

Marian KULBIK

Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska

WPŁYW WARUNKÓW HYDRAULICZNYCH W SIECI WODOCIĄGOWEJ NA WTÓRNE ZANIECZYSZCZENIE WODY

EFFECT OF HYDRAULIC CONDITIONS IN THE WATER DISTRIBUTION SYSTEM ON THE SECONDARY WATER POLLUTION

The main purpose of investigations was to show empirically the effect of flow velocity changes and water detention time on the secondary water pollution in the oversized water-pipe networks. The base of analysis are hydraulic investigations performed during flushing of the cast iron pipes of nominal diameter 100 mm and laboratory tests of washings including total solids and iron compounds. All washings samples taken from hydrants were undertaken the detailed identification in time and space. To establish the flow course, water flow velocity and time of washings flow the hydraulic calculations from the computer simulation model were used. Based on the results from simulation model the hydraulic conditions generating quality of washings were established during the six variants of water pipes flushing. There were observed interdependence between washings flow velocity and flushing duration. The similar flushing effect can be obtained in the shorter time when the optimal flow velocity dependent on the structure of washings is provided or when the flushing time prolongation is performed at lower flushing velocities. Besides there was show the dominating share of water main of diameter 300 mm in changes of washings quality, because its functions as the storage and settling tank. Rehydrated deposits undergo sedimentation during water flow at the velocity lower then 0.2 m/s. The turbulence caused by double increase of washings flow velocity, in the water main 300 mm, evidently intensify flushing of deposits from pipe walls.

1. Wprowadzenie

Wtórne zanieczyszczenie wody w sieci wodociągowej jest najczęściej skutkiem przemieszczania się miękkich osadów w postaci półpłynnej, które powodują wzrost jej mętności i zabarwienia w kolorze czerwono-brunatno-czarnym. Identyczny efekt organoleptyczny, lecz o zwiększonej intensywności, obserwuje się podczas wypływu popłuczyn w trakcie płukania sieci wodociągowej metodą ukierunkowanego przepływu [3, 5]. W obu wypadkach przyczyną tego zjawiska są zaburzenia turbulencji przepływu wody wskutek chwilowej zmienności poboru wody oraz skokowej zmiany prędkości lub/i ciśnienia spowodowanej np. przez rozprzestrzenianie się fali uderzenia hydraulicznego wskutek zamknięcia lub otwarcia zasuwy, hydrantu albo zrzutu (komory spustowej). Wykorzystując podobieństwo relacji przyczynowo-skutkowych podjęto próbę empirycznego wykazania wpływu:

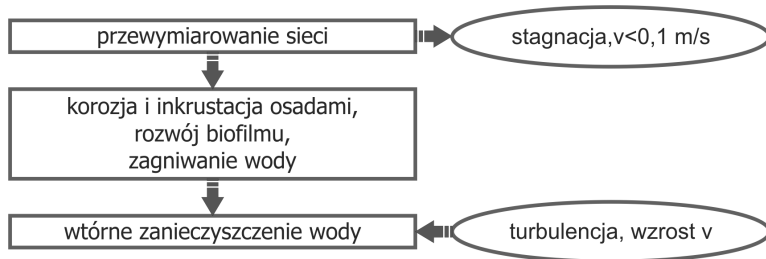
1. wzrostu prędkości i czasu trwania tego oddziaływania na intensywność wypłukiwania zanieczyszczeń,
2. czasu przebywania wody w przewymiarowanym rurociągu na sedymentację cząstek stałych i zawieszonych, a szczególnie ustalenie granicznej wartości prędkości popłuczynowego ich unoszenia po wznowieniu ruchu wody (wtórne jej zanieczyszczenie).

Podstawą empiryczną badań są pomiary hydrauliczne (natężenie przepływu, ciśnienie) oraz wyniki laboratoryjne badania próbek popłuczyn pobranych podczas realizacji płukania rurociągów żeliwnych $\phi 100$ sieci osiedlowej w Biłgoraju metodą ukierunkowanego przepływu [3]. Każdą próbkę popłuczyn pobraną z hydrantów w rejonie płukania oraz z komory spustowej (zrzutu do kanalizacji) poddano szczegółowej identyfikacji w czasie i przestrzeni. W ustaleniu zasięgu oddziaływania wymuszenia, prędkości, drogi i czasu przepływu popłuczyn pomocne były obliczenia hydrauliczne wykonane za pomocą komputerowego modelu symulacyjnego [4]. Na tej podstawie ustalono warunki hydrauliczne kształtujące jakość popłuczyn w trakcie realizacji sześciu wariantów płukania.

2. Warunki hydrauliczne a wtórne zanieczyszczenie wody

W praktyce eksploatacyjnej obserwuje się pogorszenie własności organoleptycznych wody podczas jej dystrybucji w przewymiarowanej sieci wodociągowej. Problem ten ma charakter losowy i występuje niezależnie od rodzaju materiału, wieku przewodów, stanu technicznego sieci i jej uzbrojenia, a nawet efektywności zastosowanej technologii uzdatniania wody w nowych stacjach [5]. Relację przyczynowo-skutkową pomiędzy najważniejszymi procesami biorącymi udział w przemianach jakościowych transportowanej wody a warunkami hydraulicznymi zależnymi od prędkości (stagnacja, turbulencja) przedstawia schemat ideowy (rys. 1).

Mechanizm przebiegu wymienionych procesów w sieci wodociągowej, ze względu na złożony charakter i wieloczynnikowe uwarunkowania, nie został dotychczas w pełni wyjaśniony [5]. W literaturze przedmiotu zazwyczaj opisuje się wpływ wybranych czynników (np. zawartości przyswajalnych związków organicznych i tlenu, temperatury, stężenia chloru, parametrów hydraulicznych) na proces wtórnego zanieczyszczenia transportowanej wody [6, 7].



Rys. 1. Schemat ideowy relacji przyczynowo-skutkowych pomiędzy zmiennymi: przewymiarowanie sieci – stagnacja oraz turbulencja – wtórne zanieczyszczenie wody

Fig. 1. Schematic diagram of cause-result relationships between variables: oversized network – stagnation and turbulence – secondary water pollution.

Spśród czynników hydraulicznych, które mają wpływ zarówno na dynamikę odkładania osadów i rozwój życia biologicznego, jak również kinetykę wtórnego zanieczyszczenia wody, należy wymienić:

- prędkość wody i czas jej przebywania w sieci,
- częstość i skuteczność płukania sieci.

Przykładowo podaje się w literaturze bez dowodu empirycznego, że wymienione procesy zależą od wartości prędkości:

- mniejsza niż 0,1 m/s uważana jest za wielkość krytyczną, ponieważ wówczas odbywa się odkładanie osadów w przewodach, niezależnie od oddziaływania pozostałych czynników na intensywność tego procesu [1],
- powyżej 1 m/s powoduje zmywanie nadmiaru błony biologicznej, a nawet erozję i rozmywanie osadów w wyniku działania naprężeń ścinających [2].

Z kolei czas przebywania wody w sieci stymuluje procesy zachodzące w osadach i warstwie przyściennej, które pogarszają jej jakość, chociażby ze względu na dominację powierzchni ścian przewodów w relacji do objętości transportowanej wody [3].

