

Florian Grzegorz PIECHURSKI

*Instytut Inżynierii Wody i Ścieków
Politechnika Śląska, Gliwice*

OCENA WARUNKÓW HYDRAULICZNEJ PRACY SIECI WODOCIĄGOWEJ PO RENOWACJI NATRYSKIEM CEMENTEM

THE ESTIMATION OF HYDRAULIC WORK CONDITION OF WATER SUPPLY SYSTEM AFTER RENOVATION BY CEMENT SPRAYING

This paper presents the effects of improvement flow condition in water supply system as a result of renovation with using the cementing. This renovation method used in steel and cast iron pipes shows us flow increase from 17% to 53% in comparison to flow in pipes without the cementing. The presented method allows to receive better water quality and steady pressure in water supply system.

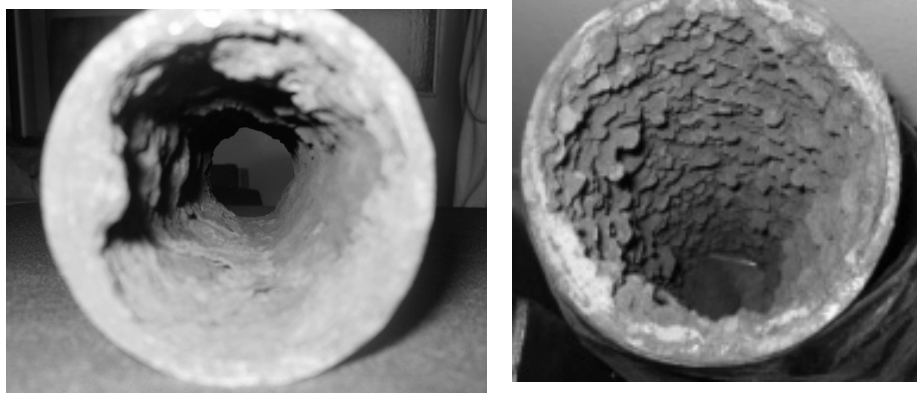
1. Wprowadzenie

Eksploatacji przewodów wodociągowych nie zbudowanych z tworzyw sztucznych wiąże się z powstawaniem korozja i inkrustacja. Odkładanie się na powierzchni wewnętrznej przewodu twardych soli metali - najczęściej żelaza, wapnie oraz manganu zawartych w transportowanej wodzie wywiera negatywny wpływ na stan techniczny i warunki hydrauliczne. Korozja powoduje destrukcję ścianki aż do wystąpienia perforacji, a inkrustacja prowadzi, do zmniejszenia czynnego przekroju poprzecznego i zwiększenia chropowatości, to znacznie zwiększa opory przy przepływie.

Samo czyszczenie przewodów jest rozwiązaniem krótkotrwałym, gdyż po jego zakończeniu korozja i inkrustacje postępują dalej prowadząc do jeszcze szybszego pogorszenia się stanu technicznego oraz parametrów hydraulicznych. Rozwiązaniem tego problemu jest wykonywanie wewnętrznych powłok zabezpieczających. Oddzielają one wewnętrzną powierzchnię istniejącego rurociągu od transportowanej wody zapobiegając ich wzajemnemu oddziaływaniu oraz uszczelniają rurociąg zabezpieczając przed eksfiltracją wody przez nieszczelne połączenia lub pęknięcia. Biorąc pod uwagę, że do czynników przyspieszających procesy starzenia i zwiększających częstotliwość występowania awarii przewodów zaliczyć można również wzrost obciążenia ruchem kołowym istotną zaletą wykładzin staje się możliwość stabilizacji lub wzmacnianie struktury istniejącego rurociągu.

Wykładziny mogą zapewnić większą gładkość powierzchni, co w rezultacie powoduje wzrost wydajności rurociągu nawet w stosunku do jego pierwotnych możliwości. Obecnie najdynamiczniej rozwijającymi się technologiami poprawy jakości infrastruktury wodociągowej są bezwykopowe metody renowacyjne. Duże zainteresowanie przyczyniło się do powstania szeregu podgrup i modyfikacji, wśród których należy dokonać wyboru odpowiedniej technologii biorąc pod uwagę pierwotny stan przewodu oraz oczekiwane rezultaty odnowy.

