

Dariusz Kowalski, Beata Kowalska, Marian Kwietniewski

## Metoda lokalizacji punktów pomiaru jakości wody w systemie monitoringu sieci wodociągowej

Do głównych przyczyn wtórnego zanieczyszczenia wody w sieci wodociągowej należą brak jej stabilności biologicznej i chemicznej [1] oraz oddziaływanie materiału rurociągów na jakość przesyłanej wody. W Polsce zjawisko to jest dodatkowo potęgowane przez przewymiarowanie sieci wodociągowej, wynikające między innymi z istotnego zmniejszenia zapotrzebowania na wodę. W zarządzaniu sieciami wodociągowymi konieczne staje się uwzględnienie tego zjawiska, co może być realizowane za pomocą odpowiednich modeli numerycznych. Zarówno wykorzystanie modeli, jak i kontrola działania sieci wodociągowej opiera się na wynikach monitoringu, którego wdrażanie – powszechne realizowane obecnie przez przedsiębiorstwa wodociągowe – stało się koniecznością [2].

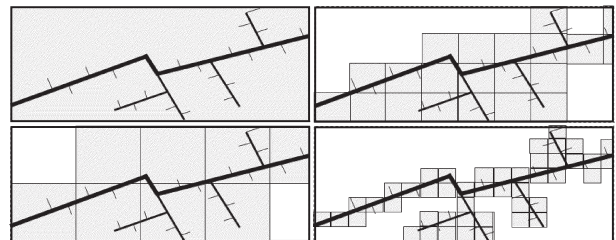
Jednym z najtrudniejszych zadań w projektowaniu systemu monitoringu sieci wodociągowej jest określenie lokalizacji punktów pomiarowych. Dotyczy to zarówno monitoringu parametrów hydraulicznych, jak i wskaźników jakości przesyłanej wody [3]. Obowiązujące akty prawne podkreślają konieczność prowadzenia takiego monitoringu, ze szczególnym uwzględnieniem jakości przesyłanej wody [4–8]. Nie precyzują one jednak lokalizacji punktów poboru próbek do celów monitoringu, mowa jest jedynie o zapewnieniu reprezentatywności tych punktów, przy czym akty te nie precyzują na czym ma ona polegać. Prowadzi to do zróżnicowanej interpretacji tego pojęcia i – co za tym idzie – wielości opracowywanych metod do określania wskazań lokalizacyjnych [3, 9]. Ustalenia dokonane przez grupę problemową ‘Battle of the Water Sensor Networks’ powołaną na 8 Symposium of Water Distribution Systems Analysis (Cincinnati, Ohio, USA, August 27–29, 2006) wykazały, że jak dotąd nie ma metody uniwersalnej, którą można byłoby uznać za referencyjną w stosunku do pozostałych. Wskazania lokalizacyjne uzyskane w wyniku porównania 18 metod znacząco różniły się od siebie [10]. W związku z tym wciąż istnieje potrzeba opracowania właściwej metody określania lokalizacji punktów pomiarowych na sieci wodociągowej.

W pracy zaprezentowano autorską metodę określania wskazań lokalizacyjnych punktów pomiaru jakości wody w sieci wodociągowej, wykorzystującą elementy geometrii fraktalnej i uwzględniającą zarówno kryteria techniczne, jak i ekonomiczne.

### Koncepcja metody

Punktem wyjściowym do opracowania metody lokalizacji było wykorzystanie analogii między układem krwionośnym ludzi i zwierząt a systemem wodociągowym. Organizmy żywe w drodze ewolucji wykształciły optymalne rozwiązania dotyczące monitorowania jakości i parametrów hydraulicznych transportowanych płynów [11, 12], takich jak ciśnienie, stężenie tlenu i inne, z wyróżnieniem organów o największym znaczeniu dla organizmu [13]. Szukając analogii z systemem wodociągowym można stwierdzić, że system monitorowania powinien obejmować punkt dostawy wody (główną pompownię) oraz fragmenty sieci w sąsiedztwie największych jej odbiorców. Taki system zaproponowano w pracy [14], przy czym nie uwzględniono jednak innych kryteriów wyznaczania ważności poszczególnych obiektów. Konieczna okazuje się więc jej modyfikacja, wymagająca między innymi zdefiniowania tej ważności.

