

Izabela Zimoch

Szacowanie zmian jakości wody w systemie dystrybucji na podstawie analizy powstawania trihalometanów

Eksploatacja rozległych sieci wodociągowych jest źródłem poważnych problemów nie tylko natury technicznej, ale również związanych z jakością transportowanej wody. Utrzymanie gwarancji bezpieczeństwa funkcjonowania podsystemu dystrybucji wody wymaga wdrożenia przez przedsiębiorstwo wodociągowe monitoringu, rozumianego jako zespół działań obejmujących planowanie, analizę i ocenę stanu funkcjonowania sieci wodociągowej zarówno w zakresach hydraulicznym i technicznym, jak dotyczącym jakości wody. Do niedawna szczególny nacisk kładziono przede wszystkim na jakość bakteriologiczną wody, ze względu na zagrożenie chorobami przenoszonymi drogą wodną. Dopiero odkrycie w 1974 r. obecności trihalometanów w wodzie, w tym chloroformu, obniżających w istotny sposób walory jakościowe i zdrowotne wody, wskazało na potrzebę kontrolowania również ich obecności w wodzie [1], gdyż są dowody rakotwórczego oddziaływania chloroformu na organizm człowieka. Zgodnie z zaleceniami Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) w wielu krajach wprowadzono dopuszczalną zawartość chloroformu, czy też sumy THM w wodzie przeznaczonej do picia. Przykładowo, w Niemczech dopuszczalna zawartość sumy THM w wodzie nie może przekroczyć 25 mg/m³, w Stanach Zjednoczonych i Polsce – 100 mg/m³, natomiast w Kanadzie – 350 mg/m³. Zmieniające się w ostatnich latach warunki hydrauliczne eksploatacji systemów wodociągowych, kształtowane zmniejszającym się poborem wody, małymi prędkościami przepływu oraz zmiennymi kierunkami transportu wody, są przyczyną odkładania się w sieci osadów nie tylko mineralnych, ale również o charakterze organicznym. Czynniki te w obecności chloru zwiększają prawdopodobieństwo powstawania THM w wodzie przebywającej w sieci wodociągowej.

Mała zawartość dezynfektanta w wodzie powoduje wtórny rozwój mikroorganizmów, co w konsekwencji prowadzi do powstawania tzw. biofilmu w sieci, instalacjach i urządzeniach wodociągowych. Intensywność tworzenia biofilmu zależy od stabilności biologicznej wody, której zapewnienie wymaga utrzymania małej zawartości substancji pożywkowych w wodzie, w tym przyswajalnego węgla organicznego (PWO) w ilości nieprzekraczającej 0,01 gC/m³, biodegradowalnego rozpuszczonego węgla organicznego (BRWO) – 0,15 gC/m³ oraz ortofosforanów około 0,05 gPO₄³⁻/m³ [2,3]. Badania nad występowaniem biofilmu w sieci wodociągowej wykazały, że wtórnemu rozwojowi mikroorganizmów sprzyja temperatura wody (15 °C) oraz mała prędkość przepływu wody (stwierdzono nawet 0,1 m/s) [4]. Następnym rozwojem biofilmu jest zwiększenie intensywności barwy, mętności oraz zawartości

substancji organicznych w wodzie wodociągowej. Skutkiem tego zjawiska jest wzrost ryzyka pojawienia się w wodzie mikroorganizmów heterotroficznych i bakterii grupy *coli*, bezkręgowców oraz patogenów oportunistycznych (*Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Klebsiella*, *Legionella*, *Edwardsiella*, *Serratia*), które mogą być przyczyną występowania chorób przenoszonych drogą wodną. Z tego względu konieczne jest utrzymywanie w wodzie odpowiedniej ilości dezynfektanta, np. chloru w ilości 0,2+0,3 gCl₂/m³, gwarantującej ograniczenie ryzyka mikrobiologicznego skażenia wody do poziomu 0,05. Stosowanie dużych dawek chloru w procesie dezynfekcji z jednej strony zabezpiecza wodę przed skażeniem mikrobiologicznym, natomiast z drugiej zwiększa ryzyko powstawania THM w wodzie. Dlatego bardzo ważny jest dobór odpowiedniej metody dezynfekcji wody, która zapewni jakość wody zgodną ze standardami zarówno pod względem bakteriologicznym, jak i obecności ubocznych produktów dezynfekcji. W ostatnich 15 latach przeprowadzono wiele badań, w których podjęto próby opracowania modelu matematycznego powstawania ubocznych produktów dezynfekcji wody. Analiza informacji literaturowych [3,5–9] wykazała konieczność interdyscyplinarnego podejścia do rozwiązania problemu niekorzystnych zmian jakości wody w celu określenia racjonalnych zasad eksploatacji systemu dystrybucji wody.