Nierozłącznym elementem poprawy jakości rurociągu jest zmiana warunków hydraulicznych przepływu odnawianego przewodu bezpośrednio związana ze zmianą współczynnika chropowatości wewnętrznej powierzchni ścianki.



Rys. 1. Rury skorodowane i z inkrustacją o małej i dużej średnicy.

Fig.1 Small and medium diameter pipes with corrosion and encrustation.

2. Obliczenia hydrauliczne przewodów wodociągowych

Obliczenia hydrauliczne przewodów ciśnieniowych przeprowadza się na podstawie obowiązujących norm [1]. Warunki przepływu w przewodach ciśnieniowych określone są jako burzliwe (turbulentne). Oznacza to, że liczba Reynoldsa Re waha się w tym przypadku w granicach: $1 \times 10^4 < Re < 3 \times 10^6$

Do obliczeń przepływów burzliwych w normach europejskich zalecane są wzory Colebrook-White'a oraz Manninga.

Dla obliczeń przewodów o przekroju kołowym przy całkowitym napełnieniu można stosować zależność:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log^* \left[\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} * \frac{k}{3,72D} \right]$$

gdzie:

λ – współczynnik oporu hydraulicznego,
 k – współczynnik chropowatości bezwzględnej [mm],
 D – średnica wewnętrzna przewodu [mm],
 Re – liczba Reynoldsa,

$$Re = \frac{V * D}{\nu}$$

gdzie:

ν – współczynnik lepkości kinetycznej wody [m²/s],
 D – średnica rury [m],
 V – prędkość przepływu [m/s].

W normach unijnych podawany jest również wzór Manninga, zalecany do obliczeń zarówno dla przekroju kołowego przy napełnieniu całkowitym.

$$V = K * R_h^{2/3} * I^{1/2}$$

gdzie:

V – prędkość przepływu [m/s],
 R_h – promień hydrauliczny [m],
 I – spadek hydrauliczny [%],
 K – współczynnik Manninga [m^{1/3}s⁻¹].

$$K = \frac{1}{n}$$

gdzie:

n – współczynnik szorstkości.

Współczynnik chropowatości bezwzględnej k zastosowany we wzorze Colebrooka - White'a uwzględnia straty ciśnienia w zależności od rodzaju materiału, z jakiego jest wykonany przewód, rodzaju połączeń i wieku przewodu (występowania inkrustacji i korozji). Jeżeli nie można uniknąć odkładanie się osadów, do obliczeń strat ciśnienia powinien być brany pod uwagę zmniejszony przekrój poprzeczny rurociągu. Przy stosowaniu zalecanych wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej k przewodu należy ustalić, czy została uwzględniona poprawka dla strat miejscowych. Zwykle używa się wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej k z zakresu od 0,03 do 3,0 mm [1].

W przypadku współczynnika Manninga K zalecane wartości wahają się od 70 m^{1/3}s⁻¹ do 90 m^{1/3}s⁻¹.

Ze względu na brak wartości współczynnika Manninga K dla rurociągów wykonanych z różnego rodzaju tworzyw sztucznych lub włókna szklanego obecnie często stosowanych w budowie sieci w normach PN-EN752 -4 2001 zamieszczono wzór do przybliżonego przeliczania tego współczynnika w zależności od współczynnika chropowatości bezwzględnej k [1].

$$K = 4 * \sqrt{g} * \left(\frac{32}{D} \right)^{\frac{1}{6}} * \log \left(\frac{3,7 * D}{k} \right)$$

gdzie:

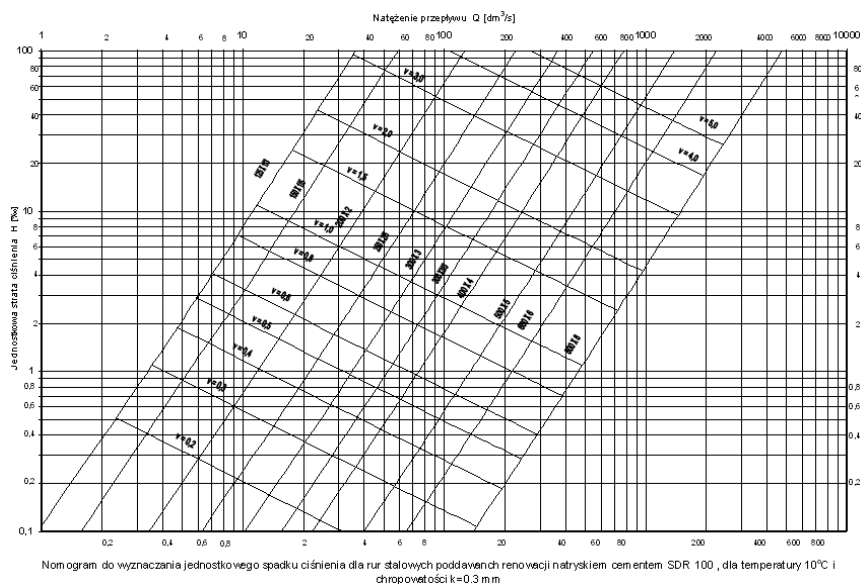
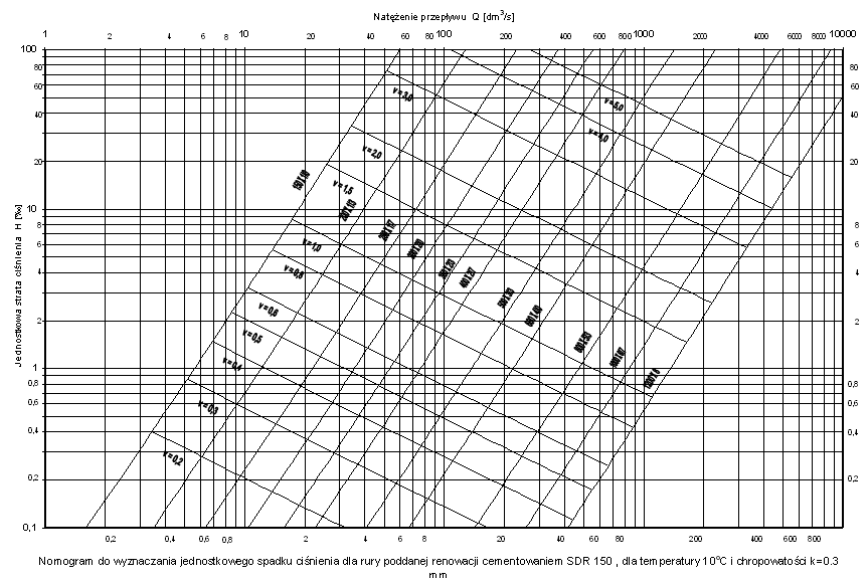
K - współczynnik Manninga [m^{1/3}s⁻¹],
 g - przyspieszenie ziemskie [m/s²],
 D – średnica wewnętrzna przewodu [mm],
 k – współczynnik chropowatości bezwzględnej [mm],

Tab. 1. Wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej k [mm].Tab. 1. Absolute coarseness factor k [mm]

Materiał	Stan powierzchni i warunki eksploatacyjne	Chropowatość bezwzględna k [mm]
Stal	nowy	0,02 - 1,0
	Po wielu latach eksploatacji	3,0 - 11,0
Żeliwo	nowy	0,3 - 1,0
	Po wielu latach eksploatacji	3,0 - 11,0
Beton	nowy	0,3 - 2,5
	Po wielu latach eksploatacji	3,0 - 9,0
Żelbet	nowy	0,3 - 2,5
	Po wielu latach eksploatacji	3,0 - 9,0
Azbestowo-cementowe	nowy	0,05-1,0
	używany	6,0

3. Analiza wyników przeprowadzonych obliczeń

Przy wykorzystaniu powyższych wzorów przeprowadzone zostały obliczenia dla przepływów w rurociągach, w temperaturze 10°C oraz założonych stałych chropowatości k podanych w tab.1. Na podstawie obliczeń opracowane zostały nomogramy do wyznaczania jednostkowego spadku ciśnienia w przewodach odnowionych z wykorzystaniem różnych technologii renowacyjnych oraz rurociągów przed odnową. Każdy nomogram umożliwia określenie warunków hydraulicznych dla konkretnego SDR, czyli stosunku grubości ścianki do średnicy zewnętrznej przewodu. Przy pozostałych metod na potrzeby obliczeń pogrupowano powłoki tworząc ich typoszeręgi.



