

Marian Kulbik

## Analiza parametrów płukania sieci wodociągowej metodą ukierunkowanego przepływu wody

Usuwanie osadów z sieci wodociągowej podczas jej płukania metodą ukierunkowanego przepływu [1,2] jest procesem hydrodynamicznym, współzależnym od wielu czynników, uwarunkowań i zakłóceń realizacyjnych, zmiennych w czasie i przestrzeni. Zasadnicze znaczenie w skuteczności płukania i kształtowaniu jakości popłuczyn mają:

- ilość, rodzaj, wiek osadów i ich podatność na erozję oraz zasoby i skład jakościowy biofilmu,
- parametry płukania sieci (czas jednokrotnej wymiany wody zależny od prędkości przepływu i zasięgu obszaru oddziaływania wymuszenia przepływu, a także krotkość wymiany wody oraz częstość płukania).

W rozpatrywaniu udziału poszczególnych czynników w procesie wypłukiwania osadów z sieci wodociągowej trzeba uwzględnić takie uwarunkowania, jak:

- charakterystyka strukturalno-materiałowo-wiekowa sieci rurociągów (materiał, średnica, rozpiętość przestrzena i wiekowa),

- funkcja rurociągu w sieci wodociągowej (magistrale, sieć rozdzielcza i rozgałęzieniowa), która zazwyczaj jest tożsama z odmiennymi warunkami hydraulicznymi podczas eksploatacji [3].

Niezależne rozpoznanie udziału poszczególnych czynników i ich uwarunkowań w tym procesie jest trudne, ze względu na występujące interakcje pomiędzy nimi, które wymagają wyjaśnienia. Interpretację wyników badań doświadczalnych dodatkowo komplikuje wpływ lokalnych zakłóceń realizacyjnych, takich jak:

- wielokrotny przepływ wody przez te same odcinki sieci pierścieniowej podczas kolejnych wariantów płukania,

- częściowe wypłukiwanie osadów z rurociągów dopływowych do rejonu płukania wskutek wzrostu prędkości przepływu powyżej wartości eksploatacyjnej, lecz mniejszej od optymalnej,

- rozcieńczanie popłuczyn przez niezidentyfikowane dopływy wody wskutek niedomknięcia zasuw,

- sedimentacja zanieczyszczeń z popłuczyn w rurociągach łączących obszar płukania z oddalonym zrzutem, a następnie ich uruchamianie po jego ponownym otwarciu.

W niniejszym artykule podjęto próbę syntezy wyników wieloletnich badań doświadczalnych w trakcie planowego płukania sieci wodociągowej metodą ukierunkowanego przepływu [4,5]. W analizie zjawiska wypłukiwania

osadów z sieci wodociągowej zastosowano podejście przyczynowo-skutkowe, bez wyjaśnienia kinetyki tego procesu. Uproszczenie to było konieczne ze względu na skomplikowany charakter mechanizmu uwalniania osadów z rurociągów. Zakres badań materiału doświadczalnego ograniczono do oszacowania udziału w intensywności wypłukiwania osadów dwóch współdecydujących czynników, jakimi są parametry płukania (czas, prędkość przepływu, krotkość wymiany wody, zasięg obszarowy oddziaływania wymuszenia przepływu) oraz ilość osadów i biofilmu na powierzchni rur żeliwnych, polimerowych i azbestowo-cementowych.

Poznanie, a następnie wdrożenie ustalonych prawidłowości i ograniczeń procesu wypłukiwania osadów metodą ukierunkowanego przepływu wody przyczyniło się do poprawy jej skuteczności [5]. Metodę tę można polecić jako sprawdzony doraźny sposób profilaktycznej ingerencji w nieunikniony proces rozwoju życia biologicznego i odkładania się osadów na wewnętrznej powierzchni ścian rurociągów. Systematyczne płukanie rurociągów, jako podstawowa czynność eksploatacyjna, zapewnia skuteczną kontrolę stanu sanitarnego przewymiarowanych sieci wodociągowych.

