

Zbigniew Lewicki

OBLICZANIE STRAT HYDRAULICZNYCH W PRZEWODACH CZYNNYCH SIECI WODOCIĄGOWYCH

Streszczenie

Omówiono problem wzrostu oporności przewodów w czasie ich eksploatacji. Dokonano przeglądu i analizy wzorów empirycznych, których używa się do obliczania współczynnika oporności. Podano metodę obliczania strat hydraulicznych w czynnych sieciach wodociągowych.

Summary

The problem of the increasing resistance of water — pipe network in the course of their exploitation and the review and analysis of empirical formulas which to calculation resistance coefficient are used, is presented. A new calculation method of the hydraulic losses in exploited water — pipe network is described.

Wstęp

Zmiany średnicy i chropowatości ścian przewodów wodociągowych, zachodzące w procesie ich wieloletniej eksploatacji, powodują znaczny wzrost strat hydraulicznych w tych przewodach. Przy ciągłym zwiększaniu się zużycia wody, skutki wzrostu oporów przepływu stają się coraz bardziej odczuwalne i niejednokrotnie prowadzą do poważnych zakłóceń w funkcjonowaniu systemów zaopatrzenia w wodę. Zakłócenia te, wyrażające się najczęściej niedostatecznym ciśnieniem wody w różnych punktach zasilanego obszaru, występują stale lub tylko w godzinach szczytowych zużycia wody w mieście. O występowaniu za niskich ciśnień w sieci, świadczą najczęściej alarmujące sygnały odbiorców wody, a znacznie rzadziej wyniki kontrolnych pomiarów ciśnienia.

Rozbudowa istniejących sieci wodociągowych powoduje przeważnie tylko doraźną poprawę warunków zaopatrzenia w wodę. Wymiana starych rurociągów na nowe lub układanie dodatkowych przewodów obok już istniejących, nie może przynieść założonych efektów, jeżeli dokony-

wane będą bez uprzedniego rozpoznania rzeczywistych warunków eksploatacyjnych sieci. Wymiana pomp w pompowniach na nowe o większej wydajności i wysokości podnoszenia, daje również jedynie doraźne efekty eksploatacyjne, przy równoczesnym wzroście zużycia energii elektrycznej. Nadmierne podwyższanie ciśnienia wody w źródłach zasilania sieci, jest przedsięwzięciem ryzykownym, szczególnie w przypadku sieci składających się z dużej ilości przewodów o długim okresie eksploatacji. Zmniejszona wytrzymałość połączeń rurowych i ich uszczelnień przy nadmiernym wzroście ciśnienia, może być przyczyną nagłego zwiększenia się strat wody w sieci.

„Zarastanie” przewodów wyrażające się zmniejszeniem przekroju przepływowego i wzrostem chropowatości wewnętrznej ścianek rur, spowodowane jest przeważnie wciąż jeszcze nie najlepszą jakością wody wodociągowej oraz niewłaściwie prowadzoną eksploatacją sieci. Systematyczne czyszczenie i płukanie przewodów oraz kontrolne pomiary hydrauliczne na sieci, powinny być zawsze podstawą prawidłowej eksploatacji. Konieczne jest także wzmożenie wysiłków nad poprawą efektów uzdatniania wody na istniejących i projektowanych ujęciach oraz intensyfikacja badań nad wpływem jakości wody na stan hydrauliczny sieci wodociągowych.

Prawidłowa eksploatacja, modernizacja i rozbudowa istniejących sieci powinna opierać się na odtworzeniu rzeczywistych warunków eksploatacyjnych całego systemu zaopatrzenia w wodę, na co zwracają uwagę autorzy coraz liczniejszych publikacji na ten temat [4], [5], [9], [14], [18], [23], [27 ÷ 31], [42]. Podstawą do oceny stanu hydraulicznego sieci wodociągowych powinny być pomiary wykonywane bezpośrednio w terenie. Wyniki takich pomiarów umożliwiają przeprowadzanie obliczeń porównawczych i przybliżone określanie warunków eksploatacyjnych. Wyznaczone w obliczeniach natężenia przepływu, ciśnienia i inne parametry określające sprawność hydrauliczną przewodów, stwarzają pełne podstawy do racjonalnej modernizacji sieci i projektowania ich rozbudowy. Wyniki obliczeń można również wykorzystać do opracowania najważniejszych zaleceń eksploatacyjnych dotyczących czyszczenia, płukania i wymiany przewodów. Metody wykonywania pomiarów hydraulicznych sieci wodociągowych oraz aparatura służąca do tego celu, zostały opisane w pracach: [21], [29], [34], [42]. Oryginalny sposób prowadzenia obliczeń porównawczych został przedstawiony na VI sympozjum naukowym nt. „Systemy zaopatrzenia w wodę miast i aglomeracji miejsko-przemysłowych” [4]. Problem obliczeń porównawczych poruszany jest również w pracach [5], [6], [14], [18 ÷ 20], [42]. Podstawowymi problemami występującymi w tego typu obliczeniach, jest ustalenie przestrzennego rozkładu zużycia wody w mieście i jego rejonach oraz określenie sposobu

obliczania strat ciśnienia w rurociągach o podwyższonej chropowatości ścian. Pierwszy z wymienionych problemów, został szczegółowo omówiony w pracy [4], natomiast propozycja rozwiązania drugiego problemu będzie podana w niniejszym artykule.

Sprawność hydrauliczna przewodów wodociągowych

Sprawność hydrauliczną przewodów wodociągowych charakteryzują następujące wielkości:

— współczynnik oporności właściwej C

$$C = \frac{\Delta h}{l \cdot Q^2} \quad \text{s}^2/\text{m}^6 \quad (1)$$

— współczynnik przepływności właściwej M

$$M = \frac{1}{\sqrt{C}} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (2)$$

— współczynnik liniowych oporów tarcia

$$\lambda = \frac{2 g d \Delta h}{l v^2} \quad (3)$$

— chropowatość bezgłębka ścianek rurociągu.