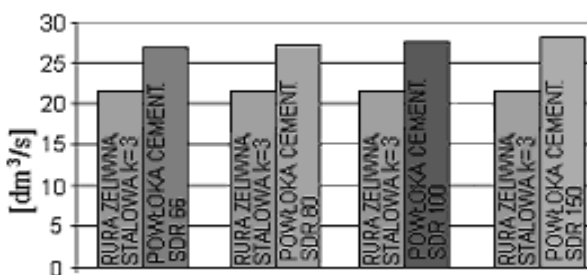
Rys.2. Przykłady nomogramów dla różnych technologii renowacji uzyskanych z obliczeń.

Fig.2. Exemplary nomograms received from calculations for different renovation technologies

Nomogramy te posłużyły do stworzenia wykresów obrazujących zmianę warunków przepływu w przewodach po renowacji.

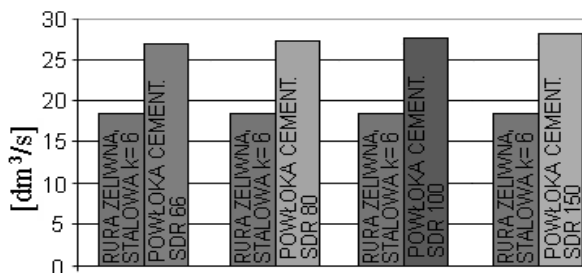
4. Ocena hydraulicznych warunków przepływu przy wykorzystaniu metody renowacji z natryskiem cementem

Przy renowacji z wykorzystaniem powłok cementowych możliwe jest nałożenie warstwy różnej grubości w zależności od stanu macierzystego przewodu oraz oczekiwanych właściwości po renowacji. Na potrzeby obliczeń pogrupowano powłoki cementowe tworząc cztery szeregi SRD. Powłoka renowacyjnej o najmniejszej grubości odpowiada SDR 150, pośrednimi typoszeręgami są SDR 100 i 80, najniższym typoszeręgiem jest SDR 66, co odpowiada najmniejszej grubości warstwy. Dla wszystkich typoszeręgów opracowane zostały nomogramy. Na ich podstawie przeprowadzono obliczenia zmian warunków przepływu w przewodach o średnicy 200 mm. Obliczenia zostały wykonane dla chropowatości powłoki cementowej $k = 0,3$ mm oraz przy założeniu czterech chropowatości dla rur macierzystych wynoszących 3, 6, 9 i 11 mm. Wyniki przedstawione zostały w formie wykresów - rys 3, 4, 5 i 6.



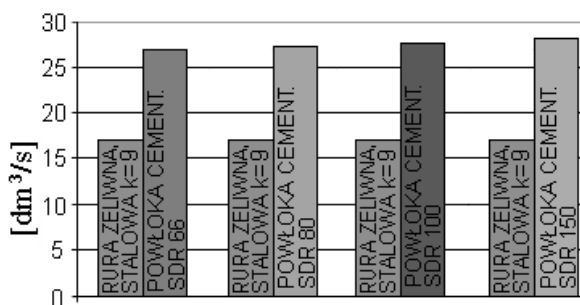
Rys. 3. Wielkości natężenia przepływu, w [dm³/s] przez wodociąg o średnicy 200 mm i chropowatości $k = 3$ mm przed i po renowacji metodą cementowania

Fig.3. Flow values in [dm³/s] through water net with diameter 200 mm and coarseness factor $k=3$ before and after renovation with cement method



