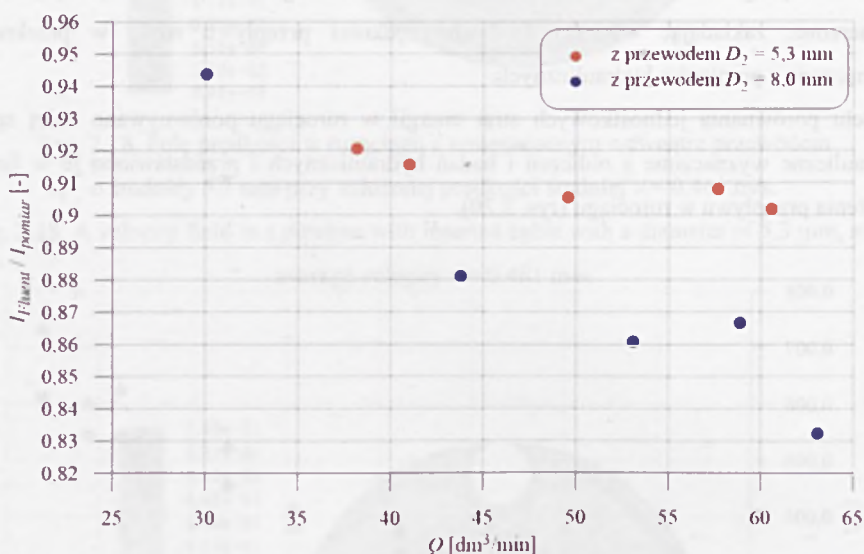


Rys. 2.20. Wartości spadków hydraulicznych z obliczeń numerycznych programem Fluent oraz z pomiarów hydraulicznych w funkcji natężenia przepływu w rurociągu.

Fig. 2.20. The values of hydraulic gradient obtained on the basis of numerical calculations using Fluent and on the basis of experimental tests as a function of volumetric flow rate.

Z rys. 2.20 wynika, że spadki hydrauliczne/jednostkowe straty energii wyznaczone z pomiarów hydraulicznych są wyższe od obliczonych przy pomocy programu Fluent. Różnice są tym wyższe im większe są natężenia przepływu wody.

W celu zilustrowania różnic pomiędzy wartościami spadków obliczonymi programem Fluent i pomierzonymi, dla obu przewodów obliczono stosunki I_{Fluent}/I_{pomiar} (gdzie: I_{Fluent} – spadek hydrauliczny obliczony programem Fluent, I_{pomiar} – spadek hydrauliczny z badań doświadczalnych). Wyniki obliczeń pokazano w funkcji natężenia przepływu w rurociągu (rys. 2.21).



Rys. 2.21. Zmiany wartości stosunków I_{Fluent}/I_{pomiar} w zależności od natężenia przepływu wody w rurociągu.

Fig. 2.21. Values of hydraulic gradient ratios I_{Fluent}/I_{pomiar} as a function of volumetric flow rate in the pipeline.

Z rys. 2.21 wynika, że większą zgodność obliczonych strat jednostkowych z pomiarami uzyskano dla przewodu o średnicy 5,3 mm. Spadki hydrauliczne obliczone programem Fluent w podanym zakresie przepływów są średnio 9% niższe od uzyskanych z badań doświadczalnych. Dla przewodu o średnicy 8,0 mm, obliczone numerycznie spadki hydrauliczne są średnio 12% niższe od spadków pomierzonych.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że jednostkowe straty hydrauliczne obliczone programem Fluent są średnio o ok. 10% niższe od pomierzonych. Należy zauważyć, że w pomiarach hydraulicznych, przewody były umieszczane w specjalnych pierścieniach, co mogło mieć wpływ na wyższe opory przepływu. Zastosowanie programu Fluent pozwala w pierwszej kolejności badać oddziaływanie umieszczonych wewnątrz przewodów na pole prędkości strumienia w przekroju poprzecznym rurociągu. W przypadku oceny oporów przepływu należy zawsze dać pierwszeństwo wynikom badań na modelu fizycznym.

3. Nieustalony przepływ wody w przewodach wodociągowych podczas uderzenia hydraulicznego

3.1. Analityczny opis zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu

Nieustalony przepływ wody w rurociągach wodociągowych charakteryzuje się zmiennością wartości ciśnienia i prędkości przepływu w różnych punktach rurociągu i w czasie. W praktyce przepływ taki powstaje w następstwie zmiennego poboru wody z sieci wodociągowej. Nieustalony przepływ powstaje wskutek szybkich zmian parametrów przepływu w czasie wywołanych, np. włączeniem lub wyłączeniem pompy, otwarciem, czy zamknięciem zaworu. Zjawisko powstawania gwałtownych zmian ciśnienia w przewodach spowodowanych szybkimi zmianami prędkości w czasie, które rozprzestrzeniają się w postaci fali ciśnienia, określa się, jako uderzenie hydrauliczne. Jego analiza wymaga zarówno uwzględnienia sprężystości cieczy, jak i ścianek rurociągu (Mitosek M., 2014). Uderzenie hydrauliczne opisywane jest układem równań różniczkowych o pochodnych cząstkowych (Szymkiewicz R., 2005):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2D} |v| v = 0 \quad (3.2)$$

gdzie:

H – wysokość ciśnienia [m],

c – prędkość fali ciśnienia [m/s],

t – czas [s],

v – prędkość przepływu wody w ruchu nieustalonym w przekroju o współrzędnej x [m/s],

g – przyspieszenie ziemskie [m/s²],

x – współrzędna w rurociągu [m],

f – współczynnik oporów ruchu [-].

Równania (3.1), (3.2) wyprowadzono w założeniu:

- jednowymiarowego przepływu wody,
- uwzględnienia zmian ściśliwości wody, sprężystości materiału rurociągu,
- dyssypacja energii obliczana jest wzorem Darcy'ego-Weisbacha.

Początkowo współczynnik f obliczany był jak dla ruchu ustalonego (Wylie E.B. i Streeter V.L., 1994). Z uwagi na brak zgodności wyników obliczeń z rezultatami badań eksperymentalnych w dalszym etapie współczynnik oporów ruchu był obliczany jako suma współczynnika dla ruchu ustalonego f_u oraz ruchu nieustalonego f_{nu} ($f = f_u + f_{nu}$). Takie postępowanie było i jest stosowane przez B. Brunone i innych (1991, 2000), A. Berganta i innych (2001), H. Ramos i innych (2004), H.F. Duan i innych (2010) oraz przez innych autorów.

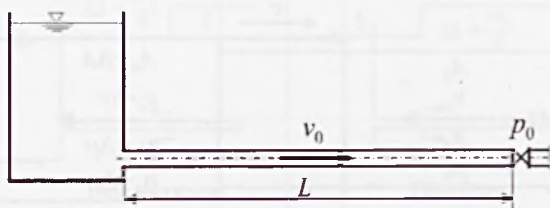
Pierwsze równanie (3.1) nazywane jest równaniem ciągłości przepływu ściśliwej cieczy. Drugie równanie (3.2) określa się, jako równanie ilości ruchu, opisujące równowagę dynamiczną w przekroju poprzecznym przewodu. Równania (3.1) i (3.2) tworzą układ quasi-liniowych równań różniczkowych cząstkowych pierwszego rzędu typu hiperbolicznego z dwiema zmiennymi niezależnymi (x, t) i dwiema zmiennymi zależnymi $H(x, t)$, $v(x, t)$.

Zmiana gęstości wody w następstwie zmian ściśliwości oraz odkształcalności rurociągu uwzględniona jest w prędkości fali ciśnienia c . Prędkość fali ciśnienia wywołanej uderzeniem hydraulicznym w rurociągu stanowi parametr, którego znajomość jest niezbędna do opisu uderzenia hydraulicznego i rozwiązania układu równań (3.1) i (3.2).

Jak już wspomniano, uderzeniem hydraulicznym nazywane są gwałtowne zmiany ciśnienia w rurociągu, spowodowane nagłymi w czasie zmianami prędkości przepływu cieczy. Zwiększenie prędkości, np. wskutek otwarcia zaworu, wywołuje w pierwszej fazie spadek ciśnienia. Takie uderzenie hydrauliczne nazywane jest ujemnym. Zmniejszenie prędkości

przepływającej wody, np. wskutek zamknięcia zaworu, powoduje początkowo wzrost ciśnienia. Jest to tzw. dodatnie uderzenie hydrauliczne. Zmiany ciśnienia w przewodzie powstałe w następstwie uderzenia hydraulicznego (dodatniego i ujemnego) oblicza się z zależności opublikowanej po raz pierwszy przez Żukowskiego w roku 1889 i Allievi'ego w roku 1913. Sposób jej wyprowadzenia przedstawiono poniżej.

Analizowano wypływ wody ze zbiornika prostym rurociągiem o długości L i średnicy D z pominięciem oporów przepływu (rys. 3.1). Założono, że w chwili, gdy zasuwą na końcu rurociągu jest otwarta, woda przepływa z prędkością początkową v_0 , a w rurociągu przy zasuwie panuje ciśnienie p_0 .

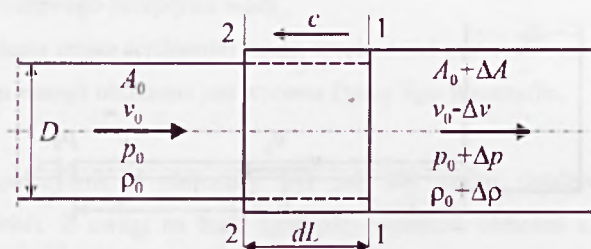


Rys. 3.1. Schemat prostego rurociągu o długości L i średnicy D wychodzącego ze zbiornika.

Fig. 3.1. Scheme of a straight pipeline of length L and diameter D coming out of the tank.

W pewnej chwili zasuwą na końcu rurociągu zostaje gwałtownie zamknięta. Gdyby rurociąg był niesprężysty, a woda cieczą nieściśliwą, to cały pęd wody zostałby zredukowany do zera w nieskończenie krótkim czasie, wskutek czego ciśnienie wody w przekroju zasuwę rosłoby do nieskończoności. W rzeczywistości przepływająca w rurociągu woda jest ściśliwa, a rurociąg charakteryzuje się pewną sprężystością. Zamknięcie zasuwę wywołuje zmniejszenie prędkości wody w przekroju zasuwę o wartość Δv . Spowolnienie przepływu wody wzbudza siły bezwładności. Wskutek ściśliwości wody, nie zatrzymuje się ona natychmiast. W pierwszej chwili zatrzymana zostaje objętość wody przy zasuwie, podczas gdy pozostałe jej objętości poruszają się z prędkością początkową. Z czasem kolejne porcje wody znajdujące się bliżej zbiornika również zostają zatrzymane. Zatrzymanie przebiega stopniowo, obejmując kolejne cząstki wody. Wskutek nacisku sił bezwładności, w objętości wody już zatrzymanej wzrasta ciśnienie o wartość Δp . W wodzie powstaje powierzchnia nieciągłości ciśnienia i prędkości, rozdzielająca część, w której występują jeszcze warunki przed zamknięciem zasuwę, tzn. ciśnienie p_0 i prędkość v_0 . Ta powierzchnia nieciągłości nazywana falą uderzeniową, przemieszcza się w przewodzie z prędkością c w kierunku przeciwnym do ciśnienia wody.

Do wyznaczenia przyrostu ciśnienia Δp wykorzystuje się równania ruchu oraz ciągłości. Na rys. 3.2 przedstawiono odcinek rurociągu o długości dL . Po prawej stronie od przekroju 1 występują warunki tuż po uderzeniu hydraulicznym, zaś na lewo od przekroju 2 warunki nie zdążyły jeszcze ulec zmianie i są jak podczas przepływu w ruchu ustalonym. Wymiary geometryczne rurociągu (średnica D , pole przekroju A), parametry fizyczne (gęstość wody ρ) oraz parametry hydrauliczne (średnia prędkość przepływu wody v_0 , ciśnienie p_0) na lewo od przekroju 2 oznaczono indeksem „0”. Na prawo od przekroju 1 wartości tych parametrów wyrażono w oparciu o przyrosty: $v = v_0 - \Delta v$, $p = p_0 + \Delta p$, $\rho = \rho_0 + \Delta \rho$ oraz $A = A_0 + \Delta A$. Względne zmiany gęstości $\Delta \rho / \rho_0$ oraz przekroju poprzecznego $\Delta A / A_0$ są niewielkie w stosunku do zmian prędkości $\Delta v / v_0$ i ciśnienia $\Delta p / p_0$.



Rys. 3.2. Zmiana parametrów geometrycznych rurociągu i hydraulicznych parametrów strumienia wody przed i podczas uderzenia hydraulicznego.

Fig. 3.2. Change of geometric parameters of the pipeline and hydraulic parameters of the water flow before and during the water hammer.

W rozważaniach przyjmuje się, że rurociąg jest cienkościenny ($D/e > 10$, gdzie e – grubość ścianki (Nielacny M., 2002)), którego ścianki są sprężyste odkształcalne według klasycznej teorii sprężystości liniowej, tj. zgodnie z prawem Hooke’a. Dodatkowo zakładając, że różnice między przekrojami A i A_0 oraz różnice między gęstościami ρ i ρ_0 są pomijalnie małe, można wyrazić, pęd zatrzymanej objętości cieczy jako $\rho A dL v_0$. Z równania ruchu wynika, że pęd ten jest równoważony przez popęd sił równy $A \Delta p dt$, tzn.:

$$\rho A dL v_0 = A \Delta p dt \quad (3.3)$$

Definiując prędkość rozprzestrzenienia się fali ciśnienia c , jako prędkość pokonania drogi dL w czasie dt :

$$c = \frac{dL}{dt} \quad (3.4)$$

Można ostatecznie wyznaczyć zmianę ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego:

$$\Delta p = \rho c \Delta v \quad (3.5)$$

Przy nagłym zamknięciu zasuwy ($\Delta v = v_0$), występuje maksymalny przyrost ciśnienia:

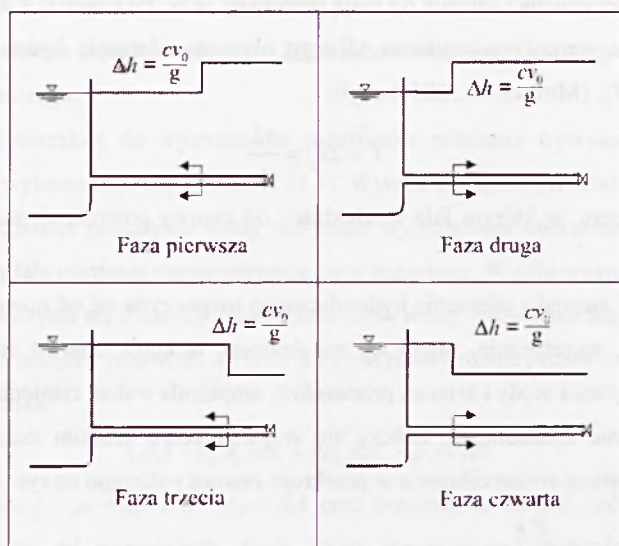
$$\Delta p_{\max} = \rho c v_0 \quad (3.6)$$

Przyrost ciśnienia można wyrazić w metrach słupa wody Δh , zależnością:

$$\Delta h = \frac{c}{g} v_0 \quad (3.7)$$

Zależności (3.5), (3.6) i (3.7) nazywane są w literaturze wzorami Żukowskiego-Allievi'ego.

Na rys. 3.3 przedstawiono cztery kolejne fazy zjawiska dodatniego uderzenia hydraulicznego.



Rys. 3.3. Cztery fazy dodatniego uderzenia hydraulicznego w rurociągu (Mambretti S., 2014).

Fig. 3.3. Four phases of rapid water hammer in the pipeline (Mambretti S., 2014).

Fala ciśnienia (uderzeniowa) poruszająca się z prędkością c po czasie $t_1 = L/c$ dociera do zbiornika. W czasie $t < t_1$, w rurociągu można wyróżnić dwie strefy: w strefie bliżej zbiornika woda płynie w kierunku zasuwy, zaś w strefie położonej bliżej zaworu woda już zdążyła się zatrzymać, a ciśnienie wzrosło o wartość Δp , którą opisuje zależność (3.7).

Po czasie t_1 , fala uderzeniowa dotrze do zbiornika i ciśnienie w zbiorniku będzie niższe niż ciśnienie w rurociągu, zaś prędkość przepływu wody w rurociągu będzie równa zero. W tym momencie kończy się pierwsza faza uderzenia. Wskutek powstałej różnicy ciśnień pomiędzy zbiornikiem i rurociągiem, woda w rurociągu zacznie płynąć w kierunku zbiornika

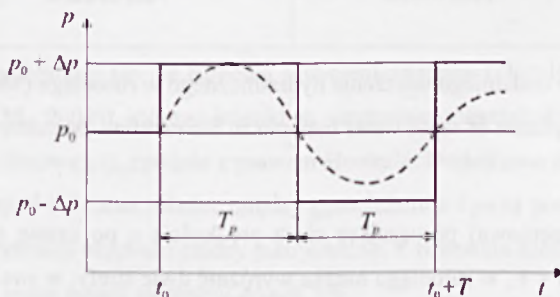
z prędkością $-v_0$. Druga faza uderzenia trwa do czasu $t_2 = 2L/c$, czyli do momentu, w którym fala ciśnienia po raz kolejny osiągnie przekrój zasuwy. W czasie $t_1 < t < t_2$, rurociąg znowu jest podzielony na dwie strefy: woda w strefie położonej bliżej zbiornika płynie z prędkością $-v_0$, zaś w strefie bliżej zasuwy nie ma przepływu i ciśnienie jest wyższe o Δp względem ciśnienia p_0 .

Druga faza uderzenia hydraulicznego kończy się w czasie t_2 , gdy fala ciśnienia dochodzi do przekroju zasuwy. Dla kolejnych faz uderzenia można przeprowadzić analogiczną analizę. Ponieważ prędkość przepływu wody w rurociągu wynosi $-v_0$, występuje spadek ciśnienia o wartość $\Delta p = -\rho c v_0$. Trzecia i czwarta faza mają podobny przebieg do dwóch poprzednich, przy czym wartości zmiany ciśnienia Δp mają przeciwny znak. Po czasie $t_4 = 4L/c$, w rurociągu zostają osiągnięte warunki początkowe, dlatego okresem uderzenia hydraulicznego T jest podwojony czas T_p , (Mitosek M., 2014) czyli:

$$T = 2T_p = \frac{4L}{c} \quad (3.8)$$

gdzie T_p jest czasem, w którym fala wychodząca od zasuwy powróci do niej w postaci fali odbitej.

Po czasie t_4 , cykl zjawiska uderzenia hydraulicznego rozpoczyna się od nowa. Te cztery fazy powtarzają się i, teoretycznie, nigdy się nie kończą. Wskutek oporów ruchu wody oraz sprężania i rozprężania wody i ścianek przewodów, amplituda wahań ciśnienia szybko maleje, przez co uderzenie hydrauliczne kończy się w stosunkowo krótkim czasie. Teoretyczny i rzeczywisty przebieg zmian ciśnienia w przekroju zaworu pokazano na rys. 3.4.



Rys. 3.4. Teoretyczny i rzeczywisty przebieg zmian ciśnienia w rurociągu podczas uderzenia hydraulicznego (Mitosek M., 2014).

Fig. 3.4. Theoretical and observed changes of pressure in the pipeline during a water hammer (Mitosek M., 2014).

Opisane rozważania odnoszą się do uderzenia hydraulicznego wywołanego zamknięciem zasuwy t_z w czasie zbliżonym do zera. W rzeczywistości czas zamykania t_z jest większy od zera. Jeżeli $t_z \leq T_p$, to przyrost ciśnienia Δp będzie maksymalny (3.6) i takie uderzenie hydrauliczne nazywa się uderzeniem prostym. Jeśli zaś $t_z > T_p$, wówczas występuje uderzenie hydrauliczne nieproste (złożone). W uderzeniu nieprostim występuje nałożenie się fali odbitej na falę pierwotną, co powoduje, że przyrost ciśnienia jest mniejszy od maksymalnego. Michaud podał zależność dla wyrażenia zmiany ciśnienia w uderzeniu hydraulicznym nieprostim (Mitosek M., 2014):

$$\Delta p = \frac{2\rho v_0 L}{t_z} \quad (3.9)$$

Zależność (3.9) można stosować gdy $\Delta p \leq 2,2p_0$ lub w warunkach liniowej zmiany prędkości przepływu w rurociągu.

W praktyce inżynierskiej do wyznaczania przyrostów ciśnienia wywołanych uderzeniem hydraulicznym, wykorzystuje się zależność (3.5). Wynika z niej, że przyrosty ciśnienia zależą nie tylko od prędkości przepływu wody tuż przed wywołaniem uderzenia, ale również od prędkości, z jaką fala ciśnienia rozprzestrzenia się w rurociągu. W celu wyznaczenia prędkości fali ciśnienia c korzysta się z zasady zachowania masy wody – równania ciągłości przepływu. Przyrost masy na odcinku przewodu dL (rys. 3.2) jest równy różnicy masy dopływu i odpływu wody z tego odcinka:

$$(\rho A - \rho_0 A_0) dL = (\rho_0 A_0 v_0 - \rho A v) dt \quad (3.10)$$

Po uwzględnieniu $\rho = \rho_0 + \Delta\rho$ i $A = A_0 + \Delta A$ oraz pominięciu ilorazu $\Delta\rho\Delta A$, jako wartości znacznie mniejszej od pozostałych, lewą stronę powyższego równania można zapisać w postaci:

$$(\rho A - \rho_0 A_0) dL = \rho_0 A_0 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0} + \frac{\Delta A}{A_0} \right) dL \quad (3.11)$$

Po wymnożeniu prawej strony równania bilansu masy otrzymuje się:

$$[\rho_0 A_0 v_0 - (\rho_0 + \Delta\rho)(A_0 + \Delta A)(v_0 - \Delta v)] dt = \rho_0 A_0 \Delta v dt \quad (3.12)$$

Po pominięciu składników zawierających $\Delta\rho$ i ΔA otrzymuje się zależność:

$$\rho_0 A_0 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0} + \frac{\Delta A}{A_0} \right) dL = \rho_0 A_0 \Delta v dt \quad (3.13)$$

Wstawiając do zależności (3.13) zależność na prędkość fali ciśnienia (3.4) otrzymano:

$$c = \frac{\Delta v}{\frac{\Delta \rho}{\rho_0} + \frac{\Delta A}{A_0}} \quad (3.14)$$

Wykorzystując definicję sprężystości wody (Mitosek M., 2014) można zapisać:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{\Delta p}{K} \quad (3.15)$$

gdzie:

K – moduł sprężystości wody [Pa].

W celu wyznaczenia stosunku $\Delta A/A_0$ przyjmuje się, że rozważania dotyczą proporcjonalnych odkształceń sprężystych rurociągów cienkościennych i stosuje się prawo Hooke'a:

$$\Delta \sigma = E \frac{\Delta l}{l} = E \frac{\Delta D}{D} \quad (3.16)$$

gdzie:

$\Delta \sigma$ – przyrost naprężeń obwodowych wywołanych przyrostem obwodu rurociągu ($l = \pi D$) [Pa],

E – moduł Younga materiału przewodu [Pa],

Δl – zmiana obwodu koła [m],

l – obwód koła [m].

Wzrost naprężeń obwodowych $\Delta \sigma$ spowodowany jest wzrostem ciśnienia wody w rurociągu Δp . Siły wynikające z przyrostu naprężeń w ściankach są równoważone przez przyrost parcia wody na przekrój podłużny rurociągu:

$$\Delta \sigma 2e \Delta L = \Delta p D \Delta L \quad (3.17)$$

gdzie:

e – grubość ścianki rurociągu [m].

Stąd:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta p D}{2 E e} \quad (3.18)$$

Związek względnego przyrostu przekroju poprzecznego ze względnym przyrostem średnicy rurociągu wyraża równanie:

$$\frac{dA}{A} = \frac{dD^2}{D^2} = 2 \frac{dD}{D} \quad (3.19)$$

Dla wielkości różnicowych można więc zapisać:

$$\frac{\Delta A}{A_0} = 2 \frac{\Delta D}{D} \quad (3.20)$$

Ostatecznie:

$$\frac{\Delta A}{A_0} = \frac{\Delta p D}{E e} \quad (3.21)$$

Po podstawieniu zależności (3.15) na $\Delta p/p_0$ oraz (3.21) na $\Delta A/A_0$ do zależności (3.14) otrzymuje się:

$$c = \frac{\Delta v}{\Delta p \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{E e} \right)} \quad (3.22)$$

Wyrażając Δp wzorem Żukowskiego (3.5), po przekształceniach uzyskuje się zależność na prędkość fali ciśnienia wyprowadzoną przez Kortewega:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{KD}{E e}}} \quad (3.23)$$

Z zależności (3.23) wynika, że prędkość rozprzestrzeniania się fali ciśnienia w przewodzie zależy od własności cieczy (K, ρ), rurociągu (E, e, D) i jest tym mniejsza, im łatwiej odkształca się rurociąg.

Jeśli rurociąg nie odkształca się ($E \rightarrow \infty$), to $c = a = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ i prędkość fali ciśnienia

odpowiada prędkości dźwięku w ośrodku nieograniczonym.

W literaturze nie znaleziono informacji na temat wpływu wprowadzenia przewodu w obszar ciśnieniowego nieustalonego przepływu wody w rurociągu na prędkość fali ciśnienia.

Własną zależność opisującą prędkość rozprzestrzeniania się fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem wyprowadzono stosując dwa podejścia, tzn. wykorzystując metodę bilansu masy oraz bilansu energii i pracy. Ze względu na zmienność przekroju przewodów wprowadzanych do rurociągu, podzielono je na pełne, cienkościenne i grubościennie:

- przewód pełny,
- przewód cienkościenny – (stosunek średnicy wewnętrznej do grubości ścianki $D/e > 10$, lub $e/D < 0,1$),
- przewód grubościenny – (stosunek średnicy wewnętrznej do grubości ścianki $D/e \leq 10$, lub $e/D > 0,1$).

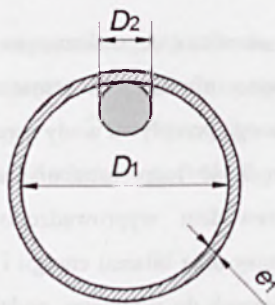
3.2. Analityczny opis zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem

3.2.1. Prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem

Określenie prędkości fali ciśnienia na podstawie bilansu masy

Przyjęto, że wprowadzony do rurociągu przewód może mieć przekrój poprzeczny w kształcie pierścienia. Taki przewód może być traktowany podobnie jak rurociąg – jako przewód cienkościenny lub jako przewód grubościenny. Możliwe jest również wprowadzenie przewodu, którego kołowy przekrój poprzeczny stanowi monolit, wtedy taki przewód będzie nazywany w pracy przewodem pełnym. Dalej rozważano teoretycznie wpływ umieszczenia w rurociągu trzech rodzajów przewodów na prędkość fali ciśnienia: przewodu pełnego, cienkościennego i grubościennego. W przyjętych oznaczeniach indeksy „1” dotyczą rurociągu, zaś indeksy „2” odnoszą się do przewodu umieszczonego wewnątrz rurociągu.

Założono występowanie uderzenia hydraulicznego w rurociągu, którego schemat przekroju rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem pokazano na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Przekrój poprzeczny rurociągu z umieszczonym pełnym przewodem.

Fig. 3.5. Cross section of the pipeline with inserted cable.

Pole przekroju poprzecznego strumienia A w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem wyraża zależność:

$$A = A_1 - A_2 \quad (3.24)$$

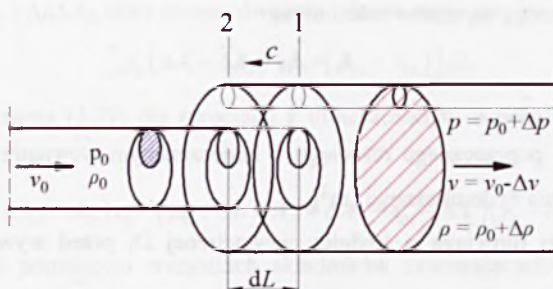
gdzie:

A – pole przekroju poprzecznego strumienia wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem $[m^2]$,

A_1 – pole przekroju rurociągu o średnicy wewnętrznej D_1 $[m^2]$,

A_2 – pole przekroju pełnego przewodu o średnicy zewnętrznej D_2 $[m^2]$.

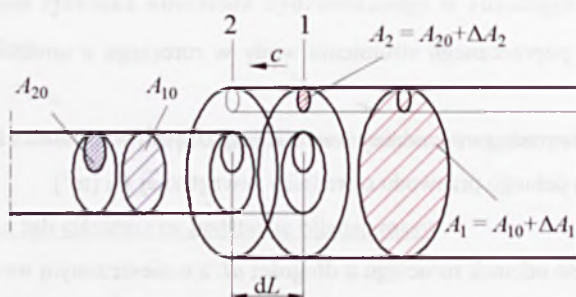
Na rys. 3.6 pokazano odcinek rurociągu o długości dL z umieszczonym wewnątrz przewodem i oznaczeniami hydraulicznych parametrów przepływu wody. Na prawo od przekroju 1 panują warunki tuż po powstaniu dodatniego uderzenia hydraulicznego. Na lewo od przekroju 2, warunki przepływu nie uległy jeszcze zmianie. Oznaczenia z indeksem „0” odnoszą się do parametrów ustalonego przepływu wody, przed nadejściem fali ciśnienia.



Rys. 3.6. Hydrauliczne parametry przepływu w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem podczas uderzenia hydraulicznego.

Fig. 3.6. Flow parameters in the pipeline with inserted cable during a water hammer.

Na rys. 3.7 naniesiono oznaczenia wymiarów geometrycznych rurociągu i przewodu. Zasada przyjętych oznaczeń jest taka sama, jak dla hydraulicznych parametrów przepływu (rys. 3.6). Oznaczenia na prawo od przekroju 1 odnoszą się do warunków po przejściu fali ciśnienia, wywołanej dodatnim uderzeniem hydraulicznym. Parametry na lewo od przekroju 2 zostały oznaczone indeksem „0” i odnoszą się do warunków jeszcze niezmiennych nadejściem fali ciśnienia.



Rys. 3.7. Geometryczne parametry przewodu i rurociągu podczas uderzenia hydraulicznego.

Fig. 3.7. Geometric parameters of the cable and the pipeline during water hammer.

Stosując oznaczenia przedstawione na rys. 3.7, pole przekroju strumienia przed wywołaniem uderzenia hydraulicznego wyrażono zależnością:

$$A_0 = A_{i0} - A_{20} \quad (3.25)$$

gdzie:

A_0 – pole przekroju poprzecznego rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem przed wywołaniem uderzenia hydraulicznego [m^2],

A_{i0} – pole przekroju rurociągu o średnicy wewnętrznej D_1 przed wywołaniem uderzenia hydraulicznego [m^2],

A_{20} – pole przekroju pełnego przewodu o średnicy zewnętrznej D_2 przed wywołaniem uderzenia hydraulicznego [m^2].

Wzrost ciśnienia wody w rurociągu spowoduje zwiększenie jego średnicy D_1 i powierzchni przekroju A_1 o wartość ΔA_1 , co zapisano następująco:

$$A_1 = A_{i0} + \Delta A_1 \quad (3.26)$$

gdzie:

ΔA_1 – zmiana pola przekroju rurociągu o średnicy wewnętrznej D_1 [m^2].

W podobny sposób wyrażono zmianę powierzchni pełnego przewodu umieszczonego wewnątrz rurociągu:

$$A_2 = A_{20} + \Delta A_2 \quad (3.27)$$

gdzie:

ΔA_2 – zmiana pola przekroju przewodu o średnicy D_2 [m^2].

Wzrost ciśnienia wody o wartość Δp , spowoduje rozciąganie ścianki rurociągu, zwiększenie jego pola przekroju ($\Delta A_1 > 0$) oraz ściskanie przewodu umieszczonego wewnątrz rurociągu, stąd:

$$\Delta A_2 < 0 \quad (3.28)$$

Na podstawie bilansu masy, podobnie jak w przypadku rozprzestrzeniania się fali ciśnienia w rurociągu bez przewodu (3.10), przyrost masy wody w elementarnym odcinku rurociągu o długości dL , jest równy różnicy masy dopływu i odpływu wody z tego odcinka:

$$[\rho(A_1 - A_2) - \rho_0(A_{20} - A_{10})]dL = [\rho_0(A_{10} - A_{20})v_0 - \rho(A_1 - A_2)v]dt \quad (3.29)$$

Uwzględniając zależności (3.24) i (3.25) lewą stronę równania (3.28) można zapisać w postaci:

$$[(\rho_0 + \Delta\rho)(A_1 - A_2) - \rho_0(A_{20} - A_{10})]dL \quad (3.30)$$

Po podstawieniu zależności na A_1 (3.26) i na A_2 (3.27), przekształceniach i pominięciu składników $\Delta\rho\Delta A_1$ i $\Delta\rho\Delta A_2$, lewa strona równania bilansu masy przyjmuje postać:

$$[\rho_0(\Delta A_1 - \Delta A_2) + \Delta\rho(A_{20} - A_{10})]dL \quad (3.31)$$

Prawą stronę równania (3.29) dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem można zapisać w postaci:

$$[\rho_0(A_{10} - A_{20})v_0 - (\rho_0 + \Delta\rho)(A_{10} + \Delta A_1 - A_{20} - \Delta A_2)(v_0 - \Delta v)]dt \quad (3.32)$$

Po wymnożeniu i pominięciu wszystkich składników zawierających $\Delta\rho$, ΔA_1 i ΔA_2 jako wartości niższego rzędu otrzymano:

$$[\rho_0\Delta v(A_{10} - A_{20})]dt \quad (3.33)$$

Po uwzględnieniu wyprowadzonych zależności w równaniu (3.29), przyjmuje ono postać:

$$[\rho_0(\Delta A_1 - \Delta A_2) + \Delta\rho(A_{20} - A_{10})]dL = [\rho_0\Delta v(A_{10} - A_{20})]dt \quad (3.34)$$

Wprowadzając oznaczenie prędkości fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem symbolem $c_p = dL/dt$ otrzymano:

$$c_p = \frac{\rho_0\Delta v(A_{10} - A_{20})}{\rho_0(\Delta A_1 - \Delta A_2) + \Delta\rho(A_{10} - A_{20})} \quad (3.35)$$

Korzystając z definicji sprężystości wody (3.15), ostatnie równanie można zapisać:

$$c_p = \frac{\frac{K}{\Delta p} \Delta\rho\Delta v(A_{10} - A_{20})}{\frac{K}{\Delta p} \Delta\rho(\Delta A_1 - \Delta A_2) + \Delta\rho(A_{10} - A_{20})} \quad (3.36)$$

Po wyrażeniu zmiany ciśnienia Δp w liczniku powyższego równania zależnością (3.5) i przekształceniach otrzymano:

$$c_p = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{\Delta p} \left(\frac{\Delta A_1 - \Delta A_2}{A_{10} - A_{20}} \right)}} \quad (3.37)$$

W obszarze liniowych odkształceń sprężystych przyrost przekroju poprzecznego rurociągu można przyjąć jak w przypadku rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu (3.21):

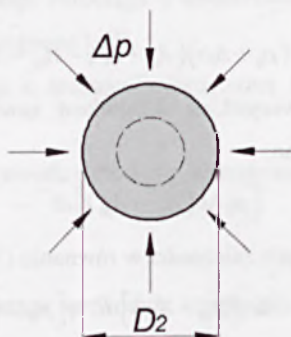
$$\Delta A_1 = A_{10} \frac{\Delta p D_1}{E_1 e_1} \quad (3.38)$$

gdzie:

e_1 – grubość ścianki rurociągu [m],

E_1 – moduł Younga materiału, z jakiego wykonany jest rurociąg [Pa].

W odróżnieniu od rurociągu, rozważany przewód nie jest przewodem cienkościennym, lecz przewodem o pełnym przekroju. Z tego powodu, przy wyznaczaniu względnej zmiany przekroju przewodu, należy uwzględnić średnie zmniejszenie obwodu koła Δl_{2sr} (rys 3.8).



Rys. 3.8. Przekrój pełnego przewodu, umieszczonego w rurociągu, ściskanego podczas uderzenia hydraulicznego.

Fig. 3.8. A cross section of a cable inserted into a pipeline and compressed during a water hammer.

Maksymalne zmniejszenie obwodu zewnętrznego występuje na obwodzie i zgodnie z prawem Hooke'a wynosi:

$$\Delta l_{2max} = \pi D_2 \frac{\Delta \sigma}{E_2} \quad (3.39)$$

Zmiana obwodu w środku przewodu wynosi:

$$\Delta l_{2\min} = 0 \quad (3.40)$$

Średnią zmianę obwodu pełnego przewodu można zapisać (linia przerywana na rys. 3.8) jako:

$$\Delta l_{2sr} = \frac{1}{2} \pi D_2 \frac{\Delta \sigma}{E_2} \quad (3.41)$$

Podstawiając do równania równowagi sił (3.17) $e = D/2$, otrzymuje się:

$$\Delta p = \Delta \sigma \quad (3.42)$$

Średnią zmianę obwodu pełnego przewodu można ostatecznie wyrazić zależnością:

$$\Delta l_{2sr} = \frac{1}{2} \pi D_2 \frac{\Delta p}{E_2} \quad (3.43)$$

Ostatnia zależność (3.43) pozwala na wyznaczenie względnej zmiany obwodu, a także względnej zmiany przekroju pełnego przewodu przy pomocy równań (3.16) i (3.20).

Ponieważ przewód umieszczony wewnątrz rurociągu jest ściskany wskutek wzrostu ciśnienia i $\Delta A_2 < 0$, więc względną zmianę przekroju dla wielkości różnicowych można zapisać w postaci:

$$\frac{\Delta A_2}{A_{20}} = - \frac{\Delta p}{E_2} \quad (3.44)$$

Stąd:

$$\Delta A_2 = -A_{20} \frac{\Delta p}{E_2} \quad (3.45)$$

Podstawiając zależności (3.38) i (3.45) do (3.37) otrzymuje się zależność na prędkość fali ciśnienia w postaci:

$$c_p = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{\Delta p} \left(\frac{A_{10} \frac{\Delta p D_1}{E_1 e_1} + \frac{A_{20} \frac{\Delta p}{E_2}}{A_{10} - A_{20}} \right)}} \quad (3.46)$$

Wyrażając powierzchnię przekroju A_{10} względem A_1 i powierzchnię A_{20} względem A_2 można zapisać:

$$c_p = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{\Delta p} \left(\frac{(A_1 - \Delta A_1) \frac{\Delta p D_1}{E_1 e_1}}{A + \Delta A_1 - \Delta A_2} + \frac{(A_2 - \Delta A_2) \frac{\Delta p D_2}{E_2}}{A + \Delta A_1 - \Delta A_2} \right)}} \quad (3.47)$$

Po pominięciu składników ΔA_1 i ΔA_2 oraz redukcji Δp otrzymuje się ostateczną postać zależności na prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem:

$$c_p = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{A_1}{A} \frac{K D_1}{E_1 e_1} + \frac{A_2}{A} \frac{K}{E_2}}} \quad (3.48)$$

Z zależności (3.48) wynika, że prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem zależy także od jego średnicy D_2 i modułu Younga E_2 . Prędkość fali ciśnienia jest tym mniejsza im łatwiej odkształca się przewód. Jeśli przewód nie odkształca się ($E_2 \rightarrow \infty$), to wpływ umieszczenia przewodu na prędkość fali ciśnienia zanika.

Określenie prędkości fali ciśnienia na podstawie bilansu energii i pracy

Zależność na prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem, można również wyprowadzić korzystając z bilansu energii i pracy. Bilans energii i pracy dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem podczas zjawiska uderzenia hydraulicznego przyjmuje postać:

$$E_k = E_{sc} + E_{sp1} + E_{sp2} \quad (3.49)$$

gdzie:

E_k – zmiana energii kinetycznej strumienia cieczy [J],

E_{sc} – przyrost energii sprężystej strumienia cieczy [J],

E_{sp1} – przyrost energii sprężystej rurociągu [J],

E_{sp2} – przyrost energii sprężystej przewodu umieszczonego wewnątrz rurociągu [J].

Zmianę energii kinetycznej E_k strumienia cieczy, czyli pracy wywołującej przyrost energii sprężystej cieczy, rurociągu oraz umieszczonego wewnątrz przewodu można zapisać:

$$E_k = \frac{1}{2} A \Delta L v_0^2 \rho \quad (3.50)$$

gdzie:

v_0 – średnia prędkość przepływu wody w ruchu ustalonym w rurociągu [m/s].

Przyrost energii sprężystej cieczy E_{sc} związanej ze ściśliwością wyraża iloczyn średniego przyrostu ciśnienia i redukcji objętości (Streeter V.L., 1959):

$$E_{sc} = \Delta p_{sr} \Delta V = \frac{\Delta p}{2} \Delta V = \frac{\Delta p}{2} \left(V \frac{\Delta p}{K} \right) = \frac{\Delta p}{2} A \Delta L \frac{\Delta p}{K} \quad (3.51)$$

Ostatecznie:

$$E_{sc} = \frac{1}{2} A \Delta L \frac{\Delta p^2}{K} \quad (3.52)$$

Zmiana energii sprężystej rurociągu E_{sp1} jest iloczynem średniej siły działającej na ściankę rurociągu F_{sr} oraz przyrostu obwodu rurociągu Δl :

$$E_{sp1} = F_{sr1} \Delta l \quad (3.53)$$

Siła działająca na jednostkę długości rurociągu T_1 jest równa:

$$T_1 = \Delta p \frac{D_1}{2} \quad (3.54)$$

Jednostkowe naprężenie rurociągu σ_1 wynosi:

$$\sigma_1 = \frac{T_1}{e_1} = \frac{\Delta p D_1}{2 e_1} \quad (3.55)$$

Siła działająca na ściankę rurociągu F_1 jest równa:

$$F_1 = T_1 \Delta L = \frac{\Delta p D_1}{2} \Delta L \quad (3.56)$$

Średnią siłę związaną z przyrostem energii sprężystej (pracą) rurociągu F_{sr1} wyraża zależność:

$$F_{sr1} = \frac{F_1}{2} = \frac{\Delta p D_1}{4} \Delta L \quad (3.57)$$

Przyrost obwodu (rozszerzanie) rurociągu wyznaczono z prawa Hooke'a:

$$E_1 \frac{\Delta l}{l_1} = \sigma_1 \quad (3.58)$$

Stąd:

$$\Delta l_1 = l_1 \frac{\sigma_1}{E_1} = \pi D_1 \frac{\sigma_1}{E_1} = \pi \frac{\Delta p D_1^2}{2 E_1 e_1} \quad (3.59)$$

Przyrost energii sprężystej rurociągu E_{sp1} wyznaczono z zależności (3.51):

$$E_{sp1} = \frac{\Delta p D_1}{4} \Delta L \cdot \pi \frac{\Delta p D_1^2}{2 E_1 e_1} \quad (3.60)$$

Ostatecznie zapisano:

$$E_{sp1} = \frac{1}{2} A_1 \Delta L \frac{D_1 \Delta p^2}{E_1 e_1} \quad (3.61)$$

W celu wyznaczenia przyrostu energii sprężystej umieszczonego wewnątrz rurociągu pełnego przewodu o średnicy zewnętrznej D_2 i sprężystości E_2 , przyjęto, że przewód ma grubość ścianki $e_2 = D_2/2$. Stąd siła działająca na jednostkę długości pełnego przewodu T_2 jest równa:

$$T_2 = \Delta p \frac{D_2}{2} \quad (3.62)$$

Siłę działającą na pełny przewód F_2 wyraża zależność:

$$F_2 = T_2 \Delta L = \frac{\Delta p D_2}{2} \Delta L \quad (3.63)$$

Średnia siła działająca na pełny przewód F_{sr} jest równa:

$$F_{sr2} = \frac{F_2}{2} = \frac{\Delta p D_2}{4} \Delta L \quad (3.64)$$

Przy wyznaczeniu energii sprężystej, która równa jest pracy zmniejszania obwodu przewodu, rozważono średni przyrost obwodu pełnego przewodu (ściśnięcie), który wyraża zależność (3.41). Stąd przyrost energii sprężystej pełnego przewodu wynosi:

$$E_{sp2} = F_{sr2} \Delta l_{2sr} = \frac{\Delta p D_2}{4} \Delta L \cdot \frac{\pi D_2 \Delta p}{2 E_2} \quad (3.65)$$

Ostatecznie zapisano:

$$E_{sp2} = \frac{1}{2} A_2 \Delta L \frac{\Delta p^2}{E_2} \quad (3.66)$$

Po podstawieniu zależności (3.66) do bilansu energii i pracy (3.49) otrzymano:

$$\frac{1}{2} A \Delta L v_0^2 \rho = \frac{1}{2} A \Delta L \frac{\Delta p^2}{K} + \frac{1}{2} A_1 \Delta L \frac{D_1 \Delta p^2}{E_1 e_1} + \frac{1}{2} A_2 \Delta L \frac{\Delta p^2}{E_2} \quad (3.67)$$

Po redukcji składników występujących po obu stronach równania (3.67) i wyrażeniu Δp za pomocą wzoru Żukowskiego (3.5) otrzymano:

$$\Delta p^2 = \frac{\rho^2 v_0^2 \frac{K}{\rho}}{1 + \frac{A_1 K D_1}{A E_1 e_1} + \frac{A_2 K}{A E_2}} = \rho^2 v_0^2 c_p^2 \quad (3.68)$$

Przekształcając powyższą zależność względem c_p otrzymuje się zależność na prędkość rozprzestrzeniania się fali ciśnienia w rurociągu o średnicy wewnętrznej D_1 , grubości ścianki

e_1 i sprężystości E_1 z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem o średnicy zewnętrznej D_2 i sprężystości E_2 , która jest zgodna z zależnością (3.48).

