

Ewa HOŁOTA, Beata KOWALSKA¹

PRZEGLĄD METOD WYZNACZANIA LOKALIZACJI PUNKTÓW MONITORINGU JAKOŚCI WODY W SIECI WODOCIĄGOWEJ

Jednym z elementów zarządzania jakością wody w sieciach wodociągowych jest monitoring jej jakości. Ma on na celu zarówno kontrolę i ocenę jakości dostarczonej wody, jak również wczesne wykrycie zdarzenia zanieczyszczenia i szybką reakcję na nie. W większości krajów obowiązujące przepisy wymagają monitorowania jakości wody, lecz nie wskazują, w jaki sposób mają być określone reprezentatywne lokalizacje umieszczania czujników jakości wody. Obecnie obowiązujące przepisy prawne regulują jedynie zakres oznaczeń i częstotliwość prowadzenia badań w systemach wodociągowych. Wybór miarodajnych punktów pomiarowych jakości wody w systemie dystrybucji jest problemem bardzo złożonym i kluczowym w planowaniu monitoringu. Wymaga on dobrej znajomości warunków hydraulicznych pracy sieci, a także przeprowadzenia analiz historycznych zmian jakości wody ujmowanej, uzdatnionej i wtłaczanej do sieci wodociągowej. Ze względu na brak szczegółowych wytycznych co do lokalizacji punktów pomiarowych dla celów monitoringu systemów wodociągowych utworzono wiele metod umożliwiających lokalizowanie punktów pomiarowych w sieciach dystrybucji wody. Jednakże dotychczas nie udało się wybrać jednej, uniwersalnej metody, która byłaby referencyjna w stosunku do innych. Z powodu dużej różnorodności metod lokalizacji punktów badania jakości wody istnieje konieczność opracowania metodyki oceny ich skuteczności. Niniejsza praca stanowi przegląd literatury dotyczącej monitoringu jakości wody. Przedstawiono w niej problemy związane z monitorowaniem jakości wody oraz zaprezentowano przegląd metod stosowanych do wyznaczenia lokalizacji punktów monitoringu jakości wody.

Słowa kluczowe: sieć wodociągowa, monitoring, jakość wody, umiejscowienie czujnika

1. Wprowadzenie

¹ Beata Kowalska, Politechnika Lubelska

Wraz ze wzrostem świadomości konsumentów w zakresie jakości wody zwiększają się wymagania stawiane systemom wodociągowym odnośnie jakości wody do spożycia. Coraz większego znaczenia nabiera kwestia kompleksowego monitorowania parametrów pracy sieci. Brak całościowego monitoringu wyraźnie utrudnia zarządzanie eksploatacją sieci wodociągowych.

Według definicji zawartej w „Leksykonie naukowo-technicznym” [48] monitoring ekosystemu to kontrola polegająca na kluczowych pomiarach wybranych parametrów ekosystemu: fizycznych, chemicznych i biologicznych, pozwalająca na śledzenie ich zmian w czasie. Powszechnie przyjmuje się, że monitoring to obserwacja, nadzór i badanie, natomiast w stosunku do obiektów technicznych – działanie polegające na dostarczeniu obsługującemu niezbędnych informacji umożliwiających ocenę pracy tych obiektów [70]. Kwietniewski zaproponował następującą definicję monitoringu: „monitorowanie sieci wodociągowej (i kanalizacyjnej) to system pomiarów i analiz dotyczących stanu funkcjonalnego i technicznego sieci w celu uzyskania wiarygodnych podstaw do zarządzania eksploatacją sieci i jej modernizacji” [44].

Monitoring sieci wodociągowych obejmuje system złożony z trzech elementów: urządzeń pomiarowych do mierzenia ciśnienia i przepływu wody, systemu transmisji danych z punktów pomiarowych do komputera zbierającego i archiwizującego dane pomiarowe oraz programu wizualizacji sieci wodociągowej ze zlokalizowanymi na niej punktami pomiarowymi. Ponieważ każdy z tych elementów posiada wiele możliwości realizacji, powinien być poddany niezależnej analizie. Ponadto system monitoringu może być elementem zintegrowanego systemu informatycznego wspomagającego kompleksowe zarządzanie siecią wodociągową, a więc obejmującego nie tylko prowadzenie bieżącego nadzoru jej pracy, ale również sterowanie siecią, projektowanie sieci, wykrywanie i lokalizację awarii, obliczanie czasu zatrzymania wody czy kalibrację modelu hydraulicznego [63].

Monitorowanie sieci wodociągowej obejmuje swoim działaniem monitorowanie wielkości hydraulicznych (natężenie przepływu, prędkość, ciśnienie), monitorowanie jakości wody oraz monitorowanie stanu technicznego systemu dystrybucji. Jednakże monitoringiem może również być objęte zużycie energii, stan urządzeń czy też poziom satysfakcji klientów. Niniejsza praca skupia się na zagadnieniu monitoringu jakości wody, który swoim zakresem może obejmować pomiar parametrów [1, 13, 16, 22, 31, 49, 50]:

- fizycznych, np. pH, mętność, przewodność,
- chemicznych, np. stężenie dezynfektanta,
- mikrobiologicznych, np. obecność *E. coli*.

Konieczność monitorowania jakości wody w przedsiębiorstwach wodociągowych wynika bezpośrednio z przepisów prawnych, regulujących ich działalność oraz standardy zaopatrzenia w wodę [17, 29, 57, 58, 61, 71]. Monitoring jakościowy jest wdrażany od kilkadziesiąt lat. Na początku swoim obszarem obejmował tylko ujęcia wody, później również system zasilania, a obecnie sieci

i cały system wodociągowy. Ma on na celu wspomaganie różnych działań umożliwiających ochronę konsumentów wody i sprawne funkcjonowanie przedsiębiorstw wodociągowych. Do najważniejszych z nich zalicza się:

- poprawę jakości wody dostarczanej odbiorcom m.in. poprzez przewidywanie zmian jakości wody, określanie zakresów i trendów tych zmian,
- określanie źródeł zanieczyszczeń wody,
- krótko- i długookresowe planowanie modernizacji systemu dystrybucji wody,
- kontrolę pracy stacji uzdatniania wody poprzez regularne badania jakości wody zasilającej sieć wodociągową,
- ocenę poziomu jakości świadczonych usług pod kątem zapewniania wymaganej jakości wody dostarczanej do odbiorców, realizowaną przez kontrolę zgodności jakości wody zasilającej sieć wodociągową, ocenę niezawodności dostaw wody i ocenę ryzyka niekorzystnego wpływu wody na odbiorców,
- wskazywanie nieprawidłowości działania systemu dystrybucji wody, w tym awarii i uszkodzeń [65].

