

Marian Kwietniewski

Zastosowanie wskaźników strat wody do oceny efektywności jej dystrybucji w systemach wodociągowych

Racjonalne gospodarowanie wodą, zarówno przez jej dostawców, jak i odbiorców, wiąże się z jakością zarządzania dystrybucją wody w systemach wodociągowych. Ma to mocne uzasadnienie w fakcie, że systemy wodociągowe rozprowadzają wodę przeznaczoną do spożycia o najwyższej jakości, mimo że jest ona również używana do innych celów, niewymagających takiej jakości, jak np. pielęgnacja zieleni miejskiej, polewanie ulic, mycie pojazdów itp. Punktem wyjścia do rozważań przeprowadzonych w niniejszej pracy jest teza, iż miarą jakości zarządzania systemem dystrybucji wody są straty wody i związana z nimi awaryjność tego systemu. Straty wody i awaryjność są wynikiem przede wszystkim złego stanu technicznego armatury i przewodów wodociągowych. Uwiarygodnienie wartości liczbowych parametrów opisujących straty wody i awaryjność jest niezwykle istotne do sprawnego zarządzania systemami dystrybucji wody. Są one ze sobą w sposób oczywisty ściśle powiązane. Charakter zmienności jednego parametru powinien potwierdzać charakter zmienności drugiego parametru. Straty wody w systemach wodociągowych są jednocześnie ważnym elementem bilansu będącego podstawą określania poboru wody na potrzeby modelowania sieci wodociągowych. Ze względu na obszerność zagadnienia, w niniejszym artykule główny nacisk położono na skuteczne miary oceny efektywności dystrybucji wody z obszaru strat wody.

Problem identyfikacji i szacowania strat wody w systemach wodociągowych był podejmowany w krajowych i światowych badaniach naukowych od dawna. Pierwsze publikowane prace na ten temat pojawiły się w kraju już w końcu lat 50. XX w. [1, 2]. Od tamtego czasu opublikowano co najmniej kilkadziesiąt prac z wynikami badań i rozważań na temat strat wody. Podejmowano takie problemy, jak np. identyfikacja źródeł i przyczyn przecieków dostrzeganych zarówno w sieciach, jak i instalacjach, definicje strat i marnotrawstwa wody (straty to wycieki wody z nieszczelności, marnotrawstwo to niewłaściwe, nieoszczędne lub niepotrzebne zużywanie wody, chociaż sama instalacja jest szczelna i w dobrym stanie) [3] oraz straty finansowe przedsiębiorstw powodowane marnotrawstwem i stratami wody. Już w 1957 r. zwrócono uwagę na straty pozorne, które wiązano z zaniedbaniami w gospodarce

wodomierzowej (uszkodzone wodomierze, niedokładne odczyty itp.), stosowaniem niewłaściwego ryczałtowego rozliczania za wodę, kradzieżami wody i niewłaściwym rejestrowaniem zużycia własnego przez przedsiębiorstwa wodociągowe [4]. Problemy związane z występowaniem strat wody w wodociągach na świecie były szeroko omawiane na Kongresie IWSA (International Water Supply Association) w 1978 r. w Kyoto (Japonia). Zwracano wówczas uwagę na różnego rodzaju straty i kryteria ich określania, urządzenia do wykrywania wycieków oraz podano wskaźniki dotyczące strategii ograniczania strat wody w sieciach. Opracowano też „Formularz nadzoru do oceny działania urządzeń z zakresu zaopatrzenia w wodę” na użytek przedsiębiorstwa wodociągowego w celu uporządkowania podejścia do zarządzania stratami wody. Już wtedy opracowano w Wielkiej Brytanii (Ośrodek Badań Wody) metodę wyboru odpowiednich technik ograniczania wycieków w systemach wodociągowych [5]. Także w Niemczech już od ponad dwudziestu lat wdraża się strategię ograniczania strat wody [6]. Powszechnie do oceny strat stosowano wskaźnik procentowego udziału strat w ilości wody wtłoczonej do sieci wodociągowej, a nierzadko również jako straty traktowano różnice między ilością wody wtłoczonej do sieci i pobranej przez odbiorców.

Ostatnia dekada to okres nowego podejścia do szacowania strat wody w oparciu o wskaźniki jednostkowe odniesione do długości sieci lub liczby przyłączy wodociągowych, a także do liczby mieszkańców. Kierunki działań w tym zakresie wyznaczają krajowe organizacje wodociągowe, które opracowują wytyczne do szacowania strat wody w takich krajach, jak Austria, Australia, Nowa Zelandia, Niemcy, Kanada, Wielka Brytania i Stany Zjednoczone. Międzynarodowe standardy w tym zakresie zaleca także IWA (International Water Association). Wynikiem prac Zespołu Zadaniowego IWA ds. Strat Wody (Water Losses Task Force – WLTF), powołanego w 1999 r., jest metoda bilansowania wody wraz z definicjami wszystkich związanych z nią pojęć, a w szczególności bezwymiarowego Infrastrukturalnego Indeksu Wycieków (Infrastructure Leakage Index – ILI) [7–11]. Bardzo ważnymi wydarzeniami propagującymi międzynarodowe standardy oceny strat wody są dwie wiodące cykliczne konferencje specjalistyczne organizowane przez IWA i ASCE (American Society of Civil Engineers), a zwłaszcza IWA Conference Water Loss, odbywająca się od 2002 r. co dwa lata i ciesząca się ogromnym zainteresowaniem na świecie.

Prof. dr hab. inż. M. Kwietniewski: Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Zaopatrzenia w wodę i Odprowadzania Ścieków, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa
marian.kwietniewski@is.pw.edu.pl

Badając straty wody w systemach wodociągowych dąży się zwykle, poza oczywistym oszacowaniem ich wartości, do ustalenia przyczyn ich powstawania. Ten aspekt został już szczegółowo rozpoznany w trakcie badań terenowych i analiz eksperckich m.in. w pracach [6, 12–14]. Straty wody są najczęściej skutkiem awarii przewodów i armatury sieci oraz przyłączy wodociągowych wykonanych głównie z tradycyjnych materiałów, takich jak żeliwo szare i stal, które stanowią jeszcze średnio blisko 50% długości przewodów wodociągowych w Polsce [15]. Przyczyniają się do tego także uszkodzenia i nieprawidłowości w pracy pompowni, urządzeń stacji oczyszczania wody, zbiorników wodociągowych, a także instalacji wodociągowych. W dużej mierze są to typowe nieszczelności w połączeniach, które powodują wycieki wody o różnym natężeniu. Odrębnym problemem logistycznym i technicznym jest lokalizacja i szacowanie wielkości wycieku. Stosowane są do tych celów nie tylko odpowiednie metody i urządzenia techniczne, ale także specjalne oprogramowania komputerowe, jak np. powiązanie programu SCYM-UA z Epanet w środowisku programowym Matlab [16] czy też oprogramowanie ECOREG [17].