System zaopatrzenia Krakowa w wodę

System zaopatrzenia Krakowa w wodę składa się z dwóch rozbudowanych podsystemów, tj. podsystemu dostawy wody oraz podsystemu dystrybucji wody, których podstawowym zadaniem jest dostarczenie do mieszkańców miasta lub innych użytkowników systemu wody nie tylko w wymaganej ilości, kształtowanej potrzebami odbiorców, ale i jakości określonej w rozporządzeniu Ministra Zdrowia z 29 marca 2007 r. [10]. Na podsystem dostawy wody składają się cztery niezależne zakłady oczyszczania, ujmujące wodę powierzchniową z Raby, Rudawy, Dłubni i Sanki oraz zakład ujmujący wodę podziemną w Mistrzejowicach. W zakładach Raba, Rudawa i Dłubnia do oczyszczania wody stosuje się koagulację, filtrację i sorpcję na węglu aktywnym oraz dezynfekcję związkami chloru, natomiast zakład Bielany stosuje filtrację powolną i końcową dezynfekcję chlorem. Średnia łączna produkcja wszystkich zakładów wynosi prawie 150 tys. m³/d. Największy udział w dostawie wody do miasta ma zakład Raba w Dobczycach, pokrywając około 53% zapotrzebowania na wodę, następnie Rudawa – 20%, Dłubnia – 15%, Bielany – 9% i Mistrzejowice – 3%. Moce produkcyjne zakładów oczyszczania powodują, że współczesny system zaopatrzenia Krakowa w wodę ma rezerwę niewykorzystanej mocy określaną na 112% średniodobowego zapotrzebowania na wodę.

Rozległy krakowski podsystem dystrybucji wody składa się z sieci tranzytowej wykonanej z przewodów o średnicy 1400 mm o łącznej długości 18 km oraz sieci magistralnej złożonej z przewodów o średnicach 1200+350 mm o łącznej długości 247,9 km. Największy udział w długości systemu przypada na przewody rozdzielcze o średnicach 280+80 mm, których całkowita długość wynosi 1131 km. Ostatnim elementem liniowym systemu są przyłącza domowe, stanowiące 473 km przewodów o średnicach 100+25 mm. Ze względu na ponad 100-letnią eksploatację sieci wodociągowej, charakteryzuje się ona dużym zróżnicowaniem wiekowym. Są jeszcze w mieście rurociągi z pierwszych dziesięcioleci funkcjonowania systemu dystrybucji, o wieku powyżej 50 lat. Zarówno wieloletnia eksploatacja, jak i rozbudowa sieci wodociągowej miasta przyczyniła się do jego różnorodności materiałowej. Zdecydowanie największy udział w strukturze materiałowej systemu odgrywają przewody ze stali stanowiące 32% całkowitej długości sieci, to jest 601 km, oraz kolejno przewody z żeliwa (26%, 481 km) i PVC (23%, 425 km). Całkowita długość sieci wodociągowej eksploatowanej i zarządzanej przez MPWiK SA w Krakowie to łącznie blisko 1900 km infrastruktury przewodów. Integralną częścią budującą sieć wodociągową jest wszelkiego rodzaju jej uzbrojenie. Nieodłącznym elementem podsystemu dystrybucji wody są zbiorniki wyrównawczo-zapasowe. Obecnie w systemie zaopatrzenia Krakowa pracuje 10 zespołów zbiorników wodociągowych o łącznej pojemności ponad 270 tys. m³, co stanowi 182% dobowego zapotrzebowania na wodę w mieście. Największy zespół zbiorników o łącznej pojemności 158,5 tys. m³ znajduje się w Sierczy na trasie tranzytu z zakładu Raba do Krakowa [11].

