

**Marian KULBIK**

Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska  
Politechnika Gdańska  
Gdańsk

## **OCENA SKUTECZNOŚCI CZYSZCZENIA SIECI WODOCIĄGOWEJ METODĄ HYDROPNEUMATYCZNĄ**

### **EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS FOR CLEANING OF WATER DISTRIBUTION SYSTEM WITH THE HYDROPNEUMATIC FLUSHING METHOD**

*In this paper the questionable criterion for an evaluation of the effectiveness of water distribution system cleaning is analyzed. The analysis is founded on the base of flushing performed on the water distribution system of the length 9,5 km and of nominal diameters 80÷160 mm. The empirical basis of considerations was the set of values of the conventional roughness factor  $k_{10}$ , obtained on the base of author's measurements carried out after cleaning of the distribution water system with the hydro-pneumatic flushing method. The obtained results have shown that measurement disturbance and local conditions of measurements have the essential effect on the variation of the determined  $k_{10}$  values. This statement enables the confirmation that in the case of operative water distribution systems, the unitary specific resistance  $C$ , is index the practical factor to evaluate the effectiveness of cleaning. However, the condition for dissemination of this proposition is the development of standards for the unit specific resistance  $C$ .*

## **1. Wprowadzenie**

Czyszczenie przewodów wodociągowych z zalegających osadów jest podstawową czynnością eksploatacyjną, której znaczenie ciągle wzrasta ze względu na powszechność zjawiska przewymiarowania sieci w Polsce [5]. Skala problemu powoduje, że przedsiębiorstwa wodociągowe coraz częściej zlecają wykonanie tych prac specjalistycznym firmom usługowym. Procedura odbioru zleczanych prac wymaga oceny skuteczności wykonanego czyszczenia sieci wodociągowej. Brak zaleceń w tym zakresie powoduje dowolność postępowania przedsiębiorstw, od niedopuszczalnej rezygnacji z jakiegokolwiek oceny wykonanych prac podczas ich odbioru, do stosowania różnych dyskusyjnych kryteriów. Z tego powodu przedstawiono możliwości i uwarunkowania znanych sposobów identyfikacji sprawności hydraulicznej czynnych sieci wodociągowych. Podstawą

dyskusji było kryterium oceny zaproponowane przez eksploatatora (pkt 4.1), w postaci konkretnej wartości niezdefiniowanego wskaźnika chropowatości wewnętrznych powierzchni ścian rurociągów po ich oczyszczeniu, a także niemożliwej do zmierzenia grubości warstwy osadu podczas sprawdzenia stanu rurociągów po płukaniu za pomocą kamery. Materiał empiryczny poddany analizie stanowiły pomiary terenowe wykonane przez autora po czyszczeniu sieci wodociągowej metodą hydropneumatyczną. Ich celem była identyfikacja stanu czyszczonych rurociągów na podstawie wartości umownego zastępczego współczynnika chropowatości  $k_{t0}$ .

## 2. Metoda hydropneumatyczna i jej ograniczenia

Czyszczenie hydropneumatyczne polega na wspomaganiu tradycyjnego płukania hydraulicznego wodą przez wprowadzanie do rurociągu sprężonego powietrza. Objętość tłoczonego powietrza, jego ciśnienie i częstość podawania są zmiennymi parametrami zależnymi od średnicy i długości czyszczonego rurociągu, a także warunków hydraulicznych (ciśnienia i natężenia przepływu). Z doświadczenia wiadomo, że objętość powietrza w stosunku do wody zazwyczaj mieści się w przedziale od 1 do 3. Powietrze wprowadzane jest przez hydrant na początku czyszczonego odcinka rurociągu, a odpływ popłuczyn odbywa się przez kolejno otwierane hydranty na jego długości.

Siłą sprawczą procesu wyplukiwania osadów miękkich i półtwardych jest pulsacyjne przemieszczanie się mieszaniny wodno-powietrznej przez płukany rurociąg, a bezpośrednią przyczyną pozostawania w przewodach uruchomionych cząstek w stanie unoszenia jest zjawisko turbulencji, powstające na granicy powierzchni osadu i przepływającej wody (warstwa przyścienna). Z tego powodu po właściwym czyszczeniu zaleca się przepłukać rurociąg wodą, aby usunąć oderwane cząstki osadu oraz wyeliminować ewentualne korki powietrza.

W efekcie czyszczenia rurociągów żeliwnych i stalowych metodą hydropneumatyczną jest niemożliwe całkowite usunięcie osadów twardych, mających postać gruzelkowatych narośli zbudowanych z nagromadzonych miejscowo produktów korozji. Zazwyczaj naprężeniom ścinającym, powstałym wskutek gwałtownej zmiany prędkości w rurociągu (turbulencji), przeciwdziałają siły kohezji (spoistości) na powierzchni warstw osadu [5].

