

Urszula Olsińska, Antoni Olsiński, Katarzyna Skibińska

Zastosowanie symulacji zmian zawartości chloru w wodzie w systemie dystrybucji do wyboru miejsca dochlorowania wody

Wskutek obniżenia zapotrzebowania na wodę (głównie w przemyśle, ale również wśród odbiorców indywidualnych) część systemów wodociągowych jest przewymiarowana, w następstwie czego zwiększył się znacznie – w stosunku do założonego na etapie projektowania – czas przetrzymania wody w sieci wodociągowej. Bezpośrednim skutkiem tego zjawiska jest częściowy, a czasem nawet całkowity, zanik środka dezynfekcyjnego w wodzie podczas jej transportu do odbiorców, co zwiększa ryzyko jej wtórnego skażenia bakteriologicznego. Problem ten dotyczy w szczególności końcówek rozległych systemów dystrybucji wody oraz sieci nieszczelnych i charakteryzujących się wysokim wskaźnikiem awaryjności.

Prawdopodobieństwo wystąpienia wtórnego skażenia mikrobiologicznego można ograniczyć przez wprowadzanie do sieci wodociągowej wody stabilnej biologicznie, stosowanie odpowiednich dawek dezynfektanta w procesie oczyszczania, bądź lokalne uzupełnianie jego zawartości w wodzie, przy jednoczesnej realizacji różnych zabiegów mających na celu poprawę stanu technicznego sieci (doszczelnianie systemu m.in. przez renowację, odnowę strukturalną lub wymianę przewodów i armatury). Jeżeli jednak dezynfekcja prowadzona w stacji oczyszczania wody nie zapewnia jej bezpieczeństwa sanitarnego w całym systemie dystrybucji, wówczas konieczne staje się dodatkowe dawkowanie środka dezynfekcyjnego bezpośrednio do sieci wodociągowej lub zbiorników sieciowych. Proces ten może być realizowany przy pomocy standardowych urządzeń dawkujących (w wersjach przewoźnych), wyposażonych w zestawy pompowe o odpowiednich parametrach, a najczęściej stosowanym środkiem dezynfekcyjnym jest chloran(I) sodu.

Właściwa lokalizacja stacji dochlorowania wody jest zagadnieniem trudnym, w szczególności w wypadku złożonych i rozległych systemów zaopatrzenia w wodę zasilanych z kilku zakładów oczyszczania wody, zwłaszcza jeśli zasięg wpływu tych zakładów zmienia się w zależności od poboru wody z sieci. W pracy przeanalizowano możliwość zastosowania modelu hydrodynamiczno-kinetycznego systemu dystrybucji w celu wyboru właściwego miejsca dochlorowania wody.

Charakterystyka systemu wodociągowego i jego modelu matematycznego

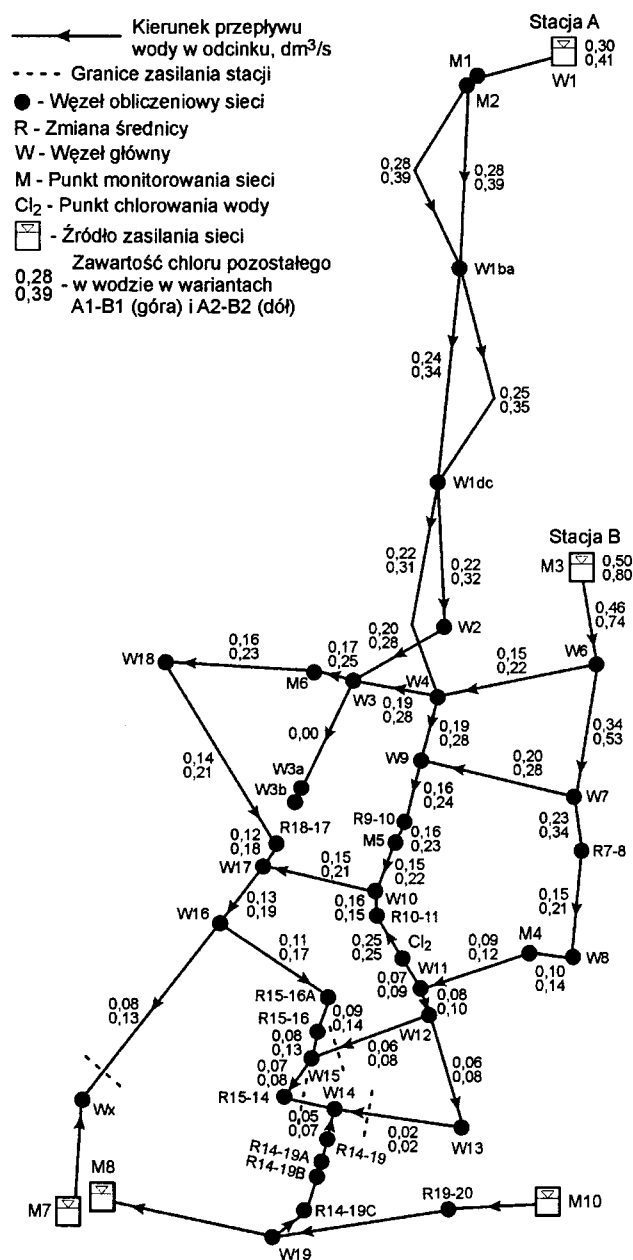
Przedmiotem analizy był fragment systemu dystrybucji wody dużej aglomeracji, usytuowany pomiędzy zakładami produkcji wody oznaczonymi jako stacja A i stacja B oraz zbiornikiem sieciowym (węzły M7, M8) i węzłem M10 (rys. 1).