Oznaczenia użyte we wzorach (1 ÷ 3):

Δh — strata ciśnienia wody na odcinku przewodu, m s.w.

l — długość odcinka przewodu, m

Q — natężenie przepływu, m^3/s

d — średnica wewnętrzna przewodu, m

v — średnia prędkość przepływu, m/s

Wysokość liniowych strat ciśnienia w przewodach wodociągowych oblicza się na podstawie powszechnie stosowanego wzoru Darcy — Weisbacha:

$$\Delta h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad \text{m s.w.} \quad (4)$$

Wzór ten dotyczy całego zakresu przepływów występujących w przewodach zamkniętych, czyli zarówno przepływów laminarnych (uwarstwionych) jak i turbulentnych (burzliwych). W przewodach wodociągowych występuje przeważnie ruch burzliwy. Obszar występowania tego ruchu dzieli się na trzy strefy przepływów:

strefa A — przepływ w rurach hydraulicznie gładkich,

strefa B — przepływ w warunkach zmiennej chropowatości hydraulicznej ścian (strefa przejściowa),

strefa C — przepływ w warunkach stałej chropowatości hydraulicznej ścian (strefa oporów kwadratowych).

W przewodach żeliwnych, stalowych i azbestowo-cementowych najczęściej występujących w sieciach wodociągowych, warunki przepływu są zazwyczaj zbliżone do warunków odpowiadających strefie przejściowej B, rzadziej strefie C. Warunki przepływu odpowiadające strefie A mogą wystąpić jedynie w przewodach szklanych, miedzianych lub z tworzyw sztucznych.

Wysokość miejscowych strat ciśnienia, spowodowanych różnego rodzaju lokalnymi przeszkodami, jak kolana, trójniki, zawory, itp., oblicza się wg wzoru:

$$\Delta h_m = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad \text{m s.w.} \quad (5)$$

gdzie: ζ — bezwymiarowy współczynnik oporu miejscowego,
 v — średnia prędkość przepływu za przeszkodą, m/s,
 g — przyspieszenie ziemskie, m/s².

W obliczeniach strat ciśnienia w sieciach wodociągowych opory miejscowe są przeważnie pomijane ze względu na „rzekomo” nieznaczny ich udział w stratach ogólnych. Wyjątkowo wielkość tych strat jest uwzględniana w obliczeniach jako 15% dodatek do strat określonych wg wzoru (4). W rzeczywistości wielkość tego dodatku może się wahać w granicach 5÷30%, w przypadku przewodów o średnicy nominalnej 100÷400 mm [15]. W przewodach o podwyższonej chropowatości wpływ oporów miejscowych na wartość ogólnych strat ciśnienia, może być jeszcze większy ze względu na inkrustację kształtek i armatury.

Istnieje możliwość wyrażania oporów miejscowych przez tzw. „ekwiwalentne” długości l_m , których wielkość określa się z następującej zależności:

$$l_m = \zeta \frac{d}{\lambda} \quad \text{m} \quad (6)$$

Uwzględnianie oporów miejscowych nabiera szczególnego znaczenia w przypadku wykonywania obliczeń porównawczych czynnych sieci wodociągowych, w których ustalenie rzeczywistych strat ciśnienia na poszczególnych odcinkach rurociągów jest zasadniczym problemem. Pomijanie strat miejscowych powoduje, że do obliczeń wprowadzane są stale „za krótkie” długości odcinków [14], [15], [19].

Wprowadzenie pojęcia współczynnika oporności właściwej, pozwala na znaczne uproszczenie obliczeń strat hydraulicznych w rurociągach. Wyznacza się je na podstawie prostej zależności:

$$\Delta h = C l_z Q^2 \quad \text{m s.w.} \quad (7)$$

gdzie:

Δh — wysokość strat hydraulicznych, m s.w.

C — współczynnik oporności właściwej, s^2/m^6

Q — natężenie przepływu, m^3/s

l_z — zastępcza długość odcinka przewodu, stanowiąca sumę długości geometrycznej odcinka i dodatku na opory miejscowe, m.

Wartości współczynnika oporności właściwej C można obliczać według wzoru:

$$C = \frac{8}{g\pi^2} \frac{\lambda}{d^5} \quad s^2/m^6 \quad (8)$$

gdzie: λ — współczynnik liniowych oporów tarcia,

d — średnica wewnętrzna przewodu, m

g — przyspieszenie ziemskie, m/s^2 .

Obliczanie współczynnika oporów tarcia

W wielu rozprawach naukowych krajowych i zagranicznych spotyka się szereg zróżnicowanych wzorów i formuł empirycznych, służących do określania wartości liczbowej współczynnika λ . Zastosowanie większości tych wzorów jest ściśle ograniczone do określonej strefy przepływu i tylko nieliczne spośród nich mają uniwersalny charakter. Współczynnik λ występuje we wzorach w postaci jawnej bądź uwikłanej. W publikacjach krajowych do stosowania w obliczeniach sieci wodociągowych zalecane są wzory: Colebrooka — White'a, Prandtla — Karmana, Nikuradsego, Szewielewa, Waldena, Altšula, Lehmana i Konakowa [6 ÷ 8], [10 ÷ 13], [16], [29 ÷ 34], [36 ÷ 41], [43 ÷ 45], [47 ÷ 48]. Większość wymienionych wzorów dotyczy jedynie rur żeliwnych i stalowych, toteż obliczenia hydrauliczne rurociągów azbestowo-cementowych, winidurowych, polietylenowych itp., należy prowadzić zgodnie z zaleceniami producentów rur.

