

Dariusz Kowalski, Beata Kowalska, Marian Kwietniewski, Anna Musz

## Przepływy zwrotne w rozgałęzieniowej sieci wodociągowej

Podstawowym celem każdego systemu wodociągowego jest dostawa wody w odpowiedniej ilości i o odpowiedniej jakości do wszystkich odbiorców. Wymaga to od operatorów tych systemów stałej troski zarówno o jakość wody wprowadzanej, jak i przesyłanej przez systemy dystrybucyjne. Obserwowane w Polsce zmniejszenie zużycia wody, a co za tym idzie znaczące zmniejszenie prędkości jej przepływu w przewodach sieciowych, stało się szczególnie widoczne pod koniec lat 90. ubiegłego wieku [1, 2] i doprowadziło do nasilenia zjawiska wtórnego zanieczyszczenia wody w sieci i urządzeniach wodociągowych [3, 4]. Podobny problem obserwowano również w innych krajach. W literaturze dostępne są informacje dotyczące wtórnego zanieczyszczenia wody w przewodach wodociągowych, którego powodem jest nie tylko mniejsze zużycie wody, ale również, w dużym stopniu, materiały wykorzystane do budowy sieci [5]. Istotne są tu między innymi produkty korozji przewodów odkładające się w formie osadów [6, 7], które w sprzyjających okolicznościach mogą być zrywane i transportowane do odbiorców wody [6, 8]. Zjawisku temu starają się przeciwdziałać operatorzy sieci wodociągowych, realizując szereg działań zapobiegawczych [6, 7, 9, 10]. W przypadku rozległych systemów wodociągowych działania te niestety nie prowadzą do skutecznej ochrony przed zjawiskiem wtórnego zanieczyszczenia wody [7, 11].

Wśród wielu przyczyn wywołujących skargi odbiorców na jakość wody wymienia się także niekontrolowane zrywanie osadów zalegających w przewodach, wywołane nagłym wzrostem prędkości lub zmianą kierunku przepływu wody [12]. Zmiany kierunku przepływu wody najczęściej obserwowane są w sieciach pierścieniowych, ponieważ zmieniający się w ciągu doby rozkład poboru wody w jednostkach osadniczych może prowadzić do odwrócenia kierunku jej przepływu w niektórych przewodach tych sieci [13]. Takie podejście sugeruje, że w sieciach rozgałęzieniowych nie dochodzi do podobnych sytuacji. Zdaniem autorów, obok rozkładu poboru wody, przyczyną zmian kierunku jej przepływu może być nagła zmiana ciśnienia, wywołana np. przez uderzenie hydrauliczne. Zjawisko takie ma charakter krótkotrwały, może jednak spowodować

lokalnie gwałtowną zmianę kierunku i prędkości przepływu wody, co może prowadzić do zerwania zalegających w przewodach osadów, a w dalszej kolejności – ich transport do odbiorców. Brak stabilności ciśnienia wody w sieci wodociągowej może stanowić przyczynę częstych i – z racji ich krótkotrwałości – nie zawsze rejestrowanych lokalnych zmian kierunku przepływu wody w przewodach sieciowych. Zjawisko takie może więc dotyczyć zarówno sieci pierścieniowych, jak i rozgałęzieniowych.

Celem artykułu było wykazanie, że zjawisko przepływu wstecznego (nazywane także przepływem zwrotnym) w przewodach sieci wodociągowych może być obecne lokalnie również w sieciach rozgałęzieniowych. Do wywołania tych przepływów wystarczy – zdaniem autorów – stosunkowo niewielka nagła zmiana ciśnienia, co sugeruje możliwość częstego występowania tego zjawiska. Przedstawione w artykule rozważania oparto zarówno na wynikach badań rzeczywistej rozgałęzieniowej sieci wodociągowej, jak również na wynikach obliczeń symulacyjnych zrealizowanych z wykorzystaniem programu FLUENT.

