



POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

BADANIA SYSTEMOWE

Inżynieria Środowiska

**BEZPIECZEŃSTWO SYSTEMÓW
ZBIOROWEGO ZAOPATRZENIA
W WODĘ**

Janusz Rak

Barbara Tchórzewska-Cieślak

Jan Studziński

Warszawa 2013



**POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH**

Seria: BADANIA SYSTEMOWE

Tom 72

**Redaktor naukowy:
Prof. dr hab. inż. Jakub Gutenbaum**

Warszawa 2013

Rada redakcyjna serii: **BADANIA SYSTEMOWE**
Inżynieria Środowiska

Prof. Olgierd Hryniewicz - przewodniczący

Prof. Jakub Gutenbaum – redaktor naczelny

Prof. Janusz Kacprzyk

Prof. Tadeusz Kaczorek

Prof. Roman Kulikowski

Prof. Marek Libura

Prof. Krzysztof Malinowski

Prof. Zbigniew Nahorski

Prof. Marek Niezgódka

Prof. Roman Słowiński

Prof. Jan Studziński

Prof. Stanisław Walukiewicz

Prof. Andrzej Weryński

Prof. Antoni Żochowski



**POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH**

Janusz Rak

Barbara Tchórzewska-Cieślak

Jan Studziński

**BEZPIECZEŃSTWO SYSTEMÓW
ZBIOROWEGO ZAOPATRZENIA
W WODĘ**

Warszawa 2013

Copyright © by Instytut Badań Systemowych PAN
Warszawa 2013

Autorzy:

Prof. dr hab. inż. Janusz R. Rak

Politechnika Rzeszowska
rakjan@prz.edu.pl

Dr hab. inż. Barbara Tchórzewska-Cieślak

Politechnika Rzeszowska
cbarbara@prz.edu.pl

Dr hab. inż. Jan Studziński

IBS PAN Warszawa
studzins@ibspan.waw.pl

Recenzenci:

Prof. dr hab. inż. Janusz Łomotowski

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Dr hab. inż. Izabela Zimoch

Politechnika Śląska w Gliwicach

Skład: Aneta M. Pielak

Wydawca:

Instytut Badań Systemowych
Polska Akademia Nauk
Newelska 6, 01-447 Warszawa
www.ibspan.waw.pl

*Publikacja wydana ze środków projektów rozwojowych
Narodowego Centrum Badań i Rozwoju
nr NR 14-0006-10/2010 oraz NR 14-0011-10/2010*

ISSN 0208-8029

ISBN 83-894-7549-9

15. Analiza i ocena strat wody na przykładzie systemu wodociągowego Rzeszowa

15.1. Wstęp

Wycieki niezmiennie towarzyszą eksploatacji sieci wodociągowych. Ich pojawienie się ma charakter losowy. W związku z tym nie jest znane miejsce ich wystąpienia a nawet nie wiadomo o ich istnieniu, dopóki nie wywołają zauważalnych skutków. Tematyka ta znalazła odzwierciedlenie w krajowych badaniach naukowych. Za pierwszą znaczącą publikację naukową w Polsce uważa się pracę F. Zygmunta z roku 1957, „Walka za stratami wody w sieciach wodociągowych”. Następnie pojawiły się prace Z. Hoffmana i W. Petrozolina dotyczące uszkodzalności sieci wodociągowych w Poznaniu i Warszawie. Kolejne publikacje pochodzą z lat 70-tych XX w., są autorstwa K. Dohnalika i H. Janczewskiego i podejmują już problematykę analizy, oceny i kontroli przecieków w sieciach wodociągowych.

Do lat 80-tych ubiegłego wieku problematyka strat wody podejmowana była głównie z powodu deficytu w zaopatrzeniu w wodę wodociągową wielu miast Polski. Jedną z jego przyczyn był fakt, że w gospodarce nakazowo-rozdziałowej cena 1m³ wody nie odgrywała żadnej roli (była groszowa), co powodowało rozrzutność w jej użytkowaniu. Transformacja ustrojowa na początku lat 1990-tych spowodowała urynkowanie ceny wody. Zagadnienia związane ze stratami wody znalazły się wówczas w centrum uwagi kadry zarządzającej przedsiębiorstwami wodociągowymi, jak również władz samorządowych uprawnionych do zatwierdzenia cen za wodę wodociągową.