3.2.2. Analiza przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem.

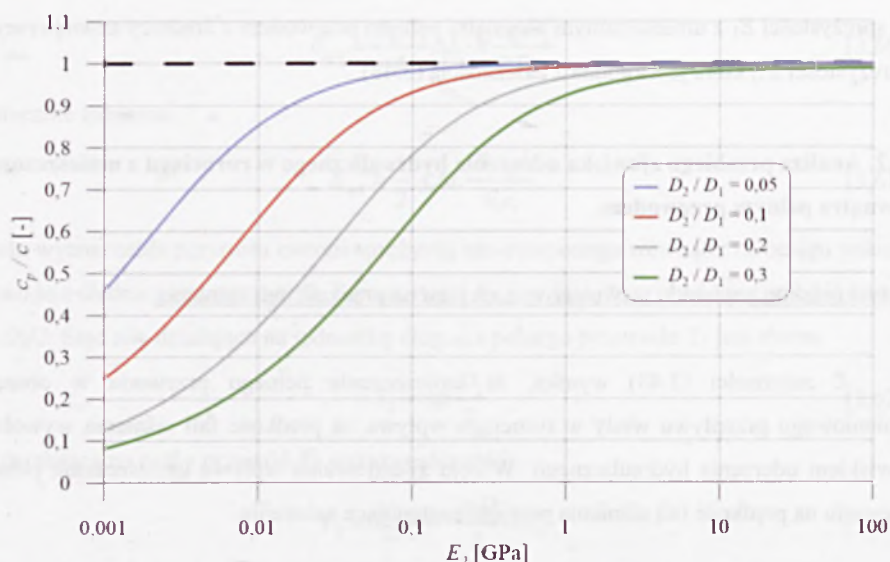
Wpływ pełnego przewodu wewnątrz w rurociągu na prędkość fali ciśnienia

Z zależności (3.48) wynika, że umieszczenie pełnego przewodu w obszarze ciśnieniowego przepływu wody w rurociągu wpływa na prędkość fali ciśnienia wywołanej zjawiskiem uderzenia hydraulicznego. W celu zilustrowania wpływu umieszczenia pełnego przewodu na prędkość fali ciśnienia przyjęto następujące założenia:

W stalowym rurociągu o średnicy wewnętrznej $D_1 = 0,1$ m, grubości ścianki $e_1 = 0,003$ m oraz module Younga $E_1 = 200$ GPa umieszczono pełny przewód o średnicy D_2 . Moduł sprężystości wody jest równy $K = 2$ GPa.

Prędkość fali ciśnienia w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu obliczona z zależności (3.23) wynosi $c = 1225$ m/s. Wprowadzenie do rurociągu pełnego przewodu zmniejszy jego przekrój poprzeczny i spowoduje przyśpieszenie przepływu wody. Na rys 2.2 pokazano jak wprowadzenie przewodu o średnicy D_2 , przy zachowaniu stałości przepływu wody, wpłynie na zmiany powierzchni przekroju strumienia w przewodzie i wzrost prędkości przepływu wody.

Najpierw przeanalizowano jak sprężystość mocowanego wewnątrz rurociągu pełnego przewodu i jego średnica wpływa na prędkość fali ciśnienia. Ze wzoru (3.48) obliczono wartości prędkości fali ciśnienia c_p dla czterech różnych średnic przewodu, tj. $D_2/D_1 = 0,05$, $D_2/D_1 = 0,1$, $D_2/D_1 = 0,2$ i $D_2/D_1 = 0,3$. Większych średnic D_2 nie rozważano, gdyż ich zastosowanie w praktyce ze względu na 10% wzrost prędkości wody w rurociągu może być istotnym ograniczeniem. Obliczone prędkości fali ciśnienia w rurociągu z pełnym przewodem c_p odniesiono do prędkości fali w rurociągu bez przewodu c i pokazano na rys. 3.9 w funkcji modułu sprężystości pełnego przewodu E_2 .

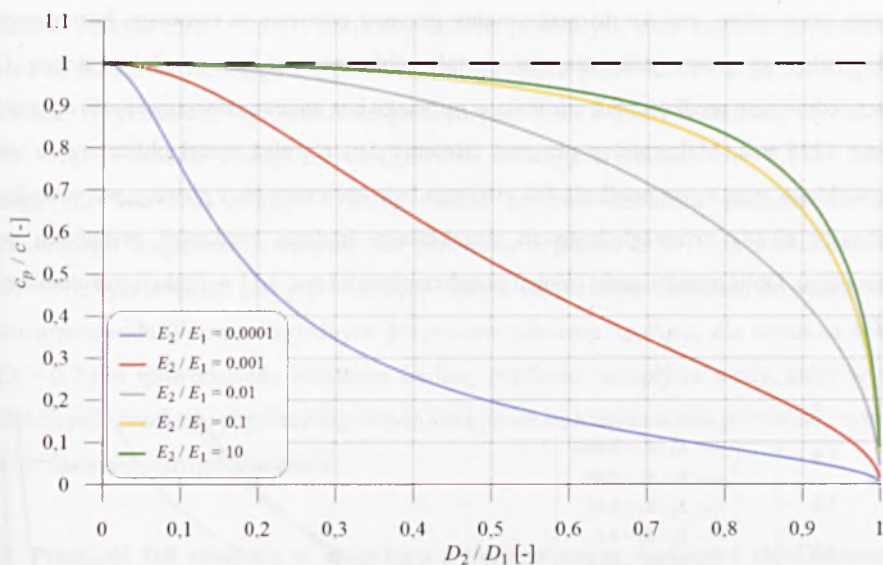


Rys. 3.9. Zmiany prędkości fali ciśnienia w rurociągu po umieszczeniu przewodu o zmiennej sprężystości i średnicy.

Fig. 3.9. Changes of the pressure wave velocity in the pipeline after insertion of the cable of varying elasticity and diameter.

Przerywaną linią na rys. 3.9 zaznaczono iloraz $c_p/c = 1$, czyli przypadek, w którym prędkość fali ciśnienia w rurociągu jest taka sama jak bez umieszczonego wewnątrz przewodu. Wpływ modułu sprężystości pełnego przewodu na zmniejszenie fali ciśnienia w rurociągu występuje, gdy jest on mniejszy niż 10 GPa. Gdy moduł sprężystości pełnego przewodu jest większy niż 10 GPa, zmniejszenie prędkości fali ciśnienia w stosunku do prędkości bez przewodu szybko zanika i sięga ok. 2% przy $D_2/D_1 = 0,3$. Dopiero przy module sprężystości $E_2 = 1$ GPa zmniejszenie prędkości sięga 8% przy stosunku średnic przewodu i rurociągu $D_2/D_1 = 0,3$. Zmniejszenie prędkości fali jest równe ok. 1% przy zmniejszeniu stosunku średnic przewodu i rurociągu do wartości $D_2/D_1 = 0,05$. Dalsze zmniejszanie modułu sprężystości do wartości $E_2 = 0,1$ GPa powoduje nawet 38% zmniejszenie prędkości fali ciśnienia przy $D_2/D_1 = 0,3$. W praktyce moduł sprężystości $E_2 = 0,1$ GPa mogą mieć pełne przewody wykonane z polietylenu (LDPE).

W celu zilustrowania jak moduł sprężystości przewodu i jego średnica wpływają na przebieg uderzenia hydraulicznego, obliczono prędkości fali ciśnienia dla różnych stosunków modułów sprężystości E_2/E_1 w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 (rys. 3.10).



Rys. 3.10. Zmiany prędkości fali ciśnienia w rurociągu po umieszczeniu przewodu o zmiennej średnicy i sprężystości.

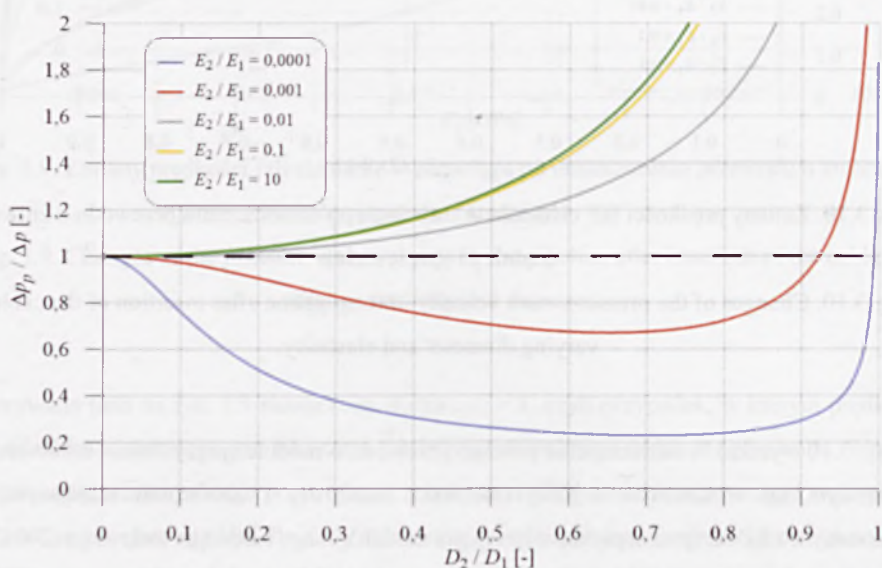
Fig. 3.10. Changes of the pressure wave velocity in the pipeline after insertion of the cable of varying diameter and elasticity.

Z rys. 3.10 wynika, że umieszczenie pełnego przewodu o module sprężystości 10 000-krotnie mniejszym, np. wykonanym z gumy (niebieska linia), czy 1 000-krotnie mniejszym, np. wykonanym z LDPE (pomarańczowa linia), niż moduł Younga rurociągu stalowego (200 GPa) powoduje obniżenie prędkości fali ciśnienia w stosunku do rurociągu bez umieszczonego przewodu (linia przerywana) niezależnie od średnicy przewodu. W przypadku, gdy $E_2/E_1 = 0,01$, wpływ umieszczenia przewodu na prędkość fali ciśnienia jest zauważalny dla stosunku średnic przewodu i rurociągu $D_2/D_1 \geq 0,2$. Przy stosunku $D_2/D_1 = 0,3$, prędkość fali ciśnienia zmniejsza się o ok. 4%. Podobny wpływ przy $E_2/E_1 = 0,1$ występuje przy stosunku średnicy przewodu i rurociągu $D_2/D_1 = 0,5$.

Wpływ pełnego przewodu wewnątrz w rurociągu na maksymalne przyrosty ciśnienia

W celu przeanalizowania, jak umieszczenie pełnego przewodu wpływa na maksymalny przyrost ciśnienia podczas prostego uderzenia hydraulicznego, obliczono stosunki $\Delta p_p/\Delta p$,

gdzie Δp_p oznacza maksymalny przyrost ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem, zaś Δp , to maksymalny przyrost ciśnienia w rurociągu bez przewodu. Maksymalne przyrosty ciśnienia Δp zostały obliczone ze wzoru Żukowskiego (3.5) z uwzględnieniem prędkości fali ciśnienia w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu równej 1225 m/s. Maksymalny przyrost ciśnienia Δp_p również został obliczony ze wzoru Żukowskiego, przy czym prędkość fali ciśnienia była obliczana przy pomocy wyprowadzonej zależności (3.48) z uwzględnieniem zwiększenia średniej prędkości przepływu wody w rurociągu. Obliczone stosunki ciśnień przedstawiono na rys. 3.11 w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 .



Rys. 3.11. Zmiany stosunków maksymalnego ciśnienia $\Delta p_p/\Delta p$ dla różnych średnic i sprężystości przewodu.

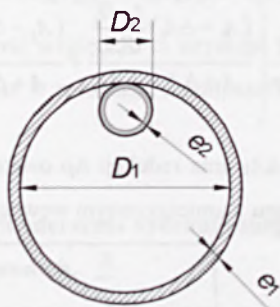
Fig. 3.11. Changes of maximum pressure increase ratios $\Delta p_p/\Delta p$ for different diameters and elasticity of the cable.

Umieszczenie w obszarze ciśnieniowego przepływu wody pełnego przewodu w przypadku, gdy $E_2/E_1 > 0.01$, co oznacza ponad stukrotne zmniejszenie modułu sprężystości przewodu w stosunku do modułu sprężystości rurociągu, zwiększa przyrosty ciśnienia wywołane nagłą zmianą prędkości przepływającej wody bez względu na średnicę przewodu (rys. 3.11). Wprowadzenie przewodu o dużo niższej sprężystości, w porównaniu ze sprężystością

rurociągu, zmniejsza przyrost ciśnienia wywołanego uderzeniem hydraulicznym. Dla stosunku modułów Younga $E_2/E_1 \leq 0,001$, przyrosty ciśnień powstałych przy nagłych zamknięciach zaworu są niższe dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem niż dla rurociągu bez przewodu. Przykładowo, wprowadzenie pełnego przewodu z gumy o średnicy $D_2 = 0,01$ m ($D_2/D_1 = 0,1$) i module Younga $E_2 = 0,02$ GPa do rurociągu o średnicy $D_1 = 0,1$ m i module Younga $E_1 = 200$ GPa, ($E_2/E_1 = 0,0001$) obniża przyrost ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego względem przepływu bez przewodu o ponad 23% (linia niebieska). Przy $D_2/D_1 < 0,7$, tym większy jest jego tłumiący wpływ na przebieg zjawiska, im większa jest średnica przewodu. Wzrost względnych przyrostów ciśnienia $\Delta p_z/\Delta p_{hez}$ dla stosunku średnic $D_2/D_1 \geq 0,7$ jest spowodowany wzrostem średniej prędkości przepływu wody, który wynika z redukcji pola przekroju poprzecznego strumienia po umieszczeniu w nim przewodu i sytuacja taka nie ma praktycznego znaczenia.

3.2.3. Prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz cienkościennym przewodem

Przewód jest cienkościenny, gdy stosunek średnicy wewnętrznej do grubości ścianki jest większy od 10 ($D/e > 10$) (Niełacny M., 2002). Schemat przekroju rurociągu z umieszczonym wewnątrz cienkościennym przewodem pokazano na rys. 3.12.



Rys. 3.12. Przekrój rurociągu z umieszczonym wewnątrz cienkościennym przewodem.

Fig. 3.12. Cross section of the pipeline with inserted thin-walled conduit.

Określenie prędkości fali ciśnienia na podstawie bilansu masy

Umieszczenie cienkościennego przewodu wewnątrz rurociągu nie zmienia charakteru zjawiska uderzenia hydraulicznego w stosunku do rurociągu z umieszczonym pełnym przewodem.

Umieszczony wewnątrz rurociągu przewód podczas wzrostu ciśnienia jest ściskany, dlatego względna zmiana powierzchni przekroju dla wielkości różnicowych jest równa:

$$\frac{\Delta A_2}{A_{20}} = -\frac{\Delta p D_2}{E_2 e_2} \quad (3.69)$$

Podstawiając równania (3.38) i (3.69) do (3.37) oraz oznaczając prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz cienkościennym przewodem symbolem c_e , otrzymano:

$$c_e = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{\Delta p} \left(\frac{A_{10} \frac{\Delta p D_1}{E_1 e_1}}{A_{10} - A_{20}} + \frac{A_{20} \frac{\Delta p D_2}{E_2 e_2}}{A_{10} - A_{20}} \right)}} \quad (3.70)$$

Wyrażając powierzchnię A_{10} względem A_1 i powierzchnię A_{20} względem A_2 można zapisać:

$$c_e = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{\Delta p} \left(\frac{(A_1 - \Delta A_1) \frac{\Delta p D_1}{E_1 e_1}}{A + \Delta A_1 - \Delta A_2} + \frac{(A_2 - \Delta A_2) \frac{\Delta p D_2}{E_2 e_2}}{A + \Delta A_1 - \Delta A_2} \right)}} \quad (3.71)$$

Po pominięciu wyrazów ΔA_1 i ΔA_2 oraz redukcji Δp ostatecznie otrzymuje się zależność na prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem:

$$c_e = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{A_1}{A} \frac{K D_1}{E_1 e_1} + \frac{A_2}{A} \frac{K D_2}{E_2 e_2}}} \quad (3.72)$$

Ze wzoru (3.72) wynika, że prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz cienkościennym przewodem zależy od własności cieczy (K/ρ) średnicy zewnętrznej przewodu, grubości jego ścianki i sprężystości. Prędkość fali ciśnienia jest tym mniejsza im łatwiej odkształca się przewód i im mniejsza jest grubość jego ścianki.

Zależność na prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz cienkościennym przewodem, można również wyprowadzić korzystając z bilansu energii i pracy.

Określenie prędkości fali ciśnienia na podstawie bilansu energii i pracy

Założenie, że umieszczony wewnątrz rurociągu przewód jest przewodem o pustym przekroju nie zmienia zależności wyrażających zmiany energii kinetycznej strumienia cieczy (3.50), przyrostu energii sprężystej strumienia cieczy (3.50) oraz przyrostu energii sprężystej rurociągu (3.61) opisanych w poprzednim rozdziale.

Przyrost energii sprężystej cienkościennego przewodu E_{sp2} o średnicy zewnętrznej D_2 , grubości ścianki e_2 i sprężystości E_2 umieszczonego w rurociągu wyrażono jak dla energii sprężystej rurociągu:

$$E_{sp2} = \frac{1}{2} A_2 \Delta L \frac{D_2 \Delta p^2}{E_2 e_2} \quad (3.73)$$

Bilans energii i pracy (3.47) przyjmuje postać:

$$\frac{1}{2} A \Delta L v_0^2 \rho = \frac{1}{2} A \Delta L \frac{\Delta p^2}{K} + \frac{1}{2} A_1 \Delta L \frac{D_1 \Delta p^2}{E_1 e_1} + \frac{1}{2} A_2 \Delta L \frac{D_2 \Delta p^2}{E_2 e_2} \quad (3.74)$$

Po redukcji składników występujących po obu stronach równania (3.74) i uwzględnieniu wzoru Żukowskiego (3.5) otrzymuje się zależność:

$$\Delta p^2 = \frac{\rho^2 v_0^2 \frac{K}{\rho}}{1 + \frac{A_1}{A} \frac{K D_1}{E_1 e_1} + \frac{A_2}{A} \frac{K D_2}{E_2 e_2}} = \rho^2 v_0^2 c_c^2 \quad (3.75)$$

Przekształcając powyższą zależność względem c_c uzyskuje się zależność (3.72) na prędkość rozprzestrzeniania się fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz cienkościnnym przewodem.

3.2.4. Analiza przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz cienkościnnym przewodem.

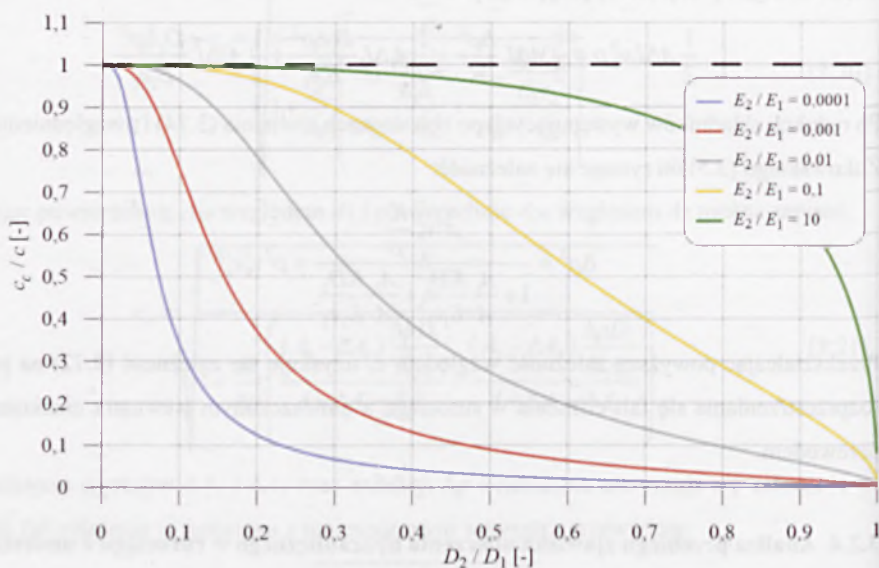
Wpływ cienkościnnego przewodu wewnątrz rurociągu na prędkość fali ciśnienia

Z zależności (3.72) wynika, że umieszczenie cienkościnnego przewodu w rurociągu ma wpływ na prędkość fali ciśnienia wywołanej uderzeniem hydraulicznym. Prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz cienkościnnym przewodem zależy od jego średnicy zewnętrznej, modułu sprężystości oraz grubości ścianki. W celu zilustrowania wpływu

umieszczenia cienkościennego przewodu na prędkość fali ciśnienia przyjęto następujące założenia:

W stalowym rurociągu o średnicy wewnętrznej $D_1 = 0,1$ m, grubości ścianki $e_1 = 0,003$ m oraz module Younga $E_1 = 200$ GPa, umieszczono przewód o zmiennej średnicy i grubości ścianki $e_1 = 0,001$ m.

Z zależności (3.72), obliczono wartości prędkości fali ciśnienia dla różnych stosunków modułów sprężystości E_2/E_1 i odniesiono je do prędkości fali ciśnienia w rurociągu bez przewodu i przedstawiono je na rys. 3.13 w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 .



Rys. 3.13. Zmiany prędkości fali ciśnienia w rurociągu po umieszczeniu cienkościennego przewodu o zmiennej sprężystości i średnicy.

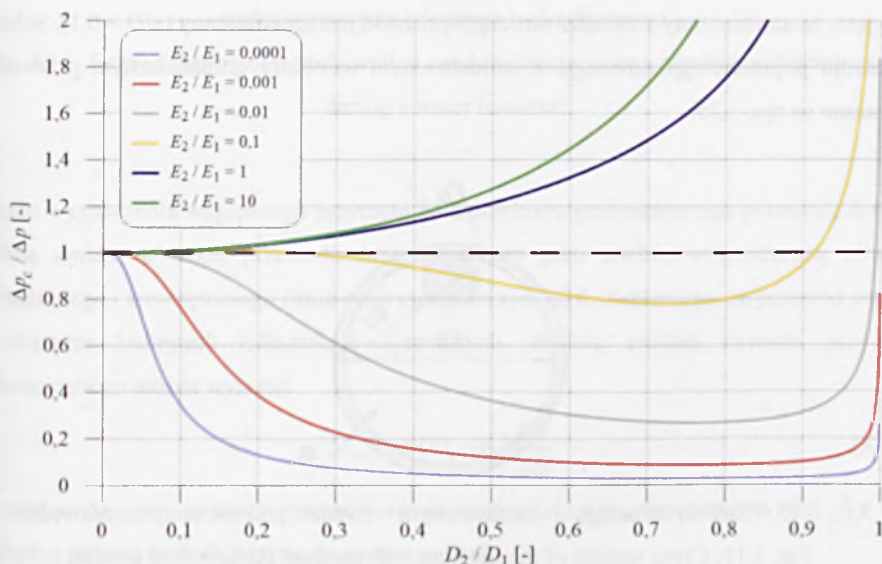
Fig. 3.13. Changes of the pressure wave velocity in the pipeline after insertion of a thin-walled conduit of varying elasticity and diameter.

Wpływ cienkościennego przewodu w rurociągu na redukcję prędkości fali ciśnienia jest tym większy im większa jest jego średnica zewnętrzna w stosunku do średnicy rurociągu oraz mniejszy moduł sprężystości w stosunku do modułu sprężystości rurociągu (rys. 3.13).

Najmniejsze wartości prędkości fali ciśnienia występują po umieszczeniu przewodu o sprężystości $E_2 = 0,02$ GPa, tzn. 10 000 razy mniejszej niż sprężystość stalowego rurociągu. Gdy przewód wykonany jest z materiału o module Younga zbliżonym do modułu sprężystości stalowego rurociągu (200 GPa i więcej), wpływ umieszczenia pustego przewodu na prędkość fali ciśnienia jest zauważalny, gdy średnica zewnętrzna cienkościennego przewodu stanowi co najmniej 40% średnicy wewnętrznej rurociągu.

Wpływ cienkościennego przewodu wewnątrz rurociągu na maksymalne przyrosty ciśnienia

W celu przeanalizowania jak umieszczenie cienkościennego przewodu wpływa na maksymalne przyrosty ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego, dla różnych stosunków E_2/E_1 obliczono stosunki $\Delta p_c/\Delta p$, gdzie Δp_c oznacza maksymalny przyrost ciśnienia w rurociągu z przewodem cienkościnnym, zaś Δp oznacza maksymalny przyrost ciśnienia w rurociągu bez przewodu. Do obliczenia prędkości fali ciśnienia c_c korzystano ze wzoru (3.72). Obliczone stosunki ciśnień przedstawiono w funkcji D_2/D_1 na rys. 3.14.



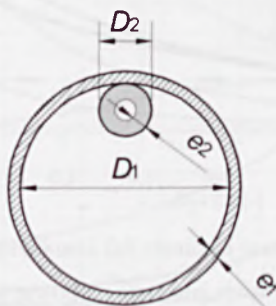
Rys. 3.14. Zmiany stosunków ciśnienia $\Delta p_c/\Delta p$ dla różnych sprężystości i średnic przewodu.

Fig. 3.14. Changes of maximum pressure increase ratios $\Delta p_c/\Delta p$ for different elasticity and diameter of the conduit.

Umieszczenie cienkościennego przewodu o grubości ścianki $e_2 = 0,001$ m wewnątrz rurociągu może mieć znaczący wpływ na redukcję maksymalnego przyrostu ciśnienia występującego podczas zjawiska uderzenia hydraulicznego (rys. 3.14). Przykładowo, maksymalny przyrost ciśnienia w rurociągu po umieszczeniu cienkościennego przewodu o średnicy $D_2 = 0,01$ m ($D_2/D_1 = 0,1$) oraz module Younga $E_2 = 0,02$ GPa jest o 32% mniejszy niż w przypadku przepływu bez przewodu (linia jasnoniebieska). Umieszczenie cienkościennego przewodu o tych samych wymiarach, lecz o module sprężystości 10 razy większym (linia pomarańczowa) powoduje ponad 22% zmniejszenie maksymalnego przyrostu ciśnienia. Z rys. 3.14 wynika, że umieszczanie przewodów cienkościennej o sprężystości $E_2 > 0,1E_1$ zwiększa maksymalne przyrosty ciśnienia (linia żółta, ciemnoniebieska i zielona).

3.2.5. Prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem

W praktyce często stosowane są przewody i rurociągi, których stosunek grubości ścianki do średnicy wewnętrznej $e/D < 0,1$. Z tego powodu, w rozważaniach teoretycznych przyjęto, że umieszczony wewnątrz rurociągu przewód jest grubościenny ($e/D > 0,1$). Schemat przekroju poprzecznego rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem pokazano na rys. 3.15.

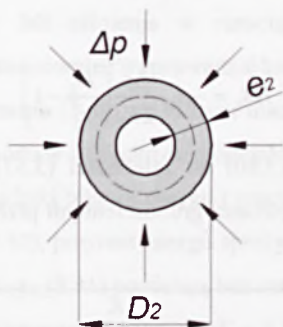


Rys. 3.15. Przekrój rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem.

Fig. 3.15. Cross section of the pipeline with inserted thick-walled conduit.

Określenie prędkości fali ciśnienia na podstawie bilansu masy

Do wyznaczenia prędkości fali w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem c_g skorzystano z bilansu masy, podobnie jak w przypadku rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym i cienkościennym przewodem (3.28). Grubościenność przewodu uwzględniono przy wyrażeniu zmiany obwodu przewodu (rys. 3.16).



Rys. 3.16. Przekrój grubościennego przewodu umieszczonego w rurociągu ściskanego podczas zjawiska uderzenia hydraulicznego.

Fig. 3.16. A cross section of a thick-walled conduit inserted into a pipeline and compressed during a water hammer.

W celu wyznaczenia względnego przyrostu pola przekroju grubościennego przewodu $\Delta A_2/A_2$, średnią zmianę obwodu przewodu Δl_{2sr} , wyrażono jako średnią arytmetyczną obwodu zewnętrznego i wewnętrznego (linia przerywana na rys. 3.16). Zakładając, że przewód pracuje w obszarze liniowych odkształceń sprężystych, średnią zmianę obwodu przewodu grubościennego można wyrazić:

$$\Delta l_{2sr} = \pi(D_2 - e_2) \frac{\Delta \sigma}{2E} \quad (3.76)$$

Wyrażając $\Delta \sigma$ przy pomocy równania równowagi sił (3.17), oraz podstawiając $l_2 = \pi D_2$, względną zmianę obwodu przewodu można zapisać:

$$\frac{\Delta l_{2sr}}{l_2} = \frac{\Delta p}{2E_2} \left(\frac{D_2}{e_2} - 1 \right) \quad (3.77)$$

Stąd wyznaczono:

$$\Delta l_{2sr} = \pi D_2 \frac{\Delta p}{2E_2} \left(\frac{D_2}{e_2} - 1 \right) \quad (3.78)$$

Ponieważ grubościenny przewód jest ściśkany ($\Delta A_2 < 0$), więc względna zmiana przekroju przewodu jest równa:

$$\frac{\Delta A_2}{A_{20}} = -\frac{\Delta p}{2E_2} \left(\frac{D_2}{e_2} - 1 \right) \quad (3.79)$$

i

$$\Delta A_2 = -A_{20} \frac{\Delta p}{2E_2} \left(\frac{D_2}{e_2} - 1 \right) \quad (3.80)$$

Wstawiając równania (3.38) i (3.80) do zależności (3.37) oraz oznaczając prędkość fali w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem symbolem c_g , otrzymuje się zależność:

$$c_g = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{\Delta p} \left(\frac{A_{10}}{A_{10} - A_{20}} \frac{\Delta p D_1}{E_1 e_1} + \frac{A_{20}}{A_{10} - A_{20}} \frac{\Delta p}{E_2} \left(\frac{D_2}{e_2} - 1 \right) \right)}} \quad (3.81)$$

Wyrażając powierzchnię A_{10} względem A_1 i powierzchnię A_{20} względem A_2 można zapisać:

$$c_g = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{\Delta p} \left(\frac{(A_1 - \Delta A_1)}{A + \Delta A_1 - \Delta A_2} \frac{\Delta p D_1}{E_1 e_1} + \frac{(A_2 - \Delta A_2)}{A + \Delta A_1 - \Delta A_2} \frac{\Delta p}{E_2} \left(\frac{D_2}{e_2} - 1 \right) \right)}} \quad (3.82)$$

Po pominięciu składników niższego rzędu oraz redukcji Δp , otrzymuje się zależność wyrażającą prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem:

$$c_g = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{A_1}{A} \frac{K D_1}{E_1 e_1} + \frac{A_2}{A} \frac{K}{E_2} \left(\frac{D_2}{e_2} - 1 \right)}} \quad (3.83)$$

Z zależności (3.83) wynika, że prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem zależy od właściwości cieczy, średnicy przewodu, sprężystości oraz grubości ścianki. Podstawiając $e_2 = D_2/2$, zależność (3.83) przyjmuje postać zależności (3.48) na prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem.

Określenie prędkości fali ciśnienia na podstawie bilansu energii i pracy

Zależność na prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem, można również wyprowadzić korzystając z bilansu energii i pracy. W tym celu korzysta się z równania (3.49), w którym inaczej definiuje się przyrost energii sprężystej grubościennego przewodu w stosunku do rozdziałów dotyczących przewodu pełnego i cienkościennego. Pozostałe składniki bilansu energii i pracy, czyli wyrażające zmianę energii kinetycznej strumienia cieczy (3.50), przyrost energii sprężystej strumienia cieczy (3.52) oraz przyrost energii sprężystej rurociągu (3.61) pozostają bez zmian.

Przyrost energii sprężystej grubościennego przewodu E_{sp2} o średnicy zewnętrznej D_2 , grubości ścianki e_2 i sprężystości E_2 umieszczonego w rurociągu wyraża ogólna zależność (3.65).

Uwzględniając średnią zmianę obwodu przewodu Δl_{sr} (3.78) otrzymuje się zależność:

$$E_{sp2} = \frac{1}{2} A_2 \Delta L \frac{\Delta p^2}{E_2} \left(\frac{D_2}{e_2} - 1 \right) \quad (3.84)$$

Bilans energii i pracy przyjmuje wówczas postać:

$$\frac{1}{2} A \Delta L v_0^2 \rho = \frac{1}{2} A \Delta L \frac{\Delta p^2}{K} + \frac{1}{2} A_1 \Delta L \frac{D_1 \Delta p^2}{E_1 e_1} + \frac{1}{2} A_2 \Delta L \frac{\Delta p^2}{E_2} \left(\frac{D_2}{e_2} - 1 \right) \quad (3.85)$$

Po redukcji wyrazów występujących po obu stronach równania (3.85), oraz wyrażeniu Δp wzorem Żukowskiego (3.5) otrzymuje się:

$$\Delta p^2 = \frac{\rho^2 v_0^2 \frac{K}{\rho}}{1 + \frac{A_1}{A} \frac{K D_1}{E_1 e_1} + \frac{A_2}{A} \frac{K}{E_2} \left(\frac{D_2}{e_2} - 1 \right)} = \rho^2 v_0^2 c_g^2 \quad (3.86)$$

Przekształcając zależność (3.86) względem c_g oraz redukcji, otrzymuje się zależność (3.83) na prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem.

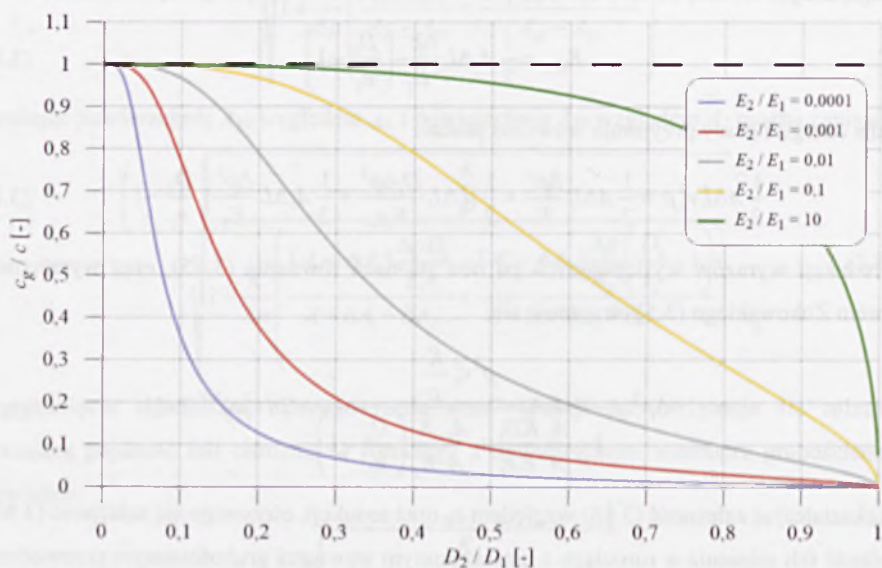
3.2.6. Analiza przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem.

Wpływ grubościennego przewodu wewnątrz rurociągu na prędkość fali ciśnienia

Z zależności (3.83) wynika, że prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem zależy od średnicy, sprężystości i grubości ścianki przewodu. W celu zilustrowania wpływu grubościennego przewodu na prędkość fali, przyjęto następujące założenia:

Stalowy rurociąg ma średnicę wewnętrzną $D_1 = 0,1$ m, grubość ścianki $e_1 = 0,003$ m oraz moduł Younga $E_1 = 200$ GPa. Obliczenia wykonano przy założeniu, że umieszczony wewnątrz rurociągu przewód ma grubość ścianki $e_2 = 0,001$ m.

Z zależności (3.83) obliczono wartości prędkości fali ciśnienia i odniesiono je do prędkości fali ciśnienia w rurociągu bez przewodu w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 dla różnych stosunków modułów sprężystości E_2/E_1 (rys. 3.17).

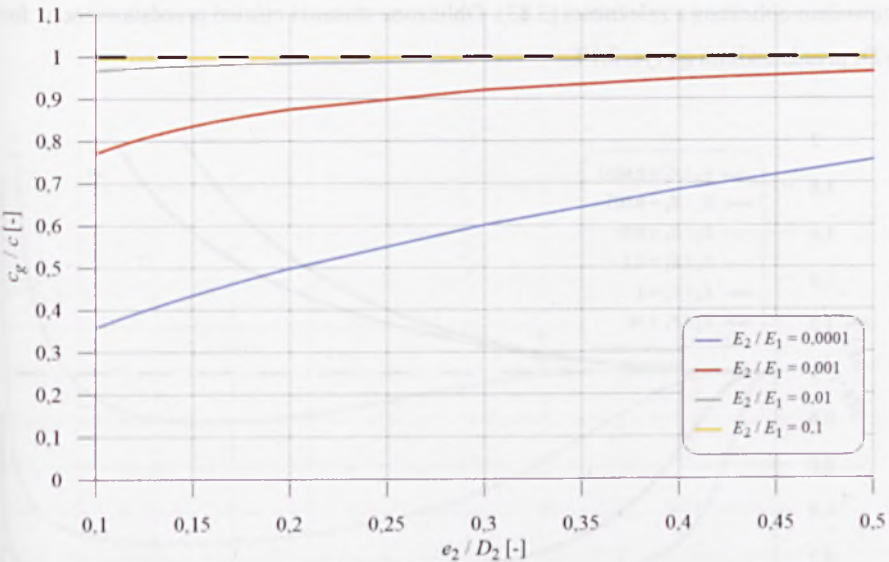


Rys. 3.17. Zmiany prędkości fali ciśnienia w rurociągu po umieszczeniu grubościennego przewodu o zmiennej sprężystości i średnicy.

Fig. 3.17. Changes of the pressure wave velocity in the pipeline with insertion of a thick-walled conduit of varying elasticity and diameter.

Z rys. 3.17 wynika, że umieszczenie grubościennego przewodu o grubości ścianki $e_2 = 0,001$ m wewnątrz rurociągu może mieć znaczący wpływ na zmniejszenie prędkości fali ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego. Im mniejsza sprężystość przewodu i im większa jest jego średnica w stosunku do średnicy rurociągu, tym większa jest jego zdolność do zmniejszenia prędkości fali ciśnienia. Dla założonych parametrów, przewody grubościennie o sprężystości $E_2 \geq 0,1 E_1$ oraz o średnicy $D_2 < 0,2 D_1$, praktycznie nie wpływają na prędkość fali ciśnienia.

W dotychczasowych rozważaniach zakładano stałą grubość ścianki grubościennego przewodu e_2 . W celu przeanalizowania jak grubość ścianki grubościennego przewodu wpływa na przebieg zjawiska uderzenia hydraulicznego, wyznaczono wartości prędkości fali ciśnienia dla różnych stosunków modułów sprężystości E_2/E_1 . W obliczeniach założono, że średnica zewnętrzna grubościennego przewodu stanowi $0,1 D_1$, czyli $0,01$ m. Obliczone w ten sposób wartości prędkości fali ciśnienia odniesiono do prędkości fali ciśnienia w rurociągu bez przewodu wyznaczając stosunki c_g/c . Wyniki obliczeń w funkcji stosunku grubości ścianki grubościennego przewodu i jego średnicy e_2/D_2 przedstawiono dla różnych stosunków modułów sprężystości E_2/E_1 na rys. 3.18.



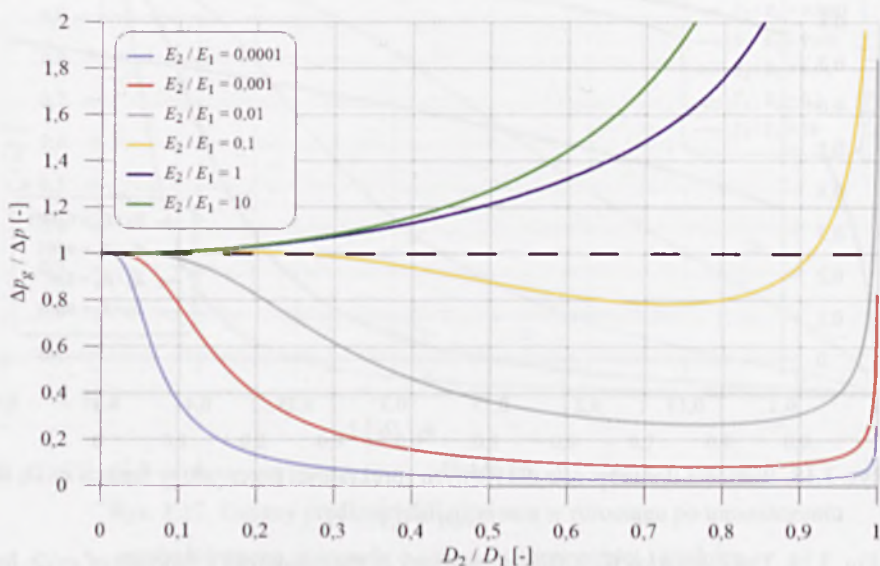
Rys. 3.18. Wartości ilorazów c_g/c dla różnych sprężystości przewodu w funkcji e_2/D_2 dla $D_2/D_1 = 0,1$.

Fig. 3.18. The c_g/c ratios for different elasticity of the conduit as a function of e_2/D_2 for $D_2/D_1 = 0,1$.

Z rys. 3.18 wynika, że im mniejsza jest grubość ścianki grubościennego przewodu, tym większy jest jego wpływ na zmniejszenie prędkości fali ciśnienia. W przypadku, gdy moduł sprężystości grubościennego przewodu $E_2 \geq 0,01 E_1$ (szara i żółta linia), jego grubość ścianki praktycznie nie ma wpływu na prędkość fali ciśnienia, gdyż jego zdolności tłumiące są zachowane dla grubości ścianek, które stanowią mniej niż ok 3% średnicy wewnętrznej rurociągu. Grubościenny przewód o module Younga $E_2 \leq 0,001 E_1$ wykazuje właściwości tłumiące dla wszystkich analizowanych grubości ścianki (zmniejsza prędkość fali ciśnienia).

Wpływ grubościennego przewodu wewnątrz rurociągu na maksymalne przyrosty ciśnienia

W celu wyjaśnienia jak umieszczenie przewodu grubościennego wpływa na maksymalne przyrosty ciśnienia występujące podczas dodatniego uderzenia hydraulicznego względem rurociągu bez przewodu, obliczono stosunki $\Delta p_g / \Delta p$, gdzie Δp_g oznacza maksymalny przyrost ciśnienia w rurociągu z przewodem grubościennym, zaś Δp oznacza maksymalny przyrost ciśnienia w rurociągu bez przewodu. Do obliczenia maksymalnego przyrostu ciśnienia wykorzystano prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem obliczoną z zależności (3.83). Obliczone stosunki ciśnień przedstawiono w funkcji D_2/D_1 przedstawiono na rys. 3.19.



Rys. 3.19. Zmiany ilorazów $\Delta p_g / \Delta p$ dla różnych sprężystości i średnic przewodu.