Spośród wymienionych wzorów najbardziej rozpowszechnionym na świecie jest wzór Colebrooka — White'a, zwany często formułą Prandtla — Colebrooka [1], [2], [14 ÷ 15], [22 ÷ 24], [26], [35], [42]. Wzór ten zalecono do obliczania strat ciśnienia w przewodach wodociągowych na III Międzynarodowym Kongresie Zaopatrzenia w Wodę (Londyn 1955 r.). Ma on następującą postać:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 d} \right) \quad (9)$$

gdzie: λ — współczynnik liniowych oporów tarcia,

Re — liczba Reynoldsa.

$$Re = \frac{v d}{\nu}$$

ν — współczynnik lepkości kinematycznej wody, m^2/s

- d — średnica wewnętrzna przewodu, m
 k — chropowatość wewnętrzna ścian rurociągu, sprowadzona do zastępczej chropowatości piaskowej, m.

Wzór Colebrooka — White'a zalecany jest do stosowania przez „Wytyczne techniczne projektowania komunalnych sieci wodociągowych” [48] oraz normę PN-70/M-34034 [40]. Ze względu na uwikłaną postać niewiadomej λ we wzorze (9), zachodzi konieczność stosowania nomogramów lub wykonywania obliczeń przy użyciu maszyn cyfrowych. Zaletą wzoru Colebrooka — White'a jest jego uniwersalność, gdyż dotyczy on całego zakresu przepływów występujących w przewodach wodociągowych. Spośród innych formuł służących do obliczania wartości współczynnika λ w niniejszej pracy zostaną podane tylko niektóre nie spotykane w literaturze krajowej.

Liebhold [26] proponuje następujące uproszczenie formuły Colebrooka — White'a:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = A + 2 \lg d \quad (11)$$

$$A = 9,14 - 2 \lg \frac{10^4 k v + 1}{v} \quad (12)$$

- gdzie: d — średnica wewnętrzna przewodu, m
 v — prędkość przepływu wody, m/s
 k — chropowatość ścian rur, m.

Liebhold zaleca przyjmowanie do obliczeń następujących wartości k:
 k = 0,1 mm — dla głównych przewodów wodociągowych,
 k = 0,4 mm — dla przewodów rozdzielczych i miejscowych,
 k = 1,5 mm — dla przewodów ściekowych.

Inną uproszczoną postać formuły Colebrooka — White'a proponuje Steinbacher [14]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + \frac{k}{3,71 d} \right] \quad (13)$$

Stosowanie tego wzoru prowadzi do uzyskiwania stale za dużych wartości λ . Bardziej skomplikowaną postać funkcji, nie wykazującą podobieństwa do formuły (9) przedstawia Wood [14]:

$$\lambda = a + b Re^{-c} \quad (14)$$

- gdzie: $a = 0,094 \left(\frac{k}{d} \right)^{0,225} + 0,53 \frac{k}{d}$

$$b = 88 \left(\frac{k}{d} \right)^{0,44}$$

$$c = 1,62 \left(\frac{k}{d} \right)^{0,134}$$

Wartości λ obliczone wg wzoru (14) są za niskie przy $Re < 20000$, a za wysokie przy $Re > 20000$.

Unger [14] proponuje bardzo zręczne uproszczenie wzoru Colebrooka — White'a, pozwalające otrzymywać podobne wartości:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{4,518}{Re} \lg \frac{Re}{7} + \frac{k}{3,71 d} \right) \quad (15)$$

Podane wzory (11), (13), (14) i (15), w których współczynnik λ występuje w postaci jawnej, utworzono przez uproszczenie bądź aproksymację formuły Colebrooka — White'a.

Ciekawą analizę porównawczą wzorów Colebrooka — White'a, Wooda i Ungera przeprowadził Hofer [14]. Porównał on czas trwania obliczeń współczynnika λ przy użyciu wymienionych wzorów. Obliczenia λ wg formuły (9) były przerywane po czterech iteracjach, kiedy błąd w określeniu λ nie przekraczał 1,2%. Przy tych założeniach czas trwania obliczeń 10 000 różnych wartości λ wynosił:

wg Colebrooka — White'a (9) — 4,5 sekundy,

wg Wooda (14) — 9,7 sekundy,

wg Ungera (15) — 2,9 sekundy.

Powyższe zestawienie wykazuje dobitnie, że dążenie do możliwie największego upraszczania wzorów obliczeniowych nie zawsze powoduje skrócenie czasu obliczeń, a jeżeli nawet do tego prowadzi, to dzieje się to zwykle kosztem zmniejszenia dokładności obliczeń.

W dzisiejszych czasach niemal wszystkie obliczenia sieci wodociągowych wykonywane są przy użyciu maszyn cyfrowych. Czas obliczeń wartości λ w stosunku do całkowitego czasu trwania kompleksowych obliczeń sieci wodociągowej, jest niepomernie mały, niezależnie od tego czy λ występuje we wzorze w postaci jawnej czy też uwikłanej. W związku z tym, do obliczeń strat ciśnienia w przewodach wodociągowych powinny być stosowane wzory pozwalające na uzyskiwanie możliwie najdokładniejszych wyników. Do tej grupy wzorów można zaliczyć niewątpliwie formułę Colebrooka — White'a.

Zmienność współczynnika oporności właściwej

Z analizy wzorów (8 ÷ 10) wynika, że wartości współczynnika oporności właściwej C zależą od następujących parametrów:

- średnicy przewodu,
- bezwzględnej chropowatości ścian,
- średniej prędkości przepływu,
- temperatury wody.

Wpływ zmienności średnicy i chropowatości rurociągów na wartości współczynnika C został szczegółowo przeanalizowany w pracy [33]. Jej autorzy potwierdzili konieczność uwzględniania zmian zachodzących w przewodach (zmniejszanie się średnicy i wzrost chropowatości) w obliczeniach hydraulicznych czynnych sieci wodociągowych.

