

Andrzej Kotowski

## Analiza hydrauliczna zjawisk wywołujących zmniejszenie przepływności rurociągów

Rurociągi wodne, zarówno wodociągowe, jak i kanalizacyjne, projektuje się na tzw. żywotność techniczną, tj. najczęściej na 50 lat – w przypadku przewodów z tworzyw sztucznych oraz na 100 lat – w przypadku materiałów tradycyjnych (stal, żeliwo, żelbet), lecz zabezpieczonych powłokami ochronnymi. Wybudowane w przeszłości rurociągi żeliwne i stalowe, w tym pokryte od wewnątrz powłokami bitumicznymi, w miarę upływu czasu eksploatacji ulegają inkrustacji na skutek osadzania się związków chemicznych wytrącających się z wody bądź też będących produktem korozji materiału rur (osady chemiczne i obrosty hydrobiologiczne – biofilm). Wskutek tego zwiększa się chropowatość wewnętrznych ścian rurociągów i jednocześnie zmniejsza się powierzchnia ich przekroju czynnego. Wzrost oporności hydraulicznej, czyli spadek przepływności (sprawności hydraulicznej) rurociągów wodnych, jest wysoce niepożądany, gdyż prowadzi bezpośrednio do strat ekonomicznych, związanych np. z koniecznością zwiększenia wysokości tłoczenia pomp czy budową dodatkowych przewodów. Także pośrednio – wskutek korozji rur – wzrasta awaryjność sieci, połączona ze stratami wody wodociągowej (infiltracja do gruntu).

Rurociągi z tworzyw sztucznych, takich jak np. polietylen (PE), polichlorek winylu (PVC), polipropylen (PP) czy żywice poliestrowe wzmocnione włóknem szklanym (GRP), są bardziej odporne na zjawiska inkrustacji i osady chemiczne w środowisku wodnym. Cechują się ponadto znaczną gładkością ścian, a więc mniejszymi oporami przepływu wody w stosunku do materiałów tradycyjnych, takich jak żeliwo czy stal (bez odpowiednich powłok ochronnych). Przykładowo, w przypadku rurociągów z polipropylenu (PP – tab. 1) potwierdzono w warunkach laboratoryjnych [1] małą chropowatość początkową ( $k \approx 0,006$  mm) odniesioną do wzoru Colebrooka-White'a, zbliżoną do deklarowanej przez producenta chropowatości technicznej ( $k=0,007$  mm).

W pracy omówiono i zilustrowano na przykładach przyczyny i skutki hydrauliczne procesu starzenia się rurociągów wodociągowych i kanalizacyjnych. Zaprezentowano metody i wzory do obliczeń sprawności hydraulicznej rurociągów przy izotermicznym przepływie cieczy.

### Jakość wody a inkrustacja rur wodociągowych

Intensywność inkrustacji na skutek osadzania się związków chemicznych na wewnętrznych ścianach rurociągów zależy w znacznej mierze od składu fizykochemicznego wody wodociągowej. Do najistotniejszych

Tabela 1. Chropowatość nowych rurociągów z tworzyw sztucznych  
Table 1. Roughness of fresh plastic pipelines

Materiał	Chropowatość (k) rur [Producent]
PVC	0,01 mm ( $d \leq 200$ mm); 0,05 mm ( $d > 200$ mm) [Wavin]
PVC-U	0,02 mm ( $d \leq 200$ mm); 0,05 mm ( $d > 200$ mm) [Gamrat]
PE	0,01 mm ( $d \leq 200$ mm); 0,015 mm ( $d > 200$ mm) [Gamrat, Pipelife]
PP	0,007 mm [Fusiotherm]
PEX-C	0,005 mm [Kan]
PE-Al-PE	0,003+0,005 mm [Kisan]
GRP	$\leq 0,01$ mm [Hobas]

wskaźników jakości wody decydujących o jej korozyjności należą pH, agresywny dwutlenek węgla, zasadowość ogólna, tlen rozpuszczony, wapń oraz substancje rozpuszczone. Współdecydują one o przebiegu korozji, której skutkiem jest nie tylko niszczenie materiału rur, lecz również niebezpieczeństwo wtórnego zanieczyszczenia wody produktami korozji, których obecność w sieci wodociągowej sprzyja rozwojowi mikroorganizmów (biofilm) i stanowi potencjalne zagrożenie mikrobiologicznego skażenia wody dostarczanej odbiorcom. Do oceny korozyjności wody wykorzystuje się różne wskaźniki zwane indeksami stabilności. Ze względu na złożoność procesu korozji, żaden z dotychczasowych indeksów nie zapewnia pełnej oceny szybkości korozji przebiegającej w środowisku wodnym [2]. Są to więc przede wszystkim wskaźniki pozwalające na porównanie korozyjności różnych wód i oszacowanie stopnia ich agresywności. Powszechnie do oceny korozyjnego charakteru wody wykorzystuje się indeksy Langeliera (IL) oraz Ryznara (IR), uwzględniające rzeczywistą wartość pH badanej wody oraz jej pH w stanie równowagi ze stałym węglanem wapnia ( $pH_s$ ). Wartości indeksów IL i IR (tab. 2) wyznaczone z zależności:

$$IL = pH - pH_s \quad (1)$$

$$IR = 2pH_s - pH \quad (2)$$

dziela wody na stabilne, korozyjne i bardzo korozyjne [2].