Obecność osadów twardych w rurociągach przewymiarowanych jest często tolerowana, jeśli ich stan sanitarno-hydrauliczny nie powoduje wtórnego zanieczyszczenia wody oraz nie ogranicza zdolności eksploatacyjnej sieci wodociągowej. Niekiedy zdarza się powtórne czyszczenie rurociągów nie spełniających oczekiwań eksploatatora, lecz bardziej skuteczną metodą hydrodynamiczną w celu całkowitego usunięcia osadów twardych. Jeśli inkrustowanego rurociągu ochrą żelazistą (wodorotlenkiem żelazowym) - po całkowitym oczyszczeniu - nie zabezpieczono na przykład ochronną warstwą cementową, wówczas nastąpi intensyfikacja procesu korozji wskutek ponownego rozwoju zjawisk elektrochemicznych. Ponadto początkowa faza procesu odtwarzania się wykwitów w postaci miękkich i porowatych osadów wodorotlenku żelazowego zazwyczaj wiąże się ze szkodliwym zjawiskiem wtórnego zanieczyszczenia wody, szczególnie w warunkach zmiennej prędkości w sieci wodociągowej. Z tego powodu ważne jest ustalenie właściwych standardów oceny stanu hydraulicznego rurociągów po czyszczeniu wybraną metodą, które uwzględniałyby wymienione uwarunkowania.

### 3. Sposoby oceny skuteczności czyszczenia rurociągów

Stan hydrauliczny rurociągów po czyszczeniu można ocenić metodą bezpośrednią, na podstawie wycinki rurociągu, albo pośrednią - w oparciu o wyniki pomiarów terenowych. W praktyce obie metody są rzadko stosowane dla tych potrzeb ze względu na uciążliwość w ich przeprowadzeniu, a także znaczne koszty realizacji. W celu oceny sprawności hydraulicznej rurociągów po wieloletniej ich eksploatacji autor stosuje od kilkunastu lat metodę pośrednią, lecz dla potrzeb tarowania modelu przepływów [6].

W praktyce eksploatacyjnej powszechnie stosuje się najprostszą organoleptyczną ocenę popłuczyn w trakcie ich wypływu hydrantem, aby ustalić czas zakończenia płukania. W tym celu kilkakrotnie napełnia się wypływającą wodą szklane naczynie lub białe emaliowane wiadro. Jeśli brunatna woda w początkowej fazie płukania staje się przezroczysta bez widocznych cząstek zanieczyszczeń, wówczas kończy się płukanie danego rurociągu. Oczywiście jest to subiektywny sposób oceny jakości popłuczyn, który pozwala jedynie zauważyć zmianę ich barwy i mętności w trakcie płukania. Z tego względu ustanie wypłukiwania zanieczyszczeń przez wypływającą wodę na pewno nie świadczy o stanie czystości sieci wodociągowej. Zazwyczaj siły ścinające spowodowane turbulencją wody (tradycyjne płukanie), a nawet przemieszczaniem się mieszaniny wodno-powietrznej (metoda hydropneumatyczna) są niewystarczające do uruchomienia osadów półtwardych i twardych przytwierdzonych do ścian płukanego rurociągu.

Więcej informacji o jakości popłuczyn można uzyskać, jeśli dokonuje się ich oceny na podstawie wyników analizy laboratoryjnej pobranych próbek wody w trakcie trwania i po zakończeniu płukania. W tym wypadku należy jednak zauważyć, że skład i stężenie zanieczyszczeń w popłuczynach zależą głównie od rodzaju i ilości zgromadzonych osadów w sieci wodociągowej, a w mniejszym stopniu świadczą o skuteczności stosowanej metody czyszczenia. Uwarunkowania i ograniczenia tego sposobu oceny skuteczności płukania sieci metodą ukierunkowanego przepływu znajdują się w publikacjach autora [3, 4]. Z badań autora wynika, że koniecznym warunkiem do zapewnienia reprezentatywności zebranego materiału empirycznego jest ustalenie relacji pomiędzy jakością popłuczyn a krotnością wymiany wody w rurociągu. Szczególnie znajomość czasu jednokrotnej wymiany wody w płukanym rurociągu warunkuje optymalną częstość poboru próbek, co ma znaczący wpływ na uzyskane wyniki. Jeśli kolejne próbki popłuczyn pobiera się systematycznie w następujących po sobie cyklach wymiany wody w płukanym rurociągu, wówczas na ich podstawie można oszacować początkowy stan zanieczyszczenia rurociągu, a także postępującą redukcję wypłukiwania osadów w czasie trwania czyszczenia, a następnie sporządzić bilans masy usuniętych substancji mineralnych i organicznych. Na podstawie tych informacji można ocenić wielkość zasobów i tempo usuwania zgromadzonych zanieczyszczeń, jednak nadal jest nieznanym hydrauliczny stan rurociągu po płukaniu. W tym celu niezbędne są pomiary hydrauliczne, które umożliwią wyznaczenie charakterystyki sprawności płukanego rurociągu, tzn. ustalenie relacji pomiędzy stratami ciśnienia a natężeniem przepływu. Znajomość tej prawidłowości pozwala obliczyć wskaźnik oporności rurociągu (pkt 4.2).