Fig. 3.19. Changes in $\Delta p_g / \Delta p$ ratios for different elasticity and diameters of the conduit.

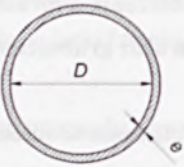
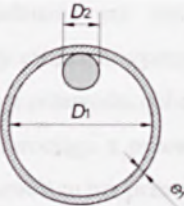
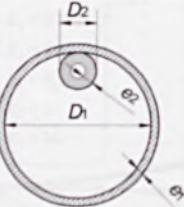
Z rys. 3.19 wynika, że umieszczanie przewodów o sprężystości stanowiących $E_2 > 0,1 E_1$ zwiększa maksymalne przyrosty ciśnienia (linia ciemnoniebieska i zielona). Umieszczenie grubościennego przewodu o niskiej sprężystości, tzn. $E_2/E_1 < 0,01$, może znacząco wpływać na przyrosty ciśnienia, występujące podczas zjawiska uderzenia hydraulicznego.

3.2.7. Analiza porównawcza przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym, cienkościnnym oraz grubościennym przewodem.

Wyprowadzone zależności na prędkości fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym, cienkościnnym oraz grubościennym zestawiono w tab. 3.1.

Tab. 3.1. Zestawienie wyprowadzonych zależności na prędkość fali ciśnienia w rurociągu.

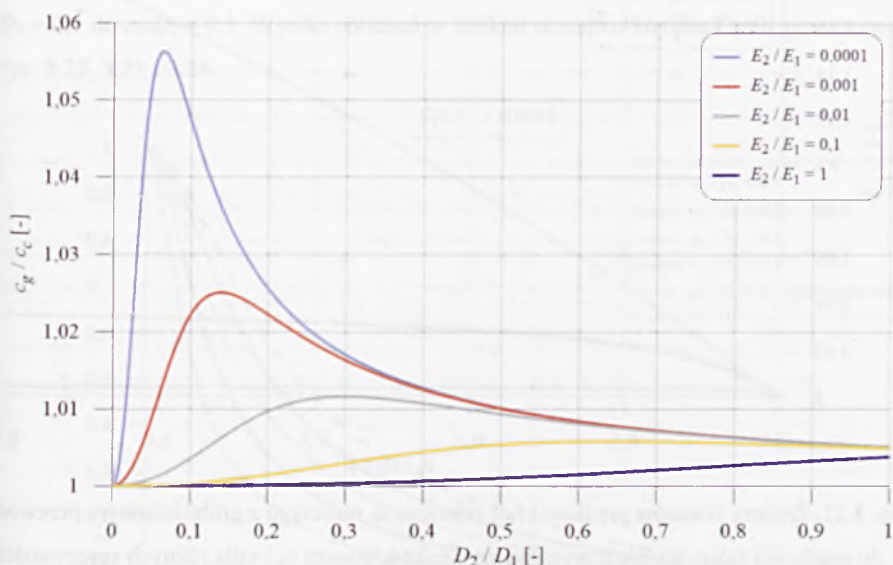
Table 3.1. Summary of derived formulas of the pressure wave velocity in the pipeline.

Rodzaj rurociągu	Schemat przekroju	Prędkość fali ciśnienia w rurociągu	Nr zależności
Rurociąg bez przewodu		$c = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{KD}{Ee}}}$	(3.23)
Rurociąg z umieszczonym pełnym przewodem		$c_p = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{A_1 KD_1}{A E_1 e_1} + \frac{A_2 K}{A E_2}}}$	(3.48)
Rurociąg z umieszczonym cienkościennym przewodem ($e_2/D_2 < 0,1$)		$c_c = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{A_1 KD_1}{A E_1 e_1} + \frac{A_2 KD_2}{A E_2 e_2}}}$	(3.72)
Rurociąg z umieszczonym grubościennym przewodem ($e_2/D_2 > 0,1$)		$c_g = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{A_1 KD_1}{A E_1 e_1} + \frac{A_2 K}{A E_2} \left(\frac{D_2}{e_2} - 1 \right)}}$	(3.83)

Z analiz przeprowadzonych w rozdziałach 3.2.2, 3.2.4 i 3.2.6 wynika, że umieszczenie przewodu o mniejszej sprężystości, w stosunku do sprężystości rurociągu, może mieć tłumiące oddziaływanie na zjawisko uderzenia hydraulicznego, tzn. zmniejsza prędkość fali ciśnienia i maksymalne przyrosty ciśnienia. Odnosi się to zarówno do pełnych przewodów o kołowym przekroju, jak i cienkościennych oraz grubościennych przewodów, których przekrój poprzeczny stanowi pierścień. Zdolności tłumiące wszystkich typów przewodów są tym większe im większa jest ich średnica i im mniejszy jest ich moduł Younga. W przypadku

przewodów cienkościennych i grubościennych znaczenie ma również grubość ich ścianki – im ona jest mniejsza tym bardziej tłumione będą oscylacje ciśnienia wywołane uderzeniem hydraulicznym.

W celu zilustrowania różnicy pomiędzy wartościami prędkości fali ciśnienia obliczonymi z zależności dla przewodu cienkościennego (3.72) i przewodu grubościennego (3.83), dla różnych sprężystości E_2/E_1 obliczono stosunki c_g/c_c . Przyjęto grubość ścianki przewodu $e_2 = 0,1$ $D_2 = 0,01$ m. Wyniki obliczeń w funkcji D_2/D_1 przedstawiono na rys. 3.20.



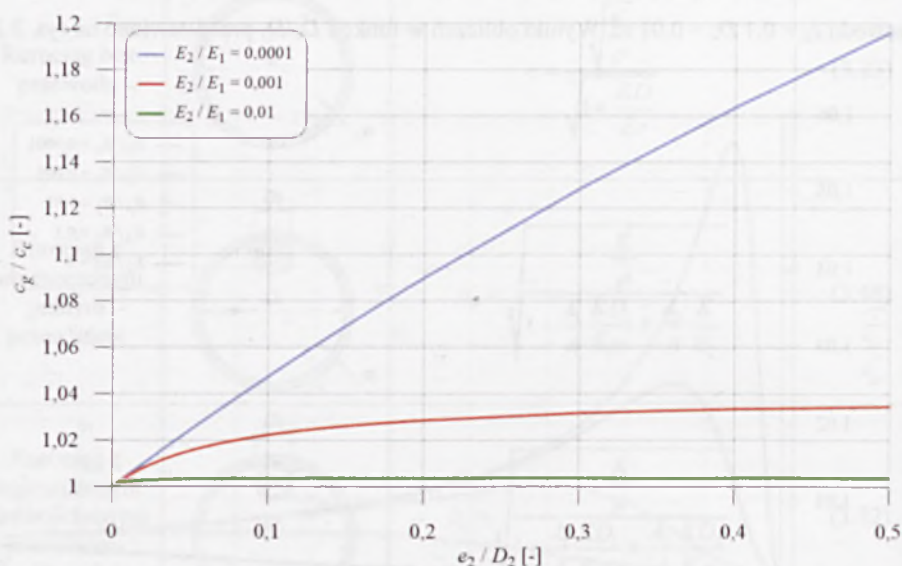
Rys. 3.20. Zmiany ilorazów prędkości fali ciśnienia w rurociągu z przewodem grubościennym do prędkości fali ciśnienia w rurociągu z przewodem cienkościennym c_g/c_c dla różnych sprężystości przewodu w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 .

Fig. 3.20. Changes in the ratios of the pressure wave velocity in a pipeline with inserted thick-walled conduit to the pressure wave velocity in a pipeline with inserted thin-walled conduit c_g/c_c for different elasticity as a function of the D_2/D_1 diameter ratio.

Z rys. 3.20 wynika, że prędkości fali ciśnienia c_g wyznaczone z zależności (3.83) są wyższe niż prędkości fali ciśnienia c_c wyznaczone ze wzoru (3.72). Różnice te zależą od stosunku średnic D_2/D_1 i są tym większe im mniejsza jest sprężystość przewodu w stosunku do sprężystości rurociągu. W przypadku, gdy $E_2/E_1 > 0,01$ stosunek c_g/c_c nie przekracza 1,01. Najwyższą różnicę wynoszącą ok. 5,6% uzyskano dla $E_2/E_1 = 0,0001$ i dla średnicy $D_2 = 0,07 D_1$. Należy

zauważyć, że dla założonych wcześniej wymiarów przewodu oraz rurociągu, przewód o średnicy $D_2 = 0,07 D_1$ powinien być traktowany jako grubościenny ($e_2/D_2 > 0,1$).

W celu przeanalizowania, jaki wpływ ma grubość ścianki przewodu na różnicę obliczonych wartości prędkości fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem grubościennym (3.83) i cienkościennym (3.72), dla różnych stosunków modułów E_2/E_1 obliczono stosunki prędkości c_g/c_e i przedstawiono w funkcji e_2/D_2 (rys. 3.21).

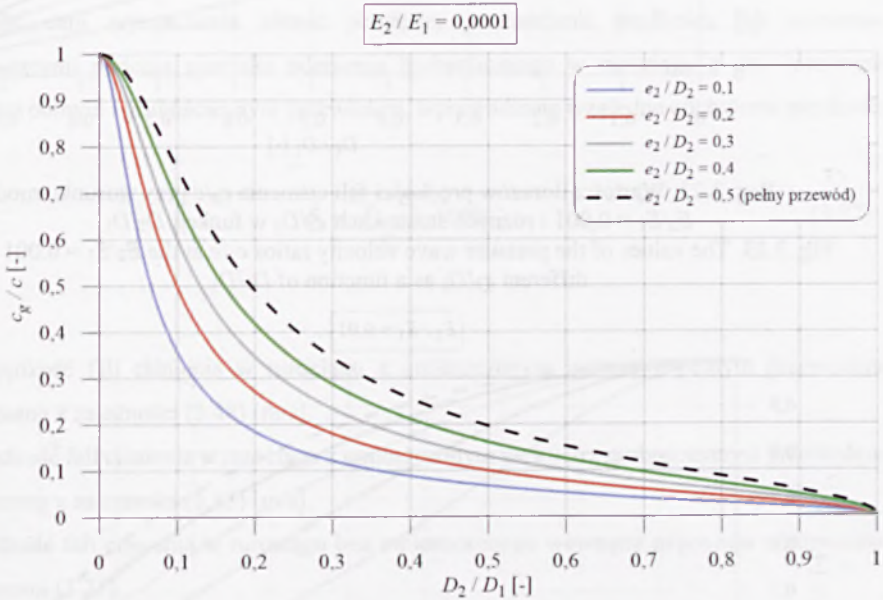


Rys. 3.21. Zmiany ilorazów prędkości fali ciśnienia w rurociągu z grubościennym przewodem do prędkości fali ciśnienia z przewodem cienkościennym c_g/c_e dla różnych sprężystości przewodu w funkcji e_2/D_2

Fig. 3.21. Changes in the ratios of the pressure wave velocity in a pipeline with inserted thick-walled conduit to the pressure wave velocity in a pipeline with inserted thin-walled conduit c_g/c_e for different elasticity as a function of e_2/D_2 .

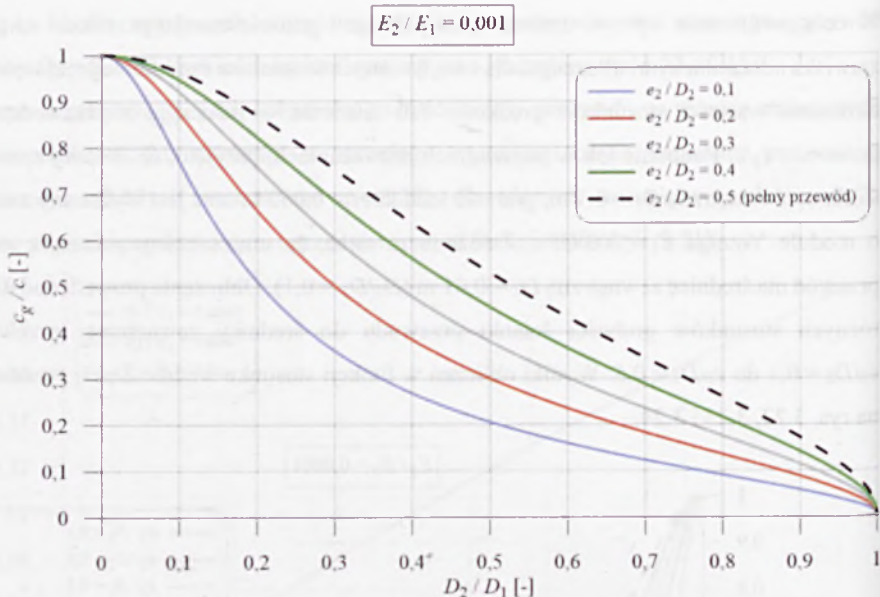
Z rys. 3.21 wynika, że różnice pomiędzy wartościami prędkości fali ciśnienia obliczonymi z zależności dla przewodu grubościennego (3.83) i przewodu cienkościennego (3.72) są tym mniejsze im większa jest sztywność przewodu, co potwierdzają poprzednie analizy. W przypadku, gdy $E_2/E_1 > 0,001$ stosunki c_g/c_e są mniejsze od 4%. Różnice pomiędzy wartościami prędkości fali ciśnienia c_g i c_e są tym większe im większa jest grubość ścianki przewodu.

W celu porównania wpływu umieszczenia pełnego i grubościennego przewodu na przebieg zjawiska uderzenia hydraulicznego, dla trzech różnych stosunków modułów sprężystości E_2/E_1 , obliczono wartości stosunków prędkości fali ciśnienia w rurociągu z przewodem i bez przewodu c_g/c . Podobnie jak w poprzednich rozważaniach, przyjęto, że stalowy rurociąg ma średnicę wewnętrzną $D_1 = 0,1$ m, grubość ścianki $e_1 = 0,003$ m oraz jest wykonany z materiału o module Younga $E_1 = 200$ GPa. Założono również, że umieszczony wewnątrz rurociągu przewód ma średnicę zewnętrzną $D_2 = 0,01$ m ($D_2/D_1 = 0,1$). Obliczenia prowadzono dla pięciu różnych stosunków grubości ścianki przewodu do średnicy zewnętrznej przewodu od $e_2/D_2 = 0,1$ do $e_2/D_2 = 0,5$. Wyniki obliczeń w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 przedstawiono na rys. 3.22, 3.23 i 3.24.



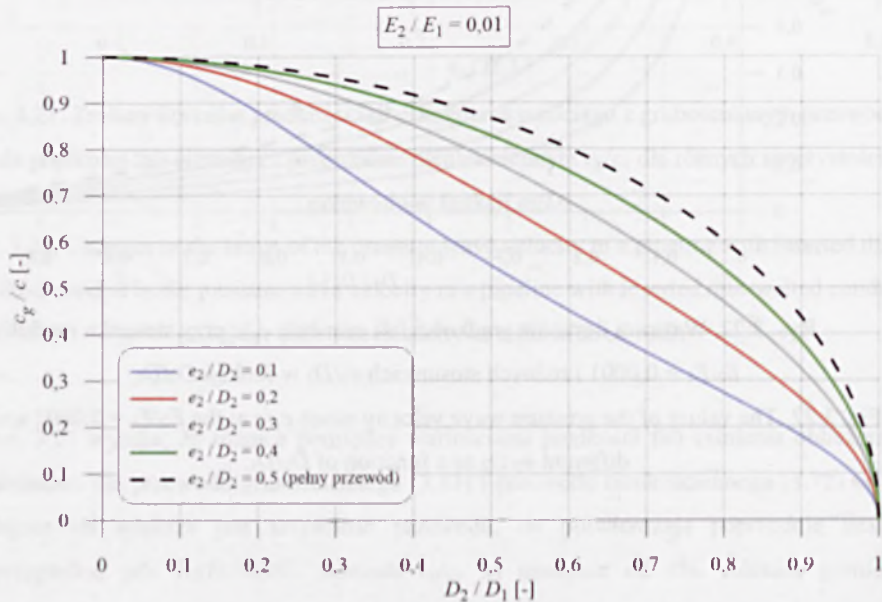
Rys. 3.22. Wartości ilorazów prędkości fali ciśnienia c_g/c przy stosunku modułów $E_2/E_1 = 0,0001$ i różnych stosunkach e_2/D_2 w funkcji D_2/D_1 .

Fig. 3.22. The values of the pressure wave velocity ratios c_g/c at the $E_2/E_1 = 0.0001$ and different e_2/D_2 as a function of D_2/D_1 .



Rys. 3.23. Wartości ilorazów prędkości fali ciśnienia c_g/c przy stosunku modułów $E_2/E_1 = 0,001$ i różnych stosunkach e_2/D_2 w funkcji D_2/D_1

Fig. 3.23. The values of the pressure wave velocity ratios c_g/c at the $E_2/E_1 = 0.001$ and different e_2/D_2 as a function of D_2/D_1 .



Rys. 3.24. Wartości ilorazów prędkości fali ciśnienia c_g/c przy stosunku modułów $E_2/E_1 = 0,01$ i różnych stosunkach e_2/D_2 w funkcji D_2/D_1

Fig. 3.24. The values of the pressure wave velocity ratios c_g/c at the $E_2/E_1 = 0.01$ and different e_2/D_2 as a function of D_2/D_1 .

Z rys. 3.22, 3.23 i 3.24 wynika, że dla wszystkich przyjętych sprężystości przewodów umieszczonych wewnątrz rurociągu, większe zdolności tłumiące przy tej samej średnicy posiada grubościenny przewód. Przerywaną linią oznaczono stosunki prędkości fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem – dla stosunku grubości ścianki i średnicy $e_2/D_2 = 0,5$, zależność (3.83) przekształca się w zależność (3.48). Zmniejszenie prędkości fali ciśnienia jest równoznaczne ze zmniejszeniem przyrostów ciśnienia, występujących podczas zjawiska uderzenia hydraulicznego. Z rys. 3.22, 3.23 i 3.24 wynika, że największe zmniejszenie maksymalnego przyrostu ciśnienia, powoduje umieszczenie przewodu posiadającego najmniejszą grubość ścianki o możliwie najniższym module sprężystości.

W celu wyznaczenia różnic pomiędzy wartościami prędkości fali ciśnienia, występującymi podczas zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym i grubościennym przewodem, wprowadzono względne odchylenie prędkości fali δ_c :

$$\delta_c = \frac{c_p - c_g}{c} \cdot 100\% \quad (3.87)$$

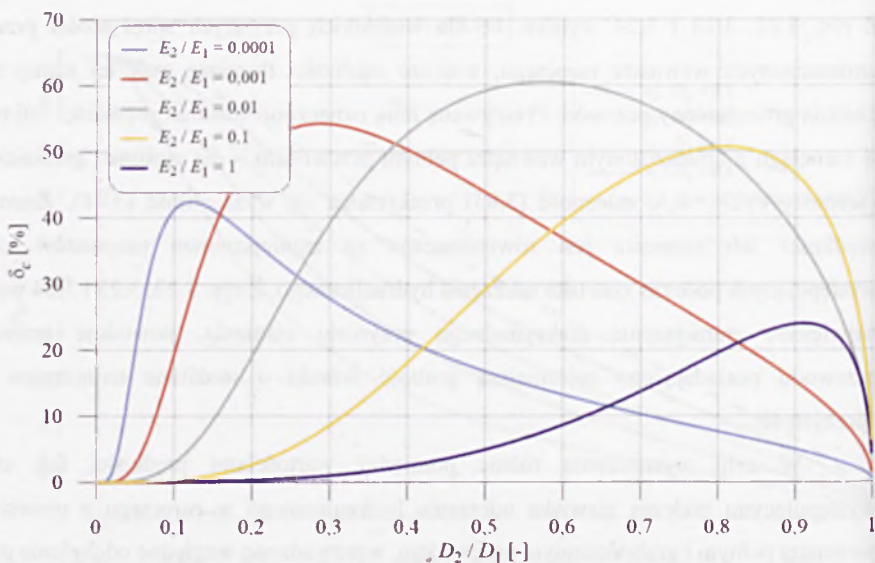
gdzie:

c_p – prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem wyznaczana z zależności (3.48) [m/s],

c_g – prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem wyznaczana z zależności (3.83) [m/s],

c – prędkość fali ciśnienia w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu wyznaczana z zależności (3.23) .

Dla sześciu różnych stosunków modułów sprężystości E_2/E_1 obliczono wartości względnych odchylen prędkości fali. W obliczeniach przyjęto, że zarówno przewód pełny, jak i grubościenny, mają te same średnice zewnętrzne $D_2 = 0,01$ m ($D_2/D_1 = 0,1$), przy czym grubość ścianki przewodu grubościennego wynosi $e_2 = 0,001$ m ($e_2/D_2 = 0,1$). Przyjęto te same parametry materiałowe rurociągu, co w poprzednich rozważaniach. Obliczone względne odchylenia prędkości fali przedstawiono w funkcji stosunku średnic D_2/D_1 (rys. 3.25).



Rys. 3.25. Względne odchylenia prędkości fali ciśnienia w rurociągu z przewodem pełnościnnym i grubościennym w odniesieniu do prędkości fali ciśnienia w rurociągu bez przewodu w funkcji D_2/D_1 .

Fig. 3.25. Relative deviations of the pressure wave velocity in a pipeline with inserted thick-walled cable with reference to the pressure wave velocity in a pipeline without a conduit as a function of D_2/D_1 .

Z rys. 3.25 wynika, że dla każdej rozważanej sprężystości przewodu E_2 , odchylenie względne prędkości fali ciśnienia δ_c (3.87) przyjmuje wartości dodatnie. Oznacza to, że umieszczenie wewnątrz rurociągu przewodu grubościennego powoduje większą redukcję prędkości fali ciśnienia niż umieszczenie przewodu pełnego. Odchylenie to nie jest stałe, tj. początkowo rośnie, a następnie maleje wraz ze stosunkiem D_2/D_1 i osiąga największą wartość dla określonego stosunku średnic przewodu i rurociągu. Maksymalne odchylenia względne prędkości fali ciśnienia występują przy mniejszych stosunkach średnic D_2/D_1 , gdy mniejsza jest sztywność przewodu. Wzrost sztywności przewodu powoduje przesunięcie maksymalnych odchyleń względnych w stronę większych średnic.

Przeprowadzone analizy wykazują, że umieszczenie zarówno pełnych przewodów, jak i tych, których przekrój poprzeczny stanowi pierścien może mieć pozytywny wpływ na łagodzenie skutków uderzenia hydraulicznego. Zmniejszenie fali ciśnienia jest tym większe, im mniejszy jest moduł sprężystości materiału, z jakiego wykonany jest przewód oraz im większa

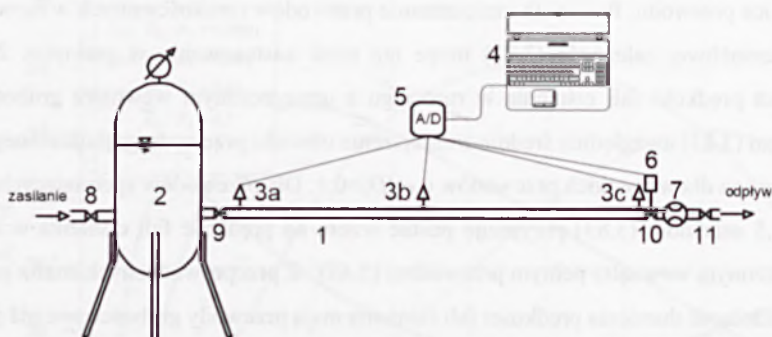
jest średnica przewodu. Ponieważ umieszczanie przewodów cienkościennych w rurociągu jest raczej niemożliwe, zależność (3.72) może nie mieć zastosowania w praktyce. Zależność wyrażająca prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem (3.83) uwzględnia średnie zmniejszenie obwodu przewodu grubościennego i może być stosowana dla wszystkich przewodów o $e_2/D_2 > 0,1$. Dla przewodów spełniających warunek $e_2/D_2 = 0,5$ zależność (3.83) przyjmuje postać wzoru na prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem (3.48). Z przeprowadzonych analiz wynika, że większą zdolność tłumienia prędkości fali ciśnienia mają przewody grubościenne niż przewody pełne.

W celu weryfikacji stwierdzeń wyprowadzonych z zależności teoretycznych przeprowadzono hydrauliczne badania zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonymi wewnątrz przewodami.

3.3. Hydrauliczne badania uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz przewodem

3.3.1. Opis stanowiska badawczego

Badania uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz przewodem przeprowadzono na zmodyfikowanym stanowisku, które wykorzystywano do wykonania pomiarów w ruchu ustalonym (rozdz. 2.4). Schemat stanowiska pomiarowego do badań nieustalonego przepływu wody w przewodzie wodociągowym pokazano na rys. 3.26. Dostosowanie stanowiska badawczego do badań uderzenia hydraulicznego wymagało zainstalowania czujników, które umożliwiały rejestrację zmian ciśnienia w rurociągu.



Rys. 3.26. Schemat stanowiska pomiarowego uderzenia hydraulicznego w stalowym rurociągu.

Fig. 3.26. Scheme of the measuring stand for water hammer in a steel pipeline.

Stanowisko badawcze składa się z następujących elementów:

1. Stalowy przewód o średnicy wewnętrznej 0,0531 m i grubości ścianki 0,0035 m, w którym umieszczano przewody o zmiennej średnicy
2. Ciśnieniowy zbiornik na wodę (hydrofor) zaopatrzony w manometr, zasilający stalowy przewód
- 3a, 3b, 3c. Czujniki ciśnienia
4. Rejestrator pomiarów – komputer przenośny
5. Karta analogowo-cyfrowa
6. Urządzenie do pomiaru czasu zamykania zaworu
7. Przepływomierz indukcyjny
8. Zawór odcinający zasilanie hydroforu
9. Zawór odcinający na początku rurociągu
10. Zawór inicjujący zjawisko uderzenia hydraulicznego
11. Zawór służący do regulacji przepływu

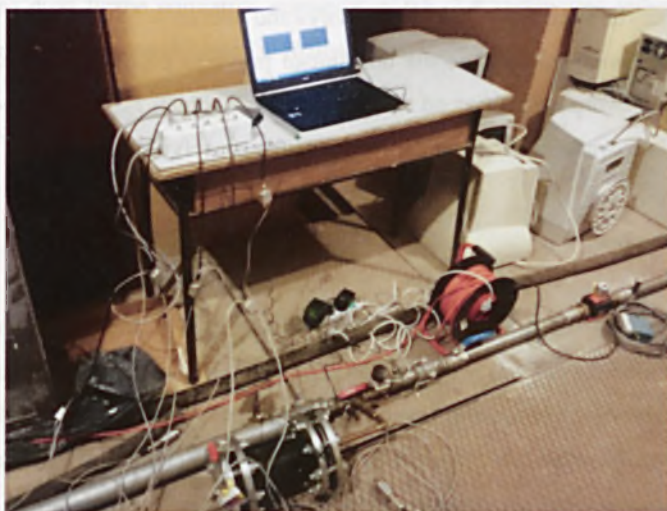
Ciśnienie wody w rurociągu było mierzone bezpośrednio przez zestaw 3 piezorezystywnych czujników typu CL1-L (fot. 3.1), przystosowanych do pomiaru ciśnienia w zakresie od -0,1 do 1,2 MPa. Czujniki ciśnienia były wkręcane w uprzednio przygotowane i nagwintowane króćce dopasowane do rurociągu stalowego.



Fot. 3.1. Czujnik ciśnienia typu CL1-L.

Photo 3.1. Pressure sensor type CL1-L.

Zmiany ciśnienia rejestrowane przez czujnik były przekształcane w impuls elektryczny przekazywany poprzez kartę analogowo-cyfrową do komputera. Komputer wyposażono w aplikację napisaną w programie LabVIEW, umożliwiającą podgląd i zapis rejestrowanych wyników pomiaru ciśnienia. Stanowisko rejestracji pomiarów pokazano na fot. 3.2.



Fot. 3.2. Stanowisko rejestracji pomiarów zmian ciśnienia w rurociągu.

Photo 3.2. Measuring stand for changes of pressure in a pipeline.

Objętościowe natężenie przepływu mierzono przepływomierzem indukcyjnym marki Kobold w zakresie od 0 do 63 dm³/min. Czas zamykania zaworu był określany z charakterystyki napięcia zarejestrowanej przez potencjometr podłączony do zaworu.

3.3.2. Metodyka badań

Przed przystąpieniem do pomiarów, napełniano rurociąg wodą i prowadzono obserwację szczelności połączeń odcinków rurociągu. Jeśli nie stwierdzono występowania wycieków, do rurociągu wkręcano uprzednio wytarowane (wykalibrowane względem ciśnienia atmosferycznego) czujniki ciśnienia. Badanie uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umocowanym wewnątrz przewodem wymagało współpracy 3 osób. Pierwsza osoba obsługiwała komputerowy program rejestrujący zmiany ciśnienia. Druga osoba inicjowała uderzenie hydrauliczne w rurociągu przez nagłe zamknięcie zaworu. W tym samym czasie, trzeci uczestnik pomiarów odcinał zasilanie z sieci wodociągowej. Wartości ciśnienia były rejestrowane z częstotliwością 500 Hz. Pomiar ciśnienia trwał 20 sekund. W tym czasie zapisywany był na dysku komputera zbiór 10 000 wartości ciśnienia w każdym czujniku. W celu maksymalnego skrócenia czasu zamykania zaworu inicjującego uderzenie hydrauliczne, zawór odcinający, którym wywoływano uderzenie hydrauliczne był częściowo przytknięty. Badania prowadzono dla dodatkiego prostego uderzenia hydraulicznego, tzn. czas zamykania zaworu był krótszy od czasu powrotu fali odbitej T_p . Przy pomocy termometru rtęciowego dokonywano również pomiaru temperatury przepływającej wody.

3.3.3. Zakres badań

Podobnie jak w przypadku badań hydraulicznych ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonymi wewnątrz przewodami, pomiary prowadzono dla czterech różnych światłowodów telekomunikacyjnych o średnicach 5,3 mm, 6,0 mm, 6,5 mm i 7,0 mm oraz grubościennego przewodu silikonowego o średnicy zewnętrznej 8,0 mm i grubości ścianki 1,0 mm. Wykonano również pomiary przebiegu uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu. Zjawisko uderzenia hydraulicznego było inicjowane dla 3 różnych wydatków w rurociągu: 40, 50 i 60 dm³/min. Przeprowadzone warianty badań oraz liczbę doświadczeń zestawiono w tab. 3.3.

Tab. 3.3. Warianty badań uderzenia hydraulicznego w rurociągu stalowym.

Table 3.3. Variants of experimental tests of water hammer in a steel pipeline.

Numer wariantu	Wariant badań	Liczba doświadczeń
1	Bez przewodu	3
2	Zc światłowodem $D_2 = 5,3$ mm	3
3	Zc światłowodem $D_2 = 6,0$ mm	3
4	Zc światłowodem $D_2 = 6,5$ mm	3
5	Zc światłowodem $D_2 = 7,0$ mm	3
6	Z przewodem silikonowym $D_2 = 8,0$ mm	3

3.3.4. Wyniki pomiarów uderzenia hydraulicznego

Wyniki pomiarów stanowią zarejestrowane wartości ciśnienia w rurociągu w funkcji czasu. W analizach wykorzystywano wartości ciśnienia zarejestrowane przez czujnik 3c znajdujący się najbliżej zaworu. Wartości z pozostałych dwóch czujników służyły do kontroli przebiegu zjawiska.

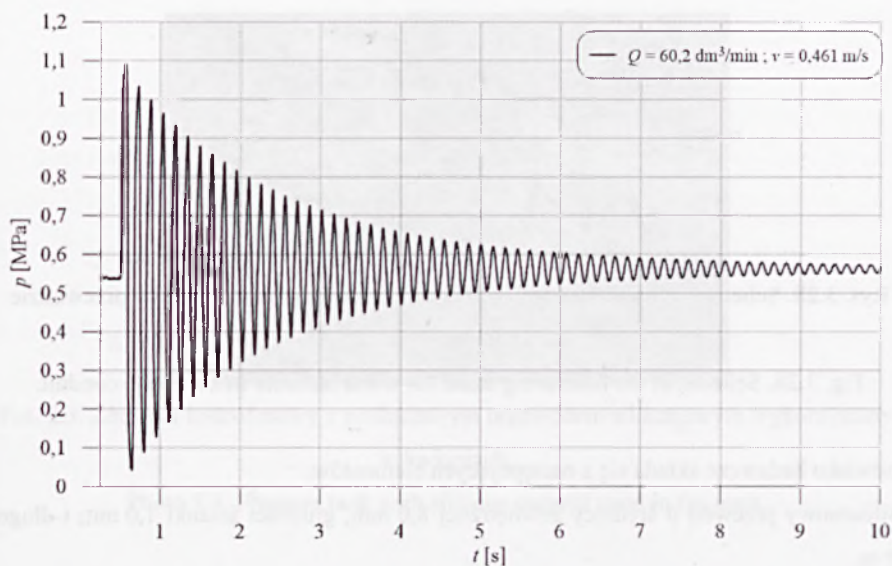
Zc względu na dużą liczbę pomiarów ciśnienia, w tab. 3.4 zestawiono jedynie podstawowe parametry z przeprowadzonych badań w różnych doświadczeniach.

Tab. 3.4 Wartości wybranych parametrów zarejestrowane podczas pomiarów.

Table 3.4 Values of selected parameters measured during experimental tests.

Lp.	Rodzaj przewodu	D_2	e_2	Q	v	t_z	Δp_{max}	T_p	c
		[mm]	[mm]	[dm ³ /min]	[m/s]	[s]	[MPa]	[s]	[m/s]
1	-	-	-	40,3	0,305	0,058	0,357	0,076	1263
2	-	-	-	49,8	0,376	0,054	0,453	0,076	1263
3	-	-	-	60,2	0,455	0,060	0,563	0,076	1263
4	Światłowod	5,3	-	40,3	0,308	0,052	0,373	0,076	1263
5	Światłowod	5,3	-	50,0	0,382	0,068	0,450	0,076	1263
6	Światłowod	5,3	-	60,1	0,459	0,046	0,547	0,076	1263
7	Światłowod	6,0	-	40,0	0,306	0,048	0,373	0,076	1263
8	Światłowod	6,0	-	49,9	0,382	0,060	0,465	0,076	1263
9	Światłowod	6,0	-	60,2	0,461	0,060	0,552	0,076	1263
10	Światłowod	6,5	-	40,3	0,309	0,048	0,391	0,076	1263
11	Światłowod	6,5	-	50,0	0,384	0,056	0,445	0,076	1263
12	Światłowod	6,5	-	60,1	0,461	0,060	0,543	0,076	1263
13	Światłowod	7,0	-	40,9	0,315	0,066	0,378	0,076	1263
14	Światłowod	7,0	-	50,0	0,385	0,046	0,463	0,076	1263
15	Światłowod	7,0	-	59,9	0,461	0,058	0,558	0,076	1263
16	Silikonowy	8,0	1,0	40,4	0,311	0,050	0,171	0,174	550
17	Silikonowy	8,0	1,0	49,7	0,383	0,046	0,202	0,199	483
18	Silikonowy	8,0	1,0	60,5	0,466	0,048	0,229	0,229	447

Dla wszystkich przeprowadzonych doświadczeń sporządzono wykresy zmian ciśnienia w funkcji czasu. Przykładowe zmiany ciśnienia w rurociągu stalowym z umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym o średnicy 6,0 mm zarejestrowane przy natężeniu przepływu w rurociągu 60,2 dm³/min pokazano na rys. 3.27.



Rys. 3.27 Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 6,0 mm zarejestrowany przez czujnik 3c przy przepływie $Q = 60,2 \text{ dm}^3/\text{min}$.

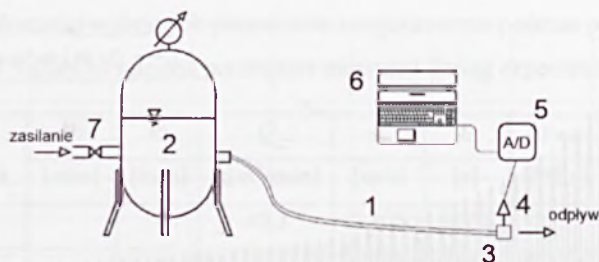
Fig. 3.27 Changes of pressure as a function of time in a pipeline with inserted cable of a 6 mm diameter recorded by a sensor 3c at $Q = 60,2 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Pozostałe wykresy zmian ciśnienia wody w rurociągu przedstawiono w załączniku pracy.

3.4. Hydrauliczne badania uderzenia hydraulicznego w grubościennym przewodzie silikonowym

3.4.1. Opis stanowiska badawczego

Doświadczenie uderzenia hydraulicznego w grubościennym przewodzie silikonowym wykonano w Laboratorium Mechaniki Płynów Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. Schemat stanowiska pomiarowego pokazano na rys. 3.28.



Rys. 3.28. Schemat stanowiska pomiarowego uderzenia hydraulicznego w przewodzie silikonowym.

Fig. 3.28. Scheme of the measuring stand for water hammer in a silicone conduit.

Stanowisko badawcze składa się z następujących elementów:

1. Silikonowy przewód o średnicy zewnętrznej 8,0 mm, grubości ścianki 1,0 mm i długości 8,10 m.
2. Ciśnieniowy zbiornik na wodę (hydrofor) zaopatrzony w manometr, zasilający silikonowy przewód
3. Metalowa końcówka, do której umocowano przewód silikonowy, umożliwiającą wkręcenie czujnika ciśnienia
4. Czujnik ciśnienia
5. Karta analogowo-cyfrowa
6. Rejestrator pomiarów – komputer przenośny
7. Zawór odcinający zasilanie hydroforu

Wykorzystywany w pomiarach hydrofor, do którego podłączono przewód silikonowy był zasilany bezpośrednio z sieci wodociągowej – fot. 3.3.



Fot. 3.3. Zbiornik hydroforowy z podłączonym przewodem silikonowym wykorzystany w badaniach.

Photo 3.3. Pressure tank with silicone conduit used in the tests.

Ciśnienie wody w przewodzie silikonowym było mierzone bezpośrednio przez piezorezystywny czujnik typu CL1-L przystosowany do pomiaru ciśnienia w zakresie od -0,1 do 1,2 MPa. Czujnik ciśnienia był wkręcony w specjalną końcówkę, do której podłączony był koniec przewodu silikonowego – fot. 3.4.



Fot. 3.4. Końcówka przewodu silikonowego, do której podłączono czujnik ciśnienia.

Photo 3.4. Silicone conduit end in which pressure sensor was connected.

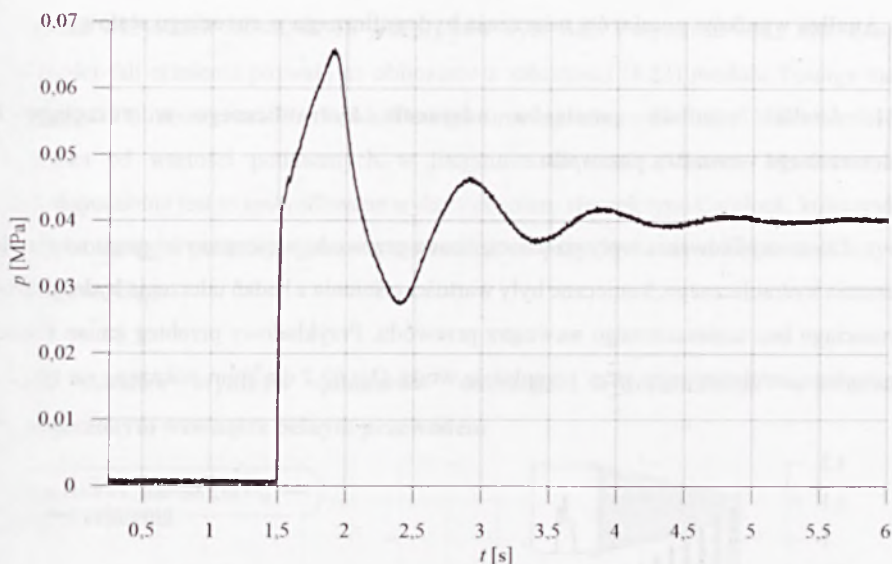
Rejestracja zmian ciśnienia odbywała się w taki sam sposób, jak w przypadku badań uderzenia hydraulicznego w rurociągu stalowym. Zjawisko uderzenia hydraulicznego było inicjowane dla przepływu.

3.4.2. Metodyka badań

W pomiarach uderzenia hydraulicznego w przewodzie silikonowym brały udział trzy osoby. Pierwszy uczestnik pomiarów utrzymywał stałe ciśnienie w hydroforze. Druga osoba inicjowała zjawisko uderzenia hydraulicznego. Trzecia osoba obsługiwała program rejestrujący zmiany ciśnienia w przewodzie silikonowym. Inicjacja zjawiska uderzenia hydraulicznego była wywoływana poprzez zatkanie metalowej końcówki na końcu silikonowego przewodu. Nie mierzono czasu zamykania odpływu, przyjęto natomiast, że był on krótszy od czasu powrotu fali odbitej. Woda z przewodu silikonowego odpływała bezpośrednio do atmosfery. Zmiany ciśnienia były rejestrowane z częstotliwością 500 Hz. Pomiar ciśnienia trwał 20 sekund. Temperaturę wody mierzono termometrem rtęciowym. Temperatura wody w przeprowadzonych doświadczeniach wynosiła 20,5°C.

3.4.3. Wyniki pomiarów uderzenia hydraulicznego i ich analiza

Doświadczenie z uderzeniem hydraulicznym w grubościennym przewodzie silikonowym miało na celu wyznaczenie prędkości fali ciśnienia c . Jej wartość wykorzystywano do wyznaczania z zależności (3.23) modułu sprężystości przewodu. Zarejestrowane zmiany ciśnienia w grubościennym przewodzie silikonowym pokazano na rys. 3.29.



Rys. 3.29. Przebieg zmian ciśnienia zarejestrowany w grubościennym przewodzie silikonowym.

Fig. 3.29. Changes of pressure recorded in a thick-walled silicone conduit as a function of time during water hammer phenomenon.

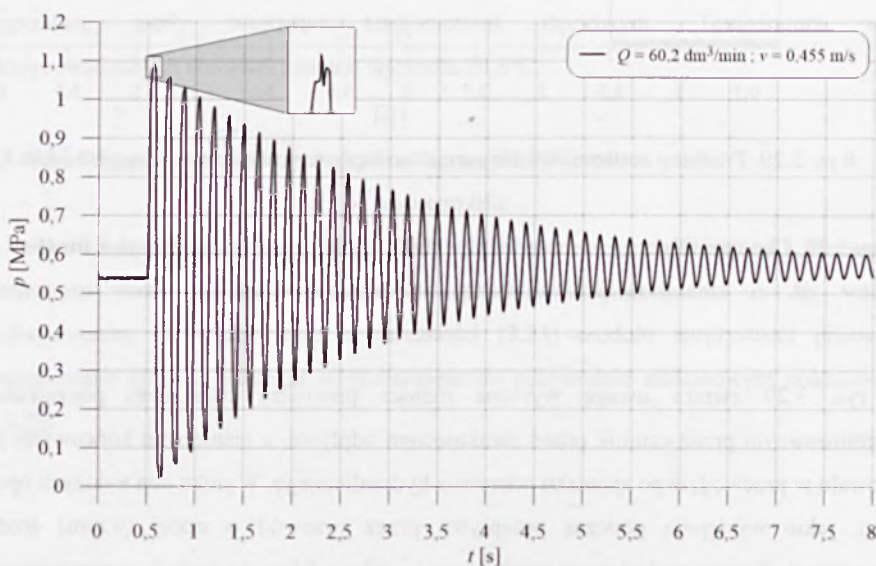
Na rys. 3.29 zwraca uwagę wyraźna różnica pomiędzy ciśnieniem początkowym, zarejestrowanym przez czujnik przed zamknięciem odpływu, a ciśnieniem końcowym, jakie panowało w przewodzie po zjawisku uderzenia hydraulicznego. Wynika ona z dużych oporów ruchu, jakie występują podczas przepływu przez przewód o małej (6 mm) średnicy wewnętrznej. Zerowe nadciśnienie początkowe wynika z faktu, że czujnik zamontowany był na końcu przewodu, z którego woda odpływała swobodnie do atmosfery.

Prędkość fali ciśnienia wyznaczona na podstawie charakterystyki ciśnienia wyniosła $c = 35,7$ m/s. Przekształcając zależność (3.23) wyznaczono moduł sprężystości silikonowego przewodu $E = 0,010$ GPa.