Sieć ta zaopatruje w wodę kilka gmin, a średni pobór wody z sieci wynosi około 80 tys. m³/d. Wybór systemu podyktowany był stwierdzonymi lokalnymi niedoborami środka dezynfekcyjnego w wodzie. Analizowany system wodociągowy został opisany w pracy [1], poświęconej opracowaniu i weryfikacji jego modelu hydrodynamiczno-kinetycznego, przeznaczonego do prognozowania zawartości chloru wolnego i trihalometanów w wodzie dostarczanej odbiorcom. Obecnie dochlorowanie wody prowadzi się w węźle oznaczonym Cl₂ (rys. 1) dawką zapewniającą zawartość chloru wolnego w ilości 0,3 gCl₂/m³. Na podstawie przeprowadzonej symulacji zmian zawartości chloru pozostałego w wodzie (o jakości podanej w tabeli 1 dla wariantu A2-B2) w warunkach średniego poboru wody, w pracy [1] wskazano obszary systemu, gdzie zawartość chloru była nadal mniejsza od 0,1 gCl₂/m³, tj. odcinki W11-Cl₂, W12-W15, W15-R15-14, R15-14-W14, W12-W13, W13-W14, W3-W3a i W3a-W3b. W celu zobrazowania wpływu początkowej zawartości dezynfektanta w wodzie wprowadzanej do sieci na jego zawartość w wodzie u odbiorców, a tym samym na wybór najkorzystniejszej lokalizacji miejsca dochlorowania wody, zakres analizy rozszerzono o symulacje dotyczące wody opisanej jako wariant A1-B1 (tab. 1), co wymagało uzupełnienia kalibracji modelu.

Tabela 1. Zestawienie wybranych wskaźników jakości wody dostarczanej do sieci

Wskaźnik, jednostka	Stacja A		Stacja B	
	wariant A1	wariant A2	wariant B1	wariant B2
Temperatura, °C	9	9	4	3
pH	7,7	7,6	7,2	7,2
Utlenialność, gO ₂ /m ³	0,8	0,8	2,5	2,8
OWO, gC/m ³	0,81	0,33	4,03	3,96
Chlor wolny, gCl ₂ /m ³	0,30	0,41	0,50	0,80
Suma THM, mg/m ³	–	3,50	–	3,70

Wartości stałych szybkości reakcji przyjęto wstępnie w oparciu o dane literaturowe [2–9], odpowiednio do wskaźników jakości wody (tab. 1). Kalibrację modelu zmian zawartości chloru pozostałego w wodzie w części systemu zasilanej ze stacji B rozpoczęto od wartości stałej szybkości zużycia chloru $K=5,0 \cdot 10^{-5}$ 1/s (wariant B1). Największą zgodność wyników symulacji z zawartością chloru pozostałego oznaczoną w wodzie w punktach monitorowania sieci uzyskano przy $K=3,5 \cdot 10^{-5}$ 1/s. Wartość tę przyjęto jako wyjściową przy kalibracji modelu w przypadku wody o składzie fizyczno-chemicznym odpowiadającemu wariantowi B2. Zadowolającą zbieżność wartości obliczonych i zmierzonych osiągnięto przy $K=4,0 \cdot 10^{-5}$ 1/s. W wypadku fragmentu systemu zasilanego