## 4. Analiza kryterium oceny skuteczności czyszczenia sieci

### 4.1. Przykładowe wskaźniki oceny

W aktach prawnych (normach, ustawach) nie ma obowiązujących w Polsce jednolitych kryteriów i standardów oceniających poziom utrzymania sieci i urządzeń wodociągowych [1, 2]. Stwierdzenie to dotyczy także braku wskaźników oceny sprawności hydraulicznej sieci wodociągowej po jej czyszczeniu. W tej sytuacji należy podkreślić, że każda propozycja w tym względzie ma charakter nowatorski, lecz zawsze z przypisanym ryzykiem popełnienia błędu z powodu braku praktycznego doświadczenia.

Jako podstawę rozważań przyjęto pewną propozycję eksploatatora sieci wodociągowej, który uzależnił ocenę efektywności czyszczenia przewodów od zastosowanej metody: inwazyjnej lub nieinwazyjnej. Dla obu metod czyszczenia, kryterium te sformułowano następująco:

1. pozostałość warstwy osadu po czyszczeniu nie może być większa niż 2 mm – metoda inwazyjna czyszczenia,
2. wskaźnik chropowatości sieci wodociągowej po czyszczeniu nie może być większy niż 2 mm – metoda nieinwazyjna czyszczenia.

Oprócz powyższego zapisu eksploatator zastrzegł, że pomiar "wskaźnika chropowatości" należy wykonać „metodą hydrauliczną”. Niestety nie podał definicji obu użytych pojęć, co dodatkowo utrudniło jednoznaczną interpretację przyjętego kryterium.

### 4.2. Interpretacja fizyczna wskaźników chropowatości rur

Z powodu nieporozumień w praktyce inżynierskiej, a także powtarzających się w literaturze nieścisłości, najpierw konieczne jest wyjaśnienie wieloznaczności użytego przez eksploatatora pojęcia "wskaźnik chropowatości".

W celu doświadczalnego wyznaczenia współczynnika  $\lambda$  z formuły Darcy-Weisbacha [5] wykonuje się odpowiednie pomiary dla rurociągu o średnicy  $D$  z naturalną chropowatością techniczną, a następnie na ich podstawie z wzoru Colebrooka-White'a oblicza się tzw. zastępczą chropowatość piaskową  $k$ . Wartości liczbowe tego wskaźnika podaje norma [8], różnicując je zależnie od stanu powierzchni rur wykonanych z materiałów stosowanych do budowy sieci wodociągowej. Na przykład dla rur żeliwnych - zależnie od ich stanu powierzchni - określono w normie następujące wartości zastępczej chropowatości piaskowej  $k$ : nowa rura asfaltowana ( $k=0,1\pm 0,15$  mm), używana i zardzewiała ( $k=1\pm 1,5$  mm), złuszczone ( $k=2\pm 4$  mm). Dodatkowo należy podkreślić, że wartości współczynnika  $k$  podane w normie nie odnoszą się do sytuacji z osadami, które powodują zmniejszenie średnicy wewnętrznej rurociągu. W takim wypadku wskaźnik  $k$  traci sens fizyczny ze względu na przyjęte założenia badawcze.

W rurociągach z osadami wyznacza się umowną (sprowadzoną) zastępczą chropowatość ścian rurociągów  $k'$  odniesioną do wewnętrznej średnicy  $D_0$  rurociągu nowego. Jeśli wielkość  $k'$  określono po  $t$  latach eksploatacji rurociągu dla konkretnego przekroju na podstawie tzw. pomiarów punktowych, wówczas podaje się ją z indeksem dolnym  $t$ , jako  $k'_t$ . Wartości  $k'$  lub  $k'_t$  różnią się od współczynnika  $k$ , ponieważ zawierają dodatkowo efekt wpływu zmniejszenia powierzchni czynnego przekroju rury wskutek odłożonych osadów. Jeśli podstawą wyznaczenia średniej wartości współczynnika  $\lambda$  jest pomiar liniowy na całej długości badanego rurociągu, wówczas posługujemy się ozna-

zeniem  $k_{10}$  dla współczynnika chropowatości rurociągu po  $t$  latach eksploatacji także odniesionego do wewnętrznej średnicy  $D_0$  rurociągu nowego.