3.5. Analiza wyników pomiarów uderzenia hydraulicznego w rurociągu stalowym

3.5.1. Analiza wyników pomiarów uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu.

Do zweryfikowania wpływu umieszczenia przewodu wewnątrz rurociągu na zjawisko uderzenia hydraulicznego, konieczne były wartości ciśnienia z badań uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu. Przykładowy przebieg zmian ciśnienia w rurociągu zarejestrowany przy przepływie wody $Q = 60,2 \text{ dm}^3/\text{min}$ pokazano na rys. 3.30.



Rys. 3.30. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu zarejestrowany przez czujnik 3c przy przepływie $Q = 60,2 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. 3.30. Changes of pressure in a pipeline as a function of time recorded by sensor 3c at $Q = 60,2 \text{ dm}^3/\text{min}$.

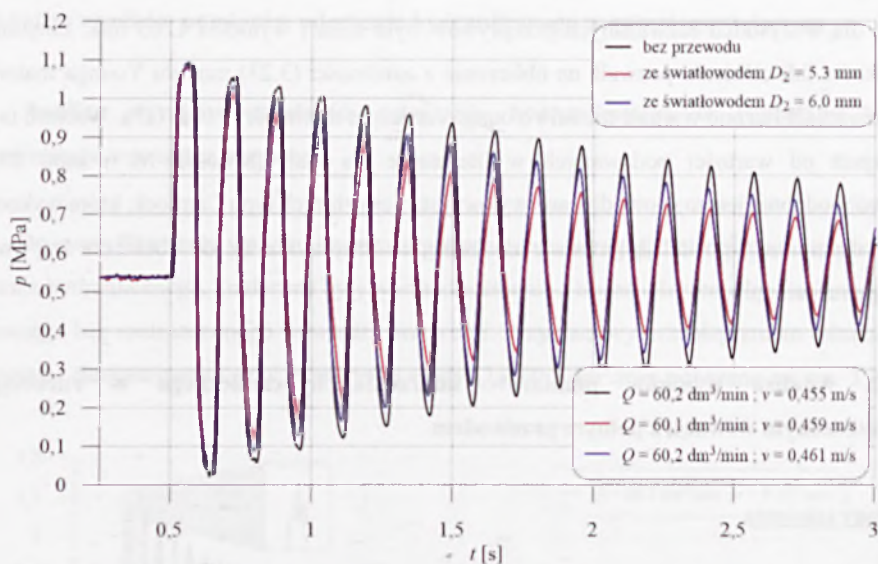
Powiększenie na rys. 3.30 pozwala dostrzec charakterystyczne piki ciśnienia w pierwszych fazach zjawiska. Są one wywołane powstaniem przepływów wstecznych podczas wzrostu ciśnienia, co zostało doświadczalnie wyjaśnione przez (Brunone B. i inni, 2000). Maksymalny przyrost ciśnienia zarejestrowany przez czujnik 3c względem ciśnienia początkowego dla wydatku $Q = 60,2 \text{ dm}^3/\text{min}$ wyniósł $0,563 \text{ MPa}$. Prędkość fali ciśnienia c obliczona z zależności

(3.8) dla wszystkich rozważanych przepływów była stała i wyniosła 1263 m/s. Znajomość prędkości fali ciśnienia pozwala na obliczenie z zależności (3.23) modułu Younga materiału rurociągu. Obliczono wartość modułu Younga rurociągu równą $E = 119,3$ GPa. Wartość ta jest mniejsza od wartości podawanych w literaturze dla stali (Mitosek M. i inni, 2017). Prawdopodobnie jest to spowodowane wykorzystaniem złączy typu Camlock, które wykonane są z aluminium i posiadają gumową uszczelkę, co przyczynia się do obniżenia sztywności całego rurociągu.

3.5.2. Analiza wyników pomiarów uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem

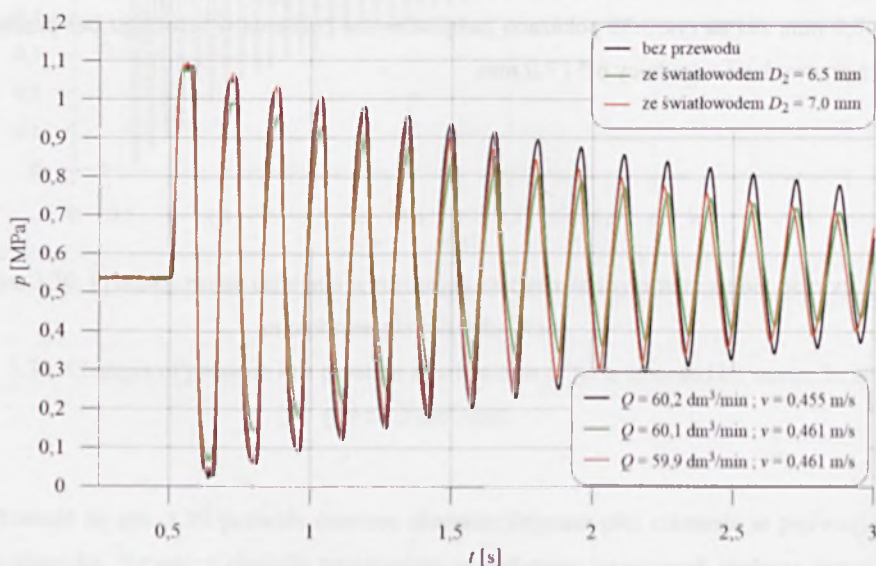
Zmiany ciśnienia

W celu zilustrowania różnic w przebiegu zmian ciśnienia w rurociągu bez i z umieszczonym przewodem światłowodowym, zarejestrowane zmiany ciśnienia w czasie przedstawiono na wspólnym wykresie. Na rys. 3.31 porównano zmiany ciśnienia przy wydatku $Q = 60$ dm³/min dla rurociągu bez przewodu, oraz z przewodami światłowodowymi o średnicy 5,3 i 6,0 mm, zaś na rys. 3.32 pokazano zarejestrowane ciśnienia w rurociągu bez przewodu oraz z przewodami o średnicy 6,5 i 7,0 mm.



Rys. 3.31. Zarejestrowane zmiany ciśnienia w rurociągu bez przewodu i z przewodami o średnicach 5,3 i 6,0 mm.

Fig. 3.31. Recorded pressure changes in a pipeline without a cable and with cables of 5.3 and 6.0 mm diameters.



Rys. 3.32. Zarejestrowane zmiany ciśnienia w rurociągu bez przewodu i z przewodami o średnicach 6,5 i 7,0 mm.

Fig. 3.32. Recorded pressure changes in a pipeline without a cable and with cables of 6.5 and 7.0 mm diameters.

Wykresy ciśnień mają wspólny czas inicjacji zjawiska ($t = 0,5 \text{ s}$) i to samo ciśnienie początkowe. Ze względu na krótki okres fali ciśnienia, wykresy ograniczono do pierwszych 2,5 s czasu trwania zjawiska. Z rys. 3.31 i 3.32 wynika, że umieszczenie przewodu światłowodowego w obszarze nieustalonego przepływu wody powoduje, że kolejne amplitudy ciśnienia maleją szybciej dla uderzeń w rurociągu z umieszczonym przewodem. We wszystkich analizowanych doświadczeniach, kolejne amplitudy ciśnienia nakładają się, co świadczy o tej samej prędkości fali ciśnienia. Wyznaczona wartość prędkości fali ciśnienia dla wszystkich doświadczeń z przewodem światłowodowym była równa 1263 m/s .

Z rys. 3.31 i 3.32 wynika, że umieszczenie przewodu w rurociągu wpływa na mocniejsze tłumienie kolejnych amplitud ciśnieniu w porównaniu z przebiegiem zjawiska uderzenia hydraulicznego bez umieszczonego przewodu. W celu porównania wpływu poszczególnych rodzajów światłowodów na tłumienie kolejnych amplitud ciśnienia, wprowadzono pojęcie względnego dekrementu tłumienia ω :

$$\omega = \frac{p_1 - p_n}{\rho c v} \quad (3.88)$$

gdzie:

ω – względny dekrement tłumienia [-],

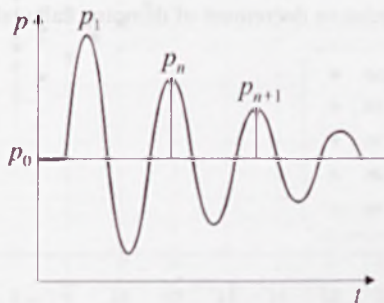
p_1 – wartość pierwszej amplitudy ciśnienia [Pa],

p_n – wartość następnej amplitudy ciśnienia [Pa],

v – prędkość przepływu wody w ruchu ustalonym [m/s],

c – prędkość fali ciśnienia [m/s].

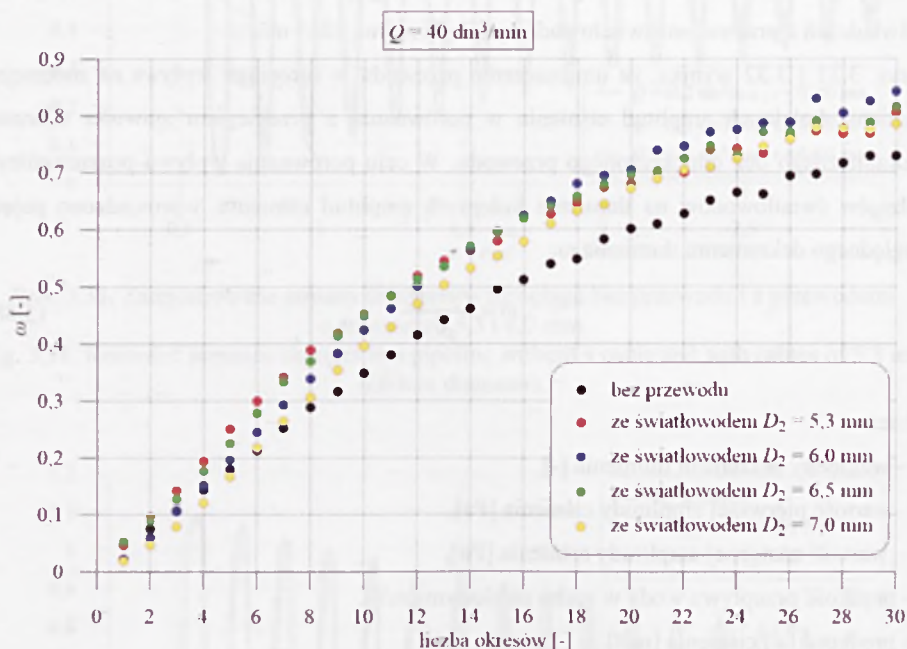
Objaśnienie oznaczeń przyjętych w zależności (3.88) pokazano również na rys. 3.33.



Rys. 3.33. Opis oznaczeń stosowanych w zależności (3.88).

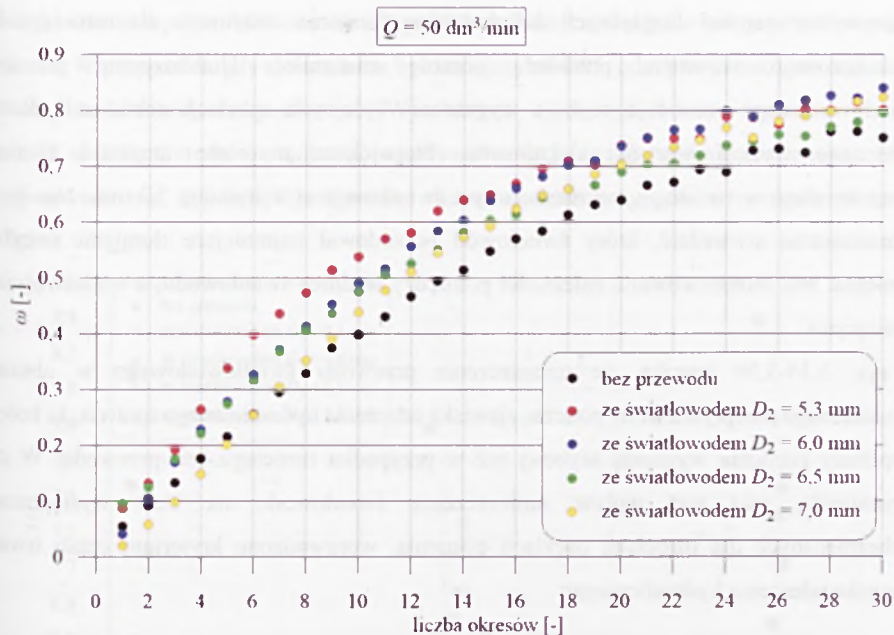
Fig. 3.33. Explanation of the symbols used in formula (3.88).

Zależność (3.88) pozwala na odniesienie różnicy pomiędzy kolejnymi amplitudami ciśnienia do maksymalnego przyrostu wyznaczonego ze wzoru Żukowskiego (3.5). Obliczenia względnego dekrementu tłumienia przeprowadzono dla 30 kolejnych amplitud, tj. 30 okresów. Wartości względnych dekrementów tłumienia ω dla 3 różnych wydatków i wszystkich badanych przewodów, przedstawiono na rys. 3.34-3.36 w funkcji liczby okresów zjawiska uderzenia hydraulicznego.



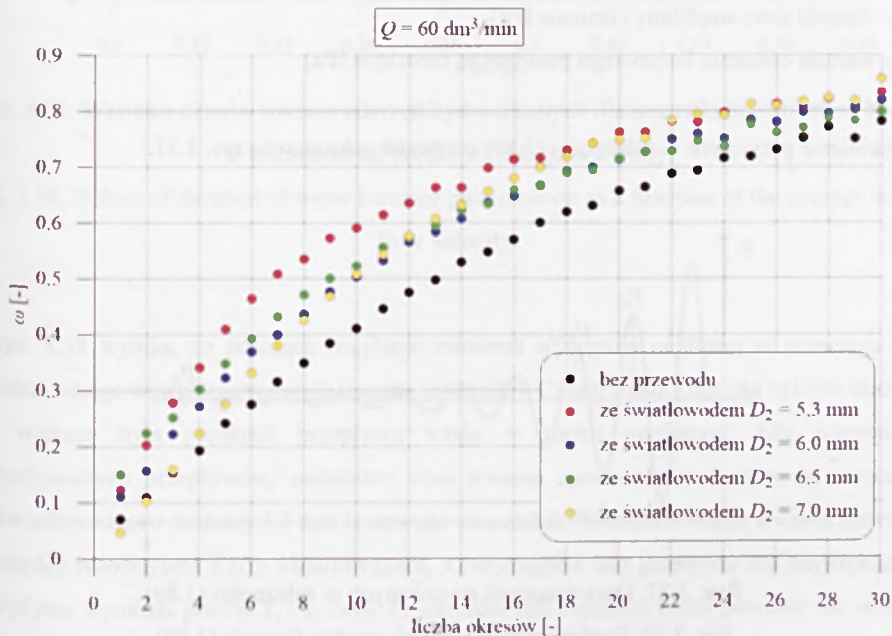
Rys. 3.34. Zmiany względnego dekrementu tłumienia obliczone dla rurociągu z badanymi przewodami dla $Q = 40 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. 3.34. Changes in the relative decrement of damping calculated for $Q = 40 \text{ dm}^3/\text{min}$.



Rys. 3.35. Zmiany względnego dekrementu tłumienia obliczone dla rurociągu z badanymi przewodami dla $Q = 50 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. 3.35. Changes in the relative decrement of damping calculated for $Q = 50 \text{ dm}^3/\text{min}$.



Rys. 3.36. Zmiany względnego dekrementu tłumienia obliczone dla rurociągu z badanymi przewodami dla $Q = 60 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. 3.36. Changes in the relative decrement of damping calculated for $Q = 60 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Najmniejsze wartości względnych dekrementów tłumienia otrzymano dla rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu (czarne znaczniki). Umieszczenie przewodu światłowodowego powoduje szybsze wygaszanie kolejnych oscylacji ciśnienia i dlatego otrzymano wyższe wartości dekrementu. Największe tłumienie amplitud ciśnienia zarejestrowano w rurociągu z umieszczonym światłowodem o średnicy 5,3 mm. Nie da się jednoznacznie stwierdzić, który światłowód powodował najmniejsze tłumienie oscylacji ciśnienia. Nie zaobserwowano zależności pomiędzy średnicą światłowodu, a właściwościami tłumiącymi.

Z rys. 3.34-3.36 wynika, że umieszczenie przewodu światłowodowego w obszarze nieustalonego przepływu wody podczas zjawiska uderzenia hydraulicznego sprawia, że kolejne amplitudy ciśnienia wygasają szybciej niż w przypadku rurociągu bez przewodu. W celu wyjaśnienia, jaki jest wpływ umieszczenia światłowodu na czas występowania niebezpiecznych dla rurociągu oscylacji ciśnienia, wprowadzono kryterium czasu trwania zjawiska uderzenia hydraulicznego:

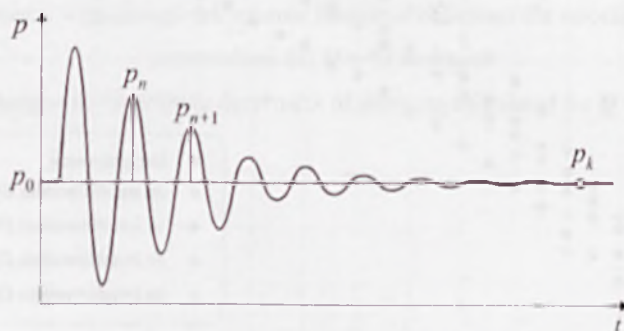
$$\frac{p_n}{p_k} < 1,05 \quad (3.89)$$

gdzie:

p_n – wartość n-tej amplitudy ciśnienia [Pa],

p_k – wartość ciśnienia końcowego panującego w rurociągu [Pa].

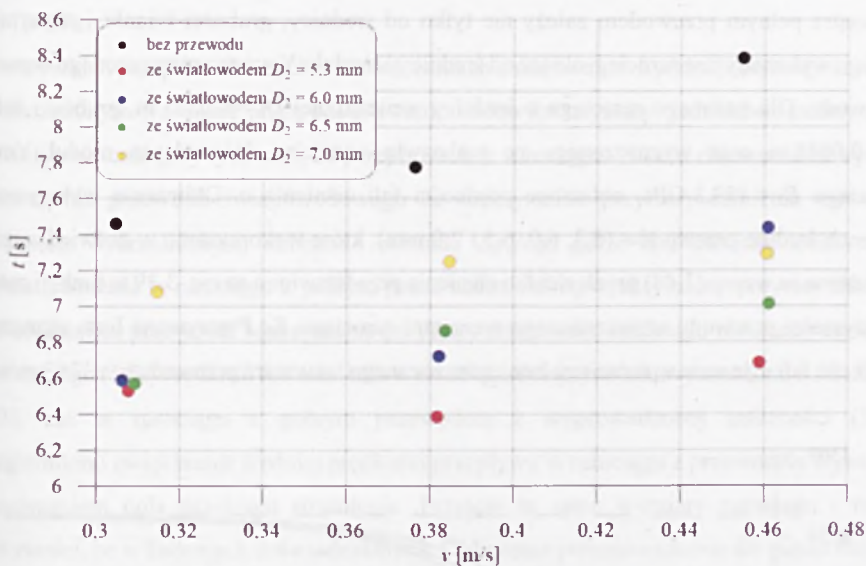
Objaśnienie przyjętych w zależności (3.89) oznaczeń pokazano na rys. 3.37.



Rys. 3.37. Opis oznaczeń stosowanych w zależności (3.89).

Fig. 3.37. Explanation of symbols used in formula (3.89).

Stosunki ciśnienia p_n/p_k obliczono we wszystkich doświadczeniach dla kolejnych 60 amplitud ciśnienia. W przypadku, gdy stosunek ten był mniejszy od 1,05, odnotowywano czas, w którym n -ta amplituda została zarejestrowana. Wyznaczone w ten sposób czasy przedstawiono na rys. 3.38 w funkcji średniej prędkości przepływu wody v_0 przed zamknięciem zaworu (dane przygotowano tak, aby inicjacja zjawiska dla wszystkich przypadków nastąpiła w czasie $t = 0,5$ s).



Rys. 3.38. Wartości czasów trwania uderzeń hydraulicznych dla wszystkich wariantów badań w zależności od prędkości przepływu wody.

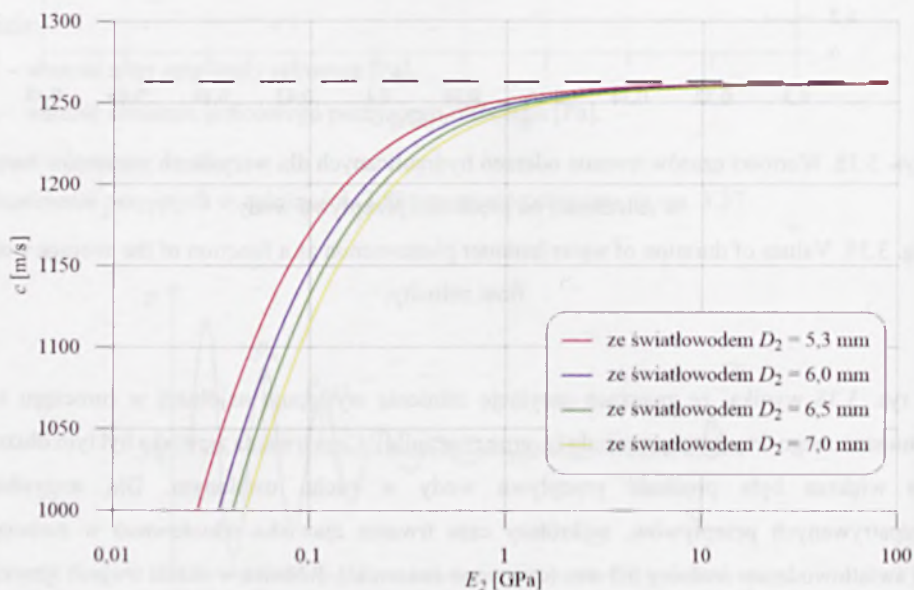
Fig. 3.38. Values of duration of water hammer phenomenon as a function of the average water flow velocity.

Z rys. 3.38 wynika, że znaczące oscylacje ciśnienia występują najdłużej w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu (czarne znaczniki). Czas trwania zjawiska był tym dłuższy im większa była prędkość przepływu wody w ruchu ustalonym. Dla wszystkich rozpatrywanych przepływów, najkrótszy czas trwania zjawiska odnotowano w rurociągu ze światłowodem o średnicy 5,3 mm (czerwone znaczniki). Różnica w czasie trwania zjawiska pomiędzy rurociągiem z tym światłowodem, a rurociągiem bez przewodu dla największego przepływu wyniosła prawie 1,7 s, czyli 11 okresów fali ciśnienia (czas powrotu fali odbitej $T_p = 0,076$ s). Stwierdzenie to jest zgodne z wynikiem poprzedniej analizy, z której wynika że największe właściwości tłumiące ma przewód światłowodowy o średnicy 5,3 mm. Dla

najmniejszego wydatku, przewody światłowodowe o średnicach 5,3, 6,0 i 6,5 mm miały ten sam czas trwania zjawiska.

Zmiany prędkości fali ciśnienia

Z zależności (3.48) wynika, że prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym przewodem zależy nie tylko od średnicy, grubości ścianki i materiału, z jakiego wykonany jest rurociąg, ale też od średnicy i modułu Younga umieszczonego wewnątrz przewodu. Dla badanego rurociągu o średnicy wewnętrznej $D_1 = 0,0531$ m, grubości ścianki $e_1 = 0,0035$ m oraz wyznaczonego na podstawie wyników doświadczeń modułu Younga rurociągu $E_1 = 119,3$ GPa, obliczono prędkości fali ciśnienia c . Obliczenia wykonano dla czterech średnic przewodów (5,3, 6,0, 6,5 i 7,0 mm), które wykorzystano w doświadczeniach. Obliczone ze wzoru (3.48) prędkości fali ciśnienia przedstawiono na rys. 3.39 w funkcji modułu sprężystości przewodu umieszczonego wewnątrz rurociągu E_2 . Przerywaną linią zaznaczono prędkość fali ciśnienia w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu $c = 1263$ m/s.

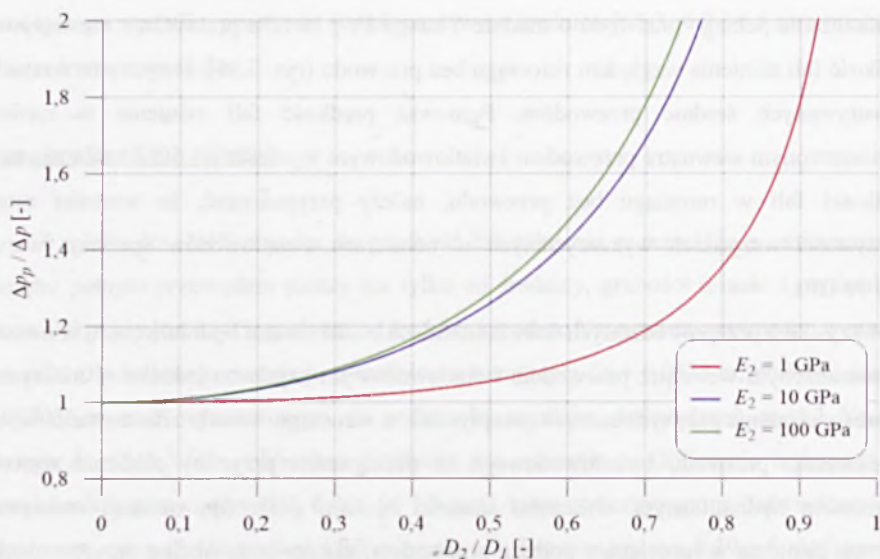


Rys. 3.39. Zmiany prędkości fali ciśnienia dla różnych średnic przewodów światłowodowych w funkcji modułu sprężystości przewodu.

Fig. 3.39. Changes of the pressure wave velocity for different diameters of fiber optic cable as a function of the Young's modulus of the cable.

Umieszczenie pełnego przewodu o module Younga $E_2 \geq 10$ GPa praktycznie nie wpływa na prędkość fali ciśnienia względem rurociągu bez przewodu (rys. 3.39). Dotyczy to wszystkich rozpatrywanych średnic przewodów. Ponieważ prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym wyniosła $c = 1263$ m/s i równa jest prędkości fali w rurociągu bez przewodu, należy przypuszczać, że wartości modułu sprężystości wszystkich wykorzystanych w pomiarach światłowodów spełniają warunek $E_2 \geq 10$ GPa.

We wszystkich przeprowadzonych doświadczeniach z uderzeniem hydraulicznym w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym uzyskano jednakowe maksymalne przyrosty ciśnienia przy tych samych przepływach w rurociągu. W celu zilustrowania wpływu umieszczenia przewodu światłowodowego na maksymalne przyrosty ciśnienia wywołane uderzeniem hydraulicznym, obliczono stosunki $\Delta p_p / \Delta p$, gdzie Δp_p oznacza maksymalny przyrost ciśnienia w rurociągu z pełnym przewodem, zaś Δp maksymalny przyrost ciśnienia w rurociągu bez przewodu. Maksymalne przyrosty ciśnienia w rurociągu obliczono ze wzoru Żukowskiego (3.5). Prędkość fali ciśnienia w rurociągu bez przewodu wyznaczono z zależności (3.23), zaś w rurociągu z pełnym przewodem z wyprowadzonej zależności (3.48). Uwzględniono zwiększenie średniej prędkości przepływu w rurociągu z przewodem wywołane zmniejszeniem pola przekroju strumienia. Przyjęto te same wymiary rurociągu i moduł sprężystości, co w badaniach doświadczalnych. Obliczenia przeprowadzono dla pięciu różnych modułów sprężystości przewodu. Wyniki przedstawiono na rys. 3.40 w funkcji stosunku średnicy wewnętrznej rurociągu i zewnętrznej przewodu D_2/D_1 .



Rys. 3.40. Zmiany stosunków $\Delta p_p / \Delta p$ dla różnych średnic i elastyczności przewodu.

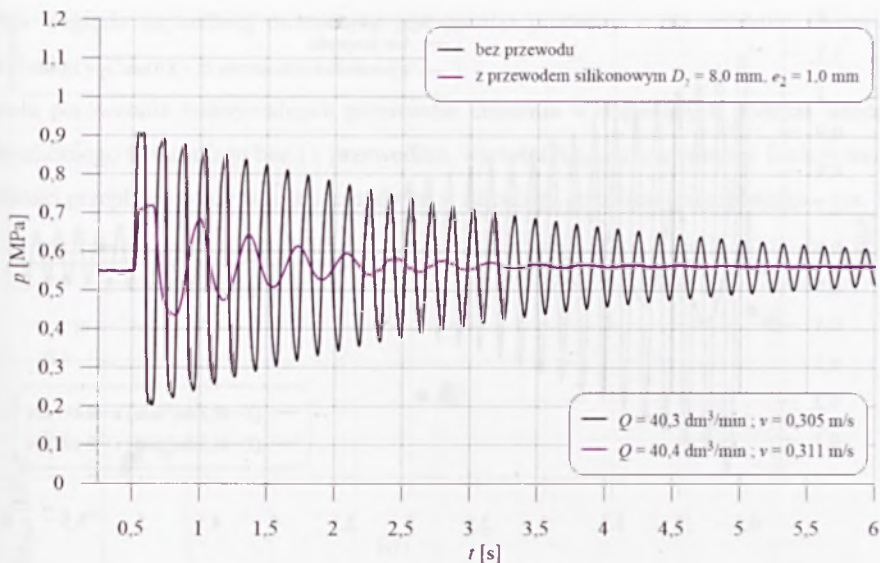
Fig. 3.40. Changes of $\Delta p_p / \Delta p$ ratios for different diameters and Young's modulus of the cable.

Umieszczenie przewodu o module sprężystości $E_2 \geq 1$ GPa i stosunku średnic $D_2/D_1 < 0,15$ praktycznie nie ma wpływu na maksymalne przyrosty ciśnienia wywołane uderzeniem hydraulicznym (rys. 3.40). Średnica największego światłowodu wykorzystanego w badaniach doświadczalnych wynosiła $D_2 = 7,0$ mm, tj. $D_2/D_1 = 0,13$.

Zarówno prędkość fali c , jak i maksymalne przyrosty ciśnienia uzyskane w doświadczeniach z wykorzystaniem pełnych przewodów w postaci światłowodów nie różniły się od tych, które zarejestrowano w rurociągu bez przewodu. Z analiz przeprowadzonych na podstawie wyprowadzonych zależności wynika, że wszystkie wykorzystane w badaniach przewody światłowodowe miały moduł Younga $E_2 \geq 10$ GPa.

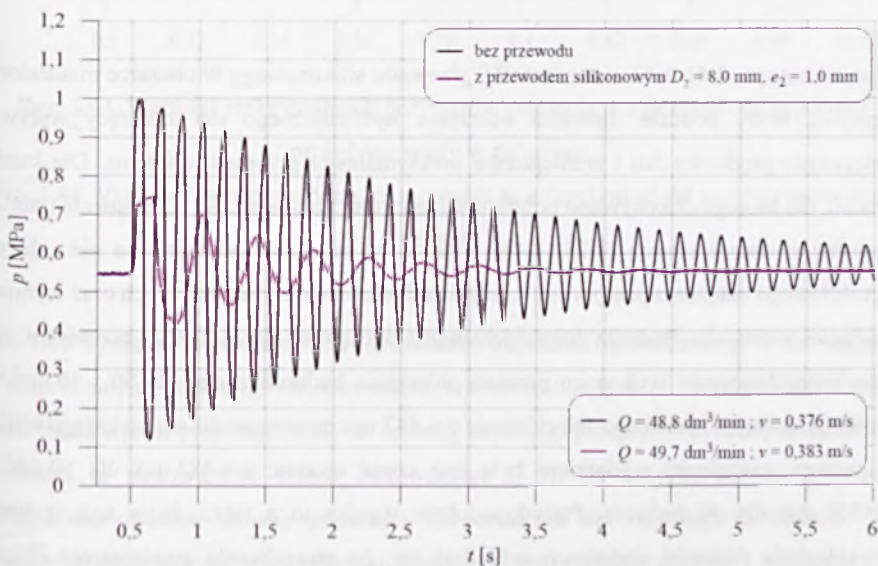
3.5.3. Analiza wyników pomiarów uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem silikonowym

W celu zilustrowania różnic pomiędzy zmianami ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym oraz w rurociągu bez przewodu, sporządzono rys. 3.41-3.43.



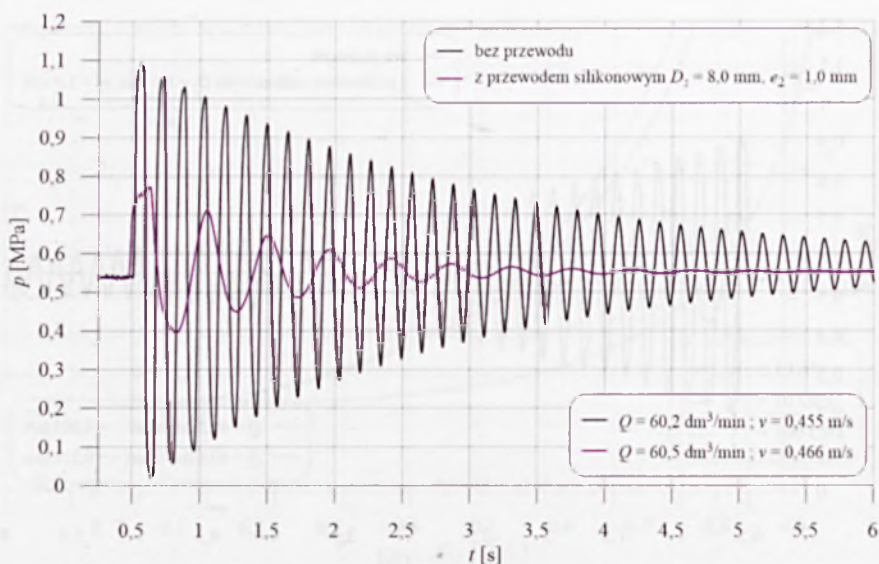
Rys. 3.41. Porównanie zmian ciśnienia w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem silikonowym dla wydátku $Q = 40 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. 3.41. Comparison of pressure changes in a pipeline without and with inserted thick-walled silicone conduit for volumetric water flow $Q = 40 \text{ dm}^3/\text{min}$



Rys. 3.42. Porównanie zmian ciśnienia w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem silikonowym dla wydátku $Q = 50 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. 3.42. Comparison of pressure changes in a pipeline without and with inserted thick-walled silicone conduit for volumetric water flow $Q = 50 \text{ dm}^3/\text{min}$



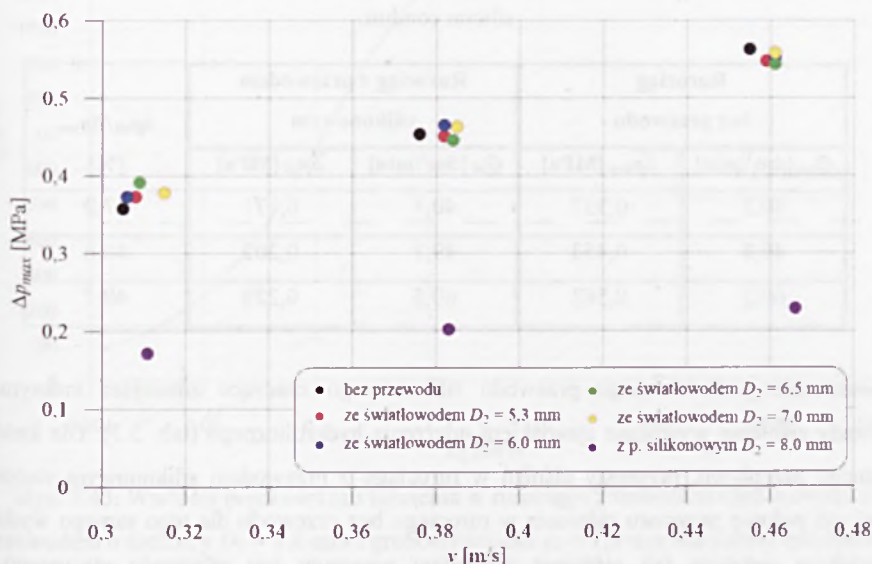
Rys. 3.43. Porównanie zmian ciśnienia w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem silikonowym dla wydatku $Q = 60 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. 3.43. Comparison of pressure changes in a pipeline without and with inserted thick-walled silicone conduit for volumetric water flow $Q = 60 \text{ dm}^3/\text{min}$

Jak wynika z rys. 3.41-3.43, umieszczenie przewodu silikonowego w obszarze nieustalonego przepływu wody podczas zjawiska uderzenia hydraulicznego ma znaczący wpływ na zmniejszenie prędkości fali i zmniejszenie maksymalnego przyrostu ciśnienia. Dla każdego wydatku, dla którego dokonywano pomiaru wyznaczono inną prędkość fali ciśnienia (tab. 3.2). Z zależności teoretycznych (3.23, 3.48) wynika, że prędkość fali ciśnienia nie zależy od objęściowego natężenia przepływu, a jedynie od właściwości materiałowych oraz wymiarów rurociągu i przewodu. Badania doświadczalne rozpoczęto od największego przepływu, tj. od $60 \text{ dm}^3/\text{min}$. Następnie wykonano pomiary uderzenia hydraulicznego dla 50 i $40 \text{ dm}^3/\text{min}$. Najmniejszą wartość prędkości fali ciśnienia $c = 447 \text{ m/s}$ otrzymano dla największego wydatku i z każdym następnym wydatkiem była ona coraz wyższa; $c = 483 \text{ m/s}$ dla $50 \text{ dm}^3/\text{min}$ i $c = 550 \text{ m/s}$ dla $40 \text{ dm}^3/\text{min}$. Prawdopodobnie wynika to z faktu, że w trakcie trwania doświadczenia przewód stopniowo ochładzał się, co powodowało zmniejszenie objętości powietrza znajdującego się w silikonowym przewodzie. Znaczenie też może mieć zmiana modułu sprężystości przewodu silikonowego spowodowana obniżeniem jego temperatury, podobnie jak ma to miejsce w przypadku przewodów polietylenowych (Wrzosek K., 1998).

Z tego względu najbardziej miarodajny jest pomiar pierwszy – dla wydatku $60 \text{ dm}^3/\text{min}$ (rys. 3.43).

W celu porównania maksymalnych przyrostów ciśnienia występujących podczas uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez i z przewodem, wartości $\Delta p_{\max}$ zestawiono w funkcji średniej prędkości przepływu wody w ruchu ustalonym w rurociągu przed inicjacją zjawiska – rys. 3.44.



Rys. 3.44. Wartości maksymalnych przyrostów ciśnienia w zależności od prędkości przepływu wody w rurociągu.

Fig. 3.44. Values of maximum pressure increases as a function of the average water flow velocity.

Z rys. 3.44 wynika, że dla wszystkich doświadczeń uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez i z umocowanymi wewnątrz światłowodami telekomunikacyjnymi, maksymalne przyrosty ciśnienia rosną wprost proporcjonalnie do średniej prędkości przepływu w ruchu stacjonarnym. Potwierdza to stosowność wzoru Żukowskiego (3.5). Ze względu na zaobserwowane w trakcie doświadczeń zmiany prędkości fali ciśnienia dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem silikonowym, maksymalne przyrosty ciśnienia rosną wraz ze wzrostem prędkości w sposób nieznaczny. Jak wcześniej wspomniano, przyrosty ciśnienia, które zarejestrowano w rurociągu bez umieszczonego przewodu są takie same jak w rurociągu ze światłowodami telekomunikacyjnymi. Maksymalne przyrosty ciśnienia

zarejestrowane podczas badań uderzenia hydraulicznego dla rurociągu bez przewodu oraz z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem silikonowym zestawiono w tab. 3.5.

Tab. 3.5. Porównanie wartości maksymalnych przyrostów ciśnień w rurociągu bez przewodu i z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym.

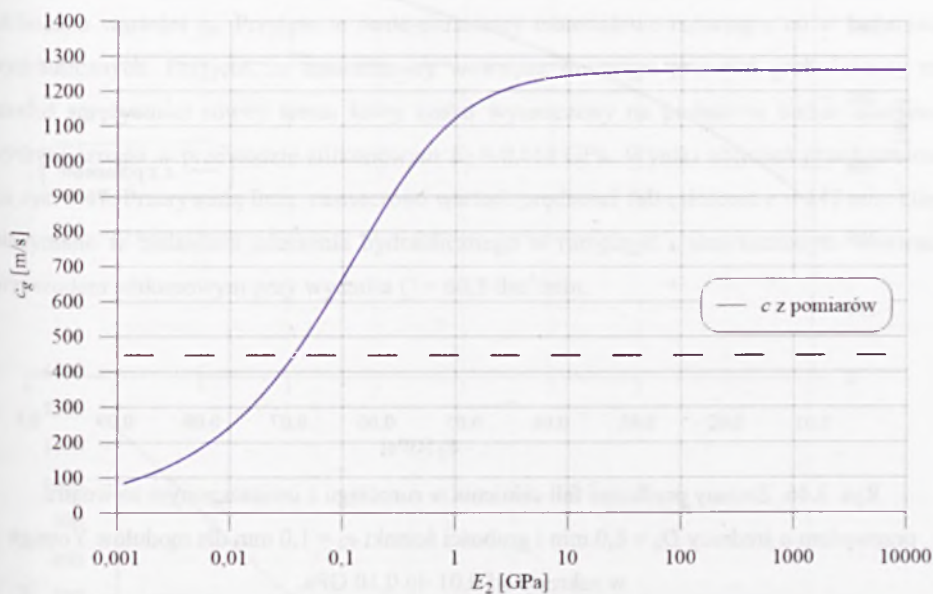
Table 3.5. Comparison of maximum pressure increases in a pipeline without and with inserted silicon conduit.

Rurociąg bez przewodu		Rurociąg z przewodem silikonowym		$\Delta p_{sil} / \Delta p_{bez}$ [%]
Q_{bez} [dm ³ /min]	Δp_{bez} [MPa]	Q_{sil} [dm ³ /min]	Δp_{sil} [MPa]	
40,3	0,357	40,4	0,171	47,9
49,8	0,453	49,7	0,202	44,6
60,2	0,563	60,5	0,229	40,7

Umieszczenie grubościennego przewodu silikonowego znacząco zmniejsza maksymalne przyrosty ciśnienia wywołane zjawiskiem uderzenia hydraulicznego (tab. 3.3). Dla każdego badanego przepływu, przyrosty ciśnień w rurociągu z przewodem silikonowym stanowiły mniej niż połowę przyrostu ciśnienia w rurociągu bez przewodu dla tego samego wydatku. Największą redukcję fali ciśnienia względem rurociągu bez przewodu otrzymano dla największego przepływu – przyrost ciśnienia w rurociągu z przewodem silikonowym stanowi 40,7% przyrostu ciśnienia w rurociągu bez przewodu. W każdym następnym doświadczeniu stosunek przyrostu ciśnienia w rurociągu z przewodem silikonowym do przyrostu ciśnienia w rurociągu bez przewodu był coraz większy. Ma to związek ze wzrostem prędkości fali ciśnienia zaobserwowanym podczas doświadczeń.

W celu weryfikacji wyprowadzonej w rozdziale zależności 3.2.5 zależności (3.83), obliczono wartości prędkości fali ciśnienia c_g w rurociągu z umieszczonym wewnątrz silikonowym przewodem grubościennym. Przyjęto średnicę rurociągu $D_1 = 0,0531$ m, grubość ścianki rurociągu $e_1 = 0,0035$ m, średnicę przewodu grubościennego $D_2 = 0,008$ m i grubość ścianki przewodu $e_2 = 0,001$ m. Założono również, że moduł sprężystości rurociągu jest równy temu, który odpowiada prędkości fali ciśnienia w rurociągu bez przewodu $E_1 = 119,3$ GPa. Obliczone prędkości fali ciśnienia w funkcji modułu sprężystości przewodu E_2 pokazano na rys. 3.45. Czarną przerywaną linią zaznaczono wartość prędkości fali ciśnienia $c = 447$ m/s.