Punktem wyjścia i podstawą metodologii zarządzania jakością wody w sieciach wodociągowych jest odpowiednie zaplanowanie i wdrożenie systemu monitoringu sieci dystrybucji wody. Ciągły monitoring i dokonywana na jego podstawie ocena jakości wody w sieci wodociągowej pozwalają zidentyfikować rejon podwyższonego ryzyka pogorszenia jakości wody, jak również umożliwiają przewidywanie miejsc wystąpienia wody o gorszej jakości. Ułatwia to podjęcie decyzji o rozmieszczeniu baz przedsiębiorstwa, których właściwa lokalizacja i wyposażenie pozwalają na skrócenie czasu związanego z wymaganą poprawą jakości wody oraz skutkują obniżeniem kosztów eksploatacji całego systemu wodociągowego [46].

W pracy skoncentrowano się przede wszystkim na przeglądzie metod wyznaczania lokalizacji punktów monitoringu jakości wody rozwijanych w ostatnich latach zarówno w Polsce, jak i na świecie. Przedstawiono także podstawowe problemy związane z monitoringiem jakości wody w systemach jej dystrybucji.

2. Problemy monitoringu jakości wody

Jednym z najtrudniejszych, a zarazem kluczowym zadaniem planowania monitoringu jest właściwa lokalizacja punktów pomiaru parametrów hydraulicznych i jakościowych przesyłanej wody. Kwestia ta nie została całkowicie rozstrzygnięta w obowiązujących aktach prawnych, normach, ani też w pracach badawczych dotyczących monitoringu prowadzonych zarówno w kraju, jak i za granicą [35, 37].

W świetle obowiązujących wymagań prawnych można stwierdzić, że brak jest szczegółowych wytycznych dotyczących lokalizacji punktów pomiarowych

systemu monitorowania sieci wodociągowych. Jedyne wytyczne dotyczą zakresu oznaczeń oraz częstotliwości prowadzenia badań w systemie wodociągowym. Problem lokalizacji punktów pomiaru jakości wody w sieci jest albo pomijany, albo traktowany powierzchownie.

Wytyczne Światowej Organizacji Zdrowia [29] zalecają prowadzenie monitoringu poprzez ciągłą, rutynową kontrolę jakości wody dostarczanej do odbiorców oraz przez okresowe badania mikrobiologiczne całego systemu dystrybucji wody. Wytyczne te nie określają jednak precyzyjnie szczegółowych zasad lokalizacji punktów pomiaru jakości wody, stwierdzając jedynie, że powinny być one reprezentatywne dla całej sieci wodociągowej. Dyrektywa UE nr 98/83/EC [17] zaleca lokalizację punktów poboru próbek w stacjach uzdatniania wody oraz w szeroko pojętej „strefie dostawy wody”.

Krajowe przepisy prawne zawarte w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z 2007 r. wraz ze zmianami z 2010 r. [61] oprócz zaleceń dotyczących zakresu i częstości dokonywania badań parametrów jakości wody wskazują, aby miejsca pobierania próbek wody były równomiernie rozmieszczone w całym systemie dystrybucji i obejmowały: ujęcia wody, miejsca wprowadzania wody do sieci, sieć wodociagową, punkty czerpalne stale używane do pobierania wody przez odbiorców oraz inne punkty czerpalne, jeśli woda jest pobierana z indywidualnych ujęć wody.

Dodatkowym dokumentem regulującym pobór próbek do badania jakości wody jest norma PN-EN ISO 5667-1:2008 [58]. Kwestia lokalizacji punktów pomiarowych do monitoringu jest ograniczona do następujących stwierdzeń: punkty pomiarowe powinny być usytuowane „w miejscach kluczowych badanych systemów”, pobieranie próbek musi się odbywać w porównywalnych warunkach oraz nie może powodować dodatkowych zanieczyszczeń ani zakłóceń przepływu.

Badania naukowe dotyczące lokalizacji reprezentatywnych miejsc poboru próbek zostały przedstawione w kilku publikacjach. Geldreich w pracy [23] wybór miejsc poboru próbek oparł na reprezentatywności właściwości strukturalnych sieci i stanu jakości wody. Część tych miejsc powinna być stała z uwzględnieniem lokalizacji pierwszego odbiorcy, stref ciśnienia, połączeń z innymi systemami, potencjalnych źródeł zanieczyszczenia, obszarów dużego ryzyka i każdego miejsca, w którym wcześniej stwierdzono obecność bakterii z grupy coli. Do innych czynników określających miejsca poboru próbek można zaliczyć: częstość niezadowolających wyników, wyniki powtórnych badań, punkty maksymalnego zużycia wody, miejsca budowy nowych odcinków sieci i miejsca częstych uszkodzeń sieci. Miejsca punktów pomiarowych mogą według niego znajdować się w budynkach użyteczności publicznej, u indywidualnych odbiorców i w specjalnych stacjach pomiarowych w sieci dystrybucji wody.

Grimmefault i Johansson [26] stwierdzili, że lokalizacja miejsc poboru próbek wody do badań musi uwzględniać obszar geograficzny, liczbę odbiorców,

materiał rurociągów oraz obszary o znacznym wpływie na jakość wody i prace prowadzone na sieci wodociągowej.

Według Kwietniewskiego [44] miejsca badań jakości wody powinny być reprezentatywne dla całej sieci. Poboru próbek wody należy dokonywać w głównych punktach pomiaru natężenia przepływu i objętości przepływającej wody. Badania jakości wody powinny być także prowadzone w zbiornikach wodociągowych, pompowniach sieciowych, w miejscach, gdzie mieszają się wody o różnej jakości, w dużych obiektach publicznych i na końcowych odcinkach sieci.

Ze względu na brak szczegółowych wytycznych w zakresie lokalizacji punktów pomiarowych dla celów monitoringu systemów wodociągowych powstało wiele metod umożliwiających lokalizowanie punktów pomiarowych w sieciach dystrybucji wody. Ich porównanie dokonane w warunkach jednej wybranej sieci pokazało, że uzyskiwane za ich pomocą wyniki znacznie różnią się od siebie [56]. Dotychczas nie udało się wybrać jednej, uniwersalnej metody, która byłaby referencyjna w stosunku do innych. Z powodu dużej różnorodności metod lokalizacji punktów badania jakości wody istnieje konieczność opracowania metodyki oceny ich skuteczności.

3. Przegląd metod wyznaczania lokalizacji punktów monitoringu jakości wody

Church i RaVelle [12] jako jedni z pierwszych opisali zagadnienie umiejscowienia czujnika monitoringu, które zdefiniowali jako problem lokalizacji maksymalnego zasięgu (ang. *maximal covering location problem*). Polegał on na zwiększeniu obszaru obsługiwanej liczby ludności w obrębie pożądanej odległości usługi poprzez umieszczenie ustalonej liczby urządzeń. Kwestię tę rozwiązali, stosując dwa podejścia heurystyczne.