W obliczonej średniej wartości  $k_{10}$  dla konkretnego odcinka rurociągu uwzględnia się nie tylko zmniejszenie powierzchni czynnego przekroju ( $k'$ ), lecz także straty hydrauliczne spowodowane oporami miejscowymi. Z wymienionych powodów wartości zdefiniowanych wskaźników dla konkretnych rurociągów różnią się istotnie, zależnie od stosowanej metodyki pomiarów, a także lokalnych uwarunkowań i zakłóceń, mających wpływ na ich dokładność [5]. W literaturze można spotkać na ten temat jedynie ogólne stwierdzenia, że na przykład dla przewodów żeliwnych i stalowych różnica pomiędzy wartościami chropowatości piaskowej  $k$  a współczynnikiem  $k_{10}$  może wynosić od około 10 do 50 i więcej procent [9]. Trudności w jednoznacznym określeniu wartości liczbowych tej relacji są zrozumiałe, jeśli uwzględni się jej wieloczynnikowe uwarunkowania.

Na podstawie powyższych wyjaśnień terminologicznych można sformułować pytanie, czy eksploatacator posługując się pojęciem "wskaźnik chropowatości", proponuje stosować do oceny efektywności czyszczenia współczynniki:  $k$ ,  $k'$  czy  $k_{10}$ . W dalszych rozważaniach założono, że wartości wskaźników podane przez eksploatacatora (pkt 4.1) dotyczą umownego zastępczego współczynnika chropowatości  $k_{10}$ .

### 4.3. Analiza porównawcza wskaźników oceny skuteczności płukania

W celu wykazania odmiennych skutków hydraulicznych dla obu wskaźników zaproponowanych przez eksploatacatora (pkt 4.1) wykonano stosowne obliczenia, których wyniki zawiera tabela 1.

Tab. 1. Porównanie wpływu wzrostu chropowatości i redukcji średnicy rurociągu na jego oporność hydrauliczną

Tab. 1. Comparison of an effect of the increase of roughness and reduction of the pipeline diameter on hydraulic resistance

Wersje obliczeń	$\Delta H$ [m st.w.]	Q [m <sup>3</sup> /h]	v [m/s]	D [m]	L [m]	$\lambda$ [-]	k [mm]
Nowa rura żeliwna asfaltowana	13,7	17,2	1,00	0,078	1000	0,0209	0,10
I Rura o wewnętrznej średnicy D i k=2mm	35,0	17,2	1,00	0,078	1000	0,0536	2,00
II. Nowa rura o zreduk. D o 4 mm	18,0	17,2	1,11	0,074	1000	0,0211	0,10
III. Rura o zreduk. D o 4 mm i k=2 mm	46,6	17,2	1,11	0,074	1000	0,0547	2,00
IV. Nowa rura o zreduk. D o 13 mm	35,0	17,2	1,43	0,065	1000	0,0218	0,10
V. Rura o zreduk. D o 4 mm i k=0,94 mm	35,0	17,2	1,11	0,074	1000	0,0412	0,94

Analizę porównawczą przeprowadzono w pięciu wersjach obliczeń dla nowego rurociągu żeliwnego  $D=80$  mm o długości  $L=1000$  m i zastępczej chropowatości piaskowej

$k=0,1$  mm [7], w którym przepływ wody odbywa się z prędkością  $v=1$  m/s, powodując stratę ciśnienia  $\Delta H=13,7$  m sł. w.

Wersja I obliczeń pokazuje, że wzrost chropowatości rurociągu z 0,1 do 2 mm skutkuje zwiększeniem spadku ciśnienia o 257 %, z poziomu 13,7 do 35,0 m sł. w., przy niezmienniej średnicy wewnętrznej. W wersji II obliczeń dokonano redukcji średnicy o 4 mm, aby odwzorować hipotetyczny skutek odłożonej warstwy osadu o grubości 2 mm. Równocześnie zachowano niezmienną chropowatość przewodu nowego  $k=0,1$  mm, wówczas spadek ciśnienia ulega zwiększeniu tylko o 31,8 %, z poziomu 13,7 do 18,0 m sł. w.

Z porównania rezultatu obliczeń w wersji I i II wynika, że w wypadku wzrostu chropowatości od 0,1 do 2 mm żeliwnego rurociągu  $\phi 80$ , spadek hydrauliczny ulega zwiększeniu ponad 8-krotnie w stosunku do efektu spowodowanego redukcją średnicy o 4 mm wskutek odłożonych osadów.

W trzeciej wersji obliczeń pokazano efekt równoczesnego wzrostu chropowatości rury do 2 mm i redukcji jej średnicy o 4 mm. W tym wypadku uzyskano wzrost spadku ciśnienia o 341 %, czyli z poziomu 13,7 do 46,6 m sł. w. W wersji IV obliczeń wykazano ponadto, że należałoby zredukować średnicę nowej rury  $\phi 80$  aż o 13 mm (16,7%), aby uzyskać identyczny spadek ciśnienia jak dla tego samego przewodu, lecz o chropowatości 2 mm (wariant I). W wersji V, zachowując spadek hydrauliczny 35 m sł. w., jak w wersjach I i IV, wyznaczono wartość chropowatości  $k=0,94$  mm, przy założeniu redukcji średnicy o 4 mm.