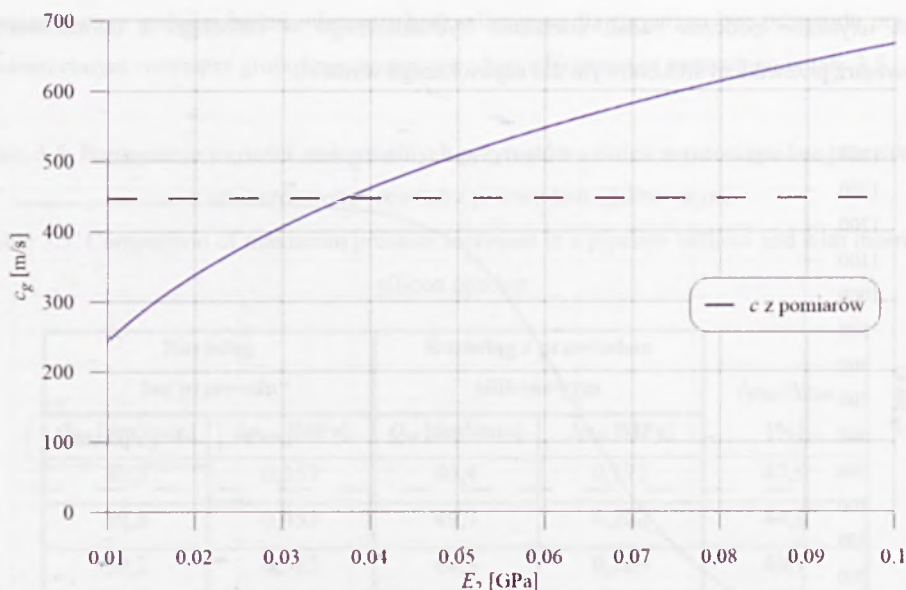
jaką uzyskano podczas badań uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym dla największego wydatku.



Rys. 3.45. Wartości prędkości fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy $D_2 = 8,0$ mm i grubości ścianki $e_2 = 1,0$ mm dla różnej sprężystości ścianki przewodu.

Fig. 3.45. Values of the pressure wave velocity in a pipeline with inserted conduit with diameter $D_2 = 8,0$ mm and the wall thickness $e_2 = 1,0$ mm for different Young's modulus of the conduit.

Dla zadanych wymiarów geometrycznych i parametrów materiałowych, prędkość fali ciśnienia obliczona na podstawie zależności (3.83) jest równa tej z pomiarów, gdy moduł Younga grubościennego przewodu wynosi $E_2 \approx 0,05$ GPa (rys. 3.45). W celu zilustrowania jak zmieniają się wartości prędkości fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem dla niewielkich wartości modułu sprężystości przewodu, wykonano obliczenia, których wyniki przedstawiono na rys. 3.46.

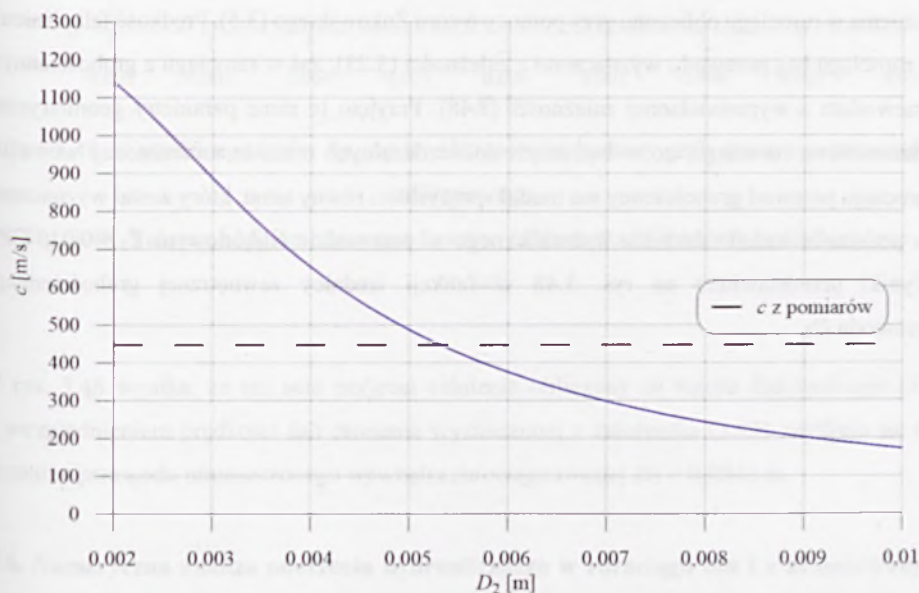


Rys. 3.46. Zmiany prędkości fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy $D_2 = 8,0$ mm i grubości ścianki $e_2 = 1,0$ mm dla modułów Younga w zakresie od 0,01 do 0,10 GPa.

Fig. 3.46. Changes of the pressure wave velocity in a pipeline with an inserted conduit with diameter $D_2 = 8,0$ mm and the wall thickness $e_2 = 1,0$ mm as a function of Young's modulus of the conduit in the range of 0.01 to 0.10 GPa.

Z rys. 3.46 wynika, że prędkość fali ciśnienia obliczona na podstawie zależności (3.83) $c = 447$ m/s jest równa wartości otrzymanej podczas badań hydraulicznych przy największym wydatku dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym, gdy moduł sprężystości umieszczonego wewnątrz przewodu wynosi $E_2 = 0,037$ GPa. Z przeprowadzonych badań uderzenia hydraulicznego w grubościennym przewodzie silikonowym (rozdz. 3.4) wynika, że moduł sprężystości tego przewodu wynosi $E_2 = 0,010$ GPa. Różnica ta ma związek ze zmieniającą się prędkością fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym wyznaczoną podczas badań hydraulicznych. Należy zwrócić uwagę, że średnicę i grubość ścianki przewodu silikonowego mierzono w warunkach ciśnienia atmosferycznego (przy zerowym nadeisnieniu). Umieszczenie silikonowego przewodu o niskim module sprężystości w obszarze ciśnieniowego przepływu wody mogło spowodować redukcję jego pola przekroju. Prowadzi to w konsekwencji do tego, że podczas zjawiska uderzenia

hydraulicznego, przewód silikonowy ma w rzeczywistości mniejszy wpływ na redukcję prędkości fali ciśnienia. W celu zilustrowania jak zmienia się wartość prędkości fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz grubościennym przewodem, z zależności (3.83) obliczono wartości c_g . Przyjęto te same parametry materiałowe rurociągu, co w badaniach hydraulicznych. Przyjęto, że umieszczony wewnątrz rurociągu przewód grubościenny ma moduł sprężystości równy temu, który został wyznaczony na podstawie badań uderzenia hydraulicznego w przewodzie silikonowym $E_2 = 0,010$ GPa. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 3.47. Przerywaną linią, zaznaczono wartość prędkości fali ciśnienia $c = 447$ m/s, którą otrzymano w badaniach uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym przy wydatku $Q = 60,5$ dm³/min.

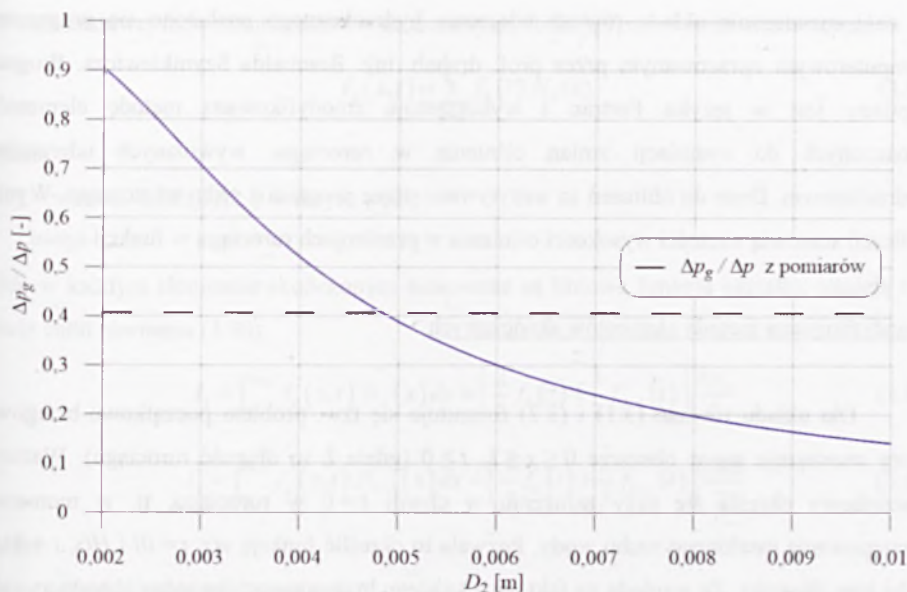


Rys. 3.47. Wartości prędkości fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o module Younga $E_2 = 0,010$ GPa i grubości ścianki $e_2 = 0,001$ m dla różnych średnic przewodu.

Fig. 3.47. Values of the pressure wave velocity in a pipeline with inserted conduit of the Young's modulus $E_2 = 0,010$ GPa and the wall thickness $e_2 = 0,001$ m for different conduit diameters.

Z rys. 3.47 wynika, że prędkość fali ciśnienia obliczona na podstawie zależności (3.83) jest równa wartości otrzymanej podczas badań hydraulicznych przy największym wydatku dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym wtedy, gdy średnica umieszczonego wewnątrz przewodu wynosi $D_2 = 0,0054$ m.

Umocowany wewnątrz rurociągu przewód zmniejsza pole przekroju strumienia i zwiększa średnią prędkość przepływu wody przy tym samym wydatku. Ma to wpływ na większe maksymalne przyrosty ciśnienia występujące podczas zjawiska uderzenia hydraulicznego. W celu porównania wpływu umieszczenia przewodu silikonowego na maksymalne przyrosty ciśnienia wywołane uderzeniem hydraulicznym, obliczono stosunki $\Delta p_g/\Delta p$, gdzie Δp_g oznacza maksymalny przyrost ciśnienia w rurociągu z grubościennym przewodem, zaś Δp maksymalny przyrost ciśnienia w rurociągu bez przewodu. Przyrosty ciśnienia w rurociągu obliczono przy pomocy wzoru Żukowskiego (3.5). Prędkość fali ciśnienia w rurociągu bez przewodu wyznaczono z zależności (3.23), zaś w rurociągu z grubościennym przewodem z wyprowadzonej zależności (3.48). Przyjęto te same parametry geometryczne i materiałowe rurociągu, co w badaniach doświadczalnych oraz, że umieszczony wewnątrz rurociągu przewód grubościenny ma moduł sprężystości równy temu, który został wyznaczony na podstawie badań uderzenia hydraulicznego w przewodzie silikonowym $E_2 = 0,010$ GPa. Wyniki przedstawiono na rys. 3.48 w funkcji średnicy zewnętrznej grubościennego przewodu D_2 .



Rys. 3.48. Wartości stosunków $\Delta p_g/\Delta p$ w zależności od średnicy grubościennego przewodu silikonowego.

Fig. 3.48. Values of $\Delta p_g/\Delta p$ ratios as a function of diameter of the thick-walled silicone conduit.

Z rys. 3.48 wynika, że ten sam przyrost ciśnienia obliczony ze wzoru Żukowskiego (3.5) z uwzględnieniem prędkości fali ciśnienia wyznaczonej z zależności (3.83) uzyskuje się dla średnicy przewodu umieszczonego wewnątrz rurociągu równej $D_2 = 0,0049$ m.

3.6. Numeryczna analiza uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez i z zamocowanym wewnątrz przewodem

3.6.1. Opis programu

Uderzenie hydrauliczne opisywane jest równaniami (3.1) i (3.2), tworzącymi układ quasi-liniowych równań różniczkowych cząstkowych pierwszego rzędu typu hiperbolicznego. Zmienne w czasie i przestrzeni parametry fizyczne strumienia wody uniemożliwiają znalezienie rozwiązań analitycznych układu nawet dla niezbyt złożonych warunków. Możliwe jest jednak znalezienie rozwiązań przy pomocy metod numerycznych (Szymkiewicz R., 2003).

W celu rozwiązania układu równań uderzenia hydraulicznego posłużono się programem komputerowym opracowanym przez prof. dr hab. inż. Romualda Szymkiewicza. Program napisany jest w języku Fortran i wykorzystuje zmodyfikowaną metodę elementów skończonych do symulacji zmian ciśnienia w rurociągu, wywołanych uderzeniem hydraulicznym. Dane do obliczeń są wczytywane przez program z pliku tekstowego. Wyniki obliczeń stanowią wartości wysokości ciśnienia w przekrojach rurociągu w funkcji czasu.

Zmodyfikowana metoda elementów skończonych

Dla układu równań (3.1) i (3.2) formułuje się tzw. problem początkowo-brzegowy, który rozwiązuje się w obszarze $0 \leq x \leq L$, $t \geq 0$ (gdzie L to długość rurociągu). Warunek początkowy określa się przy założeniu w chwili $t=0$ w rurociągu, tj. w momencie występowania ustalonego ruchu wody. Pozwala to określić funkcję $v(x, t=0)$ i $H(x, t=0)$ na całej jego długości. Ze względu na fakt, że z każdego brzegu rurociągu jedna charakterystyka wchodzi do obszaru rozwiązania, na brzegach $x=0$ i $x=L$, tzn. na początku i na końcu rurociągu należy zadać funkcję $v(t)$, albo $H(t)$. Warunki zadane na brzegach fizycznych nazywa się warunkami brzegowymi. Zespół warunków początkowych i brzegowych stanowi warunki graniczne (Kącki E., 1992).

Zgodnie z procedurą Galerkina (Zienkiewicz O.C., 1972) rozwiązanie równań (3.1) i (3.2) powinno spełniać następujący warunek:

$$\int_0^L \Omega(f_a, \dots) N dx = \sum_k^{M-1} \int_{x_k}^{x_{k+1}} \Omega(f_a, \dots) N dx = 0 \quad (3.90)$$

gdzie:

Ω – symboliczny zapis równań (3.1) i (3.2),

f_a – przybliżenie każdej funkcji $f(x, t)$ występujących w równaniach (3.1) i (3.2),

$N(x)$ – wektor liniowych funkcji kształtu,

k – numer węzła,

M – liczba węzłów.

W standardowej metodzie elementów skończonych, funkcję $f(x,t)$ wyraża się następująco:

$$f_a(x,t) = \sum_{k=1}^M f_k(t) N_k(x) \quad (3.91)$$

gdzie:

$f_k(t)$ – wartość funkcji $f(x,t)$ w k -tym węźle.

Gdy w każdym elemencie skończonym stosowane są liniowe funkcje kształtu, istnieją tylko dwie całki równania (3.90):

$$I_1 = \int_{x_k}^{x_{k+1}} f_a(x,t) N_k(x) dx = \left(\frac{2}{3} f_k(t) + \frac{1}{3} f_{k+1}(t) \right) \frac{\Delta x_k}{2} \quad (3.92)$$

$$I_2 = \int_{x_k}^{x_{k+1}} f_a(x,t) N_{k+1}(x) dx = \left(\frac{1}{3} f_k(t) + \frac{2}{3} f_{k+1}(t) \right) \frac{\Delta x_k}{2} \quad (3.93)$$

gdzie:

Δx_k – odległość pomiędzy węzłami.

W programie zastosowano modyfikację, polegającą na wyrażeniu przybliżonej wartości funkcji $f_a(x,t)$ poprzez średnią wartość funkcji w danym elemencie $f_c(t)$. Stąd:

$$I_1 = \int_{x_k}^{x_{k+1}} f_a(x,t) N_k(x) dx = f_c(t) \int_{x_k}^{x_{k+1}} N_k(x) dx = f_c(t) \frac{\Delta x_k}{2} \quad (3.94)$$

$$I_2 = \int_{x_k}^{x_{k+1}} f_a(x,t) N_{k+1}(x) dx = f_c(t) \int_{x_k}^{x_{k+1}} N_{k+1}(x) dx = f_c(t) \frac{\Delta x_k}{2} \quad (3.95)$$

Średnią wartość funkcji $f_c(t)$ dla danego elementu z równania (3.94) można zapisać:

$$f_c(t) = \omega f_k(t) + (1-\omega) f_{k+1}(t) \quad (3.96)$$

Zaś dla równania (3.95):

$$f_c(t) = (1-\omega) f_k(t) + \omega f_{k+1}(t) \quad (3.97)$$

gdzie ω jest parametrem wagowym przyjmującym wartości od 0 do 1.

Stąd równania (3.94) i (3.95) można wyrazić w następującej postaci:

$$I_1 = \left(\omega f_k(t) + (1-\omega) f_{k+1}(t) \right) \frac{\Delta x_k}{2} \quad (3.98)$$

$$I_2 = \left((1-\omega) f_k(t) + \omega f_{k+1}(t) \right) \frac{\Delta x_k}{2} \quad (3.99)$$

Po rozpisaniu całek we wszystkich elementach zgodnie z równaniem (3.90) otrzymuje się układ równań różniczkowych, który w postaci macierzowej można zapisać w sposób następujący:

$$S \frac{dX}{dt} + CX = 0 \quad (3.100)$$

gdzie:

S – macierz stała (symetryczna i pasmowa),

C – macierz zmiennych (asymetryczna i pasmowa),

$X = (v_1, H_1, v_2, H_2, \dots, v_M, H_M)^T$ – wektor niewiadomych v i H w poszczególnych węzłach,

$\frac{dX}{dt} = \left(\frac{dv_1}{dt}, \frac{dH_1}{dt}, \dots, \frac{dv_M}{dt}, \frac{dH_M}{dt} \right)^T$ – wektor pochodnych po czasie,

T – symbol transpozycji.

Do rozwiązywania tego typu równań różniczkowych najlepiej jest stosować metody absolutnie stabilne, które można opisać formułą:

$$(S + \Delta t \theta C_{j+1}) X_{j+1} = (S - \Delta t (1 - \theta) C_j) X_j \quad (3.101)$$

gdzie:

θ – parametr wagowy, $\theta \in (0; 1)$,

Δt – krok czasowy,

j – indeks czasu.

Równanie (3.101) musi być uzupełnione o następujące warunki brzegowe:

- stała wysokość ciśnienia $H_1 = \text{const}$ na początku przewodu ($k = 1$)

- prędkość przepływu wody na końcu przewodu po zamknięciu zaworu (w czasie $t > t_z$,

gdzie t_z – czas zamykania zaworu) jest zerowa $v(t) = 0$.

Prędkość przepływu wody w czasie $t \leq t_z$ zależy od rodzaju zaworu (Streeter V.L., Lai Ch., 1962). W programie przyjęto związek pomiędzy prędkością w przekroju zaworu a wysokością ciśnienia wg zależności (Limmer J., 1974, Mambretti S., 2014, Niełacny M., 2002.):

$$v(t) = \tau v_0 \sqrt{\frac{H(t)}{H_0}} \quad (3.102)$$

gdzie:

v_0, H_0 – prędkość oraz wysokość ciśnienia w przekroju zamknięcia w czasie ustalonym,

τ – funkcja zależna od charakterystyki zaworu.

Funkcję τ można wyrazić w sposób następujący

$$\tau = \left(1 - \frac{t_c}{t}\right)^m \quad (3.103)$$

Wykładnik m zależy od rodzaju armatury zaporowej. W programie przyjęto wartość charakterystyczną dla zaworów kulowych $m = 2$ (Limmer J., 1974, Niełacny M., 2002).

Dyssypacja energii sprężystej wody i rurociągu

Laboratoryjne badania uderzenia hydraulicznego prowadzone przez wielu badaczy (Axworthy D.H. i inni, 2000, Zielke W., 1968) dowodzą, że rzeczywiste tłumienie zjawiska uderzenia hydraulicznego jest dużo silniejsze, niż uzyskane z obliczeń numerycznych, w których do opisu tarcia w różniczkowym równaniu ruchu stosuje się formułę Darcy'ego-Weisbacha. W wielu obecnie prowadzonych badaniach dotyczących uderzenia hydraulicznego podkreśla się, że obok lepkości płynu i chropowatości ścianki rurociągu istnieją jeszcze inne, nieuwzględniane czynniki, związane m. in. z nie w pełni sprężystymi właściwościami samego przewodu. Uwzględnienie tych czynników przejawia się w różnych sposobach rozwiązania zagadnienia dyssypacji energii podczas uderzenia hydraulicznego.

Wykorzystany w pracy program obliczeniowy w równaniu ciągłości (3.1) uwzględnia zmienną prędkość fali ciśnienia (Mitosek M. i Szymkiewicz R., 2012). Przy wyjaśnieniu tego problemu korzysta się z równania bilansu energii i pracy dla rurociągu bez przewodu (Streeter V.L., 1958, Karney B.W., 1990):

$$E_k = E_{sc} + E_{sp} \quad (3.104)$$

gdzie:

E_k – zmiana energii kinetycznej strumienia cieczy [J],

E_{sc} – zmiana energii sprężystej strumienia cieczy [J],

E_{sp} – zmiana energii sprężystej rurociągu [J].

Zakłada się, że ciecz oraz materiał, z jakiego wykonany jest rurociąg są idealnie sprężyste. W rzeczywistości, podczas wzrostu ciśnienia wody wywołanego nagłym zamknięciem zaworu, część energii (oznaczonej symbolem E_{dys}) zostaje wytracona na skutek dyssypacji. Po jej uwzględnieniu równanie bilansu energii i pracy przyjmuje postać:

$$E_k = E_{sc} + E_{sp} + E_{dys} \quad (3.105)$$

Zakłada się, że energia E_{dyss} stanowi jedynie część energii sprężystej cieczy i rurociągu. Wprowadzono współczynnik β_1 zdefiniowany następująco:

$$\beta_1 = \frac{E_{dyss}}{E_{sc} + E_{sp}} \quad (3.106)$$

Po jego uwzględnieniu w zależności (3.105) przyjmuje postać:

$$E_k = (1 + \beta_1)(E_{sc} + E_{sp}) \quad (3.107)$$

Składniki bilansu energii (3.104) opisują zależności odpowiednio (3.50), (3.52) i (3.60). Po ich wprowadzeniu do równania (3.107) otrzymuje się zależność:

$$\rho v_0^2 = (1 + \beta_1) \Delta p^2 \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{Ee} \right) \quad (3.108)$$

Wyznaczony z równania (3.107) przyrost ciśnienia Δp można zapisać:

$$\Delta p = v_0 \rho \cdot \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \beta_1} \sqrt{1 + \frac{KD}{Ee}}} \quad (3.109)$$

Po wprowadzeniu zależności Kortewega (3.23) na prędkość fali ciśnienia c , zależność (3.109) przyjmuje postać:

$$\Delta p = v_0 \cdot \rho \cdot c_1 \quad (3.110)$$

gdzie:

$$c_1 = \frac{c}{\sqrt{1 + \beta_1}} \quad (3.111)$$

Wyprowadzona w ten sposób zależność (3.109) stanowi modyfikację wzoru Żukowskiego (3.5) i wynika z wprowadzenia energii dyssypacji E_{dyss} do bilansu energii i pracy. Ponieważ $\beta_1 > 0$, zmodyfikowana prędkość fali c_1 będzie zawsze mniejsza od tej uzyskanej przy pomocy wzoru Kortewega (3.23). To oznacza, że ze względu na dyssypację energii, zaburzenie ciśnienia w rurociągu w fazie kompresji (przyrostu ciśnienia) rozprzestrzenia się wolniej, niż wynikałoby to z klasycznej teorii uderzenia hydraulicznego.

Dotychczasowe rozważania dotyczyły fazy kompresji, kiedy ciśnienie wody w rurociągu rosło. W fazie dekompresji, w której następuje wzrost prędkości wody i spadek ciśnienia, zmagazynowana na skutek sprężystości wody i rurociągu energia, zostaje przekształcona w energię kinetyczną strumienia cieczy. Ze względu na dyssypację energii, tylko jej część zostaje zwrócona. Dlatego równanie bilansu energii i pracy przyjmuje postać:

$$E_k = E_{sc} + E_{sp} - E_{dyss} \quad (3.112)$$

Część energii zwróconej (przekształconej) definiuje się tak samo jak w zależności (3.106), przy czym współczynnik korygujący oznaczono symbolem β_2 :

$$E_k = (1 - \beta_2)(E_{sc} + E_{sp}) \quad (3.113)$$

Po przekształceniach jak dla fazy kompresji ostatecznie otrzymuje się zależność na zmodyfikowaną prędkość fali ciśnienia c_2 :

$$c_2 = \frac{c}{\sqrt{1 - \beta_2}} \quad (3.114)$$

Ponieważ $\beta_2 > 0$, zmodyfikowana prędkość fali w fazie dekompresji c_2 będzie zawsze większa od tej uzyskanej przy pomocy wzoru Kortewega (3.23).

W wykorzystywanym w pracy programie zastosowano modyfikację, polegającą na przyjmowaniu różnej wartości prędkości fali ciśnienia w fazie kompresji i w fazie dekompresji, które zostały uwzględnione w różniczkowym równaniu ciągłości (3.1). Prędkości fali ciśnienia obliczone dla poszczególnych faz były wyznaczane na podstawie współczynników korygujących β_1 i β_2 . Wartości tych współczynników poszukiwano w oparciu o przyjęte kryterium zgodności obliczonych wartości ciśnień z pomierzonymi. Wyznaczenie wartości tych współczynników było celem opisanych dalej obliczeń numerycznych.

3.6.2. Obliczenia numeryczne

Przed uruchomieniem programu, utworzono plik tekstowy zawierający dane wykorzystywane w obliczeniach. Dane do obliczeń stanowiły:

- współczynnik strat na wlocie rurociągu $\xi = 1$,
- średnia prędkość przepływu wody w ruchu ustalonym,
- czas zamykania odpływu,
- prędkość fali ciśnienia,
- wysokość ciśnienia przed inicjacją zjawiska,
- długość czasu, w jakim odtwarza się zjawisko $t = 15$ s,
- długość rurociągu $L = 48$ m,
- średnicę rurociągu $D = 0,0531$ m,
- chropowatość bezwzględną powierzchni ścianki rurociągu $k = 5,5 \cdot 10^{-5}$ m,
- krok całkowania w czasie $dt = 0,001$,
- liczbę elementów skończonych równą 49,
- wartości parametrów wagowych $\omega = \theta = 0,55$,

- współczynniki korygujące prędkość fali ciśnienia.

Zbieżność rozwiązania zapewniały wartości parametrów wagowych (Szymkiewicz R. i Mitosek M., 2005). Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone dla każdego doświadczenia z badań hydraulicznych. W obliczeniach zakładano różne wartości współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia β_1 i β_2 , w taki sposób, aby uzyskać największą zgodność obliczonych ciśnień z rzeczywistym przebiegiem zmian ciśnienia zarejestrowanym podczas pomiarów hydraulicznych.

Do oceny zgodności obliczonych wartości ciśnień z wartościami pomierzonymi, wykorzystywano wartości ekstremów ciśnień występujących w kolejnych oscylacjach. Do rozstrzygania o zgodności wyników obliczeń z obserwacjami powszechnie korzysta się z odchylenia procentowego (Moriasi D.N. i inni, 2007). Odchylenie procentowe (percent bias) PBIAS ocenia, czy wyniki uzyskane z obliczeń numerycznych są większe, bądź mniejsze, od pomierzonych na modelu doświadczalnym (Gupta H.V. i inni, 1999) – zależność (3.115):

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \cdot 100 \%}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \quad (3.115)$$

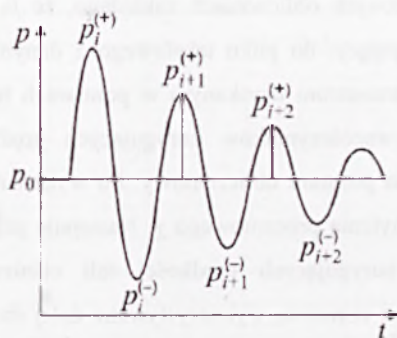
gdzie:

Y_i^{obs} – wartość z pomiarów,

Y_i^{sim} – wartość z obliczeń numerycznych.

W przypadku całkowitej zgodności wartości z pomiarów i wartości z obliczeń, odchylenie procentowe PBIAS przyjmuje 0 wartość. W przypadku, gdy $PBIAS > 0$, wartości z pomiarów są wyższe od tych uzyskanych z obliczeń.

Na potrzeby analizy uderzenia hydraulicznego, wprowadzono pojęcie bezwzględnej odchylenia procentowego, które stanowi średnią arytmetyczną z wartości bezwzględnej PBIAS obliczonej oddzielnie dla ekstremów dodatnich i ujemnych – rys. 3.49.



Rys. 3.49. Opis oznaczeń stosowany w zależności (3.115).

Fig. 3.49. Explanation of the symbols used in formula (3.115).

Bezwzględne odchylenie procentowe oznaczono symbolem χ i opisano w nawiązaniu do rys. 3.49:

$$\chi = \frac{1}{2} \left(\left| \frac{\sum_{i=1}^n (p_i^{dosw(+)} - p_i^{num(+)})}{\sum_{i=1}^n (p_i^{dosw(+)})} \right| + \left| \frac{\sum_{i=1}^n (p_i^{dosw(-)} - p_i^{num(-)})}{\sum_{i=1}^n (p_i^{dosw(-)})} \right| \right) \cdot 100 \% \quad (3.116)$$

gdzie:

$p_i^{dosw(+)}$ – wartość i-tego dodatniego ekstremum ciśnienia uzyskanego na podstawie doświadczeń hydraulicznych [Pa],

$p_i^{dosw(-)}$ – wartość i-tego ujemnego ekstremum ciśnienia uzyskanego na podstawie doświadczeń hydraulicznych [Pa],

$p_i^{num(+)}$ – wartość i-tego dodatniego ekstremum ciśnienia uzyskanego na podstawie obliczeń numerycznych [Pa],

$p_i^{num(-)}$ – wartość i-tego ujemnego ekstremum ciśnienia uzyskanego na podstawie obliczeń numerycznych [Pa].

Bezwzględne odchylenie procentowe χ jest tym mniejsze, im wyższa jest zgodność wartości z obliczeń numerycznych z wartościami z pomiarów. W przypadku całkowitej zgodności wyników pomiarów i obliczeń numerycznych bezwzględne odchylenie procentowe $\chi = 0$.

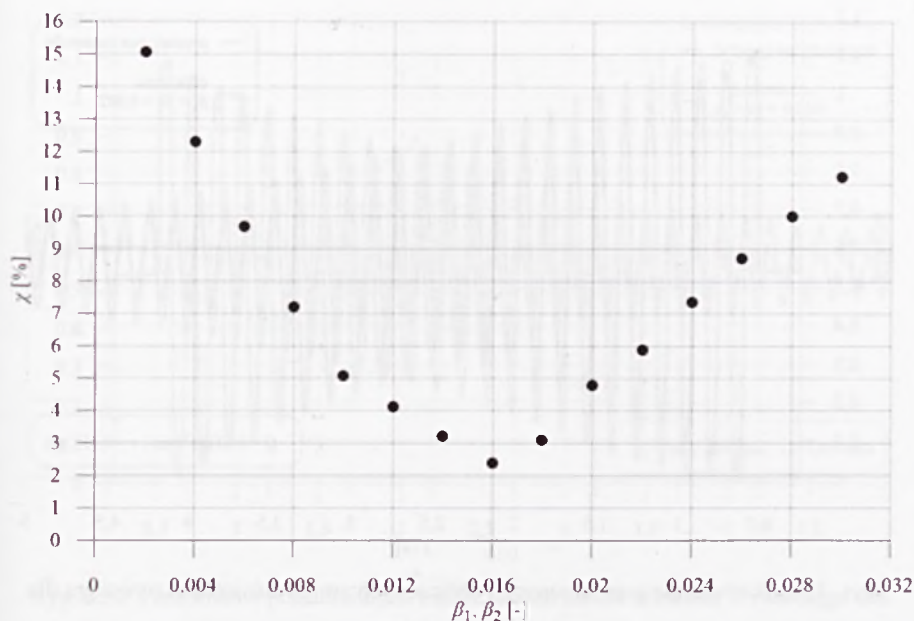
Jak już wspomniano, celem przeprowadzonych obliczeń numerycznych, było wyznaczenie wartości współczynników β_1 i β_2 , które dawałyby największą zgodność ciśnień obliczonych z ciśnieniami z pomiarów.

We wszystkich przeprowadzonych obliczeniach zakładano, że $\beta_1 = \beta_2$ (Mitosek M., 2012). Przebieg obliczeń był następujący: do pliku tekstowego z danymi wprowadzano warunki graniczne, odpowiadające parametrom uzyskanym w pomiarach hydraulicznych. Następnie zakładano niskie wartości współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia, np. $\beta_1 = \beta_2 = 0,002$ i uruchamiano program obliczeniowy. Po wykonaniu obliczeń, wyznaczano wartość bezwzględnego odchylenia procentowego χ . Następnie przyjmowano nieco wyższe wartości współczynników korygujących prędkości fali ciśnienia, np. $\beta_1 = \beta_2 = 0,004$ i ponownie obliczano wartości ciśnienia, wykorzystywane dalej do obliczeń bezwzględnego odchylenia procentowego χ . Korektę wartości współczynników i obliczenia powtarzano do momentu, w którym kolejne zwiększanie wartości współczynników β_1 i β_2 powodowało wzrost wartości bezwzględnego odchylenia procentowego χ . W ten sposób przeprowadzono obliczenia numeryczne dla wszystkich wykonanych pomiarów w hydraulicznych doświadczeniach uderzenia hydraulicznego bez i z umocowanymi wewnątrz przewodami.

Dla doświadczeń uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez przewodu oraz z umieszczonymi wewnątrz przewodami światłowodowymi, bezwzględne odchylenie procentowe χ obliczano dla 30 kolejnych dodatnich i ujemnych ekstremów (ok. pierwszych 4,5 sekund trwania zjawiska). Obliczenia we wszystkich doświadczeniach rozpoczynano od przyjęcia wartości współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia $\beta_1 = \beta_2 = 0,002$. W kolejnych obliczeniach wartości obu współczynników zwiększano o 0,002.

Ze względu na szybkie wygasanie oscylacji ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym, obliczenia bezwzględnego odchylenia procentowego χ , ograniczono do 6 kolejnych dodatnich i ujemnych ekstremów dla doświadczenia przy wydatkach 40 i 50 dm³/min, oraz do 8 kolejnych dodatnich i ujemnych ekstremów dla doświadczenia przy wydatku 60 dm³/min. Dla doświadczeń uderzenia hydraulicznego w rurociągu z przewodem silikonowym, współczynniki β_1 i β_2 przyjmowały znacznie wyższe wartości, stąd w pierwszym przybliżeniu zakładano $\beta_1 = \beta_2 = 0,01$, a następnie zwiększano ich wartości o 0,01.

W celu zilustrowania przebiegu obliczeń numerycznych, wartości bezwzględnego odchylenia procentowego χ wyznaczone dla kolejnych przybliżeń pokazano na wykresie w funkcji współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia β_1 i β_2 – rys. 3.50. Obliczenia zostały przeprowadzone dla doświadczenia uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu przy wydatku 60,2 dm³/min.

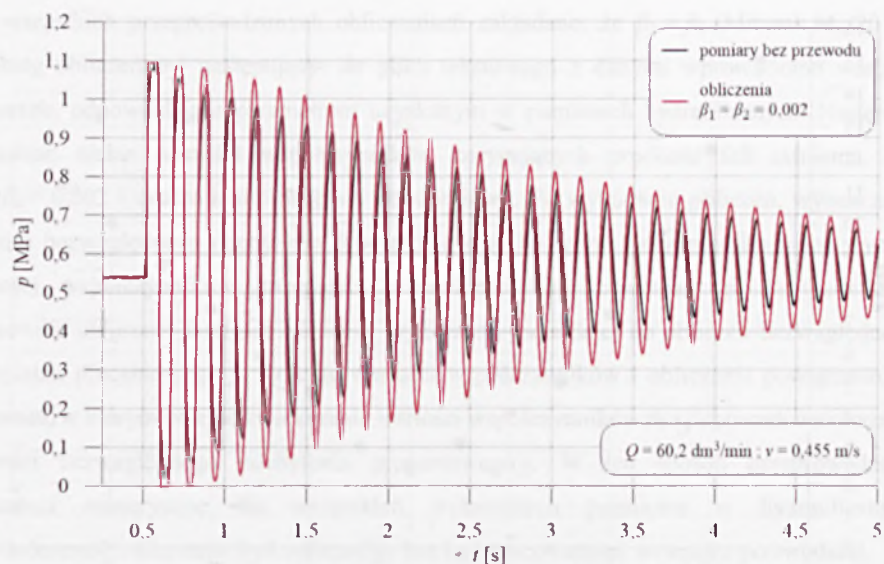


Rys. 3.50. Zmiany bezwzględnego odchylenia procentowego χ w zależności od wartości współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia β_1 i β_2 .

Fig. 3.50. Changes in the absolute percentage deviation χ as a function of the values of the coefficients β_1 and β_2 .

Z rys. 3.50 wynika, że największą zgodność obliczeń numerycznych z wynikami pomiarów uzyskano dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,016$. Wartość bezwzględnego odchylenia procentowego wynosi wówczas $\chi = 2,40\%$.

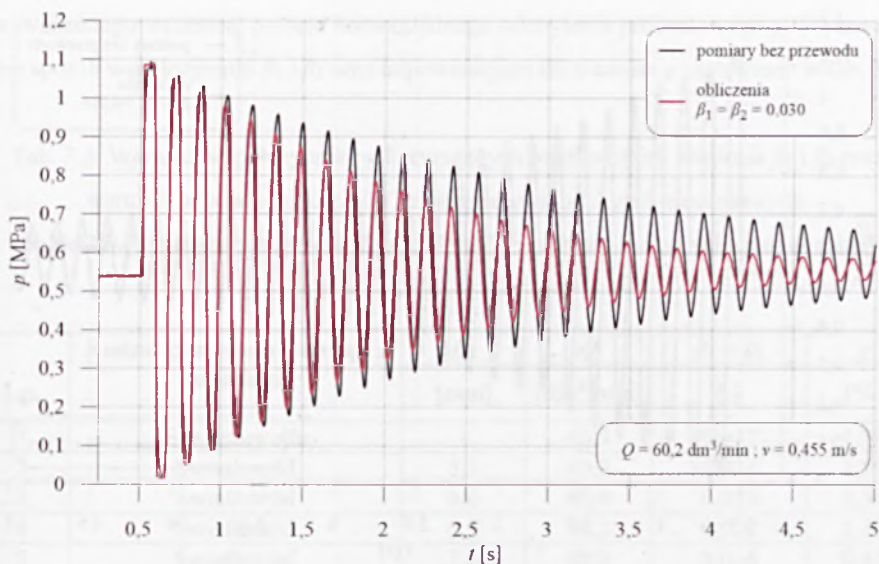
Na rys. 3.51-3.53 zestawiono przebiegi zmian ciśnienia uzyskanych przy pomocy obliczeń numerycznych dla różnych współczynników β_1 i β_2 z tymi, które zarejestrowano podczas pomiarów hydraulicznych. Kolorem czerwonym oznaczono wyniki obliczeń numerycznych, zaś kolorem czarnym, wyniki pomiarów z doświadczeń na modelu fizycznym.



Rys. 3.51. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,002$.

Fig. 3.51. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline for $\beta_1 = \beta_2 = 0,002$.

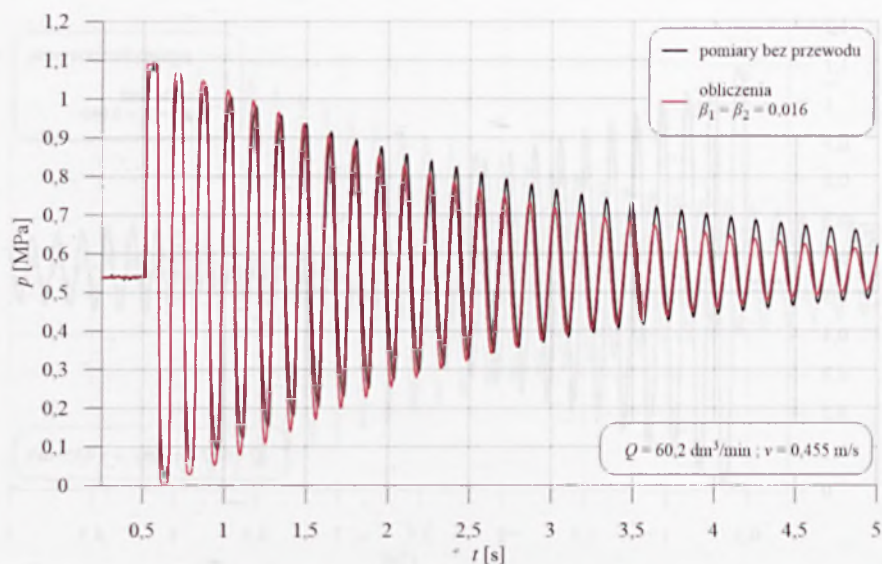
Na rys. 3.51 pokazano, że założone współczynniki korygujące prędkość fali ciśnienia $\beta_1 = \beta_2 = 0,002$ są zbyt niskie, tzn. kolejne dodatnie ekstrema ciśnienia są znacznie wyższe, zaś ujemne ekstrema niższe, niż te, które zarejestrowano podczas pomiarów. Dla przyjętych wartości współczynników β_1 i β_2 , wartość bezwzględnego odchylenia procentowego wynosi $\chi = 15,08\%$.



Rys. 3.52. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,030$.

Fig. 3.52. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline for $\beta_1 = \beta_2 = 0,030$.

Przyjęcie współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia $\beta_1 = \beta_2 = 0,030$ powoduje, że kolejne oscylacje ciśnienia uzyskane przy pomocy obliczeń numerycznych wygasają szybciej niż te, które zarejestrowano podczas pomiarów (rys. 3.52). Dla tak przyjętych współczynników β_1 i β_2 , wartość bezwzględnego odchylenia procentowego wynosi $\chi = 11,22\%$.



Rys. 3.53. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu dla

$$\beta_1 = \beta_2 = 0,016.$$

Fig. 3.53. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline for

$$\beta_1 = \beta_2 = 0,016.$$

Na rys. 3.53 przedstawiono zmiany ciśnienia obliczone dla założonych wartości współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia $\beta_1 = \beta_2 = 0,016$. Dla tak przyjętych współczynników uzyskano najwyższą zgodność obliczeń ciśnień z wynikami pomiarów i wartość bezwzględnego odchylenia procentowego równą $\chi = 2,40\%$.

Analogiczną analizę przeprowadzono dla wszystkich doświadczeń w wariantach badań uderzenia hydraulicznego. Wyniki obliczeń numerycznych w postaci wartości współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia β_1 i β_2 wraz z odpowiadającym im wartościom bezwzględnych odchylen procentowych χ zestawiono w rozdziale 3.6.3.

3.6.3. Wyniki obliczeń numerycznych i ich analiza

Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły na wyznaczenie wartości współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia β_1 i β_2 , których wprowadzenie do programu MES pozwoliły na uzyskanie najwyższej zgodności wyników obliczeń z pomiarami. Oceny zgodności wyników pomiarów i obliczeń numerycznych dokonywano przy pomocy

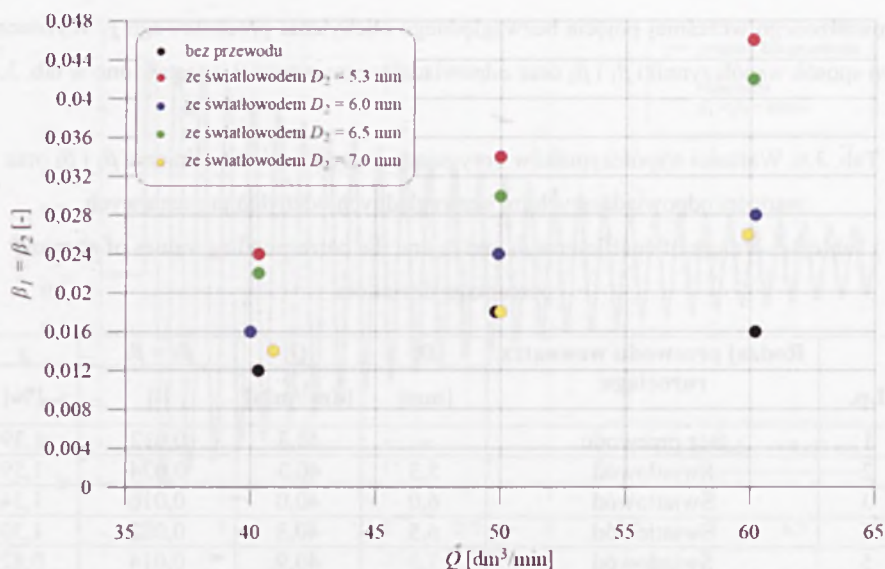
wprowadzonego wcześniej pojęcia bezwzględnego odchylenia procentowego χ . Wyznaczone w ten sposób współczynniki β_1 i β_2 oraz odpowiadające im wartości χ zestawiono w tab. 3.6.