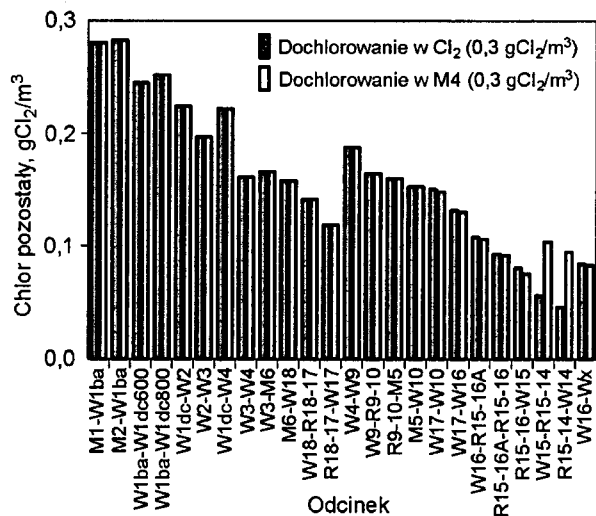
Rys. 1. Wyniki symulacji zawartości chloru wolnego w wodzie przy zastosowaniu dochlorowania w węźle Cl₂

wodą ze stacji A kalibrację zakończono przy wartościach $K=1,0 \cdot 10^{-5}$ 1/s (wariant A1) i $K=0,9 \cdot 10^{-5}$ 1/s (wariant A2). Różnice w wartościach stałych szybkości reakcji dotyczących wody pochodzącej ze stacji A (woda podziemna) i stacji B (woda powierzchniowa) należy przypisać różnicom w składzie fizyczno-chemicznym tych wód.

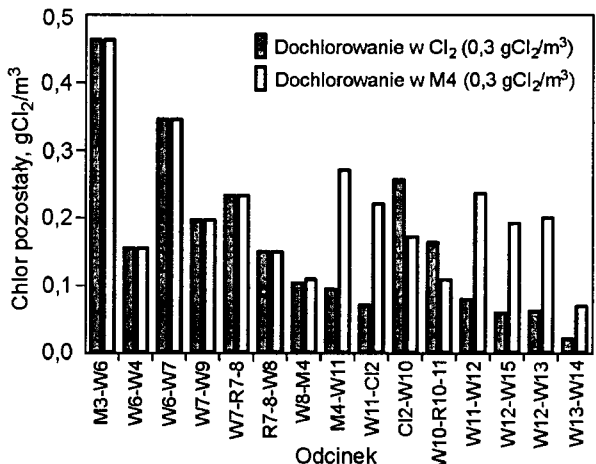
Wyniki symulacji zawartości chloru pozostałego, przedstawione w formie graficznej na rysunku 1, potwierdziły wstępnie sformułowany wniosek, że obecnie realizowane dochlorowanie wody nie rozwiązuje w pełni problemu deficytu chloru pozostałego. Przy usytuowaniu stacji dochlorowania w węźle Cl₂ nie było możliwe osiągnięcie zawartości chloru wolnego niezbędnego do zabezpieczenia sieci przed wtórnym skażeniem mikrobiologicznym wody nie tylko we wskazanych wcześniej odcinkach, ale również – co wykazały symulacje prowadzone w przypadku wody o jakości A1 i B1 – w odcinkach M4-W11, W11-W12, R15-16A-R15-16, R15-16-W15 i W16-Wx.

Wybór lokalizacji stacji dochlorowania wody

Analiza kierunku przepływu wody w kolejnych odcinkach systemu oraz rozkładu zawartości chloru w wodzie (rys. 1) wykazała konieczność przesunięcia punktu jego dawkowania z węzła Cl₂ do M4. Zakładając podwyższenie zawartości chloru wolnego w węźle M4 (podobnie jak w wypadku węzła Cl₂) do 0,3 gCl₂/m³, wykonano symulację zmian zawartości chloru w wariantach A1-B1, jako bardziej niekorzystnym ze względu na niższą (niż w wypadku wariantu A2-B2) początkową zawartość chloru (rys. 2 i 3). Jak wynika z zestawień porównawczych zawartości chloru, sama zmiana lokalizacji stacji dochlorowania nie zapewniła bezpieczeństwa sanitarnego wody w całej analizowanej sieci wodociągowej.