Wyniki przykładowej analizy porównawczej wskazują, że efekt hydrauliczny wzrostu chropowatości ścian rurociągu  $\phi 80$  o 2 mm (wariant I) jest niewspółmiernie wysoki w stosunku do analogicznej redukcji jej średnicy wewnętrznej (wariant II). W ten sposób dowiedziono, że zaproponowane przez eksploatatora dwa kryteria oceny stanu rurociągów po ich czyszczeniu metodą hydropneumatyczną w postaci (pkt 4.1): wskaźnika chropowatości równego 2 mm lub analogicznej grubości warstwy osadu, nie są tożsame pod względem skutków hydraulicznych. Z obliczeń według wariantu V wynika ponadto, że dla rurociągu o średnicy  $\phi 80$  uzyska się identyczny efekt hydrauliczny (wariant I) pod warunkiem, że redukcji średnicy o 4 mm wskutek odłożonej warstwy osadu towarzyszyć będzie równocześnie wzrost chropowatości z 0,1 do 0,94 mm.

Z oczywistych względów wynika, że bezwzględne wartości obliczonego spadku hydraulicznego zależą od średnicy i długości rurociągu, natomiast ustalone prawidłowości zachowują ważność niezależnie od jego geometrii.

## 5. Wyniki oceny skuteczności czyszczenia sieci metodą hydropneumatyczną

### 5.1. Charakterystyka strukturalna i hydrauliczna obiektu badań

Przedmiotem badań były wybrane rurociągi żeliwne i z PVC o średnicy nominalnej 80/90, 100/110 i 150/160 mm o łącznej długości 9,46 km. Rury z żeliwa stanowiły trzy czwarte długości przewodów. Spośród rur żeliwnych 83% to przewody  $\phi 100$ , a pozostałe dwie dymensje kształtowały się odpowiednio: 11,8% -  $\phi 150$  oraz 5,2% -  $\phi 80$ . Z kolei asortyment rury PVC był następujący: o średnicy nominalnej 160 mm - 10,3%, 90 mm - 7,4% i 110 mm - 6,8%.

Najliczniejszą grupę wiekową (81,4%) stanowiły żeliwne rurociągi  $\phi 100$  z lat 1971-84, o przeciętnie 30-letnim okresie eksploatacji. Spostrzeżenie to jest ważne ze względu na odmienny przebieg procesu inkrustacji rurociągów żeliwnych aniżeli przewodów z PVC. Z tego powodu oczekiwać należało zróżnicowania ilościowego i jakościowego zgromadzonych osadów w rurociągach zależnie od rodzaju materiału. W rurach żeliwnych dominuje zazwyczaj osad półtwardy i twardy w formie gruzełkowej, który jest produktem korozji, podczas gdy w przewodach z tworzyw sztucznych jest on zazwyczaj pochodzenia biologicznego w postaci galaretowatej powłoki słabo związanej z podłożem. Z tego względu usunięcie osadu z rur PVC zazwyczaj nie stanowi problemu niezależnie od stosowanej metody ich płukania [4]. Natomiast likwidacja inkrustacji z przewodów żeliwnych jest zdecydowanie trudniejsza, zatem wymaga zastosowania adekwatnego sposobu czyszczenia, zależnego chociażby do wieku ich użytkowania.

## 5.2. Metodyka i uwarunkowania pomiarów terenowych

Opis metodyki pomiarów terenowych na sieciach przewymiarowanych, w tzw. warunkach przepływu pożarowego, podano w monografii [5]. Jeśli istniała możliwość, to przestrzegano zasady równoczesnych pomiarów na co najmniej dwóch sąsiednich odcinkach o tej samej charakterystyce technicznej, aby móc na bieżąco weryfikować wyniki. Taki sposób dublowania pomiarów pozwala zidentyfikować różne nieprawidłowości, w tym nadmierne opory miejscowe spowodowane przez częściowo przymknięte zasuwy, co niestety jest częstym zjawiskiem w każdej sieci wodociągowej.

W większości przypadków odcinki przewodów wybrane do badań stanowiły część rozdzielczej sieci pierścieniowej odciętej zasuwaniami. Aby zminimalizować ryzyko niekontrolowanego dopływu wody do badanego przewodu przez niesprawne zasuwy, sprawdzano ich szczelność zamknięcia przed rozpoczęciem pomiarów poprzez obniżenie ciśnienia do zera. W sytuacji, gdy przewidywano znaczne różnice ciśnienia przed i za zamkniętą zasuwą w warunkach wymuszenia przepływu, montowano kontrolny manometr w strefie wysokiego ciśnienia (poza rejonem pomiarów), który pozwoliłby zauważyć niekontrolowany dopływ wody do badanego przewodu.