### Materiał i metoda badań doświadczalnych

Podstawę badań doświadczalnych stanowiły pomiary hydrauliczne (natężenie przepływu, ciśnienie) oraz ponad 600 próbek popłuczyn pobranych w trakcie pierwszego eksperymentalnego płukania sieci wodociągowej w Biłgoraju (województwo lubelskie) w 2005 r. [6], a następnie dwukrotnego kompleksowego płukania sieci w tym mieście w 2006 r. i 2008 r. [5,7]. Wpływ wielu czynników na proces wypłukiwania osadów wymusił potrzebę identyfikacji parametrów płukania w przypadku każdej próbki popłuczyn w kolejnych wariantach jego realizacji. W tym celu odwzorowano realizację każdego wariantu płukania sieci za pomocą komputerowego modelu symulacyjnego [7], tzn. ustalono rzeczywistą drogę i zasięg oddziaływania wymuszenia przepływu wskutek upustu wody wybranym zrzutem, a także określono prędkość i czas przepływu popłuczyn w płukanej sieci. Na tej podstawie wyznaczono zależności między zmiennymi, a także uwarunkowania i zakłócenia kształtujące jakość popłuczyn podczas danego wariantu płukania sieci. Do najważniejszych ustaleń można zaliczyć empiryczną weryfikację wpływu zgromadzonych osadów oraz parametrów płukania, w tym krotkości wymiany wody, na jakość popłuczyn.

Systematyczna kontrola jakości popłuczyn pozwala ocenić ilościowo zasoby osadów (masę) i zdolność warstwy osadów do erozji i wypłukiwania (ładunek), a także ustalić rzeczywisty czas trwania procesu ich wypłukiwania na podstawie profili zawartości suchej pozostałości, żelaza ogólnego, mętności lub zawiesin ogólnych. Jako kryterium oceny intensywności wypłukiwania osadów przyjęto ich zawartość (chwilową i uśrednioną), ładunek i masę. Uśrednioną zawartość suchej pozostałości i żelaza ogólnego stanowił stosunek całkowitej masy wypłukanych osadów do objętości wody zużytej podczas płukania według danego wariantu. Ładunek wypłukanych osadów obliczono jako iloczyn ich chwilowej zawartości w próbkach pobranych z odpływu popłuczyn i pomierzonego natężenia przepływu. Z kolei masę wypłukanych osadów stanowił iloczyn obliczonego ładunku i rzeczywistego czasu płukania.

### Skuteczność wypłukiwania osadów

Jako odpowiedni przykład do oceny wpływu dynamiki zmian zasobów osadów, wskutek ich akumulacji w sieci, na intensywność ich wypłukiwania uznano pięciokrotne płukanie rurociągu azbestowo-cementowego o średnicy 200 mm w okresie 3 lat i 4 miesięcy jego eksploatacji. Zasięg oddziaływania wymuszenia przepływu wody obejmował przyległą sieć rozdzielczą o łącznej długości 6,57 km. Średnia prędkość przepływu wody w rurociągu o średnicy 200 mm i długości około 1 km wahała się od 1,35 m/s do 1,68 m/s, zależnie od przyjętego wariantu płukania (5, 5A i 5B), różniącego się ukierunkowaniem przepływu w przyległej sieci rozdzielczej. Czas jednorazowej wymiany wody w rurociągu wyniósł około 24 min. Kształt krzywej czasowego wypłukiwania osadów (profilu) był podobny w każdej z pięciu realizacji płukania sieci. Maksimum zawartości suchej pozostałości i żelaza ogólnego w popłuczynach odnotowano po niespełna dwukrotnej wymianie wody. Dalszy przebieg krzywej po osiągnięciu maksimum miał wyraźnie malejącą tendencję wraz z upływem czasu płukania. Szczegółowy opis badań, prezentację graficzną i dyskusję wyników zawiera praca [8], a poniżej przedstawiono jedynie najważniejsze ustalenia.