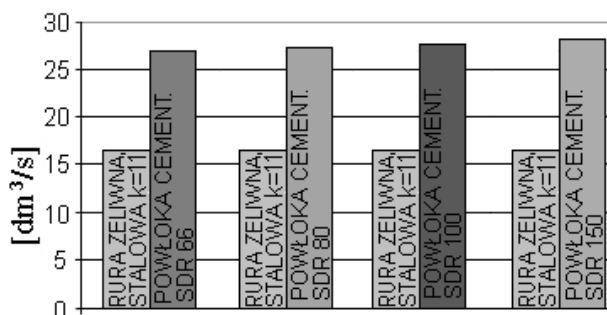
Rys 4. Wielkości natężenia przepływu, w [dm³/s] przez wodociąg o średnicy 200 mm i chropowatości $k = 6$ mm przed i po renowacji metodą cementowania.

Fig.4. Flow values in [dm³/s] through water net with diameter 200 mm and coarseness factor $k=6$ before and after renovation with cement method



Rys 5. Wielkości natężenia przepływu w $[dm^3/s]$ przez wodociąg o średnicy 200 mm i chropowatości $k=9$ mm przed i po renowacji metodą cementowania.

Fig.5. Flow values in $[dm^3/s]$ through water net with diameter 200 mm and coarseness factor $k=9$ before and after renovation with cement method.



Rys. 6. Wielkości natężenia przepływu w $[dm^3/s]$ przez wodociąg o średnicy 200 mm i chropowatości $k=11$ mm przed i po renowacji metodą cementowania.

Fig.6. Flow values in $[dm^3/s]$ through water net with diameter 200 mm and coarseness factor $k=3$ before and after renovation with cement method.

W wyniku renowacji może wystąpić znaczny wzrost wielkości przepływu w wodociągu określony na podstawie obliczeń i wynoszący od 17,7% do 53,6% w zależności od stanu zużycia macierzystego przewodu oraz grubości naniesionej powłoki cementowej. Największa poprawa warunków hydraulicznych, zgodnie z oczekiwaniami, nastąpiła po renowacji wodociągu o założonej chropowatości $k=11$ mm warstwą cementu o najmniejszej grubości (SDR150). Renowacja przewodu o pierwotnym współczynniku $k=3$ mm może spowodować zwiększenie przepływu od 17,7% (SDR 60) do 23,7% (SDR150). Dla założonej chropowatości $k=6$ mm po renowacji możliwy przepływ wzrósł prawie od 24% do 30,7% w zależno-

ści od grubości wykładziny. Różnica pomiędzy skrajnymi typoszeregami wyniosła 6,7% przy założeniu dwukrotnie większej grubości powłoki o niższym SDR 60. Podobne efekty może przynieść renowacja przewodu o chropowatości $k=9$ mm. Przepływ może wzrosnąć od 43,6% dla najcieńszej warstwy do 49,9% dla najgrubszej naniesionej warstwy cementu. Naniesienie powłoki na oczyszczoną ściankę rury, której pierwotny współczynnik $k=11$ mm może spowodować wzrost przepływu od 45,9% (SDR 60) do 53,6% (SDR150). Wyniki obliczeń jednoznacznie wskazują dużo większy wpływ współczynnika chropowatości niż grubości wykładziny na wielkość przepływu. W obrębie poszczególnych współczynników k różnice spowodowane grubością powłoki wyniosły od 6% do 7% pomimo wykonania obliczeń z założeniem dwukrotnie większej grubości powłoki cementowej o niższym SDR.

Brak istotnych różnic w poprawie pomiędzy skrajnymi typoszeregami naniesionych warstw umożliwia wybór grubości powłoki biorąc pod uwagę jedynie stan macierzystego przewodu (ilości głębokich ubytków w ścianie przewodu powodujących pocienienia ścianki). Rozwój chemii budowlanej i opracowanie materiałów powodujących wzrost odporności zapraw cementowych na ścieranie ($\sigma_s=64 \div 54$ MPa [2]) umożliwia stosowanie warstw niewielkiej grubości bez obawy przed jej szybkim uszkodzeniem. Tworzenie się w strefie kontaktowej pomiędzy wykładziną a metaliczną powierzchnią wewnętrzną rury środowiska silnie alkalicznego $pH \approx 12$ [2] zabezpieczającego przed korozją daje tej technologii istotną przewagę w renowacji rur stalowych i żeliwnych. Należy jednak pamiętać o przeprowadzeniu badań odczynu wody transportowanej świeżo wycementowanym przewodem. W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnej pH konieczne jest (okresowe w razie potrzeby) podawanie do wody dwutlenku węgla lub wodorowęglanu sodu. Taka sytuacja może wystąpić na początku eksploatacji po karbonizacji zaprawy następuje znaczna poprawa jakości wody zwłaszcza w porównaniu z przewodem bez wykładziny. Polepszenie właściwości organoleptycznych oraz składu wody wpływa na poprawę zadowolenia i zdrowia jej odbiorców.