Pierwsze podejście jest nazywane algorytmem Greedy Adding. W celu uzyskania maksymalnego zasięgu dla p -urządzeń algorytm Greedy Adding wybiera dla pierwszego urządzenia takie miejsce, które pokrywa swoim zasięgiem większość obsługiwanej populacji, dla drugiego urządzenia wybiera zaś miejsce, które obejmuje większość ludności nieznajdującej się w zasięgu pierwszego urządzenia. Proces ten jest kontynuowany dopóki p -urządzenia nie zostaną wybrane i cała ludność nie będzie w ich zasięgu.

Drugie heurystyczne podejście, zbudowane na podstawie pierwszego algorytmu, zostało nazwane algorytmem Greedy Adding with Substitution. Określa on nowe lokalizacje urządzeń dla każdej iteracji, ale dodatkowo stara się poprawić rozwiązanie w każdej z nich poprzez zastąpienie każdego kolejnego urządzenia urządzeniem z innego wolnego miejsca.

Istotnym problemem tej metody jest określenie minimalnej liczby lokalizacji czujników dla obiektów celem zapewnienia, że żaden punkt zapotrzebowania nie będzie dalej niż maksymalna odległość usługi od obiektu. Gdy jest ograni-

czona liczba czujników, decydent może wybrać lokalizacje, tak aby możliwie najmniej ludzi znajdowało się poza zasięgiem czujników.

Lee i Deininger [47] opracowali podejście umiejscowienia czujników jakości wody oparte na maksymalizacji zasięgu zapotrzebowania (ang. *demand coverage*). Metoda ta polega na umieszczeniu czujników w tych węzłach, które dostarczają najwięcej informacji o jakości wody w sieci dystrybucji. Rozwiązanie to jest oparte na założeniu, że jakość wody pogarsza się wraz z upływem czasu i odległością od źródła. Lee i Deininger założyli, że jeżeli jakość wody w monitorowanym węźle jest dobra, to w najbliższym węźle umiejscowionym w kierunku źródła wody będzie ona również dobra. Dla dużych sieci metoda ta okazała się bardzo kłopotliwa i trudna do zastosowania ze względu na zbyt duże skomplikowanie problemu.

W swoich badaniach Kumar i in. [42, 43] zastosowali macierz zasięgu opracowaną przez Lee i Deininger [47]. Po obliczeniu kierunków przepływu w całej sieci węzły są numerowane w kolejności rosnącego przepływu (ranking węzłów), a następnie w węźle, który posiada maksymalny zasięg, jest lokalizowana stacja monitorująca. Po wybraniu węzła zostaje on całkowicie usunięty z danych i zasięg jest ponownie przeliczany. Optymalne lokalizacje urządzeń są identyfikowane za pomocą programowania całkowitoliczbowego (ang. *integer programming*). Jednakże wymiarowość programowania całkowitoliczbowego zwiększa się wielokrotnie wraz ze wzrostem wielkości sieci i dla wielu wzorców zapotrzebowania, dlatego też autorzy zaproponowali kolejną metodę, wskazującą położenie stacji monitorowania jakości wody na podstawie hydrauliki przepływu oraz eliminującą użycie programowania całkowitoliczbowego.

Kessler i inni [34] wprowadzili nowy termin w swoich badaniach – poziom usług (ang. *level of service*). Definiują go jako maksymalną, dopuszczalną objętość wody, jaka zostanie pobrana zanim zanieczyszczenie wody zostanie wykryte przez czujnik. Po hydraulicznej symulacji przepływu wody w sieci zostaje wykonany wykres kierunkowy, stanowiący sieć pomocniczą do wyboru lokalizacji urządzenia. Wszystkie przewody tej sieci określają średnią prędkość przepływu w przewodzie. Stosowanie wykresu i znajomość długości przewodów pozwala obliczyć minimalny czas przepływu między dwoma węzłami. Metodologia wyboru lokalizacji urządzenia obejmuje utworzenie algorytmu „wszystkie najkrótsze ścieżki” (ang. *all shortest paths*) do identyfikacji obszaru zanieczyszczeń i algorytmu „zasięg zbioru” (ang. *set covering*) do optymalnego przydzielenia stacji monitorujących. Wynikiem algorytmów jest minimalny zbiór stacji monitorujących, który zapewnia dany poziom usług.

Harmant i inni [30] zaprojektowali algorytm oparty na pracy Lee i Deininger [47] w celu maksymalizacji trzech parametrów: zużycia wody, średniej średnicy rury i czasu retencji wody. Algorytm ten został sformułowany jako wielokryterialny problem ważonej sumy. Wybiera on najbardziej reprezentatywne punkty pobierania próbek w odniesieniu do zużycia i do degradacji jakości wody, co jest funkcją średnicy rury i czasu retencji wody.

Tryby i Uber [67, 68] opracowali model pobierania próbek wykorzystujący czas zatrzymania wody (ang. *water age*) jako podstawę do ustalania reprezentatywności próbki. Polega on na znalezieniu najlepszych miejsc do pobierania próbek jakości wody. Model ten prowadzi do zminimalizowania liczby miejsc pobierania próbek, z zastrzeżeniem pewnych ograniczeń dotyczących ustalania próbki „reprezentatywności”. Badany problem jest sformułowany za pomocą mieszanego programowania liniowego całkowitoliczbowego (ang. *mixed integer linear programming*).

Zagadnieniem znalezienia optymalnych miejsc monitorowania jakości wody zajmowali się również Woo i in. [76]. W ich rozwiązaniu do obliczania zmienności parametrów hydraulicznych i jakościowych jest używany program EPANET. Następnie jest ustalany ranking przewodów i są obliczane najkrótsze ścieżki transportu zanieczyszczeń. Metoda wyliczania najkrótszej ścieżki transportu zanieczyszczeń jest stosowana do konstruowania matrycy pokrycia i określenia wszystkich ścieżek przepływu zanieczyszczenia. Problem lokalizacji jest rozwiązywany za pomocą programowania całkowitoliczbowego (ang. *integer programming*), które służy do znalezienia rozwiązań dla szeregu symulacji. Kwestia lokalizacji czujników jest ostatecznie sformułowana jako problem minimalnego zasięgu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. Jest to zadanie optymalizacyjne, wykorzystujące kolejne symulacje pracy wodociągu w funkcji zmienianej lokalizacji punktów pomiarowych.

Al-Zahrani i Moied [2-4] rozszerzyli model opracowany przez Lee i Deiningera [47]. Zastosowali algorytmy genetyczne do rozwiązania problemu rozmieszczenia czujników monitorujących jakość wody. Są one lokalizowane według wielkości przepływu, zakładając, że jakość wody pogarsza się w kierunku końcowych odcinków sieci.