Największe bezwzględne wartości wymienionych wskaźników uzyskano podczas pierwszego płukania w lutym 2005 r. – zawartość żelaza ogólnego w popłuczynach wyniosła 5,5 gFe/m<sup>3</sup>, suchej pozostałości 618 g/m<sup>3</sup>, a mętność 17 NTU. Masa netto zanieczyszczeń w popłuczynach była także największa, ponieważ usunięto wówczas

125,3 kg zanieczyszczeń (42,9% ogółu), w tym 1,5 kg związków żelaza (29,5% ogółu) (tab. 1). Po niespełna miesięcznej eksploatacji rurociągu powtórne płukanie w marcu 2005 r. odznaczało się wyraźną gorszą skutecznością, pomimo zachowania zbliżonych parametrów (prędkość, czas płukania, zużycie wody). W tej realizacji wypłukano 40,3 kg zanieczyszczeń, w tym 0,78 kg związków żelaza (tab. 1). Jeśli przyjąć łącznie powyższe dwie realizacje płukania według trzech wersji (5, 5A i 5B), różniących się ukierunkowaniem przepływu w przyległej sieci rozdzielczej [8], wówczas usunięto 56,6% ogółu zanieczyszczeń, w tym 44,9% związków żelaza. Wartości te obrazują początkowe zasoby osadów zgromadzonych w płukanej sieci wodociągowej podczas jej wieloletniej eksploatacji do 2005 r.

W pierwszej kompleksowej realizacji płukania sieci, po dalszych 15 miesiącach eksploatacji w czerwcu 2006 r., wskaźniki jakości popłuczyn miały zdecydowanie mniejsze wartości. Podczas pierwszej wymiany wody maksymalna zawartość suchej pozostałości wyniosła 224 g/m<sup>3</sup>, żelaza ogólnego 2,3 gFe/m<sup>3</sup>, a mętność 10,9 NTU. Wartości tych wskaźników stanowiły odpowiednio 36%, 42%, i 64% wartości uzyskanych podczas pierwszego eksperymentalnego płukania sieci w 2005 r. Zdecydowanie najbardziej została zmniejszona sucha pozostałość, a najmniej mętność popłuczyn. W tym wypadku masa wypłukanych osadów (tab. 1) była o ponad połowę mniejsza niż w 2005 r., ponieważ wypłukano 75,3 kg zanieczyszczeń (25,8% ogółu), w tym 0,74 kg związków żelaza (14,6% ogółu).

Znacznie mniejsza masa osadów, przy niezmiennych parametrach płukania, świadczyła o mniejszych odtworzonych ich zasobach w stosunku do początkowego stanu w 2005 r. Malejącą tendencję dynamiki procesu odtwarzania biofilmu i osadów w rurociągu o średnicy 200 mm potwierdziły dwa kolejne płukania. Po 21 miesiącach eksploatacji rurociągu w marcu 2008 r. (wersja 5B) w ciągu 217 min wypłukano 26,2 kg zawiesin ogólnych oraz 0,6 kg związków żelaza (11,8% ogółu) (tab. 1). Z przebiegu krzywej zawartości związków żelaza w popłuczynach [8] wynika, że proces ich usuwania był typowy, tzn. stabilne wypłukiwanie związków żelaza na średnim poziomie 3,28 gFe/m<sup>3</sup> przez 38 min jego realizacji, a następnie stopniowe zmniejszanie do 0,6 gFe/m<sup>3</sup> na zakończenie płukania. Równocześnie odnotowano maksymalną zawartość zawiesin ogólnych 175 g/m<sup>3</sup> po 24 min od uruchomienia zrzutu (jednorazowa wymiana wody w rurociągu), z wyraźną tendencją malejącą wraz z upływem czasu płukania. Jakość popłuczyn świadczyła, że główną przyczyną

Tabela 1. Masa osadów wypłukanych z rurociągu azbestowo-cementowego o średnicy 200 mm w latach 2005–2008  
Table 1. Mass of deposits flushed out from the 200 mm diameter asbestos cement pipeline in the time span of 2005 to 2008

Data realizacji	Wersja płukania	Czas płukania min	Zużycie wody m <sup>3</sup>	Masa domieszek w wodzie		Masa osadów*	
				żelazo ogólne kgFe	sucha pozostałość kg	żelazo ogólne kgFe	sucha pozostałość kg
20-02-2005	5, 5A	232	569	0,11	56,3	1,50	125,3
22-03-2005	5B	270	586	0,11	58,0	0,78	40,3
06-06-2006	5, 5A, 5B	311	784	0,15	77,6	0,74	75,3
01-03-2008	5, 5A	217	870	0,17	–	0,60	26,2**
25-06-2008	5,5A,	175	649	0,08	64,2	1,35	17,2
26-06-2008	5B	136	256	0,03	25,3	0,10	8,2
Razem		1341	3714	0,65	281,4	5,07	292,5