Ważną przyczyną obserwowaną we współczesnych wodociągach jest nadmierne ciśnienie, które wynika z braku właściwego zarządzania systemami dystrybucji wody. Ciśnienie jest czynnikiem warunkującym wartość natężenia wypływu wody z uszkodzonego przewodu czy urządzenia. Na przykład natężenie wypływu wody przez otwór o danej średnicy przy ciśnieniu 0,6 MPa jest o około 70% większe niż przy ciśnieniu 0,2 MPa [6]. Inne przyczyny występowania strat wody to kradzieże polegające na budowie tzw. obejść omijających wodomierze, kradzieże wody z hydrantów, przelewy wody w zbiornikach, a także nieprawidłowa eksploatacja systemu i brak odpowiednio przeszkolonych pracowników w zarządzaniu systemem, co jest szczególnie widoczne na obszarach wiejskich. Oprócz tych oczywistych strat rzeczywistych wody wyróżnia się także tzw. straty pozorne, które są związane głównie z błędami urządzeń pomiarowych w miejscach zasilania sieci w wodę i przy jej poborze, niejednoczesności odczytów wodomierzy, błędnego szacowania objętości wody zużytej na płukanie sieci i cele przeciwpożarowe, jak również z ryczałtowym rozliczaniem pobranej wody.

Dokładne określenie strat wody jest niemożliwe. Można je tylko szacować z pewnym przybliżeniem, wykorzystując do tego celu odpowiednie wskaźniki. Głównym problemem jest niepewność danych oraz niejednoznaczność kwalifikowania źródeł strat wody. Dyskusje wśród specjalistów dotyczą m.in. kradzieży wody – czy zaliczyć je do strat pozornych czy rzeczywistych? Sporną kwestią jest też sposób szacowania ilości wody zużywanej do gaszenia pożarów. Na ogół koszty wody zużywanej do tego celu są pokrywane przez miasto lub gminę. Woda rozliczana jest okresowo na podstawie poboru wody z hydrantów, gdzie sprawozdawczość prowadzi służby pożarnicze i szacują ilość zużytej wody w nawiązaniu do liczby pożarów.

Celem artykułu jest pokazanie możliwości zastosowania jednostkowych wskaźników strat wody jako miar oceny efektywności dystrybucji wody w systemach wodociągowych. Rozważania zaprezentowane w pracy nawiązują do obecnych kierunków i standardów światowych w zakresie zarządzania systemami dystrybucji wody, rekomendowanych przez IWA. Wyniki rozważań zilustrowano na przykładzie systemu dystrybucji wody w mieście i gminie średniej wielkości.

Straty wody w systemach dystrybucji

Straty wody można oszacować wstępnie metodą bilansowania ilości wody wtłoczonej do sieci, ilości wody sprzedanej oraz ilości wody zużytej na potrzeby własne przedsiębiorstwa. W ten sposób uzyskuje się wartości bezwzględne objętości wody straconej w systemie wodociągowym w danym czasie, np. w ciągu roku lub doby, które są bardzo ważne z punktu widzenia właściwej organizacji zarządzania dystrybucją wody w przedsiębiorstwie wodociągowym. Roczne straty wody są ważnym wskaźnikiem pozwalającym ocenić efektywność zarządzania systemem dystrybucji wody na danym obszarze, zarówno w skali jednego roku, jak i w dłuższym przedziale czasu. Wysokie i rosące straty wody informują o nieefektywnym zarządzaniu systemem wodociągowym, nieodpowiednim planowaniu strategii oraz złym stanie technicznym sieci.

Zwykle do dokładnej oceny strat wody w różnych systemach dystrybucji stosuje się metodę wskaźnikową. Wskaźniki strat wody należą do grupy miar efektywności dystrybucji wody i są wykorzystywane np. w procesie tzw. benchmarkingu, zarówno do oceny efektywności danego systemu dystrybucji, jak i do porównania z innymi systemami. Podobnie należy traktować wskaźnik jednostkowej intensywności uszkodzeń sieci wodociągowej. Benchmarking jest stosowany w sektorze wodociągów i kanalizacji na świecie od lat 90. ub. w., a w Polsce od 2009 r. i koordynowany oraz rozwijany przez Izbę Gospodarczą „Wodociągi Polskie” [18].

Podstawowym, stosowanym od dawna i jeszcze obecnie w Polsce oraz wielu krajach świata dość powszechnie, jest procentowy wskaźnik strat wody (W_s , %), wyznaczany z zależności:

$$W_s = \frac{V_{ds} - V_{wl} - V_{sp}}{V_{sp}} 100 \quad (1)$$

w której:

V_{ds} – objętość wody dostarczonej do sieci, m^3/a

V_{wl} – objętość wody zużytej na potrzeby własne wodociągu na obszarze jednostki osadniczej, m^3/a

V_{sp} – objętość wody sprzedanej, m^3/a

Nierzadko jeszcze można spotkać się z niewłaściwym określeniem strat wody, kiedy do tego celu wykorzystuje się ilość wody niesprzedanej, która jest różnicą pomiędzy ilością wody wtłoczonej do sieci a ilością wody sprzedanej. W takich przypadkach straty wody są tylko częścią wody niesprzedanej, natomiast drugą jej część stanowią potrzeby własne przedsiębiorstwa na obszarze jednostki osadniczej. Ten wskaźnik także jest wyrażany w procentach i określa się go wg formuły (1), w której znika człon V_{wl} , ponieważ potrzeby własne przedsiębiorstwa są wliczane do objętości wody niesprzedanej odbiorcom.