Rys. 2. Porównanie średniej zawartości chloru pozostałego w wodzie w odcinkach zasilanych ze stacji A (wariant A1) przy poborze średnim

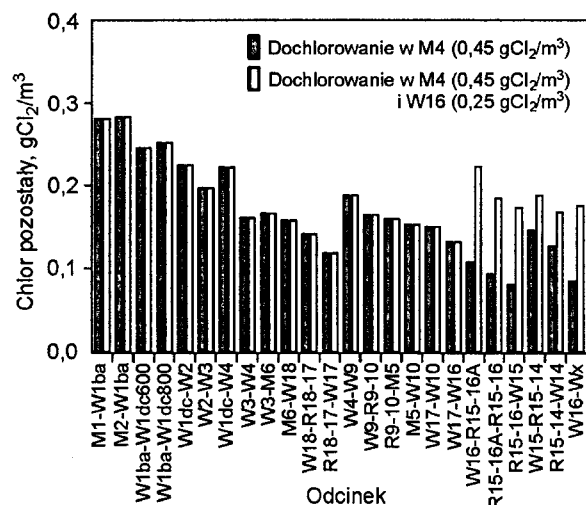


Rys. 3. Porównanie średniej zawartości chloru pozostałego w wodzie w odcinkach zasilanych ze stacji B (wariant B1) przy poborze średnim

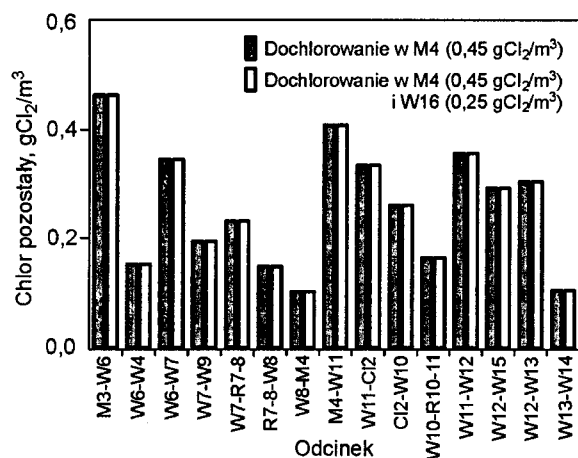
W celu kompleksowej poprawy sytuacji zaproponowano jednoczesną zmianę lokalizacji stacji dochlorowania i dawki dezynfektanta. Rezultaty symulacji wykonanych przy przyjętych jak wyżej stałych szybkości zużycia chloru i zwiększeniu zawartości chloru pozostałego w wodzie w węźle M4 do 0,45 gCl₂/m³ podsumowano na rysunkach 4 i 5. Przy tak ustalonych warunkach eksploatacji rozpatrywanego fragmentu systemu dystrybucji, niedobór dezynfektanta wystąpił jedynie w wodzie transportowanej przewodami R15-16A-R15-16, R15-16-W15, W16-Wx oraz W13-W14. W świetle przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że utrzymanie wymaganego

stężenia dezynfektanta w całym rozpatrywanym fragmencie systemu dystrybucji wody przy średnich poborach wody będzie możliwe w wypadku wariantu A1, B1 (rys. 4 i 5) po wprowadzeniu drugiej stacji dochlorowania w węźle W16 i zapewnieniu zawartości chloru pozostałego odpowiednio:

- w węźle M4 w ilości $0,45 \text{ gCl}_2/\text{m}^3$,
- w węźle W16 w ilości $0,25 \text{ gCl}_2/\text{m}^3$.



Rys. 4. Porównanie średniej zawartości chloru pozostałego w wodzie w odcinkach zasilanych ze stacji A (wariant A1) przy średnim poborze



Rys. 5. Porównanie średniej zawartości chloru pozostałego w wodzie w odcinkach zasilanych ze stacji B (wariant B1) przy średnim poborze

W następstwie zmian lokalizacji stacji dochlorowania i zawartości środka dezynfekcyjnego w miejscu dawkowania, zaobserwowano sukcesywny wzrost jego zawartości w wodzie w węzłach, w których pierwotnie odnotowano jego deficyt (tab. 2).

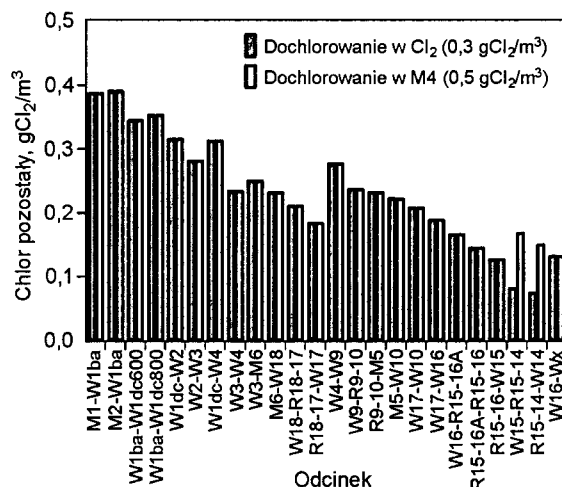
Tabela 2. Prognozowana zawartość chloru pozostałego w wodzie w węzłach przy poborze średnim (wariant A1-B1)