\*różnica pomiędzy masą zanieczyszczeń w popłuczynach a masą domieszek zawartych w wodzie płuczącej

\*\*zawiesiny ogólne

obserwowanych przez odbiorców negatywnych skutków wtórnego zanieczyszczenia wody było uwalnianie osadów wraz z biofilmem w formie zawiesin z powierzchni ścian rurociągu i przyległej sieci rozdzielczej. Popłuczyny składały się w 25% z substancji organicznych i w 75% z substancji mineralnych, z dominacją związków żelaza.

Po upływie niespełna 4 miesięcy, podczas drugiego kompleksowego płukania w czerwcu 2008 r. (wersje 5, 5A, 5B), usunięto tylko 25,4 kg osadów (8,6% ogółu), w tym aż 1,5 kg związków żelaza (29,5% ogółu). Tym razem popłuczyny zawierały trzykrotnie mniej zanieczyszczeń niż w pierwszym kompleksowym płukaniu sieci w czerwcu 2006 r., lecz równocześnie wystąpiło wyraźne zwiększenie zawartości związków żelaza. W tym kontekście wydają się interesujące wyniki badań osadu pobranego z początkowego odcinka rurociągu w niespełna pięć miesięcy po pierwszym kompleksowym płukaniu sieci, tj. 31 października 2006 r. [5]. Na powierzchni wycinka rury azbestowo-cementowej o średnicy 200 mm znajdował się osad w ilości 5,08 mg/cm<sup>2</sup>, o konsystencji galaretowatej mazi, zawierający 24% substancji organicznych oraz 76% substancji mineralnych (w przeliczeniu na suchą masę), w tym aż 57% żelaza ogólnego. Znacząca ilość związków żelaza w świeżym osadzie świadczyła, że napływ produktów korozji z przyległej sieci żeliwnej zapoczątkował proces rozwoju biofilmu na gładkim podłożu azbestowo-cementowym. Tezę tę potwierdzają wyniki badań zawarte w pracy [9] – „Produkty korozji są porowate i zwiększają powierzchnię, którą mogą zasiedlać drobnoustroje, a adsorbując związki organiczne zwiększają depozyt substancji pokarmowych.”

Sukcesywnie zmniejszająca się masa wypłukanych osadów w kolejnych realizacjach płukania sieci (tab. 1) dowodzi, że systematyczne płukanie przewymiarowanych sieci wodociągowych metodą ukierunkowanego przepływu skutecznie zabezpiecza je przed nadmierną akumulacją osadów i rozwojem biofilmu. Aby zapobiegać w przyszłości incydentom wtórnego zanieczyszczenia wody w rurociągu azbestowo-cementowym o średnicy 200 mm, wraz z przyległą siecią rozdzielczą, zalecono jego płukanie corocznie na wiosnę. Czas trwania płukania ze średnią prędkością do 1,5 m/s, w każdej z trzech wersji płukania, można ograniczyć do dwóch wymian wody w sieci.

### **Wpływ parametrów płukania sieci na skuteczność usuwania osadów z rurociągów**

Parametry płukania sieci wodociągowej, które współdecydowały o intensywności wypłukiwania osadów, były następujące:

- czas jednokrotnej wymiany wody, który zależał od prędkości przepływu popłuczyn i zasięgu obszarowego oddziaływania wymuszenia przepływu (długości płukanej sieci),
- krotność wymiany wody, która była zależna od prędkości płukania oraz ilości i rodzaju osadów zdeponowanych w rurociągu,
- częstość płukania, która zależała od jakości wody wtłaczanej do sieci, a także warunków eksploatacji sieci (prędkości przepływu i czasu przetrzymania wody w sieci).