Zakładanie, że średnica wewnętrzna przewodu jest równa średnicy nominalnej, może prowadzić do bardzo znacznych błędów obliczeniowych. Przykładowo, zmniejszenie się średnicy wewnętrznej w stosunku do nominalnej o 4% w rurociągu o średnicy nominalnej 250 mm, spowoduje wzrost strat ciśnienia o 19,4%. Wpływ wzrostu chropowatości bezwzględnej ścian na zwiększenie się wartości współczynnika C jest również bardzo znaczny i tym większy im mniejsza jest średnica przewodu.

Wpływ zmienności prędkości przepływu i temperatury wody na wartości współczynnika C , został omówiony w pracach [25], [32]. Ustalono w nich, że zmiany temperatury wody wywierają bardzo nieznaczny wpływ na wartości C i wpływ ten maleje ze wzrostem prędkości przepływu. W związku z tym, zaproponowano, by w obliczeniach hydraulicznych sieci wodociągowych przyjmować stałą temperaturę wody $T = 283\text{K} / +10^\circ\text{C}$.

Wpływ prędkości przepływu na wartości współczynnika C jest największy przy małych prędkościach przepływu, kiedy to wysokość strat hydraulicznych osiąga również najmniejsze wartości. Można więc wprowadzić do obliczeń stałe, charakterystyczne prędkości przepływu określone zależnością interpolacyjną:

$$v_c \approx 1,5 d^{0,477} \quad \text{m/s} \quad (16)$$

gdzie:

- v_c — charakterystyczna prędkość przepływu wody w rurociągu, m/s
- d — średnica przewodu, m.

Błąd względny w określaniu wartości C , spowodowany założeniem niezmienniej prędkości przepływu, dochodzi do 13% przy chropowatości $k = 0,4$ mm, jednak przy wzroście k do 3,0 mm nie przekracza 3%.

Błędy względne wynikające z przyjęcia stałej temperatury wody są 3 ÷ 4-krotnie mniejsze od przytoczonych.

Przyjęcie stałej temperatury i prędkości przepływu wody, pozwala na określenie stałych wartości współczynnika oporu tarcia λ_s dla rur o danych średnicach i chropowatościach. Pomimo takich uproszczeń dokładność obliczeń pozostaje wystarczająca, szczególnie w przypadku przewodów o podwyższonej chropowatości ścian ($k \geq 1,5$ mm).

Określenie stałych wartości λ_s umożliwia obliczenie stałych wartości współczynnika oporności właściwej C_s ze wzoru:

$$C_s = 0,082655 d^{-5} \lambda_s \quad \text{s}^2/\text{m}^6 \quad (17)$$

Wartości współczynnika C_s obliczone przy założeniu stałej temperatury wody $T = 283\text{K}$ i charakterystycznych prędkości przepływu v_c zestawiono w tabeli 1. Prędkości charakterystyczne wyznaczono z zależności (16). Jedynie dla chropowatości $k = 6,0$ mm i $k = 10,0$ mm przyjęto do obliczeń nieco inne prędkości w zależności od średnicy rurociągu:

$D_n = 80 \div 150$ mm	$v_c = 0,6$ m/s
$D_n = 200 \div 350$ mm	$v_c = 0,8$ m/s
$D_n = 400 \div 700$ mm	$v_c = 1,1$ m/s
$D_n = 800 \div 1200$ mm	$v_c = 1,5$ m/s
$D_n = 1400 \div 2000$ mm	$v_c = 2,0$ m/s

Zastosowanie wymienionych prędkości w obliczeniach przewodów o podwyższonej chropowatości ścian ($k \geq 1,5$ mm), nie wpływa znacząco na dokładność obliczeń, gdyż przy takich chropowatościach występuje najczęściej przepływ w strefie C (strefa oporów kwadratowych).

Wzrost oporów przepływu w czasie eksploatacji przewodów

W czasie długoletniej eksploatacji rurociągów zachodzą w nich zmiany, mające istotny wpływ na warunki eksploatacyjne sieci. Wskutek korozyjności wody oraz odkładania się osadów na ściankach rur, następuje znaczny wzrost chropowatości ścian, przy jednoczesnym zmniejszaniu się przekroju przepływowego rur. Efektem tego zjawiska jest stałe wzrastanie oporów przepływu wywołujące spadek ciśnienia wody w całej sieci lub tylko w niektórych jej rejonach.

Opisanemu zjawisku można przeciwdziałać, prowadząc systematyczne czyszczenie i płukanie rurociągów. W codziennej praktyce eksploatacyjnej czynności te są bardzo często zaniedbywane albo też wykonywane sporadycznie. Dowodem na to są między innymi wyniki badań prze-

ZESTAWIENIE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA OPORNOŚCI WŁAŚCIWEJ C_s
 OBLICZONYCH PRZY ZAŁOŻENIU STAŁEJ TEMPERATURY WODY $T = 283K$
 (+10°C) I CHARAKTERYSTYCZNYCH PRĘDKOŚCI v_c