Ostfeld i Salomons [51-53, 55] zaproponowali metodologię opartą na pracy Kesslera i in. [34], łączącą symulacje hydrauliczne z techniką teorii grafów w celu przydzielenia minimalnego zestawu stacji monitorujących, który pokrywa całą sieć dla danego poziomu usług. W swojej metodzie zastosowali matrycę zanieczyszczenia i rozwiązali problem jego minimalnego zasięgu za pomocą programowania liniowego, binarnego. Ostfeld i Salomons [54] dostosowali algorytm przedstawiony w pracy [55] do optymalnego umieszczenia czujników w systemie dystrybucji wody z zastosowaniem wielocelowego algorytmu genetycznego NSGA-II.

Preis i Ostfeld [59] rozwinęli ewolucyjny model wielocelowej optymalizacji dla wzmocnienia działań przeciwko celowej ingerencji zanieczyszczeń. Użyli algorytmu NSGA-II (ang. *Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm-II*) do optymalizacji kompromisów pomiędzy czterema sprzecznymi celami: maksymalizacją prawdopodobieństwa detekcji, minimalizacją czasu wykrycia, maksymalizacją zbędności oprzyrządowania do wykrywania zanieczyszczeń oraz maksymalizacją prawdopodobieństwa identyfikacji źródła zanieczyszczenia.

Nową formułę mieszanego programowania całkowitoliczbowego (ang. *mixed integer programming*) do umieszczenia czujnika w miejskich systemach wodociągowych zaprezentowali Berry i inni [6, 8, 10]. Przedstawiony przez nich model umieszczenia czujnika jest niezależny od czasu i zakłada ochronę konsumenta tylko wtedy, gdy każda ścieżka od miejsca wprowadzenia zanieczyszczenia do konsumenta jest strzeżona przez czujnik. Niestety, przy użyciu programowania całkowitoliczbowego w rozwiązaniu problemu położenia czujnika wymagana jest duża ilość zasobów obliczeniowych. Berry i in. [7, 9] zaproponowali sformułowanie p-mediany zaczerpnięte z teorii dyskretnej lokalizacji do określenia problemów lokalizacji czujników, które zostało rozwiązane za pomocą metody heurystycznej opartej na połączeniu GRASP (ang. *General Responsibility Assignment Software Patterns*) i lokalnego wyszukiwania. Algorytm p-mediany zakłada stałą liczbę scenariuszy, z których każdy określa prawdopodobieństwo wystąpienia zanieczyszczenia, zestaw miejsc wprowadzenia zanieczyszczenia i czasy trwania wprowadzania zanieczyszczenia. Wpływ każdego potencjalnego incydentu jest określany za pomocą symulacji transportu zanieczyszczeń.

Rozbudowaną metodykę lokalizacji punktów pomiarowych połączoną z ustaleniem częstości wykonywania badań jakości wody przedstawił Sudol [64, 65]. W swojej metodyce autor rozważa odcinki przewodów wraz z ich charakterystyką techniczną w przeciwieństwie do Lee i Deiningera [47], którzy brali pod uwagę węzły. Dzięki temu w algorytmie lokalizacji punktów pomiarowych możliwe było uwzględnienie nie tylko ilości przepływającej wody, ale także czasu przebywania wody w sieci, średnicy i niezawodności odcinka przewodu.

Watson i in. [72, 73] opisali szczegółowo problem optymalizacji umieszczenia czujnika i wprowadzili modele mieszanego programowania liniowego całkowitoliczbowego (ang. *mixed integer linear programming*), oparte na modelu przepływu niezależnego od czasu. Pokazali, że podejścia oparte na mieszanym programowaniu liniowym całkowitoliczbowym mogą znaleźć optymalne rozwiązania dla małej i średniej wielkości sieci, ale nie radzą sobie z większymi sieciami wodociągowymi. Udowodnili również, że podejścia heurystyczne umożliwiają zlokalizowanie optymalnych rozwiązań dla małych i średnich sieci w znacznie krótszym czasie niż metody programowania całkowitoliczbowego oraz mogą uzyskać wystarczająco dobre rozwiązania dla bardzo dużych sieci.

Uber [69] przedstawił ogólne sformułowanie i metodę rozwiązania heurystycznego algorytmu zachłannego dla problemu lokalizacji czujnika. W celu rozmieszczenia czujników należy rozważyć potencjalne miejsca zdarzenia zanieczyszczenia. Metoda ta lokalizuje ograniczoną liczbę czujników, aby uzyskać maksymalne korzyści dla zdrowia publicznego. Liczba czujników niezbędna do zainstalowania jest określona przez kompromis między kosztem sieci czujników a stopniem ochrony zdrowia publicznego.

Berger-Wolf [5] rozważał dwa problemy umieszczania czujników w sieci w celu wykrycia i zidentyfikowania źródła zanieczyszczeń: ograniczoną liczbę

czujników oraz ograniczony czas na wykrycie zanieczyszczenia lub identyfikację źródła skażenia. Przedstawił analizę złożoności obliczeniowej tych zagadnień i pokazał, że problemy ograniczonej liczby czujników i ograniczonego czasu są wielomianowo równoważne i NP-trudne. Podejścia sugerowane przez Bergera-Wolfa mają na celu albo losowe umieszczenie czujników, albo zastosowanie heurystyki zachłannej, tak aby obliczyć minimalny, ale niekoniecznie optymalny zestaw czujników umożliwiających identyfikację źródła zanieczyszczenia.

Carr [11] sformułował problemy rozmieszczenia czujników jako mieszane programy całkowitoliczbowe (ang. *mixed integer program*), dla których obiektywne współczynniki nie są znane. Rozważał również wersję kryterium absolutnej solidności, która jest naturalnie ograniczona przez właściwości danych niepewnych. Jest ona sformułowana jako mieszane programy liniowe całkowitoliczbowe (ang. *mixed linear integer program*), służące do umieszczenia czujników w sieciach dystrybucji wody. Programy te działają zgodnie z informacjami prawdopodobieństwa pojawienia się zanieczyszczenia i statystyki zużycia wody, które są trudne do oceny.

Shastri i Diwekar [62] zaproponowali lokalizację czujników za pomocą metody programowania stochastycznego, rozszerzając ją o rozważanie niepewności zapotrzebowania na wodę w sieci wodociągowej. Rozwiązanie problemu uzyskali poprzez algorytm L-shaped BONUS, który skutecznie rozwiązuje zagadnienia stochastycznego nieliniowego programowania.