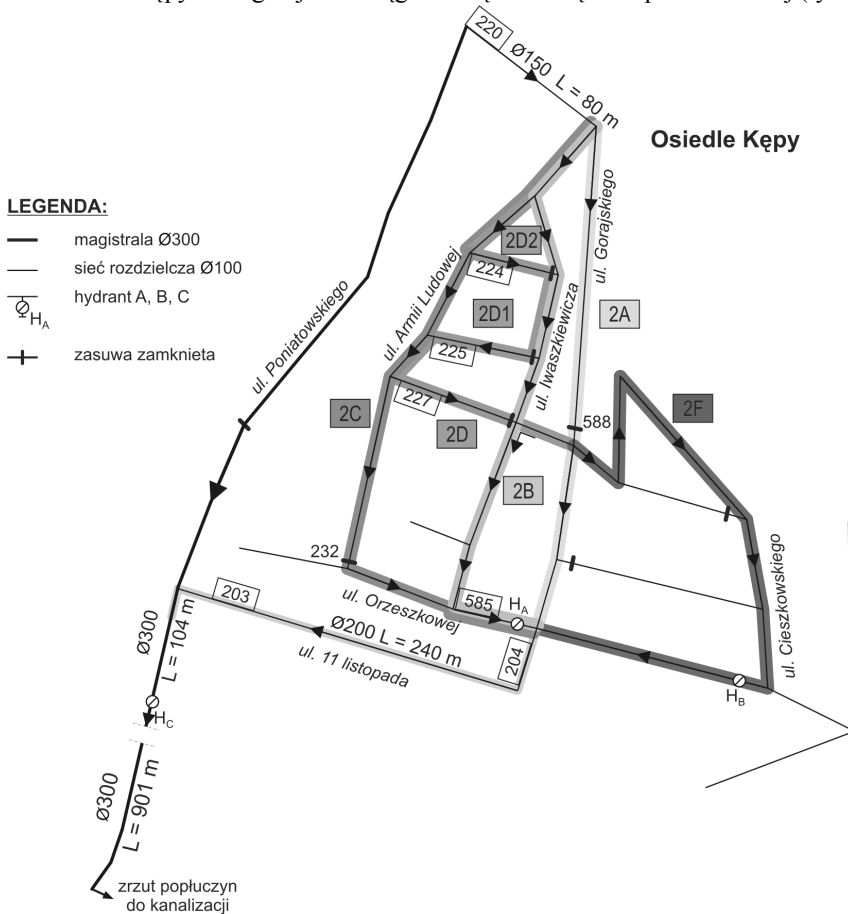
Z praktycznego punktu widzenia warto zauważyć, że wymienione czynniki mogą być doraźnie w ograniczonym zakresie, kształtowane przez eksploatatora, ponieważ systematyczne i skuteczne płukanie sieci wodociągowej zakłóca przebieg niekorzystnych procesów, jak również powoduje usunięcie osadów luźnych (półpłynnych). Jeśli naprężenia ścinające w warstwie przyściennej, wywołane turbulentnym ruchem wody wskutek wzrostu jej prędkości, będą większe od sił kohezji (spójności) osadu, wówczas nastąpi wypłukiwanie kolejnych warstw słabo związanych z podłożem.

Profilaktyczna ingerencja eksploatatora (płukanie sieci, sterowanie przepływem) może skutecznie ograniczyć wtórne zanieczyszczenie wody [4]. Działania te okresowo eliminują osady półpłynne w sieci wodociągowej, które mogłyby przemieszczać się wskutek dynamicznych zmian warunków hydraulicznych (naruszenia dobowej równowagi hydraulicznej). Efekt płukania jest szczególnie korzystny, jeśli dodatkowo spowoduje ukształtowanie się nowej równowagi hydraulicznej na granicy osad - warstwa przyścienna przez prędkość wielokrotnie wyższą od normalnych warunków eksploatacji.

W takim wypadku pozostaną w sieci wodociągowej osady twarde, które nie będą rozmywane w warunkach eksploatacji wskutek zmiennego, a szczególnie maksymalnego poboru wody. W ten sposób eksploatacja może zapobiegać negatywnym skutkom ciągłego procesu hydraulicznego starzenia się przewodów, szczególnie w przewymiarowanej sieci wodociągowej.

3. Przedmiot i zakres badań

Przedmiotem badań są żeliwne rurociągi $\phi 100$ o długości 2,2 km wraz z 1 km magistrali $\phi 300$. Na osiedlu Kępy w Biłgoraju rurociągi tworzą strukturę sieci pierścieniowej (rys. 2).



Rys. 2. Warianty płukania sieci wodociągowej na osiedlu Kępy w Biłgoraju w 2008 r.

Fig. 2. Variants of water distribution system flushing within the Kępy Biłgoraj housing estate in 2008.

O wyborze osiedlowej sieci rozdzielczej, która jest eksploatowana w małosmownych warunkach hydraulicznych od 1991 r., zdecydowała jej jednorodna struktura materiałowa i jednakowy wiek. W minionym okresie (1991-2008) wtłaczano do sieci wodociągowej wodę uzdatnioną o ówczesnie obowiązujących parametrach jakościowych (np. żelazo ogólne $0,5 \text{ g Fe/m}^3$). Rozruch nowej stacji uzdatniania rozpoczęto 30 marca 2008 r. W efekcie jej działania podczas realizacji płukania, woda uzdatniona zawierała średnio $0,07 \text{ g Fe/m}^3$ związków żelaza, natomiast wartość suchej pozostałości zmieniała się od 91 do 178 g/m^3 .

Ważnym elementem badań okazała się magistrala $\phi 300$ (rys. 2), która w badaniach pełniła rolę przewodu odpływowego od rejonu płukania do komory spustowej (zrzutu do kanalizacji). Szczególne znaczenie magistrali $\phi 300$ w przemianach jakości popłuczyn wynikało z jej funkcji jako zbiornika retencyjnego (osadnika) o 72 m^3 pojemności oraz 960 m^2 powierzchni ścian. Z relacji pojemności magistrali do powierzchni ścian wynikają specyficzne warunki przepływu, które polegają na kontakcie $7,5 \text{ cm}$ warstwy popłuczyn z podłożem (wewnętrzna ściana rury), zazwyczaj inkrustowanym osadami lub/i z uformowaną błoną biologiczną.

Z powodu naprzemian zatrzymywania przepływu i ponownego jego uruchamiania po kolejnej zmianie ustawienia zasuw, warunki hydrauliczne przemieszczania się popłuczyn w magistrali $\phi 300$ można utożsamiać z sytuacjami podczas kształtowania się zjawiska wtórnego zanieczyszczenia wody w eksploatacji sieci wodociągowej. Efektem okresowego zatrzymywania przepływu w sieci przewymiarowanej jest strącanie i osiadanie cząstek osadu. Z kolei ponowne uruchamianie przepływu wody powoduje wyfukowanie i transport uprzednio zakumulowanych zanieczyszczeń. Ponadto porównanie jakości popłuczyn z płukania sieci (pobór próbek z hydrantów w rejonie płukania) z ich spływem magistralą $\phi 300$ (pobór próbek z komory spustowej) pozwoliło ocenić wpływ zachodzących zjawisk wskutek opóźnienia czasowego odpływu na stężenie suchej pozostałości i związków żelaza (pkt 5).