Tabela 2. Klasyfikacja korozyjności wody na podstawie indeksów Langeliera (IL) i Ryznara (IR) [2]  
Table 2. Classification of water corrosivity using Langlier (IL) and Ryznar (IR) indexes [2]

Rodzaj wody	IL	IR
Niekorozyjna (stabilna)	0	6,2+6,8
Korozyjna	<0	>6,8
Bardzo korozyjna	<0	>8,5

W celu ilustracji złożoności problemu zaprezentowano przykładową analizę wyników badań korozyjności wody wodociągowej w Rzeszowie [3]. Obecnie oczyszczana woda z rzeki Wisłok charakteryzuje się średnią wartością indeksu Langeliera  $IL=0,07$  (zmiany w granicach od  $-0,3$  do  $0,4$ ), co klasyfikuje ją do wód stabilnych, lecz wartość indeksu Ryznara  $IR=7,4$  (zmiany od  $6,9$  do  $7,9$ ) wskazuje na jej korozyjny charakter. Należy zaznaczyć, że w latach 1956–2000 proces oczyszczania wody był wielokrotnie zmieniany. Tak więc obecne dane o jakości (korozyjności) wody nie mogą być reprezentatywne do oceny oporności rurociągów wybudowanych przed 2000 r.

Kamersztejn, na podstawie wyników badań przeprowadzonych w ZSRR i Stanach Zjednoczonych [4], podzielił wody naturalne na pięć grup w zależności od intensywności zmniejszania się przepływności rurociągów wraz z czasem ich eksploatacji, natomiast Lamont wyróżnił cztery grupy jakości wody [5]. Autorzy ci ustalili formuły empiryczne do szacowania zmniejszania się przepływności rurociągów wraz z czasem ich eksploatacji, co ma znaczenie praktyczne jedynie pod warunkiem braku istotnych zmian jakości wody w czasie. Konieczne są więc najczęściej badania terenowe oporności rurociągów – jak w przypadku sieci wodociągowej w Rzeszowie – zwłaszcza wybudowanych przed 2000 r.

Chropowatość ścian rurociągów wodnych, o określonym składzie fizyczno-chemicznym wody, rośnie z reguły proporcjonalnie do czasu eksploatacji. Mostkov przyjął założenie, że zmniejszenie przepływności przewodów wodociągowych może być interpretowane jako skutek wzrostu zastępczej chropowatości ścian względem początkowej średnicy rurociągu. Wykorzystując dane Kamersztejna i jego podział na grupy jakości wody, Mostkov wykazał, że ujęta w ten sposób tzw. pozorna chropowatość ( $k_t$ ) rur żeliwnych i stalowych zwiększa się wprost proporcjonalnie do czasu ( $t$ ) ich eksploatacji wg zależności:

$$k_t = k_0 + \alpha t \quad (3)$$

w której:

$k_0$  – chropowatość nowego rurociągu, mm (w przypadku rurociągów stalowych i żeliwnych przyjmuje się najczęściej  $k_0 \in \{0,4; 0,6\}$  mm [5,6]),

$\alpha$  – roczny przyrost pozornej chropowatości, zależny od korozyjności wody i średnicy rurociągu, mm/a

Na podstawie badań oporności hydraulicznej sieci wodociągowej na osiedlu Baranówka w Rzeszowie wykazano [3], że w przypadku bitumowanych (od wewnątrz) rurociągów żeliwnych z lat 80. XX w. o średnicach  $150 \div 300$  mm parametr  $\alpha=0,23$  mm/a, co wywołuje spadek przepływności charakterystyczny w III grupie wg Kamersztejna (wody bardzo korozyjne), gdzie wg Mostkova  $\alpha \in \langle 0,18; 0,4 \rangle$  mm/a (mniejsze wartości dotyczą większych średnic). Obecną jakość wody zaliczyć już można do I grupy, w której  $\alpha \in \langle 0,005; 0,055 \rangle$  mm/a [5].

## Podstawy badań sprawności hydraulicznej rurociągów

Podczas przepływu cieczy newtonowskiej w przewodach powstają naprężenia styczne (opory ruchu) wywołane lepkością, określane jako straty hydrauliczne. Wysokość liniowych strat hydraulicznych ( $\Delta h$ ) w całkowicie wypełnionym, prosto osiowym rurociągu o długości ( $l$ ) i średnicy wewnętrznej ( $d$ ), wyraża wzór Darcy-Weisbacha [7–10]:

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

w którym:

$\lambda$  – bezwymiarowy współczynnik oporów liniowych (tarcia)

$v$  – średnia prędkość strumienia wody w przekroju poprzecznym rurociągu, m/s

$g$  – przyspieszenie ziemskie, m/s<sup>2</sup>

W izotermicznych przepływach turbulentnych (bez wymiany ciepła), mających znaczenie praktyczne w sieciach wodociągowych (i kanalizacyjnych), tzn. przy wartościach liczby Reynoldsa  $Re > 4000$ , dostępnych jest wiele wzorów określających wartość współczynnika  $\lambda$  – najczęściej w odniesieniu do konkretnych materiałów rur [11–18]. Ich ogólna postać zależy od strefy, w jakiej odbywa się przepływ wody (ścieków), przy czym w ruchu turbulentnym wyodrębnia się trzy takie strefy [7, 9]:

– strefę I: przepływów w rurach hydraulicznie gładkich;  $\lambda = f_1(Re)$ ,

– strefę II: przepływów przejściowych;  $\lambda = f_2(Re, k/d)$ ,

– strefę III: przepływów o kwadratowej zależności oporów;  $\lambda = f_3(k/d)$ .

Współczynnik oporów liniowych zaleca się jednak obliczać z uwikłanej postaci wzoru Colebrooka-White'a w postaci [7–10]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71d} \right) \quad (5)$$

ze względu na jego uniwersalny charakter, obejmujący wszystkie trzy strefy przepływu turbulentnego, co znalazło odbicie w literaturze, przepisach bądź normach większości państw, w tym także w Polsce. Wzór ten został ustalony na podstawie badań Nikuradsego, dotyczących rur hydraulicznie gładkich (miedzianych) oraz ze sztuczną (równomierną) chropowatością piaskową, a także Colebrooka i White'a, dotyczących rur z nierównomierną chropowatością piaskowo-żwirową [19–21]. Zastępcza chropowatość piaskowa ( $k$ ), występująca we wzorze Colebrooka-White'a (5) jest więc miarą tzw. stanu hydraulicznego wewnętrznych powierzchni rurociągów i zależy nie tylko od wielkości i rozmieszczenia nierówności na powierzchni rur, wynikających z rodzaju materiału (i technologii produkcji) oraz przeznaczenia rurociągów (woda, ścieki), ale także od strat miejscowych – głównie na połączeniach rur i niedokładnościach osiowego ułożenia oraz niekołowego kształtu przekroju poprzecznego w przypadku rurociągów tworzywowych (technologia montażu). Nie jest to więc miara średniej wysokości nierówności na wewnętrznych powierzchniach ścian przewodów, jak się dotychczas niekiedy mylnie sądzi, lecz jest to współczynnik hydrauliczny, zależny od wielu czynników, w tym również od czasu eksploatacji rurociągu (inkrustacja, osady).