Węzeł	Zawartość chloru pozostałego, gCl_2/m^3			
	dochlorowanie w węźle Cl ₂ 0,30	dochlorowanie w węźle M4		dochlorowanie w węzłach M4 – 0,45 i W16 – 0,25
		0,30	0,45	
W11	0,09	0,24	0,36	0,36
W12	0,07	0,23	0,35	0,35
W13	0,06	0,17	0,26	0,26
W14*	0,03	0,09	0,12	0,16
R15-16	0,09	0,09	0,09	0,17
W15*	0,06	0,11	0,16	0,20
R15-14	0,06	0,10	0,14	0,18
Wx	0,06	0,06	0,06	0,12

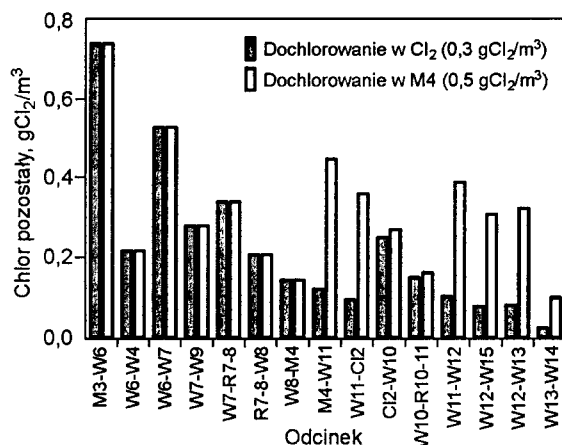
*wartości obliczono uwzględniając mieszanie się wód dopływających z obu stacji

Zaproponowane rozwiązanie okazało się również wystarczające w wypadku dostawy do sieci wody o wyższej zawartości chloru wolnego (wariant A2-B2). Jednocześnie można wykazać, iż nieznaczne zwiększenie zawartości chloru pozostałego w węźle M4, np. do $0,5 \text{ gCl}_2/\text{m}^3$, stwarza możliwość okresowego wyłączenia z eksploatacji stacji w węźle W16. Potwierdzeniem są wyniki symulacji zawartości chloru pozostałego porównane na rysunkach 6 i 7 oraz w tabeli 3 z wynikami prowadzonego obecnie dochlorowania wody w węźle Cl₂.

Ze względu na dobową i godzinową nierównomierność poboru wody w systemach dystrybucji konieczne jest potwierdzenie skuteczności proponowanych rozwiązań dochlorowania wody



Rys. 6. Porównanie średniej zawartości chloru pozostałego w wodzie w odcinkach zasilanych ze stacji A (wariant A2) przy średnim poborze



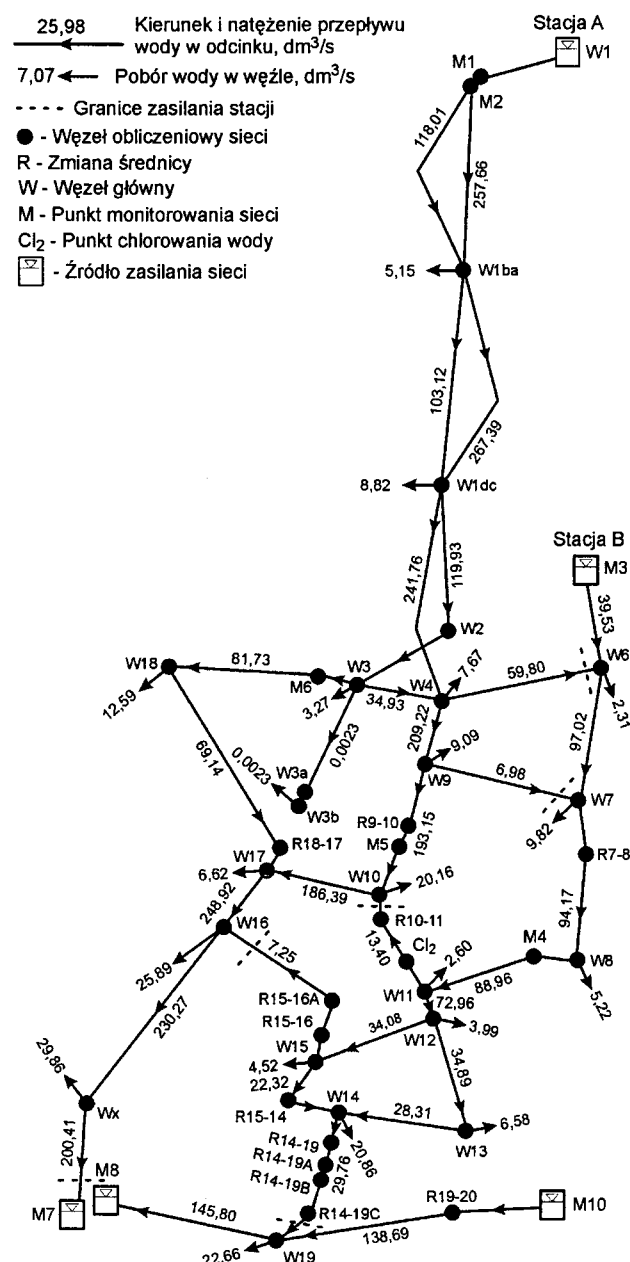
Rys. 7. Porównanie zawartości chloru pozostałego w wodzie w odcinkach zasilanych ze stacji B (wariant B2) przy średnim poborze