4. Wyniki badań próbek popłuczyn pobranych z hydrantów

Płukanie sieci zrealizowano w dniach 13-15.05.2008 r., w porze nocnej, według scenariusza wariantu 2, podzielonego na sześć wersji A, B, C, D, F, G, w tym dodatkowo wyróżniono dwa etapy w wersji 2D. Podział przewymiarowanej sieci wodociągowej o strukturze pierścieniowej na sześć wersji płukania był konieczny. W poszczególnych wersjach płukania uzyskano jednokierunkowy przepływ wody w rurociągach, z maksymalną prędkością po ukierunkowaniu strumienia przez zamknięcie wybranych zasuw. O wpływie wymuszenia i ukierunkowania przepływu na wzrost prędkości w rurociągach wskazuje porównanie wartości prędkości w wariancie 2G bez regulacji (wszystkie zasawy otwarte) z pozostałymi wersjami. W tym wypadku średnia prędkość wynosiła $0,98 \text{ m/s}$, podczas gdy w prawidłowo ukierunkowanym przepływie w wersjach 2A, częściowo 2B i 2F jest ponad 2-krotnie większa, przy wydajności zrzutu mniejszym o połowę.

4.1. Ocena reprezentatywności próbek popłuczyn

Zalecana częstość poboru próbek wynikała z wcześniejszych ustaleń autora [3], że największą zawartość związków żelaza i suchej pozostałości zawierają popłuczyny z pierwszej wymiany wody w rurociągu wraz z tendencją malejących ich ilości w kolej-

nych cyklach (wymianach). Prawidłowość ta występuje wówczas, gdy płukanie odbywa się z optymalną prędkością, tzn. turbulencja wody jest wystarczająca do usunięcia osadów miękkich i słabo związanych z podłożem. Jeśli prędkość jest mniejsza od optymalnej, wówczas stężenie zanieczyszczeń wzrasta wraz z upływem czasu płukania do wartości maksymalnej, zazwyczaj podczas wymiany drugiej lub trzeciej.

W celu ustalenia wpływu powyższych czynników i okoliczności ich oddziaływania na ładunek wypłukiwanych zanieczyszczeń należało zidentyfikować pochodzenie każdej z 27 próbek pobranych z hydrantów (tab. 1).

Tab. 1. *Identyfikacja prędkości i czasu przepływu popłuczyn dla próbek z pierwszego dnia płukania*

Tab. 1. *Identification of flow velocity and washings flow time from the first day of flushing*

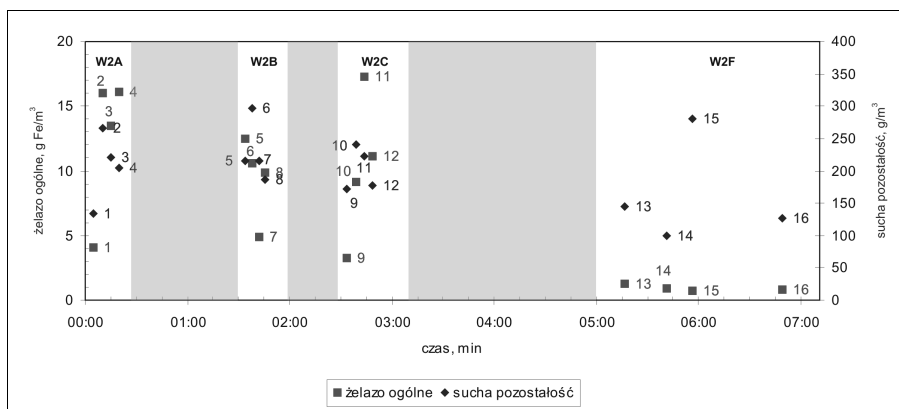
Nr próbki/ hydrant	Wariant	Pochodzenie popłuczyn w próbce (rys. 2)/ krotność wymiany wody	Prędkość przepływu m/s	Czas jednorazowej wymiany min
H_c		rurociągi odpływowe		
1		φ300 nr 630 w ul. Poniatowskiego	0,3	6,3
2		φ200 nr 203 w ul. 11-listopada	0,6	7,1
H_c	2A	rurociąg φ100 w ul. Gorajskiego	2,3	3,5
3		początek 1-wymiany		
4		2-wymiana		
H_A	2B	rurociąg φ100 w ul. Iwaskiewicza	1,7	5,5
5		połowa 1-wymiany		
6		po 1-wymianie		
7		w trakcie 2-wymiany		
8		po 3-wymianie		
H_A	2C	rurociąg φ100 w ul. Armii Ludowej	1,2	5,5
9		1-wymiana		
10		2-wymiana		
11		3-wymiana		
12		4-wymiana		
H_B	2 F	rurociąg φ100 w ul. Cieszkowskiego	2,0	4,4
13		4-wymiana		
14		7-wymiana		
15		11-wymiana		
16		15-wymiana		

Próbki popłuczyn pobierano z trzech hydrantów A, B, C zależnie od wariantu realizacji płukania (rys. 2). Każda próbka reprezentuje popłuczyny ukształtowane przez podobny rodzaj i zasoby zgromadzonych osadów (pkt 3.2), lecz w innych warunkach hydraulicznych (prędkość, czas trwania płukania, zasięg wymuszenia przepływu).

Jeśli prawidłowo pobrane próbki reprezentują w każdym wariantcie jakość popłuczyn w kolejnych wymianach, wówczas można ustalić przebieg czasowy wpływu prędkości i krotności wymiany wody na dynamikę wypłukiwania zanieczyszczeń z danego rurociągu. W praktyce okazało się niekiedy zbyt trudne spełnienie tego warunku przez obsługę.

4.2. Empiryczny dowód wpływu warunków hydraulicznych na wypłukiwanie obrostów biologicznych i osadów

Na przykładzie realizacji czterech wersji płukania podczas pierwszej nocy poddano indywidualnej ocenie każdą z 16 pobranych próbek. Czas rzeczywisty poboru próbek wraz z wartościami stężenia suchej pozostałości i żelaza ogólnego podano na rys. 3.



Rys. 3. Jakość popłuczyn podczas płukania sieci osiedlowej według wariantu 2A, B, C, F

Fig. 3. Washings quality from flushing water distribution system according to variants 2A, B, C, F

Pierwszą próbkę popłuczyn pobrano z hydrantu C w trakcie wzrostu prędkości w magistrali $\phi 300$ do $0,3$ m/s wskutek uruchamiania zrzutu, zatem pochodzi ona z zasobów wody znajdującej się w jej początkowym odcinku nr 630 (rys. 2). Podwyższoną zawartość związków żelaza $4,1$ g Fe/m³ należy tłumaczyć zamknięciem zasuw w otoczeniu magistrali $\phi 300$ na godzinę przed otwarciem zrzutu. Ukierunkowanie przepływu w sieci wodociągowej spowodowało czterokrotny wzrost prędkości w rurociągu $\phi 100$ w ul. Gorajskiego z $0,1$ do $0,4$ m/s wskutek poboru wody przez mieszkańców w okresie wieczornego szczytu. W tym czasie nastąpiła 3-krotna wymiana wody w sieci osiedlowej. W tych okolicznościach należy sądzić, że odnotowany wzrost stężenia związków żelaza jest skutkiem naruszenia dobowej równowagi hydraulicznej w przewymiarowanej sieci osiedlowej wskutek wzrostu prędkości do $0,4$ m/s.