Wzór Colebrooka-White'a, jako powszechnie uznany, powinien stanowić bazę odniesienia do określania wartości chropowatości zastępczej ( $k$ ) różnych materiałów rur, w całym zakresie izotermicznych przepływów turbulentnych, w tym zwłaszcza do celów porównawczych sprawności hydraulicznej rurociągów w czasie ich eksploatacji. W praktyce korzysta się również z częściowych postaci wzoru Colebrooka-White'a, właściwych oddzielnie w I i III strefie. Mianowicie, przejście pomiędzy strefami I i II określa się poprzez wyznaczenie granicznej wartości chropowatości względnej ( $\varepsilon_{grI}$ ;  $\varepsilon = k/d$ ), na podstawie wzorów Filonienko-Altšula (6) lub Altšula-Ljačera (7), odpowiednio w przypadku rur o chropowatości równomiernej bądź nierównomiernej [7]:

$$\varepsilon_{grI} = \frac{18 \log Re - 16,4}{Re} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{grI} = \frac{23}{Re} \quad (7)$$

W przypadku spełnienia relacji  $\varepsilon \leq \varepsilon_{grI}$  współczynnik oporów liniowych (w I strefie) obliczać można z uwikłanej postaci wzoru Prandtla-Kármána (w funkcji Re) [7, 9]. Według prac [22, 23] kryterium (7) ma zastosowanie do rurociągów z tworzyw sztucznych. Przekształcając wzór (7), wykorzystując dane literaturowe o chropowatości rurociągów z tworzyw sztucznych ( $k \in <0,003; 0,05>$  mm – tab. 1), można określić górne ograniczenie prędkości przepływu wody w I strefie, a mianowicie:

$$v_{grI} = 23v/k \quad (8)$$

niezależnej od średnicy rurociągu, która w przypadku temperatury wody 283,15 K (i lepkości  $\nu = 1,306 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) wynosi przykładowo:

- przy  $k=0,003$  mm:  $v_{grI}=10$  m/s,
- przy  $k=0,01$  mm:  $v_{grI}=3,0$  m/s,
- przy  $k=0,02$  mm:  $v_{grI}=1,5$  m/s,
- przy  $k=0,05$  mm:  $v_{grI}=0,6$  m/s.

Oznacza to, że np. rurociągi (w tym tworzywowe – tab. 1) o chropowatości  $k > 0,01$  mm w systemach wodociągowych (i kanalizacyjnych), gdzie  $v \in <0,5; 3>$  m/s, pracują już w strefie przejściowej (II). Nie mogą więc być obliczane ze wzorów przeznaczonych do rur hydraulicznie gładkich, np. Prandtla-Kármána [7, 9], jak się to dotychczas czyni. Dolne ograniczenie prędkości przepływu w I strefie wynika z warunku  $vd/\nu = Re > 4000$ . Stąd  $v_{min} = 4000\nu/d$  zależy już od średnicy rurociągu (np.  $v_{min} = 0,05$  m/s przy  $d = 0,1$  m oraz  $v_{min} = 0,005$  m/s przy  $d = 1,0$  m).

Powyżej granicznej wartości liczby Reynoldsa ( $Re_{grII}$ ) (wg wzoru Rouse'a) [7, 9, 15]:

$$Re_{grII} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \frac{200}{\varepsilon} \quad (9)$$

oddzielającej strefy II i III, przewody traktowane są już jako tzw. doskonale chropowate, a panujący w nich przepływ jako całkowicie turbulentny [21, 24]. Wówczas współczynnik oporów ( $\lambda$ ) zależy jedynie od wartości chropowatości względnej ( $\varepsilon$ ) i określany jest najczęściej ze wzoru Prandtla-Nikuradsego [7, 9]. Podczas przepływu w III strefie, jako alternatywną do metody bazującej na wzorach Darcy-Weisbacha (4) i Colebrooka-White'a (5), do wymiarowania rurociągów wodociągowych i kanalizacyjnych stosowana jest metoda oparta na wzorze Manninga (na prędkość średnią), o dogodnej postaci analitycznej [8–10, 25, 26]:

$$v = \frac{1}{n} \sqrt[3]{R_h^2 \sqrt{J}} = C_M \sqrt{R_h J} \quad (10)$$

w której:

$n$  – współczynnik szorstkości przewodu,  $\text{s}/\text{m}^{1/3}$

$R_h$  – promień hydrauliczny ( $R_h = d/4$ ), m

$J$  – spadek linii energii ( $J = \Delta h/l$ )

$C_M$  – współczynnik Chézy do wzoru Manninga,  $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ , w postaci:

$$C_M = \frac{1}{n} R_h^{1/6} = \frac{1}{n} \left(\frac{d}{4}\right)^{1/6} \quad (11)$$

Współczynnik szorstkości ( $n$ ) we wzorze Manninga zależy od stanu hydraulicznego powierzchni ścian przewodów – analogicznie jak współczynnik chropowatości ( $k$ ). W normie [8] określany jest jako współczynnik Manninga  $K = 1/n$ , którego wartość (w III strefie) można określić ze wzoru:

$$K = \frac{1}{n} = 4\sqrt{g} \left(\frac{32}{d}\right)^{1/6} \log \frac{3,7d}{k} \quad (12)$$

Poniżej zaprezentowano metodologię uzmiennienia wartości współczynnika szorstkości ( $n$ ) do wzoru Manninga w strefach I i II – na drodze bezpośredniego porównania zależności określających średnią prędkość przepływu cieczy w obu stosowanych metodach obliczeniowych [1].