W wielu przypadkach procentowy wskaźnik strat wody jest jedynym parametrem wykorzystywanym do oceny ilości traconej wody. Jednak takie postępowanie jest obciążone niepewnością, bowiem wskaźnik procentowy nie uwzględnia czynników istotnie wpływających na straty wody, takich jak długość sieci, gęstość przyłączy (na km sieci wodociągowej), ich długość oraz ciśnienie wody w sieci. Przede wszystkim zaś nie jest on w żaden sposób związany z obciążeniem hydraulicznym sieci wodociągowej. Dlatego coraz chętniej stosuje się jednostkowy wskaźnik strat wody (q_s , $m^3/d \cdot km$, $m^3/h \cdot km$) w postaci wzoru:

Tabela 1. Standardowy bilans wody w przedsiębiorstwach wodociągowych wg „najlepszych praktyk” IWA [10, 11]
Table 1. IWA 'best practice' standard water balance [10, 11]

Woda wycieczona do sieci wodociągowej	Pobór wody	Zafakturowany autoryzowany pobór	Zafakturowany zmierzony pobór	Woda przynosząca dochód
			Zafakturowany niezmierny pobór	
		Niezafturowany autoryzowany pobór	Niezafturowany zmierzony pobór	Woda nieprzynosząca dochodu
			Niezafturowany niezmierny pobór	
	Straty wody	Straty pozorne	Nieautoryzowany pobór	Woda nieprzynosząca dochodu
			Błędy pomiaru i odczytu wodomierzy	
		Straty rzeczywiste	Wycieki wody z sieci przesyłowej i rozdzielczej	
			Straty w zbiornikach wody	
	Wycieki wody na przyłączach			

$$q_s = V_s/L \quad (2)$$

w którym:

V_s – średnia wartość strat wody, m^3/d , m^3/h

L – długość sieci, km

Niedokładność oceny strat wody za pomocą wskaźnika procentowego w stosunku do wskaźnika jednostkowego bardzo jasno wykazano w pracy [12]. Wykorzystując do obliczenia strat wody średnie przepływy dobowe:

$$W_s = \frac{Q_s}{Q_{ds}} 100 \quad (3)$$

i dzieląc licznik i mianownik przez długość sieci wodociągowej otrzymano formułę:

$$W_s = \frac{q_s}{q_o} 100 \quad (4)$$

w której:

W_s – procentowy wskaźnik strat wody, %

Q_s – średnia dobową dostawą wody, m^3/d

Q_{ds} – średnia dobową dostawą wody do sieci, m^3/d

q_s – wskaźnik jednostkowych strat wody w sieci, $m^3/d \cdot km$

q_o – wskaźnik intensywności obciążenia sieci, $m^3/d \cdot km$

Formuła ta jasno pokazuje związek obciążenia hydraulicznego sieci z procentowym i jednostkowym wskaźnikiem strat wody. Z zależności tej wynika, że przy tym samym wskaźniku procentowym, rzeczywiste jednostkowe straty wody będą większe w sieci bardziej obciążonej (wydajnej), niż w sieci o mniejszym obciążeniu hydraulicznym. Na podstawie zależności opracowanych przez autorów pracy [12], wykorzystujących dane dotyczące 196 sieci wodociągowych w Polsce można oszacować, przy założeniu stałej wartości procentowego wskaźnika strat (np. 15%), rzeczywiste straty wody na około $7,2 m^3/d \cdot km$ przy obciążeniu hydraulicznym równym $50 m^3/d \cdot km$ i $14,2 m^3/d \cdot km$ przy dwukrotnie większym obciążeniu sieci. Jak widać, w efekcie będzie to skutkowało błędną diagnozą odnośnie stanu technicznego systemu wodociągowego i efektywności dystrybucji wody.

Podobnie można mówić o procentowym wskaźniku wody niedochodowej, który niedokładnie opisuje ten składnik bilansu wody w przedsiębiorstwie. Ilość wody niedochodowej jest bowiem mocno uzależniona od zróżnicowania i zmian ilości zużywanej wody, przerw w dostawie wody, stosowania lub nie własnych zbiorników konsumenckich (gromadzących wodę na ich potrzeby – powodują one istotne niedokładności w rejestracji poboru wody) [19]. Zbiorniki własne są stosowane powszechnie w krajach

z deficytem wody. Sugeruje się również, aby wskaźnik wody niedochodowej wyrażać nie jako procent objętości lecz jako procent wartości wody niesprzedanej, wyrażający np. udział rocznych kosztów operacyjnych związanych z produkcją i dystrybucją niesprzedanej wody [19]. Procentowe wskaźniki strat oraz wody niedochodowej mogą być przydatne do wstępnej oceny zmian efektywności dystrybucji wody w funkcji czasu (w kolejnych latach) w ramach tego samego przedsiębiorstwa, natomiast nie są one miarodajne do porównywania efektywności zarządzania dystrybucją wody w różnych przedsiębiorstwach. Fakt, iż wskaźnik procentowy nie jest odpowiedni do zarządzania stratami i do oceny efektywności dystrybucji wody potwierdziło już wiele organizacji na świecie, np. krajowi „regulatorzy” w sektorze wodociągów i kanalizacji w Anglii i Walii, na Malcie, w Stanach Zjednoczonych, Australii, Nowej Zelandii i RPA [11]. W Polsce nie ma jeszcze takiego oficjalnego potwierdzenia, ani też zaleceń dotyczących stosowania wskaźników jednostkowych. Niemniej jednak już coraz chętniej wykorzystuje się je do oceny efektywności dystrybucji wody w systemach wodociągowych.

Warto również pokazać, jaki wpływ mogą mieć straty pozorne na szacowanie strat rzeczywistych na przykładzie wskaźnika procentowego. W rozważaniach przeprowadzonych w pracy [12] przyjęto, że głównym czynnikiem występującym po stronie strat pozornych, a wpływającym na straty rzeczywiste, jest niepewność rejestracji wodomierzy. Przyjmując standardowe błędy:

– w przypadku pomiaru objętości wody dostarczanej do sieci: błąd względny $\delta_{ds} \pm 1,0\%$ i wynikające stąd błędy bezwzględne,

– w przypadku pomiaru objętości wody sprzedanej: błąd względny $\delta_{sp} \pm 5,0\%$ i wynikające stąd błędy bezwzględne,

oraz wyjściowy obliczeniowy wskaźnik strat w wysokości 20%, uzyskuje się przedział, w którym znajdzie się najbardziej prawdopodobna wartość wskaźnika obliczeniowego strat. Zawierać się on będzie w przedziale $15,15\% \leq W_s \leq 24,75\%$ (minimalna wartość wskaźnika wynosi 15,15%.)