Biorąc pod uwagę, że większość przewodów wodociągowych wykonana jest ze stali i żeliwa (nawet do 60% w regionie Śląska) oraz fakt, że do roku 1990 produkowane były one bez wykładziny nie dziwi duże zainteresowanie renowacją cementem. Technologia tą w latach 1995-2000 odnowiono 37% odcinków poddanych renowacji bezwykopowo.

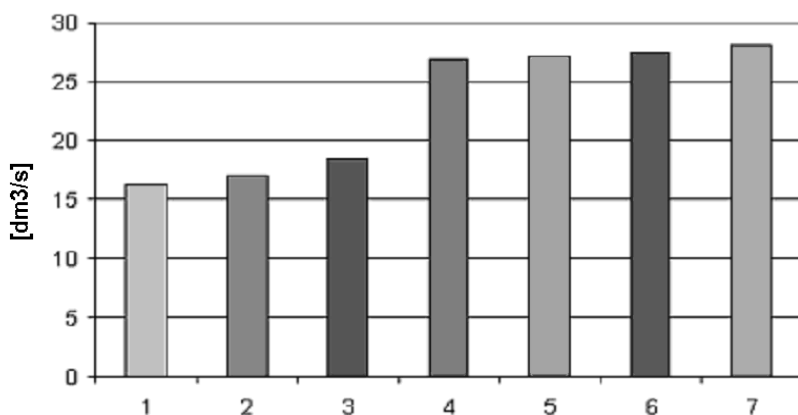
5. Ogólne uwagi do metod renowacji

Największy wpływ na trwałość renowacji niezależnie od technologii ma prawidłowe i dokładne jej wykonanie. Najprawdopodobniej jednak nie w trakcie próby szczelności. Uszkodzenia ujawniają się po kilku miesiącach lub latach. Trudno jest również dokładne je zlokalizowanie, ponieważ woda może płynąć setki metrów w przewodzie macierzystym.

Biorąc pod uwagę czas i uciążliwość renowacji wykładziną cementową oceniana jest jako nienajlepsza. Po zakończeniu procesu natryskiwania przewiduje się minimum dwunastogodzinny okres wiązania nałożonej warstwy [2] oraz wykonanie dezynfekcji odnowionego odcinka rurociągu. Atest Higieniczny PZH narzuca, by po wysezonowaniu warstwy cementowej odnawiany odcinek przepłukać i napęlić na 24 godziny zimną wodą po tym czasie odprowadzić ją do kanalizacji. W wyniku stosowania metody wykładziny cementowej ze względu na alkaliczność zaprawy cementowej może wzrastać wartość pH wody przepływającej przez wodociąg. Z doświadczeń angielskiej firmy wodociągowej North West Water Ltd. wynika, że zjawisko to może utrzymywać się przez okres nawet pierw-

szych sześciu miesięcy eksploatacji odnowionego rurociągu [4]. Tak długi czas karbonizacji zdarza się rzadko a wydłużone podwyższenie pH nie przekroczenia wartości dopuszczalnej. Problemy te nie występują w przypadku stosowania wykładzin wykonanych z tworzyw sztucznych. Długotrwałym, kosztownym oraz uciążliwym może być wykorzystywanie, do utwardzania rękawów oraz rewersji wykładziny, pary wodnej lub wody o wysokiej temperaturze (85°C). Temperaturę należy utrzymywać przez czas nawet kilku godzin. Woda krąży w obiegu zamkniętym umożliwiającym jej podgrzewanie. Wysoka temperatura wymusza stosowanie dodatkowych norm bezpieczeństwa. Powłoki luźno pasowane nie są utwardzane termicznie ani za pomocą podwyższonego ciśnienia. Co nie znaczy, że nie posiadają cech wydłużających ich instalację.