Krause i in. [40, 41] opracowali metodologię rozmieszczenia czujników opartą na submodularnej funkcji celowych zanieczyszczeń i wykorzystali ją przez zastosowanie algorytmów celem maksymalizacji monotonicznej funkcji submodularnej. Optymalizacja została oparta na wielu kryteriach, m.in. minimalizacji czasu wykrycia zanieczyszczenia, minimalizacji liczby ludności, na którą wpływa zanieczyszczenie przed jego wykryciem, minimalizacji oczekiwanego zapotrzebowania dla zanieczyszczonej wody do momentu detekcji zanieczyszczenia, maksymalizacji prawdopodobieństwa detekcji.

Metoda rozmieszczania czujników, sformułowana przez Doriniego [14, 15] jako problem ograniczonej wielocelowej optymalizacji, została rozwiązana za pomocą nowatorskiego algorytmu *Noisy Cross-Entropy Sensor Locator* (nCESL) oraz jako jedno i wielocelowe metodologie ujęte w ramy zwane SLOTS (ang. *sensors local optimal transformation system*). Głównymi celami tej metody było zminimalizowanie przewidywanego czasu wykrycia zanieczyszczenia, minimalizacja liczby ludności, na którą wpływa zanieczyszczenie przed jego wykryciem, minimalizacja oczekiwanego zapotrzebowania na zanieczyszczoną wodę przed wykryciem i maksymalizacja prawdopodobieństwa wykrycia.

Eliades i Polycarpou [19] zaproponowali algorytm „iteracyjnego pogłębienia rozwiązań Pareto” do wyszukiwania odpowiednich miejsc lokalizacji czujników jakości wody z dużej przestrzeni możliwych rozwiązań. Algorytm rozwiązuje problem przez iteracyjny wybór najlepszego niedominującego rozwiązania

i rozszerza je przez zwiększenie głębokości drzewa wyszukiwania, dopóki nie zostaną wykorzystane wszystkie czujniki. W pierwszej iteracji wszystkie rozwiązania frontu Pareto są przechowywane na liście, a zamiast wyboru jednego z tych rozwiązań wszystkie z nich są dostępne i rozszerzone do ich następnych połączeń. Oznacza to, że wszystkie te rozwiązania jednego czujnika są połączone ze wszystkimi pozostałymi węzłami sieciowymi. Rozwiązania Pareto są następnie obliczane i procedura jest powtarzana, aż wszystkie czujniki będą rozmieszczone. Ostatecznym rozwiązaniem algorytmu jest zbiór punktów frontu Pareto, które niekoniecznie muszą być na globalnym froncie Pareto. Eliades i Polycarpou [20, 21] dla ustalania położenia czujników zaproponowali wielocelową optymalizację, która jest odpowiednia dla więcej niż jednej funkcji celu oraz jest badana i rozwiązywana za pomocą wielocelowego ewolucyjnego algorytmu.

Ghimire i Barkdoll przedstawili dwa heurystyczne podejścia wyboru lokalizacji czujników. W pierwszym z nich, opisanym w pracy [25], czujniki są umieszczone na skrzyżowaniach o najwyższym zapotrzebowaniu na wodę. Drugie podejście Ghimire i Barkdoll [24] oparli na największej masie wody (ang. *mass-based approach*) – czujniki są umieszczone na połączeniach o największej masie uwalnianej wody.

Guan i in. [27] zaproponowali metodę optymalizacyjną wykorzystującą algorytm genetyczny. Przedstawili algorytmiczny proces pętli zamkniętej dla optymalnej lokalizacji czujników wody w systemach dystrybucji wody. Model opiera się na funkcji jednocelowej, jednak sugerowana funkcja celu zawiera wiele czynników, takich jak czas wykrycia, objętość wody zanieczyszczonej czy niezawodność optymalnego systemu. W ten sposób naśladuje wielocelowe podejście optymalizacyjne.

Gueli [28] sformułował rozwiązanie polegające na zastosowaniu modelu drapieżnika-ofiary (ang. *predator-prey*), opartego na procesie ewolucyjnym optymalizacji wielocelowej. Wdrożony algorytm ma na celu rozwiązanie problemu wykrycia zanieczyszczenia ograniczonego czujnikiem. Oczekiwany czas detekcji, oczekiwana populacja narażona na zanieczyszczenie, oczekiwane zapotrzebowanie i prawdopodobieństwo wykrycia zanieczyszczenia są czterema funkcjami celu branyymi pod uwagę przy ocenie potencjalnego rozwiązania problemu. Proponowana metodologia jest oparta na wdrażaniu modelu ekosystemu.

Huang i in. [32] zaproponowali wielokryterialny algorytm genetyczny powiązany ze statystyczną metodą obróbki danych. Opracowana metodologia pozwala na rozpoznanie optymalnego zestawu stacji monitorowania z uwzględnieniem trzech celów: czasu opóźnienia detekcji, prawdopodobieństwa detekcji, liczby ludności dotkniętej zanieczyszczeniem przed jego wykryciem.

Do rozwiązania problemu lokalizacji czujników i do wykrywania potencjalnie szkodliwych zanieczyszczeń w systemach dystrybucji wody Propato i Piller [60] zastosowali mieszane programowanie liniowe całkowitoliczbowe (ang. *mixed integer linear program*). Trachtman [66] zaproponował podejście do

projektowania lokalizacji czujników „Strawman” – metodę heurystyczną opartą na takich czynnikach, jak rozkład przestrzenny populacji, ciśnienia i wzorców przepływu, a także krytyczna lokalizacji użytkowników.

Wu i Walski [77] posłużyli się optymalizacyjnym zadaniem wielokryterialnym, które zostało rozwiązane za pomocą algorytmu genetycznego ze scenariuszami zanieczyszczenia symulowanymi przy użyciu metody Monte Carlo.

Isovitich & VanBriesen [33] do rozmieszczenia czujników wykorzystali system informacji geograficznej oraz analizę chi-kwadrat. Analiza ta bada relacje między umieszczeniem czujnika i średnim oraz osiągalnym średnim zapotrzebowaniem na wodę. Eliminuje również skutki nakładania się lokalizacji czujników i pozwala na sprawdzenie, czy czujniki są umieszczane w węzłach z wysokim średnim zapotrzebowaniem na wodę i/lub wysokim osiągalnym średnim zapotrzebowaniem na wodę.

Weickgenannt [74, 75] zastosował algorytm genetyczny NSGA-II kompromisu i ryzyka do umiejscowienia czujników. Sformułowane przez niego zadanie optymalizacji miało dwa cele: zminimalizowanie ryzyka zanieczyszczenia i zmniejszenie liczby stosowanych czujników. Pierwszy cel wyrażał prawdopodobieństwo, że zestaw czujników nie wykryje zanieczyszczenia i związanej z nim ilości zanieczyszczonej wody, która jest zużywana przed wykryciem, natomiast drugi cel działał jako substytut kosztów pobierania próbek.