Z uwagi na brak, do niedawna, miarodajnych standardów dotyczących strat wody trudno było porównywać systemy wodociągowe pod tym względem, a – jak wykazano wcześniej – wskaźnik procentowy nie daje takich podstaw. Dlatego pojawiły się propozycje międzynarodowych standardów rekomendowane przez IWA (tab. 1). Jasno zdefiniowany bilans wody jest pierwszym etapem oceny rozmiaru strat i ilości wody niedochodowej, a w efekcie

oceny efektywności dystrybucji wody. Standardy te zostały szybko wdrożone lub są promowane w różnych wariantach przez wielu krajowych regulatorów w sektorze wodociągów i kanalizacji (Niemcy, Australia, Malta, RPA, Stany Zjednoczone, Nowa Zelandia, Kanada), przedsiębiorstwa wodociągowe i konsultantów w takich krajach, jak Austria, Brazylia, Cypr, Ghana, Jordan, Kazahstan, Malasia, Oman, Palestyna, Arabia Saudyjska, Wielka Brytania, Uzbekistan, jak również w publikacjach książkowych [19, 20].

Rozwinięciem metodyki oceny strat wody wg standardów IWA jest zdefiniowanie kolejnych ważnych wskaźników [10, 20, 21]:

– wskaźnik jednostkowych strat rzeczywistych (RLB – real leakage balans); gdy gęstość przyłączy jest mniejsza niż 20 na km sieci wodociągowej (RLB₁, m³/d·km) stosuje się zależność:

$$[RLB_1] = V_s / (M + R) \quad (5)$$

natomiast gdy gęstość przyłączy przekracza 20 na km sieci wodociągowej (RLB₂, m³/d·przyłącze, m³/a·przyłącze), wówczas stosuje się zależność:

$$[RLB_2] = V_s / N_p \quad (6)$$

w których:

V_s – średnia wartość strat wody, m³/d, m³/a

M, R – długości przewodów magistralnych (M) i rozdzielczych (R), km

N_p – liczba przyłączy wodociągowych

– wskaźnik objętości wody niedochodowej (NRWB – non-revenue water basic, %):

$$[NRWB] = \frac{V_{ds} - V_{sp}}{V_{ds}} \cdot 100 \quad (7)$$

gdzie:

V_{ds}, V_{sp} – jak we wzorze (1)

– infrastrukturalny wskaźnik wycieków (ILI – infrastructure leakage index) wyznaczany z zależności:

$$[ILI] = \frac{[CARL] 1000}{[UARL] 365} \quad (8)$$

w której:

[CARL] – roczne rzeczywiste straty wody (current annual real losses), m³/a

[UARL] – roczne nieuniknione straty wody (unavoidable annual real losses), dm³/d

Wartość wskaźnika UARL wyznacza się z formuły:

$$[UARL] = [18(M + R) + 25L_p + 0,8N_p]0,365p \quad (9)$$

w której:

p – średnie ciśnienie w strefie pomiarowej, mH₂O

L_p – długość przyłączy wodociągowych, km

Objętość strat nieuniknionych oblicza się jako sumę trzech składników, w których [21]:

– 18 dm³/(km·d·mH₂O): przecieki nieuniknione z przewodów sieci (magistralne + rozdzielcze, bez przyłączy),

– 0,8 dm³/(przyłącze·d·mH₂O): przecieki nieuniknione z przyłączy (do granicy nieruchomości),

– 25 dm³/(km·d·mH₂O): przecieki nieuniknione z przyłączy (od granicy nieruchomości do wodomierza głównego).

Zależność (9) została opracowana przy założeniu, że infrastruktura techniczna systemu wodociągowego jest prawidłowo eksploatowana i dobrze utrzymana.

Wskaźnik ILI jest bezwymiarowy i z technicznego punktu widzenia znajduje zastosowanie w analizie porównawczej różnych systemów wodociągowych na całym świecie. Można jednak spotkać krytyczne opinie na jego temat, u podstaw których leży niepewność danych wykorzystywanych do obliczania wartości UARL i wynikająca stąd niedokładność tego wskaźnika. Trudno jednak znaleźć obecnie konstruktywne propozycje pozwalające uniknąć tych wad. Niemniej dostrzega się większą przydatność wskaźnika ILI do oceny poziomu strat wody w systemach wodociągowych, w których [19]:

– liczba przyłączy wodociągowych jest większa niż 5000,

– średnie ciśnienie w całym systemie dystrybucji przekracza 0,25 MPa,

– gęstość przyłączy jest większa niż 20 na km sieci wodociągowej.

Niewątpliwą zaletą tego wskaźnika jest fakt, że u podstaw jego obliczania leży założenie, iż straty wody są nieuchronne, a zatem należy zaakceptować pewną subiektywną ich wartość. Wskaźnik ILI ma podstawowe znaczenie do oceny efektywności zarządzania systemem dystrybucji wody, a propozycje zasad jego wykorzystania zawiera tabela 2. Znacznie zawężoną klasyfikację systemów dystrybucji wody ze względu na wartość wskaźnika ILI zasugerowano w pracy [23]. W przypadku wartości ILI w przedziale od 1,5 do 3,5 umieszczono 4 kategorie systemów wodociągowych (oceniając je jako dobra, średnia, słaba i bardzo słaba) oraz dodano jeszcze dwie spoza tego przedziału, tj. bardzo dobrą gdy $ILI \leq 1,5$ i niedopuszczalną gdy $ILI \geq 3,5$.

Tabela 2. Interpretacja wartości wskaźnika ILI [22]
Table 2. Interpretation of infrastructure leakage index (ILI) [22]