Druga próbka odzwierciedla jakość popłuczyn ukształtowaną podczas przepływu wody z prędkością 0,56 m/s w rurociągu odpływowym $\phi 200$ nr 203 (rys. 2). W chwili jej poboru zakończyła się jednokrotna wymiana wody w początkowym odcinku nr 630 magistrali $\phi 300$. Dwukrotny wzrost stężenia suchej pozostałości w popłuczynach do 266 g/m^3 , w tym czterokrotny związków żelaza do 16 g Fe/m^3 stanowi efekt wypłukiwania zakumulowanych osadów miękkich z rurociągu odpływowego $\phi 200$ wskutek 10-krotnego wzrostu prędkości z poziomu 0,05 m/s w warunkach eksploatacyjnych. Turbulencja przepływu wody w rurociągu $\phi 200$ z prędkością zbliżoną do wartości minimalnej zalecanej w projektowaniu przewodów okazała się wystarczająca do wypłukiwania zanieczyszczeń o konsystencji półpłynnej.

Z kolei dwie następne próbki nr 3 i 4 pobrano podczas odpływu popłuczyn z właściwego płukania rurociągu $\phi 100$ w ul. Gorajskiego według wariantu 2A z prędkością 2,3 m/s. Ich jakość ukształtowała się odpowiednio: w początkowej fazie pierwszej i drugiej wymiany (tab. 1). Porównywalna jakość popłuczyn do próbki nr 2 dowodzą, że wypłukiwanie zanieczyszczeń z rurociągu $\phi 100$ w ul. Gorajskiego jest na podobnym poziomie pomimo ponad czterokrotnie większej prędkości aniżeli w rurociągu odpływowym $\phi 200$. Rzeczywiście chwilowy ładunek związków żelaza różni się nieznacznie w obu wypadkach, ponieważ zwiększył się tylko o 26% z 0,2 do 0,27 g Fe/s. Ustalenia te świadczą, że intensywność wypłukiwania zanieczyszczeń nie zawsze jest proporcjonalna do wzrostu prędkości, ponieważ zależy także od rodzaju i zasobów osadu [5].

Cztery kolejne próbki (nr 5 ÷ 8) pobrano podczas płukania rurociągu $\phi 100$ z prędkością 2,5 m/s w ul. Iwazkiewicza według wariantu 2B (rys. 2). Jednak z powodu niezamknięcia przez obsługę zasuwy nr 588, około 50% objętości strumienia popłuczyn stanowił przepływ z prędkością 1,3 m/s rurociągiem równoległym w ul. Gorajskiego, w którym uprzednio nastąpiła 3-krotna wymiana podczas płukania według wariantu 2A. W zaistniałej sytuacji jakość popłuczyn stanowiła wypadkową z różnych faz płukania obu rurociągów. Dodatkowy 50% dopływ o jakości ukształtowanej podczas ośmiu wymian łącznie spowodował rozcieńczanie popłuczyn pochodzących z właściwego płukania rurociągu według wariantu 2B. Tezę tę można potwierdzić obliczeniowo, jeśli założyc, że początkowe stężenie związków żelaza w popłuczynach (bez dopływu) według wariantu 2B wynosiło 16 g/m^3 , czyli podobnie jak w wariantcie 2A, wówczas po ośmiu wymianach w dopływie zawartość związków żelaza powinna być poniżej 1 g/m^3 . Z tego względu średnia zawartość związków żelaza podczas trzech wymian była niższa niż poprzednio i wyniosła $9,5 \text{ g Fe/m}^3$, a suchej pozostałości $248,5 \text{ g/m}^3$. Powyższe ustalenia potwierdzają tezę o zmniejszającej się dynamice wypłukiwania zanieczyszczeń z danego rurociągu wraz z czasem trwania płukania (krotnością wymiany wody) ze względu na ograniczone zasoby osadów miękkich w sieci osiedlowej.

Następne cztery próbki (nr 9 ÷ 12) pobrano podczas płukania rurociągu $\phi 100$ w ul. Armii Ludowej według wariantu 2C (rys. 2). W tym wypadku mniejsza wartość prędkości od oczekiwanej jest także skutkiem niezamknięcia zasuwy nr 588 (tab. 1). W efekcie około 50% objętości strumienia popłuczyn stanowił przepływ równoległy rurociągami płukanymi w poprzednich wariantach 2A i 2B. Tak jak poprzednio, jakość popłuczyn stanowi wypadkową mieszania się wód popłucznych o różnym stopniu zanieczyszczenia ze względu na ich różne pochodzenie (dopływ wody uprzednio płukanymi rurociągami w ul. Iwazkiewicza i ul. Gorajskiego). W odróżnieniu do wariantów 2A i 2B, tym razem warto odnotować systematyczny wzrost stężenia związków żelaza od $3,3$ do $17,3 \text{ g Fe/m}^3$ podczas trzech kolejnych wymian wody w rurociągu. Wydłużenie czasu potrzebnego do maksymalnego wypłukiwania zanieczyszczeń należy wiązać z faktem,

że płukanie sieci według wariantu 2C odbywało się z ponad 2-krotnie mniejszą prędkością (1-1,2 m/s), chociaż długość płukanych rurociągów wzrosła do 1046 m, lecz tylko 39% stanowią przewody płukane po raz pierwszy. Średnia zawartość związków żelaza po czterech wymianach wody wyniosła 10,2 g Fe/m³, a suchej pozostałości 203 g/m³.

W wariantcie 2F płukano rurociąg w ul. Cieszkowskiego (rys. 2) o długości 550 m. Realizacja wariantu 2F nastąpiła po prawie 2-godzinnej przerwie spowodowanej poszukiwaniem i lokalizacją zamkniętej zasuwy na wyznaczonej trasie przepływu popłuczyn w scenariuszu płukania. Niestety pobór próbek w wariantcie 2F był wyraźnie spóźniony, co spowodowało, że reprezentują one stan sieci po jej płukaniu. Średnia zawartość związków żelaza podczas płukania od 4 do 15 wymiany wody wyniosła tylko 0,92 g Fe/m³, a suchej pozostałości 162,5 g/m³. Wyniki te dowodzą, że zasoby zgromadzonych osadów miękkich uległy wyczerpaniu już po czwartej wymianie wody w płukanym rurociągu z prędkością 2 m/s.

4.3. Wpływ czasu płukania na wypłukiwanie związków żelaza

Płukanie sieci osiedlowej kontynuowano następnego dnia według kolejnych wariantów 2D, D2, D1, G (rys. 2). W trakcie kilkunastogodzinnej przerwy zachowano ukierunkowanie przepływu wskutek pozostawienia zamkniętych zasuw. W drugim dniu płukania pobrano kolejnych 10 próbek z hydrantów A i C. Analogicznie jak poprzednio ustalono pochodzenie każdej z próbek (tab. 2).