## 5.3. Wyniki obliczeń współczynnika chropowatości $k_{10}$

Wyniki pomiarów strat hydraulicznych  $\Delta H$  i natężenia przepływu  $Q$  oraz obliczone na tej podstawie parametry hydrauliczne (prędkość  $v$ , współczynnik oporów liniowych  $\lambda$ ) dla rurociągu o średnicy wewnętrznej  $D$  i długości  $L$ , a także średnie wartości współczynnika chropowatości  $k_{10}$  dla badanych rurociągów zawiera tabela 2.

Ocena wiarygodności zebranego materiału empirycznego jest pozytywna, ponieważ uzyskane straty hydrauliczne i prędkość przepływu w większości badanych odcinków sieci odpowiada postawionym wymaganiom. Jako kryterium wiarygodności pomiarów uznaje się, że minimalny spadek ciśnienia powinien być pięć razy większy od błędu pomiaru, czyli w tym wypadku co najmniej 10 m sł.w. Równocześnie należy zapewnić minimalną prędkość przepływu większą od 0,8 m/s, aby mieć pewność, że ruch wody w badanym przewodzie odbywał się w V strefie ruchu burzliwego, tzn. gdy współczynnik  $\lambda$  nie zależy od liczby  $Re$  (a tym samym od  $Q$ ).

Na życzenie zamawiającego dokonano pomiarów na niektórych odcinkach rurociągów z PVC (tabela 2), chociaż ich długość była niewystarczająca do uzyskania wymaganej wielkości spadku ciśnienia. Z tego powodu wyniki te mogą być dodatkowo obarczone 20% błędem wynikającym z odczytu wartości ciśnienia z dokładnością  $\pm 0,5$  m sł.w.

Tab. 2. Parametry hydrauliczne wybranych rurociągów obliczone na podstawie pomiarów

Tab. 2. Hydraulic parameters of some chosen pipelines calculated on the base of measurements

Lokalizacja (ulica)	Materiał	Rok budowy	$\Delta H$ [m]	Q [m <sup>3</sup> /h]	v [m/s]	D [m]	L [m]	$\lambda$ [-]	$k_{10}$ [mm]
Warszawska	Żeliwo	1972	25,5	47,9	0,75	0,150	1624	0,0814	9,8
Jaśminowa	Żeliwo	1972	11,3	67,1	1,06	0,150	500	0,0598	5,0
Nowodworska	Żeliwo	1971	28,0	27,7	1,02	0,098	747	0,0692	4,6
Różana	Żeliwo	1971	21,8	41,3	1,69	0,098	260	0,0695	4,6
Wiejska – odgałęzienie 2	Żeliwo	1971	23,1	27,2	1,00	0,098	644	0,0687	4,5
Szańcowa i Tartaczna	Żeliwo	1928	34,9	20,1	1,20	0,077	488	0,0752	4,3
Grochowska	Żeliwo	1984	19,1	31,7	1,16	0,098	450	0,0598	3,3
Kaliska	PVC	1986	5,8	18,2	0,97	0,081	183	0,0533	2,1
Piechoty	Żeliwo	1978	7,4	24,6	0,91	0,098	395	0,0438	1,5
Wiejska – odgałęzienie 1	Żeliwo	1975	12,8	39,1	1,44	0,098	285	0,0416	1,3
Wiejska – odgałęzienie 4	PVC	brak	4,0	26,4	1,41	0,081	80	0,0403	1,0
Wiejska – odgałęzienie 3	PVC	brak	13,2	40,8	2,18	0,081	149	0,0298	0,4
Freta	PVC	1996	3,8	22,4	0,80	0,099	431	0,0267	0,3
Tarnowska	PVC	1973	16,8	44,2	2,36	0,081	179	0,0269	0,3
Wiejska – odgałęzienie 5	PVC	brak	4,0	28,8	1,54	0,081	115	0,0235	0,2
Agrykola	PVC	1984	8,7	83,4	1,41	0,145	573	0,0216	0,2

Wartości współczynnika  $k_{10}$  ze zrozumiałych względów zależą od rodzaju materiału (tabela 2). Dla rurociągów z PVC uzyskano średnią wartość współczynnika  $k_{10}=0,49$  mm, przy przedziale zmienności od 0,2 do 2,1 mm. Natomiast dla rurociągów żeliwnych uśredniona wartość współczynnika wyniosła  $k_{10}=5,65$  mm w przedziale zmienności od 1,3 do 9,8 mm. Na podstawie uzyskanych wyników należy odnotować zróżnicowany stan hydrauliczny sieci wodociągowej po jej płukaniu metodą hydropneumatyczną. Istotnego zróżnicowania wartości współczynnika  $k_{10}$  nie można tłumaczyć specyfiką lokalnych warunków płukania sieci metodą hydropneumatyczną, które starano się wyeliminować lub ograniczyć (pkt 5.4). Bardziej prawdopodobnym powodem występowania najwyższych wartości współczynnika  $k_{10}$  jest ograniczona skuteczność metody hydropneumatycznej (pkt 2) w wypadku usuwania osadów z rurociągów żeliwnych po



kilkudziesięciu latach ich eksploatacji. Dowodem na potwierdzenie tej tezy są wykonane odkrywki na kilkunastu rurociągach, na których w jednej trzeciej stwierdzono występowanie osadów twardych o grubości do 4 mm.