Tabela 3. Prognozowana zawartość chloru pozostałego w wodzie w węzłach przy poborze średnim (wariant A2-B2)

Węzeł	Zawartość chloru pozostałego, gCl ₂ /m ³	
	dochlorowanie w węźle Cl ₂ 0,3 gCl ₂ /m ³	dochlorowanie w węźle M4 0,5 gCl ₂ /m ³
W13	0,07	0,27
W14*	0,07	0,15
W15	0,09	0,18
R15-14	0,08	0,16

*wartości obliczono uwzględniając mieszanie się wód z obu stacji

w sieci w wypadku wystąpienia najbardziej niekorzystnych warunków hydraulicznych. Stąd też poprawność rozmieszczenia stacji dochlorowania w węzłach M4 i W16 sprawdzono w przypadku pracy systemu odpowiadającego poborowi minimalnemu (rys. 8). Na podstawie kierunków przepływu wody można zauważyć, że przy poborze minimalnym zwiększył się zasięg zasilania stacji oczyszczania wody A i B, w stosunku

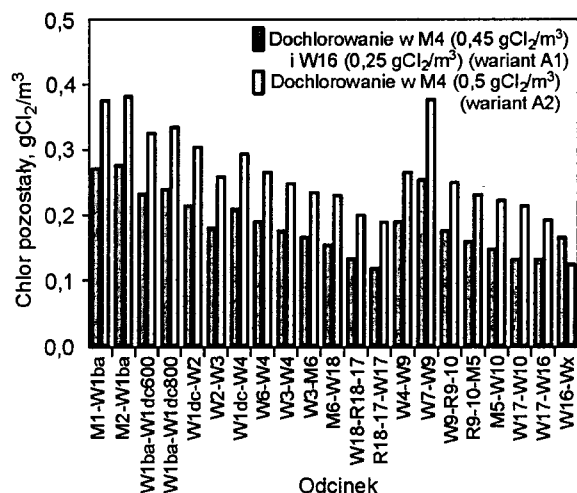


Rys. 8. Wyniki symulacji hydraulicznych przy poborze minimalnym

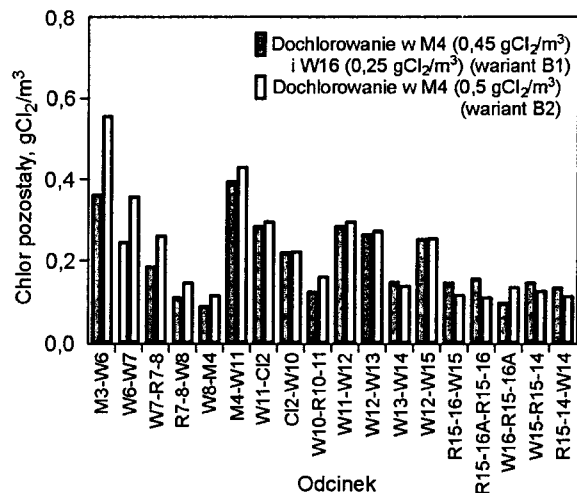
do obszaru zasilanego przy poborze średnim [1]. Woda z tych stacji dopływa do węzłów M7 i W19, a nie jak przy poborze średnim do Wx i W14. Uwagę zwraca fakt, że w odcinkach W1dc-W2, W2-W3, W1dc-W4, W3-W4 (zmiana kierunku), W4-W6 (zmiana kierunku), W4-W9, W18-W17, W17-W10, W17-W16, W16-Wx, Wx-M7 (zmiana kierunku), W12-W15, W13-W14, W19-M8 przy poborze minimalnym wystąpiły większe objętościowe natężenia przepływu niż przy poborze średnim. W pozostałych odcinkach wystąpiły mniejsze objętościowe natężenia przepływu niż przy poborze średnim, co może mieć wpływ na ilość chloru pozostałego w wodzie wskutek zmiany czasu jej przebywania w systemie dystrybucji.