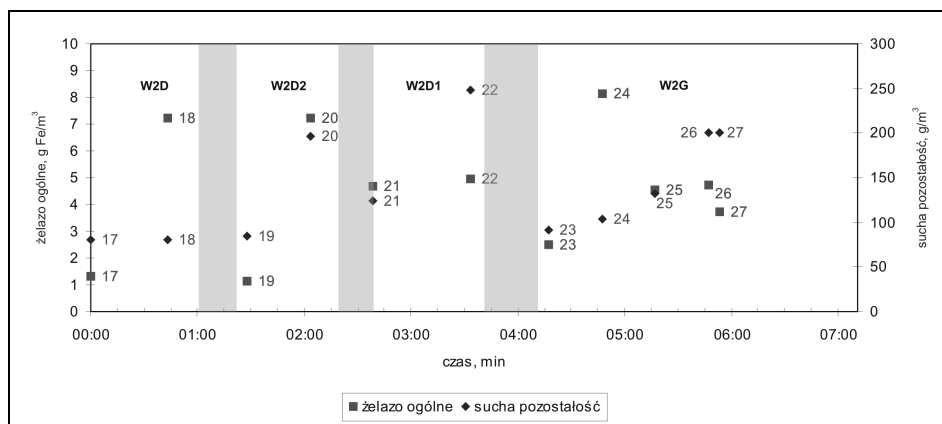
Tab. 2. *Identyfikacja prędkości i czasu przepływu popłuczyn dla próbek z drugiego dnia płukania*

Tab. 2. *Identification of flow velocity and washings flow time from the second day of flushing*

Nr próbki/hydrant	Wariant	Pochodzenie popłuczyn w próbce/krotność wymiany wody	Prędkość przepływu m/s	Czas jednorazowej wymiany min
H _A	2D	odcinek 227+ 80% dopływu przez otwarte zasuwy 232 i 588 (rys. 2)	0,6	8,1
17		początek 1-wymiany		
18		6-wymiana		
H _A	2D2	odcinek 224+ 80% dopływu przez otwarte zasuwy 232 i 588	0,6	8,1
19		początek 1-wymiany		
20		6-wymiana		
H _A	2D1	odcinek 225+ 80% dopływu przez otwarte zasuwy 232 i 588	0,6	8,1
21		początek 1-wymiany		
22		8-wymiana		
H _C	2G	cała sieć osiedlowa	1,0	14,0
23		uruchomienie zrzutu		
24		3-wymiana		
25		5-wymiana		
26		7-wymiana		
27		8-wymiana		

Celem wariantu 2D, D1, D2 było płukanie trzech odcinków rurociągu (spinek) o łącznej długości 250 m, na których były zamknięte zasuwy w poprzednich realizacjach (rys. 2). Niestety przebieg płukania był niezgodny ze scenariuszem, gdyż dwie zasuwy (odcinek nr 232 i 588) nie zostały zamknięte. W efekcie wskazane odcinki rurociągu płukano z prędkością zaledwie 0,62 m/s, a równocześnie kontynuowano proces płukania na licznych odcinkach sieci osiedlowej o łącznej długości 1420 m ze średnią prędkością 1,7 m/s. W tej sytuacji objętość strumienia wody przepływającej przez płukany rurociąg stanowiła zaledwie 18,8% całkowitego odpływu. Próbki nr 17, 19, 21 pobrano z hydrantu A zlokalizowanego na ul. Orzeszkowej w trakcie uruchamiania zrzutu. Z tego powodu świadczą one o jakości popłuczyn w sieci osiedlowej po jej płukaniu poprzedniego dnia. Z kolei próbki nr 19, 20, 22 wskazują, że wielokrotna wymiana wody w sieci osiedlowej z prędkością 1,7 m/s powoduje dalsze wypłukiwanie głównie związków żelaza.

W wariantcie 2G przystąpiono do ostatecznego usunięcia zanieczyszczeń z całej sieci, w tym szczególnie na odcinkach z uprzednio zamkniętymi zasuwami. W czasie 128 minut trwania realizacji wariantu 2G (9 wymian) pobrano próbki nr 23 do 27 z hydrantu H_c (rys. 2). Podwyższona zawartość żelaza ogólnego we wszystkich próbkach świadczy, że proces jego wypłukiwania z sieci osiedlowej nie został zakończony pomimo wielokrotnej wymiany wody w każdym rurociągu (tab. 1). Żeliwne rurociągi sieci osiedlowej podczas przepływu wody ze średnią prędkością 1 m/s (max. 4,2 m/s na odcinku 204 o długości 45 m) stanowią nadal źródło związków żelaza na poziomie około 5 g Fe/m³. Równocześnie wyraźnemu zmniejszeniu uległy zasoby pozostałych substancji organicznych i mineralnych, o czym świadczy stężenie suchej pozostałości porównywalne z jakością wody uzdatnionej wtłaczanej do sieci (rys. 4).



Uwaga: próbki popłuczyn zestawiono na rys. 4 w rzeczywistym czasie ich poboru

Rys. 4. Jakość popłuczyn podczas płukania sieci osiedlowej według wariantu 2D, D2, D1, G

Fig. 4. Washings quality from flushing water distribution system according to variants 2D, D2, D1, G

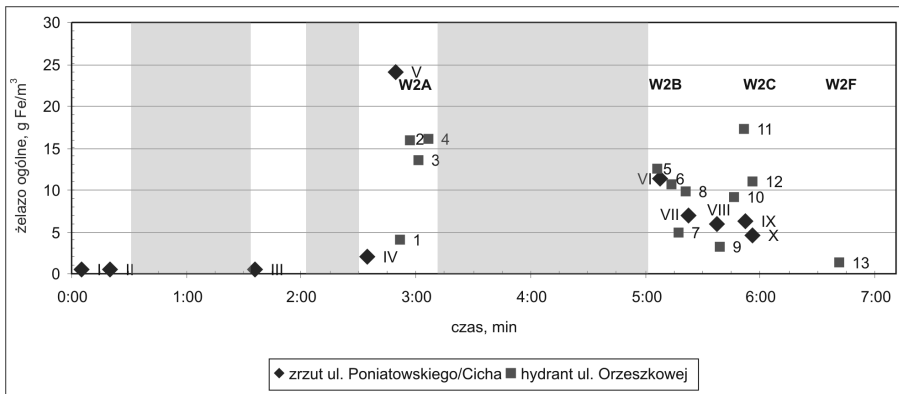
5. Wyniki badań próbek pobranych z komory spustowej

5.1. Wpływ czasu zatrzymania przepływu w magistrali $\phi 300$ na sedymentację cząstek stałych i zawieszonych

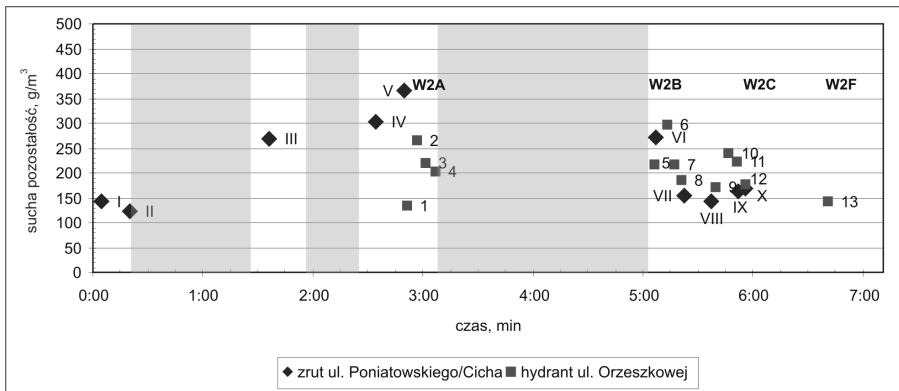
Odptyw popłuczyn z rejonu płukania do zrzutu odbywał się najpierw rurociągiem $\phi 200$ długości 240 m, a następnie odcinkiem magistrali $\phi 300$ długości 1005 m wydzielonym zamkniętymi zasuwami z pierścieniowej struktury sieci (rys. 2).

W pierwszym dniu trzykrotnie zamykano zasuwę na zrzucie odpowiednio na okres: 50, 27 i 111 minut po wykonaniu każdej z czterech wersji płukania 2A, B, C, F (rys. 5).

a)



b)



Uwaga: próbki pobrane z hydrantu umieszczono na rys. 5 z opóźnieniem czasowym, tj. w chwili dopływu do zrzutu strumienia popłuczyn, który reprezentują, co umożliwi analizę porównawczą.