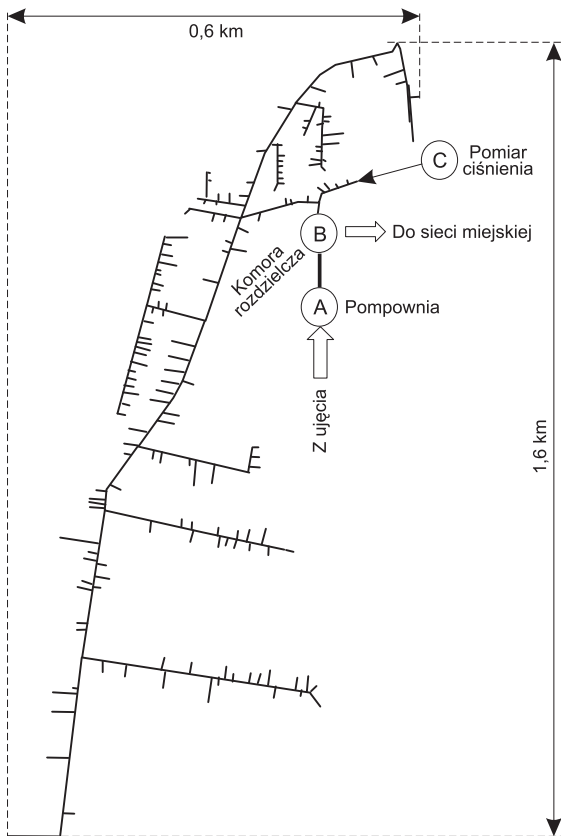
### Opis obiektu i metodyka badań

Badana sieć znajduje się na obrzeżach dużego miasta i została wybudowana w latach 1989–1990. Zasila ona w wodę osiedle mieszkaniowe ze znaczną przewagą zabudowy jednorodzinnej (600 mieszkańców i 150 przyłączy wodociągowych) oraz cztery małe zakłady usługowe. Średnie dobowe zapotrzebowanie na wodę wynosi 87,4 m<sup>3</sup>/d. Schemat struktury sieci pokazano na rysunku 1. Zarówno przewody w komorze rozdzielczej B, jak również rurociąg tranzytowy (pompownia – komora B – miejska sieć zewnętrzna) wykonane są ze stali, natomiast pozostała część sieci z PVC. Objętość wody zgromadzonej w sieci osiedlowej oszacowano na ok. 106 m<sup>3</sup>.

Ujmowana woda podziemna dostarczana jest do dwóch zbiorników wyrównawczych, skąd bez oczyszczania, za pośrednictwem pompowni II stopnia A (rys. 1) wprowadzana jest (przewodem stalowym o śr. 500 mm) do systemu dystrybucyjnego. W komorze rozdzielczej B (rys. 2), następuje podział transportowanej wody, przy czym jej część (przewodem stalowym o śr. 200 mm) trafia do rozpatrywanej sieci osiedlowej. Pozostała woda transportowana jest tranzytowym przewodem stalowym o średnicy 500 mm i długości ok. 1 km do sieci miejskiej. Objętość wody zawartej w przewodzie pomiędzy pompownią II stopnia a komorą rozdzielczą wynosi ok. 7,1 m<sup>3</sup>. Wyznaczona na podstawie wskazań przepływomierza, zainstalowanego na

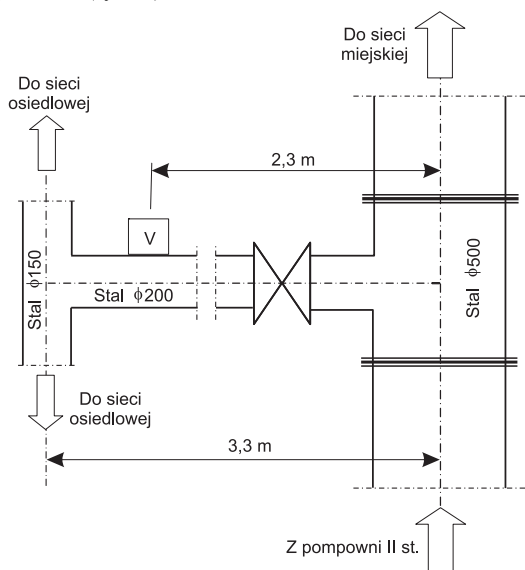
Dr inż. D. Kowalski, dr hab. inż. B. Kowalska, mgr inż. A. Musz: Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Wodociągów i Kanalizacji, ul. Nadbystrzycka 40B, 20–618 Lublin  
[d.kowalski@wis.pol.lublin.pl](mailto:d.kowalski@wis.pol.lublin.pl)

Prof. dr hab. inż. M. Kwietniewski: Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków, ul. Nowowiejska 20, 00–653 Warszawa  
[marian.kwietniewski@is.pw.edu.pl](mailto:marian.kwietniewski@is.pw.edu.pl)

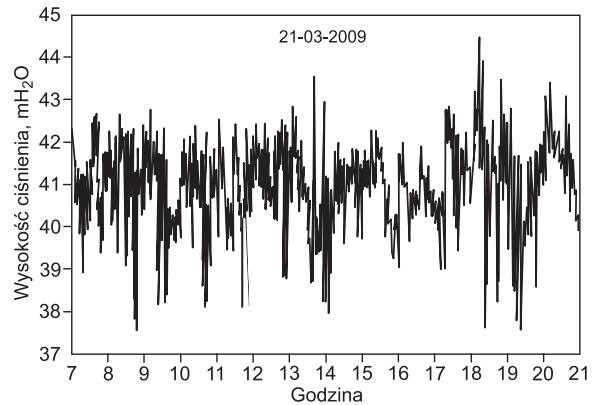


Rys. 1. Struktura badanej osiedlowej sieci wodociągowej  
Fig. 1. Structure of the housing-estate water distribution network

wyjściu z pompowni, średnia prędkość przepływu wody w przewodzie o średnicy 500 mm wynosiła 0,33 m/s. Wysokość ciśnienia na wyjściu z pompowni wahała się w granicach od 41 mH<sub>2</sub>O do 45 mH<sub>2</sub>O. Połączenie rozpatrywanej sieci osiedlowej z siecią miejską powoduje, że pomimo zastosowania regulacji ciśnienia wyjściowego z pompowni (przetwornica częstotliwości) w sieci osiedlowej występują wyraźne wahania ciśnienia wody. Ilustruje to przykładowy wykres zmian wysokości ciśnienia zmierzonego w punkcie C (rys. 1) za pomocą manometru hydrantowego CellBox H firmy Biatel (rys. 3).