Na przełomie XX i XXI wieku nastąpił znaczący spadek zużycia wody wodociągowej. Głównymi czynnikami z tym związanymi było (Apostolakis, Kaplan, 1981; Bernaciak, Spychała, 2008; Berger, Ways, 2003; Dąbrowski, 2000, Dohnalik, Jędrzejewski, 2004): opomiarowanie odbiorców wody, aktywne podejście do kontroli i trwałego zmniejszania strat wody, przejście na nową generację armatury czerpalnej oraz cena za zużycie wody niejednokrotnie osiągnęła próg wrażliwości dochodów miesięcznych w rodzinie, który szacuje się na 4%.

15.2. Wskaźniki strat wody wg International Water Association (IWA)

Zestawienie podstawowych danych do obliczania strat wody (Lambert, Hibner, 2000):

- Woda wtłoczona do sieci – $V_{wtł}$
- Zużycie własne wody – $V_{wł}$
- Woda sprzedana – V_{sp}
- straty wody – V_{str}
- Długość sieci magistralnej – M
- Długość sieci rozdzielczej – R
- Całkowita długość sieci wodociągowej – $M+R$
- Długość połączeń wodociągowych – PW
- Liczba połączeń wodociągowych – Lpw .

Procentowy wskaźnik strat wody określa udział strat wody (V_{str}) w stosunku do objętości wody wtłoczonej ($V_{wtł}$) do sieci wodociągowej:

$$WSW = \frac{V_{str}}{V_{wtł}} \cdot 100[\%] \quad (15.1)$$

Straty wody w podsystemie dystrybucji charakteryzują następujące wskaźniki:

- wskaźnik jednostkowy strat rzeczywistych – RLB (ang. *Real Loss Basic*),
- wskaźnik objętości wody niedochodowej – $NRWB$ (ang. *Non-Revenue Water Basic*),
- indeks infrastrukturalny wycieków – ILI (ang. *Infrastructure Leakage Index*).

Bilans strat nieuniknionych (Avizienis i inni, 2000), to objętość roczna wody wodociągowej w formie strat nieuniknionych określana na podstawie składników:

- przecieki nieuniknione na przewodach sieci magistralnej i rozdzielczej; przyjmuje się $18 \text{ dm}^3/\text{km d } 1 \text{ m H}_2\text{O}$ ciśnienia,
- przecieki nieuniknione na przewodach podłączeniach wodociągowych; przyjmuje się $25 \text{ dm}^3/1\text{m}$ podłączeń d $1\text{m H}_2\text{O}$ ciśnienia,
- przecieki nieuniknione związane z liczbą podłączeń wodociągowych; przyjmuje się $0,8 \text{ dm}^3/1$ podłączenie d $1 \text{ m H}_2\text{O}$ ciśnienia.

Wzór na straty nieuniknione przedstawia się następująco:

$$U_{ARL} = [18 \cdot (M + R) + 25 \cdot PW + 0,8 \cdot L_{pw}] \cdot 0,365 \cdot p [m^3 / r] \quad (15.2)$$

gdzie: M – długość sieci magistralnej, [km], R – długość sieci rozdzielczej, [km], PW – długość podłączeń wodociągowych, [km], L_{pw} – liczba podłączeń wodociągowych, p – średnie ciśnienie w rozpatrywanej strefie pomiarowej, [m H_2O], $0,365$ – współczynnik przeliczeniowy na rok i m^3 .

Straty nieuniknione możliwe są do tolerowania przez przedsiębiorstwo wodociągowe. Wynika to z faktu, że wycieki z sieci wodociągowej o wielkości poniżej $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ są trudne do wykrycia (Balcerzak i inni, 1999).

Infrastrukturalny indeks wycieków ILI w stosunku rocznym wyznacza się ze wzoru:

$$ILI = \frac{V_{str}}{U_{ARL}} \quad (15.3)$$

Indeks ten pozwala pośrednio na ocenę stanu technicznego sieci wodociągowej według następującej skali:

$ILI \leq 1,5$ – stan bardzo dobry

$1,5 < ILI \leq 2$ – stan dobry

$2 < ILI \leq 2,5$ – stan średni

$2,5 < ILI \leq 3,0$ – stan słaby

$3,0 < ILI \leq 3,5$ – stan bardzo słaby

$ILI > 3,5$ – stan niedopuszczalny.