Średnica nominalna D_n , mm	Prędkość charakterystyczna v_c , m/s	Zastępcza chropowatość piaskowa k , mm					
		0,1	0,4	1,5	3,0	6,0	10,0
80	0,45	679,220	844,430	1232,500	1608,600	2209,70	2918,90
100	0,50	206,650	256,660	370,720	478,680	647,80	842,80
125	0,56	62,970	78,191	111,980	143,060	191,05	244,70
150	0,62	23,866	29,651	42,140	53,486	70,72	89,63
200	0,70	15,209	6,4586	0,0717	11,387	14,317	18,508
250	0,78	1,6006	1,9839	2,7643	3,4431	4,4350	5,4820
300	0,85	0,61156	0,75761	1,0490	1,2938	1,6600	2,0360
350	0,91	0,27154	0,33615	0,46297	0,57046	0,72460	0,88320
400	0,98	0,13428	0,16629	0,22811	0,27998	0,35340	0,42880
500	1,08	0,041578	0,051430	0,070047	0,085428	0,10700	0,12880
600	1,18	0,015960	0,019735	0,026734	0,032446	0,040380	0,048310
700	1,26	0,0071159	0,0087913	0,011854	0,014330	0,017750	0,021130
800	1,35	0,0035331	0,0043645	0,0058637	0,0070654	0,0087070	0,010330
900	1,43	0,0019067	0,0023548	0,0031534	0,0037891	0,0046540	0,005503
1000	1,50	0,0010989	0,0013565	0,0018114	0,0027712	0,0026590	0,0031350
1200	1,64	0,00042361	0,00052266	0,00069459	0,00082921	0,0010100	0,0011850
1400	1,82	0,00018897	0,00023134	0,00030828	0,00036732	0,00044520	0,00052090
1600	1,88	0,000094353	0,00011629	0,00015341	0,00018204	0,00021950	0,00025620
1800	2,00	0,000051033	0,000062382	0,000082728	0,000097935	0,00011780	0,00013700
2000	2,10	0,000029473	0,000036298	0,000047632	0,000056271	0,000067650	0,000078460

plywności sieci wodociągowych kilkunastu miast, wykonane w ostatnich latach przez Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej. Również autorzy nielicznych jak dotąd publikacji krajowych i zagranicznych zwracają uwagę na nagminne występowanie zjawiska zmniejszania się przepływności rurociągów w czynnych sieciach wodociągowych [1 ÷ 6], [17], [18], [22], [30 ÷ 32], [35], [42], [46]. Nie uwzględnianie tego faktu przy projektowaniu rozbudowy istniejących sieci, z góry wyklucza możliwość uzyskania pełnych efektów eksploatacyjnych i ekonomicznych już po rozbudowie.

Wyniki badań procesu „zarastania” przewodów wskazują, że jest to proces bardzo skomplikowany, zależny od wielu czynników, których wpływu nie można ściśle określić. Najogólniej biorąc proces ten zależy od następujących czynników:

- okres eksploatacji („wiek”),
- skład fizyczno-chemiczny wody oraz jego zmienność w czasie,
- warunki eksploatacyjne (ciśnienia, prędkości przepływu),
- materiał rur,
- wykonawstwo rurociągów (poziomowanie, izolacje, uszczelnienia, itp.)
- funkcja przewodu i jego usytuowanie w sieci.

Badania i analiza ich wyników spowodowały powstanie nielicznej grupy wzorów empirycznych, określających stopień wzrostu oporności przewodów w procesie ich eksploatacji. Jednakże wzory te nie uwzględniają wszystkich wymienionych czynników, przez co ich stosowanie jest znacznie ograniczone. Niejednokrotnie odnoszą się one tylko do przebadanej sieci, uwzględniając lokalne warunki eksploatacyjne. Najbardziej rozpowszechnione wzory i formuły empiryczne zostaną przedstawione w niniejszej pracy.

Formuła Colebrooka — White’a podana przez Altšula [1], [3], oparta jest na wynikach badań specjalnej amerykańskiej komisji i uzależnia zmniejszanie się przepływności początkowej rurociągu od czasu eksploatacji, pH wody oraz średnicy przewodu:

$$\frac{M_t}{M_o} = - \frac{1}{\beta_o} \lg \left(\frac{t \alpha}{3,7 d} + 10^{-\beta_o} \right) \quad (18)$$

gdzie:

M_o — przepływność początkowa przewodu, m^3/s

M_t — przepływność przewodu po t latach eksploatacji, m^3/s

d — średnica rurociągu, m

$$\beta_o = \frac{C_o}{2 \sqrt{8g}}$$

C_o — współczynnik do wzoru Chezy dla rur nowych,

α — współczynnik zwiększania się chropowatości ścian, którego wartość liczbową określona jest w zależności od pH wody:

$$0,8 \lg \alpha = 3,8 - \text{pH}$$

Kamerštejn [1], [3], [17] w wyniku przeprowadzonych badań przedstawił odmienną formułę, uwzględniającą większą niż wzór (18) liczbę wskaźników składu wody:

$$\frac{M_t}{M_o} = 1 - 0,01 n t^m \quad (19)$$

gdzie:

M_t, M_o, t — jak we wzorze (18)

m, n — parametry, których wartość zależy od średnicy przewodu oraz od składu fizyczno-chemicznego wody, szczególnie od stężenia jonów wodorowych pH, wskaźnika stabilności wody, jej twardości oraz zawartości żelaza i związków organicznych.

Spośród wszystkich wód naturalnych Kamerštejn wyodrębnił pięć charakterystycznych grup wody o różnej intensywności oddziaływania na „zarastanie” rur i określił dla nich konkretne wartości parametrów m, n . Mostkov [35] na podstawie badań Kamerštejna podał formułę określającą zależność wysokości wyniosłości na ściankach rurociągów od liczby lat eksploatacji, średnicy przewodów i składu fizyczno-chemicznego wody:

$$k_t = k_o + \alpha t \text{ mm} \quad (20)$$

gdzie:

k_o — początkowa wysokość wyniosłości na ściankach rur, mm

k_t — wysokość wyniosłości po t latach eksploatacji, mm

α — szybkość wzrastania wysokości wyniosłości, mm/rok; wartość α zależy od średnicy rur i składu wody.