Tab. 3.6. Wartości współczynników korygujących prędkości fali ciśnienia β_1 i β_2 oraz wartości odpowiadających im bezwzględnych odchyień procentowych.

Table 3.6. Values of coefficients β_1 and β_2 and the corresponding values of absolute percentage deviations

Lp.	Rodzaj przewodu wewnątrz rurociągu	D_2	Q	$\beta_1 = \beta_2$	χ
		[mm]	[dm ³ /min]	[-]	[%]
1	Bez przewodu	-	40,3	0,012	1,39
2	Światłowod	5,3	40,3	0,024	1,59
3	Światłowod	6,0	40,0	0,016	1,34
4	Światłowod	6,5	40,3	0,022	1,30
5	Światłowod	7,0	40,9	0,014	0,82
6	Silikonowy	8,0	40,4	0,220	2,18
7	Bez przewodu	-	49,8	0,018	2,00
8	Światłowod	5,3	50,0	0,034	1,78
9	Światłowod	6,0	49,9	0,024	1,42
10	Światłowod	6,5	50,0	0,030	1,70
11	Światłowod	7,0	50,0	0,018	0,90
12	Silikonowy	8,0	49,7	0,200	2,21
13	Bez przewodu	-	60,2	0,016	2,40
14	Światłowod	5,3	60,1	0,046	2,62
15	Światłowod	6,0	60,2	0,028	1,88
16	Światłowod	6,5	60,1	0,042	3,32
17	Światłowod	7,0	59,9	0,026	1,80
18	Silikonowy	8,0	60,5	0,220	2,14

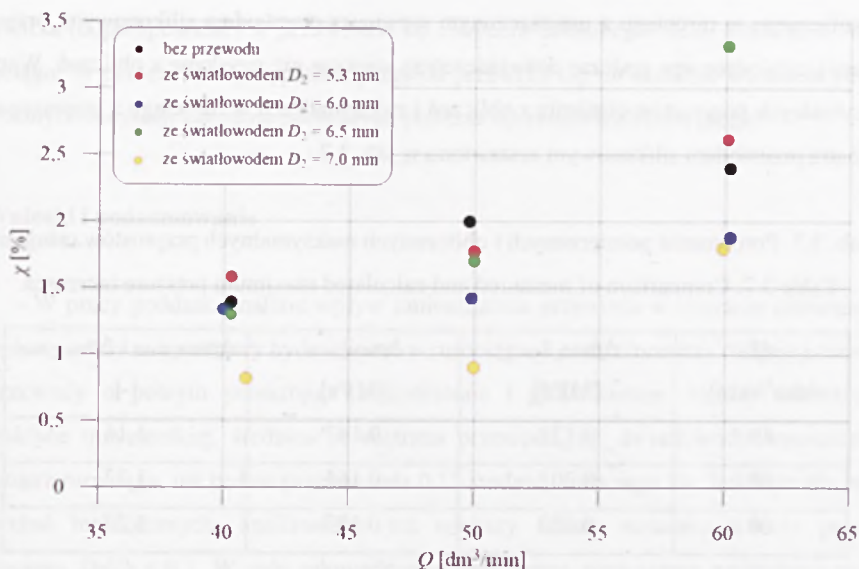
Wartości współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia β_1 i β_2 uzyskane dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym są o rząd wyższe od wartości otrzymanych dla rurociągu z przewodem światłowodowym oraz bez przewodu. Wynika to z faktu, że umieszczenie przewodu silikonowego wewnątrz rurociągu znacznie zmniejsza prędkość fali ciśnienia, redukuje maksymalne przyrosty ciśnienia, co skutkuje szybszym wygasaniem oscylacji. Współczynniki β_1 i β_2 przyjmują wartości 0,220 dla wydatku 40 i 60 dm³/min oraz 0,200 dla wydatku 50 dm³/min. Zmiany współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia β_1 i β_2 w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym oraz bez umieszczonego wewnątrz przewodu, w funkcji wydatku przedstawiono na rys. 3.54.



Rys. 3.54. Wartości wyznaczonych współczynników korygujących prędkości fali ciśnienia β_1 i β_2 w zależności od natężenia przepływu w rurociągu.

Fig. 3.54. Values of the determined coefficients β_1 and β_2 as a function of the volumetric flow rate in a pipeline.

Wartości współczynników β_1 i β_2 rosną wraz ze wzrostem wydatku we wszystkich doświadczeniach uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym. Dla każdego przepływu najniższe wartości współczynników β_1 i β_2 uzyskano dla rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu, zaś najwyższe dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym o średnicy 5,3 mm. Potwierdza to wnioski z poprzednich analiz, że ten światłowod ma największy wpływ na tłumienie kolejnych oscylacji ciśnienia wywołanych uderzeniem hydraulicznym. Obliczone wartości bezwzględnych odchyłeń procentowych χ w funkcji wydatku przedstawiono na rys. 3.55.



Rys. 3.55. Wartości względnych odchyłeń procentowych χ w zależności od natężenia przepływu w rurociągu.

Fig. 3.55. Values of the relative percentage deviations χ depending as a function of the volumetric flow rate in a pipeline.

Z rys. 3.55 wynika, że dla wszystkich rozpatrywanych wydatków, największą zgodność (najmniejszą wartość χ) uzyskiwano dla rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu (czarne znaczniki). W większości doświadczeń, wartości bezwzględnych odchyłeń procentowych rosną wraz ze wzrostem przepływu – zgodność wyników obliczeń numerycznych z wynikami pomiarów jest największa dla najmniejszych rozpatrywanych wydatków. Jedynie dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym, wartość χ dla wszystkich przepływów jest praktycznie taka sama (zielone znaczniki) i wynosi ok. 2,2%. Wszystkie obliczone wartości bezwzględnych odchyłeń procentowych nie przekraczają 3,4%. Obliczone zmiany ciśnienia oraz zarejestrowane podczas pomiarów hydraulicznych dla wszystkich rozpatrywanych wydatków zestawiono na rys. Z19-Z35 w załączniku. W praktyce inżynierskiej najistotniejszym parametrem uderzenia hydraulicznego jest maksymalny przyrost ciśnienia. Z rys. Z19-Z35 (załącznik) wynika, że dla doświadczeń uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonymi wewnątrz przewodami światłowodowymi oraz w rurociągu bez umieszczonego wewnątrz przewodu, obliczone maksymalne przyrosty ciśnienia są zgodne z wartościami z pomiarów hydraulicznych. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku uderzenia

hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym, przyrosty ciśnienia zarejestrowane podczas doświadczeń są większe niż uzyskane z obliczeń. Wartości maksymalnych przyrostów ciśnienia z obliczeń i z doświadczeń w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym zestawiono w tab. 3.7.

Tab. 3.7. Porównanie pomierzonych i obliczonych maksymalnych przyrostów ciśnienia.

Table 3.7. Comparison of measured and calculated maximum pressure increases.

Q [dm ³ /min]	Δp_{max_dosw} [MPa]	Δp_{max_num} [MPa]	$\Delta p_{max_dosw} / \Delta p_{max_num}$ [-]
40	0,171	0,147	1,16
50	0,202	0,165	1,22
60	0.229	0,187	1,22

gdzie:

Δp_{max_dosw} – pomierzone maksymalne przyrosty ciśnienia,

Δp_{max_num} – obliczone maksymalne przyrosty.

Obliczony maksymalny przyrost ciśnienia nie zależy od zadawanych wartości współczynników β_1 i β_2 , a jedynie od prędkości przepływu wody w ruchu ustalonym oraz prędkości fali ciśnienia. O prawidłowo wprowadzonej wartości prędkości fali ciśnienia świadczy fakt, że obliczone amplitudy ciśnienia na rys. Z24, Z30 i Z35 pokrywają się z pomierzonymi. Maksymalne przyrosty ciśnienia z obliczeń numerycznych są o ok. 20% niższe od pomierzonych (tab. 3.7). Różnica pomiędzy obliczonymi a pomierzonymi maksymalnymi przyrostami ciśnienia jest związana z faktem, że umieszczony w obszarze przepływu wody przewód, poddany działaniu wysokiego ciśnienia przewęża i wydłuża się. To powoduje zmniejszenie jego średnicy i tym samym zwiększenie grubości ścianki przewodu. Wyniki teoretycznych obliczeń, przedstawione na rys. 3.23-3.25, wykazują, że prędkość fali ciśnienia jest tym większa, im mniejsza jest średnica grubościennego przewodu umieszczonego wewnątrz rurociągu oraz rośnie wraz ze wzrostem grubości ścianki przewodu. Zwiększenie prędkości fali ciśnienia, powstałe wskutek przewężenia się przewodu, jest równoznaczne ze zwiększeniem przyrostów ciśnienia, występujących podczas zjawiska uderzenia hydraulicznego. To wskazuje, że gdy w obszarze ciśnieniowego przepływu wody w rurociągu umieści się przewód o dużo niższej sprężystości w porównaniu do sprężystości rurociągu, istotnym zagadnieniem staje się zwiększanie ciśnienia

powietrza (dopompowanie) w przewodzie do ciśnienia ustalonego ruchu strumienia wody w rurociągu. W przeciwnym przypadku, przewód przewęża się, co skutkuje wzrostem amplitud mierzonych oscylacji ciśnienia powstałych podczas uderzenia hydraulicznego.

4. Wnioski i podsumowanie

W pracy poddano analizie wpływ umieszczenia przewodu w obszarze ciśnieniowego przepływu wody na parametry hydrauliczne w rurociągu. Rozróżniono trzy rodzaje przewodów – przewody o pełnym przekroju, cienkościenne i grubościenne. Należy zauważyć, że w praktyce inżynierskiej, średnica zewnętrzna przewodu, np. światłowodu umieszczonego wewnątrz rurociągu, nie będzie przekraczała 0,15 średnicy rurociągu D_1 . Jednakże dla potrzeb rozważań teoretycznych, analizowano też większy zakres stosunku średnic przewodu i rurociągu $D_2/D_1 \leq 0,3$. W celu udowodnienia tezy pracy, rozważania podzielono na dwie części, odnoszące się do ustalonego i nieustalonego przepływu wody (uderzenia hydraulicznego). W każdej części wykonano analizy teoretyczne, numeryczne oraz pomiary na modelach fizycznych. Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

Przepływ ustalony w rurociągu

1. Teoretyczna analiza ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem przeprowadzona w oparciu o hipotezę Einsteina pozwala stwierdzić, że chropowatości wewnętrznej powierzchni rurociągu i zewnętrznej powierzchni przewodu mają niewielki wpływ na zmianę wartości współczynnika oporów liniowych i dyssypację energii w porównaniu z przepływem wody w rurociągu bez przewodu. Dominujący wpływ na obliczony współczynnik oporu i straty ciśnienia ma wzrost średnicy zewnętrznej przewodu w stosunku do średnicy wewnętrznej rurociągu.

2. Doświadczalna analiza przeprowadzona w strefie przejściowej turbulentnego przepływu wody wskazuje, że wartości wykładników potęgowych równań regresji utworzonych z pomiarów strat energii w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem w funkcji przepływu są w przybliżeniu równe 1,75. Jest to zgodne z wartościami podawanymi w literaturze dla przepływu w rurociągach bez przewodów.

3. W celu opisu przyrostu liniowych strat energii w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem h_{Lz} względem rurociągu bez przewodu h_{Lb} , w pracy zastosowano, wprowadzony przez autora, iloraz κ opisany zależnością (2.23) uzależnioną od średnic przewodu i rurociągu. Udział chropowatości zewnętrznej powierzchni przewodu w obwodzie zwilżonym jest niewielki, co sprawia, że umieszczenie przewodu wewnątrz rurociągu powoduje mało znaczące zmiany współczynnika oporów liniowych. Zastosowanie zaproponowanej metody pozwala na znaczące ułatwienie obliczeń przyrostu strat energii wywołanego umieszczeniem przewodu wewnątrz rurociągu, ponieważ wartość ilorazu κ zależy jedynie od stosunku średnic przewodu i rurociągu.

4. Na podstawie numerycznej analizy pola prędkości w przekroju strumienia w rurociągu przeprowadzonej programem CFD Fluent można stwierdzić, że wprowadzenie przewodu o średnicy nie większej niż $0,15 D_1$ ($D_2/D_1 \leq 0,15$), powoduje tylko nieznaczne zmniejszenie obszaru maksymalnej prędkości przepływu wody w przekroju.

Przepływ nieustalony w rurociągu

5. W ramach teoretycznej analizy nieustalonego przepływu wody w rurociągu wyprowadzone zostały, metodą bilansu masy oraz metodą bilansu energii i pracy, oryginalne zależności na prędkość rozprzestrzeniania się fali ciśnienia z umieszczonym wewnątrz pełnym, cienkościennym i grubościennym przewodem (tab. 3.1). Na ich podstawie wykazano, że umieszczenie przewodu o mniejszej sprężystości, w stosunku do sprężystości rurociągu, może mieć tłumiące oddziaływanie na zjawisko uderzenia hydraulicznego, tj. zmniejsza prędkość fali ciśnienia i maksymalne przyrosty ciśnienia. Odnosi się to zarówno do pełnych przewodów o kołowym przekroju, jak i cienkościennych oraz grubościennych przewodów, których przekrój poprzeczny stanowi pierścień. Zdolności tłumiące wszystkich typów przewodów są tym większe im większa jest ich średnica i im mniejszy jest ich moduł Younga. W przypadku przewodów cienkościennych i grubościennych znaczenie ma również grubość ich ścianki – im ona jest mniejsza tym bardziej tłumione będą oscylacje ciśnienia wywołane uderzeniem hydraulicznym.

6. Uzyskana w pomiarach prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym jest równa prędkości fali w rurociągu bez przewodu. Oznacza to, że wartości modułu sprężystości wszystkich wykorzystanych w pomiarach światłowodów spełniają warunek $E_2 \geq 10$ GPa.

7. Umieszczenie grubościennego przewodu silikonowego, którego średnica stanowi $D_2 = 0,15 D_1$, istotnie zmniejsza maksymalne przyrosty ciśnienia wywołane zjawiskiem uderzenia hydraulicznego. Przyrosty ciśnień w rurociągu z przewodem silikonowym nie przekraczały połowy przyrostu ciśnienia w rurociągu bez przewodu w doświadczeniach przy tym samym wydatku.

8. Numeryczną analizę przebiegu nieustalonego przepływu wody wykonano programem, który rozwiązuje równania uderzenia hydraulicznego zmodyfikowaną metodą elementów skończonych. W celu poprawy zgodności wyników obliczeń z pomiarami wskazano na konieczność wykorzystania współczynników β_1 i β_2 , korygujących prędkość fali ciśnienia w fazie wzrostu i spadku ciśnienia.

9. Przeprowadzone badania mają także bardzo istotne znaczenie praktyczne. Wprowadzenie przewodów światłowodowych do rurociągów transportujących ciecz, tylko nieznacznie zwiększa opory ruchu strumienia, a jednocześnie przyspiesza tłumienie fali ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego. Wprowadzenie przewodów światłowodowych np. do sieci wodociągowej pozwala nie tylko na wykorzystanie istniejącej infrastruktury miejskiej do prowadzenia przewodów sieci telekomunikacyjnej, ale także zapewnia ich ochronę przed uszkodzeniem. Znany jest przypadek uszkodzenia sieci światłowodowej podczas pożaru Mostu Łazienkowskiego, który miał miejsce w lutym 2015 r. w Warszawie. Umieszczenie tych przewodów w sieci wodociągowej niewątpliwie zabezpieczyłoby je przed zniszczeniem. Celowe jest, więc stosowanie tego rodzaju rozwiązania szczególnie w przeprawach mostowych. Rozwiązanie takie zostało zgłoszone, jako wniosek patentowy zatytułowany „Kanał światłowodowy z funkcją stabilizacji ciśnienia w rurociągu” (2017).

Istotne praktyczne znaczenie może mieć wprowadzenie do rurociągu transportującego ciecz przewodu powietrznego (w przypadku ropociągu przewodu wypełnionego np. azotem) o podwyższonej odkształcalności ścianek. Takie rozwiązanie pozwala radykalnie obniżyć przyrosty ciśnienia wywołane uderzeniem hydraulicznym i może stanowić istotną ochronę rurociągu przed tym zjawiskiem. Wykorzystanie tego rozwiązania w praktyce zostało zgłoszone, jako patent o nazwie „Dynamiczny stabilizator ciśnienia” (2017).

Spis literatury

- [1] Allievi L.: *Teoria del colpo d'ariete*. Atti Coll. Arch., Mediolan, 1913.
- [2] Allievi L.: *Teoria generale del moto perturbato dell'acqua nei tubi in pressione* (*General theory of perturbed flow of water in pressure conduits*. Annali della Societa degli Ingegneri ed Archietti Italiani, Mediolan, 1903.
- [3] Andrzejewski M., Szelał B.: *Metody układania kabli telekomunikacyjnych w obiektach infrastruktury podziemnej*. Inżynieria, Kraków, 2011.
- [4] Axworthy D. H., Ghidaoui M. S., McInnis D. A.: *Extendend Thermodynamics Derivation of Energy Dissipation in Unsteady Pipe Flow*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 126, 2000.
- [5] Bergant A., Simpson A. R., Vitovsky J.: *Development in unsteady pipe flow friction modelling*. Journal of Hydraulic Research, 39(3), 2001.
- [6] Bogusławski A., Drobniak S., Tyliczszak A.: *Turbulencja – od losowości do determinizmu*. Modelowanie Inżynierskie nr 36, 2008.
- [7] Brunone B., Bryan B. W., Mecarelli M., Ferrante M.: *Velocity profiles and unsteady pipe friction in transient flow*. Journal of Water Resources Planning and Management, 126(4), 2000.
- [8] Brunone B., Golia U. M., Greco M.: *Some remarks on the momentum equation for fast transients*. Proc. Int. Meeting on Hydraulic Transients with Column Separation, IAHR, Madryt, 1991.
- [9] Christensen, B.A.: *Discussion of "Limitations and Proper Use of the Hazen-Williams Equation"*. Journal of Hydraulic Engineering, 2000.
- [10] Colebrook C F: *Turbulent Flow In Pipes With Particular Reference To The Transitions Region Between The Smooth And Rough Pipe Laws*. Journal of the Institution of Civil Engineering, 11 (4): 133–156, 1939.
- [11] Darcy, H.: *Recherches Experimentales Relatives au Mouvement de L'Eau dans les Tuyaux*. 2 volumes, Mallet-Bachelier, Paryż, 1857.
- [12] Duan H.-F., Ghiadoui M., Lee P.J., Tung Y.-K.: *Unsteady friction and visco-elasticity in pipe fluid transients*. Journal of Hydraulic Research, 48(3), 2010.
- [13] Einstein H.A.: *Der hydraulische Oder Profil-Radius*. Schweizerische Bauzeitung, 103, (8): 89-91, Zurych, 1934.

- [14] Gałaj J., Pawlak A., Pawlak E., Zegar W.: *Ćwiczenia laboratoryjne z hydromechaniki*. Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa, 2016.
- [15] German J.: *Hydraulic capacity of 2in1 sewers*. VATTEN nr 63, s.153-158, 2007.
- [16] Gibson N. R.: *Pressures in penstocks caused by gradual closing of turbine gates*. Transactions of American Society of Civil Engineers, vol. 83, 1919-1920.
- [17] Gupta, H. V., Sorooshian S., Yapo P.O.: *Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration*. Journal of Hydrologic Engineering, 4(2), 1999.
- [18] Horton R. E.: *Separate Roughness Coefficients for Channel Bottom and Sides*. Engineering News-Record, 3(22), 652-653, 1933.
- [19] Janson L. E.: *Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal*. Borealis, Sven Axelsson AB/Affisch & Reklamtryck AB, Boras, 1996.
- [20] Karney, B. W. *Energy relations in transient closed-conduit flow*. Journal of Hydraulic Engineering, 116(10), 1990.
- [21] Kącki E.: *Równania różniczkowe cząstkowe w zagadnieniach fizyki i techniki*. WNT, Warszawa, 1992.
- [22] Korteweg D. J.: *Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in elastischen Röhren*, Annalen der Physik und Chemie, Wiedemann, 1878.
- [23] Kotowski A.: *Analiza hydrauliczna zjawisk wywołujących zmniejszenie przepływności rurociągów*. Ochrona środowiska, vol. 32, 2010.
- [24] Kubrak M., Kodura A., Imielowski S.: *Analysis of Pressure Wave Velocity in a Steel Pipeline with Inserted Fiber Optic Cable*, 36 International School of Hydraulics, 2017.
- [25] Kubrak M., Kodura A.: *Numeryczna analiza warunków przepływu w przewodach wodociągowych z kablem telekomunikacyjnym*. Instal, Ośrodek Informacji "Technika instalacyjna w budownictwie", nr 12, 2013.
- [26] Liou, C.P.: *Limitations and Proper Use of the Hazen-Williams Equation*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 124, 1998.
- [27] Limmer J.: *Druckstoßberechnung in elastischen Rohrleitungen mit Berücksichtigung der radialen Dehnung*. Inst. für Hydraulik und Gewässerkunde, Monachium, 1974.
- [28] Locher, F. A.: *Discussion of "Limitations and Proper Use of the Hazen-Williams Equation"*. Journal of Hydraulic Engineering, 2000.
- [29] Mambretti S: *Water Hammer Simulations*. WIT Press, Southampton, 2014.

- [30] Menabrea L. F.: *Note sure les effets de choc de l'eau dans les conduites*. Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L'Academie des Sciences, vol. 47, Paryż, 1858.
- [31] Michaud J.: *Coups de belier dans les conduits. Etude des moyens employes pour en attenuer les effets (Water hammer in conduits: study of the means used for diminishing the effects)*. Bulletin de la Societe Vaudoise des Ingenieurs et des Architectes, Lozanna, 1878.
- [32] Mitosek M., Chorzelski M.: *Influence of visco-elasticity on pressure wave velocity in polyethylene MDPE pipe*. Archives of Hydro-engineering and Environmental Mechanics, 2003.
- [33] Mitosek M., Matlak M., Kodura A., Kubrak M.: *Zbiór zadań z hydrauliki dla inżynierii i ochrony środowiska*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2017.
- [34] Mitosek M.: *Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2014.
- [35] Mitosek M.: *Study of cavitation due to water hammer in plastic pipes*. Plastics rubber and composites processing and applications, vol. 26, nr 7, 1997.
- [36] Mitosek M., Szymkiewicz R.: *Wave damping and smoothing in the unsteady pipe flow*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 138, nr 7, 2012.
- [37] Moody, L. F.: *Friction factors for pipe flow*. Transactions of the ASME, vol. 66, 1944.
- [38] Moriasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Bingner R. L., Harmel R. D.: *Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification Of Accuracy In Watershed Simulations*. Transactions of the ASABE, vol.50, 2007.
- [39] Niełacny M.: *Uderzenia hydrauliczne*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2002.
- [40] Nikuradse J.: *Law of flow in rough pipes*. NACA Technical Memorandum 1292, Washington, 1950.
- [41] Parmakian J.: *Waterhammer Analysis*. Dover Publications, Inc., Nowy Jork, 1963.
- [42] Pezzinga G.: *Evaluation of unsteady flow resistance by quasi – 2D or 1D models*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 126, 2000.
- [43] Pezzinga G.: *Quasi – 2D model for unsteady flow in pipe networks*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 125, 1999.

- [44] Poiseuille, J. L.: *Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très-petits diamètres*, Comptes Rendus, Académie des Sciences, Paryż, 1841.
- [45] Ramos H., Covas D., Reis L.: *Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer*. Journal of Hydraulic Engineering, 134(9), 2008.
- [46] Reynolds, O.: *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channel*. Philo. Trans. of the Royal Soc., 1883.
- [47] Siwicki P., Szeląg B.: *Zastosowanie modelu CFD FLUENT do określania strat hydraulicznych w kołowych przewodach wodociągowych ze światłowodem*. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, Zeszyt 4, 2010.
- [48] Streeter V. L.: *Fluid mechanics*. McGraw-Hill Companies, Columbus, 1958.
- [49] Streeter V. L.: *Water hammer analysis*, Journal of Hydraulic Division, 95(6), 1969, 1959-1972.
- [50] Streeter V.L., Lai Ch.: *Water hammer analysis including fluid friction*. Journal of Hydraulic Division, vol. 88, 1962.
- [51] Swamee, P. K.: *Discussion of "Limitations and Proper Use of the Hazen-Williams Equation"*. Journal of Hydraulic Engineering, 2000.
- [52] *Symposium on Water hammer*. American Society of Mechanical Engineers and American Society of Civil Engineers, Chicago, Illinois, 1933.
- [53] *Symposium on Water hammer*. Annual Meeting, American Society of Mechanical Engineers, 1937.
- [54] Szymkiewicz R., Mitosek M.: *Analysis of unsteady pipe flow using the modified finite element method*. Communications in Numerical Methods in Engineering, vol. 21, nr 4, 2005.
- [55] Szymkiewicz R., Mitosek M.: *Alternative Convolution Approach to Friction in Unsteady Pipe Flow*. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme, vol. 136, nr 1, ss. 1-9, 2014.
- [56] Szymkiewicz R.: *Analiza uderzenia hydraulicznego w rozgałęzionej sieci rurociągów*. Archiwum Hydrotechniki, tom XXII, zeszyt 1, 1975.
- [57] Szymkiewicz R.: *Metody numeryczne w inżynierii wodnej*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2003.

- [58] Szymkiewicz R., Mitosek M.: *Numerical aspects of improvement of the unsteady pipe flow equations*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 55, nr 11, 2007.
- [59] Weisbach, J.: *Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik*. Braunschweig, 1845.
- [60] White F.: *Fluid mechanics*. McGraw-Hill, Nowy Jork, 2011.
- [61] Wrzosek K.: *Wpływ temperatury strumienia wody na parametry uderzenia hydraulicznego w przewodach z tworzyw sztucznych*. Rozprawa doktorska na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1998.
- [62] Wylie E.B., Streeter V.L.: *Fluid in transient systems*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 264, 1994.
- [63] Wyszowski K.: *Mechanika gazów i cieczy dla studiów inżynierskich Inżynierii Środowiska. Część I*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1979.
- [64] Zielke W.: *Frequency-Dependent Friction in Transient Pipe Flow*. Journal of Basic Engineering, vol. 90, 1968.
- [65] Zienkiewicz O.C.: *Metoda elementów skończonych*. Arkady, Warszawa, 1972.
- [66] Żukowski N. E.: *O gidravliceskom udare v vodoprovodnyh trubach*. Bjuletin Politechniceskogo obcestva nr 5, 1889.

List of figures

Fig. Z1. Changes of pressure in a pipeline without inserted cable or conduit at the volumetric flow $Q = 40,3 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z2. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable with diameter of 5.3 mm at the volumetric flow rate $Q = 40,3 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z3. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable with diameter of 6.0 mm at the volumetric flow rate $Q = 40,0 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z4. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable with diameter of 6.5 mm at the volumetric flow rate $Q = 40,3 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z5. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable with diameter of 7.0 mm at the volumetric flow rate $Q = 40,9 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z6. Changes of pressure in a pipeline with inserted conduit with diameter of 8.0 mm at the volumetric flow rate $Q = 40,4 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z7. Changes of pressure in a pipeline without inserted cable or conduit at the volumetric flow rate $Q = 49,8 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z8. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable with diameter of 5.3 mm at the volumetric flow rate $Q = 50,0 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z9. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable with diameter of 6.0 mm at the volumetric flow rate $Q = 49,9 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z10. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable with diameter of 6.5 mm at the volumetric flow rate $Q = 50,0 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z11. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable with diameter of 7.0 mm at the volumetric flow rate $Q = 50,0 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z12. Changes of pressure in a pipeline with inserted conduit with diameter of 8.0 mm at the volumetric flow rate $Q = 49,7 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z13. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable or conduit at the volumetric flow rate $Q = 60,2 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z14. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable with diameter of 5.3 mm at the volumetric flow rate $Q = 60,1 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z15. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable with diameter of 6.0 mm at the volumetric flow rate $Q = 60,2 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z8. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable with diameter of 6.5 mm at the volumetric flow rate $Q = 60,1 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z17. Changes of pressure in a pipeline with inserted cable with diameter of 7.0 mm at the volumetric flow rate $Q = 59,9 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z18. Changes of pressure in a pipeline with inserted conduit with diameter of 8.0 mm at the volumetric flow rate $Q = 60,5 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Fig. Z19. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline without inserted cable or conduit for $\beta_1 = \beta_2 = 0,012$.

Fig. Z20. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted cable with diameter of 5.3 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,024$.

Fig. Z21. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted cable with diameter of 6.0 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,016$.

Fig. Z22. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted cable with diameter of 6.5 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,022$.

Fig. Z23. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted cable with diameter of 7.0 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,018$.

Fig. Z24. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted conduit with diameter of 8.0 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,220$.

Fig. Z25. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline without inserted cable or conduit for $\beta_1 = \beta_2 = 0,018$.

Fig. Z26. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted cable with diameter of 5.3 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,034$.

Fig. Z27. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted cable with diameter of 6.0 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,024$.

Fig. Z28. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted cable with diameter of 6.5 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,030$.

Fig. Z29. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted cable with diameter of 7.0 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,018$.

Fig. Z30. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted conduit with diameter of 8.0 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,200$.

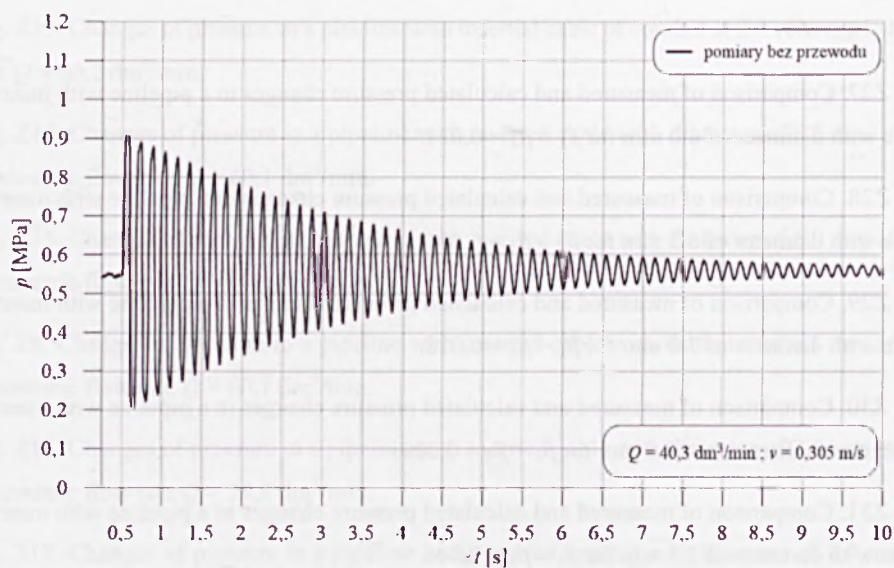
Fig. Z31. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted cable with diameter of 5.3 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,046$.

Fig. Z32. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted cable with diameter of 6.0 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,028$.

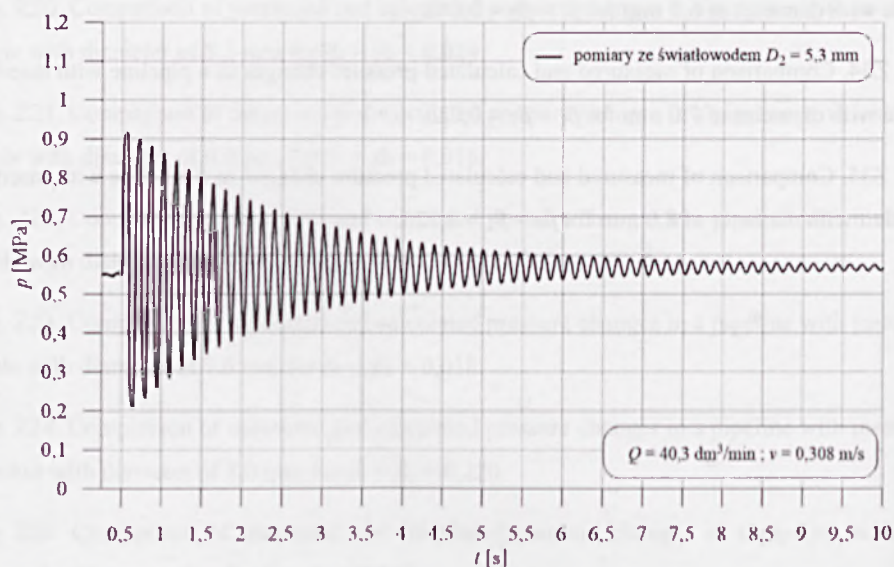
Fig. Z33. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted cable with diameter of 6.5 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,042$.

Fig. Z34. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted cable with diameter of 7.0 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,026$.

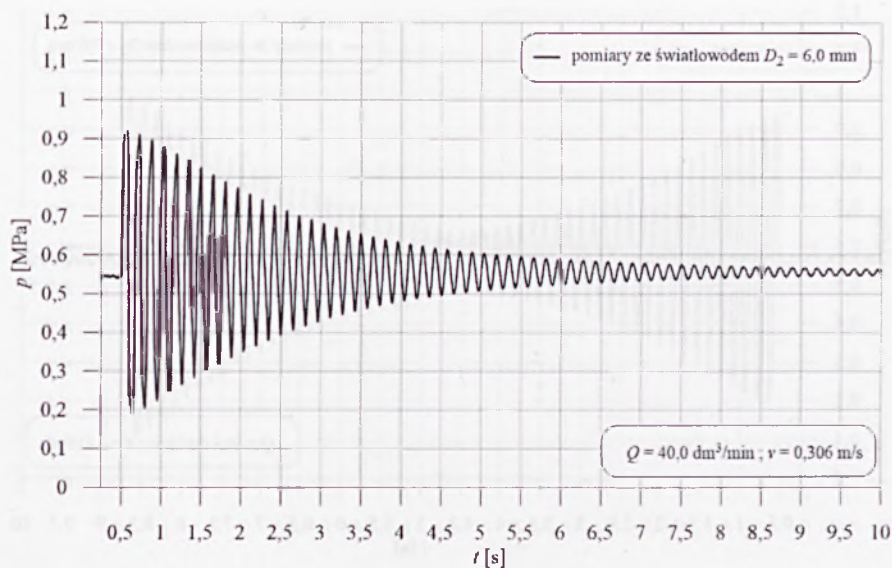
Fig. Z35. Comparison of measured and calculated pressure changes in a pipeline with inserted conduit with diameter of 8.0 mm for $\beta_1 = \beta_2 = 0,220$.



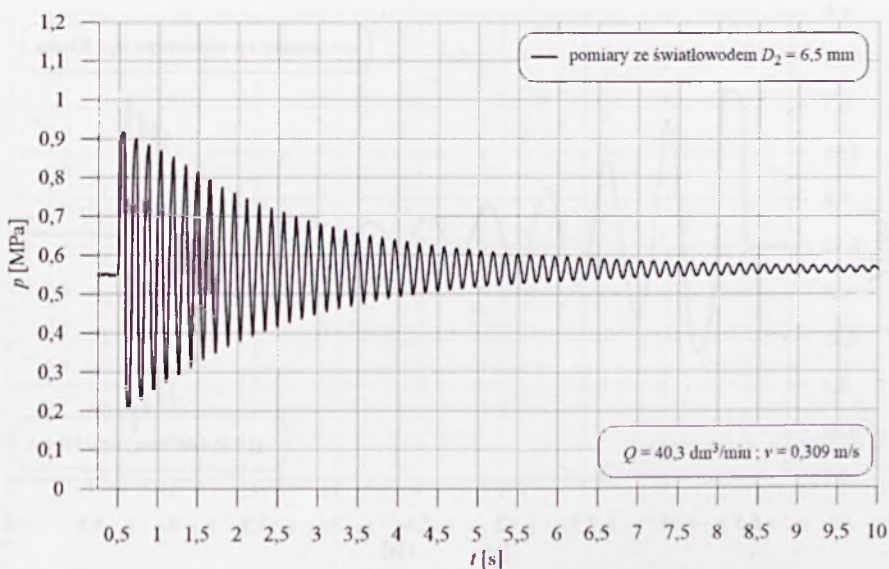
Rys. Z1. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu bez przewodu przy przepływie $Q = 40,3 \text{ dm}^3/\text{min}$.



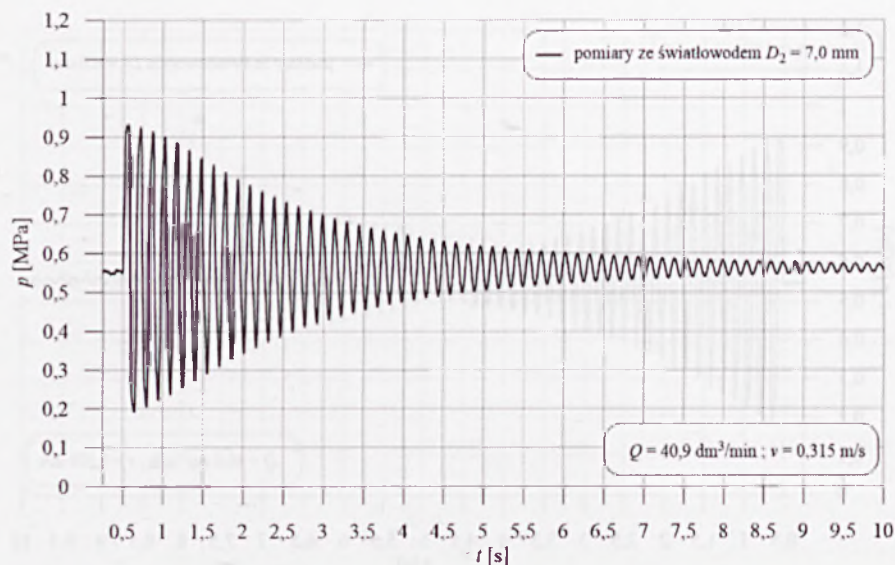
Rys. Z2. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 5,3 mm przy przepływie $Q = 40,3 \text{ dm}^3/\text{min}$.



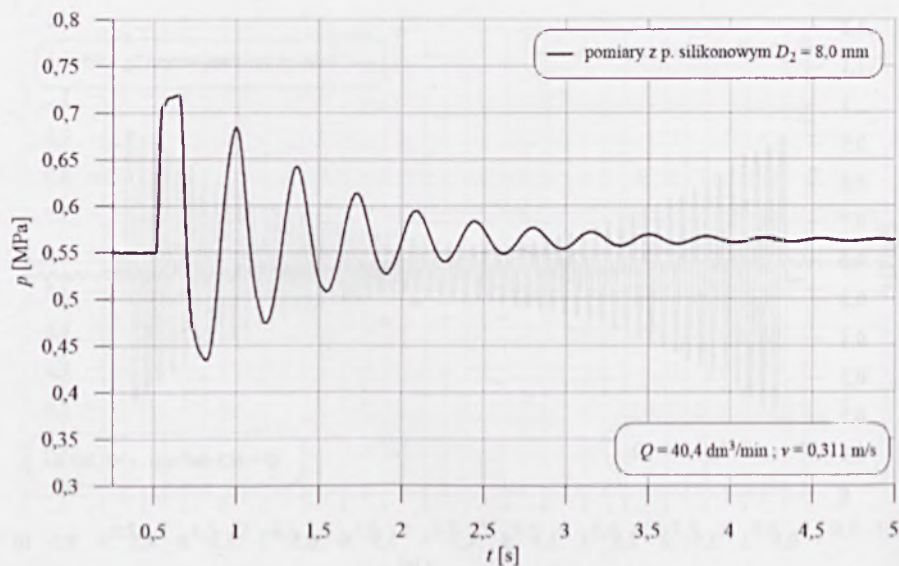
Rys. Z3. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 6,0 mm przy przepływie $Q = 40,0$ dm³/min.



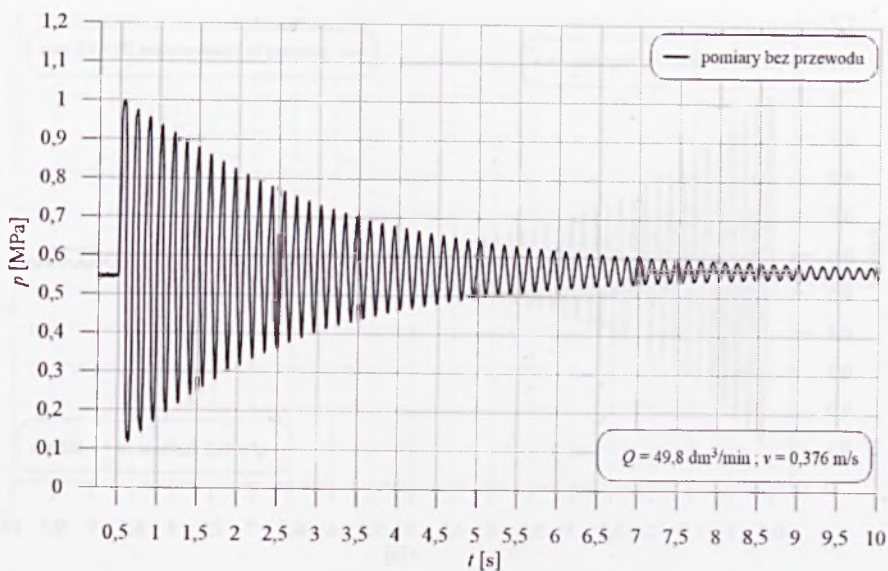
Rys. Z4. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 6,5 mm przy przepływie $Q = 40,3$ dm³/min.



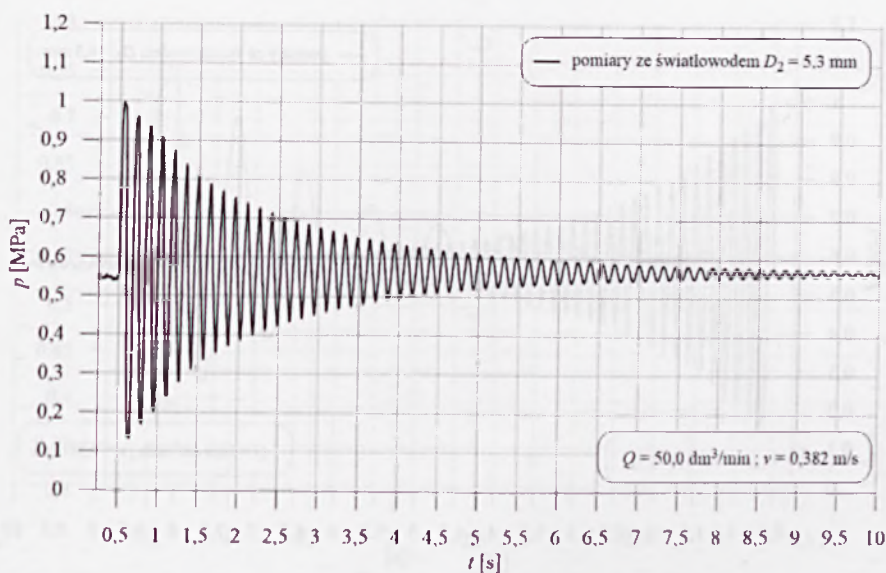
Rys. Z5. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 7,0 mm przy przepływie $Q = 40,9 \text{ dm}^3/\text{min}$.