#### 5.4. Wpływ uwarunkowań pomiarowych na zmienność współczynnika chropowatości $k_{t0}$

Realizacji pomiarów na czynnej sieci wodociągowej zawsze towarzyszą nieuniknione zakłócenia, które mogą mieć wpływ na wyniki. W obliczeniach średnich wartości współczynnika chropowatości  $k_{t0}$  (tabela 2) starano się wyeliminować wpływ następujących parametrów hydraulicznych (zakłóceń pomiarów):

- chwilowej zmienności ciśnienia w sieci,
- poboru wody przez odbiorców, pomimo obniżonego ciśnienia w sieci wskutek upustu wody hydrantami,
- bezpośredniego pomiaru ciśnienia na czynnym hydrancie z powodu występujących ograniczeń (braku odpowiedniej liczby hydrantów na odcinku pomiarowym).

Z tego powodu wybierano ze zbioru danych pomiarowych w każdej realizacji najkorzystniejsze wyniki, tzn. odnotowany minimalny spadek ciśnienia przy danym natężeniu przepływu, który w najmniejszym stopniu był "zniekształcony" przez wymienione zakłócenia. Wielkość poboru wody przez mieszkańców na danym odcinku pomiarowym uwzględniono w oparciu o rzeczywiste histogramy rozbioru wody zawarte w komputerowym modelu przepływów. Z kolei lokalną stratę ciśnienia na czynnym hydrancie przyjęto od 1 do 3 m sł. w., zależnie od prędkości wypływu wody. Po wprowadzonej korekcie wyników pomiarów uzyskane wartości współczynnika  $k_{t0}$  (tabela 2) są najmniejsze z możliwych.

Oprócz zakłóceń wymienionych powyżej na wyniki pomiarów mogą mieć wpływ następujące nieprawidłowości:

- niezgodność rzeczywistej średnicy rurociągu z podaną w dokumentacji archiwalnej,
- niedostateczna wysokość strat ciśnienia na odcinku pomiarowym, która nie spełnia kryterium wiarygodności pomiarów (niewystarczająca długość odcinka pomiarowego),
- lokalne dławienie przepływu,
- dodatkowy dopływ wody wskutek nieszczelności zasuwy lub jej niezamknięcia z powodu niezgodności dokumentacji ze stanem faktycznym,
- zwiększone natężenie przepływu spowodowane przeciekiem wskutek awarii,
- różnice czasowe w odczytach urządzeń pomiarowych.

Oszacowanie wpływu wymienionych nieprawidłowości na wyniki obliczeń jest praktycznie niemożliwe, stąd zaleca się w takich wypadkach powtórzenie pomiarów po ustaleniu i wyeliminowaniu przyczyn.

W przebadanej sieci wodociągowej rurociągi o znacznie podwyższonej chropowatości ( $k_{t0} > 15$  mm) stanowiły aż 24,9% ich długości, co świadczy niekorzystnie o stanie technicznym sieci i uzbrojenia. Rurociągi te nie zostały uwzględnione w zestawieniu wyników (tabela 2), ponieważ przyczyny ich odmiennego stanu hydraulicznego wymagają dokładnego wyjaśnienia.

Obliczenia sprawdzające wskazywały w większości na wątpliwy wymiar średnicy rurociągów określonej na podstawie dokumentacji jako najbardziej prawdopodobną przyczynę podwyższonej chropowatości. W tych sytuacjach konieczna jest odkrywka

rurociągu i inwentaryzacja sieci. Równocześnie nie można wykluczyć wpływu innych przyczyn, jak: lokalnego dławienia przepływu, a nawet zalegania osadu twardego, ponieważ w obu przypadkach osiągnię się identyczny skutek w postaci wyraźnie zwiększonej oporności.