Symulacje zmian zawartości chloru wolnego w wodzie podczas poboru minimalnego przeprowadzono przy założeniu, iż pobór ten występuje bezpośrednio po poborze średnim i trwa 2 godz. Analizą objęto jedynie te odcinki, które – podobnie jak podczas poboru średniego – były zasilane wodą dostarczaną ze stacji A i B. Wyniki tych symulacji zestawiono na rysunkach 9 i 10.

W rozpatrywanym przypadku za niepokojący uznać można niedobór środka dezynfekcyjnego, jaki wystąpił na odcinku W8-M4 poprzedzającym stacją dochlorowania w węźle M4 (rys. 10) przy jakości wody opisanej w wariantach A1-B1.



Rys. 9. Porównanie średniej zawartości chloru pozostałego w wodzie w odcinkach zasilanych ze stacji A przy poborze minimalnym i dochlorowaniu w węzłach M4 i W16 (wariant A1) oraz M4 (wariant A2)



Rys. 10. Porównanie średniej zawartości chloru pozostałego w wodzie w odcinkach zasilanych wodą ze stacji B przy poborze minimalnym i dochlorowaniu w węzłach M4 i W16 (wariant B1) oraz M4 (wariant B2)

Wynik ten może wskazywać na konieczność przesunięcia punktu dochlorowania wody z węzła M4 do W8, połączonego z weryfikacją zawartości chloru pozostałego bezpośrednio za stacją. O ewentualnych zmianach lokalizacji tej stacji powinna jednak zdecydować dokładniejsza analiza stanów pracy systemu, gdyż chwilowe (lokalne) obniżenie zawartości dezynfektanta w wodzie nie zagraża jej bezpieczeństwu sanitarnemu. W świetle wyników przedstawionych na rysunkach 9 i 10 w pełni uzasadniony wydaje się natomiast wybór układu dochlorowania w wariancie A2-B2, czyli w sytuacji, gdy na etapie dezynfekcji końcowej zastosowano wyższą dawkę chloru.

Jest jednak pewne prawdopodobieństwo, iż w warunkach poborów minimalnych mogą wystąpić pewne niedobory chloru pozostałego w wodzie w tych przewodach, które podczas poboru średniego były zasilane z węzłów M7, M8 i M10 wodą o składzie fizyczno-chemicznym odmiennym od opisanego w tabeli 1. Ponieważ przy poborze średnim nie znalazły się one w zasięgu wpływu rozpatrywanych zakładów oczyszczania wody, nie były przedmiotem wcześniejszych analiz. Nie można było zatem oszacować ilości chloru pozostałego w wodzie bezpośrednio przed wystąpieniem poboru minimalnego. W związku z powyższym założono, że w węzłach nie objętych uprzednio analizą (M7, R14-19, R14-19A, R14-19B, R14-19C, W19) zawartość początkowa chloru pozostałego nie będzie większa niż $0,1 \text{ gCl}_2/\text{m}^3$. Wyniki obliczeń wykonanych przy takim założeniu przedstawiono w tabelach 4 i 5.

Tabela 4. Średnia zawartość chloru pozostałego w wodzie w odcinkach narażonych na niedobór chloru w warunkach poboru minimalnego

Odcinek	Zawartość chloru pozostałego, gCl_2/m^3	
	wariant A1-B1	wariant A2-B2
M7-Wx	0,11	0,09
W14-R14-19	0,12	0,11
R14-19-R14-19A	0,09	0,09
R14-19A-R14-19B	0,08	0,07
R14-19B-R14-19C	0,08	0,07
R14-19C-W19	0,08	0,07

Tabela 5. Zawartość chloru pozostałego w węzłach o najniższej ilości chloru pozostałego w warunkach poboru minimalnego

Węzeł	Zawartość chloru pozostałego, gCl_2/m^3	
	wariant A1-B1	wariant A2-B2
M7	0,09	0,09
R14-19	0,12	0,11
R14-19A	0,08	0,07
R14-19B	0,08	0,07
R14-19C	0,08	0,07
W19	0,08	0,07

Można zatem stwierdzić, iż symulacje pracy systemu podczas wystąpienia dwugodzinnego poboru minimalnego potwierdziły poprawność przyjętej lokalizacji stacji dochlorowania wody, ze wskazaniem na celowość dokładniejszego rozważenia możliwości przesunięcia działającej w sposób ciągły stacji z węzła M4 do W8. Analiza przeprowadzona przy poborze minimalnym, będąca pośrednim dowodem na złożoność systemu, wskazała dodatkowo na celowość przeprowadzenia kompleksowej symulacji pracy całego systemu dystrybucji wody.