Analiza zmian zawartości THM w wodzie

Oceny zmian jakości wody w podsystemie dystrybucji dokonano w oparciu o wyniki badań jakości wody przeprowadzonych w latach 2003–2006. Badania te pozwoliły podjąć próbę opracowania modelu szacowania wtórnego zanieczyszczenia wody w sieci wodociągowej, w ujęciu powstawania THM będących ubocznymi produktami dezynfekcji wody chlorem. W analizie rozpatrzono jedynie strefę zaopatrzenia miasta w wodę pochodzącą z zakładu Raba. Wybór – jako obszaru badań – tego rejonu eksploatacji krakowskiego systemu wodociągowego uzasadnia zarówno największa ilość produkowanej wody, jak i największy obszar zasilania, ale również zastosowana technologia oczyszczania wody. Oparcie pracy zakładu Raba na wodzie powierzchniowej pochodzącej ze zbiornika Dobczyce, charakteryzującej się dużą zmiennością jakości w ciągu roku, a szczególnie letnio-jesiennymi zakwitami sinic, zwiększa prawdopodobieństwo występowania różnorodnej matrycy organicznej w wodzie, zawierającej liczne niezidentyfikowane substancje organiczne. Zastosowana technologia oczyszczania wody gwarantuje dużą skuteczność, niemniej jednak użycie chloru jako środka dezynfekcyjnego sprzyja powstawaniu THM w wodzie podczas jej transportu na dużą odległość do odbiorców.

Oceną objęto zmienność składu wody w charakterystycznych punktach sieci, będących reprezentatywnymi punktami badań. Pobór próbek odbywał się zgodnie z PN-87/C-04632/01-04, natomiast wskaźniki jakości badanych próbek wody oznaczono zgodnie z procedurami podanymi w PN. W przeprowadzonej analizie dokonano podziału strefy zasilania miasta wodą ujmowaną z Raby na 6 obszarów badawczych, w funkcji

odległości od nastawni Piaski Wielkie (tab. 1). Średni czas przepływu wody w poszczególnych strefach został wyznaczony przy pomocy modelu hydraulicznego EPANET2, przy założeniu obecnego poboru wody w mieście około 150 tys. m³/d. Minimalny czasu przepływu wody do najbliższego położonego punktu monitoringu (zb. Kosocice) wynosi 0,58 godz., natomiast przy najmniejszym poborze wody w mieście wzrasta trzykrotnie, tj. do 1,5 godz. Czas kontaktu z chlorem w przypadku wody dopływającej do najdalej odległego punktu monitoringu (ul. Brzeska 12, dzielnica Wolica) zmienia się w zakresie 16,2+43,3 godz.

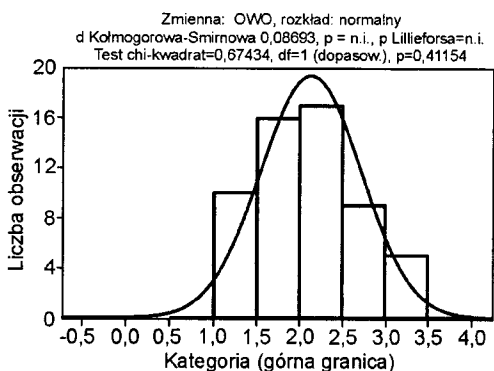
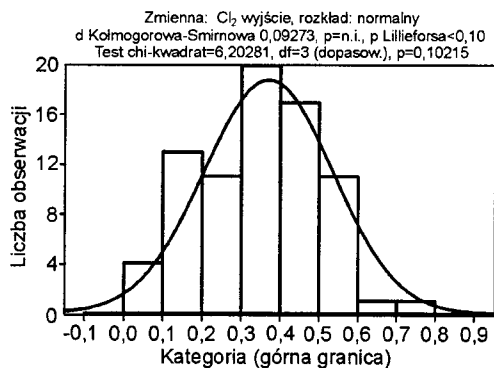
Tabela 1. Obszary zasilania systemu zaopatrzenia Krakowa w wodę z zakładu oczyszczania Raba

Obszar	Dzielnica	Odległość km	Czas przepływu godz.	
			min.	maks.
I	Wola Duchacka	<2	1,4	3,7
II	Wola Duchacka, Swoszowice, Łagiewniki, Prokocim-Bieżanów	2-4	2,7	7,4
III	Swoszowice, Łagiewniki, Podgórze, Prokocim-Bieżanów	4-6	4,2	11,1
IV	Swoszowice, Dębni, Centrum, Grzegórzki, Podgórze, Prokocim-Bieżanów	6-8	5,6	14,8
V	Dębni, Centrum, Grzegórzki, Prokocim-Bieżanów, Nowa Huta	8-10	6,9	18,5
VI	Nowa Huta	10	6,9	18,5