### **Czas płukania**

Wymagany minimalny czas trwania płukania sieci wodociągowej można obliczyć jako sumę czasu trwania erozji osadów powiększonego o czas potrzebny na odpływ popłuczyn do odbiornika. W oszacowaniu minimalnego

czasu płukania sieci na etapie jego planowania pomocne są wyniki symulacji komputerowej. Na podstawie obliczeń hydraulicznych określa się długość płukanych rurociągów w oparciu o uzyskany zasięg obszarowy zastosowanego wymuszenia przepływu, a następnie oblicza się czas jednokrotnej wymiany wody przy możliwej do osiągnięcia prędkości przepływu w przewodach. Znacznie trudniejszy do jednoznacznego określenia metodami analitycznymi jest czas trwania procesu erozji osadów podczas płukania ukierunkowanego, ponieważ o kinetyce ich wypłukiwania decyduje stopień dostosowania prędkości przepływu popłuczyn do stanu, rodzaju i ilości zgromadzonych osadów. Minimalny czas wypłukiwania osadów uzyskuje się w warunkach optymalnej prędkości przepływu przy danej średnicy rurociągu i rodzaju osadów. Obserwuje się wówczas największą intensywność ich wypłukiwania w początkowej fazie płukania, a czas wypłukiwania z optymalną prędkością jest ograniczony do dwóch lub trzech wymian wody.

Z badań doświadczalnych wynika, że stopień zanieczyszczenia rurociągów (ilość osadów) zależy zarówno od rodzaju materiału, jak również od ich lokalizacji i pełnionej funkcji w sieci wodociągowej [10]. Rury żeliwne o ściankach porowatych stanowią bardziej sprzyjające środowisko do akumulacji osadów i rozwoju biofilmu niż gładkie powierzchnie polimerowe i azbestowo-cementowe. Z tego powodu w rurach żeliwnych obserwuje się równomierne wypłukiwanie zanieczyszczeń nawet podczas czterech i więcej wymian wody. Dzieje się tak dlatego, że zakończenie wypłukiwania zanieczyszczeń następuje wówczas, gdy osiągnięte nowe warunki równowagi hydraulicznej w przewodach lub kiedy nastąpi uruchomienie wszystkich zalegających osadów słabo związanych z podłożem. Udział uwarunkowań związanych z lokalizacją i funkcją rurociągu w kształtowaniu zasobów osadów wynika ze zróżnicowanych warunków eksploatacyjnych sieci wodociągowej (prędkość przepływu, czas przetrzymania wody). Ponadto opóźnione wypłukiwanie osadów podczas czwartej i następnych wymian może nastąpić także wskutek uruchomienia osadów luźnych z rurociągów dopływowych poza rejonem płukania [8]. Aby uniknąć wypłukiwania osadów z rurociągów dopływowych i ich przemieszczania do rejonu płukania, zaleca się kompleksowe płukanie sieci najpierw w sąsiedztwie ujęcia wody, a następnie sukcesywne powiększanie obszaru oddziaływania wymuszenia w taki sposób, aby strumień popłuczyn występował tylko w oczyszczonych przewodach.

### **Prędkość przepływu wody**

Jeżeli płukanie sieci wodociągowej (rurociągu o danej średnicy i z danego rodzaju materiału) odbywa się z optymalną prędkością (spadkiem hydraulicznym), tzn. turbulencja wody wskutek wzrostu prędkości przepływu powoduje naprężenia ścinające w warstwie przyściennej większe od sił spójności osadów miękkich (półpłynnych), wówczas największą zawartość suchej pozostałości, w tym związków żelaza, zawierają popłuczyny z pierwszej wymiany wody w rurociągu, z tendencją malejącą w kolejnych wymianach wody. Zjawisko to jest charakterystyczne podczas płukaniu rurociągów polimerowych i azbestowo-cementowych, ze względu na łatwość usunięcia osadów o ograniczonej ilości, słabo związanych z podłożem. Z tego powodu większa prędkość przepływu od optymalnej nie ma wpływu na dalszy wzrost intensywności wypłukiwania osadów. Jeżeli prędkość przepływu jest mniejsza od optymalnej, wówczas zawartość zanieczyszczeń w popłuczynach wzrasta do

wartości maksymalnej z pewnym opóźnieniem, zazwyczaj podczas drugiej lub trzeciej wymiany wody. Dzieje się tak najczęściej podczas płukania rurociągów żeliwnych. Aby osiągnąć porównywalną skuteczność wypłukiwania zanieczyszczeń z mniejszą prędkością, należy dostosować (zwiększyć) czas płukania rurociągu o danej średnicy. Im mniejsza prędkość, tym czas potrzebny do wypłukania osadów będzie dłuższy.