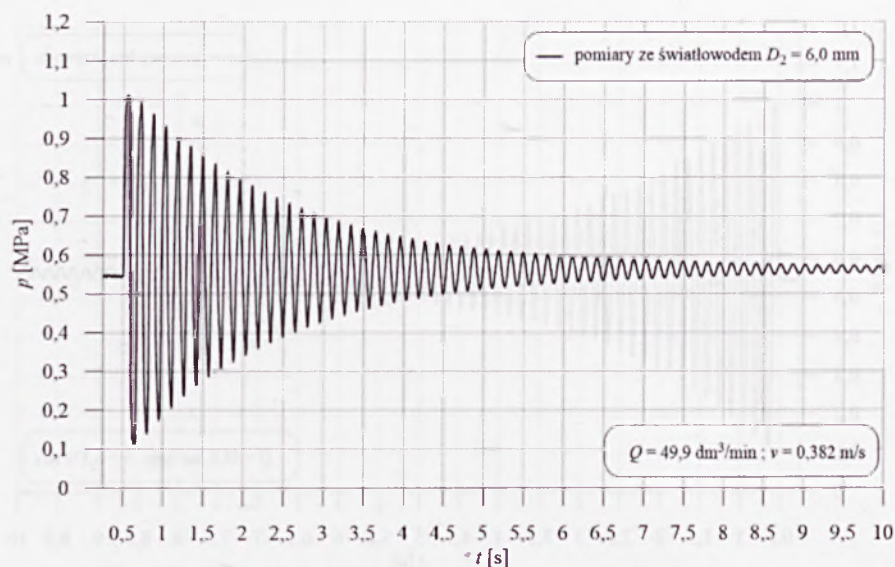
Rys. Z6. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 8,0 mm przy przepływie $Q = 40,4 \text{ dm}^3/\text{min}$.



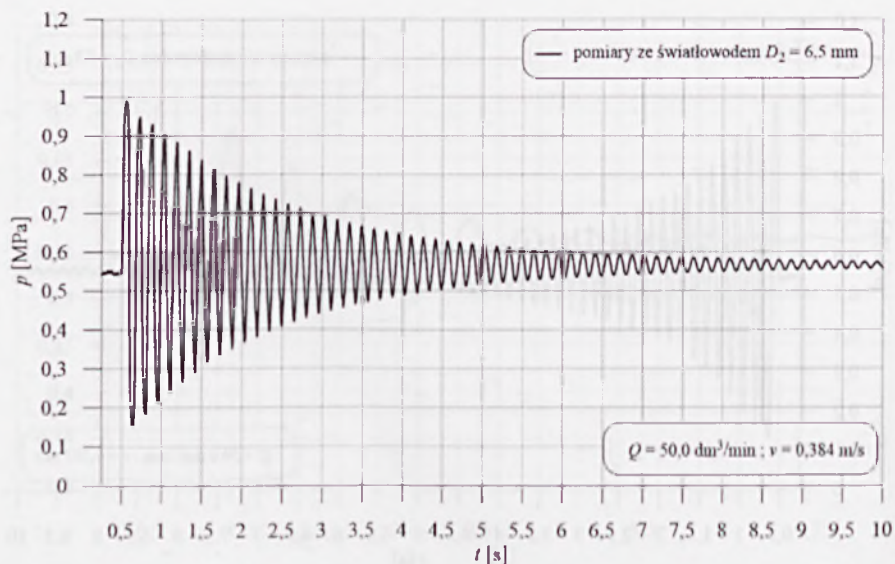
Rys. Z7. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu bez przewodu przy przepływie $Q = 49,8 \text{ dm}^3/\text{min}$.



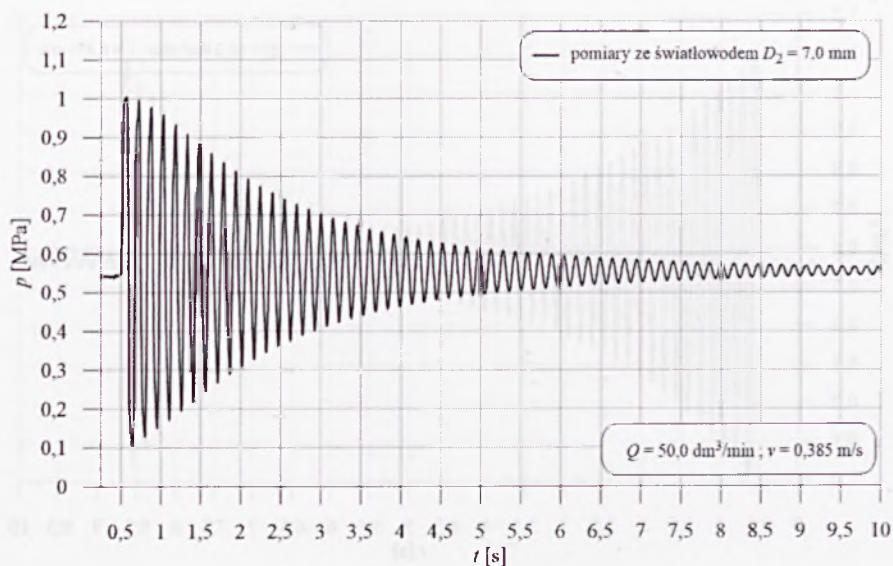
Rys. Z8. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 5,3 mm przy przepływie $Q = 50,0 \text{ dm}^3/\text{min}$.



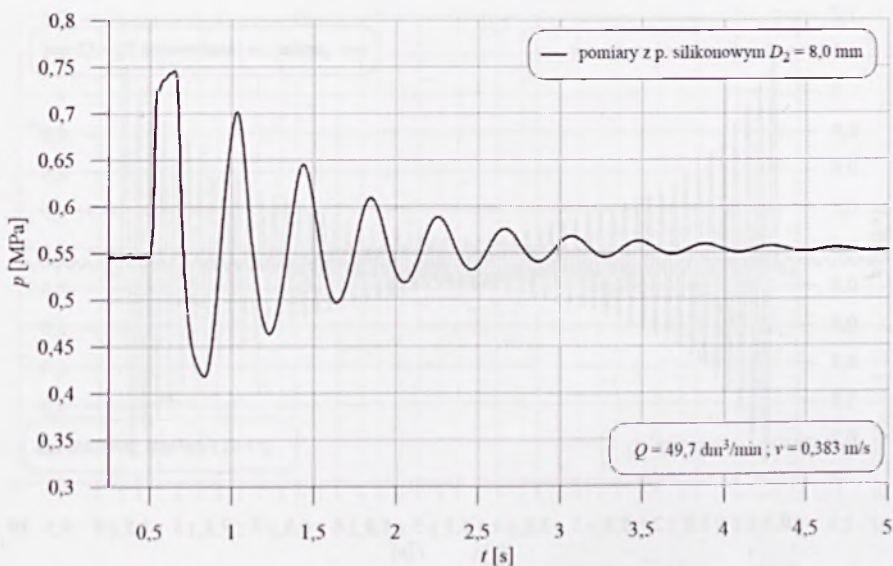
Rys. Z9. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 6,0 mm przy przepływie $Q = 49,9$ dm³/min.



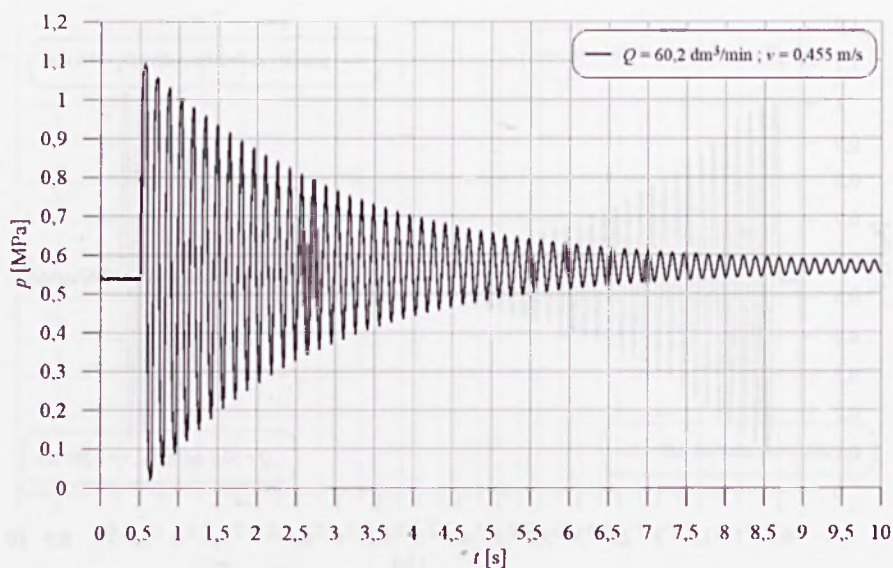
Rys. Z10. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 6,5 mm przy przepływie $Q = 50,0$ dm³/min.



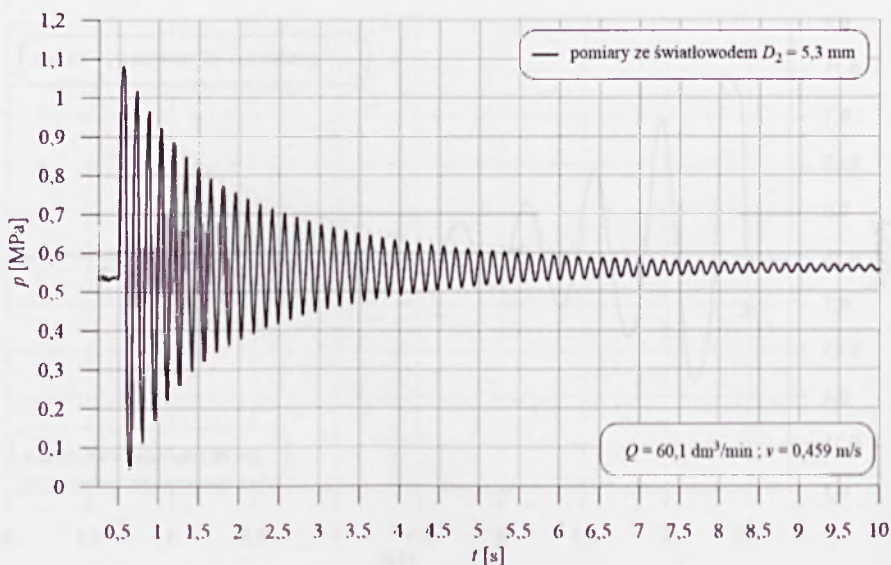
Rys. Z11. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 7,0 mm przy przepływie $Q = 50,0 \text{ dm}^3/\text{min}$.



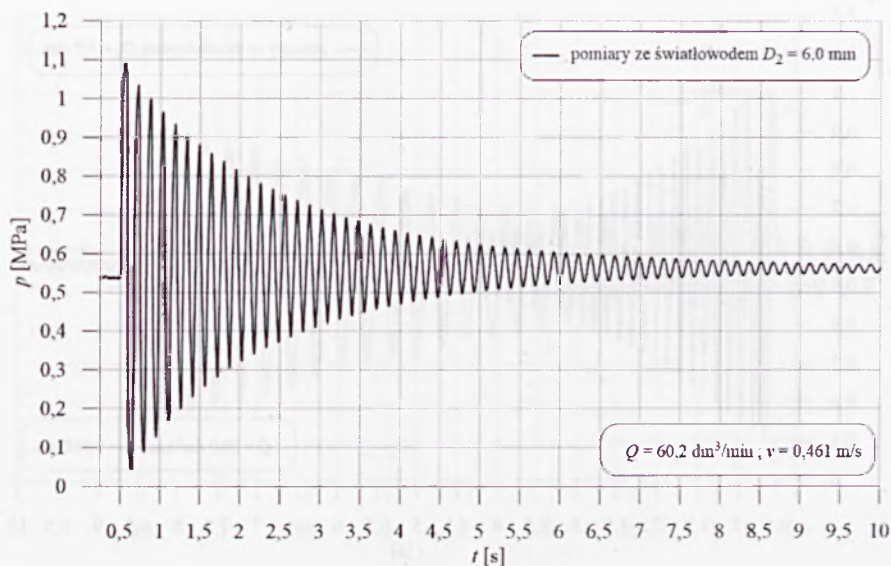
Rys. Z12. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 8,0 mm przy przepływie $Q = 49,7 \text{ dm}^3/\text{min}$.



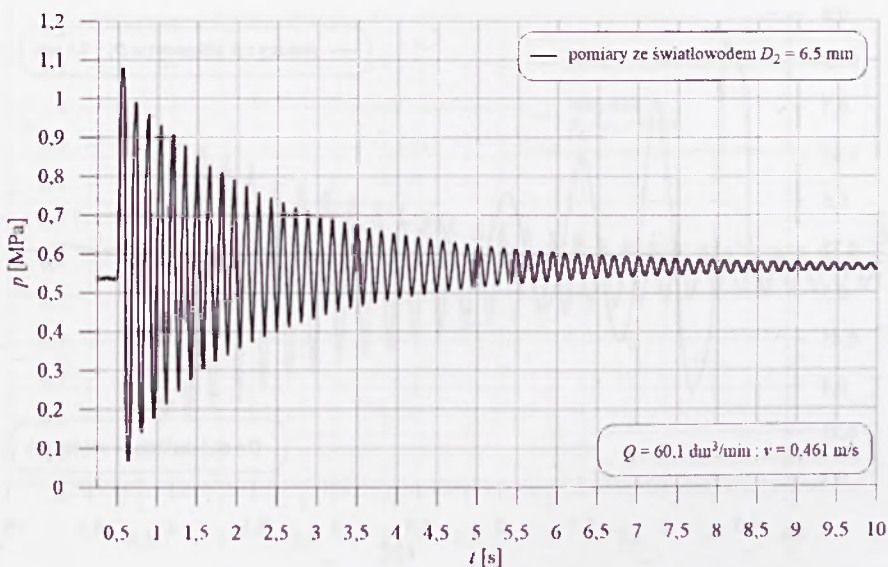
Rys. Z13. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu bez przewodu przy przepływie $Q = 60,2 \text{ dm}^3/\text{min}$.



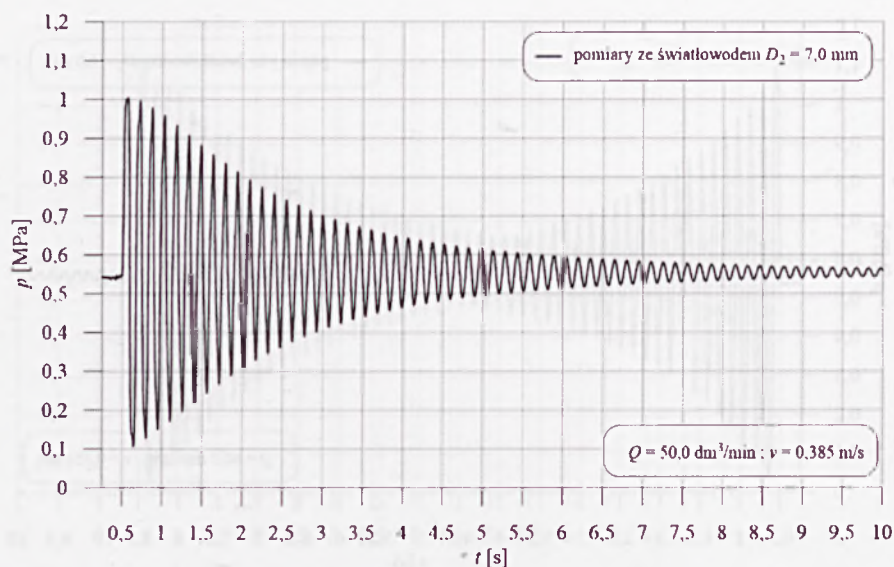
Rys. Z14. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 5,3 mm przy przepływie $Q = 60,1 \text{ dm}^3/\text{min}$.



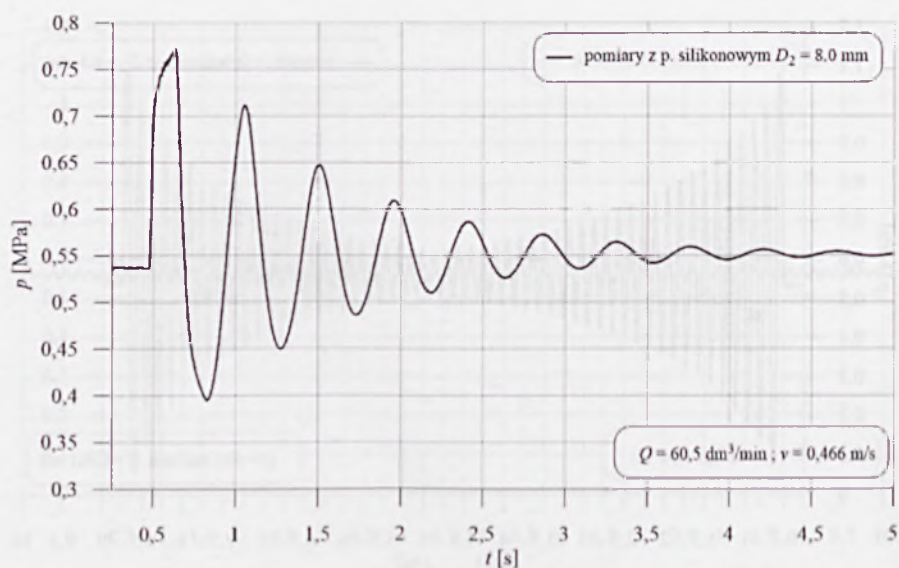
Rys. Z15. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 6,0 mm przy przepływie $Q = 60,2$ dm³/min.



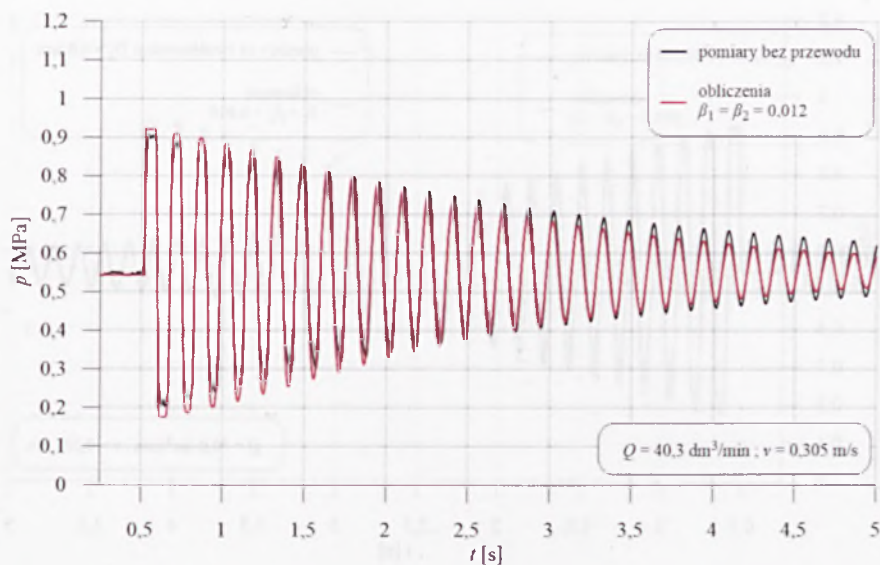
Rys. Z16. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 6,5 mm przy przepływie $Q = 60,1$ dm³/min.



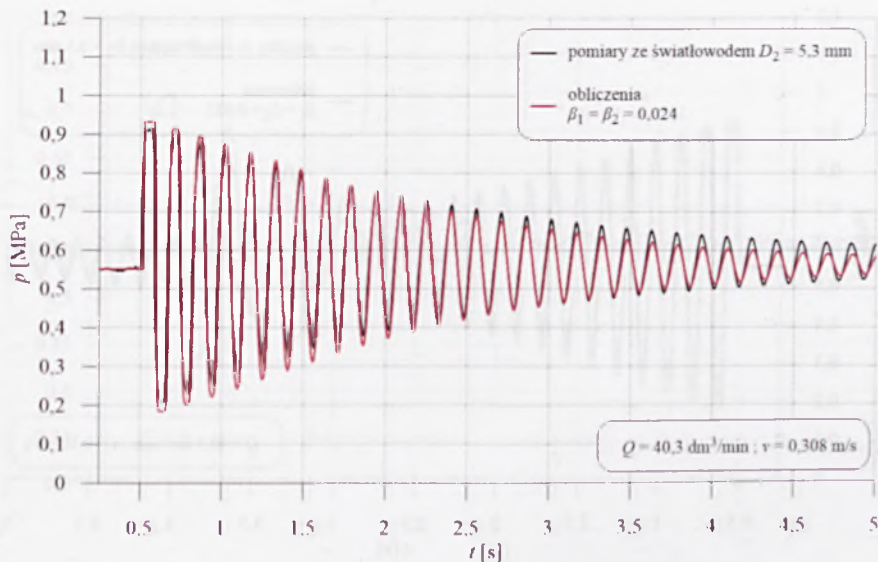
Rys. Z17. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 7,0 mm przy przepływie $Q = 59,9 \text{ dm}^3/\text{min}$.



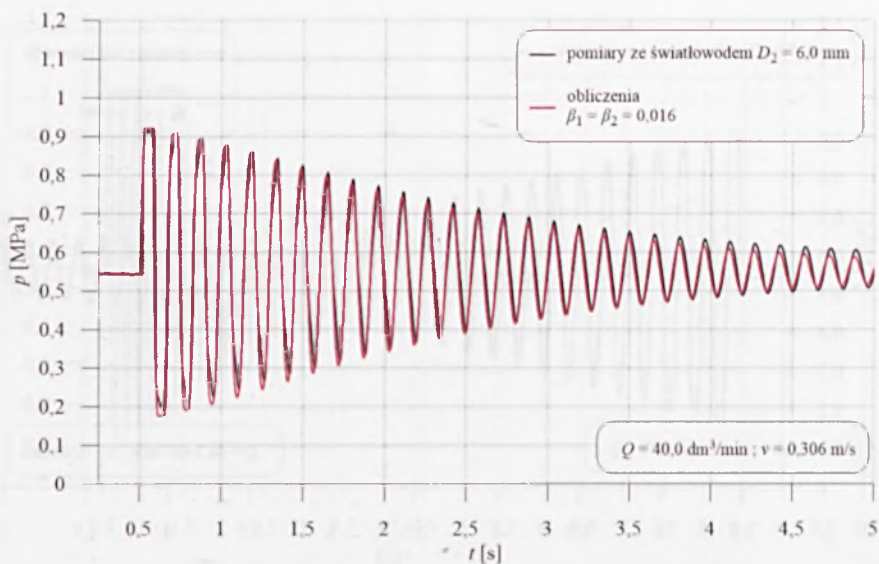
Rys. Z18. Przebieg zmian ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem o średnicy 8,0 mm przy przepływie $Q = 60,5 \text{ dm}^3/\text{min}$.



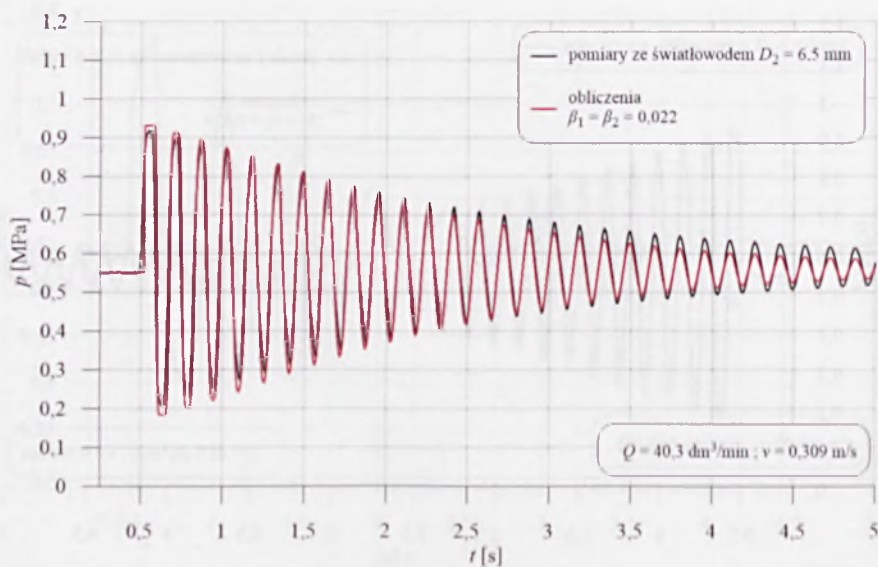
Rys. Z19. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,012$.



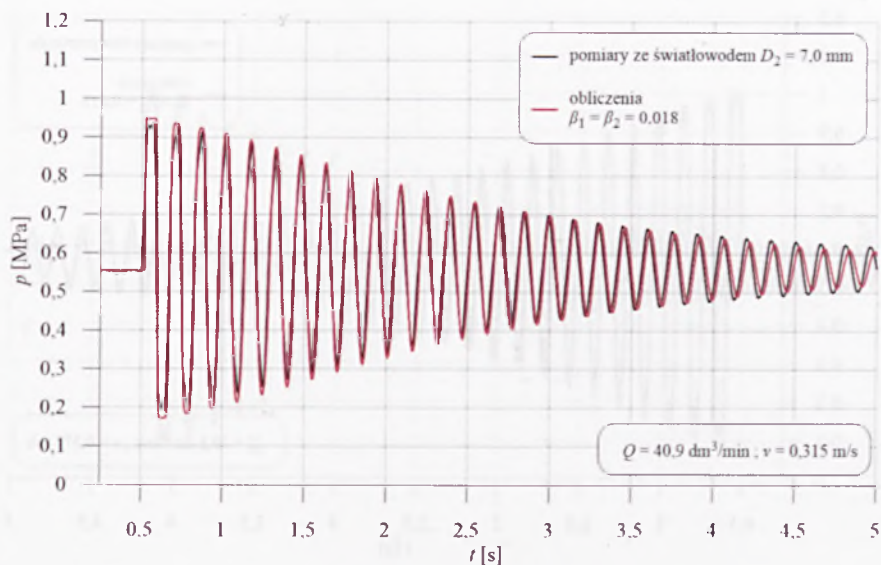
Rys. Z20. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 5,3 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,024$.



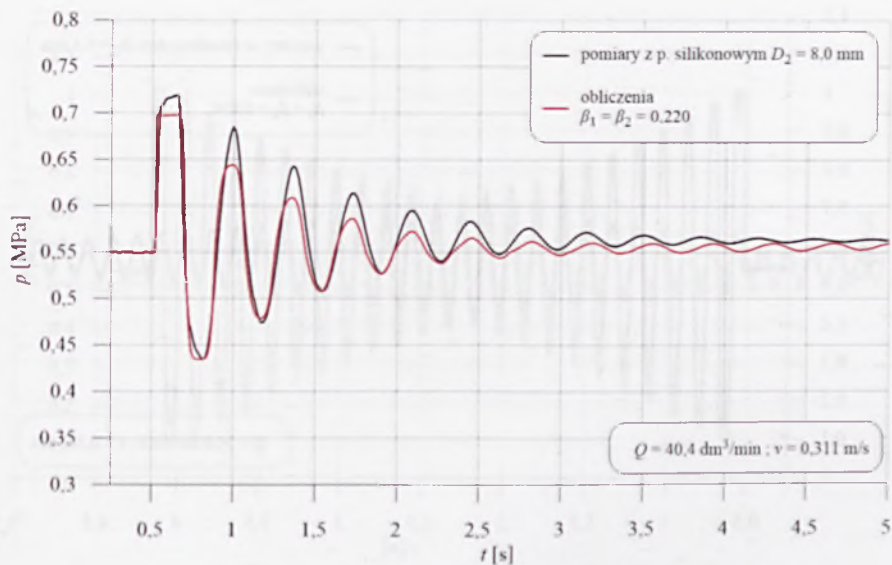
Rys. Z21. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 6,0 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,016$.



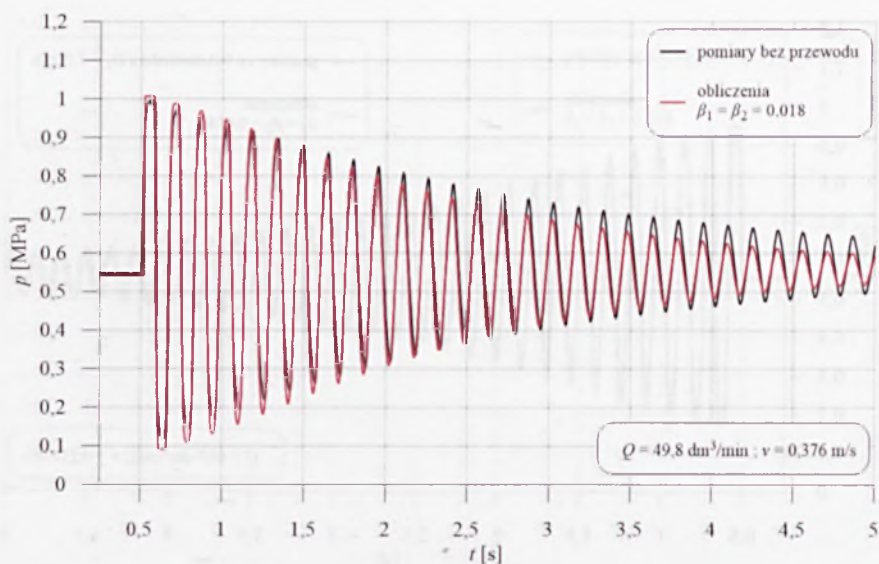
Rys. Z22. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 6,5 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,022$.



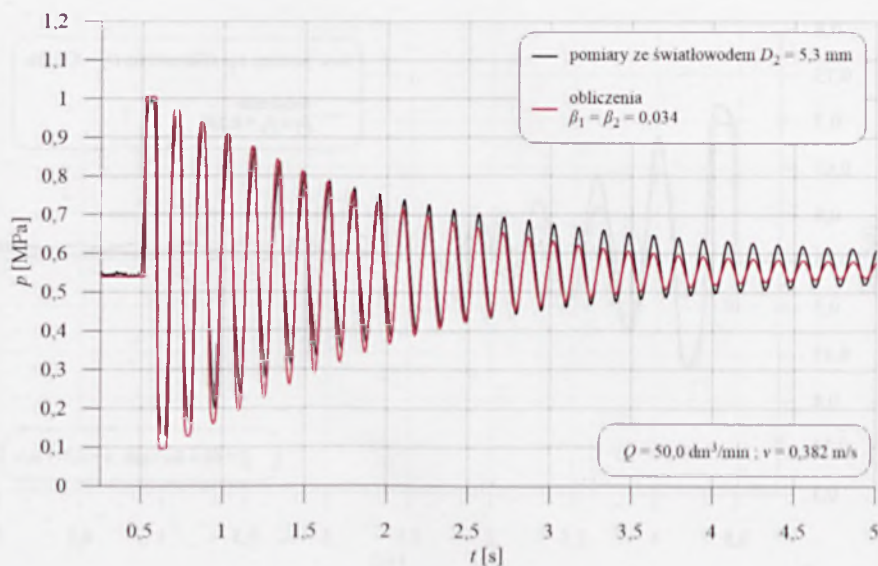
Rys. Z23. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 7,0 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,018$.



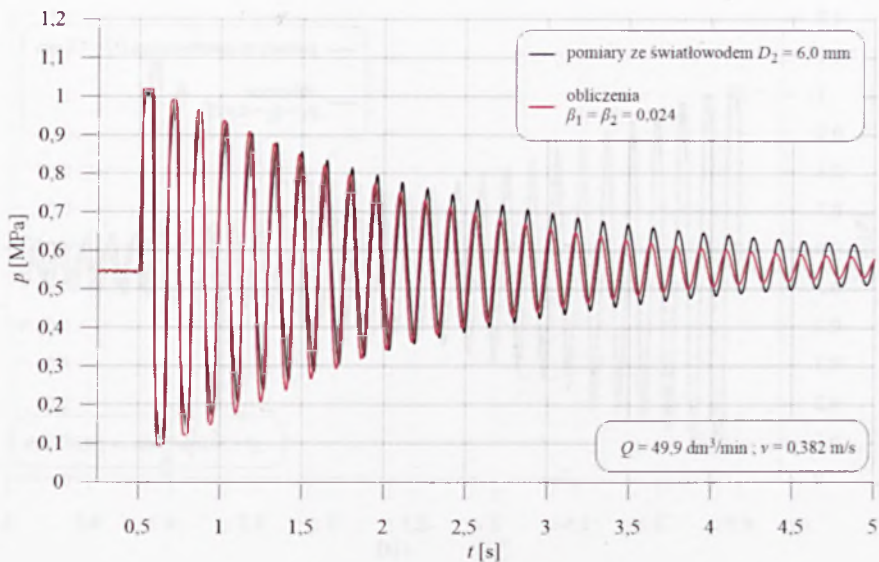
Rys. Z24. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 8,0 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,220$.



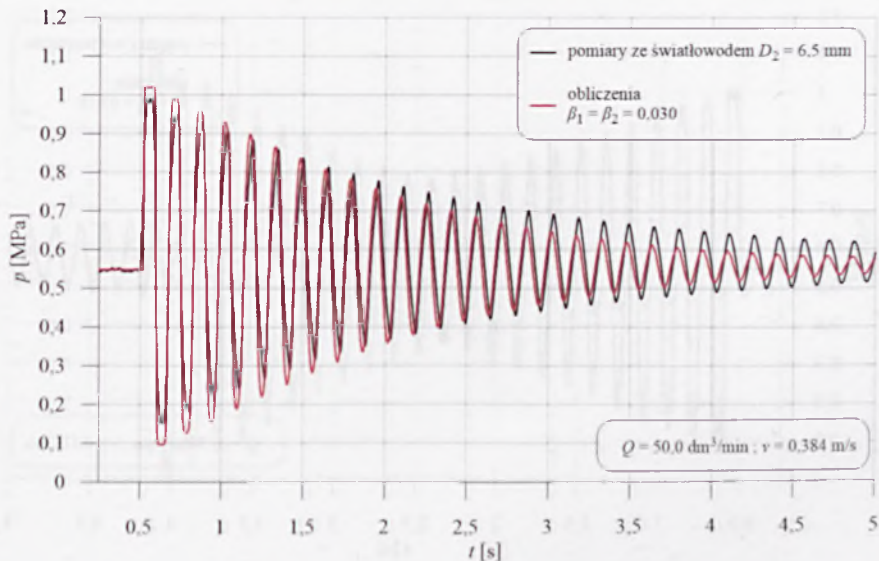
Rys. Z25. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,018$.



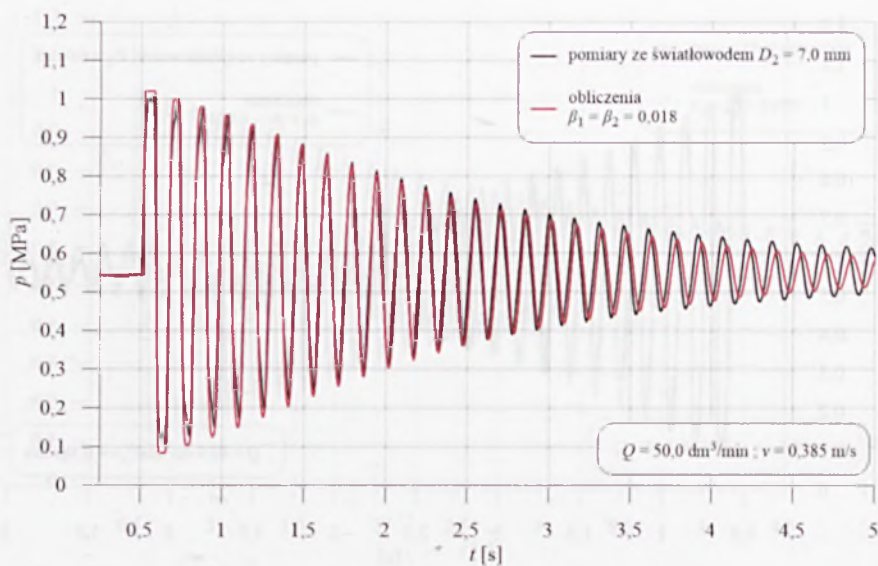
Rys. Z26. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 5,3 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,034$.



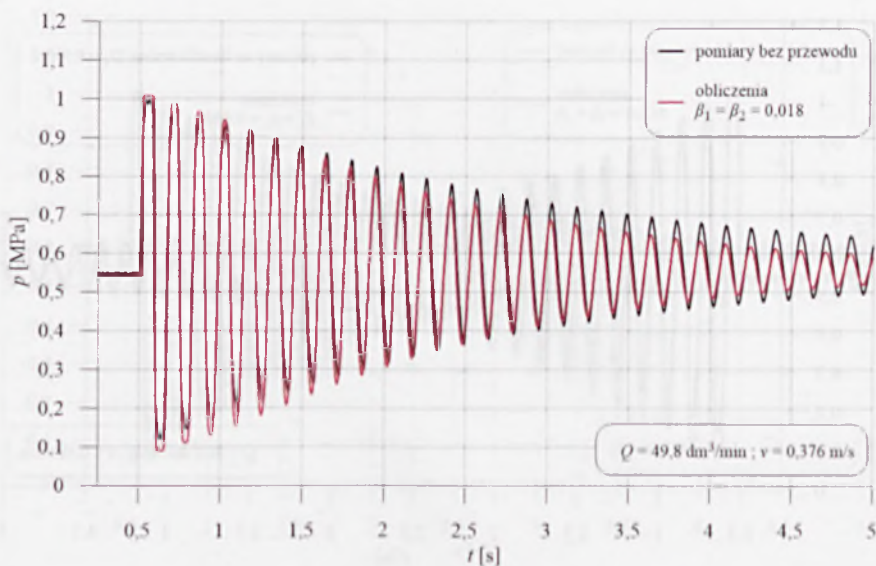
Rys. Z27. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 6,0 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,024$.



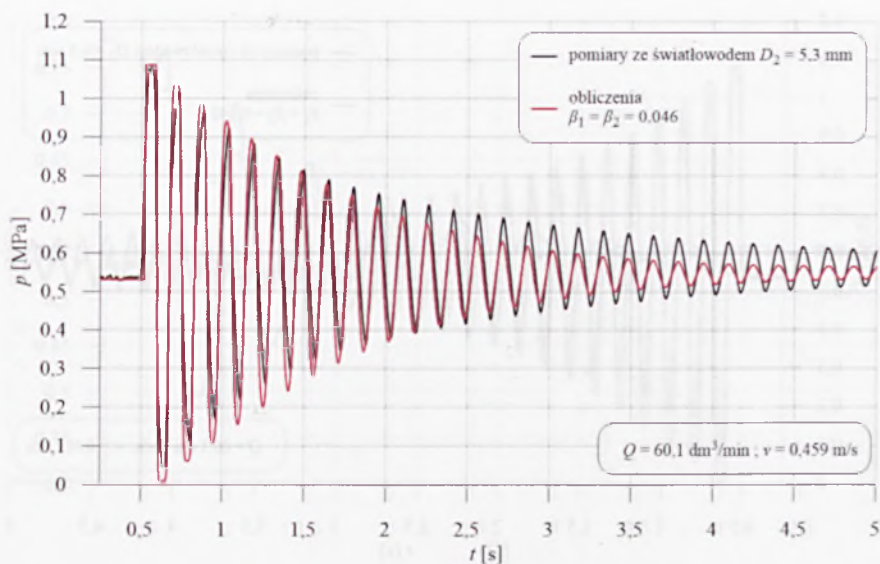
Rys. Z28. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 6,5 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,030$.



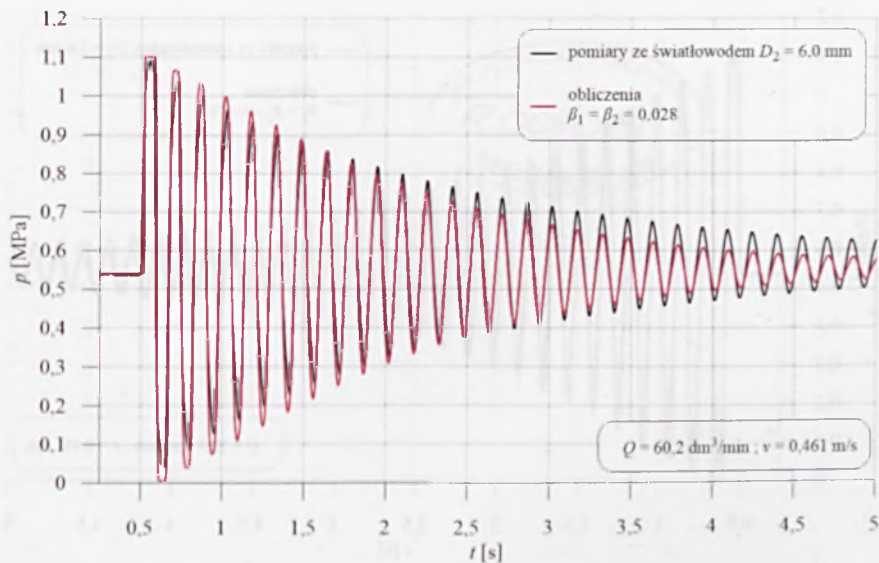
Rys. Z29. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 7,0 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,018$.



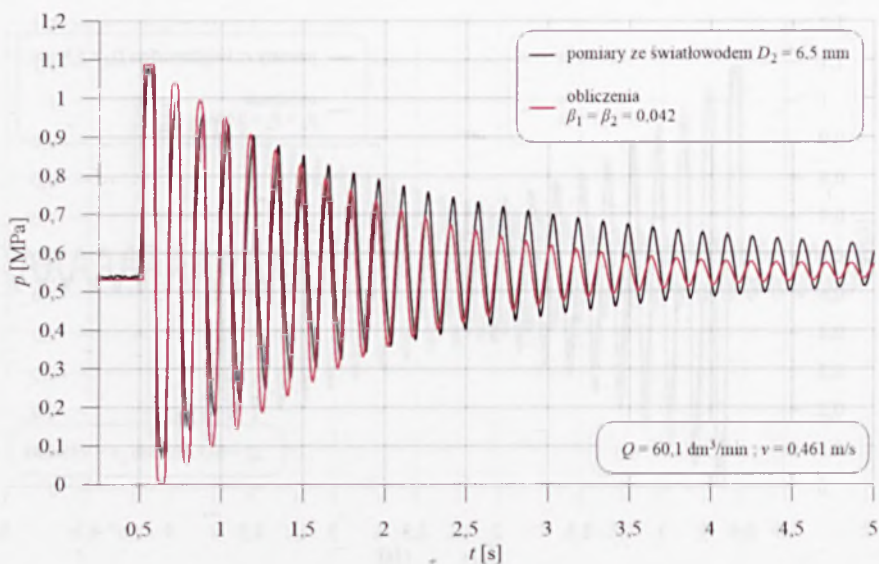
Rys. Z30. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 8,0 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,200$.



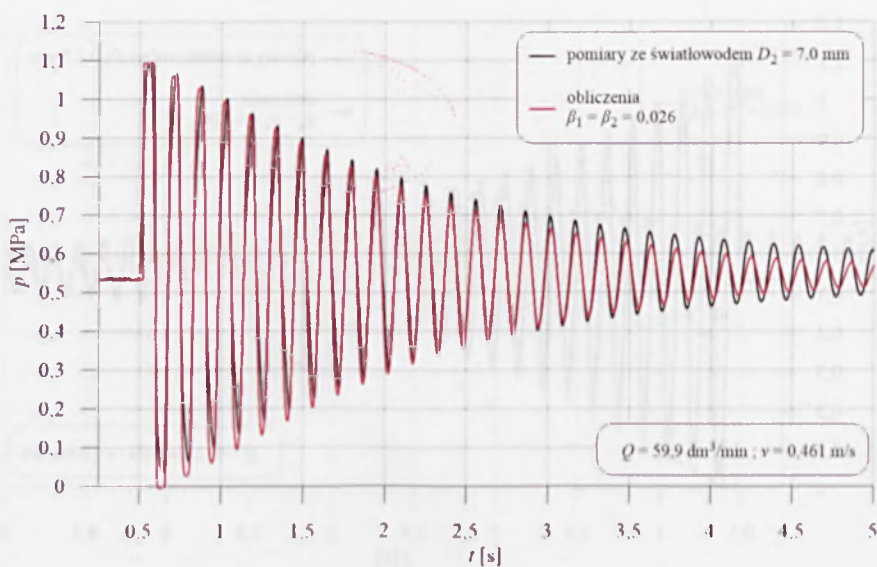
Rys. Z31. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 5,3 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,046$.