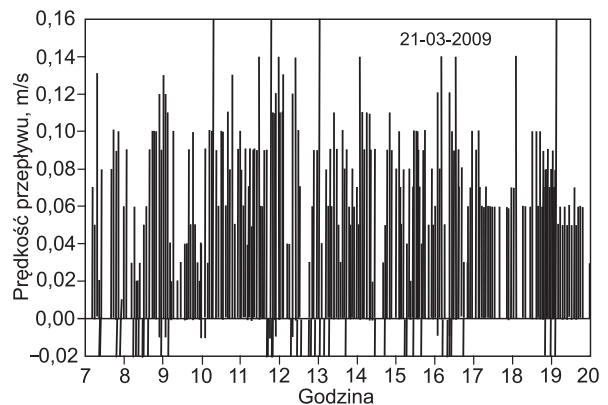
Rys. 2 Schemat węzła w komorze rozdzielczej (B) wraz z lokalizacją przenośnego przepływomierza (V)  
Fig. 2. Piping in the separation chamber (B) and location of the ultrasound flowmeter (V)



Rys. 3. Wyniki pomiaru wysokości ciśnienia wody w punkcie C (pomiar w odstępach co 30s)

Fig. 3. Results of pressure head measurements at point C performed at 30s intervals

Do pomiaru prędkości przepływu wody w przewodzie o średnicy 200 mm (zasilającym sieć osiedlową) w komorze rozdzielczej B (rys. 1) zastosowano przenośny ultradźwiękowy przepływomierz PORTAFLOW 300. Według danych producenta, próg rejestracji tego miernika wynosił 0,01 m/s, zaś błąd względny pomiaru  $\pm 2,0\%$ . Przepływomierz rejestruje prędkości przepływu wody uśrednione w przedziałach pięciosekundowych. Przykłady wskazań urządzenia przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wyniki pomiaru prędkości przepływu wody w punkcie V (pomiar w odstępach co 5s)

Fig. 4. Results of water flow velocity measurements at point V performed at 5s intervals

Maksymalna zarejestrowana prędkość przepływu wody transportowanej przez przewód zasilający rozpatrywaną sieć wodociągową wynosiła 0,16 m/s. W godzinach pomiarów (od 7:10 do 19:55) przepływomierz zarejestrował dodatkowo 61 wskazań, które wykazały ujemną wartość przepływu (wartość ujemna oznacza przepływ w kierunku odwrotnym do zadanego w ustawieniach miernika). W warunkach rozpatrywanej sieci oznaczało to przepływ zwrotny z sieci osiedlowej do głównego przewodu zasilającego sieć miejską. Spośród wszystkich zarejestrowanych wartości ujemnych, tylko w sześciu przypadkach pojawiły się one w kolejnych dwóch pomiarach (odczytach), przy czym w jednym przypadku wartości ujemne wystąpiły w trzech kolejnych odczytach. Oznacza to, że przepływ zwrotny był procesem krótkotrwałym. Zainstalowany miernik, ze względu na dokładność, nie był w stanie zarejestrować szczegółów przebiegu tego procesu. Dlatego też próbę rozpoznania szczegółów przebiegu zjawiska przepływów zwrotnych w rozpatrywanym przewodzie łączącym badaną sieć osiedlową z siecią miejską podjęto w oparciu o metody modelowania numerycznego.

Obliczenia numeryczne wykonano przyjmując założenie, że woda jest płynem ściśliwym. Sieć osiedlową potraktowano w tym przypadku jako szczelny zbiornik o określonej pojemności, połączony pojedynczym przewodem ze źródłem wody. Spadek wysokości ciśnienia w źródle, przy założeniu pełnej sztywności ścianek takiego zbiornika, można powiązać z objętością wody wypływającej ze zbiornika przez przewód przyłącza do źródła. Przy założeniu braku przepływu wody zarówno w przewodach sieci osiedlowej, jak i w układzie zasilającym pompownia–sieć miejska, zadanie to jest stosunkowo proste. Nie odzwierciedlałoby ono jednak warunków rzeczywistych. Uwzględnienie zjawiska przepływu wody w badanym układzie komplikuje rozważany problem, gdyż z niego wynika, że rozpatrywany układ nie może być w pełni szczelny (źródło–upust). Do rozwiązania tak postawionego zadania wykorzystano model numeryczny, który oparto na następujących równaniach:

– ciągłości przepływu [14,15]:

$$\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

– zachowania masy [16]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} u = 0 \quad (2)$$

– zachowania energii [17]:

$$\rho \frac{d}{dt} \left( \frac{u^2}{2} + e \right) = \rho f u + \operatorname{div}(P u) - \operatorname{div} j \quad (3)$$