Projektowanie systemów technicznych wymaga ich uprzedniego opisu. W przypadku sieci wodociągowej opis ten jest bardzo indywidualny ze względu na wielość i różnorodność czynników, które ją kształtują. Z punktu widzenia geometrii, struktura sieci wodociągowej ma charakter *quasi* chaotyczny (niepowtarzalny), zatem do jej opisu można wykorzystać elementy geometrii fraktalnej [15]. Do głównych cech zbiorów fraktalnych należy samopodobieństwo (elementy zbioru są w pewien sposób podobne zarówno do siebie nawzajem, jak i do całości zbioru) oraz tzw. hierarchia skal. Obie te cechy występują jednocześnie podczas obserwacji obrazu sieci wodociągowej przy zmiennej rozdzielczości (rys. 1). Wszystkie kwadraty pokrywające obraz sieci wodociągowej są podobne do siebie. Zmiana ich wielkości (rozdzielczości obrazu) powoduje uszczegółowienie obrazu samej sieci, co zostało szczegółowo opisane w pracy [16].



Rys. 1. Przykładowa sieć wodociągowa z siatką kwadratów o zmiennej wielkości [7]

Fig. 1. Exemplary water network with overlay of variable-size squares [7]

Proponowaną metodę oparto na następujących założeniach: punkty pomiaru jakości przesyłanej wody lokalizowane są w węzłach sieci wodociągowej, czujniki monitorujące powinny być zlokalizowane w najważniejszych punktach sieci, definicja „ważności” tych punktów oparta jest o kryteria heurystyczne, czujniki mierzące ten sam parametr nie powinny być zlokalizowane blisko siebie, natomiast lokalizacja punktów pomiarowych prowadzona jest zgodnie z zasadami geometrii fraktalnej w sposób iteracyjny, w zależności od wykorzystywanej skali obserwacji sieci, z wykorzystaniem rankingu ważności wyodrębnionych w danej skali węzłów.

Do realizacji tej metody niezbędny jest plan sytuacyjny sieci wodociągowej, jako podstawa do lokalizacji głównych odbiorców wody, mapa zagospodarowania przestrzennego obszaru badań – w powiązaniu z planem sytuacyjnym pozwala na określenie rodzaju zabudowy, także spisu, lokalizacji i charakterystyki odbiorców wody – wg danych lokalnego przedsiębiorstwa wodociągowego oraz modelu numerycznego opisującego warunki hydrauliczne panujące w badanej sieci. Najistotniejszym na tym etapie jest wybór najważniejszego węzła z punktu widzenia monitorowania jakości wody. Autorzy proponują, aby wyboru tego dokonać w oparciu o ranking ważności w oparciu o wskaźnik  $W$ , wykorzystując następujący wzór definicyjny:

$$W = Q \times a \times b \times c \quad (1)$$

w którym:

$Q$  – dobowy pobór wody

$a$  – współczynnik opisujący wymaganą pewność dostawy wody o wymaganej jakości

$b$  – współczynnik opisujący skutki braku dostawy wody o wymaganej jakości

$c$  – współczynnik opisujący czas przebywania wody w systemie dystrybucji

Wartość dobowego poboru wody można określić we wzorze (1) na dwa sposoby – w jednostkach objętości lub w postaci kategorii przedstawionych w tabeli 1. Zastosowano podział 5-stopniowy, analogicznie do liczby poziomów ryzyka podanych w pracach [17, 18]. Numer kategorii stanowił jednocześnie wartość poszukiwanego wskaźnika opisującego pobór wody. Wartości współczynników  $a$ – $c$  we wzorze (1) można przyjmować zgodnie z tabelami 2–4.