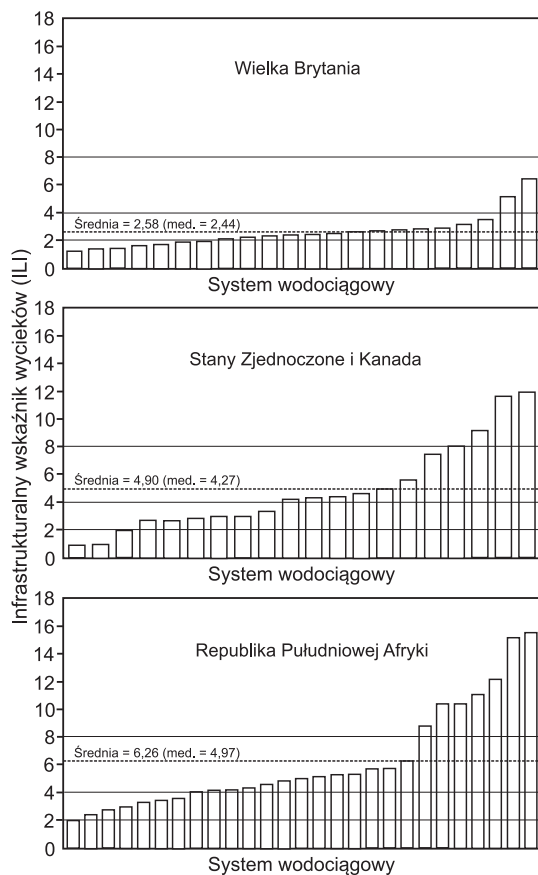
Wartość wskaźnika ILI		Grupa systemów dystrybucji wody	Opis rzeczywistych strat wody oraz koniecznych działań
kraje rozwijające się	kraje rozwinięte		
<4	<2	A	Dalsze ograniczenie strat może być ekonomicznie nieuzasadnione, chyba że jest taka możliwość; wymagana jest dokładna analiza do zidentyfikowania efektywności działań zmniejszających straty wody
4÷8	2÷4	B	Istnieje możliwość wprowadzenia usprawnień w celu zwiększenia rentowności poprzez poprawę zarządzania ciśnieniem w sieci, aktywną kontrolę wycieków oraz konserwację sieci
8÷16	4÷8	C	Słaba kontrola wycieków, sytuacja dopuszczalna, gdy źródła wody są obfite i woda jest tania; należy analizować poziom i charakter wycieków i podjąć działania w celu ograniczenia strat
>16	>8	D	Bardzo nieefektywne wykorzystanie źródeł wody; konieczna aktywna kontrola wycieków (priorytet) oraz obowiązkowy program ograniczania strat

Oznacza to, że systemy, które można zakwalifikować do drugiej w kolejności grupy B (przy czterech grupach) wg przyjętego standardu IWA, będą już traktowane jako systemy o niedopuszczalnym poziomie strat wody. W literaturze światowej podkreśla się również, że wartość wskaźnika na poziomie ekonomicznie nieuzasadnionym (<2) jest często osiągnięta pod wpływem bardzo restrykcyjnej polityki związanej z ograniczaniem wycieków, narzucanej przedsiębiorstwom wodociągowym [24].

Przykłady oceny efektywności dystrybucji wody

Wskaźnik ILI jest już szeroko wykorzystywany w świecie do oceny strat wody i tym samym do oceny efektywności dystrybucji wody w systemach wodociągowych. Ilustrują to wyniki badań wielu systemów wodociągowych, przedstawione na rysunku 1, na którym zaznaczono także wartości kryterialne ILI (2, 4 i 8), jako graniczne oceny systemów dystrybucji wody (wg tab. 2).

Po analizie tych diagramów ogólnie można stwierdzić, że wartości ILI, poza systemami w Wielkiej Brytanii (śr. 2,58), są znacznie zróżnicowane. Wpływa na to wiele czynników, wśród których istotne znaczenie mogą mieć cena wody oraz efektywność zarządzania systemami dystrybucji wspomagana odpowiednimi programami ograniczania strat. Największe wartości ILI osiągnięto w systemach dystrybucji wody w Republice Południowej Afryki, przy wysokiej średniej równej 6,26. Świadczy to o słabej kontroli strat i konieczności analizowania poziomu i charakteru wycieków oraz podjęcia działań w celu ich ograniczenia. Taką sytuację dopuszcza się wówczas, gdy źródła wody są obfite



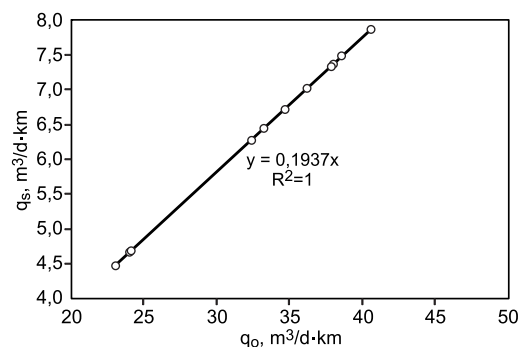
Rys. 1. Infrastrukturalny wskaźnik wycieków (ILI) w systemach wodociągowych w niektórych krajach w 2004 r. [19, 24]

Fig. 1. Infrastructure leakage index (ILI) for water supply systems in selected countries in 2004 [19, 24]

i woda jest tania, ale RPA ma niewielkie zasoby wody. Jednak polityka państwa, w wyniku której każda posesja powinna mieć zapewnioną darmową wodę w ilości $7 \text{ m}^3/\text{m-c}$ nie sprzyja jej oszczędzaniu przez odbiorców, ani też nie zachęca do wprowadzania zmian w zarządzaniu eksploatacją sieci wodociągowych [24].

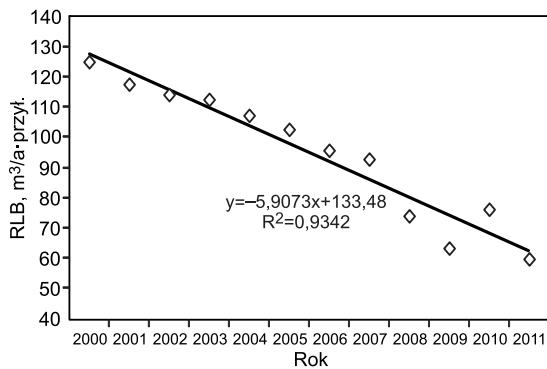
W Polsce jednostkowy wskaźnik strat wody ($\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{km}$, $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{km}$) jest wykorzystywany jeszcze bardzo rzadko w praktyce eksploatacyjnej przedsiębiorstw wodociągowych. Jest on natomiast często stosowany w analizach i ocenach strat wody w badaniach terenowych. Wskaźnik ILI jest wykorzystywany dopiero od kilku lat, również głównie w pracach badawczych, których wyniki są publikowane m.in. w pracach [6, 12, 13, 25–28]. Niemniej jednak już ten skromny zakres badań wskazuje na wzrastające zainteresowanie metodami wykorzystującymi wskaźniki jednostkowe do oceny strat wody, przyjętymi wg najlepszych standardów światowych. Jednocześnie w wyniku zastosowania tych wskaźników można dostrzec wyraźny postęp w ograniczaniu strat wody i poprawie efektywności dystrybucji wody w polskich wodociągach.