Efekt płukania jest szczególnie korzystny, jeśli nastąpi ukształtowanie się nowej równowagi hydraulicznej na granicy osad/warstwa przyścienna przez prędkość wielokrotnie wyższą od występującej w normalnych warunkach eksploatacji. Pozostałe osady twarde w sieci wodociągowej nie będą rozmywane wskutek zmiennego, a szczególnie maksymalnego poboru wody.

W warunkach normalnej eksploatacji sieci wodociągowej uruchomienie i przemieszczanie osadów luźnych (półpłynnych) w sieci wodociągowej może spowodować praktycznie każdy wzrost prędkości przepływu po okresie stagnacji wody, jeśli tylko narusza ona ukształtowaną równowagę hydrauliczną na powierzchni ścian rurociągów przewymiarowanych. W takiej sytuacji obserwuje się negatywne skutki zjawiska wtórnego zanieczyszczenia transportowanej wody w postaci zwiększenia jej mętności i zmiany zabarwienia [11].

### Krotność wymiany wody

Wpływ krotności wymiany wody na dynamikę wypłukiwania osadów z rurociągu można ustalić tylko wówczas, gdy pobrane próbki reprezentują jakość popłuczyn co najmniej w trzech kolejnych wymianach, tzn. częstość poboru próbek jest dostosowana do warunków hydraulicznych przepływu wody w sieci oraz zasięgu oddziaływania zastosowanego wymuszenia przepływu. Spełnienie tego warunku okazało się szczególnie trudne w wariantach płukania o czasie jednorazowej wymiany wody krótszym niż 10 min. Niesystematyczny pobór próbek popłuczyn znacząco zubożył bazę danych nadającą się do wyznaczenia oddzielnej zależności pomiędzy jakością popłuczyn a krotnością wymiany wody w każdym wariantcie płukania. Spośród ponad 300 próbek popłuczyn, uzyskanych podczas kompleksowego płukania sieci w Biłgoraju w 2006 r., jedynie około 40% pobrano podczas trzech pierwszych wymian wody w płukanych rurociągach [5]. Pozostałe próbki reprezentowały jakość popłuczyn w końcowej fazie oraz po płukaniu, zatem po uzyskaniu nowej równowagi hydraulicznej na powierzchni ścian rurociągów. Z powodu pominięcia kontroli wypłukiwania początkowych zasobów osadów, były one nieprzydatne do oceny zależności pomiędzy krotnością wymiany a jakością popłuczyn w wielu wariantach płukania. Negatywna ocena reprezentatywności części próbek popłuczyn wymusiła konieczność posłużenia się wartościami uśrednionymi we wszystkich realizacjach w analizie wpływu krotności wymiany wody na jakość popłuczyn. W ten sposób ustalono, że największe zmniejszenie wartości średniej wystąpiło pomiędzy pierwszą i drugą wymianą wody, odpowiednio 79,3% w przypadku mętności, 61,5% – żelaza i 35,2% – suchej pozostałości [5]. Najbardziej stabilna była zawartość suchej pozostałości, ponieważ podczas trzeciej wymiany wody stanowiła nadal 57% początkowej wartości średniej (pierwsza wymiana), podczas gdy w przypadku pozostałych dwóch wskaźników (zawartość żelaza i mętność) wartości te wynosiły odpowiednio 19,1% i 11,5%. Wyniki te wykazały, że skuteczne wypłukiwanie z rurociągów większości osadów w postaci półpłynnej

nastąpiło podczas trzech wymian wody ze średnią prędkością do 1 m/s wskutek zastosowanego wymuszenia przepływu. Dalsze badania wykonane podczas płukania sieci w 2008 r. pozwoliły w pełni zweryfikować te ustalenia [7].

