

Agnieszka Malesińska, Jarosław Chudzicki

Zmiana oporu hydraulicznego przewodów wodociągowych poddanych renowacji z zastosowaniem rur z polietylenu

W 2008 r. przewody z żeliwa szarego stanowiły prawie 37% długości sieci wodociągowych w Polsce, a w Warszawie nawet 56%, przy czym przewody eksploatowane przez ponad 50 lat obejmowały w 2004 r. około 50% długości sieci, a ich stan techniczny trudno uznać za dobry [1]. Z tego względu prowadzi się renowację sieci wodociągowej, polegającą np. na wprowadzeniu w stary przewód żeliwny nowego rurociągu o mniejszej średnicy (metoda reliningu), lecz o dużo mniejszym współczynniku chropowatości bezwzględnej (k) [2]. Zasadne jest zatem pytanie, na ile taki sposób naprawy sieci zmienia parametry hydrauliczne przewodu poddanego renowacji. Czy przewód po renowacji, mimo mniejszego współczynnika chropowatości bezwzględnej, jest w stanie przy zwiększonej prędkości zapewnić wymaganą wysokość ciśnienia między węzłami obliczeniowymi? Należy zauważyć, że na wartość strat ciśnienia ma wpływ nie tyle wartość współczynnika chropowatości bezwzględnej (k), co wartość jego stosunku do średnicy wewnętrznej przewodu, czyli chropowatość względna ($\epsilon = k/d_w$). Im średnica jest mniejsza tym wpływ współczynnika k jest bardziej widoczny. W przypadku większych średnic, zmniejszenie wartości współczynnika k w stosunku do średnicy przewodu nie będzie aż tak zauważalne, natomiast zmniejszenie średnicy spowoduje wzrost prędkości przepływu przy założonym strumieniu objętości wody.

W niniejszym artykule podjęto próbę określenia rzeczywistych zmian parametrów hydraulicznych przepływu wody w przewodach sieci wodociągowej wynikających z jej renowacji.

Przewody (nowe i po 50 latach eksploatacji) z żeliwa szarego z powłoką bitumiczną

Na podstawie badań oporności hydraulicznej nowych rurociągów przeprowadzonych w latach 80. XX w. przyjęto, że średnia chropowatość nowych rurociągów z żeliwa szarego o wewnętrznej powłoce bitumicznej wynosi $k_o = 0,6 \pm 0,2$ mm ($p = 99,9\%$) [3]. Szeroki przedział ufności w przypadku średniej wartości k_o świadczy o wpływie różnych czynników na chropowatość nowego rurociągu, takich jak warunki i czas składowania rur, zachowanie prostoosiowości rurociągu, rodzaj i dokładność połączeń i inne. Wartość zastępczej chropowatości piaskowej

rurociągu (k_t) eksploatowanego przez t lat określono z następującej zależności [3]:

$$k_t = 0,6 + (0,076 - 0,103I)t \quad (1)$$

w której I jest wskaźnikiem stabilności wody w przedziale od $-0,8$ do $+0,25$, wyznaczonym ze wzoru Stroheckera [4]:

$$I = [pH] - [pH_s] = [pH] - (11,39 - 2\log M) \quad (2)$$

w którym:

$[pH]$ – rzeczywiste pH wody

$[pH_s]$ – pH wody w stanie równowagi węglanowo-wapniowej

M – zasadowość ogólna wody, gCO_2/m^3

Wykorzystując te zależności, w niniejszym artykule przeprowadzono obliczenia zmiany przepuszczalności hydraulicznej przewodów z żeliwa szarego. Zakładając czas eksploatacji uwzględniono zmianę wartości średnicy wewnętrznej przewodów wg formuły [3]:

$$d_t = d_o - 0,236t \quad (3)$$

w której:

d_t – średnica wewnętrzna przewodu po t latach eksploatacji, mm

d_o – średnica wewnętrzna nowego przewodu, mm

Na potrzeby prowadzonych analiz założono, że wpływ wartości wskaźnika stabilności wody na roczny przyrost warstwy osadów jest nieistotny [3].

W tabeli 1 zestawiono zmiany wartości średnic wewnętrznych przewodów żeliwnych wynikające z ich wieloletniej eksploatacji. Zakres średnic związany jest z możliwością renowacji polegającej na wprowadzeniu nowego przewodu wykonanego z polietylenu PE do wnętrza starego przewodu żeliwnego (zestawione średnice wybrane zostały krokowo). W tabeli 2 przedstawiono natomiast zmiany wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej przy różnych wartościach wskaźnika stabilności wody w funkcji czasu eksploatacji przewodu wodociągowego.