Wzór Darcy-Weisbacha (4) po przekształceniach ma postać:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{2gdJ} \quad (13)$$

Przyrównując zapis (13) do wzoru Manninga (10) po przekształceniach otrzymuje się:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{2gdJ} = \frac{1}{n} \left(\frac{d}{4}\right)^{1/6} \frac{1}{2\sqrt{2g}} \sqrt{2gdJ} \quad (14)$$

Dzieląc równanie (14) obustronnie przez  $(2gdJ)^{1/2}$  i przekształcając je ze względu na  $n$  otrzymuje się:

$$n = \sqrt{\lambda} \frac{1}{\sqrt{8g}} \left(\frac{d}{4}\right)^{1/6} \quad (15)$$

Postać wzoru (15) pozwala już na rozszerzenie zakresu stosowalności wzoru Manninga na warunki przepływu cieczy w strefach I i II, poprzez uzależnienie współczynnika szorstkości ( $n$ ) od wartości liczby Re i chropowatości  $k$  – pośrednio przez współczynnik oporów liniowych ( $\lambda$ ). Przykładowo, na podstawie badań rur z polipropylenu ( $k = 0,006$  mm) ustalono w I strefie przepływów zależność [1]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{Re^{0,868}}{4,62} \quad (16)$$

Po wstawieniu wzoru (16) do wzoru (15) otrzymuje się w przypadku rur hydraulicznie gładkich:

$$n = \left(2 \log \frac{Re^{0,868}}{4,62}\right)^{-1} \frac{1}{\sqrt{8g}} \left(\frac{d}{4}\right)^{1/6} \quad (17)$$

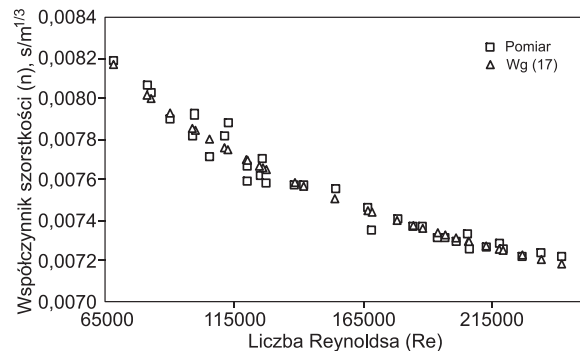
Jednak aby zachować uniwersalizm wzoru na  $n$  w strefie I proponuje się postać ogólną – ze znanym z literatury wzorem Prandtla-Kármána:

$$n = \left(-2 \log \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}}\right)^{-1} \frac{1}{\sqrt{8g}} \left(\frac{d}{4}\right)^{1/6} \quad (18)$$

W II strefie przepływów proponuje się natomiast formułę ze wzorem (5) w postaci:

$$n = \left[-2 \log \left(\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71d}\right)\right]^{-1} \frac{1}{\sqrt{8g}} \left(\frac{d}{4}\right)^{1/6} \quad (19)$$

Na rysunku 1 przedstawiono porównanie wyników obliczeń współczynnika szorstkości przewodu ( $n$ ) z formułą (17) z wynikami pomiarów rur hydraulicznie gładkich.



Rys. 1. Porównanie wyników obliczeń i pomiaru szorstkości rurociągu ( $n$ ) w zakresie przepływu w I strefie [1]  
Fig. 1. Calculated and measured values of pipeline roughness ( $n$ ) within the range of flow in zone I [1]



## Wpływ chropowatości ścian rurociągu na jego przepływność

Zaprezentowane zależności fizyczne i wzory do obliczeń strat hydraulicznych w rurociągach mają skomplikowaną (nieliniową) i uwikłaną postać matematyczną, trudną zwłaszcza do oddzielnego zilustrowania wpływu dwóch czynników:

- a) chropowatości ( $k$ ), bądź szorstkości ( $n$ ) rurociągów, np. wskutek inkrustacji ścian,
- b) zmniejszenia średnicy rurociągów, np. wskutek odkładania się osadów

na sprawność hydrauliczną (przepływność) ciśnieniowych rurociągów wodnych. Próbę taką podjęto w celu ilustracji problemu a) – na podstawie metodologii obliczeń opartej na wzorach Darcy-Weisbacha (4) i Colebrooka-White'a (5), natomiast problemu b) – na podstawie metodologii opartej na wzorze Manninga (10) przy  $n=\text{const}$ .

Wzór Darcy-Weisbacha (4), po uwzględnieniu równania ciągłości ruchu ( $Q=Av$ ), ma postać:

$$\Delta h = \lambda \frac{8}{g\pi^2} \frac{1}{d^5} Q^2 \quad (20)$$

Dzieląc to równanie obustronnie przez długość rurociągu ( $l$ ) otrzymuje się wzór na spadek linii energii:

$$J = \lambda \frac{8}{g\pi^2} \frac{1}{d^5} Q^2 = CQ^2 \quad (21)$$

w którym:

$8\lambda/(g\pi^2 d^5)=C$  – oporność właściwa rurociągu o średnicy  $d$ ,  $s^2/m^6$

Zmiany oporności rurociągu w czasie  $t$  lat eksploatacji (z  $C_0$  na  $C_t$ ) charakteryzuje wskaźnik oporności względnej ( $\delta_C$ ):

$$\delta_C = \frac{C_t}{C_0} = \frac{\lambda_t}{\lambda_0} \left(\frac{d_0}{d_t}\right)^5 \quad (22)$$

Przy niezmiennym w czasie strumieniu przepływu ( $Q=\text{idem}$ ), ze wzorów (21) i (22) wynika wprost, że wskaźnik  $\delta_C=J_t/J_0$  i spadek linii energii ( $J_t$ ) po czasie  $t$  zwiększają się najczęściej ( $\delta_C>1$ ) względem wyjściowego  $J_0$  (w czasie  $t=0$ ) do  $J_t=\delta_C J_0$ .