– zachowania momentu pędu [18]:

$$\frac{d}{dt} \int_{\tau(S)} r \rho u \, d\tau = \int_{S(\epsilon)} r \rho f \, d\tau + \int_{S(\epsilon)} r p_n \, dS \quad (4)$$

W modelu konieczne okazało się również uwzględnienie tzw. lepkości turbulentnej ( $v_t$ ), która nie jest cechą fizyczną płynu, ale charakteryzuje przepływ [18]. Określono ją w oparciu o tzw. model k- $\epsilon$ , opisany wzorem:

$$v_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

W równaniach (1)–(5) zastosowano oznaczenia:

$C_\mu$  – stała

$k$  – energia kinetyczna,  $m^2/s^2$

$\epsilon$  – intensywność dyssypacji energii,  $1/s$

$v_x, v_y, v_z$  – składowe prędkości przepływu,  $m/s$

$x, y, z$  – współrzędne kierunkowe,  $m$

$\operatorname{div} u$  – miara prędkości względnej zmiany objętości płynu

$t$  – czas,  $s$

$S$  – powierzchnia płynna,  $m^2$

$r$  – wektor odległości elementu płynu od punktu, względem którego jest liczony moment ilości ruchu,  $m$

$\tau(S)$  – objętość płynna,  $m^3$

$f$  – gęstość rozkładu sił masowych,  $N/m^3$

$p_n$  – gęstość rozkładu sił powierzchniowych (wektor naprężenia),  $Pa$

$\rho$  – gęstość wody,  $kg/m^3$

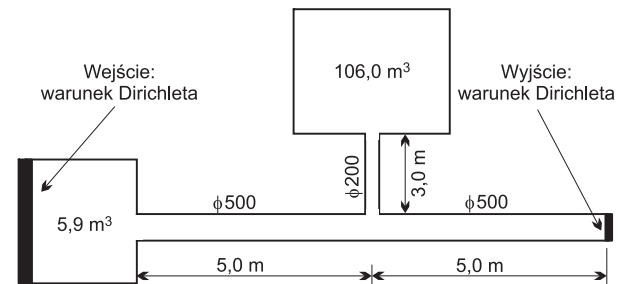
$P u$  – iloczyn tensora naprężenia i wektora prędkości,  $Pa \cdot m/s$

$e$  – energia wewnętrzna,  $m^2/s^2$

$j$  – wersor osi  $y$

Do budowy modelu wykorzystano program FLUENT 6.2 (Fluent Inc.), bazujący na metodzie elementów skończonych. W skład programu wchodzi preprocesor GAMBIT [19] oraz procesor i postprocesor FLUENT [20].

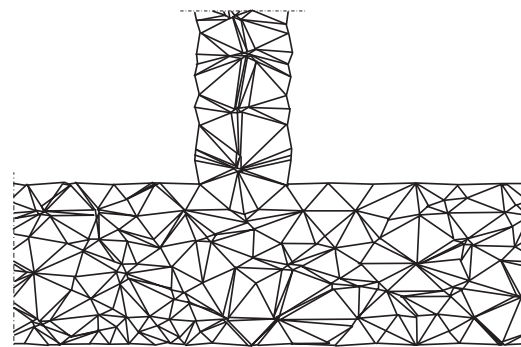
W modelu numerycznym, którego schemat ideowy przedstawiono na rysunku 5, rozpatrywaną sieć osiedlową reprezentuje szczelny zbiornik o sztywnych ściankach i pojemności  $106 m^3$ . W badaniach symulacyjnych założono brak wypływu wody ze zbiornika reprezentującego sieć osiedlową na zewnątrz układu (odpowiednik braku poboru wody z tej sieci). Założono również istnienie źródła (pompownia) oraz upustu (zewnętrzna, miejska sieć wodociągowa) wody. Układ źródło–upust (warunek wejściowy–warunek wyjściowy) wymusza przepływ wody w przewodzie tranzytowym o średnicy  $500 mm$  (rys. 5). Dodatkowo założono, że woda wypełniająca badany układ ma temperaturę  $10^\circ C$ .



Rys. 5. Schemat ideowy wykorzystanego modelu numerycznego wraz z warunkami brzegowymi

Fig. 5. Schematic diagram of the numerical model applied, including boundary conditions

Do budowy modelu numerycznego zastosowano warunki brzegowe Dirichleta, zwane także warunkami pierwszego rodzaju [18,19]. Reprezentowały one ciśnienie wejściowe na ściance zbiornika o pojemności  $5,9 m^3$ , reprezentującego układ przewodów łączących pompownię II stopnia (A – rys. 1) z komorą rozdzielczą (B – rys. 1) oraz ciśnienie wyjściowe na końcu przewodu głównego (rys. 5). Przepływ przez główny przewód o średnicy  $500 mm$  wymuszony był przez różnicę ciśnień podaną w obu tych warunkach. Założono, że początkowo wysokość ciśnienia wody w całym badanym układzie była równa zdefiniowanej przez wejściowy warunek brzegowy i wynosiła  $41 mH_2O$ . Jako warunek wymuszający przepływ zwrotny (ze zbiornika reprezentującego sieć osiedlową do przewodu o śr.  $500 mm$ ) zastosowano nagłą zmianę wysokości ciśnienia na końcu przewodu o średnicy  $500 mm$  (wyjście – rys. 5). Badania realizowano w układzie trójwymiarowym. Siatkę elementów skończonych opracowano w programie GAMBIT 2.1, wykorzystując typ schematu TGrid [19]. Fragment wykorzystanej siatki przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Siatka elementów skończonych trójnika łączącego przewód o śr.  $200 mm$  (który prowadzi do zbiornika i reprezentuje sieć osiedlową) z przewodem o śr.  $500 mm$  – fragment modelu