Proces wyznaczania rankingów węzłów na podstawie wzoru (1) można prowadzić dwuetapowo. W pierwszym etapie, wykorzystując dany typ obserwacji (rys. 1), należy podzielić rozpatrywany obszar sieci na podobszary (rys. 2), a następnie wyznaczyć wartość wskaźnika ważności ( $W$ ) zgodnie ze wzorem (1) w przypadku każdego podobszary. W pierwszym etapie obliczeń konieczna będzie pewna modyfikacja wzoru (1):  $Q$  oznacza sumaryczny pobór wody we wszystkich węzłach zawartych w danym

Tabela 1. Propozycja kategoryzacji poboru wody w zależności od jego wartości w poszczególnych węzłach

Table 1. Proposition of water demand categorization depending on its value in individual network nodes

Dobowy pobór wody*	Kategoria poboru wody
0÷20%	1
21÷40%	2
41÷60%	3
61÷80%	4
81÷100%	5

\*odsetek największego poboru wody spośród wszystkich węzłów

Tabela 2. Wartości współczynnika  $a$  we wzorze (1) w zależności od rodzaju odbiorców wody

Table 2. Coefficient  $a$  values in the formula (1) depending on water user type

Rodzaj zabudowy	Współczynnik $a$
Zabudowa mieszkaniowa	1
Szkoły, internaty, usługi niewodochłonne	2
Usługi wodochłonne, centra handlowe, centra administracyjne, małe sklepy	3
Przychodnie, hale widowiskowo-sportowe, tereny przemysłowo-składowe, gastronomia	4
Tereny przemysłu wodochłonnego, bazy straży pożarnej, szpitale	5

Tabela 3. Wartości współczynnika  $b$  we wzorze (1) w zależności od rodzaju zabudowy

Table 3. Coefficient  $b$  values in the formula (1) depending on development type

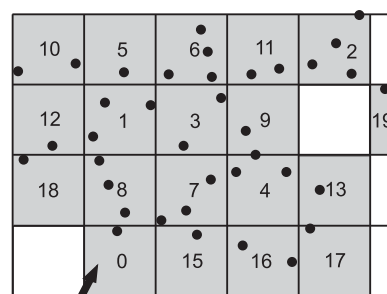
Rodzaj zabudowy	Współczynnik $b$
Niska	1
Średnia	2
Wysoka	3
Centra administracyjne, tereny przemysłowe	4
Obiekty służące ratowaniu życia	5

Tabela 4. Wartości współczynnika  $c$  we wzorze (1) w zależności czasu przetrzymania wody

Table 4. Coefficient  $c$  values in the formula (1) depending on water retention time

Czas przetrzymania wody*	Współczynnik $c$
0÷20%	1
21÷40%	2
41÷60%	3
61÷80%	4
81÷100%	5

\*odsetek najdłuższego czasu przetrzymania wody spośród wszystkich węzłów



Rys. 2. Siatka kwadratów pokrywająca obszar sieci wodociągowej oraz przykładowy ranking ważności wydzielonych podobszary (1, 2, ..., 19)

Fig. 2. Grid square overlay covering water system area and exemplary importance ranking of selected subareas (1, 2, ..., 19)

kwadracie, współczynniki  $a$  oraz  $b$  odpowiadają dominującym w danym kwadracie rodzajom zabudowy i odbiorców, natomiast współczynnik  $c$  odpowiada największej wartości czasu przetrzymania wody spośród węzłów zawartych w danym kwadracie. Wykorzystując obliczone wartości wskaźnika ważności ( $W$ ) można utworzyć ranking podobszary wydzielonych przez siatkę. Należy jednak pamiętać, że zmiany jakościowe wody w sieciach dystrybucji nie mogą być w pełni opisane bez uwzględnienia warunków

początkowych, tj. jakości wody wprowadzanej do sieci. W związku z tym jeden z punktów pomiarowych systemu monitorowania należy zlokalizować na wejściu do systemu dystrybucji. Wybór konkretnych węzłów do lokalizacji punktów pomiarowych realizowany jest w drugim etapie prac, z zastosowaniem analogicznej metodyki.