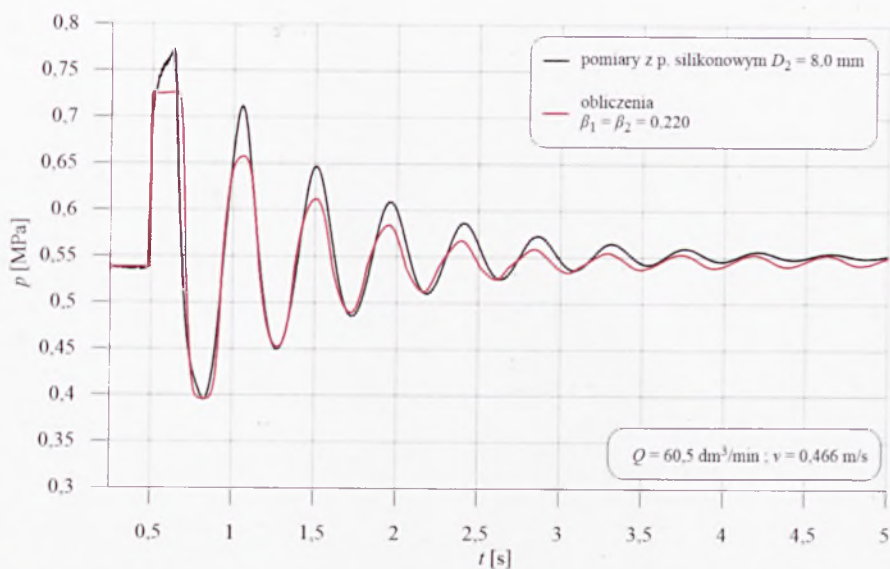
Rys. Z32. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 6,0 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,028$.



Rys. Z33. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 6,5 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,042$.



Rys. Z34. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 7,0 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,026$.



Rys. Z35. Porównanie pomierzonych i obliczonych zmian ciśnienia w rurociągu z przewodem o średnicy 8,0 mm dla $\beta_1 = \beta_2 = 0,220$.



**BG Magazyn
Podstawowy**

BG PW

R. 008031



400000000308707



mgr inż. Michał Kubrak

Warszawa, dn. 6.11.2017 r.

Streszczenie rozprawy doktorskiej pt.:

Ciśnieniowy przepływ wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem

W pracy poddano analizie wpływ umieszczenia przewodu w obszarze ciśnieniowego przepływu wody na parametry hydrauliczne w rurociągu. Sformułowano następującą tezę pracy: „Przewód umieszczony wewnątrz stalowego rurociągu w obszarze ciśnieniowego przepływu wody powoduje niewielki wzrost liniowych strat ciśnienia w ruchu ustalonym oraz ma tłumiące oddziaływanie na przyrosty ciśnienia wody i skraca czas trwania dodatniego uderzenia hydraulicznego”. Celami pracy było wyjaśnienie wpływu umieszczenia przewodu w sieci wodociągowej na jej przepustowość i straty ciśnienia podczas ustalonego przepływu wody oraz sprężystości ścianki wprowadzanego przewodu na przebieg uderzenia hydraulicznego. Rozróżniono trzy rodzaje przewodów – przewody o pełnym przekroju, cienkościenne i grubościennie.

Praca składa się z dwóch zasadniczych części – pierwsza dotyczy ustalonego ciśnieniowego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem, zaś druga odnosi się do nieustalonego przepływu wody, występującego podczas uderzenia hydraulicznego. W każdej z obu części, jako metody badawcze wykorzystano analizy teoretyczne, badania hydrauliczne oraz obliczenia numeryczne. Pomiarów hydraulicznych wykonano dla czterech różnych pełnych przewodów w postaci przewodów światłowodowych, oraz dla grubościennego przewodu silikonowego. Badania doświadczalne ograniczono do zakresu zewnętrznych średnic przewodów nieprzekraczających 0,15 wewnętrznej średnicy rurociągu.

Teoretyczną analizę ustalonego przepływu w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem przeprowadzono z wykorzystaniem hipotezy Einsteina. Wykazano, że decydujący wpływ na obliczony współczynnik oporu i straty ciśnienia ma wzrost średnicy zewnętrznej przewodu w stosunku do średnicy wewnętrznej rurociągu. Numeryczną analizę parametrów ustalonego ciśnieniowego przepływu wody przeprowadzono z wykorzystaniem programu CFD Fluent. Stwierdzono, że wprowadzenie przewodu powoduje nieznaczne zmniejszenie obszaru maksymalnej prędkości przepływu wody. W celu weryfikacji teoretycznych zależności opisujących ustalony przepływ wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem,

przeprowadzono badania doświadczalne na modelu fizycznym. Pomierzone straty liniowe były zbliżone do obliczonych na podstawie zależności teoretycznych.

W ramach analizy teoretycznej nieustalonego przepływu wody, wyprowadzono trzy zależności pozwalające na analityczne obliczanie prędkości fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym, cienkościennym oraz grubościennym przewodem. Każdą z zależności wyprowadzono metodą bilansu masy oraz metodą bilansu pracy i energii. Obliczenia numeryczne dotyczące nieustalonego przepływu wody podczas uderzenia hydraulicznego w rurociągu z przewodem wykonano za pomocą programu obliczeniowego rozwiązującego równania uderzenia hydraulicznego zmodyfikowaną metodą elementów skończonych. Celem przeprowadzonych symulacji numerycznych było określenie wartości współczynników korygujących prędkość fali ciśnienia, pozwalających na uzyskanie wysokiej zgodności obliczeń z pomiarami.

Z przeprowadzonych pomiarów uderzenia hydraulicznego wynika, że umieszczenie przewodu światłowodowego w obszarze nieustalonego przepływu wody podczas uderzenia hydraulicznego skraca czas trwania zjawiska tj. sprawia, że kolejne amplitudy ciśnienia wygasają szybciej niż w przypadku rurociągu bez przewodu. Umieszczenie przewodu o podwyższonej odkształcalności ścianek znacząco zmniejsza maksymalne przyrosty ciśnienia wywołane zjawiskiem uderzenia hydraulicznego. Największą redukcję fali ciśnienia względem rurociągu bez przewodu otrzymano dla największego przepływu – przyrost ciśnienia w rurociągu z przewodem silikonowym stanowi 40,7% przyrostu ciśnienia w rurociągu bez przewodu.

Michał Kubiś



Poznań, 12 lutego 2018



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Instytut Inżynierii Środowiska

ul. Berdychowo 4, 60-965 Poznań

Prof. dr hab. inż. Janusz Wojtkowiak
tel. (61) 6652442
e-mail: janusz.wojtkowiak@put.poznan.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała KUBRAKA

pt.: „Ciśnieniowy przepływ wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem”

Recenzja została sporządzona na zlecenie Rady Wydziału Instalacji Budowlanych Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej w związku z uchwałą nr 67/2017 z dnia 21 listopada 2017 roku, przekazaną w piśmie Dziekana WIBHiŚ PW prof. nzw. dr hab. inż. Krzysztofa Wojdygi – (pismo nr WIBHiŚ-9/2018 z dnia 15.01.2018).

1. Ogólna charakterystyka pracy

Oceniana praca została wydrukowana w roku 2017 jako publikacja Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. Praca liczy 183 strony i składa się z 4 rozdziałów poprzedzonych spisem treści, streszczeniami w języku polskim i angielskim oraz spisem oznaczeń. Rozprawę zamyka spis literatury i załącznik zawierający tytuły rysunków oraz wykresy z wynikami obliczeń i pomiarów. Spis literatury obejmuje 66 pozycji, wśród których Doktorant jest współautorem 2 prac – jednego artykułu w polskim czasopiśmie naukowo-technicznym (Instal, 2013) i jednego referatu opublikowanego (wygłoszonego) w ramach Międzynarodowej Szkoły Hydrauliki (36 *International School of Hydraulics*, 2017). Obie prace są ściśle związane z tematyką ocenianej rozprawy doktorskiej.

W spisie literatury liczną grupę stanowią artykuły opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych, takich jak: *Journal of Hydraulic Engineering*, *Journal of Hydraulic Research*, *Journal of Water Resources Planning and Management*, *Journal*

of Fluids Engineering – ASME Transactions, International Journal of Numerical Methods in Fluids, Journal of Fluid Mechanics.

Oceniana praca doktorska ma charakter teoretyczno-doświadczalny i mieści się w dyscyplinie „inżynieria środowiska”.

2. Ocena tematyki pracy

Rozprawa doktorska dotyczy problemu wpływu obecności przewodu telekomunikacyjnego (światłowodu) w rurociągu wodociagowym na jego charakterystykę przepływową. Zakres rozprawy obejmuje przepływy w warunkach ustalonych i nieustalonych.

Pomysł wykorzystania sieci wodociagowej do prowadzenia przewodów światłowodowych jest nowatorski i warty rozpatrzenia. Jego zastosowanie daje szanse uzyskania znaczących korzyści, tak na etapie realizacji inwestycji (np. ograniczenie robót ziemnych), jak i podczas eksploatacji (np. obniżenie ryzyka zniszczenia światłowodu w czasie pożaru). To, w jakim zakresie pomysł znajdzie praktyczne zastosowanie będzie zależało od rozwiązania wielu kwestii szczegółowych. Jedną z takich kwestii jest wpływ obecności przewodu telekomunikacyjnego na straty ciśnienia wody w przepływie ustalonym. Drugą jest wpływ światłowodu na przebieg uderzenia hydraulicznego w rurociągu. Można przyjąć, że znaczący wzrost strat ciśnienia lub zwiększenie prędkości fali ciśnienia w uderzeniu hydraulicznym, spowodowane obecnością światłowodu, byłyby dyskwalifikujące dla takiego rozwiązania. Autor rozprawy podjął się zbadania i rozstrzygnięcia obydwu powyższych kwestii.

W dostępnej w literaturze n/t przepływów ciśnieniowych znaleźć można liczne informacje o wpływie różnych „blokad” na straty ciśnienia w przepływach ustalonych. Brakuje natomiast danych o wpływie obecności przewodu elastycznego wewnątrz rurociągu na przebieg uderzenia hydraulicznego.

Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Michała Kubraka jest ważna i aktualna, tak z poznawczego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

3. Ogólna ocena treści pracy

W rozdziale 1. Autor krótko uzasadnia celowość podjęcia tematu. Formułuje tezę, cel i zakres pracy. W sposób syntetyczny omawia stan wiedzy w zakresie ustalonego i nieustalonego ruchu wody w przewodach ciśnieniowych. Zakres pracy obejmuje rurociągi prostoliniowe, stalowe z wodą o stałej temperaturze płynącą z prędkościami spotykanymi w sieciach wodociagowych. Kandydat analizuje cztery przewody światłowodowe o różnych

średnicach i jeden grubościenny przewód silikonowy. Badania prowadzi metodami analitycznymi, numerycznymi i eksperymentalnymi. Teza pracy w brzmieniu: „Przewód umieszczony wewnątrz stalowego rurociągu w obszarze ciśnieniowego przepływu wody powoduje niewielki wzrost liniowych strat ciśnienia w ruchu ustalonym oraz ma tłumiące oddziaływanie na przyrosty ciśnienia wody i skraca czas trwania dodatniego uderzenia hydraulicznego”, nie budzi zastrzeżeń.

Cel, zakres i teza pracy zostały określone jasno i precyzyjnie. Wykazanie prawdziwości postawionej tezy stanowi właściwe wyzwanie dla pracy doktorskiej.

Rozdział 2. Dotyczy ustalonego ciśnieniowego przepływu wody w prostoliniowym rurociągu. Na wstępie Kandydat podaje podstawy teoretyczne opisu strat ciśnienia (wysokości strat energii) w rurociągu bez oraz z umieszczonym wewnątrz światłowodem. Przeprowadza obliczenia, z których wynika, że decydujący wpływ na straty ciśnienia ma względna średnica zewnętrzna przewodu odniesiona do średnicy wewnętrznej rurociągu (D_2/D_1). Pokazuje, że wpływ chropowatości powierzchni przewodu na straty ciśnienia jest niewielki.

Numeryczną analizę przepływu wykonuje za pomocą kodu CFD Fluent. Wyznacza pole prędkości wody w przekroju poprzecznym rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem, które charakteryzuje się nieznacznym zmniejszeniem obszaru maksymalnej prędkości wody, w porównaniu z polem w rurociągu bez przewodu. Jest to wynik zgodny z oczekiwaniem mający jasną interpretację fizyczną.

Celem badań doświadczalnych jest walidacja teoretycznych zależności opisujących analizowany przepływ. Kandydat przeprowadza badania na stanowisku z rurociągiem stalowym o długości $L = 48$ m i średnicy wewnętrznej $D_1 = 0,0531$ m. Wyniki pomiarów strat ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem potwierdzają zadowalającą dokładność opisu teoretycznego.

Analizy teoretyczne i numeryczne oraz badania doświadczalne opisane w Rozdziale 2 są w pełni poprawne (mimo drobnych zastrzeżeń wymienionych w punkcie 4 niniejszej recenzji) i zasługują na wysoką ocenę.

W Rozdziale 3. Kandydat analizuje nieustalony przepływ wody w przewodzie wodociagowym podczas uderzenia hydraulicznego. Podobnie jak w Rozdziale 2 stosuje metody analityczne, numeryczne i eksperymentalne. Wyprowadza trzy zależności na prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym, grubościennym i cienkościennym przewodem.

Przeprowadza badania doświadczalne, które potwierdzają, że umieszczenie przewodu w rurociągu skraca czas trwania uderzenia hydraulicznego i obniża maksymalne wartości

skoków ciśnienia wywołane uderzeniem hydraulicznym. Wykazuje, że redukcja skoku ciśnienia jest tym większa im większa jest odkształcalność przewodu wprowadzonego do rurociągu.

Do analizy numerycznej zjawiska uderzenia hydraulicznego Autor wykorzystuje zapożyczony (niekomercyjny) kod komputerowy, bazujący na zmodyfikowanej metodzie elementów skończonych (MES). Wyniki obliczeń numerycznych stosuje do wyznaczenia wartości współczynników korygujących prędkości fali ciśnienia, pozwalających na uzyskanie dobrej zgodności wyników obliczeń i pomiarów.

Zawartość Rozdziału 3 nie budzi większych zastrzeżeń i zasługuje na uznanie. Pewne wątpliwości co do sposobu prezentacji wyników, zamieszczono w rozdziale 4 niniejszej recenzji.

Rozdział 4. ocenianej pracy zawiera wnioski i podsumowanie. Autor, obok sprawy zasadniczej, jaką jest wykazanie poprawności postawionej tezy, formułuje szereg wniosków o dużym praktycznym znaczeniu.

Zbadanie wpływu umieszczenia przewodu elastycznego wewnątrz rurociągu na parametry hydrauliczne ciśnieniowego przepływu wody w warunkach ustalonych i nieustalonych z wykorzystaniem metod analitycznych, numerycznych i eksperymentalnych, analiza wyników oraz wyciągnięte wnioski, stanowią o dużej wartości merytorycznej i aplikacyjnej ocenianej pracy.

Cel rozprawy został osiągnięty, teza udowodniona, a otrzymane wyniki mogą być uznane za rozwiązanie ważnego problemu naukowego.

4. Uwagi krytyczne

4.1. Uwagi formalne

Język i układ rozprawy są zwięzłe i poprawne. Sposób prezentacji wyników jest właściwy pod względem edytorskim. Wszystkie rysunki, fotografie i tabele są starannie wykonane i dobrze dobrane. Kilka zastrzeżeń natury merytorycznej, dotyczących prezentacji wyników, podano w pkt. 4.2 niniejszej recenzji. Mimo dużej staranności, Autor nie ustrzegł się usterek edytorskich, które w kolejności chronologicznej wymieniono poniżej.

L.p.	Str.	Wiersz	Jest	Powinno być
1.	24	7d	...wewnętrznej D_2 ...	...zewewnętrznej D_2 ...
2.	27	1g	... $D_2 = 0,1$ m...	... $D_1 = 0,1$ m...
3.	29	14g	... $D_2 = 0,1$ m...	... $D_1 = 0,1$ m....

L.p.	Str.	Wiersz	Jest	Powinno być
4.	51	5g	...z zależności (2.24)...*	...z zależności (2.23)...
5.	51	8g	...(2.24)...	...(2.23)...
6.	53	3d	...zależnością (2.23)...	...zależnością (2.24)...
7.	77	8g	...(3.28)...	...(3.29)...
8.	89	4g	...(3.50)...	...(3.52)...
9.	89	10g	...(3.47)...	...(3.49)...
10.	90	5g	... $e_1 = 0,001$ m.	... $e_2 = 0,001$ m.
11.	92	6d	... $e/D < 0,1$.	... $e/D > 0,1$.
12.	93	4g	...(3.28).	...(3.29).
13.	93	9d	...względnego przyrostu...	...względnej zmiany...
14.	116	6g	...wywołana poprzez zatkanie...	...wywołana przez zamknięcie...
15.	130	12d	...(tab. 3.2).; <u>uwaga</u> : brak tabeli 3.2	...(tab. 3.4).
16.	142	9g	...(3.107)...	...(3.108)...
17.	145	1g	...(3.115).	...(3.116).
18.	147	4d	...przy pomocy obliczeń...	...za pomocą obliczeń...

Do uwag zawartych w tabeli można dodać trzy kolejne o nieco innym charakterze.

19. Str. 14 (spis oznaczeń), str. 21 wz. (2.6) i dalsze strony – symbole lepkości kinematycznej średniej prędkości przepływu wody są nierozróżnialne.
20. Str. 60 w tabeli 2.20 i na str. 61 na rys. 2.17, ten sam symbol h_L oznacza dwie różne wielkości fizyczne.
21. Str. 153 wiersze 9d i 10d, zdanie: „*Jedynie dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym wartość χ dla wszystkich przepływów jest praktycznie taka sama (zielone znaczniki) i wynosi ok. 2,2%*”, nie znajduje potwierdzenia na rys. 3.55.

4.2. Uwagi merytoryczne

Uwagi podano w kolejności chronologicznej.

1. Str. 33 rys. 2.8, wątpliwości budzi lokalizacja króćca impulsowego przy hydroforze wynikająca z braku informacji o jego odległości od wylotu z hydroforu oraz oddalenia od zaworu nr 9.
2. Str. 55 uwagi dotyczące równań (2.31) i (2.32). W rozdziale 2. analizowany jest ustalony turbulentny przepływ nieściśliwego płynu newtonowskiego (wody). Natomiast równania (2.31) i (2.32), dotyczą nieustalonego laminarnego przepływu ściśliwego płynu

- newtonowskiego. Zamiast wymienionych równań należało podać równania RANS w formie uproszczonej – ważnej dla analizowanego przepływu.
3. Str. 57 wiersze 6 i 7d, informacja: „...wybrano te, które pozwalały na uzyskiwanie poprawnych wyników w stosunkowo krótkim czasie.” skłania do zadania dwóch pytań:
 - w jaki sposób oceniano poprawność wyników symulacji kodem CFD?
 - co było miarą poprawności wyników?
 4. Str. 90 rys. 3.13 i str. 91 rys. 3.14, jeżeli wyniki obliczeń dotyczą przewodu cienkościennego o grubości ścianki $e_2 = 0,001$ m, to w zakresie $D_2/D_1 < 0,12$ wyniki pokazane na rys. 3.14 są nieważne, gdyż odnoszą się do przewodu grubościennego.
 5. Str. 92 wiersze 9g i 10g, stwierdzenie: „umieszczenie przewodów cienkościennech o sprężystości $E_2 > 0,1E_1$ zwiększa maksymalne przyrosty ciśnienia (linia żółta, ciemnoniebieska i zielona)” jest częściowo niezgodne z rys. 3.14.
 6. Str. 96 wiersze 8g÷10g, dlaczego założenia do obliczeń dotyczące przewodu grubościennego są identyczne z przyjętymi dla przewodu cienkościennego (str. 90)? (w konsekwencji przewody grubościenny i cienkościenny są nierozróżnialne).
 7. Str. 96, rys. 3.17 jest identyczny z rys. 3.13 na str. 90.
 8. Str. 96 rys. 3. 17, dla $D_2/D_1 > 0,12$ przewód nie jest grubościenny (jest cienkościenny).
 9. Str. 98, rys. 3.19 jest identyczny z rys. 3.14 na str. 91.
 10. Str. 98 rys. 3.19, dla $D_2/D_1 > 0,12$ przewód nie jest grubościenny (jest cienkościenny).
 11. Str. 100 tabela 3.1, jaka jest interpretacja fizyczna nieciągłości polegającej na tym, że dla $e_2/D_2 = 0,1$, równania (3.72) i (3.82) nie są identyczne (nie przechodzą jedno w drugie)?
 12. Str. 101 rys. 3.20, brak jasności co do warunków (założeń) dla których wykonano obliczenia:
 - czy parametry rurociągu przyjęto jak wcześniej, tzn.: $E_1 = 200$ GPa, $D_1 = 0,1$ m, $e_1 = 0,003$ m?,
 - zapis $e_2 = 0,1 D_2 = 0,01$ m, jest mylący, gdyż może oznaczać zarówno $e_2 = 0,01$ m i $D_2 = 0,1$ m, jak i $e_2 = 0,001$ m i $D_2 = 0,01$ m; poprawny (jednoznaczny) zapis powinien mieć postać: $e_2 = 0,1D_2$ i $D_2 = 0,01$ m,
 - w każdym przypadku mamy $e_2 = \text{const.}$ i $D_2 = \text{const.}$, co wobec $D_1 = \text{const.}$ uniemożliwia wykonanie obliczeń c_g/c_c w funkcji D_2/D_1 (rys. 3.20).
 13. Str. 102 rys. 3.21, oś odciętych e_2/D_2 dzieli przewody na cienkościenne ($e_2/D_2 < 0,1$) i grubościenne ($e_2/D_2 > 0,1$). Jak zatem obliczano wartości rzędnych (c_g/c_c) skoro

dziedziny funkcji opisanych równaniami na c_g i c_c są zbiorami rozłącznymi (wzór na c_c jest ważny dla $e_2/D_2 < 0,1$ i wzór na c_g jest ważny dla $e_2/D_2 > 0,1$)?

14. Str. 103 rys. 3.22 i str. 104 rysunki 3.23 i 3.24, skoro do obliczeń przyjęto $D_1 = 0,1$ m i $D_2 = 0,01$ m (str. 103 wiersze 5g i 7g), to w jaki sposób zrealizowano zmienność D_2/D_1 od 0 do 1?
15. Str. 106 rys. 3.25, podobnie jak wyżej, czyli: ($D_1 = \text{const.}$ i $D_2 = \text{const.}$) $\Rightarrow$ ($D_2/D_1 = \text{const.}$), co sprawia, że zmienność D_2/D_1 na osi odciętych na rys. 3.25 jest niezrozumiała.

Powyższe uwagi w większości mają charakter dyskusyjny i nie podważają najważniejszych osiągnięć ocenianej pracy.

5. Podsumowanie

Praca, jest napisana poprawnym językiem. Stosowana terminologia, nie budzi zastrzeżeń. Autor wykazuje bardzo dobrą znajomość omawianych zagadnień, umiejętność formułowania problemów badawczych i ich rozwiązywania.

Za oryginalny dorobek naukowy Kandydata należy uznać:

- wyprowadzenie równań na straty ciśnienia w przepływie ustalonym oraz równań na prędkość fali ciśnienia w uderzeniu hydraulicznym w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym, grubościennym i cienkościennym przewodem elastycznym,
- zbudowanie stanowiska badawczego i przeprowadzenie badań weryfikujących poprawność wyprowadzonych równań i otrzymanych wyników,
- zbadanie wpływu średnicy przewodu, wytrzymałości materiału użytego do jego wykonania oraz elastyczności ścianek na charakterystykę ustalonego i nieustalonego, ciśnieniowego przepływu wody w rurociągu stalowym zawierającym taki przewód,
- wykazanie, że umieszczenie elastycznego przewodu (światłowodu) wewnątrz stalowego rurociągu wywołuje niewielki wzrost strat ciśnienia w ustalonym przepływie ciśnieniowym oraz tłumi przyrosty ciśnienia i skraca czas trwania uderzenia hydraulicznego.

6. Wniosek końcowy

Reasumując, uważam, że przedstawiona **praca doktorska mgr inż. Michała Kubraka spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim** określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami). **Stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.**



Dr hab. inż. Jerzy Gałaj, prof. nzw. SGSP
Katedra Techniki Pożarniczej
Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego
Szkoła Główna Służby Pożarniczej
01-692 Warszawa, ul. Słowackiego 52/54
e-mail: jgalaj@sgsp.edu.pl

Warszawa, dn. 26.02.2018

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Kubraka

pt.: „Ciśnieniowy przepływ wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem”
opracowana na podstawie uchwały nr 67/2017 Rady Wydziału Instalacji Budowlanych i
Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej z dnia 21 listopada 2017 roku (pismo
WIBHiŚ – 10/2018 r. z dnia 15.01.2018 Dziekana Wydziału Instalacji Budowlanych,
Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej
prof. nzw. dr hab. inż. Krzysztofa Wojdygi)

Promotorem rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Michała Kubraka pt.: „Ciśnieniowy przepływ wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem” jest prof. dr hab. inż. Marek Mitosek. Recenzowana praca dotyczy analizy wpływu umieszczenia przewodu w obszarze ustalonego i nieustalonego ciśnieniowego przepływu wody, na parametry hydrauliczne w rurociągu. Zagadnienia te są szczególnie istotne w obecnych czasach, kiedy przy intensywnie rozbudowywanej infrastrukturze telekomunikacyjnej zwłaszcza w gęsto zabudowanych obszarach miast, coraz częściej istniejąca sieć wodociągowa będzie wykorzystywana do poprowadzenia przewodów światłowodowych. Takie rozwiązanie będzie chroniło je przed ewentualnym zniszczeniem np. podczas pożaru.

Recenzowana praca liczy 183 strony maszynopisu i składa się z czterech głównych rozdziałów podzielonych na podrozdziały oraz bibliografii obejmującej 66 pozycji (47 z nich stanowią opracowania autorów zagranicznych) i załącznika, w którym została umieszczona większość wykresów przedstawiających przebiegi ciśnienia, uzyskane podczas badań uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem.

W rozdziale 1 zatytułowanym „Wprowadzenie” autor uzasadnił podjęcie tematu, sformułował tezy i cele pracy a także przedstawił jej zakres oraz aktualny stan wiedzy związany zarówno z ustalonym jak i nieustalonym przepływem wody w rurociągach pod ciśnieniem. Praca składa się z dwóch zasadniczych części. Pierwsza z nich dotyczy badań ustalonego ciśnieniowego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem (rozdział 2), natomiast druga nieustalonego przepływu wody występującego podczas uderzenia hydraulicznego (rozdział 3). Jako metody badawcze w obu wspomnianych przypadkach autor zastosował wszystkie, jakie są obecnie dostępne czyli analizę teoretyczną, badania eksperymentalne oraz obliczenia numeryczne. W rozdziale 4 zamieszczono

podsumowanie oraz wnioski końcowe sformułowane na podstawie analizy przepływów ustalonych i nieustalonych.

W pracy autor postawił następującą tezę „Przewód umieszczony wewnątrz stalowego rurociągu w obszarze ciśnieniowego przepływu powoduje niewielki wzrost liniowych strat ciśnienia w ruchu ustalonym oraz ma tłumiące oddziaływanie na przyrosty ciśnienia wody i skraca czas trwania dodatniego uderzenia hydraulicznego”. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych podparte odpowiednią teorią dowiodły prawdziwości postawionej tezy w większości analizowanych przypadków.

Zasadniczą część rozprawy stanowią rozdziały 2 i 3. W pierwszym z nich po podaniu ogólnych zależności związanych z oporami tarcia w rurociągu bez przewodu i z umieszczonym wewnątrz przewodem o innej chropowatości autor przeprowadził teoretyczną analizę ustalonego przepływu wody w takim rurociągu porównując współczynniki strat liniowych i straty energii ciśnienia w rurociągach bez przewodu i z przewodem o różnych średnicach. Aby zweryfikować wyniki analizy teoretycznej autor przeprowadził hydrauliczne badania ustalonego przepływu wody w rurociągu o długości 48 m, średnicy wewnętrznej 0,0531 m i grubości ścianki 0,0035 m bez i z alternatywnie umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym o czterech różnych średnicach: 5,3 mm, 6,0 mm, 6,5 mm lub 7,0 mm a także grubościennym elastycznym przewodem silikonowym o średnicy 8,0 mm i grubości ścianki 1,0 mm. Otrzymane wyniki pomiarów wysokości strat energii w zależności od wydajności wody i średnicy przewodu zestawiono w tabelach i przedstawiono na wykresach. Autor w tabeli 2.16 porównał również rzeczywiste straty energii z wartościami teoretycznymi obliczonymi z zależności (2.24) na współczynnik κ , który zgodnie z przyjętym na podstawie rozważań założeniem jest w przybliżeniu równy stosunkowi strat energii w rurociągu bez i z przewodem. W tym samym rozdziale oprócz analizy teoretycznej i badań doświadczalnych autor wykorzystując dostępne narzędzie w postaci programu CFD Fluent przeprowadził numeryczne modelowanie przepływu wody w rurociągu z alternatywnie umieszczonymi wewnątrz przewodami o średnicach 5,3 i 8,0 mm, a następnie otrzymane wyniki (strata energii, spadek hydrauliczny) porównał z wynikami badań doświadczalnych. W pierwszej części rozdziału 3 autor przedstawił analityczny opis zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu, przy czym jako pierwszy podał wyprowadzenie wzorów na szybkość rozchodzenia się fali w rurociągach z umieszczonym wewnątrz przewodem pełnym, cienkościennym i grubościennym. Przenalizował również wpływ umieszczenia w rurociągu przewodu i jego sprężystości na maksymalne przyrosty ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego. Aby zweryfikować otrzymane wyniki analizy teoretycznej, a w szczególności szybkości fali i przebiegi ciśnienia, autor przeprowadził hydrauliczne badania uderzenia hydraulicznego w rurociągu bez i z umieszczonym wewnątrz przewodem. Badaniami objęto cztery różne światłowody telekomunikacyjne o średnicach 5,3 mm, 6,0 mm, 6,5 mm i 7,0 mm oraz grubościenny przewód silikonowy o średnicy zewnętrznej 8,0 mm. Zjawisko uderzenia hydraulicznego zainicjowano przy trzech różnych wydatkach wody w rurociągu: 40, 50 i 60 dm³/min. Głównym efektem wspomnianych badań były takie wielkości charakteryzujące uderzeni hydrauliczne, jak szybkość i okres fali uderzeniowej, maksymalną wartość uzyskanego ciśnienia oraz jego przebiegi czasowe ograniczone do 10 s. Ze względu na dużą liczbę wykresów ilustrujących przebiegi ciśnienia większość z nich umieszczono w załączniku. W tej części zamieszczono również wszechstronną analizę uwzględniającą wpływ wydatku i sprężystości przewodu na podstawowe parametry uderzenia hydraulicznego oraz ich porównanie z wartościami teoretycznymi. W przypadku uderzenia hydraulicznego autor zastosował numeryczną analizę

zjawiska w rurociągu bez i z zamocowanym wewnątrz przewodem przy pomocy programu komputerowego opracowanego przez prof. Romualda Szymkiewicza opartego na zmodyfikowanej metodzie elementów skończonych. W pierwszej kolejności obliczenia posłużyły do wyznaczenia wartości współczynników korygujących β_1 i β_2 , dla których bezwzględne odchylenie procentowe maksimów i minimów ciśnień jest najmniejsze, a następnie dla wartości współczynników spełniających ten warunek przeprowadzono obliczenia parametrów uderzenia hydraulicznego, w wyniku których uzyskano przebiegi ciśnienia w rurociągu dla wybranej wydajności wody równej około 60 dm³/min. Na końcu rozdziału przeprowadzono analizę porównawczą wyznaczonych numerycznie przebiegów ciśnienia z uzyskanymi podczas badań doświadczalnych włącznie z wartościami maksymalnymi ciśnienia. W ostatnim rozdziale zamieszczono podsumowanie wszystkich badań oraz dziewięć wniosków ogólnych, z których ostatni moim zdaniem powinien być potraktowany oddzielnie jako efekt badań.

Do oryginalnych twórczych osiągnięć naukowych autora należy zaliczyć:

- a) po raz pierwszy przeprowadzenie badań hydraulicznych ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem światłowodowym o różnych średnicach a także grubościennym elastycznym przewodem silikonowym na specjalnie zbudowanym stanowisku badawczym, których celem było wyjaśnienie wpływu umieszczenia przewodu w postaci światłowodu telekomunikacyjnego na jej przepustowość i straty ciśnienia,
- b) po raz pierwszy przeprowadzenie numerycznej analizy parametrów ustalonego przepływu wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem przy wykorzystaniu programu CFD Fluent,
- c) po raz pierwszy przeprowadzenie badań hydraulicznych nieustalonego przepływu wody w rurociągu w umieszczonym wewnątrz pełnym, cienkościennym lub grubościennym przewodem, których celem było wyjaśnienie wpływu sprężystości ścianki przewodu i jego średnicy na przebieg uderzenia hydraulicznego w tym w szczególności na prędkość rozchodzenia się fali uderzeniowej i maksymalną wartość ciśnienia oraz jego tłumienie,
- d) po raz pierwszy przeprowadzenie numerycznej analizy nieustalonego przepływu wody podczas uderzenia hydraulicznego w rurociągu z przewodem przy wykorzystaniu programu obliczeniowego opracowanego przez prof. dr hab. inż. Romualda Szymkiewicza,
- e) po raz pierwszy wyprowadzenie trzech zależności pozwalających na analityczne obliczenie prędkości rozchodzenia się fali uderzeniowej w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym, cienkościennym oraz grubościennym przewodem, co należy uznać za największy wkład

Mocną stroną pracy jest czytelne przedstawienie w formie graficznej otrzymanych wyników badań w postaci kolorowych wykresów liniowych lub punktowych niezależnie od zmierzonych lub wyliczonych wartości zestawionych w tabelach.

Autor nie ustrzegł się w swej pracy uchybień zarówno natury merytorycznej jak i formalnej. Część z nich mogła wynikać z nieuwagi a także niezbyt dokładnego sprawdzenia ostatecznej wersji pracy. Poniżej przedstawiłem moje wątpliwości, uwagi, spostrzeżenia i komentarze odnoszące się do treści ocenianej rozprawy. Zostały one podzielone na część merytoryczną i formalną przy czym poszczególne uwagi w każdej z części zostały przedstawione w porządku chronologicznym.

1. Uwagi o charakterze merytorycznym

- a) ze względu na przyjęte w podrozdziale 1.1. nazewnictwo w zakresie pojęć „przewód” i „rurociąg” w podrozdziale 1.4 w odpowiednich podtytułach należało użyć słowa „rurociąg” a nie „przewód”,
- b) wzór (2.8) Colebrooka-White’a stosuje się tylko w strefie przejściowej a nie w każdej z wymienionych stref,
- c) w tekście na str. 23 przed wzorem (2.11) powołano się błędnie na zależność (2.1) zamiast na (2.10),
- d) na str. 24 brakuje informacji, że do obliczenia współczynnika oporu λ_i ze wzoru Colebrooka-White’a potrzebna jest znajomość chropowatości względnej ϵ_i ,
- e) na rys. 2.2 w tytule rysunku brakuje wzmianki o drugiej osi umieszczonej po prawej stronie przedstawiającej stosunek prędkości wody w rurociągu z przewodem do prędkości bez przewodu,
- f) na górze str. 27 zgodnie z przyjętymi oznaczeniami powinno być D_1 (średnica rurociągu) a nie D_2 (średnica przewodu),
- g) informacja o metodzie obliczania współczynników strat liniowych λ_z i λ_b została podana zbyt późno, bowiem dopiero na str. 29, natomiast o stosunku tych dwóch wartości jest mowa już na str. 26,
- h) w celach porównawczych najlepiej byłoby zrobić badania ustalonego przepływu wody z przewodem i bez przewodu dla tych samych wydatków wody, natomiast można się domyśleć, że z jakichś względów było to niemożliwe. Jeżeli tak, to autor powinien o tym wspomnieć w pracy,
- i) w opisie badań brakuje informacji nt. ciśnienia wody w hydroforze, które ma istotny wpływ na przepływ wody w rurociągu,
- j) na str. 42 dobrze byłoby podać wzór na chropowatość bezwzględną k , która służy później do wyznaczenia innych wielkości zwłaszcza, że we wzorze Colebrooka-White’a wielkość k bezpośrednio nie występuje,
- k) na str. 42 brakuje informacji, na jakiej podstawie przyjęto niepewność pomiarową przepływomierza elektromagnetycznego,
- l) z treści pracy nie wynika dlaczego autor nie obliczył i nie zamieścił w tabelach 2.9-2.13 wartości współczynników liniowych strat w rurociągu z przewodem, tak jak to ma miejsce w tabeli 2.8, w której zamieszczono wyniki badań dla rurociągu bez przewodu,
- m) na str. 50 brakuje wzoru na k_1 i Δk_1 ,
- n) na górze strony 51 powołano się na niewłaściwy numer wzoru, zamiast (2.23) powinno być (2.22),
- o) uzasadnienie o celowości porównania stosunku strat energii ze współczynnikiem k powinno się znaleźć przed tabelą 2.16, a nie dopiero w podsumowaniu,
- p) na str. 55 pod wzorem (2.32) brak objaśnienia wielkości wektorowej $\mathbf{v}$,
- q) na str. 59 powołano się na niewłaściwe tabele, zamiast 2.1 i 2.6, powinno być 2.3 i 2.7,
- r) z rozdz. 2.5 a w szczególności tab. 2.9 i 2.13 oraz z treści zamieszczonej w rozdz. 2.6.2 wynika, że założono inne wartości początkowe prędkości niż podana w rozdz. 2.6.3 i w tytule rys. 2.16. Podana wartość początkowa prędkości odpowiadała średnicy $D_2 = 8$ mm,
- s) na str. 60 nie podano informacji skąd wzięto, czy też obliczono wartość współczynnika strat liniowych λ niezbędna do wyznaczenia wielkości liniowych strat energii h_L ze wzoru (2.5),
- t) z rys. 2.17 trudno jednoznacznie stwierdzić, że liniowe straty energii przyjmują podobne wartości, ponieważ są one porównywane przy różnych wydatkach,

- u) na str. 72 pod wzorem 3.16 brakuje objaśnienia wielkości D i ΔD ,
- v) moim zdaniem równania (3.17) i (3.19) nie zostały dostatecznie objaśnione,
- w) na str. 75 powtórzono tę samą informację o oznaczeniach parametrów na lewo od przekroju 2 i na prawo od przekroju 1,
- x) biorąc pod uwagę wzory (3.10) i (3.25) na str. 77 we wzorach (3.29), (3.30) i (3.31) zamiast $A_{10}-A_{20}$ powinno być $A_{20}-A_{10}$. Na szczęście we wzorze końcowym (3.35) jest poprawnie,
- y) na str. 80 w mianowniku wzorów (3.47) i (3.82) zastosowano niewłaściwe znaki, zamiast $A+\Delta A_1-\Delta A_2$ powinno być $A-\Delta A_1+\Delta A_2$, co ostatecznie nie wpłynęło na końcowy wynik, ponieważ wcześniej pominięto mało znaczące wyrazy zawierające przyrosty powierzchni,
- z) przed wzorem (3.65) należało się raczej powołać na wzór (3.43), zamiast na wzór (3.41),
- aa) na str. 89 przed wzorem (3.74) należało się powołać na wzór (3.67) a nie (3.47),
- bb) na str. 110 nie podano temperatury wody, jaką zmierzono podczas badania uderzenia hydraulicznego,
- cc) w pracy brakuje tabeli 3.2, na którą powołuje się autor na str. 130,
- dd) wniosek nr 9 powinien być dołączony do podsumowania, ponieważ dotyczy raczej efektów praktycznych przeprowadzonych badań m.in. w postaci dwóch zgłoszonych patentów i nie powinien być traktowany stricte jako wniosek z badań.

2. Uwagi o charakterze formalnym

- a) objaśnienia pod wzorami nie są konieczne, jeżeli w pracy na początku zamieszczono wykaz oznaczeń,
- b) po tytułach rysunków i tabel nie należy stawiać kropek, podobnie po tytułach podrozdziałów nie stawia się kropek (np. 3.2.2, 3.2.7 i 3.5.1),
- c) we wzorze (2.6) oznaczenia prędkości i współczynnika lepkości kinematycznej praktycznie się nie różnią, proponowałbym zastosować dla prędkości inne oznaczenie lub dodatkowy indeks,
- d) na str. 28 zauważono literówkę, zamiast „linowych” powinno być „liniowych”,
- e) moim zdaniem fotografie umieszczone w pracy można by potraktować jako rysunki i ponumerować jednolicie w pracy,
- f) na str. 46 w wersji angielskiej podano błędny numer tabeli, zamiast 2.9 powinno być 2.13,
- g) na str. 56 zamiast „stałości prędkości” powinno być „stałej prędkości”,
- h) na str. 59 brakuje przecinka oddzielającego część całkowitą od części ułamkowej jednej z założonych prędkości, zamiast 0 439 powinno być 0,439,
- i) pełny rozdział powinien zaczynać się od początku nowej strony (np. rozdział 2 zamiast na str. 19, na str. 20 i 3 zamiast na str. 65, na str. 66),
- j) na str. 64 zamiast „są średnio 9% niższe” powinno być „są średnio o 9% niższe”,
- k) na str. 73 zamiast „własności cieczy” powinno być „właściwości cieczy”,
- l) wykresy zamieszczone na rys. 3.6 i 3.7 można było przedstawić na jednym rysunku,
- m) na str. 77 przed równaniem (3.30) zamiast (3.28) powinno być (3.29),
- n) większa część strony 99 jest pusta, moim zdaniem można było trochę inaczej rozmieścić tekst w ramach rozdziału 3.2.7, np. przenieść jego część zamieszczoną po tabeli 3.1 przed tę tabelę,
- o) na końcu str. 127 powinno być „w funkcji stosunku średnicy zewnętrznej przewodu i średnicy wewnętrznej rurociągu” zamiast „ w funkcji stosunku średnicy wewnętrznej rurociągu i zewnętrznej przewodu”,

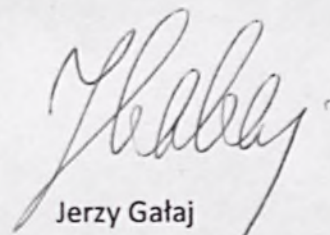
- p) w głównej części pracy brakuje spisu tabel i rysunków w przeciwieństwie do załącznika,
- q) ze względu na kolejność proponowałbym zmianę tytułu ostatniego rozdziału z „Wnioski i podsumowanie” na „Podsumowanie i wnioski”,
- r) w większości artykułów, na które autor powołuje się w spisie literatury brakuje informacji o stronach.

Biorąc pod uwagę wszystkie przyjęte kryteria oceny, stwierdzam, iż recenzowana przeze mnie rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Kubraka pt. „Ciśnieniowy przepływ wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem” odpowiada warunkom stawianym tego typu opracowaniom i spełnia wymagania stawiane przez przepisy Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami). W związku z powyższym wnoszę do Rady Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska o dopuszczenie Pana Michała Kubraka do publicznej obrony rozprawy.

Ze względu na wysoki poziom naukowy pracy wynikający m.in. z wszechstronnego podejścia do rozpatrywanych zagadnień polegającego na wykorzystaniu wszystkich dostępnych metod: analitycznej, doświadczalnej i symulacji komputerowej oraz wyprowadzenia po raz pierwszy oryginalnych wzorów na prędkość fali uderzenia hydraulicznego w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem pełnym, cienkościennym i grubościennym, pomimo dostrzeżonych w rozprawie błędów i nieścisłości, doceniając znaczny wkład doktoranta w rozwój inżynierii środowiska, stwierdzam, że rozprawa zasługuje na wyróżnienie.

Warszawa, dn. 26 lutego 2018 roku

dr hab. inż., prof. nzw. SGSP



Jerzy Gałaj



WIBHiŚ - 28 /2018

Warszawa, 02.03.2018 r.



Biblioteka Główna
Politechniki Warszawskiej
00-661 Warszawa
ul. Plac Politechniki 1

Przesyłam w załączeniu 2 egzemplarze rozprawy doktorskiej

mgr inż. Michała Kubraka

na temat:

***„Ciśnieniowy przepływ wody w rurociągu z umieszczonym
wewnątrz przewodem”***

z prośbą o udostępnienie rozprawy zainteresowanym w związku z dyskusją publiczną, która odbędzie się w dniu 19 marca br. o godz. 11⁰⁰ w sali nr 115 w Warszawie ul. Nowowiejska 20.

Załącznik

DZIEKAN
Wydziału Instalacji Budowlanych
Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

prof. dr hab. inż. Krzysztof Wojdyga
-1-