Przekształcając wzór (21) ze względu na  $Q$  otrzymuje się postać:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{\frac{g\pi^2}{8}} d^{5/2} \sqrt{J} = M\sqrt{J} \quad (23)$$

w której:

$\lambda^{-1/2}(g\pi^2/8)^{1/2}d^{5/2}=M$  – przepływność właściwa rurociągu o średnicy  $d$  ( $m^3/s$ ), przy czym:  $M=C^{-1/2}$  ( $C=1/M^2$ ).

Zmiany przepływności rurociągu eksploatowanego przez  $t$  lat (z  $M_0$  na  $M_t$ ) charakteryzuje wskaźnik względnej przepływności ( $\eta_M$ ):

$$\eta_M = \frac{M_t}{M_0} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_t}\right)^{1/2} \left(\frac{d_t}{d_0}\right)^{5/2} \quad (24)$$

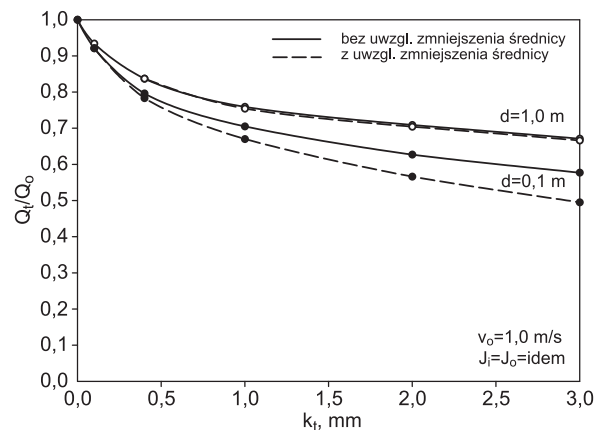
Przy niezmiennym w czasie spadku linii energii ( $J=\text{idem}$ ) ze wzorów (23) i (24) wynika, że:

$$\eta_M = \frac{Q_t}{Q_0} \quad (25)$$

stąd po czasie  $t$  lat strumień przepływu ( $Q_t$ ) zmniejsza się najczęściej ( $\eta_M<1$ ) względem wyjściowego  $Q_0$  (w czasie  $t=0$ ) do wartości  $Q_t=\eta_M Q_0$ .

Do ilustracji zjawiska spadku przepływności ( $\eta_M$ ), wywołanej wzrostem chropowatości ( $k_t$ ), za punkt odniesienia

wybrano dwa rurociągi hydraulicznie gładkie ( $k=0$ ) o średnicach  $d_0=0,1$  m oraz  $d_0=1,0$  m i przepływności właściwej  $M_0$  (w czasie  $t_0=0$ ). Przyrost chropowatości w czasie eksploatacji ( $t$ ) zadano dyskretnie z przedziału  $k_{ti} \in \{0,1; 0,4; 1; 2; 3\}$  mm. Jako wyjściową prędkość przepływu przyjęto  $v_0=1,0$  m/s. Wartości współczynników  $\lambda_0$  i  $\lambda_{ti}$  w temperaturze wody 283,15 K obliczono ze wzoru Colebrooka-White'a (5) przy  $k_0=0$  i zadanym  $k_{ti}$ . Wyniki obliczeń  $\eta_M(k_{ti})$  naniesiono na wykres. Z rysunku 2 wynika, że w przypadku rurociągu o średnicy  $d_0=0,1$  m wraz ze wzrostem chropowatości, np. do  $k_t=1,0$  mm, jego przepływność zmniejszy się o 33% ( $\eta_M=0,67$ ) w porównaniu do  $k_0=0$  mm. W przypadku rurociągu o średnicy  $d_0=1,0$  m taki sam rezultat zmniejszenia przepływności ( $\eta_M=0,67$ ) osiągnięty zostanie przy wzroście chropowatości do  $k_t=3,0$  mm. Niewielki wpływ zmniejszenia średnicy rurociągu  $d_t/d_0$  na wartość  $\eta_M$  uwidacznia się jedynie w przypadku rurociągów o małych średnicach.



Rys. 2. Wpływ chropowatości ( $k_t$ ) na względną przepływność rurociągu ( $\eta_M=Q_t/Q_0$ ;  $\eta_M=1$ ,  $k_0=0$ )  
Fig. 2. Effect of roughness ( $k_t$ ) on relative pipeline flowability ( $\eta_M=Q_t/Q_0$ ;  $\eta_M=1$ ,  $k_0=0$ )

## Wpływ średnicy rurociągu na jego przepływność

Wpływ zmniejszenia średnicy (np. wskutek znacznego odkładania się osadów) na sprawność hydrauliczną rurociągów ciśnieniowych (wodociagowych i kanalizacyjnych) można najlepiej zilustrować na podstawie metodologii opartej na wzorze Manninga w III strefie przepływu turbulentnego ( $n=\text{idem}$ ). Wzór (10), po uwzględnieniu równania ciągłości ruchu, ma postać:

$$Q = \frac{1}{n} \sqrt{\left(\frac{d}{4}\right)^2} \sqrt{J} \frac{\pi d^2}{4} = \frac{1}{n} \frac{\pi}{\sqrt{4^5}} \sqrt{d^8} \sqrt{J} \equiv M_M \sqrt{J} \quad (26)$$

w której:

$\pi d^{8/3}/(4^{5/3}n)=M_M$  – przepływność właściwa rurociągu ( $d$ ) do wzoru Manninga, w  $m^3/s$

Względne zmiany przepływności rurociągu ( $M_{Mi}/M_{Mo}$ ) ujmując, podobnie jak we wzorze (26), wskaźnik  $\eta_{MM}$ :