Fig. 6. Finite element mesh of the three-way pipe connecting tube  $d=200 mm$  (which leads to the tank and represents the housing-estate water distribution network) with tube  $d=500 mm$  – detail of the model

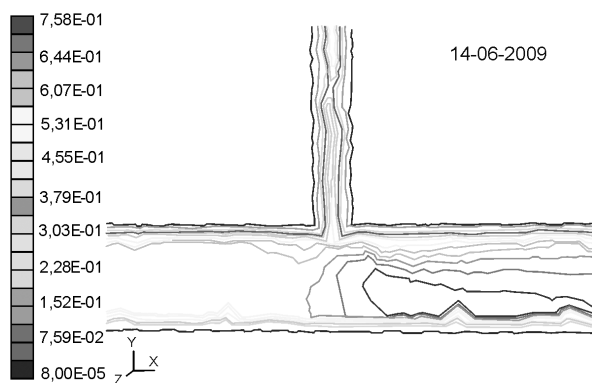
W dalszej części przeprowadzono parametryzację modelu, wprowadzając niezbędne dane opisujące materiał przewodów (stal) oraz właściwości płynu (temperatura, współczynnik ściśliwości i rozszerzalności termicznej, gęstość, współczynnik lepkości kinematycznej itp.). W badaniach symulacyjnych rozpatrzono dwa warianty. W pierwszym założono początkowy brak przepływu wody w całym układzie. Warunki początkowe tego wariantu były następujące: wysokość ciśnienia wejściowego – 41 mH<sub>2</sub>O, wysokość ciśnienia wyjściowego niższa od wejściowego o kolejne wartości – 0,1 mH<sub>2</sub>O, 0,5 mH<sub>2</sub>O, 1,0 mH<sub>2</sub>O i 1,5 mH<sub>2</sub>O. W wariantcie drugim założono istnienie początkowego ustalonego przepływu wody w przewodzie o średnicy 500 mm. W warunkach początkowych tego wariantu wysokość ciśnienia wejściowego wynosiła podobnie jak w wariantcie pierwszym – 41 mH<sub>2</sub>O, natomiast wysokość ciśnienia na wyjściu była niższa od wejściowego o 0,2 mH<sub>2</sub>O. Ta różnica ciśnień wymusiła przepływ wody w przewodzie o średnicy 500 mm z prędkością 0,33 m/s. Wartość ta była zgodna z wyznaczoną podczas pomiarów terenowych. Obliczenia symulacyjne w tym wariantcie przeprowadzono w dwóch fazach – w pierwszej realizowano je do momentu ustalenia się warunków przepływu, natomiast w drugiej – wprowadzano nagle obniżenie wysokości ciśnienia wyjściowego o 0,1 mH<sub>2</sub>O, 0,5 mH<sub>2</sub>O, 1,0 mH<sub>2</sub>O i 1,5 mH<sub>2</sub>O. Zmiana ta traktowana była jako wymuszenie zjawiska przepływu zwrotnego w przewodzie o średnicy 200 mm. Zaprezentowany na wykresie czas symulacji (rys. 9) obejmował w tym wariantcie jedynie drugą fazę obliczeń.

W trakcie badań symulacyjnych, w obu wariantach obliczeniowych, określono prędkość przepływu wody na granicy łączącej przewody o średnicach 200 mm i 500 mm. Początek osi czasowej na rysunku 9 odpowiadał chwili zmiany ciśnienia wymuszającego przepływ zwrotny wody. Określono także objętość wody wypływającej z sieci osiedlowej do przewodu tranzytowego (śr. 500 mm).

## Wyniki i dyskusja

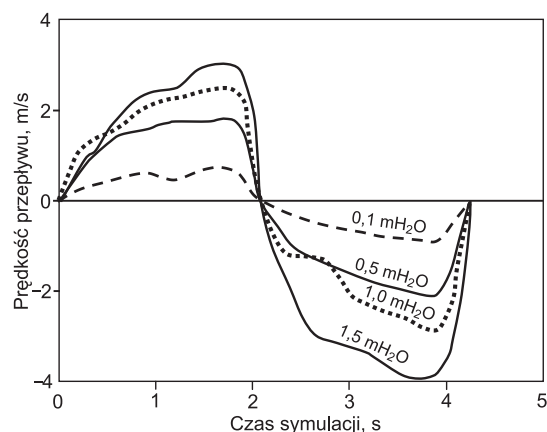
### Wariant I – początkowy brak przepływu wody