### Obiekt badań

Metodę wyznaczania lokalizacji punktów pomiaru jakości wody przetestowano w warunkach sieci wodociągowej Puław, w ramach projektu pt. „Przygotowanie założeń i wdrożenie Zintegrowanego Systemu Zarządzania Infrastrukturą Techniczną Przedsiębiorstwa” (Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka). Do badań wykorzystano podstawowy model numeryczny, zbudowany w programie EPANET 2, odzwierciedlający strukturę sieci MPWiK „Wodociągi Puławskie” (rys. 3). W skład modelu wchodziły 564 węzły oraz 600 odcinków obliczeniowych. Lokalizację punktów pomiaru jakości wody prowadzono wielowariantowo, przy założeniu wynikającym z przesłanek ekonomicznych – wyznaczenie 5 punktów pomiarowych:

– warianty jednoetapowe: wariant 1 w oparciu o pobór wody wg pracy [14]; wariant 2 w oparciu o pobór wody, czas przetrzymania wody oraz współczynniki odpowiadające wymaganej pewności dostawy wody i skutków braku jej dostawy, zgodnie z formułą (1); wariant 3 w oparciu o formułę (1), w której pobór wody opisano zgodnie z tabelą 1, zaś współczynniki a–c przyjęto zgodnie z tabelami 2–4,

– warianty zakładające fraktalny charakter sieci, realizowane w sposób iteracyjny: wariant 4 – zgodny z formułą (1) wykorzystującą współczynniki zgodne z wariantem 3 (wielkość boku siatki obszarów pierwszego etapu przyjęto jako odpowiadającą długości, jaką przepływnie woda w sieci w ciągu 2 godz. z prędkością średnią wyznaczoną spośród wszystkich raportowanych przez model numeryczny w godzinie o średnim poborze wody); wariant 5 – jak wariant 4, jednak z długością boku siatki odpowiadającą 4-godz. czasowi przepływu; wariant 6 – jak wariant 4, lecz z 6-godz. czasem przepływu; wariant 7 – jak wariant 4, lecz z 8-godz. czasem przepływu; wariant 8 – jak wariant 4, lecz z 10-godz. czasem przepływu.

W celu porównywania wyników obliczeń opracowano metodę opartą na elementach teorii ryzyka, z wykorzystaniem następujących wskaźników: V – objętość wody zgromadzonej w przewodach sieciowych, nieobjętej monitoringiem, T – maksymalny czas detekcji zanieczyszczenia przez system monitoringu,  $T/V_{pom}$  – stosunek czasu detekcji zanieczyszczenia do objętości wody zgromadzonej w przewodach, objętej monitoringiem.

W celu ułatwienia analiz została zastosowana maczyca ryzyka [17, 18] oparta na rankingach bazujących na omówionych wskaźnikach. Wartości poszczególnych elementów tej maczycy proponuje się uzależniać w każdym wariantcie wskazań lokalizacyjnych od miejsca, jakie dane rozwiązanie zajmuje w rankingu opartym na badanych wskaźnikach ryzyka. Najniższa pozycja w rankingu będzie odpowiadać 1 punktowi, zaś najwyższa liczbie wszystkich ocenianych wariantów. W przypadku, kiedy wartości wskaźników wykorzystywanych do szacowania ryzyka powtarzają się, należy zmniejszyć liczbę możliwych do uzyskania punktów. Suma uzyskanych tą drogą punktów może być traktowana jako główny wskaźnik pozwalający na ocenę porównawczą prawidłowości lokalizacji punktów monitorowania jakości wody w poszczególnych wariantach.

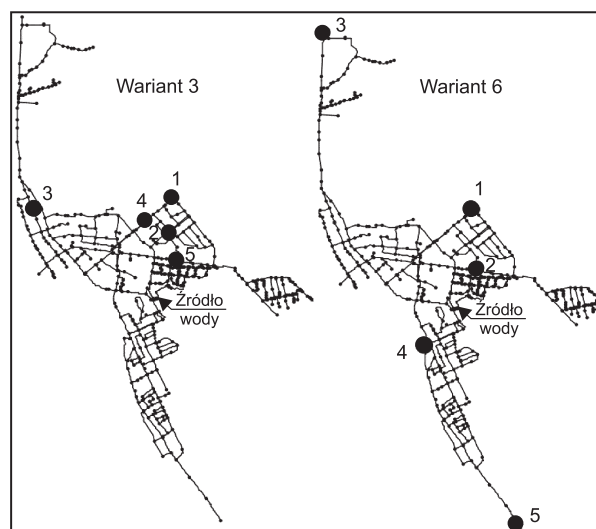
Tabela 5. Matryca ryzyka braku lub zbyt późnego wykrycia zanieczyszczenia wody w sieci