### Zasięg oddziaływania wymuszenia przepływu wody

Największe wartości wskaźników jakości popłuczyn uzyskano najczęściej po czasie potrzebnym do osiągnięcia maksymalnego zasięgu oddziaływania wymuszenia przepływu wody [6]. Im dłuższa była droga przepływu popłuczyn w sieci wodociągowej, tym potencjalnie większa była możliwość spłukiwania osadów z wewnętrznej powierzchni przewodów wraz z upływem czasu płukania. Jako empiryczny dowód wzrostu ilości wypłukiwanych osadów wraz z powiększaniem się zasięgu oddziaływania wymuszenia mogą posłużyć popłuczyny z odpływowego odcinka magistrali o średnicy 300 mm i długości 1 km. W początkowej fazie odpływu popłuczyn z prędkością 0,4 m/s po uruchomieniu zrzutu nastąpił prawie dwukrotny wzrost zawartości suchej pozostałości, w tym trzykrotny żelaza ogólnego, który narastał proporcjonalnie do zasięgu oddziaływania wymuszenia przepływu. Największą zawartość suchej pozostałości 490 g/m<sup>3</sup>, w tym 24 gFe/m<sup>3</sup>, uzyskano ze znacznym opóźnieniem, po 5-krotnej wymianie wody, zapewne ze względu na znikomą prędkość przepływu w magistrali [10]. Szczegółowy opis zarówno kompleksowego programu płukania sieci wodociągowej metodą ukierunkowanego przepływu, jak również symulacyjnej weryfikacji hydraulicznych warunków jego realizacji, zamieszczono w pracy [6].

### Wnioski

W ramach wieloletnich badań skuteczności płukania sieci wodociągowej metodą ukierunkowanego przepływu określono następujące prawidłowości i ograniczenia:

- ◆ Preferuje się stosowanie tej metody do usuwania biofilmu oraz osadów miękkich i słabo związanych z podłożem w rurociągach o średnicy do 250 mm.

- ◆ Wzrost zawartości zanieczyszczeń w popłuczynach następuje wskutek turbulencji wody, która narusza dobową równowagę hydrauliczną, ukształtowaną przez losowy pobór wody podczas normalnej eksploatacji sieci wodociągowej.

- ◆ Należy dążyć do utrzymania optymalnej prędkości przepływu (spadku hydraulicznego), która wywoła turbulencję wody stosowną do stanu zanieczyszczenia i rodzaju powierzchni rurociągu, ponieważ jej dalszy wzrost jest nieskuteczny, gdyż jedynie przyczyni się do nadmiernego zużycia wody podczas płukania.

- ◆ Porównywalną masę wypłukanych osadów można uzyskać w krótszym czasie, przy zapewnieniu optymalnej prędkości przepływu, zależnie od stanu danego rurociągu (rodzaj materiału) albo przez wydłużenie czasu oddziaływania (krotności wymiany), lecz przy mniejszej prędkości przepływu wody.

- ◆ Ładunek wypłukanych osadów z rurociągu po osiągnięciu maksimum zawsze zmniejsza się wraz z krotnością wymiany wody (czasem trwania płukania), niezależnie od uwarunkowań (rodzaj materiału, lokalizacja rurociągu i pełnione funkcje, itd.).

- ◆ Maksimum zawartości usuniętych osadów w popłuczynach zależy od:

- rodzaju, składu, wieku i konsystencji osadów oraz biofilmu w danym rurociągu,

– zasięgu oddziaływania wymuszenia przepływu wody, ponieważ im dłuższa jest droga przepływu popłuczyn rurociągiem, tym większa jest potencjalna możliwość wypłukania osadów,

– rodzaju materiału, z którego wykonany jest płukany rurociąg oraz jego lokalizacji i pełnionej funkcji w strukturze układu sieci wodociągowej (sucha pozostałość była największa w rurociągach żeliwnych sieci rozdzielczej, zawartość związków żelaza była zbliżona w rurociągach żeliwnych i z PVC tylko w początkowej fazie płukania, szybko zanikając z powierzchni polimerowych przy dalszym płukaniu, natomiast mętność wody była zdecydowanie największa w próbkach pobranych podczas płukania odgałęzień, szczególnie wykonanych z PVC).