Kowalski [35, 36, 38, 39, 45] opracował własną metodę lokalizowania stacji pomiarowych, opartą na elementach teorii geometrii fraktalnej. Za podstawę oceny prawidłowości wskazań lokalizacji punktów pomiarowych systemu monitoringu jakości wody przyjął elementy teorii ryzyka. W metodyce tej wyodrębniono istotne parametry ryzyka, takie jak: objętość wody w sieci nieobjętej monitoringiem, maksymalny czas detekcji zanieczyszczenia od momentu jego pojawienia się oraz względny czas tej detekcji odniesiony do objętości wody w monitorowanej sieci. Do warunków niezbędnych do zastosowania tej metody należy zaliczyć przede wszystkim konieczność zbierania danych dotyczących nie tylko sieci wodociągowej, ale także planu zagospodarowania przestrzennego jednostki osadniczej oraz potrzebę lokalizowania i charakteryzowania głównych odbiorców wody.

Dwa różne podejścia do rozwiązania problemu optymalizacji rozmieszczenia czujników zanieczyszczenia w sieciach dystrybucji wody przedstawili Ehsani i Afshar [18]. Za najistotniejsze cele z punktu widzenia rozwiązania zagadnienia uznali prawdopodobieństwo wykrycia i oczekiwany czas detekcji wykrycia. W pierwszym przypadku połączyli dwa cele w jedno sformułowanie i rozwiązali problem jako jednocelowy. W drugim przypadku zastosowali algorytm genetyczny NSGA-II do rozwiązania problemu umiejscowienia czujnika, rozważając oba cele osobno w formie problemu optymalizacji wielocelowej. Obie te metody charakteryzowały się dobrą skutecznością w znalezieniu rozwiązań do lokalizacji czujników.

4. Podsumowanie

Monitoring sieci wodociągowej może obejmować parametry hydrauliczne, jakościowe i techniczne. Kompleksowy monitoring wszystkich tych parametrów jest warunkiem niezbędnym do sprawnego funkcjonowania przedsiębiorstw wodociągowych. Jednakże ze względu na duże koszty zakupu i montażu czujników nie wszędzie jest on w pełni wdrażany. Niniejsza praca przedstawia główne problemy związane z monitoringiem jakości przesyłanej wody, przede wszystkim kwestię lokalizacji reprezentatywnych punktów pomiaru jakości wody. Ze względu na fakt, że każda sieć wodociągowa jest inna reprezentatywność punktów w obrębie poszczególnych sieci również będzie inna. Wybór miejsc poboru próbek zależy od wielu czynników, m.in. od struktury geometrycznej sieci, warunków hydraulicznych w niej panujących, od znajomości analiz historycznych zmian jakości wody ujmowanej, uzdatnianej i wtłaczanej do sieci wodociągowej.

Przedstawiony przegląd literatury wskazuje na intensywny rozwój metod wyboru lokalizacji punktów pomiarowych na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci, będący następstwem rosnącego zainteresowania monitoringiem jakości wody w sieciach wodociągowych. Wyróżnia się metody heurystyczne, które pozwalają znaleźć rozwiązanie przybliżone, lecz nie optymalne, np. metoda Churcha i RaVellea, a także metody optymalizacyjne polegające na maksymalizacji lub minimalizacji funkcji celu, np. metoda Ostfelda. Pomimo wielu metod lokalizacji czujników wciąż brakuje jednej, referencyjnej w stosunku do innych, optymalnej metody, która pozwoliłaby na właściwe rozmieszczenie czujników w sieci wodociągowej. Ostfeld w pracy [56] udowodnił, że nawet w obrębie jednej sieci wodociągowej różne metody wskazują inne lokalizacje rozmieszczenia czujników, choć część z nich się powtarza. Świadczy to o dużej złożoności zagadnienia lokalizacji punktów monitoringu jakości wody oraz o konieczności dalszego poszukiwania metody, która byłaby uniwersalna dla wszystkich sieci wodociągowych.

Literatura

- [1] Aasgaard G., Berg J.D., Nesgard B., Ratnaweera H., Wathne B.M., Degestand K., Lenes G.: On-line monitoring of water quality: Hygienic control, increased treatment efficiency, updated environmental information and cost reduction, 13 Special Subject. IWSA World Congress, Madrid 1997, pp. SS13-1-HSS13-4.
- [2] Al-Zahrani M.A.: Identifying water quality sampling stations in Al-Khobar water distribution system. Kingdom of Saudi Arabia, Arab Gulf Journal of Scientific Research, vol. 22, issue 3, 2004, pp. 130-137.
- [3] Al-Zahrani M.A., Moeid K.: Locating optimum water quality monitoring stations in water distribution system. ASCE World Water & Environmental Resources Congress, 2001, pp. 393-402.

- [4] Al-Zahrani M.A., Moeid K.: Optimizing water quality monitoring stations using genetic algorithms. *Arabian Journal for Science and Engineering*, no. 28(1B), 2003, pp. 57-75.
- [5] Berger-Wolf T., Hart W., Saia J.: Discrete sensor placement problems in distribution networks. *Mathematical and Computer Modelling*, no. 42(13), 2005, pp. 1385-1396.
- [6] Berry J.W., Hart W.E., Phillips C.A., Uber J.: A general integer-programming-based framework for sensor placement in municipal water networks. *ASCE World Water and Environmental Resources Congress 2004*, pp. 455-465.
- [7] Berry J.W., Hart W.E., Phillips C.A., Watson J.P.: A facility location approach to sensor placement optimization. *Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati 2006*.
- [8] Berry J.W., Hart W.E., Phillips C.A., Watson J.-P.: Scalability of integer programming computations for sensor placement in water networks. *ASCE World Water and Environmental Resources Congress, 2005*, pp. 281-293.
- [9] Berry J.W., Fleischer L., Hart W.E., Phillips C.A., Watson, J.-P.: Sensor placement in municipal water networks. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, no. 131(3), 2005, pp. 237-243.
- [10] Berry J.W., Hart W.E., Phillips C.A., Uber J.G., Watson J.-P.: Validation and assessment of integer programming sensor placement models. *ASCE World Water and Environmental Resources Congress, 2005*, pp. 55-65.
- [11] Carr R., Greenberg H., Hart W., Konjevod G., Lauer E., Lin H., Morrison T., Phillips C.: Robust optimization of contaminant sensor placement for community water systems. *Mathematical Programming*, no. 107(1), 2006, pp. 337-356.
- [12] Church R., ReVelle C.: The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*, no. 32(1), 1974, pp. 101-118.
- [13] Dojlido J., Zerbe J.: *Instrumentalne metody badania wody i ścieków*. Arkady, Warszawa 1997.
- [14] Dorini G., Jonkergouw P., Kapelan Z., Savic D.: SLOTS: Effective algorithm for sensor placement in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management Division. ASCE*, no. 136 (6), 2010, pp. 620-628.
- [15] Dorini G., Jonkergouw P., Kapelan Z., di Pierro F., Khu S.T., Savic D.A.: An efficient algorithm for sensor placement in water distribution systems. *Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati 2006*, pp. 1-13.
- [16] Du Preez L.A., Husselmann A.J., Acton N.R., Lange L.: Establishing a network of on-line monitors at the purification works and in the distribution network of Rand Water. *Wat. Sci. Tech.*, vol. 37, no. 9, 1998, pp. 65-71.
- [17] Dyrektywa Rady 98/83/EC z dnia 3 listopada 1998 r. dotycząca jakości wody przeznaczonej do konsumpcji przez ludzi. *Official Journal of the European Communities*. No. L. 330.5.12.98. pp. 32-54.
- [18] Ehsani N., Afshar A.: Optimization of contaminant sensor placement in water distribution networks: Multi-objective approach. *Water Distribution Systems Analysis, 2010*, pp. 338-346.
- [19] Eliades D., Polycarpou M.: Iterative deepening of Pareto solutions in water sensor Networks. *Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati 2006*.