Prowadzone w ostatnich latach badania nad dokładnością oszacowania współczynników oporów liniowych (λ) doprowadziły do uzyskania rozbudowanego wzoru Waldena [5, 6]. Jednak z uwagi na wymaganą dokładność obliczeń inżynierskich nie ma uzasadnionej potrzeby stosowania tak dokładnych zależności. Dlatego też w celach porównawczych obliczono wartość współczynnika λ z następujących wzorów [7]:

– Waldena:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\left(\frac{6,1}{Re^{0,91}} + 0,268 \frac{k}{d_w}\right) \quad (4)$$

Tabela 1. Zmiana średnicy wewnętrznej przewodów żeliwnych w zależności od czasu ich eksploatacji
Table 1. Change in inside diameter of cast iron pipes as a function of operation time

Średnica nowego przewodu (DN) mm	Czas eksploatacji (t)					
	10lat	20lat	30lat	40lat	50lat	60lat
	średnica wewnętrzna eksploatowanego przewodu (d_w), mm					
80	77,64	75,28	72,92	70,56	68,20	65,84
100	97,64	95,28	92,92	90,56	88,20	85,84
150	147,64	145,28	142,92	140,56	138,20	135,84
200	197,64	195,28	192,92	190,56	188,20	185,84
250	247,64	245,28	242,92	240,56	238,20	235,84
300	297,64	295,28	292,92	290,56	288,20	285,84
350	347,64	345,28	342,92	340,56	338,20	335,84
400	397,64	395,28	392,92	390,56	388,20	385,84
500	497,64	495,28	492,92	490,56	488,20	485,84
600	597,64	595,28	592,92	590,56	588,20	585,84
700	697,64	695,28	692,92	690,56	688,20	685,84
800	797,64	795,28	792,92	790,56	788,20	785,84
900	897,64	895,28	892,92	890,56	888,20	885,84
1000	997,64	995,28	992,92	990,56	988,20	985,84
1200	1197,64	1195,28	1192,92	1190,56	1188,20	1185,84

Tabela 2. Zmiana wartości współczynnika chropowatości rur żeliwnych w czasie ich eksploatacji zależnie od wartości wskaźnika stabilności wody; obliczenia wg wzoru (1)

Table 2. Change in roughness coefficient with operation time of cast iron pipes as a function of water stability index; calculations according to the formula (1)

Czas eksploatacji (t) lata	Wskaźnik stabilności wody (I)					
	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0	0,25
	współczynnik chropowatości bezwzględnej eksploatowanego przewodu (k_t), mm					
10	2,18	1,98	1,77	1,57	1,36	1,10
20	3,77	3,36	2,94	2,53	2,12	1,61
30	5,35	4,73	4,12	3,50	2,88	2,11
40	6,94	6,11	5,29	4,46	3,64	2,61
50	8,52	7,49	6,46	5,43	4,40	3,11
60	10,10	8,87	7,63	6,40	5,16	3,62

– Colebrooka-White'a:

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

w których:

λ – współczynnik oporów liniowych

Re – liczba Reynoldsa

k – współczynnik chropowatości bezwzględnej, mm

d_w – średnica wewnętrzna przewodu, mm

Znając wartości współczynnika oporów liniowych (λ) obliczono następnie przepuszczalność hydrauliczną przewodu (K, m³/s) z zależności [7]:

$$K = \sqrt{\frac{\pi^2 g d_w^5}{8 \lambda}} \quad (6)$$

Obliczenia przeprowadzono przy następujących wartościach parametrów wody: temperatura – 283 K, gęstość – 999,70 kg/m³, lepkość kinematyczna – 1,306·10⁻⁶ m²/s.

Wartość prędkości niezbędnej do obliczenia liczby Reynoldsa ustalono na podstawie dopuszczalnych prędkości przepływu wody w zależności od przeznaczenia przewodu zestawionych w tabeli 3. W celu ujednoczenia warunków brzegowych do obliczeń przyjęto prędkość przepływu wody równą 1,0 m/s, która jest dopuszczalna w każdego typu przewodach. Otrzymane wartości współczynnika oporów liniowych nowych przewodów żeliwnych zestawiono w tabeli 4.

Tabela 3. Zalecana prędkość przepływu wody w przewodach wg PN-76/M-34034 [8]

Table 3. Recommended pipe water velocity according to the standard PN-76/M-34034 [8]

Rodzaj przewodu	Średnica, mm	Prędkość, m/s
Tranzytowy, przesyłowy	≥300	≤3,0
Magistralny	≥300	1,0+3,0
Rozdzielczy	50+300	0,5+1,0