Postęp techniczny w krajowych wodociągach w zakresie efektywnego zarządzania dystrybucją wody zilustrowano na przykładzie jednostki średniej wielkości, jaką jest miasto i gmina Siedlce, dla której przeprowadzono badania w latach 2000–2011. Według danych z 2011 r., udział mieszkańców korzystających z wodociągu wynosił 99%, przy całkowitej liczbie mieszkańców 77 tys., długość przewodów magistralnych wynosiła 14,8 km, rozdzielczych – 324,2 km, przyłączy – 218 km, a liczba przyłączy – 10526 przy gęstości 30 przyłączy na km sieci. Struktura materiałowa sieci wodociągowej obejmowała w tym roku PVC – 52%, PE – 24%, żel szare – 15%, stal – 8% i azbestocement – 1%. Wyniki obliczeń i analiz przedstawiono na rysunkach 2–7. Na uwagę zasługuje bardzo wysoka zgodność zmian wskaźnika jednostkowych strat wody (q_s) i obciążenia sieci (q_o) (rys. 2). Widać mocny wpływ obciążenia sieci na straty wody, które zwiększały się szybko i proporcjonalnie do obciążenia sieci. Warto jednocześnie podkreślić, że w latach 2000–2011 obciążenie sieci wodociągowej zmalało o około 50%, podobnie jak w innych polskich miastach. W tym samym stopniu zmalały też straty wody wyrażone w $\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{km}$ (q_s) oraz w $\text{m}^3/\text{przyłącze}$ (RLB – rys. 3). Najmniejsze obciążenia i straty wody miały miejsce w ostatnim analizowanym roku (2011). Również wyraźną tendencją spadkową charakteryzował się wskaźnik objętości wody niedochodowej (NRWB), choć w okresie obserwacji jego wartość była niestabilna (rys. 4).



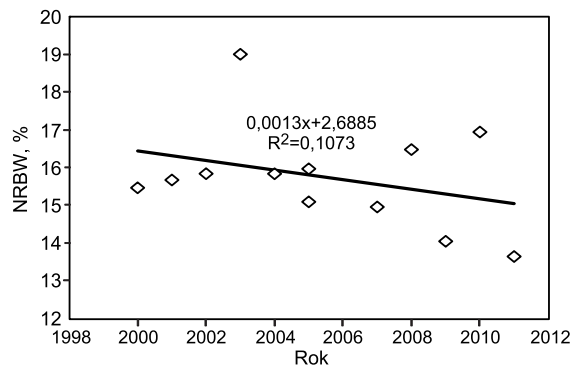
Rys. 2. Zależność jednostkowego wskaźnika strat wody (q_s) od obciążenia hydraulicznego sieci (q_o) w mieście i gminie Siedlce w latach 2000–2011

Fig. 2. Correlation between unitary water loss indicator (q_s) and hydraulic load (q_o) of town of Siedlce and municipality distribution system in the period from 2000 to 2011



Rys. 3. Jednostkowe straty rzeczywiste (RLB – real leakage balance) w mieście i gminie Siedlce w latach 2000–2011 [28]

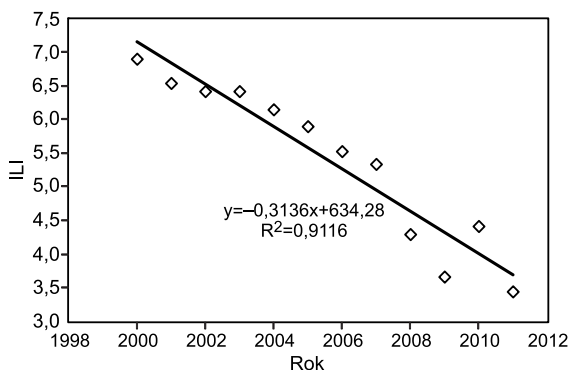
Fig. 3. Real leakage balance for the town and municipality of Siedlce in the period from 2000 to 2011 [28]



Rys. 4. Wskaźnik objętości wody niedochodowej (NRWB – non-revenue water basic) w mieście i gminie Siedlce w latach 2000–2011 [28]

Fig. 4. Non-revenue water basic for the town and municipality of Siedlce in the period from 2000 to 2011 [28]

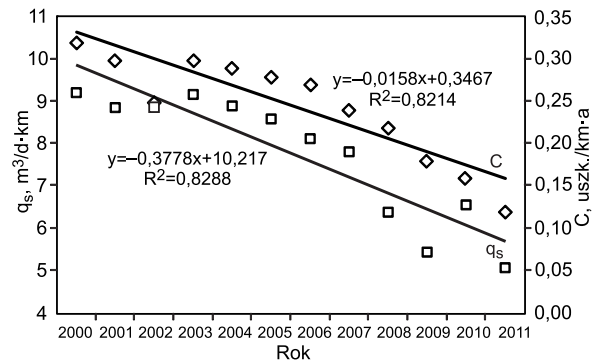
Zmniejszająca się stale w czasie obserwacji wartość infrastrukturalnego wskaźnika wycieków (ILI) świadczyła o ciągłej modernizacji i dobrym zarządzaniu i w rezultacie dużej poprawie efektywności dystrybucji wody w Siedlcach (rys. 5). Wartość tego wskaźnika zmalała z 6,8 do 3,45, tj. o ponad połowę, co obecnie pozwala zakwalifikować system wodociągowy w Siedlcach do drugiej grupy wg standardów światowych (tab. 2). Jakkolwiek w przypadku badanego systemu dystrybucji wody jest to duży postęp, to jednak wskazuje się na możliwość wprowadzenia dalszych usprawnień w celu zwiększenia rentowności poprzez poprawę zarządzania ciśnieniem w sieci, aktywną kontrolę



Rys. 5. Infrastrukturalny wskaźnik wycieków (ILI) w mieście i gminie Siedlce w latach 2000–2011 [28]

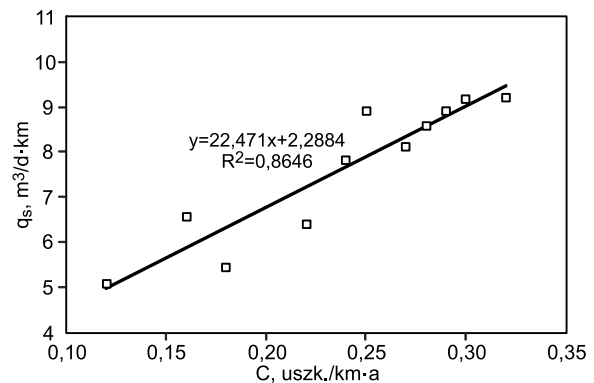
Fig. 5. Infrastructure leakage index (ILI) for the town and municipality of Siedlce in the period from 2000 to 2011 [28]

wycieków oraz konserwację sieci. Z uzyskanych doświadczeń wynika, że duży potencjał w zakresie ograniczania strat wody tkwi w poprawie zarządzania ciśnieniem w sieci wodociągowej. O poprawie efektywności zarządzania badanym systemem dystrybucji wody świadczą też wyniki oceny awaryjności skojarzonej ze stratami wody w sieci wodociągowej (rys. 6 i 7).