Rys. 5. Jakość popłuczyn w odpływie magistralą $\phi 300$ do zrzutu podczas płukania sieci pierwszego dnia według wariantów 2A, B, C, F: a) żelazo ogólne, b) sucha pozostałość

Fig. 5. Washings quality at the main pipe 300 mm outflow during the first day of flushing according to variants 2A, B, C, F: a) total iron, b) total solids.

W zaistniałej sytuacji zgromadzony materiał empiryczny pozwala prześledzić wpływ czasu zatrzymania przepływu w magistrali $\phi 300$ na kształtowanie się jakości popłuczyn ze względu na jej funkcję jako zbiornika retencyjnego i osadnika (pkt 3).

W trakcie realizacji wariantów 2A, B, C i F pobrano pierwszego dnia 10 próbek popłuczyn z komory spustowej w różnych odstępach czasu (oznaczenie nr I-X na rys.5).

Popłuczyny z realizacji płukania według wariantu 2A dopłynęły do zrzutu po 145 minutach. (rys. 5). Z tego powodu pierwsze cztery próbki reprezentują jakość wody znajdującej się na magistrali $\phi 300$ przed rozpoczęciem płukania. Różnica pomiędzy próbkami polega na długości drogi przemieszczania się strumienia wody w magistrali do zrzutu odpowiednio na odcinku 30, 220, 450 i 1000 m. Im dłuższa droga przepływu popłuczyn tym potencjalnie większa możliwość uruchamiania zgromadzonych zanieczyszczeń. Z tego powodu w czwartej próbce odnotowano czterokrotny wzrost stężenia związków żelaza do $2,09 \text{ g Fe/m}^3$, a także ponad dwukrotny wzrost suchej pozostałości do 302 g/m^3 , jako efekt splukiwania wewnętrznej powierzchni ściany magistrali $\phi 300$ na całej jej długości.

Piątą próbkę pobrano ze zrzutu w chwili, gdy następował odpływ popłuczyn po 1-krotnej wymianie wody w płukanym rurociągu według scenariusza 2A (rys. 5). W odpływie popłuczyn zrzutem odnotowano największe wartości stężenia odpowiednio: żelaza ogólnego 24 g Fe/m^3 i suchej pozostałości 366 g/m^3 . Wartości te są wyższe od odnotowanych w próbce pobranej z hydrantu, która zawierała $16,1 \text{ g Fe/m}^3$ żelaza ogólnego i 204 g/m^3 suchej pozostałości. Różnica wskazuje na znaczący udział zanieczyszczeń zgromadzonych w magistrali $\phi 300$ w kształtowaniu jakości popłuczyn, ponieważ odnotowano ponad 2-krotny wzrost stężenia suchej pozostałości, szczególnie wyraźny po pierwszej 50 minutowej przerwie w odpływie. Intensywność uruchamiania związków żelaza w stosunku do pozostałych zanieczyszczeń nastąpiła z pewnym opóźnieniem, dopiero po wzroście prędkości w magistrali $\phi 300$ do $0,32 \text{ m/s}$. Z obserwacji tych wynika, że odnotowane wtórne zanieczyszczenie popłuczyn spowodowały zakłócenia przepływu w magistrali $\phi 300$ przez dwukrotne zamknięcie zasuwy na zrzucie.

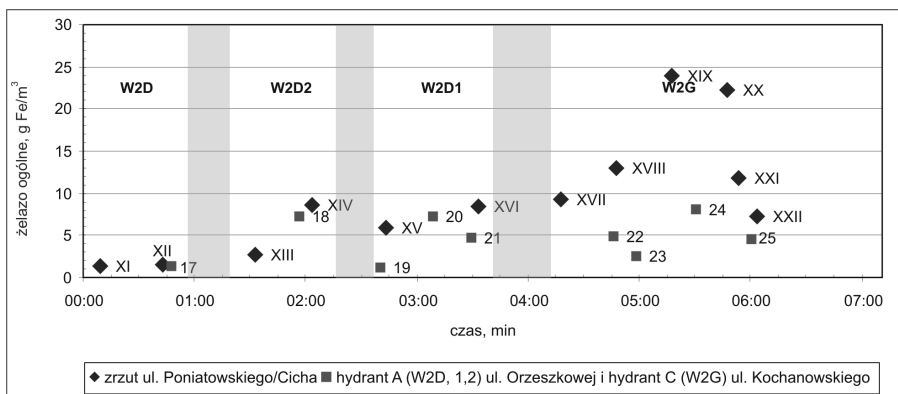
Trzecia przerwa w odpływie popłuczyn magistralą $\phi 300$ trwała aż 111 minut. W magistrali znajdowały się w tym czasie popłuczyny z realizacji płukania według wariantu 2B i 2C, które miały sprzyjające warunki do sedimentacji substancji stałych i zawieszonych. Widoczny efekt stagnacji popłuczyn w magistrali odnotowano w kolejnych pięciu próbkach, które pobrano po ponownym uruchomieniu zrzutu. Szósta próbkę pobrano po 5 minutach od całkowitego otwarcia zasuwy, a cztery następne w odstępach 15-minutowych. W tym okresie odpływ popłuczyn magistralą odbywał się ponownie z prędkością $0,22 \text{ m/s}$, stąd czas 1-krotnej wymiany wyniósł 76 minut. W szóstej próbce pobranej ze zrzutu stężenie suchej pozostałości i żelaza ogólnego jest na poziomie porównywalnym z zawartością zanieczyszczeń w odpływie z hydrantów podczas realizacji wariantu 2B. (rys. 3). W następnych czterech próbkach wartości stężenia zanieczyszczeń mają wyraźną tendencję malejącą, chociaż powinny być to popłuczyny z realizacji wariantu 2C (rys. 5). Brak współzależności pomiędzy stężeniem zanieczyszczeń w odpływie zrzutem i hydrantem należy tłumaczyć: po pierwsze - sedimentacją zanieczyszczeń w prawie dwugodzinnym okresie stagnacji popłuczyn w magistrali $\phi 300$, a po drugie - spływem popłuczyn z prędkością $0,22 \text{ m/s}$, która odpowiada normalnym warunkom eksploatacji. Podczas dalszej 2-godzinnej stabilizacji prędkości w magistrali $\phi 300$ nadal występują warunki sprzyjające sedimentacji zanieczyszczeń, stąd mniejsze stężenie zanieczyszczeń w popłuczynach dopływających do komory spustowej aniżeli pobranych z hydrantu w rejonie płukania.