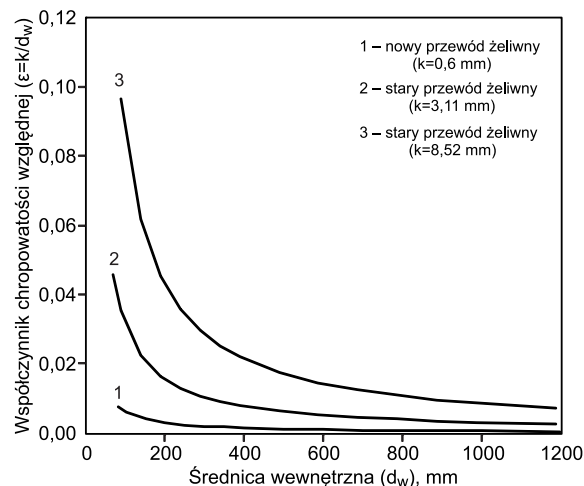
Tabela 4. Wartości parametrów hydraulicznych nowych przewodów żeliwnych przy współczynniku chropowatości $k=0,6$ mm
Table 4. Hydraulic parameter values for new cast iron pipes with roughness coefficient $k=0.6$ mm

Średnica wewnętrzna (d_w) mm	Współczynnik chropowatości względnej (ϵ)	Liczba Reynoldsa (Re)	Współczynnik oporów liniowych (λ)		Przepuszczalność hydrauliczna (K) m^3/s	
			wg Waldena	wg Colebrooka-White'a	λ wg Waldena	λ wg Colebrooka-White'a
80	0,00750	61256	0,034917	0,035600	0,034	0,033
100	0,00600	76570	0,032518	0,033169	0,061	0,060
150	0,00400	114855	0,028751	0,029321	0,179	0,177
200	0,00300	153139	0,026461	0,026986	0,382	0,379
250	0,00240	191424	0,024868	0,025402	0,689	0,682
300	0,00200	229709	0,023671	0,024185	1,114	1,102
350	0,00171	267994	0,022725	0,023223	1,672	1,654
400	0,00150	306279	0,021951	0,022435	2,375	2,349
500	0,00120	382848	0,020742	0,021205	4,268	4,221
600	0,00100	459418	0,019828	0,020274	6,886	6,810
700	0,00086	535988	0,019101	0,019533	10,314	10,199
800	0,00075	612557	0,018503	0,018924	14,633	14,469
900	0,00067	689127	0,017998	0,018410	19,916	19,692
1000	0,00060	765697	0,017564	0,017968	26,236	25,940
1200	0,00050	918836	0,016850	0,017240	42,255	41,774

W wyniku wieloletniej eksploatacji przewodu wodociągowego dochodzi do zmiany jego chropowatości wewnętrznej (tab. 2). Jak wynika z doświadczalnej zależności (1), zmiana ta zależy również od wskaźnika stabilności wody. Wartość współczynnika chropowatości (k) ma wpływ na przepuszczalność hydrauliczną przewodu, a obliczone wartości mają tylko znaczenie szacunkowe. Trudno jednoznacznie określić przepuszczalność hydrauliczną przewodu po 50-letniej eksploatacji. Z uwagi na mnogość czynników wpływających na zmianę wartości tego parametru wydaje się, że tylko przeprowadzenie pomiarów, np. rzeczywistej zmiany ciśnienia, pozwoli na wiarygodne określenie charakterystyki hydraulicznej takiego przewodu. W tabeli 5 przedstawiono oszacowane parametry hydrauliczne przewodu żeliwnego po 50 latach eksploatacji z uwzględnieniem współczynnika chropowatości $k=3,11$ mm oraz $k=8,52$ mm. Przyjęte współczynniki chropowatości odnoszą się do 50-letnich przewodów żeliwnych i zostały obliczone z uwzględnieniem wskaźnika stabilności wody (I) o wartości odpowiednio 0,25 oraz -0,8 (tab. 2).

W tabelach 4 i 5 w ostatnich dwóch kolumnach zamieszczono wyniki analizy przepuszczalności hydraulicznej, w których wykorzystano wartości współczynnika oporów liniowych (λ) obliczonych ze wzorów Waldena i Colebrooka-White'a. Z porównania uzyskanych wartości przepuszczalności hydraulicznej wynika, że w przypadku większych średnic nieco większe wartości uzyskano w przypadku współczynnika oporów liniowych obliczanych ze wzoru Waldena. Różnice te były jednak niewielkie i w zakresie analizowanych średnic błąd względny nie przekraczał 0,16%. W dalszych analizach do obliczeń wartości współczynnika λ przyjęto wzór Waldena.

Otrzymane wartości chropowatości względnej (ϵ) trzech analizowanych przewodów żeliwnych zestawiono na rysunku 1. Na tej podstawie można wnioskować, że zmiana wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej (k) miała znaczny wpływ na wartość chropowatości względnej (ϵ), lecz tylko do pewnej średnicy przewodu. Jako umowną graniczną średnicę można przyjąć $DN=800$ mm.