-
- [20] Eliades D., Polycarpou M.: Security issues in drinking water distribution networks. Proc. of the International Workshop on Computational Intelligence in Security for Information Systems CISIS'08 Advances in Soft Computing, vol. 53, 2009, pp. 69-76.
- [21] Eliades D., Polycarpou M.: Security of water infrastructure systems critical information infrastructure security lecture notes in computer science, vol. 5508, 2009, pp. 360-367.
- [22] Gatel D., Servais P., Block J.C., Bonne P., Cavard J.: Microbiological water quality management in the Paris suburbs distribution system. Aqua, vol. 49, no. 5, 2000, pp. 231-241.
- [23] Geldreich E.E.: Microbial quality of water supply in distribution systems. CRC Lewis Publishers, London 1996.
- [24] Ghimire S.R., Barkdoll B.D.: A heuristic method for water quality sensor location in a municipal water distribution system: Mass related based approach. Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati 2006.
- [25] Ghimire S.R., Barkdoll B.D.: Heuristic method for the battle of the water network sensors: Demand-based approach. Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati 2006.
- [26] Grimmefalt J., Johansson C.: Sampling for determination of the drinking water quality in Goteborg's distribution system, 6 Special Subject. IWSA World Congress, Madrid 1997, pp. SS6-4-SS6-7.
- [27] Guan J., Aral M.M., Maslia M.L., Grayman W.M.: Optimization model and algorithms for design of water sensor placement in water distribution systems. Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati 2006.
- [28] Gueli R.: Predator-prey model for discrete sensor placement. Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati 2006.
- [29] Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed., vol. 1., Recommendations. WHO, 2004.
- [30] Harmant P., Nace A., Kiene L., Fotoohi F.: Optimal supervision of drinking water distribution network. ASCE 29th Annual Water Resources Planning and Management Conference, 1999, pp. 52-60.
- [31] Hermanowicz W., Dojlido J., Dożańska W., Koziorowski B.: Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków, wyd. 2. Arkady, Warszawa 1999.
- [32] Huang J.J., McBean E.A., James W.: Multiobjective optimization for monitoring sensor placement in water distribution systems. Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati 2006.
- [33] Isovitsch S.L., VanBriesen J.M.: Sensor placement and optimization criteria dependencies in a water distribution system. Journal of Water Resources Planning and Management, no. 134(2), 2008, pp. 186-196.
- [34] Kessler A., Ostfeld A., Sinai G.: Detecting accidental contaminations in municipal water networks. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, no. 124(4), 1998, p. 192-198.
- [35] Kowalski D.: Nowe metody opisu struktur sieci wodociągowych do rozwiązywania problemów ich projektowania i eksploatacji. PAN, Komitet Inżynierii Środowiska, Monografie, vol. 80, 2011.
- [36] Kowalski D., Kowalska B.: Fractal classification of water supply networks. Proc. of 11th International Conference on Computing and Control for the Water Industry

- Urban Water Management: Challenges and Opportunities. Exeter, 5-9.09.2011, vol. 3, pp. 323-329.
- [37] Kowalski D., Kwietniewski M.: Problem lokalizacji punktów pomiarowych w systemach monitoringu sieci wodociągowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 6/2009, s. 24-29.
- [38] Kowalski D., Kowalska B., Kwietniewski M.: Metoda lokalizacji punktów pomiaru jakości wody w systemie monitoringu sieci wodociągowej. *Ochrona Środowiska*, nr 3/2013.
- [39] Kowalski D., Kowalska B., Kwietniewski M.: Propozycja metodyki oceny prawidłowości lokalizacji punktów monitorowania jakości wody w sieciach wodociągowych. *Mat. konf. GIS „Modelowanie i monitoring w zarządzaniu systemami wodociągowymi i kanalizacyjnymi”*. Warszawa 04.04.2011, s. 87-90.
- [40] Krause A., Leskovec J., Guestrin C., VanBriesen J., Faloutsos C.: Efficient sensor placement optimization for securing large water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 134, no. 6, 2008, p. 516-526.
- [41] Krause A., Leskovec J., Isovitsch S., Xu J., Guestrin C., VanBriesen J., Small M., Fischbeck P.: Optimizing sensor placements in water distribution systems using submodular function maximization. *Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium*, Cincinnati 2006.
- [42] Kumar A., Kansal M.L., Arora G.: Identification of monitoring stations in water distribution system. *ASCE Journal of Environmental Engineering*, no. 123(8), 1997, pp. 746-752.
- [43] Kumar A., Kansal M.L., Arora G., Ostfeld A., Kessler A.: Detecting accidental contaminations in municipal water networks. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, no. 125(5), 1999, pp. 308-310.
- [44] Kwietniewski M. (red.), Gębski W., Wronowski N.: *Monitorowanie sieci wodociągowych i kanalizacyjnych*. Wyd. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Monografie, seria: Wodociągi i Kanalizacja, nr 10, Warszawa 2005.
- [45] Kwietniewski M., Chudzicki J., Kowalski D., Kowalska B., Miszta-Kruk K., Wąsowski J.: Metodologia zarządzania jakością i ciśnieniem wody w sieciach wodociągowych. Projekt Badawczy Własny nr 4942/B/T02/2008/34 realizowany w latach 2008-2011. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 3/2012, s. 117-121
- [46] Kwietniewski M., Kowalska B., Wąsowski J., Chudzicki J., Kowalski D., Miszta-Kruk K.: Problematyka zarządzania jakością wody w systemach dystrybucji. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, nr 3/2012, s. 117-121
- [47] Lee B., Deininger R.: Optimal locations of monitoring stations in water distribution system. *ACSE Journal of Environmental Engineering*, no. 118(1), 1992, pp. 4-16.
- [48] *Leksykon naukowo-techniczny*, wyd. piąte poprawione i uzupełnione. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
- [49] Levi Y.: Maintaining water quality in distribution systems. *Mat. Międzynarodowej Konferencji „Zaopatrzenie w Wodę Miast i Wsi”*, Poznań 1996, pp. 225-235.
- [50] Matia L., Canto J., Lupon J., Salvatella N., Prats N., Alonso J.: The integral management of quality control in a public water supply through automatic control stations: A future perspective, 13 Special Subject. *IWSA World Congress*, Madrid 1997, pp. SS13-9-SS13-13.