♦ Skuteczny czas erozji osadów należy zwiększyć proporcjonalnie do zasięgu oddziaływania wymuszenia przepływu wody, aby umożliwić spływ popłuczyn wraz z osadami do odbiornika (zrzut).

♦ Częstość płukania sieci wodociągowej powinna być dostosowana do tempa akumulacji osadów, które zależy od jakości wody wodociągowej oraz warunków hydraulicznych w sieci (prędkość przepływu wody, czas przetrzymania).

## LITERATURA

1. E.N. ANTOUN, J.E. DYKSEN, D.J. HILTEBRAND: Unidirectional flushing: A powerful tool. *Journal American Water Works Association* 1999, Vol. 91, No. 7, pp. 62–71.
2. M. KULBIK: Ochrona jakości wody w sieci wodociągowej przez wymuszenie ukierunkowanego przepływu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1998, nr 10, ss. 418–421.
3. A. KOTOWSKI: Analiza hydrauliczna zjawisk wywołujących zmniejszenie przepływności rurociągów. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 1, ss. 27–32.
4. M. KULBIK: Jakość wody w sieci wodociągowej w warunkach wymuszenia ukierunkowanego przepływu. *Instal* 1999, nr 11, ss. 9–14.
5. M. KULBIK: Ocena skuteczności płukania przewymiarowanych sieci wodociągowych metodą ukierunkowanego przepływu na podstawie jakości popłuczyn. *Ochrona Środowiska* 2008, vol. 30, nr 1, ss. 31–38.
6. M. KULBIK: Skuteczność płukania przewymiarowanych sieci wodociągowych metodą ukierunkowanego przepływu. *Instal* 2006, nr 10, ss. 52–57.
7. M. KULBIK: Jakość popłuczyn z płukania sieci wodociągowej metodą ukierunkowanego przepływu. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN* 2009, vol. 56, ss. 240–250.
8. M. KULBIK: Wpływ częstości płukania sieci wodociągowej na jakość popłuczyn. Mat. konf. „Eksploracja systemów wodociągowo-kanalizacyjnych: Doświadczenia krajowe i zagraniczne”, SAUR NEPTUN Gdańsk, Gdańsk 2010, ss. 1–15.
9. M. ŚWIDERSKA-BRÓŹ: Czynniki współdecydujące o potencjale powstania i rozwoju biofilmu w systemach dystrybucji wody. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 3, ss. 7–13.
10. M. KULBIK: Ocena zanieczyszczenia sieci wodociągowej na podstawie jakości popłuczyn. W: Ochrona przed korozją sieci wodociągowej – zastosowanie fosforanów w ochronie instalacji wodociągowych, Gdańska Fundacja Wody, Gdańsk 2010, ss. 1–15.
11. M. KULBIK: Wpływ warunków hydraulicznych w sieci wodociągowej na wtórne zanieczyszczenie wody. W: Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód – zagadnienia współczesne [red. M.M. SOZAŃSKI], PZITS Oddział Wielkopolski, Poznań 2010, t. II, ss. 35–51.

**Kulbik, M. Analyzing the Parameters of Water-pipe Network Flushing by the Method of Unidirectional Water Flow. *Ochrona Środowiska* 2012, Vol. 34, No. 1, pp. 47–51.**

**Abstract:** Many years' experiments performed during flushing of the water-pipe network by the method of unidirectional water flow have contributed substantially to the verification of the interactions among the quality of the washings, accumulation of deposits in the pipes, the parameters of flushing, the number of water exchange cycles, and the range of influence of forced water flow. It has been found that, at the beginning, the flushing of the deposits out of the water-pipe network proceeds according to the

rapidly rising curve (the first or the second water exchange cycle) and then according to the falling curve. This is so because at the point in time when the pollutant content of the washings reaches the maximal value, an evidently downward trend sets on in the flushing of the pollutants out of the water-pipe network. The efficiency of flushing was quantified based on the pollutant content of the washings. It has been demonstrated that the maximal pollutant content of the washings is influenced by the type, composition and age of the deposits, as well as by the velocity of flushing and the length of washings flow.

**Keywords:** Water-pipe network, deposits, washings.