Rys. 6. Jednostkowe straty wody (q_s) i częstość uszkodzeń (C) sieci wodociągowej w mieście i gminie Siedlce w latach 2000–2011 [28]

Fig. 6. Unitary water losses (q_s) and frequency of water network failure (C) for the town and municipality of Siedlce in the period from 2000 to 2011 [28]



Rys. 7. Zależność jednostkowych strat wody (q_s) od częstości uszkodzeń (C) sieci wodociągowej w mieście i gminie Siedlce [28]

Fig. 7. Correlation between unitary water losses (q_s) and frequency of water network failure (C) for the town and municipality of Siedlce in the period from 2000 to 2011 [28]

Zarówno wskaźnik jednostkowych strat wody (q_s), jak i częstość uszkodzeń (C) wykazują wyraźną tendencję malejącą w całym rozważanym czasie (rys. 6). Jednocześnie widać zgodność wzrostu strat wody i awaryjności sieci (rys. 7). Analizując awaryjność warto zauważyć, że w ciągu rozważanej dekady częstość uszkodzeń sieci wodociągowej została zmniejszona o ponad 62% (z 0,32 uszk./km·a do 0,12 uszk./km·a).

Choć nie ustalono dotychczas obowiązujących kryterialnych wartości wskaźnika uszkodzeń, to jednak w przedsiębiorstwie dąży się do osiągnięcia wartości poniżej 0,1 uszk./km·a, tj. małej awaryjności (wysokiej niezawodności), która jest proponowana w pracy [15] na podstawie doświadczeń krajowych. Warto przy tym podkreślić, że propozycje te są zbieżne z zalecanymi standardami niemieckimi w tym zakresie [6], gdzie przy częstości uszkodzeń przekraczającej 0,5 uszk./km·a (wysoka awaryjność = niska niezawodność) sugeruje się podjęcie działań odnowieniowych na przewodach w celu ograniczenia strat wody i poprawy stanu technicznego sieci.

Podsumowanie

Wykorzystanie międzynarodowych standardów szacowania strat wody do oceny efektywności systemu jej dystrybucji przekłada się wprost na możliwości poprawy jakości zarządzania systemami wodociągowymi, a w szczególności ich utrzymaniem i eksploatacją. Procentowy wskaźnik strat wody, stosowany jeszcze szeroko w Polsce i na świecie, jest niemiarodajny do oceny strat wody, ponieważ nie uwzględnia takich istotnych czynników, jak długość sieci, liczba przyłączy i ich długość oraz ciśnienie i obciążenie hydrauliczne sieci wodociągowej. Można traktować go jednak jako pierwsze przybliżenie oceny strat wody i może być stosowany do oceny zmienności strat wody w wieloletnim w tym samym systemie dystrybucji. Wad wskaźnika procentowego są częściowo pozbawione takie wskaźniki, jak jednostkowy wskaźnik strat (q_s , $m^3/d \cdot km$) i wskaźnik jednostkowych strat rzeczywistych (RLB, $m^3/d \cdot km$, m^3/a przyłącze, m^3/d przyłącze). Wszystkie czynniki pomijane we wskaźniku procentowym uwzględnia natomiast infrastrukturalny wskaźnik wycieków (ILI). Do oceny efektywności dystrybucji wody wykorzystywany jest też wskaźnik objętości wody niedochodowej (NRWB). Jego skuteczność byłaby większa, gdyby wyrażał tę objętość w postaci strat finansowych wynikających z ilości wody niesprzedanej. Wskaźnik jednostkowy zależy od obciążenia sieci wodociągowej i w związku z tym należy, w celach porównawczych z innymi sieciami, znać obciążenie tych sieci. Znajomość obciążenia sieci jest również konieczna przy korzystaniu z tego wskaźnika do oceny stanu technicznego przewodów. Jednostkowe straty wody mogą być miarodajne do porównania stanu technicznego sieci o takim samym lub bardzo zbliżonym obciążeniu hydraulicznym.

Bezwymiarowy infrastrukturalny wskaźnik wycieków (ILI) jest ważnym wskaźnikiem benchmarkingu, pozwalającym na porównywanie różnych systemów dystrybucji wody. Jednocześnie umożliwia sklasyfikowanie systemów wodociągowych pod względem stanu technicznego sieci wodociągowej i strategii ograniczania strat wody w tych systemach wg zalecanych międzynarodowych standardów. Wskaźnik ten jest obecnie najbardziej skutecznym parametrem oceny efektywności dystrybucji wody, jednakże ma on swoje ograniczenia. Zaleca się bowiem jego stosowanie wtedy, gdy liczba przyłączy jest większa niż 5000, a ich gęstość przekracza 20 na km sieci wodociągowej oraz przy ciśnieniu w sieci co najmniej 0,25 MPa.

Wyniki badań strat wody przeprowadzonych w polskich wodociągach z wykorzystaniem jednostkowych wskaźników strat wskazują we wszystkich analizowanych publikacjach na istotny postęp w zakresie ograniczania strat wody, a w rezultacie na coraz większą efektywność dystrybucji wody w ostatniej dekadzie. W przypadku analizowanego systemu wodociągowego w Siedlcach wykazano ponad 50-procentowe zmniejszenie strat wody i takie samo zmniejszenie wartości infrastrukturalnego wskaźnika wycieków, co świadczy o dużym postępie w zakresie efektywnego zarządzania tym systemem. Największym ograniczeniem w ocenie strat wody – i w rezultacie sprawności systemu dystrybucji – jest niepewność danych źródłowych, która związana jest przede wszystkim z:

- ograniczoną zasobnością danych,
- ograniczoną wiarygodnością danych, np. w zakresie ilości wody zużywanej na potrzeby własne miasta,
- obiektywnymi trudnościami w szacowaniu nieuniknionych strat rzeczywistych oraz strat pozornych.