Wskaźnik jednostkowy strat rzeczywistych wylicza się ze wzoru:

$$RLB_1 = \frac{V_{str}}{(M + R)365} [\text{m}^3/\text{km} \cdot \text{d}] \quad (15.4)$$

lub

$$RLB_2 = \frac{V_{str} \cdot 1000}{L_{pw} \cdot 365} [\text{dm}^3/\text{d} \cdot \text{podłączenie wodociągowe}] \quad (15.5)$$

Wskaźnik RLB_1 zaleca się stosować, jeżeli liczba połączeń wodociągowych przypadających na kilometr sieci wodociągowej ($M+R$) jest mniejsza od 20. Wskaźnik RLB_2 zaleca się stosować, jeżeli liczba połączeń wodociągowych przypadających na kilometr sieci wodociągowej wynosi co najmniej 20.

Wskaźnik objętości wody niedochodowej $NRWB$ oblicza się ze wzoru:

$$NRWB = \frac{V_{wtł} - V_{sp}}{V_{wtł}} \cdot 100 [\%] \quad (15.6)$$

15.3. Analiza strat wody wodociągowej w Rzeszowie

W tabeli 15.1 zestawiono bilans produkcji wody.

Tabela 15.1. Zestawienie bilansu produkcji wody w latach 2003-2011.

Rok	Woda wtłoczona do sieci $V_{wtł}$ [m^3/r]	Woda sprzedana V_{sp} [m^3/rok]	Woda sprzedana gospod. domowym V_{spgd}	Zużycie wody na cele własne $V_{wtł}$ [m^3/r]	Straty wody V_{str} [m^3/r]
2003	13 435 689	10 154 890	7186111	1 192 120	2 088 679
2004	12 997 379	9 766 400	7349389	1 460 707	1 770 273
2005	12 488 658	9 603 237	7452456	1 321 381	1 564 040
2006	12 621 969	9 639 561	6951736	1 374 711	1 607 697
2007	12 879562	9 709 020	7167430	1 495 793	1 674 749
2008	12 967 002	9 478 922	7094977	1 525 964	1 962 116
2009	12 539 547	9 520 591	7072548	1 329 615	1 800 558
2010	13 041 107	9 413 191	7066952	1 651 988	1 975 928
2011	13 120 817	9 610 883	7096594	1 566 097	1 943 837

W tabeli 15.2 zestawiono długości poszczególnych rodzajów sieci wodociągowej.

Tabela 15.2. Zestawienie długości sieci wodociągowej w Rzeszowie.

Rok	Długość sieci magistralnej M [km]	Długość sieci rozdzielczej R [km]	Razem $M+R$ [km]	Długość połączeń wodociągowych PW [km]	Razem L [km]	L_{pw}
2003	49,5	345,4	394,9	281,5	676,4	15173
2004	49,5	348,6	398,1	282,7	680,8	15235
2005	49,5	350,5	400,0	283,8	683,8	15319
2006	49,5	384,4	433,9	287,7	721,6	15812
2007	49,5	433,5	483,0	305,8	788,8	16293
2008	49,5	447,7	497,2	322,8	820,0	16957
2009	49,5	460,0	509,5	323,2	832,7	16964
2010	49,8	490,5	540,3	323,8	864,7	16975
2011	49,8	504,1	553,9	324,4	878,3	16990

Wartość średniej ważonej ciśnienia w sieci wodociągowej obliczono wyróżniając trzy podstawowe strefy (35 m H₂O – 25%, 40 m H₂O – 30% i 55 m H₂O – 45%)

$$p = 0,25 \cdot 35 + 0,30 \cdot 45 + 0,45 \cdot 55 = 47 \text{ [m H}_2\text{O]}$$

W tabeli 15.3 zestawiono obliczenia wskaźników strat wody.

Tabela 15.3. Zestawienie wskaźników strat wody w latach 2003-2011.

Rok	WSW [%]	$NRWB$ [%]	RLB_1 [m ³ /km·d]	RLB_2 [dm ³ /dPW]	$UARL$ [m ³ /r]	ILI
2003	15,5	24,4	14,5	377	45090	4,64
2004	13,6	24,9	12,2	318	45326	3,91
2005	12,5	23,1	10,7	280	455468	3,43
2006	12,7	23,6	10,2	279	474375	3,39
2007	13,0	24,6	9,5	282	503900	3,32
2008	15,1	26,9	10,8	317	524689	3,74
2009	14,4	24,1	9,7	291	528754	3,40
2010	15,2	27,8	10,0	319	538673	3,67
2011	14,8	26,8	9,6	313	543079	3,58