Przykładowy rozkład izolinii prędkości w przewodach badanego układu przy spadku ciśnienia wyjściowego o 0,1 mH<sub>2</sub>O przedstawiono na rysunku 7, natomiast zbiorcze zestawienie przebiegu zmian prędkości przepływu wody w przewodzie o średnicy 200 mm, wymuszonego przez spadek ciśnienia w wyjściowym warunku brzegowym, przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 7. Wariant I – przykładowy wykres izolinii prędkości podczas przepływu będącego skutkiem spadku wysokości ciśnienia o 0,1 mH<sub>2</sub>O

Fig. 7. Variant I: example of velocity contour chart for the flow forced by a 0.1 mH<sub>2</sub>O drop in pressure head



Rys. 8. Wariant I – przebieg zmian prędkości przepływu wody na granicy łączącej przewody o śr. 200 mm i 500 mm, wymuszony spadkiem wysokości ciśnienia (wartości ujemne reprezentują przepływ z przewodu o śr. 500 mm do przewodu o śr. 200 mm)  
Fig. 8. Variant I: chart of water flow velocity variations on the border connecting tubes d=200mm and 500mm; water flow forced by the drop in pressure head (negative values represent flow from tube d=500mm to tube d=200mm)

Na podstawie uzyskanych rezultatów można stwierdzić, że przepływ wody na granicy łączącej przewody o średnicy 200 mm z przewodem o średnicy 500 mm miał charakter sinusoidalny. W początkowej fazie zjawiska pojawił się przepływ zwrotny (ze zbiornika reprezentującego sieć osiedlową do przewodu o śr. 500 mm). W drugiej fazie nastąpiła zmiana kierunku tego przepływu (co reprezentowały wartości ujemne). Wyznaczony czas trwania zjawiska przepływu zwrotnego w badanych warunkach był stosunkowo krótki i wynosił ok. 2,2 s. Wyjaśnia to, dlaczego zainstalowany przepływomierz (którego minimalny czas uśredniania wyników wynosił 5 s) stosunkowo rzadko rejestrował przepływy zwrotne. Maksymalne prędkości przepływu wody były uzależnione od wysokości założonego spadku jej ciśnienia w warunku brzegowym – wahały się one od 0,9 m/s do 2,9 m/s. Interesujący okazał się fakt, że okres fali zmian prędkości przepływu wody nie zależał od wartości zmian ciśnienia w przyjętym warunku brzegowym. Sugeruje to, że był on uzależniony w większym stopniu od objętości wody w układzie oraz od parametrów geometrycznych sieci (np. długości przewodów), niż od wprowadzonych zmian wysokości ciśnienia wody.

Na podstawie wyników symulacji przebiegu zmian prędkości przepływu wody w przewodzie o średnicy 200 mm możliwe było oszacowanie objętości wody wypływającej w trakcie trwania przepływu zwrotnego ze zbiornika reprezentującego sieć osiedlową do przewodu o średnicy 500 mm (tab. 1).

Przedstawione w tabeli 1 wartości objętości przepływającej wody należy uznać za znaczące, szczególnie w aspekcie krótkiego czasu trwania tego zjawiska. Sugeruje to, że osady potencjalnie zalegające w przewodzie o średnicy 200 mm mogą trafiać do przewodu o średnicy 500 mm zasilającego sieć miejską. Biorąc pod uwagę sinusoidalny przebieg zmian wartości i kierunku przepływu badanego

Tabela 1. Objętość wody wypływającej z odgałęzienia (śr. 200 mm) do przewodu zasilającego (śr. 500 mm) podczas przepływu zwrotnego – wariant I

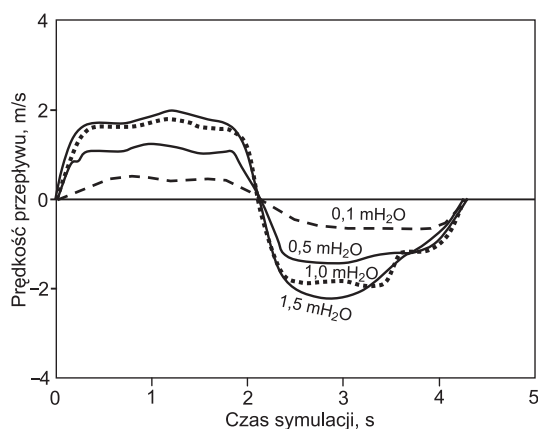
Table 1. Volume of water flowing from the branch (d=200 mm) to the source pipe (d=500 mm) during reverse flow – variant I

Spadek wysokości ciśnienia, mH <sub>2</sub> O	0,1	0,5	1,0	1,5
Objętość wody, m <sup>3</sup>	0,063	0,170	0,220	0,297

zjawiska wydaje się, że możliwe jest także zjawisko odwrotne – transportu osadów z przewodu o średnicy 500 mm do sieci osiedlowej.