Autor dziękuje Zarządowi Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Siedlcach za pomoc w trakcie prowadzenia badań oraz umożliwienie zebrania danych.

Praca naukowa została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu rozwojowego nr NR14 0006 10 pt. „Opracowanie kompleksowej metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa dostawy wody do odbiorców” w latach 2010–2013.

LITERATURA

1. Z. STEFAŃCZYK: O stratach w sieci wodociągowej i próbach szczelności nowych przewodów. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1948, nr 4, ss. 99–103.
2. B. SIŁKA: Oszczędzanie wody. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1949, nr 7 i 8, ss. 243–246.
3. F. ZYGMANOWSKI: Straty i marnotrawstwo wody w instalacjach domowych i przemysłowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1961, nr 11, ss. 421–425.
4. M. KRÓLIK: Pozorne straty wody. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1957, nr 2, ss. 44–45.
5. H. JANCZEWSKI: Zmniejszanie strat wody. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1984, nr 3, ss. 84–86.
6. H. HOTŁOŚ: Analiza strat wody w systemach wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 2003, vol. 25, nr 1, ss. 17–24.
7. Control and Mitigation of Drinking Water Losses in Distribution Systems. U.S. EPA Manual, 2010.
8. DVGW Manual: Leakage management and control. A best practice training manual, DVGW-W 392, Geneva 2001.
9. DVGW Manual: Network Inspection and Water Losses, German Schedule of Technical Standards Water, 2000.
10. W. HIRNER, A. LAMBERT: Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. IWA Website, 2000 (www.iwahq.org.uk/bluepages).
11. H. ALEGRE, W. HIRNER, J. BAPTISTA, R. PARENA: Performance indicators for water supply services. IWA Manual of Best Practices, 2000.
12. P. DOHNALIK, A. JĘDRZEJEWSKI: Efektywna eksploatacja wodociągów. LEMTECH Konsulting, Kraków 2004.
13. T. BERGEL: Analiza wskaźnikowa strat wody wodociągowej w gminach wiejskich i miejsko-wiejskich w Polsce (cz. 1 i 2). *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2012, nr 8, ss. 322–325 i nr 10, ss. 413–415.
14. M. BERGER, M. WAYS: Poszukiwanie przecieków sieci wodociągowych. Wyd. Seidel-Przywecki, Warszawa 2003.
15. M. KWIETNIEWSKI, M. TŁOCZEK, L. WYSOCKI [red.]: Zasady doboru rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych do budowy przewodów wodociągowych. Izba Gospodarcza „Wodociągi Polskie”, Bydgoszcz 2011.
16. Z. KAPELAN, D. SAVIC, T. KOPPEL: Probabilistic leak detection in pipe networks using the SCEM-UA algorithm. Proc. of Water Distribution Systems Analysis Symposium, 2006.
17. ECOREG, 2013 (<http://www.ecoreg.pl/indexpl.html>).
18. BENCHMARKING – Wyniki przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych w Polsce za 2010 r. Wyd. Izba Gospodarcza „Wodociągi Polskie”, Bydgoszcz 2012.
19. R. MCKENZIE, A. LAMBERT: Water Loss Group: IWA Task Force. Best Practice Performance Indicators for Non-Revenue Water and Water Loss Components: A Practical Approach. Water 21, IWA Water Loss Task Force, 2003.
20. M. FARLEY, S. TROW: Losses in Water Distribution Networks. A Practitioner’s Guide to Assessment, Monitoring and Control. IWA Publishing, 2003.
21. A. LAMBERT, T.G. BROWN, M. TAKIZAWA, D. WEIMER: A Review of performance indicators for real losses from water supply systems. *AQUA* 1999, Vol. 48, No 6.
22. A. LAMBERT: Technical ‘metric’ comparisons of real losses using the ILI, ILMSS Ltd. Water Loss Research & Analysis Ltd., Non-Revenue Water Conference, Malta 2012

- (<http://173.254.28.127/~leakssui/wp-content/uploads/2012/11/Malta16Nov2012AL-Read-Only1.pdf>).
23. S. SPERUDA: Straty wody w polskich sieciach wodociągowych. Wyd. WaterKEY Sławomir Speruda. Warszawa 2007.
 24. R.S. MCKENZIE, C. SEAGO: Assessment of real losses in potable water distribution systems: Some recent developments. *Water Science and Technology: Water Supply* 2005, Vol. 5, No. 1, pp. 33–40.
 25. F.G. PIECHURSKI: Sposoby obliczania i oceny straty wody w systemach wodociągowych. *Przegląd Komunalny* 2010, nr 5, ss. 54–59.
 26. J. RAK, A. TUNIA: Analiza i ocena strat wody w wodociągu Rzeszowa. *Instal* 2011, nr 5, ss. 42–45.
 27. I. PIEGDOŃ, B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Analiza awaryjności sieci wodociągowej miasta Sanoka z uwzględnieniem strat wody. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2012, nr 10, ss. 450–452.
 28. E. SZYMURA, I. ZIMOCH: Kwantyfikacja stref systemu dystrybucji wody w ujęciu wskaźników strat wody i awaryjności sieci. W: I. ZIMOCH, W. SAWINIĄK [red.]: Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013, ss. 473–484.
 29. M. IWANCZUK: Analiza strat i ocena efektywności dystrybucji wody na przykładzie miasta i gminy Siedlce. Praca dyplomowa, Politechnika Warszawska, Warszawa 2012 (praca niepublikowana).

Kwietniewski, M. Application of Water Loss Indicators as a Measure of its Distribution Effectiveness in Water Supply Systems. *Ochrona Środowiska* 2013, Vol. 35, No. 4, pp. 9–16.

Abstract: Application of international standards of water loss estimates to the effectiveness assessment of water distribution system translates into the opportunity to improve quality of water supply system management. The water loss percentage indicator is found not to be useful for water loss estimates as it does not take into account many factors significantly affecting the magnitude of losses. The presented considerations relate to global standards for water distribution system

management, recommended by the International Water Association (IWA). A key measure used to evaluate the effectiveness of water distribution in water supply systems is the infrastructure leakage index (ILI). Great usefulness of this parameter is illustrated by the exemplary evaluation of water distribution system for the medium-sized town of Siedlce. The results obtained (ILI in the range of 2–4) confirm that in order to increase profitability of water supply systems there is a potential for improvements in terms of network pressure management, leakage control, and network maintenance.

Keywords: Water distribution system, water loss indicator, ILI.