Wartości liczbowe parametrów m, n oraz współczynnika α podane są m.in. w pracach [1], [3], [17], [29], [33]. Identyczną postać jak wzór Mostkova ma formuła ustalona przez Colebrooka — White'a na podstawie badań przewodu wodociągowego w Thirlmere [42]:

$$k = k_A + \alpha t \quad \text{mm} \quad (21)$$

gdzie: k, k_A, α, t — podobnie jak we wzorze Mostkova.

Wzory (20) i (21) przedstawiają linearny wzrost chropowatości ścian w czasie eksploatacji rurociągów. Fakt ten nie znalazł jednak potwierdzenia w wynikach prowadzonych ostatnio badań sieci.

Wydaje się, że omawiane zależności liniowe można stosować jedynie do

pierwszej fazy eksploatacji przewodów, kiedy proces wzrostu oporności jest najszybszy i najbardziej równomierny. W krajach anglo-amerykańskich i RFN stosuje się często empiryczną formułę Williamsa — Hazena, podaną w systemie metrycznym przez Schwinga [42]:

$$v = 0,3545 C_{W-H} d^{0,63} I^{0,54} \quad \text{m/s} \quad (22)$$

gdzie:

- v — średnia prędkość przepływu, m/s,
- d — średnica przewodu, m,
- I — spadek hydrauliczny w postaci ułamka,
- C_{W-H} — współczynnik, którego wartość jest proporcjonalna do chropowatości ścian i zmienna w czasie.

Wartości współczynnika C_{W-H} dla określonych okresów eksploatacji podali Williams i Hazen w ułożonych przez nich tablicach hydraulicznych [46].

Schwing [42] analizując wyniki badań sieci wodociągowej Gelsenkirchen (RFN), znalazł następującą zależność między chropowatością piaskową, średnicą i czasem eksploatacji:

$$\lg \frac{k_s}{d} = \frac{t}{25} - 3,757 \quad (23)$$

- gdzie: k_s — zastępcza chropowatość piaskowa rurociągu, mm
- d — średnica przewodu, mm
- t — czas eksploatacji.

Podana zależność jest słuszna jedynie w odniesieniu do sieci wodociągowej Gelsenkirchen, zasilanej wodami infiltracyjnymi powierzchniowymi i gruntowymi.

Różnorodność form przedstawionych wzorów i formuł empirycznych wskazuje jednoznacznie na dużą złożoność procesu „zarastania” przewodów. Należy oczekiwać, że prace badawcze prowadzone nadal w tym kierunku, pozwolą na ustalenie bardziej uniwersalnych wzorów o większych możliwościach zastosowań. Możliwości wykorzystania wzoru Kamerštej-
na (19) do określania oporności przewodów nie objętych pomiarami zostały opisane w pracach [4], [5]. Wartości liczbowe parametrów m , n można ustalać na podstawie wyników pomiarów oporności wybranych odcinków sieci oraz danych o zmienności fizyczno-chemicznego składu wody na przestrzeni całego okresu eksploatacji wodociągu. Pomiarami oporności należy obejmować grupy przewodów o różnych średnicach i „wieku”, funkcjonujących w odmiennych warunkach zasilania. Wszystkie omówione wzory uzależniają wzrost oporności rurociągów od czasu ich eksploatacji („wieku” przewodów). Fakt ten znalazł pełne potwierdzenie w wynikach pomiarów oporności, prowadzonych na świecie w

ostatnich latach. W celu dokładniejszego określenia wpływu wszystkich rozważanych czynników na „zarastanie” rurociągów, konieczna jest intensyfikacja prac naukowo-badawczych w tym kierunku oraz szersze niż dotychczas ich propagowanie.

Obliczanie strat ciśnienia w czynnych przewodach wodociągowych

Stosowanie wzorów określających zmiany zachodzące w procesie eksploatacji rurociągów, stwarza możliwość wierniejszego odtworzenia istniejącego stanu sieci aniżeli w przypadku wykonywania tradycyjnych obliczeń, opartych na przyjęciu jednakowej chropowatości $k = 1,2 \div 1,5$ mm dla wszystkich czynnych przewodów.

Chociaż wzory omówione w poprzednim rozdziale niezupełnie opisują zjawisko „zarastania” rurociągów, to jednak ich umiejętne stosowanie umożliwia znaczne zwiększenie dokładności obliczeń strat ciśnienia w przewodach. Dowodem na to mogą być rezultaty obliczeń porównawczych, wykonanych dla sieci wodociągowych dwóch miast, objętych kompleksowymi badaniami terenowymi. W pierwszej fazie przeprowadzono obliczenia sieci przyjmując zgodnie z wytycznymi [48] jednakową chropowatość $k = 1,5$ mm dla wszystkich przewodów. Po porównaniu obliczonych ciśnień z pomierzonymi okazało się, że są one wyższe od pomierzonych przeciętnie o $10 \div 20$ m s.w. Następnie dla tych samych odcinków sieci określono oporność na podstawie wyników pomiarów oraz wzoru Kamerštejna. Ciśnienia obliczone przyz tak określonych opornościach, wykazywały dużą zbieżność z ciśnieniami pomierzonymi i różniły się zaledwie o $2 \div 6$ m s.w. Opisany przykład dowodzi, że obliczanie strat ciśnienia w przewodach czynnych sieci wodociągowych, nie może być prowadzone metodami stosowanymi powszechnie przy projektowaniu nowych sieci.

Straty ciśnienia w rurociągach eksploatowanych powinny być obliczane według następującego wzoru:

$$\Delta h_t = C_t l_z Q^2 \quad \text{m s.w.} \quad (24)$$

gdzie:

Δh_t — wysokość strat ciśnienia w czynnym przewodzie wodociągowym, m s.w.

C_t — współczynnik oporności właściwej przewodu eksploatowanego, s^2/m^6

l_z — zastępcza długość odcinka przewodu, m

Q — natężenie przepływu wody, m^3/s .