Rys. 1. Zależność współczynnika chropowatości względnej (ϵ) od wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej (k) rur żeliwnychFig. 1. Correlation between relative roughness coefficient (ϵ) and absolute roughness coefficient (k) of cast iron pipes

Po przekroczeniu tej średnicy zmienił się charakter zależności, a widoczne różnice pomiędzy współczynnikami chropowatości względnej w przypadku kolejnych średnic nie były już tak znaczące i dalej zmniejszały się w miarę wzrostu średnicy przewodów. W przypadku średnic większych od $DN=800$ mm i wszystkich analizowanych wartości współczynnika k , wpływ nierówności na wewnętrznych ściankach przewodu w przekroju czynnym nie osiągał nawet 1%. W przypadku średnic większych od $DN=800$ mm różnice w wartościach chropowatości względnej (ϵ) były stosunkowo niewielkie i wynosiły poniżej 4%. W przypadku średnic mniejszych od $DN=800$ mm różnice w wartościach ϵ zwiększały się już bardziej gwałtownie (od 5% do 20%). Wynika z tego, że przy mniejszych średnicach (poniżej $DN=800$ mm) wpływ wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej (k) na wartość współczynnika chropowatości względnej (ϵ), a w konsekwencji także

Tabela 5. Wartości parametrów hydraulicznych przewodów żeliwnych po 50-letniej eksploatacji przy współczynniku chropowatości $k=3,11$ mm oraz $k=8,52$ mmTable 5. Hydraulic parameter values for cast iron pipes after 50-year operation period with roughness coefficient $k=3.11$ mm and $k=8.52$ mm

Średnica wewnętrzna (d_w) mm	Współczynnik chropowatości względnej (ϵ)	Liczba Reynoldsa (Re)	Współczynnik oporów liniowych (λ)		Przepuszczalność hydrauliczna (K) m^3/s	
			wg Waldena	wg Colebrooka-White'a	λ wg Waldena	λ wg Colebrooka-White'a
współczynnik chropowatości bezwzględnej $k=3,11$ ($l=0,25$)						
68,2	0,04560	52221	0,068618	0,068961	0,016	0,016
88,2	0,03526	67534	0,061242	0,061555	0,032	0,032
138,2	0,02250	105819	0,050934	0,051188	0,109	0,109
188,2	0,01652	144104	0,045285	0,045509	0,251	0,250
238,2	0,01306	182389	0,041584	0,041809	0,472	0,471
288,2	0,01079	220674	0,038913	0,039125	0,786	0,784
338,2	0,00920	258959	0,036865	0,037066	1,205	1,201
388,2	0,00801	297243	0,035226	0,035420	1,740	1,735
488,2	0,00637	373813	0,032734	0,032915	3,200	3,192
588,2	0,00529	450383	0,030898	0,031070	5,249	5,234
688,2	0,00452	526953	0,029468	0,029633	7,958	7,936
788,2	0,00395	603522	0,028311	0,028470	11,398	11,366
888,2	0,00350	680092	0,027348	0,027502	15,633	15,589
988,2	0,00315	756662	0,026529	0,026678	20,724	20,666
1188,2	0,00262	909801	0,025197	0,025340	33,710	33,615
współczynnik chropowatości bezwzględnej $k=8,52$ ($l=-0,8$)						
68,2	0,124927	52221	0,115113	0,115551	0,012	0,012
88,2	0,096599	67534	0,099465	0,099835	0,025	0,025
138,2	0,061650	105819	0,078867	0,079140	0,088	0,088
188,2	0,045271	144104	0,068205	0,068432	0,205	0,204
238,2	0,035768	182389	0,061460	0,061672	0,388	0,388
288,2	0,029563	220674	0,056711	0,056904	0,651	0,650
338,2	0,025192	258959	0,053136	0,053315	1,003	1,002
388,2	0,021947	297243	0,050319	0,050488	1,455	1,453
488,2	0,017452	373813	0,046109	0,046262	2,697	2,692
588,2	0,014485	450383	0,043063	0,043205	4,446	4,439
688,2	0,012380	526953	0,040726	0,040859	6,770	6,759
788,2	0,010809	603522	0,038856	0,038982	9,729	9,714
888,2	0,009592	680092	0,037314	0,037434	13,383	13,362
988,2	0,008622	756662	0,036013	0,036129	17,787	17,758
1188,2	0,007171	909801	0,033921	0,034029	29,054	29,008

na wartość strat ciśnienia może mieć znaczący wpływ. Dlatego w tym zakresie średnic mniejszy wpływ na straty ciśnienia miało zmniejszenie samej średnicy wewnętrznej przewodu niż zmniejszenie wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej. Nawet stosunkowo niewielkie zmniejszenie wartości tego współczynnika może wpłynąć na polepszenie parametrów hydraulicznych przewodu. W przypadku dużych średnic (powyżej $DN=800$ mm – przewody magistralne i tranzytowe) wpływ współczynnika chropowatości bezwzględnej (k) na wartość strat ciśnienia nie był już tak zauważalny, ponieważ w tym przypadku głównym parametrem wpływającym na straty ciśnienia jest prędkość przepływu wody. Wpływ współczynnika chropowatości k był coraz mniejszy w miarę zwiększania się średnic przewodów (rys. 1).