5.2. Wpływ wzrostu prędkości i krotności wymiany wody w magistrali $\phi 300$ na uruchomienie i transport zanieczyszczeń

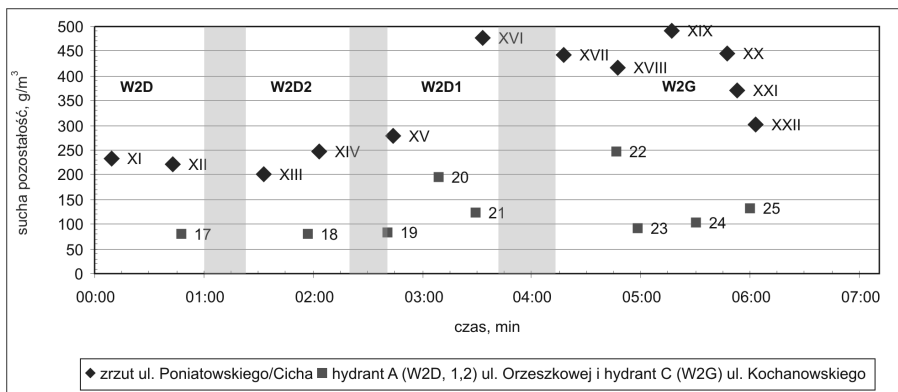
Kontynuację płukania sieci osiedlowej następnego dnia rozpoczęto od realizacji wariantu 2D. Przepływ popłuczyn do zrzutu odbywał się magistralą $\phi 300$ z prędkością 0,38 m/s, tj. wartością prawie dwukrotnie większą od odnotowanej w ostatniej fazie odpływu poprzedniego dnia.

Próbki popłuczyn nr XI i XII pobrano ze zrzutu odpowiednio: po 9 i 43 minutach od jego uruchomienia. Ich jakość świadczy o początkowym stanie zanieczyszczenia magistrali $\phi 300$, ponieważ potrzebny czas spływu popłuczyn z realizacji wariantu 2D wyniósł 48 minut (rys. 6).

a)



b)



Uwaga: jak na rys. 5.

Rys. 6. Jakość popłuczyn w odpływie magistralą $\phi 300$ do zrzutem podczas płukania sieci drugiego dnia według wariantów 2D, 2D2, 2D1, 2G: a) żelazo ogólne, b) sucha pozostałość

Fig. 6. Washings quality at the main pipe 300 mm outflow during the first day of flushing according to variants 2D, 2D2, 2D1, 2G: a) total iron, b) total solids

Po kolejnym uruchomieniu zrzutu nastąpił wzrost prędkości w magistrali $\phi 300$ do 0,38 m/s, co zapoczątkowało proces wypłukiwania i transportu zakumulowanych zanieczyszczeń z poprzedniego dnia, gdy jej wartość wynosiła 0,22 m/s. Z porównania jakości popłuczyn w początkowej fazie odpływu wynika, że drugiego dnia płukania, w stosunku do pierwszego, stężenie żelaza ogólnego wzrosło trzykrotnie, a suchej pozostałości prawie dwukrotnie. W tym czasie odbywał się spływ popłuczyn, które pochodzą z połowy trzeciej wymiany wody w rurociągu płukanym według wariantu 2D. Porównanie stężenia suchej pozostałości w próbkach nr 17-19 pobranych z hydrantu do 2,5-krotnie większych wartości w początkowej fazie spływu zrzutem pokazuje, że popłuczyny z sieci osiedlowej uległy dodatkowemu zanieczyszczeniu w magistrali $\phi 300$. Bilans masy zanieczyszczeń w popłuczynach (patrz: pkt 6, tab. 3) dowodzi, że nastąpiło wypłukiwanie zanieczyszczeń, które uległy sedymentacji poprzedniego dnia podczas odpływu z prędkością 0,22 m/s.

W środkowej fazie odpływu zrzutem (od 2 do 4 godziny spływu) stężenie żelaza ogólnego w czterech kolejnych nr XIV-XVII próbkach jest na poziomie 8 g Fe/m³. Podobne wartości uzyskano w próbkach pobranych z hydrantu podczas realizacji wersji 2D2 i 2D1, co potwierdza ich pochodzenie z płukania sieci osiedlowej. Analiza porównawcza wskazuje zatem, że podstawowym źródłem związków żelaza znajdujących się w środkowej fazie spływu popłuczyn zrzutem jest ich bezpośrednie wypłukiwanie i transport z sieci osiedlowej, natomiast pozostałe substancje organiczne i mineralne pochodzą z magistrali $\phi 300$ wskutek stopniowego rozmywania osadów wytrąconych i odłożonych poprzedniego dnia.

Z kolei w próbce nr XVI, w porównaniu do poprzedniej, stężenie suchej pozostałości wzrosło o 41% do poziomu 476 g/m³, przy zawartości żelaza ogólnego 8,4 g/m³ (rys. 6 b). Gwałtownego wzrostu stężenia suchej pozostałości w odpływie popłuczyn zrzutem nie można uzasadnić efektem płukania według wersji 2D1, ponieważ jego wartość w próbce nr 21 pobranej z hydrantu jest trzykrotnie mniejsza. Wyjaśnienia należy upatrywać w udziale magistrali $\phi 300$ w kształtowaniu jakości popłuczyn wskutek stopniowego wypłukiwania błony biologicznej i osadów z powierzchni jej ścianek wraz z upływem czasu działania zrzutu, oprócz rozmywania uprzednio nagromadzonych zanieczyszczeń. Proces wypłukiwania osadów w magistrali $\phi 300$ trwał ponad 2 godziny, następnie były one transportowane do zrzutu ze średnią prędkością 0,36 m/s.

Najwyższą zawartość zanieczyszczeń w popłuczynach odnotowano w próbce nr XIX pobranej ze zrzutu po 318 minutach od rozpoczęcia płukania. Jednak po uwzględnieniu trzech przerw w odpływie (82 minuty), zrzut był czynny przez 236 minut do momentu pobrania próbki XIX, w której stężenie żelaza ogólnego wyniosło 24 g Fe/m³, a suchej pozostałości 490 g/m³. W tym okresie nastąpiła prawie 5-krotna (4,8) wymiana wody w magistrali $\phi 300$ ze średnią prędkością 0,39 m/s, ponieważ po trzeciej wymianie wody wartość jej wzrosła z 0,36 do 0,43 m/s.

Kulminacja zanieczyszczeń w odpływie popłuczyn, które pochodzą z ostatniej fazy płukania według wariantu 2G, nie wynika z wartości stężenia suchej pozostałości i żelaza ogólnego w próbkach nr 23 i 24 pobranych z hydrantu, ponieważ są one od 3 do 5-krotnie mniejsze aniżeli w odpływie ze zrzutu (rys. 6). W tej sytuacji jedynym źródłem pochodzenia zanieczyszczeń jest magistrala $\phi 300$, w której nastąpiła wielokrotna wymiana wody ze zwiększoną prędkością. W celu empirycznego potwierdzenia tej tezy wykonano bilans masy zanieczyszczeń w popłuczynach pobranych z hydrantów i komory spustowej (pkt 6, tab. 3).

6. Bilans masy zanieczyszczeń w popłuczynach

Bezpośrednio z płukanej sieci przewodów żeliwnych o łącznej długości 2,56 km usunięto 55,2 kg substancji mineralnych i 64,3 kg organicznych, w tym 4 kg związków żelaza (tab. 3).