## 6. Podsumowanie

Wszechstronna analiza wyników pomiarów terenowych wraz z oceną efektywności czyszczenia rurociągów na podstawie wartości współczynnika chropowatości  $k_{t0}$ , upoważnia do ogólnej konkluzji. Ocena stanu wewnętrznej powierzchni ścian rurociągów po ich czyszczeniu metodą hydropneumatyczną określona na podstawie pomiarów hydraulicznych jest najbardziej obiektywnym i wiarygodnym sposobem ze względu na czułość i dokładność określanych parametrów hydraulicznych. W celu uwiarygodnienia pomiarów konieczne jest spełnienie szeregu wymagań metodycznych, co do minimalnego spadku hydraulicznego, wydajności hydrantów zapewniających prędkość powyżej 0,8 m/s, a także odpowiedniej długości badanego rurociągu, która umożliwi optymalne rozmieszczenie co najmniej trzech nastaw hydrantowych. Jeśli wymagania te nie są spełnione lub/i występują zakłócenia pomiarów, wówczas wzrasta ryzyko popełnienia błędu, a oszacowanie wartości współczynnika chropowatości  $k_{t0}$  jest możliwe tylko w pewnym przedziale zmienności. Każdorazowo granice przedziału oszacowania współczynnika  $k_{t0}$  wyznacza się analitycznie na podstawie rzeczywistej zmienności parametrów hydraulicznych (pkt 5.4). Zastosowanie „pomiaru liniowego” na odcinku rurociągu eliminuje ponadto wpływ na ocenę nieuniknionej przypadkowości, jaka występuje zawsze podczas wyboru miejsca wykonania odkrywki albo „pomiaru punktowego” chropowatości w wybranym przekroju. Mankamentem „metody liniowej” jest jednak utrudniona interpretacja wyników pomiarów ze względu na identyfikację sprawności (oporności) hydraulicznej przewodu dla jego znanej, lecz często niepewnej długości i średnicy. Równocześnie nie jest możliwe wyróżnienie (oddzielenie) wpływu na wartość współczynnika  $k_{t0}$  zarówno rzeczywistej chropowatości powierzchni wewnętrznej ścian przewodu, jak również osadów pozostających po czyszczeniu, a także oporów miejscowych występujących w każdej sieci wodociągowej. Z tego powodu, w ocenie efektywności czyszczenia rurociągów, autor zaleca posługiwanie się opornością jednostkową (właściwą) C, po przekształceniu wzoru Darcy-Weisbacha do postaci:  $\Delta H = C \cdot L \cdot Q^2$ . W ten sposób można uniknąć problemu wyodrębnienia udziału chropowatości rurociągu w „całkowitej” oporności badanego przewodu. Obecnie nieznanne są standardy określające wartość oporności jednostkowej C zależnie od stanu zanieczyszczenia rurociągu po jego oczyszczeniu.

W przyszłości niezbędne jest określenie dopuszczalnej wartości współczynnika C dla wybranych rurociągów o znanej średnicy i akceptowalnym stanie wewnętrznej powierzchni ścian. W tym celu trzeba by wykonać pomiar hydrauliczny dla rurociągów o uprzednio rozpoznanym stanie wewnętrznej powierzchni ścian za pomocą kamery lub/i oględzin podczas odkrywki. Wartości oporności jednostkowej C dla tych rurociągów można by, wówczas traktować jako reprezentatywny standard efektywności czyszczenia sieci wodociągowej. Ustalenia te byłyby pomocne w praktyce eksploatacyjnej, aby ograniczyć konfliktogenne sytuacje, wynikające chociażby ze stawiania przez eksploatatora sieci wodociągowej nierealnych wymagań zewnętrznemu wykonawcy prac, związanych z jej oczyszczaniem.

## Bibliografia

- [1] Bylka H. Kryteria i standardy jakości i poziomu usług wodociągowo-kanalizacyjnych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2002, 1, 23-27
- [2] Dymaczewski Z., Sozański M. M. Wodociągi i kanalizacja w Polsce. Tradycja i współczesność. Poznań-Bydgoszcz: Polska Fundacja Ochrony Zasobów Wodnych, 2002, 1163
- [3] Kulbik M. Ocena skuteczności płukania przewymiarowanych sieci wodociągowych metodą ukierunkowanego przepływu na podstawie jakości popłuczyn. *Ochrona Środowiska*, 2008, 1, 31-38
- [4] Kulbik M. Skuteczność płukania przewymiarowanych sieci wodociągowych metodą ukierunkowanego przepływu. *INSTAL*, 2006, 10 (265), 52-57.
- [5] Kulbik M. Komputerowa symulacja i badania terenowe miejskich systemów wodociągowych. *Monografie nr 49*. Gdańsk: Politechnika Gdańska, 2004, 211
- [6] Kulbik M. Tarowanie parametrów modelu przepływów w przewymiarowanych sieciach wodociągowych. *III Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna nt. "Zaopatrzenie w wodę miast i wsi". Poznań 1-3 czerwiec 1998*. Tom 1, 351-357.
- [7] Mielcarzewicz E.W. Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę. Warszawa: Arkady, 2000
- [8] Polska Norma: PN-76/M-34034. Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia
- [9] Siwoń Z. Wybrane problemy modelowania przepływów w układach dystrybucji wody. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 1997, 6, 218-222