Wykorzystanie rurociągów z polietylenu do renowacji przewodów wodociągowych

Jednym ze sposobów renowacji przewodu (np. żeliwnego) jest wprowadzenie do jego wnętrza rury z polietylenu (PE) o mniejszej średnicy zewnętrznej (metoda reliningu). Rurociągi z PE charakteryzują się stosunkowo małym współczynnikiem chropowatości bezwzględnej wynoszącym $k \approx 0,05$ mm [1], a według danych producentów nawet 0,01 mm [9]. Po przeprowadzeniu renowacji przewodów metodą reliningu przy zastosowaniu rurociągu z polietylenu należy spodziewać się mniejszych oporów hydraulicznych, a co za tym idzie – powinny się poprawić warunki hydrauliczne przepływu w przewodzie po renowacji. Okazuje się jednak, że nie jest to wcale takie jednoznaczne.

Tabela 6. Wartości parametrów hydraulicznych przewodów z polietylenu przy współczynniku chropowatości $k=0,01$ mm
Table 6. Hydraulic parameter values for PE pipes with roughness coefficient $k=0.01$ mm

Średnica zewnętrzna mm	Minimalna grubość ścianki mm	Średnica wewnętrzna (d_w) mm	Współczynnik chropowatości względnej (ϵ)	Liczba Reynoldsa (Re)	Współczynnik oporów liniowych (λ)		Przepuszczalność hydrauliczna (K), m^3/s	
					wg Waldena	wg Colebrooka-White'a	λ wg Waldena	λ wg Colebrooka-White'a
63	5,8	51,4	0,000195	39357	0,022368	0,022651	0,014	0,014
75	6,8	61,4	0,000163	47014	0,021447	0,021736	0,022	0,022
90	8,2	73,6	0,000136	56355	0,020565	0,020857	0,036	0,035
110	10,0	90,0	0,000111	68913	0,019649	0,019941	0,060	0,060
125	11,4	102,2	9,78E-05	78254	0,019101	0,019392	0,084	0,083
140	12,7	114,6	8,73E-05	87749	0,018627	0,018916	0,113	0,112
160	14,6	130,8	7,65E-05	100153	0,018102	0,018387	0,160	0,159
180	16,4	147,2	6,79E-05	112711	0,017651	0,017933	0,218	0,216
200	18,2	163,6	6,11E-05	125268	0,017262	0,017540	0,287	0,284
225	20,5	184,0	5,43E-05	140888	0,016844	0,017118	0,389	0,386
250	22,7	204,6	4,89E-05	156662	0,016479	0,016750	0,513	0,509
280	25,4	229,2	4,36E-05	175498	0,0161-2	0,016368	0,689	0,684
315	28,6	257,8	3,88E-05	197397	0,015725	0,015986	0,936	0,928
355	32,2	290,6	3,44E-05	222511	0,015355	0,015610	1,277	1,267
400	36,4	327,2	3,06E-05	250536	0,015001	0,015250	1,739	1,724
450	40,9	368,2	2,72E-05	281930	0,014661	0,014904	2,362	2,343
500	45,5	409,0	2,44E-05	313170	0,014367	0,014606	3,103	3,078
560	50,9	458,2	2,18E-05	350842	0,014060	0,014293	4,167	4,133
630	57,3	515,4	1,94E-05	394640	0,013752	0,013979	5,654	5,608

Aby przedstawić możliwe komplikacje związane z tego typu renowacją przeanalizowano podstawowe parametry hydrauliczne nowych przewodów wykonanych z PE PN16. Typoszereg analizowanych średnic przyjęto na podstawie katalogu producenta [9]. Zakres przyjętych do analizy średnic był związany z możliwością ich wykorzystania do renowacji starych przewodów żeliwnych metodą wciągania rurociągu z PE o mniejszej średnicy zewnętrznej. W tabeli 6 zestawiono (analogicznie jak w przypadku przewodów żeliwnych) podstawowe parametry hydrauliczne nowych przewodów z PE, przyjmując korzystniejszą w ich przypadku wartość współczynnika chropowatości $k=0,01$ mm.