Jednostkowa ilość wtłoczonej wody do sieci:

$$q_{wtl} = \frac{V_{wtl} \cdot 1000}{LM \cdot 365} \text{ [dm}^3\text{/Mk} \cdot \text{d]} \quad (15.7)$$

Jednostkowa ilość sprzedanej wody ogółem:

$$q_{sp} = \frac{V_{sp} \cdot 1000}{LM \cdot 365} \text{ [dm}^3\text{/Mk} \cdot \text{d]} \quad (15.8)$$

Jednostkowa ilość sprzedanej wody gospodarstwom domowym:

$$q_{spgd} = \frac{V_{spgd} \cdot 1000}{LM \cdot 365} \text{ [dm}^3\text{/Md]} \quad (15.9)$$

Jednostkowa ilość strat wody:

$$q_{str} = \frac{V_{str} \cdot 1000}{LM \cdot 365} \text{ [dm}^3\text{/M} \cdot \text{d]} \quad (15.10)$$

Jednostkowa ilość zużytej wody na potrzeby własne:

$$q_{wl} = \frac{V_{wl} \cdot 1000}{LM \cdot 365} \text{ [dm}^3\text{/M} \cdot \text{d]} \quad (15.11)$$

Jednostkowa ilość wody niedochodowej:

$$q_{nd} = \frac{(V_{wtl} - V_{sp}) \cdot 1000}{LM \cdot 365} \text{ [dm}^3\text{/Md]} \quad (15.12)$$

Obliczenie jednostkowego wskaźnika obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej $M+R$:

$$q_o = \frac{V_{wtl}}{L_{M+R} \cdot 365} \text{ [dm}^3\text{/km} \cdot \text{d]} \quad (15.13)$$

Obliczenie jednostkowego wskaźnika strat wody w odniesieniu do całej długości sieci wodociągowej:

$$q_{strL} = \frac{V_{str}}{L \cdot 365} \text{ [m}^3\text{/km} \cdot \text{d]} \quad (15.14)$$

gdzie:

$$V'_{str} = V_{str} - UARL \quad (15.15)$$

$$q'_{str.L} = \frac{V'_{str}}{L \cdot 365} \text{ [m}^3\text{/km} \cdot \text{d]} \quad (15.16)$$

W tabeli 15.4 zestawiono jednostkowe ilości wody.

Tabela 15.4. Jednostkowe wskaźniki ilości wody w latach 2003-2011.

Jednostkowy wskaźnik ilości wody	ROK								
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
<i>qwtł</i>	247	236	227	223	224	222	209	206	227
<i>qsp</i>	187	178	174	170	169	162	157	149	174
<i>qspgd</i>	132	134	135	123	125	121	118	112	135
<i>qstr</i>	38	32	28	28	29	34	30	31	28
<i>qwl</i>	22	27	24	24	26	26	22	26	24
<i>qnd</i>	60	59	52	53	55	60	52	57	52
Liczba mieszkańców korzystających z wodociągu LM	149 010	150620	151 050	155 332	157 225	159 902	164 132	173593	151 050

W tabeli 15.5 zestawiono wartości wskaźnika jednostkowego obciążenia hydraulicznego sieci magistralnej i rozdzielczej oraz jednostkowego wskaźnika strat wody na całej długości sieci wodociągowej.

Tabela 15.5. Zestawienie wskaźników jednostkowych obciążeń hydraulicznych sieci wodociągowej w Rzeszowie.

ROK	q [m ³ /km · d]	$q_{str.L}$ [m ³ /km · d]	V'_{str} [m ³ /r]	$q'_{str.L}$
2003	93	8,46	1 637 775	6,63
2004	89	7,12	1 317 016	5,30
2005	86	6,27	1 108571	4,44
2006	80	6,10	1 133322	4,30
2007	73	5,82	1 170848	4,07

2008	71	6,56	1 437427	4,80
2009	67	5,92	1 271803	4,18
2010	66	6,26	1 437254	4,55
2011	65	6,06	1 400758	4,37

W tabeli 15.6 zestawiono liczby awarii i wskaźniki intensywności uszkodzeń sieci wodociągowej Rzeszowa. Długości poszczególnych rodzajów sieci wodociągowej zaczerpnięto z tabeli 15.2.

Tabela 15.6. Zestawienie intensywności uszkodzeń sieci wodociągowej w Rzeszowie.