Wartości współczynnika C_t można obliczać na podstawie przekształconego wzoru Kamerštejna:

$$C_t = C_o / (1 - 0,01 n t^m)^{-2} \text{ s}^2/\text{m}^6 \quad (25)$$

gdzie:

C_t — jak we wzorze (24), s^2/m^6

C_o — współczynnik oporności właściwej przewodu nowego, s^2/m^6

n, m, t — jak we wzorze (19).

Wartości współczynnika C_o można odczytywać z tabeli 1 dla chropowatości $k = 0,1 \text{ mm}$.

Podsumowanie

Wyniki badań hydraulicznych czynnych sieci wodociągowych wykazują niezbicie, że sprawność tych sieci jest znacznie niższa aniżeli się przypuszcza [3], [4], [9], [17], [31], [34], [35], [42]. Chropowatość badanych przewodów już po krótkim okresie eksploatacji (10 ÷ 20 lat) przekracza wartość $k = 1,5 \text{ mm}$, zalecaną do obliczeń m.in. przez obowiązujące w Polsce wytyczne [48]. Tak więc nawet bardzo dokładne obliczenia prowadzone przy projektowaniu rozbudowy sieci, mogą stwarzać zupełnie fałszywy obraz przyszłych warunków eksploatacyjnych, o ile nie będą poprzedzone badaniami hydraulicznymi i analizą istniejącego stanu sieci. Przybliżone określanie rzeczywistych warunków eksploatacyjnych jest możliwe na podstawie wyników obliczeń porównawczych sieci wodociągowych. Wyznaczone w ten sposób współczynniki C_t mogą zostać wykorzystane nie tylko do obliczeń rozbudowywanej sieci, ale również do prognozowania dalszych zmian oporności przewodów. Umożliwia to wybór najracjonalniejszego i najbardziej efektywnego sposobu eksploatacji sieci.

Nawet przybliżone określanie rzeczywistych wartości współczynników oporności i przepływności właściwej czynnych przewodów wodociągowych pozwala na znaczne uściślenie obliczeń strat hydraulicznych w czynnej sieci wodociągowej. Jest to niewątpliwie następny krok w kierunku doskonalenia metod projektowania i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę miast i wsi.

SPIS LITERATURY

- [1]. Altšul A. D., *Gidravlicieskie poteri na trenie v truboprovodach*. Gosenergoizdat, Moskva — Leningrad 1963.
- [2]. Altšul A. D., *Gidravlicieskie soprotivlenija*. Izd. „Nedra”, Moskva 1970.

- [3]. Altšul A. D., Kamerštejn A. G., *Uvelicenie soprotivlenija truboprovodow v processe ich ekspluatacii*. *Gidrotečničkoje stroitelstvo*, 7/1949.
- [4]. Bielecki K., Galik S., Lewicki Z., Mielcarzewicz E., Pełka H., *Badania i ocena przydatności do dalszej eksploatacji miejskich sieci wodociągowych*. *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej* nr 37, Wrocław 1975.
- [5]. Bielecki K., Lewicki Z., Mielcarzewicz E. W., Pełka H., *Untersuchungen und Beurteilung der Hydraulik in Betrieb befindlicher Wasserversorgungsleitungen als Grundlage für die Projektierung ihres Ausbaus*. Hochschule für Bauwesen, Leipzig 1975
- [6]. Brydak - Jeżowiecka D., Jeżowiecki J., *Zastosowanie wzorów WODEGO (Szewielewa) do obliczania jednostkowych strat ciśnienia w przewodach wewnętrznych instalacji wodociągowych*. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* Nr 9, 1970.
- [7]. Bylka H., Grabarczyk C., *Analiza wpływu zmian chropowatości i średnicy przewodów na dokładność obliczeń hydraulicznych*. *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej* Nr 37, Wrocław 1975.
- [8]. Czetwertyński E., Utrysko B., *Hydraulika i hydromechanika*. PWN, Warszawa 1969.
- [9]. Egilskij J., *Modelirovannyje sistemy vodosnabżenia i raščety jejo rekonstrukcii*. *Ziliščnoje Komunalnoje Chożiajstvo* 11/1968.
- [10]. Gabryszewski T., *Wodociągi*. PWN, Warszawa 1973.
- [11]. Grabarczyk C., Szymaczek E., *Kryteria rozstrzygające strefę przepływu w rurociągach*. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* Nr 3, 1973.
- [12]. Grabarczyk C., Szymaczek E., *Wyznaczanie wartości współczynnika liniowego oporu hydraulicznego dla przejściowej strefy burzliwego przepływu w rurach chropowatych*. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* Nr 2, 1974.
- [13]. Grabarczyk C., Szymaczek E., *Wyznaczanie wartości współczynnika liniowego oporu hydraulicznego dla przejściowej strefy burzliwego przepływu w rurach chropowatych*. *Materiały Konferencyjne PZITS*, Poznań 1973.
- [14]. Hofer P., *Beurteilung von Fehlern in Rohrnetzberchnungen*. *GWF — Gas/Erdgas* 114 (1973) H. 3.
- [15]. Hofer P., *Der Einfluss von Einzelwiderständen auf die Rohrnetzberchnung*. *GWF — Gas/Erdgas* 112 (1971) E. 11.
- [16]. Jankowski Z., Kurpisz Ł., *Obliczanie współczynnika tarcia. Nomogram*. *Gospodarka Paliwami i Energią* Nr 3, 1970.
- [17]. Kamerštejn A. G., *Meropriżatia po sochraneniu propusknoj sposobnosti vodoprovodnych trub*. *Gostroizdat* 1950.
- [18]. Kottmann A., *Ermittlung der Rauigkeit von Versorgungsnetzen auf der Grundlage kurzzeitig gemessener Entnahmen*. *GWF — Wasser/Abwasser* 113 (1972) H. 6.
- [19]. Kottmann A., *Fehler bei Rohrnetzberchnungen*. *GWF — Gas/Erdgas* 114 (1973) H. 2.
- [20]. Kottmann A., Dutschka K., *Zur Genauigkeit von Druckmessungen für eine Rohrnetzberchnung auf elektronischen Datenverarbeitungsanlagen*. *GWF — Gas/Erdgas* 111 (1970) H. 5.
- [21]. Kottmann A., Frasch H., *Druck — und Mengennmessung als Grundlage für elektronische Rohrnetzberchnungen*. *GWF — Gas/Erdgas* 107 (1966) H. 45.