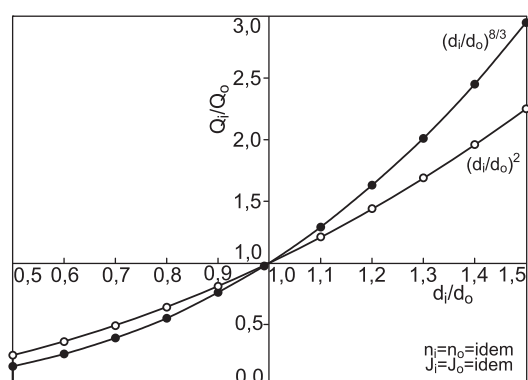
$$\eta_{MM} = \frac{M_{Mi}}{M_{Mo}} = \frac{n_0}{n_i} \left(\frac{d_i}{d_0}\right)^{8/3} \quad (27)$$

a przy niezmiennym spadku linii energii ( $J=\text{idem}$ ) oraz przy  $n=\text{idem}$  ze wzorów (26) i (27) wynika, że:

$$\eta_{MM} = \frac{Q_i}{Q_0} = \left(\frac{d_i}{d_0}\right)^{8/3} \quad (28)$$

stąd strumień przepływu ( $Q_i$ ) zmieni się względem wyjściowego  $Q_0$  do  $Q_i=\eta_{MM}Q_0$ .

Z wykresów na rysunku 3 wynika m.in., że wpływ zmniejszenia czynnej średnicy rurociągu z  $d_0$  do  $d_i$  ( $d_i/d_0 < 1$ ), czyli zmniejszenia powierzchni czynnego przekroju (np. na skutek odłożenia się osadów) w warunkach jednakowej (i wysokiej) chropowatości ścian w III strefie przepływów turbulentnych ( $n = \text{idem}$ ), na spadek przepływności rurociągu  $\eta_{MM} = (d_i/d_0)^{8/3}$  wynika głównie z fizycznego zmniejszenia się pola przekroju poprzecznego rurociągu – w funkcji  $(d_i/d_0)^2$ , a tylko w mniejszej części – w funkcji  $(d_i/d_0)^{2/3}$  z oporów ruchu ( $((d_i/d_0)^{8/3} = (d_i/d_0)^2 (d_i/d_0)^{2/3}$ ). Przykładowo, dwukrotne zmniejszenie średnicy  $d_i/d_0 = 0,5$  wywoła spadek względnej przepływności rurociągu  $\eta_{MM} = Q_i/Q_0$  z 1,0 do 0,16 (czyli 6,25-krotny). Z tego spadek przepływności  $\eta_{MM}$  z 1,0 do 0,25 (czyli 4-krotny) da się uzasadnić zmniejszeniem przekroju ( $(d_i/d_0)^2$ ), a pozostała różnica przepływności  $\eta_{MM} = 0,25 - 0,16 = 0,09$  wynika z oporów przepływu. Podobnie można interpretować wpływ zwiększenia średnicy rurociągu ( $d_i/d_0 > 1$ ) na wzrost  $\eta_{MM} = Q_i/Q_0$ .



Rys. 3. Wpływ względnej średnicy rurociągu przy  $n = \text{idem}$  na jego względną przepływność ( $\eta_{MM} = Q_i/Q_0$ )  
Fig. 3. Effect of relative pipe diameter at  $n = \text{idem}$  on the relative flowability of the pipeline ( $\eta_{MM} = Q_i/Q_0$ )

### Ocena sprawności rurociągów kanalizacyjnych

W celu ilustracji zagadnień hydraulicznych będących przedmiotem pracy omówiono przykłady z badań własnych [1, 3, 11, 12, 28–33]. W pracy [28] wykazano, że po renowacji kanału kamionkowego K 0,4 m w technologii „Shortlining WIR System” z zastosowaniem modułów PVC o średnicy wewnętrznej  $d = 334$  mm, jego pole przekroju poprzecznego zmalało o 30% (z  $0,126 \text{ m}^2$  do  $0,088 \text{ m}^2$ ), lecz przepływność – przy całkowitym wypełnieniu i niezmiennym spadku dna – tylko o 20% (z  $72 \text{ dm}^3/\text{s}$  do  $58 \text{ dm}^3/\text{s}$ ). Jednocześnie prędkość przepływu ścieków wzrosła o 20%, tj. do ok.  $0,7 \text{ m/s}$ . Zjawiska te są pozytywnym skutkiem m.in. polepszenia gładkości ścian odnowionego kanału ( $k = 0,1 \text{ mm}$  – PVC w porównaniu do  $k = 1,5 \text{ mm}$  – kamionka). Zmniejszenie przepływności tego kanału nie miało zasadniczego znaczenia, ponieważ był on znacznie przewymiarowany już na etapie projektowania. W tym przypadku nie przepustowość hydrauliczna kanału była głównym problemem, a jego zły stan techniczny oraz zjawisko akumulacji i zagniwania osadów na dnie, związane ze zbyt małym jego spadkiem ( $J = 0,12\%$ ) i zbyt małą prędkością przepływu ścieków.

W pracy [29] na podstawie badań terenowych oporności hydraulicznej stalowego rurociągu o długości  $l = 7570 \text{ m}$  i średnicy wewnętrznej  $d_0 = 995 \text{ mm}$  (odprowadzającego oczyszczone ścieki poprodukcyjne z fabryki papieru Paper-Kwidzyn SA do Wisły) wykazano, że po 23 latach eksploatacji zmierzona grubość warstwy osadów wyniosła ok.