Oznaczenia	ROK								
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Liczba awarii sieci magistralnej	75	61	54	45	51	29	38	39	52
Intensywność uszkodzeń λ_M	1,52	1,23	1,09	0,91	1,03	0,59	0,76	0,78	1,04
Liczba awarii sieci rozdzielczej	173	135	108	136	114	106	114	114	113
Intensywność uszkodzeń λ_R	0,50	0,39	0,31	0,35	0,26	0,24	0,24	0,23	0,22
Liczba awarii połączeń wodociągowych	151	111	83	117	0,90	83	65	102	134
Intensywność uszkodzeń połączeń wodociągowych λ	0,54	0,39	0,29	0,41	0,28	0,26	0,20	0,32	0,41
Całkowita liczba awarii sieci wodociągowej	399	0,07	245	298	255	218	217	255	299
λ	0,59	0,45	0,36	0,41	0,32	0,27	0,26	0,30	0,34

Intensywność uszkodzeń sieci wodociągowej oblicza się w odniesieniu do 1 km jej długości i jednostki czasu równej jednemu rokowi ze wzoru:

$$\lambda = \frac{k}{L \cdot \Delta t} \quad (15.17)$$

Procentowy wskaźnik strat wody *WSW* waha się od 12,5% do 15,5% i należy do dolnej strefy wyników uzyskiwanych w innych miastach polskich.

Infrastrukturalny wskaźnik wycieków *ILI* waha się od 3,32 do 4,64 i według skali *IWA* sytuuje sieć wodociągową Rzeszowa jako stan niedopuszczalny lub bardzo słaby. Wskaźnik ten pokazuje, ile razy straty rzeczywiste przewyższają straty nieuniknione (wyznaczone wg wzoru *IWA*). Należy zauważyć, że metodyka *IWA* uwzględnia straty pozorne wynikające z błędów wskazań wodomierzy. W pracy straty te zostały uwzględnione w ogólnym bilansie wody wodociągowej. Stąd postulat o przystosowaniu skali *ILI* wg *IWA* do warunków krajowych. Może to nastąpić w wyniku analizy strat wody w większej liczbie miast polskich.

Analiza intensywności uszkodzeń plasuje sieć wodociągową rozdzielczą i połączeń jako bardzo niską (poniżej 0,5 uszk/km rok) (Kotowski, Hotłoś, 1994; Kwietniewski, Rak, 2010). Znacząca jest intensywność uszkodzeń sieci magistralnej ~ 1,0 uszk/km·rok. Awarie na sieci magistralnej powodują największe straty wody, ale udział tego rodzaju sieci w ogólnym bilansie jest stosunkowo mały. Sumaryczne wskaźniki intensywności uszkodzeń wahają się od 0,3 do 0,59 uszk/km·rok. Straty wody w wyniku zgłoszonych awarii wodociągowych nie mają strategicznego wpływu na wielkość rocznych strat wody. W tym względzie potrzebna jest pogłębiona analiza obejmująca czasy trwania awarii, dokładności urządzeń pomiarowych i możliwość wykrywania utajnionych wycieków, które być może trwają niewykryte od wielu lat. Pewnego rodzaju wskazówką w tym względzie są przedstawione w tabeli 6 wskaźniki jednostkowe obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej magistralnej i rozdzielczej.

Wskaźnik jednostkowego zużycia wody w gospodarstwach domowych wynosi od 121 do 135 dm³/M·d, co odpowiada obserwowanym trendom w innych miastach polskich.

Przeprowadzona analiza strat wody w wodociągu Rzeszowa w globalnej ocenie przedstawia się na zadawalającym poziomie.

Niepokojącym jest wartość indeksu infrastrukturalnego wycieków *ILI* wg *IWA*; w miastach polskich waha się on od 3,16 do 16,62 (średnio 7,3) (Kwietniewski, Rak, 2010). Na tym tle wartości zaobserwowane w Rzeszowie mieszczą się w dolnym obszarze, ale są bardzo wysokie wg klasyfikacji *IWA*.

Wskaźnik objętości wody niedochodowej *NRWB* waha się od 23,1 do 27,8%, co koresponduje ze wskaźnikiem *ILI*.

IBS PAN *Serw*

47323

Bibl. podręczna

ISSN 0208-8029
ISBN 83-894-7549-9

**INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

tel.: (+48) 22 3810246 / 22 3810277 / 22 3810241 / 22 3810273

e-mail: biblioteka@ibspan.waw.pl