Tab. 3. Bilans masy zanieczyszczeń w popłuczynach na podstawie próbek pobranych z hydrantów i zrzutu bez uwzględnienia opóźnienia czasowego w odpływie magistralą $\phi 300$

Tab. 3. Pollutions balance in washing obtained from the samples taken from hydrants and from the outlet of main pipe 300 mm, without a lag-time taking into account

Wariant	Objętość popłuczyn m ³	Masa wypłukanych			
		związków żelaza		suchej pozostałości	
		zrzut	hydrant	zrzut	hydrant
		kg Fe	kg Fe	kg	kg
2A	37	0,02	0,53	5,03	8,39
2B	25	0,02	0,26	7,54	6,10
2C	49	0,56	0,53	16,68	11,12
2F	105	0,60	0,10	18,91	18,04
Suma I dzień	216	1,20	1,42	48,17	43,65
2D	95	0,13	0,47	18,45	9,02
2D2	74	0,39	0,32	16,27	10,83
2D1	91	0,61	0,50	31,46	18,91
2G	223	3,53	1,31	95,89	37,07
Suma II dzień	483	4,66	2,60	162,07	75,83
Łącznie I+II	699	5,87	4,02	210,24	119,48

Z kolei do komory spustowej dopłynęło 700 m³ popłuczyn, w które zawierały 103 kg substancji mineralnych i 107 kg organicznych, w tym 5,9 kg związków żelaza. Różnica wskazuje, że zrzutem odpłynęło 90,8 kg (43,2%) zanieczyszczeń więcej aniżeli wynikałoby z jakości próbek popłuczyn pobranych z hydrantów, w tym 1,8 kg (30,7%) związków żelaza. Do nadwyżki masy zanieczyszczeń zapewne przyczyniły się wypłukiwane osady i błona biologiczna bezpośrednio z magistrali żeliwnej $\phi 300$ i przewodu odpływowego $\phi 200$ podczas realizacji wariantu 2B, C, D, F.

Z bilansu masy zanieczyszczeń w popłuczynach wynika, że w drugim dniu płukania sieci osiedlowej według wariantu 2D i 2G usunięto 162,1 kg substancji organicznych i mineralnych, w tym 4,7 kg związków żelaza. Wielkości te są ponad 3 razy większe aniżeli w odpływie zrzutem pierwszego dnia, chociaż wówczas płukanie obejmowało

90% długości sieci osiedlowej według czterech wersji 2A, B, C, F, lecz zużyto tylko 31% objętości wody (tab. 3).

Szczególnie efektywna była końcowa faza odpływu popłuczyn zrzutem w drugim dniu podczas realizacji płukania według wariantu 2G, ponieważ w spływie znajdowało się 95,9 kg zanieczyszczeń, w tym 3,5 kg związków żelaza, co stanowi odpowiednio: 45,6% wszystkich zanieczyszczeń, w tym 60,1% związków żelaza. Dodać należy, że podczas realizacji wariantu 2G zużyto 35% objętości wody, czyli więcej niż pierwszego dnia płukania.

Analiza porównawcza wyników badań laboratoryjnych popłuczyn pobranych z hydrantów i zrzutu wykazała, że magistrala $\phi 300$ pełniła rolę zbiornika retencyjnego i osadnika. Okresowa stagnacja popłuczyn z powodu przerw w odpływie sprzyjała sedymentacji zanieczyszczeń, co istotnie opóźniło ich spływ do kanalizacji.

Opisane zjawisko sedymentacji cząstek substancji organicznych i mineralnych w magistrali $\phi 300$, ich czasowej akumulacji, a następnie wypłukiwania, w tym szczególnie związków żelaza, można odnieść poprzez analogię do przebiegu wtórnego zanieczyszczenia transportowanej wody w warunkach codziennej eksploatacji przewymiarowanej sieci wodociągowej.

7. Podsumowanie i wnioski

W badaniu wpływu hydrauliki na wtórne zanieczyszczenie wody wykorzystano podobieństwo relacji przyczynowo-skutkowych podczas płukania przewodów a czynników biorących udział w przemianach jakościowych transportowanej wody w przewymiarowanej sieci wodociągowej.

Przedstawiona analiza materiału empirycznego, który zebrano w trakcie realizacji płukania sieci wodociągowej metodą ukierunkowanego przepływu dowodzi, że:

3. Turbulencja wody jest bezpośrednią przyczyną wypłukiwania i unoszenia cząstek osadu oraz błony biologicznej wraz z popłuczynami. Dwukrotny wzrost prędkości popłuczyn do 0,4 m/s był wystarczającym impulsem do uruchomienia w magistrali $\phi 300$ uprzednio skumulowanych zanieczyszczeń.
4. Wybrane przykłady płukania sieci wodociągowej dowodzą, że intensywność wypłukiwania zanieczyszczeń zależy od:
 - wzrostu prędkości wody w stosunku do dobowej równowagi hydraulicznej kształtowanej przez losowy charakter poboru wody w sieci wodociągowej,
 - czasu trwania oddziaływania turbulencji (krotności wymiany wody w rurociągu),
 - zasięgu oddziaływania wymuszenia, ponieważ im dłuższa droga przepływu popłuczyn, tym większa potencjalna możliwość wypłukiwania zanieczyszczeń..
5. Podobny efekt wypłukiwania zanieczyszczeń można osiągnąć w krótszym czasie przy zapewnieniu prędkości optymalnej dla danego rodzaju i konsystencji osadów albo przez wydłużenie czasu oddziaływania, lecz przy mniejszej jej wartości.
6. Ograniczone zasoby osadów miękkich i słabo związanych z podłożem w sieci wodociągowej powodują, że:
 - maksymalną ilość wypłukiwanych zanieczyszczeń uzyskuje się tylko podczas optymalnej prędkości przepływu, a jej dalszy wzrost jest nieskuteczny,
 - zmniejsza się dynamika wypłukiwania zanieczyszczeń z danego rurociągu wraz z czasem trwania płukania (krotnością wymiany wody).

7. Czasowe zatrzymanie przepływu w sieci wodociągowej powoduje sedymentację cząstek stałych i zawieszonych, a jego powtórne wznowienie wiąże się z ich uruchomieniem z intensywnością zależną od poziomu prędkości (podobieństwo do kształtowania się wtórnego zanieczyszczenia transportowanej wody).
8. Czynniki hydrauliczne (prędkość, czas przetrzymania wody), które kształtują ciągle proces starzenia się przewodów, jak również kinetykę wtórnego zanieczyszczenia wody w sieci wodociągowej, mogą być kontrolowane i regulowane przez następujące działania eksploatatora [4]:
 - skuteczne i systematyczne płukanie sieci metodą ukierunkowanego przepływu (sposób doraźny),
 - ciągle wymuszenie kontrolowanego ruchu wody przez odpowiednie sterowanie zasuwami strumienia przepływu (sposób docelowy).

Bibliografia

- [1] Celerier J. L. Zagadnienia jakości wody w eksploatacji sieci wodociągowej. W: (Materiały) Gdańska Fundacja Wody. Gdańsk 26–28 listopada, 1996, 1–77.
- [2] Emde K.M.E. and Smith D.W. Optimizing distribution system flushing programs. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna “Zaopatrzenie w wodę miast i wsi” Poznań 1996, 459-469.
- [3] Kulbik M. Ocena skuteczności płukania przewymiarowanych sieci wodociągowych metodą ukierunkowanego przepływu na podstawie jakości popłuczyn. *Ochrona Środowiska*, 2008, 30 (1) 31-38.
- [4] Kulbik M. Komputerowa symulacja i badania terenowe miejskich systemów wodociągowych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2004, (49) 211.
- [5] Kulbik M. Jakość wody w sieci wodociągowej w warunkach wymuszenia ukierunkowanego przepływu. *Informacja INSTAL* 1999, 189 (11) 9–14.
- [6] Mansuy N. Microbial assessment of plugging in the laboratory. Technical workshop on Contamination and Control of Iron Bacteria Infested. University of Regina. Canada 11-12 November 1986.
- [7] Piriou P., Dukan S. and Kiene L. Modelling bacteriological water quality in drinking water distribution systems. *Wat. Sci. Tech.* 1998, 38 (8-9) 299-307.