$34 \text{ mm}$ , co zmniejszyło jego czynną hydraulicznie średnicę do  $d_i = 927 \text{ mm}$  i przepływ do  $Q_i = 0,772 \text{ m}^3/\text{s}$ . Zmierzona oporność hydrauliczna rurociągu wyniosła  $C_f = \Delta h / (lQ^2) = 0,00725 \text{ s}^2/\text{m}^6$  i była około 5-krotnie większa od oporności nowego rurociągu (o chropowatości początkowej  $k_0 = 0,4 \text{ mm}$ ). Zalecono oczyszczenie rurociągu z osadów. Przy szacowanej chropowatości pozostałej po oczyszczeniu na poziomie  $k = 3 \text{ mm}$  oporność hydrauliczna rurociągu wyniesie  $C = 0,00256 \text{ s}^2/\text{m}^6$  i będzie ok. 3-krotnie mniejsza niż rurociągu przed czyszczeniem. Gwarantuje to wzrost jego przepływności o ok. 68%, przy niezmiennym spadku linii energii. Ponieważ samo oczyszczenie rurociągu z osadów przyspiesza proces starzenia się, zalecono jednoczesne wykonanie odpowiedniej powłoki ochronnej (np. cementowej), co jeszcze zwiększy jego przepływność.

### Wnioski

◆ Historyczne dane o korozyjności wody wodociągowej mogą być pomocne do wstępnej (np. na podstawie metodologii Kamersztejna, Lamonta czy Mostkova) oceny wzrostu oporności i spadku przepływności rurociągów, pod warunkiem braku istotnych zmian jakości wody w badanym czasie. Warunek ten jest najczęściej trudny do spełnienia, stąd wynika konieczność wykonywania badań terenowych oporności hydraulicznej rurociągów.

◆ W porównaniu do rur hydraulicznie gładkich ( $k = 0$ ), najistotniejszy wpływ na wzrost oporności i spadek przepływności rurociągów wodociagowych i kanalizacyjnych ma wzrost chropowatości ( $k$ ), bądź szorstkości ( $n$ ), ścian przewodów w czasie eksploatacji (np. na skutek inkrustacji). Wpływ zmniejszania powierzchni czynnego przekroju przewodu jest mniejszy, co wykazano na przykładach rurociągów o średnicy  $0,1 \text{ m}$  i  $1,0 \text{ m}$  w zakresie  $k \ll 0; 3 > \text{mm}$ .

◆ W warunkach jednakowej (i dużej) szorstkości bądź chropowatości ścian w III strefie przepływu turbulentnego ( $n = \text{idem}$  lub  $k = \text{idem}$ ) wykazano, że wpływ zmniejszenia czynnej średnicy przewodu z  $d_0$  do  $d_i$  (np. na skutek odkładania się osadów) na spadek przepływności rurociągów wodnych wynika głównie z fizycznego zmniejszenia się pola przekroju rurociągu – w funkcji  $(d_i/d_0)^2$ , a tylko w części z oporów ruchu – w funkcji  $(d_i/d_0)^{2/3}$ .

◆ Na drodze analitycznej i doświadczalnej dowiedziono, że uzależnienie wartości współczynnika szorstkości ( $n$ ) we wzorze Manninga od  $Re$  i  $k$  w I i II strefie przepływu turbulentnego czyni tę metodę wymiarowania rurociągów równie uniwersalną jak metoda oparta na wzorach Darcy-Weisbacha i Colebrooka-White’a.

◆ Pomimo odmiennych – z natury rzeczy – mechanizmów procesów korozji oraz powstawania osadów w czasie eksploatacji przewodów wodociagowych, w porównaniu do rur kanalizacyjnych, skutki hydrauliczne wzrostu oporności rurociągów wodnych (czy też spadku ich przepływności) mogą być oceniane wspólną metodologią zaproponowaną w niniejszej pracy.

### LITERATURA

1. A. KOTOWSKI, P. WÓJTOWICZ: Podstawy metodologiczne badań parametrów hydraulicznych ciśnieniowych rurociągów i kanałów z tworzyw sztucznych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2005, t. 78, nr 1, ss. 18–24.
2. A.L. KOWAL, M. ŚWIDERSKA-BRÓŹ: Oczyszczanie wody. Podstawy teoretyczne i technologiczne, procesy i urządzenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.