Table 5. Risk matrix for failure or serious delay of water contamination detection in the network

Liczba punktów	Ranking czujników monitoringu w wariantach					
	1	2	3	4	5	6–8
objętość wody nieobjęta monitoringiem (V)						
1	2	4	4	3	1	4
2	2	3	2	4	1	2
3	4	5	1	3	2	6
4	4	3	1	5	2	6
5	3	2	1	4	5	6
maksymalny czas detekcji zanieczyszczenia (T)						
1	2	1	1	1	3	1
2	1	1	2	1	3	2
3	2	2	3	2	2	1
4	4	4	5	1	3	2
5	3	4	5	1	1	2
względny czas detekcji zanieczyszczenia ( $T/V_{pom}$ )						
1	3	2	2	2	1	4
2	1	2	4	3	5	4
3	3	5	4	2	1	2
4	5	4	5	1	3	2
5	4	5	6	1	2	3
Suma	43	47	47	34	35	47

Szczegółowy opis metody oceny prawidłowości wskazań został opisany w pracach [16, 19].

Wyniki porównania zestawiono w tabeli 5. Najwyższe wartości uzyskano w wariantach 2 i 3 oraz 6–8 (jednakowe rezultaty). W wariantach 2 i 3 cztery spośród pięciu wyznaczonych węzłów znajdowały się blisko centrum sieci, w niewielkich odległościach od siebie. Uzyskany wynik nie spełnił w tym przypadku założeń, które przyjęto w opracowanej metodyce. Z tego względu za najlepszy, a jednocześnie spełniający wszystkie założenia stawiane rozpatrywanej metodyce przyjęto wariant 6 (i jednocześnie 7 oraz 8) (rys. 3). Wariant oparty na metodzie podanej w pracy [14] znalazł się w tym rankingu na czwartym miejscu.



Rys. 3. Wskazania lokalizacyjne punktów pomiarowych  
Fig. 3. Indications for measuring point localization



## Wnioski

◆ Lokalizacja punktów pomiarowych jakości przesyłanej wody, w oparciu o zaproponowaną metodę okazała się możliwa do przeprowadzenia w warunkach rzeczywistej sieci wodociągowej. Zastosowana metoda oceny prawidłowości tej lokalizacji umożliwiła liczbowe porównanie ze sobą rozpatrywanych wariantów i wybór najlepszego spośród nich.

◆ Jednoetapowa metoda opisana w pracy [14] (wariant 1), oparta na kryterium poboru wody, dała wynik gorszy od najlepszego wyniku uzyskanego w proponowanej metodzie.

◆ Długość boku siatki kwadratów wykorzystywanej w pierwszej iteracji proponowanej metody, w świetle opracowanej matrycy ryzyka, ma wpływ na jakość uzyskiwanych wskazań lokalizacyjnych punktów pomiarowych. Przeprowadzone analizy wykazały, że długość tego boku powinna odpowiadać odległości, jaką przepływnie woda w sieci w ciągu 6÷10 godz. z prędkością średnią wyznaczoną spośród wszystkich raportowanych przez model numeryczny w godzinie o średnim poborze wody.

◆ W świetle uzyskanych rezultatów wydaje się, że proponowana metoda może być wykorzystywana do lokalizowania punktów pomiarowych systemu monitorowania jakości przesyłanej wody przez rzeczywiste sieci wodociągowe, odpowiadające wielkością i stopniem złożoności sieci analizowanej w artykule.