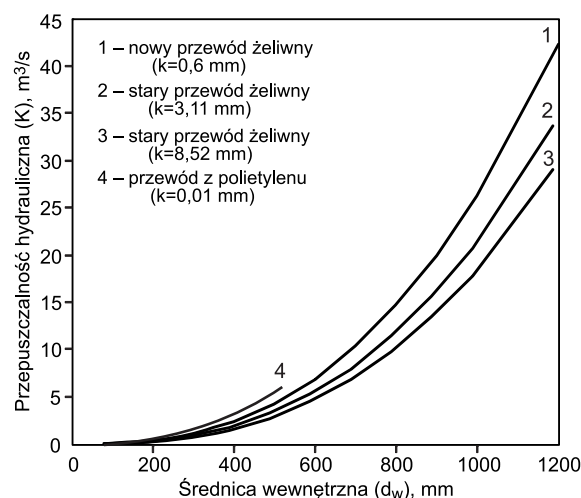
Porównanie przepuszczalności hydraulicznej przewodów

W tym wariancie obliczeń przeanalizowano cztery przypadki:

- nowy przewód żeliwny o współczynniku $k=0,6$ mm,
- stary przewód żeliwny o współczynniku $k=3,11$ mm,
- stary przewód żeliwny o współczynniku $k=8,52$ mm,
- nowy przewód z PE o współczynniku $k=0,01$ mm.

Obliczenia wykonano przy jednej prędkości przepływu wody wynoszącej $v=1,0$ m/s. W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano wartości przepuszczalności hydraulicznej (K) przewodów żeliwnych i z polietylenu o różnych średnicach, z uwzględnieniem różnych wartości współczynnika k (tab. 4–6), a zmienność przepuszczalności hydraulicznej w funkcji średnicy przewodu zilustrowano na rysunku 2.

Na podstawie otrzymanych wykresów przeanalizowano skutki renowacji przewodu metodą reliningu przy konieczności zachowania niezmięnionej przepuszczalności

Rys. 2. Zależność przepuszczalności hydraulicznej (K) od średnicy analizowanych przewodów (d_w)Fig. 2. Correlation between hydraulic conveyance (K) and pipe diameter (d_w)

tęgo przewodu. Przykładowo, przy założonej takiej samej prędkości przepływu wody i przepuszczalności hydraulicznej przewodu na poziomie $K=5$ m^3/s należy zastosować następujące średnice:

- polietylen ($k=0,01$ mm): średnica wewnętrzna $d_w=515,4$ mm ($K=5,654$ m^3/s),
- żeliwo nowe ($k=0,6$ mm): średnica wewnętrzna $d_w=600$ mm ($K=6,886$ m^3/s),
- żeliwo po 50 latach eksploatacji ($k=3,11$ mm): średnica wewnętrzna $d_w=588,2$ mm ($K=5,249$ m^3/s),
- żeliwo po 50 latach eksploatacji ($k=8,52$ mm): średnica wewnętrzna $d_w=688,2$ mm ($K=6,770$ m^3/s).

Nie w każdych warunkach jest możliwa renowacja przewodu przez wprowadzenie do jego wnętrza nowego przewodu o średnicy zewnętrznej równej średnicy wewnętrznej starego przewodu. Jak można zauważyć na podstawie powyższego zestawienia, zachowanie żądanej przepuszczalności jest możliwe jedynie przy tym samym rzędzie wielkości średnic. Należy się więc spodziewać, że zmniejszenie średnicy wewnętrznej, przy konieczności zachowania wartości przepływu, musi prowadzić do zwiększenia prędkości przepływu, a tym samym do zwiększenia wysokości strat ciśnienia.

W przypadku, kiedy ze względów eksploatacyjnych jest potrzeba, a nawet konieczność zmniejszenia ilości transportowanej wody (np. na skutek zmniejszonego poboru wody w stosunku do wcześniej przyjętej wartości projektowej) lub kiedy możliwe jest zwiększenie wysokości podnoszenia wody w pompowni wodociągowej zasilającej sieć, metoda renowacji przewodu przez wprowadzenie do niego nowego rurociągu z PE o mniejszej średnicy, ale też o dużo mniejszej wartości współczynnika chropowatości, jest jedną z lepszych metod renowacji sieci wodociągowej, szczególnie w miejscach trudnodostępnych. Nie można jednak stosować tej metody bez przeprowadzenia szczegółowej analizy hydraulicznej. Jest to szczególnie ważne wówczas, kiedy renowacja powoduje znaczne zmniejszenie średnicy, np. o dwa wymiary. Podczas tego typu renowacji należy zachować szczególną uwagę w przypadku średnic przewodów większych od DN=800 mm, ponieważ w tych warunkach wpływ wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej (k) na parametry hydrauliczne przewodu jest coraz mniejszy. W skrajnych przypadkach zmniejszenie średnicy wewnętrznej może doprowadzić do zmniejszenia ilości dostarczanej wody, a nawet do deficytów wody wynikających ze zbyt niskiego ciśnienia w sieci wodociągowej. Przykładem takiej sytuacji była renowacja odcinka sieci wodociągowej w jednym z większych miast Polski, która polegała na wprowadzeniu do wnętrza starego przewodu żeliwnego nowego rurociągu z PE. Średnica odnawianego przewodu żeliwnego wynosiła DN=800 mm. Do wnętrza tego przewodu wprowadzony został rurociąg z PE o średnicy zewnętrznej 630 mm. Naprawiany odcinek pełnił funkcję magistrali (fragment pierścienia przewodów rozprowadzających wodę z dużej pompowni zasilającej sieć rozdzielczą). W tej konkretnej sytuacji nie można było zmniejszyć ilości transportowanej wody przewodem poddawany renowacji. Z przyczyn technicznych nie można było także zwiększyć wysokości podnoszenia wody w pompowni współpracującej z przewodem. Po przeprowadzeniu renowacji nie uzyskano spodziewanych efektów hydraulicznych. W wyniku wzrostu oporów hydraulicznych odnowionego przewodu, spowodowanego wzrostem prędkości przepływającej wody w zmniejszonym przekroju,