Niezależnie od stosowanej metody najważniejszymi efektami renowacji jest poprawa jakości wody osiągnięta przez oddzielenie jej od skorodowanej ścianki wewnętrznej rury macierzystej. Ważnym jest również zmniejszenie strat wody spowodowanych wyciekami awaryjnymi.



Rys. 7. Wielkości przepływu w $[\text{dm}^3/\text{s}]$ przez wodociągowy o średnicy 200 mm przed i po renowacji metodą cementowania.

Fig.7. Flow values in $[\text{dm}^3/\text{s}]$ through water net with diameter 200 mm before and after renovation with cement method

1 – rura stalowa lub żeliwna przed renowacją, 2 – rura betonowa lub żelbetowa przed renowacją, 3 – rura azbestocementowa przed renowacją, 4 – rura po renowacji metodą cementowania o SDR 66, 5 – rura po renowacji metodą cementowania o SDR 80, 6 – rura po renowacji metodą cementowania o SDR 100, 7 – rura po renowacji metodą cementowania o SDR 150.

6. Wnioski

1. Wybór optymalnej metody renowacji wodociągu musi być przeprowadzany indywidualnie dla każdego przypadku w oparciu o pełne informacje na temat pierwotnego stanu przewodu, oczekiwanych rezultatów odnowy a w niektórych przypadkach również terenu, na którym się znajduje.
2. Wyniki przeprowadzonych obliczeń jednoznacznie wskazują dużo większy wpływ współczynnika chropowatości niż grubości wykładziny na wielkość przepływu. Najwidoczniej przedstawia te zależności renowacja zaprawą cementową ze względu na duże zróżnicowanie grubości naniesionych warstw zaprawy (SDR od 66 do 150). W obrębie poszczególnych współczynników k różnice spowodowane grubością powłoki wyniosły od 6% do 7,7% pomimo wykonania obliczeń z założeniem dwukrotnie większej grubości powłoki cementowej o niższym SDR.
3. W wyniku renowacji metodami cementacji, może wystąpić znaczny wzrost wielkości przepływu w rurociągu określony na podstawie obliczeń wynoszący do 53,6% w zależności od stanu zużycia macierzystego przewodu oraz grubości zastosowanej powłoki renowacyjnej. Największa poprawa warunków hydraulicznych nastąpiła po renowacji wodociągu o założonej chropowatości $k=11\text{mm}$ wykładziną o najniższym współczynniku chropowatości i najmniejszej grubości.
4. Niezależnie od stosowanej metody najważniejszym efektem renowacji wodociągu jest poprawa jakości wody osiągnięta przez oddzielenie jej od skorodowanej ścianki wewnętrznej rury macierzystej. Ważnym jest również zmniejszenie strat wody spowodowanych wyciekami awaryjnymi.

Bibliografia

- [1] Grabarczyk Cz. Przepływy cieczy w przewodach. Metody obliczeniowe. Envirotech Poznań 1997.
- [2] Kolonko A.: Doświadczenie z renowacji rurociągów stalowych i żeliwnych metodą cementacji. Gaz Woda i Technika Sanitarna. 7/2001.
- [3] PN-EN zalecenia dotyczące klasyfikacji i projektowania systemów przewodów rurowych z tworzyw sztucznych stosowanych do renowacji.
- [4] Rumelhart, D.E., Widrow, B., and Lehr, M.A. The basic ideas in neural networks. Communications of the ACM, 1996, 37 (3) 87-92.
- [5] Piechurski F, Ola W: Zmiana warunków hydraulicznych przepływu po renowacji sieci wodociągowej. Materiały VII Konferencji Naukowo- Technicznej Nowe technologie w sieciach i instancjach wodociągach kanalizacyjnych. Szczyrk 2008 s.123-138