- [22]. Kottmann A., Hofer P., *Überlegungen zur Definition der Rohrwandrau-
higkeit*. GWF — Gas/Ergas 111 (1970) H. 3 u. 112 (1971) H. 11.
- [23]. *Know what's happening in your water system*. The American City, June 1972.
- [24]. Lehman J., *Widerstandsgesetze der turbulenten Strömung in geraden Stahl-
rohren*. Gesundheits Ingenieur, 1961.
- [25]. Lewicki Z., *Analiza wpływu zmian temperatury oraz prędkości przepływu
na wartość współczynników oporności i przepływności właściwej przewodów
wodociągowych obliczone według wzoru Colebrooka — White'a*. Instytut Inżynierii
Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Komunikat Nr 18, Wro-
cław 1973.
- [26]. Liebhold F., *Vereinfachte Berechnung der Druckhöhen in Rohrleitungen*.
Gesundheits Ingenieur, 1960.
- [27]. Łyp B., *Metoda oceny funkcjonowania sieci magistral wodociągowych w wiel-
kim mieście*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna Nr 5, 1974.
- [28]. Łyp B., *Metoda oceny funkcjonowania sieci magistral wodociągowych w mie-
ście i jej zastosowanie w modelu obliczeniowym dla Warszawy*. Prace Nauko-
we Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej Nr 37,
Wrocław 1975.
- [29]. Mielcarzewicz E., *Obliczenia hydrauliczne układów wodociągowych*. Ar-
kady, Warszawa 1965.
- [30]. Mielcarzewicz E., *O celowości badania sprawności hydraulicznej czyn-
nych sieci wodociągowych*. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Sanitarnej
i Wodnej Politechniki Wrocławskiej Nr 12, Wrocław 1971.
- [31]. Mielcarzewicz E., *Badania oporności hydraulicznej czynnych sieci wo-
dociągowych — podstawą prawidłowej eksploatacji i projektowania wodocią-
ków*. Materiały Konferencyjne PZITS, Poznań 1973.
- [32]. Mielcarzewicz E., Lewicki Z., *O możliwości uproszczenia obliczeń
strat hydraulicznych w przewodach wodociągowych o podwyższonej chropo-
watości ścian*. Materiały Konferencyjne PZITS, Poznań 1973.
- [33]. Mielcarzewicz E., Pełka H., *Analiza wpływu zmian średnicy i chropo-
watości ścian rurociągu na współczynniki oporności i przepływności właści-
wej przewodu, obliczone na podstawie wzoru Colebrooka — White'a*. Prace Na-
ukowe Instytutu Inżynierii Sanitarnej i Wodnej Politechniki Wrocławskiej Nr
9, Wrocław 1970.
- [34]. Mielcarzewicz E., Pełka H., *Metodyka i wstępne wyniki badań prze-
pływności przewodów wodociągowych*. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Sa-
nitarnej i Wodnej Politechniki Wrocławskiej Nr 12, Wrocław 1971.
- [35]. Mostkov M. A., *Gidravličeskij spravočnik*. Gostroizdat, Moskva 1954.
- [36]. Mysiak M., *Wodociągi*. PWN, Wrocław 1970.
- [37]. Nowakowski E., *Uwagi do normy PN-64/M-34034. Rurociągi. Obliczenia
strat ciśnienia*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna Nr 8, 1970.
- [38]. Petrozolin W., *Projektowanie sieci wodociągowych*. Arkady, Warszawa
1974.
- [39]. Piotrowski J., *Nowe badania współczynników oporu w przewodach wo-
dociągowych*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna Nr 1, 1962.
- [40]. *PN-70/M-34034 Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia*.
- [41]. Sawicki W., Wierzbicki K., *Stosowanie rur z tworzyw sztucznych w
wodociągach i ich charakterystyka hydrauliczna*. Materiały Konferencyjne
PZITS, Poznań 1973.
- [42]. Schwing V., *Rauhheitsmessungen in Wasserversorgungs leitungen als*

- Grundlage exakterer Rohrnetzrechnungen.* GWF — Wasser/Abwasser 108 (1967) H. 8.
- [43]. Troskolański A. T., *Hydromechanika.* WNT, Warszawa 1967.
- [44]. Walden H., Sawicki W., *Tablice i nomogramy do obliczania strat ciśnienia w przewodach wodociągowych.* Arkady, Warszawa 1968.
- [45]. Wichowski W., *Obliczanie optymalnych oporów hydraulicznych dla burzliwych przepływów wody i ścieków.* Gaz, Woda i Technika Sanitarna Nr 12, 1970.
- [46]. Williams G. S., Hazen A., *Hydraulic Tables.* John Wiley u. Sons, Inc., New York u. London, 1960.
- [47]. *Wodociągi i Kanalizacja. Poradnik.* Arkady, Warszawa 1971.
- [48]. Zarządzenie Nr 8 Ministra Gospodarki Komunalnej z dnia 17 stycznia 1964 r. w sprawie projektowania komunalnych sieci wodociągowych. Załącznik: Wytyczne techniczne projektowania komunalnych sieci wodociągowych. Dz. U. Nr 8, Warszawa 1964.