Parametry hydrauliczne pracy systemu dystrybucji wody kształtowane obecnym poborem wody w mieście stwarzają dogodne warunki do powstawania THM w wodzie. Na skutek zwiększonego czasu kontaktu wody z chlorem oraz w okresach letnich odnotowano wyraźny wzrost zawartości ubocznych produktów dezynfekcji wody w sieci wodociągowej. Zakres zmienności temperatury wody zasilającej system wodociągowy podczas badań obejmował minimalne temperatury w okresie zimowym (2,9 °C) oraz maksymalne w sezonie letnim (22 °C). Zmienność zawartości chloroformu w wodzie z zakładu Raba wykazuje zależność od pory roku. Latem odnotowano największy przyrost THM w sieci wodociągowej – stwierdzono ok. 5,5-krotne zwiększenie zawartości chloroformu w stosunku do wody zasilającej system. W okresie badań (lata 2003–2006) w sezonie letnim średnia zawartość chloroformu w wodzie na wyjściu z zakładu Raba wynosiła 5,2 mg/m³, a w wodzie w sieci wodociągowej 28,5 mg/m³. Incydentalnie na poziomie ryzyka 0,08 w systemie dystrybucji wody w okresie letnim zdarzały się przekroczenia wartości dopuszczalnej chloroformu. Największą zawartość chloroformu (65,2 mg/m³) w sieci odnotowano 27-08-2004, czego przyczyną można upatrywać w wysokiej temperaturze wody 20,2 °C, przy jednocześnie stosunkowo dużej zawartości substancji organicznych (OWO 3,3 gC/m³) w wodzie na wejściu do sieci. Ponadto w okresie jesiennym, ze względu na temperaturę wody (11+19 °C), odnotowano średni przyrost THM w wodzie chlorowanej wynoszący 250%, jednak maksymalnie do 14,1 mg/m³, przy zawartości chloroformu w wodzie na wyjściu z zakładu Raba <6 mg/m³.

W oparciu o uzyskane wyniki badań przeprowadzono analizę zmian zawartości THM w wodzie wodociągowej w funkcji

dawki chloru, ilości chloru w wodzie podawanej do systemu dystrybucji, pH, utlenialności, OWO i absorbancji w UV ($\lambda=254$ nm). Wyniki poddano analizie statystycznej za pomocą programu STATISTICA PL. Z przeprowadzonej analizy wynika, że największą zmiennością zawartości chloroformu (maks. $65,2 \text{ mg/m}^3$, min. $4,5 \text{ mg/m}^3$) w wodzie cechował się obszar II zasilania, w którym średnia zawartość chloroformu wynosiła $16,36 \text{ mg/m}^3$. W celu weryfikacji hipotezy o normalności rozkładu rozpatrywanych zmiennych przeprowadzono test Kołmogorowa-Smirnowa (K-S). Na przyjętym poziomie istotności 0,05 nie było podstaw do odrzucenia założenia, że rozkład czynników warunkujących powstawanie THM jest rozkładem normalnym. Wyniki przeprowadzonej weryfikacji wybranych zmiennych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Rozkład zmiennych losowych (OWO, chlor) na wyjściu z zakładu oczyszczania wody Raba

Hipotezę o normalności rozkładu należało jednak odrzucić w przypadku THM w wodzie na wyjściu z zakładu oczyszczania. Dlatego dane poddano transformacji logarytmo-normalnej w postaci:

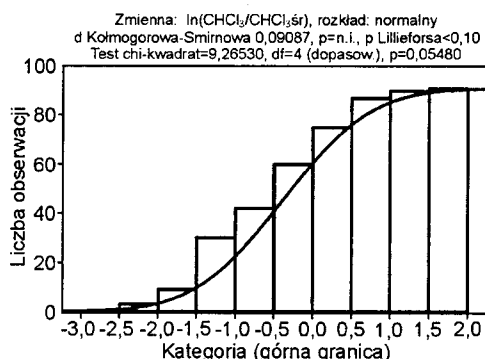
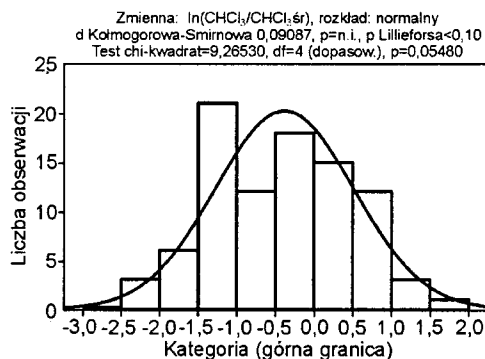
$$\ln(a/\bar{a}) \quad (1)$$

w której:

\bar{a} – średnia zawartość chloroformu w wodzie na wyjściu z zakładu oczyszczania, mg/m^3 ,

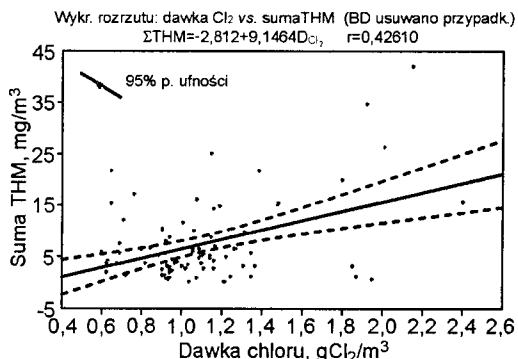
a – zawartość chloroformu w próbce wody, mg/m^3

Tak uzyskaną bazę danych ponownie sprawdzono testem K-S i tym razem hipoteza o normalności rozkładu została przyjęta. W celu oceny ryzyka przekroczeń wartości inicjujących powstawanie w sieci dystrybucji ponadnormatywnych ilości THM sporządzono wykres dystrybucyjny (rys. 2). Określono prawdopodobieństwo ($p=0,92$), z jakim nie zostanie przekroczona wartość transformowanej zmiennej losowej, która odpowiada wartości krytycznej chloroformu na wyjściu ze stacji (10 mg/m^3), jako zmiennej inicjującej wzrost zawartości chloroformu w sieci powyżej wartości dopuszczalnej 30 mg/m^3 .



Rys. 2. Rozkład chloroformu na wyjściu z zakładu oczyszczania wody Raba

W celu pełnej analizy ilości powstających THM w podsystemie dystrybucji wody Krakowa przeprowadzono weryfikację hipotezy o zależności sumy THM w sieci od dawki chloru w zakładzie oczyszczania Raba. Na przyjętym poziomie istotności $\alpha=0,05$ nie było podstaw do odrzucenia hipotezy o zależności rozpatrywanych czynników. W dalszej analizie określono korelację pomiędzy dawką chloru a sumą THM w sieci wodociągowej i dokonano weryfikacji istotności współczynnika korelacji za pomocą testu Pearsona, który potwierdził istotność statystyczną korelacji w całej populacji generalnej. Ilość powstających THM w krakowskiej sieci wodociągowej jest zależna od dawki chloru w zakładzie Raba (rys. 3). Przeprowadzona analiza wykazała przeciętną korelację omawianych zmiennych, o czym świadczy wartość współczynnika korelacji wynosząca 0,42610.



Rys. 3. Zależność sumy THM w krakowskim podsystemie dystrybucji wody od dawki chloru

Przeprowadzone badania wykazały ponadto, że średnia zawartość chloroformu w podsystemie dystrybucji wody różnie wraz z odległością od źródła zasilania w strefach od I do IV, natomiast w strefach V i VI następuje zmniejszenie zawartości chloroformu odpowiednio do 68,5% (strefa V) i 37,2% (strefa VI), w odniesieniu do średnich wartości tego wskaźnika

w strefie IV. Powyższy fakt można wyjaśnić większym prawdopodobieństwem ewentualnego występowania obszaru mieszania się wód zasilających krakowski system wodociągowy z zakładów Raba i Dłubnia. Można też wysunąć tezę, iż przy znacznej odległości od źródła zasilania, a co za tym idzie – większym czasie kontaktu wody z chlorem, w pewnych warunkach kontaktu substancji organicznych z utleniaczem w wodzie mogą zachodzić reakcje następcze, powodujące zmniejszenie zawartości chloroformu, jednakże potwierdzenie tych przypuszczeń wymaga dalszych badań.

Wnioski

♦ Analiza zmian zawartości chloroformu w systemie dystrybucji wody może być istotnym czynnikiem określającym zmiany jakości wody w czasie jej transportu siecią wodociągową od zakładu oczyszczania do odbiorców.