### Wariant II – początkowy ustalony przepływ wody

W wariantcie tym uwzględniono istnienie początkowego przepływu ustalonego wody w przewodzie o średnicy 500 mm. Założona prędkość przepływu wody wynosiła 0,33 m/s (odpowiadała ona wartości uzyskanej w trakcie pomiarów przeprowadzonych w obiekcie rzeczywistym). Wyniki zestawienia przebiegu zjawiska przepływu wody na granicy badanych przewodów, wymuszonego przez spadek wysokości ciśnienia w wyjściowym warunku brzegowym przedstawiono na rysunku 9. Widoczne było zmniejszenie maksymalnych wartości prędkości przepływu wody w stosunku do wariantu pierwszego (początkowy brak przepływu) – wartości maksymalne wahały się od 0,4 m/s do 1,9 m/s. Warto jednak zauważyć, że okres fali zmian tej prędkości nie uległ zmianom w stosunku do wariantu I. Podobnie jak w przypadku poprzednim, jego długość nie zależała od wartości spadku ciśnienia zadanego w wyjściowym warunku brzegowym.



Rys. 9. Wariant II (druga faza obliczeń) – przebieg zmian prędkości przepływu wody na granicy łączącej przewody  $d=200$  mm i  $d=500$  mm, wymuszony nagłym spadkiem wysokości ciśnienia w wyjściowym warunku brzegowym (wartości ujemne reprezentują przepływ wody z przewodu  $d=500$  mm do przewodu  $d=200$  mm)

Fig. 9. Variant 2 (second phase of calculation): chart of water flow velocity variations on the border connecting tubes  $d=200$  mm and  $500$  mm; water flow forced by a rapid drop in pressure head at the output boundary condition (negative values represent water flow from tube  $d=500$  mm to tube  $d=200$  mm)

Podobnie jak poprzednio, na podstawie uzyskanych zmian prędkości przepływu oszacowano objętość wody wypływającej ze zbiornika reprezentującego badaną sieć osiedlową do przewodu o średnicy 500 mm (tab. 2).

Wyznaczone objętości wody, choć mniejsze niż uzyskane w wariantcie I, także mogą świadczyć o możliwym transporcie osadów zalegających w rozpatrywanych przewodach o średnicach 500 mm i 200 mm w trakcie trwania zjawiska przepływu zwrotnego.

Tabela 2. Objętość wody wypływającej z odgałęzienia (śr. 200 mm) do przewodu zasilającego (śr. 500 mm) podczas przepływu zwrotnego – wariant II

Table 2. Volume of water flowing from the branch ( $d=200$  mm) to the source pipe ( $d=500$  mm) during reverse flow – variant II

Spadek wysokości ciśnienia, $mH_2O$	0,1	0,5	1,0	1,5
Objętość wody, $m^3$	0,054	0,153	0,198	0,249

### Wnioski

♦ Wyniki badań terenowych i symulacyjnych wykazały, że do zaistnienia zjawiska przepływu zwrotnego w rozgałęzieniowej sieci wodociągowej konieczne było spełnienie następujących warunków:

- podłączenie sieci rozgałęzieniowej zarówno do pompowni wodociągowej, jak i sieci miejskiej (zewnętrznej),
- rolę wymuszenia przepływu zwrotnego spełnia spadek ciśnienia pojawiający się od strony sieci miejskiej (zewnętrznej),
- prędkość przepływu wody w sieci rozgałęzieniowej osiąga niewielkie wartości, związane ze znacznym przewymiarowaniem przewodów.

♦ Biorąc pod uwagę niestabilność ciśnienia w sieci wodociągowej, potwierdzoną przez wyniki pomiarów terenowych, można stwierdzić, że zjawisko przepływu zwrotnego może pojawiać się w nim stosunkowo często. Pomimo znacznych trudności pomiarowych, w ciągu 14 h zarejestrowano 64 takie przypadki.

♦ Wyniki badań symulacyjnych wykazały, że w badanym układzie przewodów wodociagowych zjawisko przepływu zwrotnego miało charakter krótkotrwały. Okres fali przepływu zwrotnego i powrotnego do sieci wynosił ok. 4,5 s i nie zależał do wartości spadku ciśnienia wymuszającego przepływ zwrotny. Można sądzić, że mógł być on uzależniony od geometrii rozpatrywanego układu.

♦ Zjawisko przepływu zwrotnego w analizowanym układzie przewodów może przyczynić się do nasilenia wtórnego zanieczyszczenia wody, poprzez zrywanie zalegających w nich (w sąsiedztwie trójnika) osadów. Przemawia za tym zarówno wyznaczona prędkość maksymalna, jak i objętość wody przepływającej w obu kierunkach w stosunkowo krótkim czasie trwania tego zjawiska. Ze względu na sinusoidalny przebieg zmian wartości i kierunku przepływu zwrotnego wody możliwe jest zjawisko transportu odrywanych osadów zarówno w kierunku do sieci miejskiej, jak i odwrotnie – transportu osadów do sieci osiedlowej.