3. A. KOTOWSKI, A. PAWLAK, H. PEŁKA, P. WÓJTOWICZ: Badania oporności hydraulicznej i ciśnienia w sieci wodociągowej osiedli mieszkaniowych Baranówka i Zimowit miasta Rzeszowa na potrzeby modelowania systemu zaopatrzenia w wodę. Raporty Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr 2009, seria SPR nr 2.
4. A.G. KAMERSTEJN: Meroprijatia po sochranieniu propusknij sposobnosti vodoprovodnyh trub. Gosud. Izdatiel. Stroitel. Lit., Moskwa–Leningrad 1950.
5. E.W. MIELCARZEWICZ: Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę. Arkady, Warszawa 2000.
6. H. PEŁKA, E.W. MIELCARZEWICZ: Wyniki badań procesu wzrostu oporności przewodów wodociągowych Oporność hydrauliczna eksploatowanych przewodów wodociągowych. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”, PZITS Oddział w Poznaniu, Poznań 1994, ss. 643–651.
7. PN-76/M-34034: Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia. PKNiM, Warszawa 1976.
8. PN-EN 752-4: Zewnętrzne systemy kanalizacyjne. Obliczenia hydrauliczne i oddziaływanie na środowisko. PKN, Warszawa 2001 i 2008.
9. DVWK-ATV-A110: Richtlinien für die hydraulische Dimensionierung und den Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und -leitungen. Gfa, Hennef 1988.
10. J. CHUDZICKI: Obliczenia hydrauliczne przewodów kanalizacyjnych w świetle norm EN752 i EN12056. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2003, nr 3, ss. 91–95.
11. A. KOTOWSKI: Durchflusswiderstaende in hydraulisch glatten Rohren, Kniekrummern und Segmentkrummern. *GWF-Wasser/Abwasser* 2003, Jg. 144, Nr 9, S. 582–588.
12. A. KOTOWSKI, P. WÓJTOWICZ: Analysis of research methods of isothermal liquid flows in plastic pipes. *Environment Protection Engineering* 2004, Vol. 30, No. 3, pp. 71–80.
13. W. BAGARELLO, V. FERRO, G. PROVENZANO, D. PUMO: Experimental study on flow-resistance law for small-diameter plastic pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Eng.* 1995, No. 10–11, pp. 313–316.
14. G. ECHAVEZ: Increase in losses coefficient with age for small diameter pipes. *J. of Hydraulic Eng.* 1997, No. 2, pp. 157–159.
15. G.O. BROWN: The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance. *Environmental and Water Resources History*, Am. Society of Civil Eng. (ASCE) 2002, pp. 34–43.
16. C. GRABARCZYK, M. KALENIK, T. SIWIEC, D. MORAWSKI: Eksperymentalne badania liniowych oporów hydraulicznych ciśnieniowych przepływów ścieków w rurach PVC i PE – Gamrat. Mat. konf. „Nowe materiały i urządzenia w wodociągach i kanalizacji, Kielce–Cedzyna 2001, Politechnika Świętokrzyska, ss. 29–37.
17. M. LEBIEDOWSKI: Ocena chropowatości przewodów kanalizacyjnych z tworzyw sztucznych. *Gospodarka Wodna* 2002, nr 12, ss. 522–524.
18. K. WYSZKOWSKI: Badania zależności współczynnika oporów liniowych w zakresie przepływu burzliwego. *Archiwum Hydrotechniki* 1970, vol. XII, nr 4, ss. 547–569.
19. C.F. COLEBROOK, C.M. WHITE: Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proceedings of the Royal Society* 1937, Vol. 161, No. A 903.
20. C.F. COLEBROOK: Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. *J. of Inst. of Civil Eng.* 1939, Vol. 11, No. 4, pp. 133–156.
21. G. KEADY: Colebrook-White formula for pipe flows. *Journal of Hydraulic Eng.* 1998, No. 1, pp. 96–97.
22. T. SIWIEC: Kryterium wyboru metody obliczania oporów liniowych w rurach z tworzyw sztucznych. *Instal* 2002, nr 11, ss. 69–72.
23. E. NOWAKOWSKI: Rurociągi z tworzyw sztucznych w instalacjach basenowych. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* 1993, nr 5, ss. 125–128.
24. W.F. SILVA-ARAYA, M.H. CHAUDHRY: Unsteady friction in rough pipes. *J. of Hydraulic Eng.* 2001, No. 7, pp. 607–618.
25. H. MOGHAZI, M. EL-DIN: Estimating Hazen-Williams coefficient for polyethylene pipes. *Journal of Transportation Eng.* 1998, No. 3–4, pp. 197–199.
26. C. FISHENICH: Robert Manning (A historical perspective). ERDC TN-EMRRP-SR-10, 2000, No. 4, pp. 1–4.
27. Z. SIWON, J. CIEŻAK, S. BOGACZEWICZ: Analiza procesu hydraulicznego starzenia się żeliwnych i stalowych przewodów sieci wodociągowej we Wrocławiu. *Ochrona Środowiska* 1998, vol. 20, nr 4, ss. 21–26.
28. A. KOLONKO, A. KOTOWSKI: Koncepcja renowacji kanału z oszacowaniem wpływu wybranej techniki rehabilitacji na warunki przepływu ścieków. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2007, t. 81, nr 12, ss. 28–31.
29. H. PEŁKA, A. KOTOWSKI: O celowości badań oporności hydraulicznej rurociągów przed oczyszczaniem bądź renowacją. *Instal* 2003, nr 11, ss. 2–5.
30. A. KOTOWSKI, E.W. MIELCARZEWICZ, H. PEŁKA, K. WYSZKOWSKI, M. KONDAKRZI: Badanie oporów hydraulicznych eksploatowanych ośmiu przewodów wodociągowych w Brzegu. Raporty Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr 1990, seria SPR nr 71.
31. A. KOTOWSKI, E.W. MIELCARZEWICZ, H. PEŁKA, A. AL-KHATIB: Badania hydrauliczne sprawności sieci wodociągowej i układu przewodów przesyłowych oraz studia nad racjonalną modernizacją i rozbudową systemu zaopatrzenia w wodę Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego. Raporty Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr 1991, seria SPR nr 15.
32. A. KOTOWSKI, H. PEŁKA: Pomiary parametrów pracy sieci wodociągowej Polkowic. *Gospodarka Wodna* 1994, nr 8, ss. 180–183.
33. A. KOTOWSKI, A. PAWLAK, W. KLUSKA: O strategii wyboru wariantu zasilania i eksploatacji sieci wodociągowej Polkowic Dolnych. *Gospodarka Wodna* 2003, nr 1, ss. 30–35.

**Kotowski, A. Hydraulic Analysis of Phenomena Reducing Pipeline Flowability. *Ochrona Srodowiska* 2010, Vol. 32, No. 1, pp. 27–32.**

**Abstract:** While in service, water pipelines undergo corrosion and develop incrustations, which is attributable to the chemical instability of tap water. This study reports the following findings. Tap water corrosivity tests can be regarded as a useful tool for the preliminary estimation of the increase in pipeline roughness, provided that no significant changes in water quality were observed at the time of the research. Compared to smooth pipes (in hydraulic terms), even a slight increase in the wall roughness of the pipes becomes a substantial contributing factor in the

decrease of pipeline flowability. At a high wall roughness, the decrease in the flowability of the pipeline is attributable primarily to the physical reduction in the pipe cross-section; the contribution of flow resistance is less important. The author has demonstrated, both by analysis and by experiments, that relating the value of the roughness coefficient ( $n$ ) in Manning's equation to Reynolds number and roughness ( $k$ ) renders this method of pipeline dimensioning as accurate as the method based on Darcy-Weisbach and Colebrook-White equations.

**Keywords:** Water pipelines, water corrosivity, incrustation, pipelines roughness, flow resistance, hydraulic efficiency.