analizowany przewód przestał pełnić funkcję przewodu zasilającego. Po renowacji nastąpiła zmiana kierunku przepływu wody w tym przewodzie, na co miał także wpływ specyficzny układ sieci w bezpośrednim sąsiedztwie tego przewodu.

W celu analizy tego problemu wykonano kilka przykładowych obliczeń. Pierwotnie woda była transportowana na przewodzie żeliwnym o średnicy DN=800 mm i przy prędkości przepływu 1 m/s przewód ten zapewniał przepustowość 0,5024 m³/s. Przy zachowaniu tego samego przepływu w analizowanym przewodzie żeliwnym po 50 latach eksploatacji (przy zwiększonej wartości współczynnika k) prędkość przepływu wody wynosiła 1,06 m/s. Po przeprowadzeniu renowacji woda była transportowana na analizowanym odcinku nowym przewodem PE PN16 o średnicy 630 mm. Prędkość przepływu wody przy niezmienionej wydajności wyniosłaby wówczas 2,41 m/s, a więc byłaby dwukrotnie większa od prędkości w starym przewodzie żeliwnym przed renowacją, co przełożyłoby się na zwiększenie wysokości strat ciśnienia. W celach porównawczych obliczono wartość strat ciśnienia w czterech wcześniej analizowanych przypadkach. Liniową stratę ciśnienia (h_1) obliczono ze wzoru:

$$h_1 = \frac{Q^2}{K^2} L \quad (7)$$

Obliczenia przeprowadzono przy stałej wartości założonego strumienia objętości wody $Q=0,5024$ m³/s na odcinku przewodu o długości $L=1000$ m. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 7.

Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, zmiana starego przewodu żeliwnego na nowy przewód z polietylenu o mniejszej chropowatości spowodowała przy tej samej wartości strumienia objętości wody (Q) ponad 2-krotny wzrost wartości liniowych strat ciśnienia na rozpatrywanym odcinku, tj. z 2,68 mH₂O do 6,89 mH₂O. Zmniejszenie wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej (k) rury z polietylenu w tym wypadku było niewystarczające aby przy zachowanej wartości Q zwiększył on znacząco przepuszczalność hydrauliczną przewodu. Wpływ miało przede wszystkim zmniejszenie przekroju poprzecznego przewodu po renowacji, co doprowadziło do zwiększenia prędkości przepływu. Opisana zmiana parametrów hydraulicznych przewodu po renowacji była powodem zmiany charakteru pracy analizowanego odcinka sieci wodociągowej. Należy podkreślić, że w przedstawionym przykładzie nie było błędem zastosowanie konkretnej metody renowacji, lecz brak szczegółowej analizy hydraulicznej poprzedzającej dobór średnicy nowego rurociągu polietylenowego. Najbezpieczniejszym rozwiązaniem (jeżeli tylko jest to możliwe) byłoby wykonanie pomiarów strat ciśnienia na odcinku starego przewodu przed jego renowacją. Tym

Tabela 7. Zestawienie wysokości strat ciśnienia przy zmiennych parametrach hydraulicznych
Table 7. Head loss summary at various hydraulic parameters

Rodzaj przewodu	Współczynnik chropowatości bezwzględnej (k) mm	Średnica wewnętrzna (d_w) mm	Prędkość przepływu wody (v) m/s	Przepuszczalność hydrauliczna (K) m ³ /s	Liniowa strata ciśnienia (h_1) mH ₂ O
Żeliwo nowe	0,60	800	1,00	14,469	1,21
Żeliwo po 50 latach eksploatacji	3,11*	788	1,06	11,367	1,95
	8,52*	788	1,06	9,713	2,68
Polietylen	0,01	515,5	2,41	6,052	6,89

*wartości współczynnika chropowatości k wynikały z przyjęcia dwóch różnych wartości wskaźnika stabilności wody (tab. 2)

samym analizę słuszności przyjętej średnicy przewodu z PE przeznaczonego do wprowadzenia w stary przewód żeliwny powinno się przeprowadzać z uwzględnieniem umownego współczynnika chropowatości bezwzględnej (k) [10–13].