♦ W świetle uzyskanych wyników widać, że zjawisko przepływu zwrotnego, dotychczas kojarzone z sieciami pierścieniowymi, może także stosunkowo często pojawiać się lokalnie w sieciach rozgałęzieniowych, spełniających podane wcześniej warunki.

Artykuł powstał w ramach realizacji programu badawczego nr 4508/B/T02/2009/36, sfinansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

### LITERATURA

1. H. KŁOSS-TRĘBACZKIEWICZ, E. OSUCH-PAJDZIŃSKA, M. ROMAN: Decrease of water consumption in Polish towns: Its causes and effects. *Journal of Water SRT – Aqua* 2000, Vol. 49, pp. 149–157.
2. Z. HEIDRICH, J. JĘDRZEJKIEWICZ: Analiza zużycia wody w miastach polskich w latach 1995–2005. *Ochrona Środowiska* 2007, vol. 29, nr 4, ss. 29–34.
3. A. KOTOWSKI: Analiza hydrauliczna zjawisk wywołujących zmniejszenie przepływności rurociągów. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 1, ss. 27–32.
4. M. KWIETNIEWSKI: Water quality in distribution system operation, storage, cross-connections. National Report Poland. *Water Science and Technology: Water Supply* 2000, Vol. 18, pp. 229–231.
5. A. SETH, R. BACHMANN, J. BOXALL, A. SAUL, R. EDY-VEAN: Characterisation of materials causing discoloration in potable water systems. *Water Science and Technology* 2004, Vol. 49, No. 2, pp. 27–32.

6. 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.
7. I. ZIMOCZ: Zastosowanie modelowania komputerowego do wspomagania procesu eksploatacji systemu wodociągowego. *Ochrona Środowiska* 2008, vol. 30, nr 3, ss. 31–35.
8. M. LEHTOLA, T.K. NISSINEN, I.T. MIETTINEN: Removal of soft deposits from the distribution system improves the drinking water quality. *Water Research* 2004, Vol. 38, pp. 601–610.
9. D. KOWALSKI, M. KWIETNIEWSKI, A. MUSZ, M. WIDOMSKI: Charakterystyka wybranych metod płukania i czyszczenia przewodów wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 2008, vol. 30, nr 1, ss. 27–30.
10. H. HOTŁOŚ: Quantitative assessment of the influence of water pressure on the reliability of waterpipe networks in service. *Environment Protection Engineering* 2010, Vol. 36, No. 3, pp. 103–112.
11. U. OLSIŃSKA, K. SKIBIŃSKA: Modelowanie zmian jakości wody w systemie dystrybucji. *Ochrona Środowiska* 2007, vol. 29, nr 2, ss. 33–40.
12. R. PRINCE, I. GOULTER, G. RYAN: What causes customer complaints about discoloured water. *Water Research* 2003, Vol. 30, pp. 62–67.
13. E. MIELCARZEWICZ: Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę. Arkady, Warszawa 2000.
14. C. GRABARCZYK: Przepływy cieczy w przewodach. Metody obliczeniowe. Envirotech, Poznań 1997.
15. M. MITOSEK: Mechanika płynów w inżynierii środowiska. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
16. Z. ORZECZOWSKI, J. PRYWER, R. ZARZYCKI: Mechanika płynów w inżynierii środowiska. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
17. R. PUZYREWSKI, J. SAWICKI: Podstawy mechaniki płynów i hydrauliki. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 1998.
18. O.C. ZIENKIEWICZ, R.L. TAYLOR, P. NITHIARASU: The Finite Element Method for Fluid Dynamics. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford 2005.
19. GAMBIT 2.1. Command Reference Guide, Modeling Guide, Tutorial Guide, Vol. 1, 2. CD documentation. Fluent Inc., 2003.
20. FLUENT 6.1. Tutorial and Users Guide, Vol. 1, 2. CD documentation. Fluent Inc., 2003.

**Kowalski, D., Kowalska, B., Kwietniewski, M., Musz, A. Reverse Flow in Branched Water Distribution Network. *Ochrona Środowiska* 2010, Vol. 32, No. 4, pp. 31–36.**

**Abstract:** Changes in the flow direction in water distribution networks may cause the pipe incrustation to tear off, thus inducing self-contamination and deteriorating the quality of the water supplied to the user. So far, the occurrence of changes in the flow direction has been regarded as inherent in looped water distribution networks. However, in-situ measurements and simulations performed by the authors of this paper have revealed short periods of reverse flow also in branched water distribution networks. Furthermore, the results obtained have demonstrated that reverse flow occurs not only after a failure (as can be inferred from the investigations

reported in the literature), but also during short-term pressure head variations induced (for example) by water hammer or by the change in water demand. The results of simulations indicate that the occurrence of reverse flow in the branched water distribution network is of a short duration. The observed period of the wave of reverse and return flow averaged 4.5 s and did not depend on the drop in the pressure which forces reverse flow. It may well be assumed that this period fails to depend on the geometry of the system being studied. The paper also presents the attempt to describe the phenomenon with the specialized FLUENT software, which is used when modeling the dynamics of fluids.

**Keywords:** Reverse flow, water distribution network, branched network, water quality deterioration.