Odrębnego potraktowania wymagała końcówka sieci oznaczona W3-W3a-W3b. We wszystkich rozważanych przypadkach przeprowadzono również symulacje zawartości chloru pozostałego w wodzie transportowanej tym przewodem, otrzymując każdorazowo wyniki negatywne. W przewodzie tym, ze względu na dużą średnicę (DN1000 na odcinku W3-W3a) i niewielki przepływ rzędu $0,01 \text{ dm}^3/\text{s}$ ma miejsce stagnacja wody prowadząca do zaniku dezynfektanta. Problem ten można rozwiązać jedynie przez lokalne dochlorowanie wody, aczkolwiek korzystniejsza wydaje się wymiana przewodu na nowy, o odpowiednio zaprojektowanej średnicy.

Wnioski

♦ Z przeprowadzonej analizy systemu dystrybucji wynika, że dobrze skalibrowany model matematyczny takiego systemu może być z powodzeniem wykorzystany nie tylko na potrzeby modernizacji, rozbudowy i remontów sieci, ale także do wspomagania zarządzania jakością wody dostarczanej odbiorcom.

♦ Symulacje komputerowe mogą być pomocne między innymi przy wyborze właściwej lokalizacji i ustaleniu sposobu eksploatacji stacji dochlorowania wody, które umożliwią zapewnienie bezpieczeństwa sanitarnego wody w całym systemie dystrybucji.

♦ Warunkiem bezpiecznego wykorzystania modelu w procesie decyzyjnym jest rzetelna baza danych i zorganizowany proces aktualizacji informacji o systemie.

LITERATURA

1. U. OLSIŃSKA, K. SKIBIŃSKA: Modelowanie zmian jakości wody w systemie dystrybucji. *Ochrona Środowiska*, 2007, nr 2, ss. 33–40.
2. L. COZZOLINO, D. PIANESE, F. PIROZZI: Control of DBPs in water distribution systems through optimal chlorine dosage and disinfection station installation. *Desalination*, 2005, Vol. 176, No. 1–3, pp. 113–125.
3. W.E. ELSHORBAGY, H. ABU-QDAIS, M.K. ELSHEAMY: Simulation of THM species in water distribution systems. *Water Research*, 2000, Vol. 34, No. 13, pp. 3431–3439.
4. J.-L. GAGNON: Chlorine modeling case study for the Seine network located in the Paris suburbs area. *Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”*, tom 2, PZITS, Poznań 1998, ss. 129–140.
5. H. GALLARD, U. von GUNTEN: Chlorination of natural organic matter: Kinetics of chlorination and of THM formation. *Water Research*, 2002, Vol. 36, No. 1, pp. 65–74.
6. N.B. HALLAM *et al.*: The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems. *Water Research*, 2002, Vol. 36, No. 14, pp. 3479–3488.
7. S.H. MAIER, R.S. POWELL, C.A. WOODWARD: Calibration and comparison of chlorine decay models for a test water distribution system. *Water Research*, 2000, Vol. 34, No. 8, pp. 2301–2309.
8. L.A. ROSSMAN *et al.*: DBP formation kinetics in a simulated distribution system. *Water Research*, 2001, Vol. 35, No. 14, pp. 3483–3489.
9. W. SUNG *et al.*: Modeling DBP formation. *Journal AWWA*, 2000, Vol. 92, No. 5, pp. 53–63.

Olsńska, U., Olsński, A., Skibińska, K. Simulation of Chlorine Content Variations in the Water within a Distribution System with the Aim to Select a Location for a Chlorination Booster Station. *Ochrona Środowiska* 2007, Vol. 29, No. 2, pp. 47–54.

Abstract: The paper provides evidence corroborating the usefulness of the mathematical models of water distribution systems when applied as a tool to support the design of water disinfection in a water-pipe network. Making use of a calibrated and verified model representing a section of the water supply system, simulation was carried out for the variations in residual chlorine content in the water, thus enabling the indication of the

zones where the disinfectant was in deficiency, and subsequently allowing for the suggestion where the chlorination booster station should be located. The solution suggested, which provides bacteriological safety of the water in the pipeline, was verified under hydraulic conditions equivalent to those of a moderate and minimal water demand, using samples of water that differed in quality. There are two major prerequisites for a safe use of the model in decision-making: a reliable database and a well-organized process of updating the available information on the water distribution system.

Keywords: Modeling, water distribution system, residual chlorine, water chlorination in distribution systems.