♦ Powstawanie THM (zwłaszcza chloroformu) jest zależne od ilości substancji organicznych obecnych w wodzie, rodzaju i dawki dezynfektanta, a także temperatury i czasu kontaktu wody z utleniaczem. Zależność ta jest słuszna w przypadku małych systemów zaopatrzenia w wodę zasilanych z jednego źródła. W przypadku dużych systemów, mających kilka układów zasilania i o rozbudowanych podsystemach dystrybucji wody, zasada ta nie przekłada się jednak wprost na warunki eksploatacji systemu wodociągowego. Potwierdziła to analiza zmian zawartości chloroformu w krakowskim podsystemie dystrybucji wody w strefach zasilania odległych od nastawni Piaski Wielkie o ponad 8 km, ponieważ w czasie podwyższonej temperatury (lato) w strefach V i VI odnotowano zmniejszenie zawartości chloroformu średnio do 53%, w odniesieniu do największej wartości ze średnich w wydzielonych obszarach badań wynoszącej 20,15 mg/m³ (strefa IV).

♦ W krakowskim podsystemie dystrybucji wody w latach 2003–2006 odnotowano jedynie incydentalne przekroczenia zawartości chloroformu w wodzie, przypadające na miesiące letnie (sierpień). Przeprowadzona analiza wykazała, że dystrybuanta zmiennej losowej nieprzekroczenia wartości NDS chloroformu wynosi 0,923077.

Praca powstała w ramach realizacji projektu badawczego KBN 5T07E 044 25 pt. „Opracowanie modelu niezawodności funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę (SZW) w aspekcie wtórnego zanieczyszczenia wody”.

LITERATURA

1. J. NAWROCKI, S. BIŁOZOR [red.]: Uzdatnianie wody. Procesy chemiczne i biologiczne. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Poznań 2000.
2. M.W. LE CHEVALLIER *et al.*: Examining the relationship between iron corrosion and the disinfection of biofilm bacteria. *Journal AWWA*, 1993, Vol. 7, pp. 111–123.
3. S. OKABE, T. KOKAZI, Y. WATANABE: Biofilm formation potentials in drinking waters treated by different advanced treatment processes. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2002, Vol. 2, No. 4, pp. 97–104.
4. D. GATEL *et al.*: Microbial water quality management in the Paris suburbs distribution system. *Aqua*, 2000, Vol.49, No. 5, pp. 231–241.
5. R. SADIQ, M.J. RODRIGUEZ: Disinfection by-products (DPDs) in drinking water and predictive models for their occurrence: A review. *Science of the Total Environment*, 2004, pp. 21–46.
6. P.C. SINGER *et al.*: DPDs in chlorinated North Carolina drinking water. *Journal JAWWA*, 1995, Vol. 87, No. 10, pp. 83–92.
7. W.J. CHAN, C.P. WEISEL: Halogenated DPD concentrations in a distribution system. *Journal AWWA*, 1998, Vol. 90, No. 4, pp. 151–163.
8. M.J. RODRIGUEZ, B. SERODESJ: Spatial and temporal evolution of trihalomethanes in three water distribution systems. *Water Research*, 2001, Vol. 35, No. 6, pp. 1572–1586.
9. W.E. ELSHORBAGY *et al.*: Simulation of THM species in water distribution systems. *Water Research*, 2000, Vol. 34, pp. 3431–3439.
10. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 29 marca 2007 r. w sprawie wymagań dotyczących jakości wody do spożycia przez ludzi. *DzU nr 61, poz.417*.
11. I. ZIMOCH, T. ŻABA: Dynamika zmian parametrów niezawodności systemu dystrybucji wody Krakowa. *Mat. II Kongresu Inżynierii Środowiska PAN*, 2005, Monografie nr 32, ss. 609–617.

Zimoch, I. Assessing Spatial Variations of Water Quality in the Water-pipe Network by Analysis of THM Formation. *Ochrona Środowiska* 2007, Vol. 29, No. 4, pp. 49–52.

Abstract: When tap water is transported over a long distance, the supplier will have to face the problem of its bacteriological safety. This necessitates a careful choice of the disinfection method in order to provide the user with water of the quality desired. The use of chlorine compounds for water disinfection favours the formation of organic halo-complexes, including trihalomethanes (THM). The increase in the THM content during transport in the water-pipe network is attributable not only to the need of applying high chlorine doses for the purpose of

disinfection but also to the long time of water residence in the supply system. The paper presents an analysis of the process of THM formation in the water-pipe network of the city of Cracow. Making use of the results obtained, a model was constructed for the assessment of water recontamination due to the THM being formed, taking into account the service conditions of the water supply system. In the analysis, consideration was given not only to the operating conditions of the treatment train but also to the unstable conditions that characterize the functioning of the water-pipe network.

Keywords: Water distribution system, chlorination, disinfection, water quality, trihalomethanes (THM).