Podsumowanie

Przedstawiona analiza hydrauliczna przewodów wodociągowych poddanych renowacji przez wprowadzenie do przewodu nowego rurociągu z polietylenu o mniejszej średnicy i mniejszej wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej (k) wykazała, że zmiany takie oddziałują w różnym stopniu na przepuszczalność hydrauliczną przewodu zależnie od jego średnicy. Wartość współczynnika k ma odwrotnie proporcjonalny do średnicy wewnętrznej przewodu wpływ na wysokość strat ciśnienia. Na podstawie przeprowadzonych analiz ustalono graniczną średnicę wynoszącą $DN=800$ mm jako tę, przy której zmiana wartości współczynnika k – przy zmniejszonej średnicy wewnętrznej przewodu – może prowadzić do wymiernych korzyści pod względem hydraulicznym.

Każda renowacja powinna być poprzedzona analizą hydrauliczną i próbą określenia korzyści lub strat wynikających z przyjęcia takiej – a nie innej – metody odnowy starego odcinka sieci wodociągowej. Szczególną uwagę należy zwrócić na te przypadki renowacji, które prowadzą do znacznej zmiany średnicy wewnętrznej nowego przewodu w stosunku do przewodu starego. Renowacja taka powinna zostać poprzedzona pomiarami wartości parametrów hydraulicznych starego odcinka sieci. W przypadkach szczególnych, kiedy nie planuje się zmniejszenia ilości dostarczanej wody, a parametry pracy pompowni nie mogą ulec zmianie, powszechnie stosowane obliczenia analityczne mogą nie gwarantować spodziewanych efektów przeprowadzonej renowacji. Stąd też im będzie większy stopień zmniejszenia średnicy wewnętrznej w stosunku do średnicy pierwotnej, tym należy zachować większą ostrożność podczas analizy spodziewanych efektów takiej renowacji.

LITERATURA

1. M. KWIETNIEWSKI, M. TŁOCZEK, L. WYSOCKI [red.]: *Zasady doboru rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych do budowy przewodów wodociągowych*. Izba Gospodarcza Wodociągi Polskie, Bydgoszcz 2011.
2. A. KULICZKOWSKI [red.]: *Technologie bezwykopowe w inżynierii środowiska*. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2010.
3. H. PEŁKA: Wpływ właściwości chemicznych wody na oporność hydrauliczną przewodów wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 1985, vol. 7, nr 2–3, ss. 19–24.
4. G. ECHAVEZ: Increase in losses coefficient with age for small diameter pipes. *Journal of Hydraulic Engineering* 1997, No. 2, pp. 157–159.
5. E. ROMEO, C. ROYO, A. MONZÓN: Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes. *Chemical Engineering Journal* 2002, Vol. 86, pp. 369–374.
6. M. ÖZGER, G. YILDIRIM: Determining turbulent flow friction coefficient using adaptive neuro-fuzzy computing technique. *Advances in Engineering Software* 2009, Vol. 40, pp. 281–287.
7. H. WALDEN: *Mechanika płynów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1980.
8. PN-76/M-34034. Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia.
9. Systemy polietylenowe PE 100, Safe Tech RC[®] i Wavin TS^{DOQ}[®]. Katalog produktów Wavin, Poznań 2011.
10. E. HOŁOTA, B. KOWALSKA, D. KOWALSKI: Badanie współczynników chropowatości zastępczej wybranych rurociągów rzeczywistej sieci wodociągowej. *Instal* 2013, nr 9, ss. 61–64.
11. Z. SIWOŃ, J. CIEŻAK, W. CIEŻAK: Oporność hydrauliczna eksploatowanych żeliwnych i stalowych przewodów tranzytowych. *Instal* 2009, nr 5, ss. 8–12.
13. Z. SIWOŃ, 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.
14. Z. SIWOŃ: Wybrane problemy modelowania przepływów w układach dystrybucji wody. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1997, t. 71, nr 6, ss. 218–222.

Malesinska, A., Chudzicki, J. Change in Hydraulic Resistance of Water Supply Pipes Being Renovated with Polyethylene Pipes. *Ochrona Środowiska* 2014, Vol. 36, No. 3, pp. 29–35.

Abstract: Effect of the existing water supply pipe renovation on hydraulic resistance was analyzed. Trenchless relining method of pipe renovation and reconstruction was considered, using polyethylene (PE) pipes of smaller outside diameter than the inside diameter of a renovated pipe. Hydraulic analysis was carried out of roughness coefficient influence on linear friction factor as well as on hydraulic

conveyance of pipes of various inside diameters, made of cast iron and polyethylene. Roughness (k) was demonstrated to affect the head loss inversely proportionally to the inside diameter of the pipe. On the basis of the conducted analysis, an approximate threshold diameter $DN=800$ mm was estimated for which change in roughness (k), at the reduced inside pipe diameter, may lead to measurable hydraulic benefits of renovation.

Keywords: Pipe hydraulic conveyance, friction factor, relining method.