- [51] Ostfeld A., Salomons E.: Optimal early warning monitoring system layout for water networks security: Inclusion of sensors sensitivities and response delays. *Civil Engineering and Environmental Systems*, no. 22(3), 2005, pp. 151-169.
- [52] Ostfeld A., Salomons E.: Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, no. 130(5), 2004, p. 377-385.
- [53] Ostfeld A., Salomons E.: Securing water distribution systems using online contamination monitoring. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, no. 131(5), p. 402-405
- [54] Ostfeld A., Salomons E.: Sensor network design proposal for the battle of the water sensor networks BWSN. *Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati 2006*.
- [55] Ostfeld A., Kessler A., Goldberg I.: A contaminant detection system for early warning in water distribution networks. *Engineering Optimization*, no. 36(5), 2004, pp. 525-538.
- [56] Ostfeld A. et al.: The battle of the water sensor networks (BWSN): A design challenge for engineers and algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, no. 134(6), 2008, pp. 556-568.
- [57] PN-EN 805:2002: Zaopatrzenie w wodę. Wymagania dotyczące systemów zewnętrznych i ich części składowych.
- [58] PN-EN ISO 5667-1:2008: Wytyczne dotyczące opracowywania programów pobierania próbek i technik pobierania próbek.
- [59] Preis A., Ostfeld A.: Multiobjective sensor design for water distribution systems security. *Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati 2006*.
- [60] Propato M., Piller O.: Battle of the water sensor networks. *Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati 2006*.
- [61] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 29 marca 2007 r. w sprawie wymagań dotyczących jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. z dnia 06.04.2007 r. Nr 61, poz. 417 z późn. zm.).
- [62] Shastri Y., Diwekar U.: Sensor placement in water networks: A stochastic programming approach. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, no. 132(3), 2006, pp. 192-203.
- [63] Studziński J.: Wspomaganie zarządzania miejskim przedsiębiorstwem wodociągowym za pomocą informacji z systemów monitoringu i mapy numerycznej. *Polskie Stowarzyszenie Zarządzania Wiedzą, seria: Studia i Materiały, nr 14, 2008*.
- [64] Sudół M.: Monitoring jakości wody w systemie jej dystrybucji w świetle danych literaturowych i badań własnych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 3/2007, s. 17-22.
- [65] Sudół M.: Monitoring sieci wodociągowej dla potrzeb oceny niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości. *Politechnika Warszawska, Warszawa 2005*.
- [66] Trachtman G.B.: A 'strawman' common sense approach for water quality sensor site selection. *Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati 2006*.
- [67] Tryby M.E., Uber J.G.: Representative water quality sampling in water distribution systems. *ASCE World Water and Environmental Resources Congress 2001*, pp. 404-413.

- [68] Tryby M.E., Boccelli D.L., Uber J.G., Rossman L.A.: Facility location model for booster disinfection of water supply networks. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, no. 128(5), 2002, p. 322-333.
- [69] Uber J., Janke R., Murray R., Meyer P.: Greedy heuristic methods for locating water quality sensors in distribution systems. *Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*, 2004, pp. 1-9.
- [70] Urbaniak A., Winkowski M.: Monitorowanie pracy sieci wodociągowej na obszarze aglomeracji miejskiej. *Mat. Międzynarodowej Konferencji „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”*, Poznań 1996, s. 619-635.
- [71] Ustawa o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i odprowadzaniu ścieków. *Dz.U. z dnia 13 lipca 2001 r. Nr 72, poz. 747*.
- [72] Watson J.-P., Greenberg H.J., Hart W.E.: A multiple-objective analysis of sensor placement optimization in water networks. *ASCE World Water and Environmental Resources Congress*, 2004, pp. 456-465.
- [73] Watson J.-P., Hart W.E., Berry J.W.: Scalable high-performance heuristics for sensor placement in water distribution networks. *ASCE World Water and Environmental Resources Congress*, 2005, pp. 282-29.
- [74] Weickgenannt M., Kapelan Z., Blokker M., Savic D.: Optimal sensor placement for the efficient contaminant detection in water distribution systems. *Water Distribution Systems Analysis*, 2008, pp. 1-10.
- [75] Weickgenannt M., Kapelan Z., Blokker M., Savic D.A.: Risk-based sensor placement for contaminant detection in water distribution systems. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management Division*, no. 136 (6), 2010, pp. 629-636.
- [76] Woo H.-M., Yoon J.-H., Choi D.-Y.: Optimal monitoring sites based on water quality and quantity in water distribution systems. *ASCE World Water and Environmental Resources Congress*, 2001, p. 397-405.
- [77] Wu Z.Y., Walski T.: Multiobjective optimization of sensor placement in water distribution systems. *Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium*, Cincinnati 2006.

METHODS OF DETERMINING LOCALIZATIONS OF WATER QUALITY MONITORING POINTS IN A WATER DISTRIBUTION SYSTEM – REVIEW

S u m m a r y

One of the elements of water quality management in water distribution networks is water quality monitoring. Its aim is to control and evaluate the quality of the water supply, as well as early detect contaminant events and quickly respond to them. In most countries, the existing regulations require monitoring of water quality, but do not indicate how representative locations of water quality sensors should be defined. The currently applicable law regulations only specify the range of indications and frequency of doing research in water supply systems. The choice of appropriate measurement points of water quality in a water distribution system is a complex problem and it is crucial in the planning of monitoring. It requires a good knowledge of the hydraulic conditions of the network, as well as analysis of historical changes in the quality of water from intake, treated and supply to the water network. Due to the lack of specific guidelines for the location of measurement points for the monitoring of water distribution system, a large number of methods were

created to enable locating sampling points in water distribution system but so far no universal method that would be a reference in relation to others has been chosen. Because of the wide variety of location methods of water quality testing points, there is a need to develop a methodology of evaluating their effectiveness. This paper provides an overview of the literature concerning water quality monitoring. It identifies the problems associated with the monitoring of water quality and provides an overview of the methods used to determine the location of water quality monitoring points.

Keywords: water network, monitoring, water quality, sensor placement

Przesłano do redakcji: 15.12.2014 r.

Przyjęto do druku: 28.03.2015 r.

DOI: 10.7862/rb.2015.6