*Praca naukowa została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu rozwojowego nr NR14000610 pt. „Opracowanie kompleksowej metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa dostawy wody do odbiorców” realizowanego w latach 2010–2013.*

## LITERATURA

1. B. KOWALSKA, D. KOWALSKI, A. ROŻEJ: Organic compounds migrating from plastic pipes in contact with the drinking water. Preliminary studies. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA* 2011, Vol. 60, No. 3, pp.137–146.
2. M. KWIETNIEWSKI, W. GĘBSKI, N. WRONOWSKI: Monitorowanie sieci wodociągowych i kanalizacyjnych. *Monografie PZITS, Seria: Wodociągi i Kanalizacja* 2007, nr 10.
3. D. KOWALSKI, M. KWIETNIEWSKI: Problem lokalizacji punktów pomiarowych w systemach monitoringu sieci wodociągowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2009, nr 6, ss. 24–29.
4. Dyrektywa Rady 98/83/EC z 3 listopada 1998 r. dotycząca jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. *Official Journal of the European Communities* 1998, No L. 330, pp. 32–54.
5. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 29 marca 2007 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz. U. nr 61, poz. 417; rozporządzenie Ministra Zdrowia z 20 kwietnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz. U. nr 72, poz.466.
6. Guidelines for Drinking-water Quality. Vol. 1 – Recommendations. WHO 2004.
7. PN-EN 805:2002. Zaopatrzenie w wodę – Wymagania dotyczące systemów zewnętrznych i ich części składowych.
8. Ustawa z 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków. Dz. U. nr 72, poz. 747.
9. M. SUDOŁ: Monitoring sieci wodociągowej dla potrzeb oceny niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Warszawa 2005 (praca niepublikowana).
10. A. OSTFELD, J.G. UBE, E. SALOMONS, J.W. BERRY, W.E. HART, C.A. PHILLIPS, J.-P. WATSON, G. DORINI, P. JONKERGOUW, Z. KAPELAN, F. di PIERRO, S.-T. KHU, D. SAVIC, D. ELIADES, M. POLYCARPOU, S.R. GHIMIRE, B.D. BARKDOLL, R. GUELI, J.J. HUANG, E.A. McBEAN, W. JAMES, A. KRAUSE, J. LESKOVEC, S. ISOVITSCH, J. XU, C. GUESTRIN, J. van BRIESEN, M. SMALL, P. FISCHBECK, A. PREIS, M. PROPATO, O. PILLER, G.B. TRACHTMAN, Z.Y. WU, T. WALSKI: The battle of the water sensor networks (BWSN): A design challenge for engineers and algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2008, Vol. 134, No. 6, pp. 556–568.
11. A. ORR: Testing natural selection with genetics. *Scientific American* 2009, special issue (January), pp. 42–47.
12. G. STIX: Darwin’s living legacy – evolutionary theory 150 years later. *Scientific American* 2009, special issue (January), pp. 4–12.
13. W.Z. TRACZYK [red.]: Fizjologia człowieka z elementami fizjologii stosowanej i klinicznej. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2004.
14. S.R. GHIMIRE, B.D. BARKDOLL: Heuristic method for the battle of the water network sensors: Demand-based approach. Proc. ‘8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium’, Cincinnati (Ohio, USA) 2006.
15. D. KOWALSKI: Czy sieć wodociągowa to fraktal? *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2010, nr 3, ss. 29–33.
16. D. KOWALSKI: Nowe metody opisu struktur sieci wodociągowych do rozwiązywania problemów ich projektowania i eksploatacji. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN* 2011, vol. 88.
17. J. RAK: Metody matrycowe oceny ryzyka w systemach zaopatrzenia w wodę. *Instal* 2004, nr 3, ss. 42–45.
18. J. RAK, B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.
19. D. KOWALSKI, B. KOWALSKA, M. KWIETNIEWSKI: Propozycja metodyki oceny prawidłowości lokalizacji punktów monitorowania jakości wody w sieciach wodociągowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2012, nr 5, ss. 212–217.

**Kowalski, D., Kowalska, B., Kwietniewski, M. Localization Method for Water Quality Measuring Points in Water Network Monitoring System. *Ochrona Środowiska* 2013, Vol. 35, No. 3, pp. 45–48.**

**Abstract:** A new measuring point localization method based on fractal geometry for water quality monitoring in water network was presented. The proposed method belongs to the group based on individual network point suitability rankings for localization of monitoring sensors. The

method concept as well as tables of indexes essential for its practical application were presented. In addition to technical criteria, measuring point localization indications include economic criterion as well. Method used for assessment of this localization accuracy enabled numeric comparison between the considered options and selection of the best one. The proposed method was successfully tested for water network in Pulawy.

**Keywords:** Control point, water quality, fractal geometry.