

Małgorzata Iwanek, Dariusz Kowalski, Marian Kwietniewski

Badania modelowe wpływu wody z podziemnego rurociągu podczas awarii

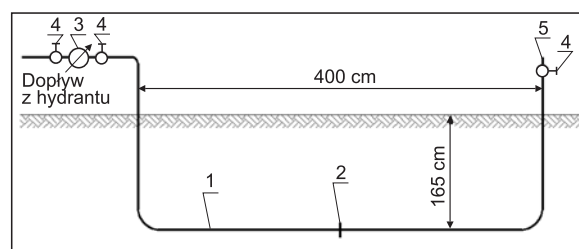
Awarie, uszkodzenia i nieszczelności przewodów oraz związane z nimi wycieki występują w systemach wodociągowych przez cały czas ich eksploatacji [1–7]. Zdarzenia tego typu pociągają za sobą koszty ekonomiczne wynikające ze strat wody [8] oraz konieczności napraw uszkodzonej sieci [9]. Ponadto wycieki wody mogą powodować zjawiska sufozyjne, stanowiące zagrożenie bezpieczeństwa ludzi i mienia, zwłaszcza w aglomeracjach miejskich [10–13]. Obecnie dostępne są różne metody wykrywania wycieków, które ułatwiają promowaną od kilkunastu lat ich aktywną kontrolę [1, 14–18]. Jednak w wielu polskich przedsiębiorstwach wciąż stosuje się podejście pasywne [19], polegające na przystępowaniu do likwidacji awarii dopiero po jej zgłoszeniu. W przypadku nieszczelności przewodu podziemnego najłatwiej stwierdzić awarię wówczas, gdy na powierzchni terenu pojawi się woda. Nie zawsze jednak pojawia się ona od razu, a czasem nie pojawia się wcale. Zależy to od różnych czynników – zarówno parametrów hydraulicznych wodociągu, jak i właściwości środowiska gruntowego czy wielkości wycieku wody [20].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy wpływu ciśnienia hydraulicznego w wodociągu, położenia zwierciadła wody gruntowej oraz przepuszczalności gruntu na czas wypływu wody na powierzchnię terenu podczas awarii podziemnego przewodu wodociągowego, a także na zasięg rozprzestrzeniania się wody. Badania przeprowadzono w oparciu o symulację numeryczną awarii wodociągu według różnych wariantów obliczeniowych, realizowaną za pomocą programu FEFLOW v. 5.3. Rezultaty symulacji zostały zweryfikowane doświadczalnie po przeprowadzeniu kontrolowanej awarii wodociągu w warunkach rzeczywistych.

Materiały i metody

Badania obejmowały trzy etapy. W pierwszym, przeprowadzonym w warunkach rzeczywistych, wykonano fizyczną symulację awarii wodociągu, polegającą na doprowadzeniu do kontrolowanego wycieku z nieszczelnego przewodu wodociągowego. W tym celu w grudniu 2013 r. przygotowano cztery niezależne od siebie rurociągi

badawcze z PE-HD (DN×g=63 mm×3,8 mm), zamontowane w czterech oddzielnych wykopach (o długości 4,0 m i szerokości 0,70 m) na głębokości 1,65 m. Końce rurociągów wyprowadzono na powierzchnię terenu i zaślepiono korkami. W połowie długości każda z rur została przecięta na niemal całym obwodzie – pozostawiono 5-milimetrový nieprzecięty odcinek obwodu, by ułatwić montaż z zachowaniem współosiowości części rur. Na przecięcie została nasunięta opaska z cienkiej dzianiny, przepuszczająca wodę, zabezpieczająca przewód przed przedostawianiem się gruntu do środka rury w trakcie wykonywania obsypki. Dwie z czterech rur zostały ułożone w gruncie rodzimym, natomiast w pozostałych dwóch przypadkach rury zostały ułożone na 10-centymetrowej zagęszczonej podsypce piaskowej i zasypane piaskiem na całej głębokości wykopu. Fizyczną symulację awarii wodociągu przeprowadzono w lipcu 2014 r. W miejsce korków zaślepiających z jednej strony zamontowano zestaw pomiarowy (składający się z dwóch zaworów kulowych i manometru) i podłączono przewód zasilający do hydrantu, natomiast z drugiej strony zainstalowano zawór odcinający (rys. 1).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego
(1 – rura PE-HD DN×g=63 mm×3,8 mm, 2 – miejsce wycieku, 3 – manometr, 4 – zawór kulowy, 5 – otwarty koniec rury)

Fig. 1. Scheme of the test stand
(1 – PE-HD DN×g=63 mm×3.8 mm pipe, 2 – leakage point, 3 – manometer, 4 – ball valve, 5 – the pipe's open end)

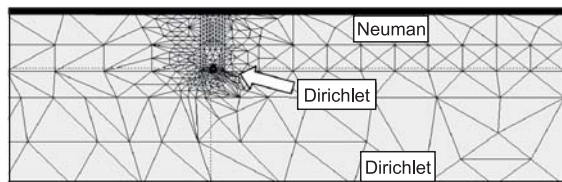
Doświadczenie poprzedzono odpowietrzeniem układu i natychmiast po jego zakończeniu zamknięto zawór wylotowy i całkowicie otwarto zawory doprowadzające wodę z hydrantu. W trakcie badań zmierzono czas, jaki upłynął od momentu otwarcia zaworów zasilających do chwili pojawienia się wody na powierzchni terenu oraz określono miejsce wypływu wody na powierzchnię względem nieszczelności przewodu. Czynności te zostały powtórzone w układzie pozostałych trzech przewodów. Drugi etap badań obejmował wyznaczenie wybranych parametrów hydraulicznych gruntów zastosowanych w eksperymencie (gruntu rodzimego i piasku średnioziarnistego).

Dr inż. M. Iwanek, dr hab. inż. D. Kowalski: Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, ul. Nadbystrzycka 40b, 20-618 Lublin
m.iwanek@wis.pol.lublin.pl

Prof. dr hab. inż. M. Kwietniewski: Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

Wilgotność aktualną gruntu wyznaczono zgodnie z normą PN-B-04481:1988 [21]. Współczynnik filtracji obliczono ze wzoru Hazena na podstawie składu granulometrycznego gruntu [22], porowatość gruntu przyjęto równą zawartości wody w gruncie w stanie nasyconym, natomiast parametry krzywej retencji wodnej estymowano wykorzystując nieliniową analizę regresji, w oparciu o funkcję van Genuchtena i wyniki pomiarów wilgotności gruntu na bloku pyłowym przy różnych wartościach ciśnienia ssącego [23].

W trzecim etapie badań przeprowadzono symulację numeryczną awarii wodociągu według różnych wariantów obliczeniowych, wykorzystując komercyjny program FEFLOW v. 5.3 (WASY Institute for Water Resources Planning System Research Ltd., Niemcy). Zbudowany w programie dwuwymiarowy model o szerokości 20 m i głębokości 5 m obejmował przekrój poprzeczny wykopu wraz z przewodem oraz obszar wokół wykopu. Dane wejściowe stanowiły parametry hydrauliczne gruntów wykorzystanych w trakcie fizycznej symulacji awarii, określone w drugim etapie badań (grunty A i B – tab. 1) oraz parametry gruntów o mniejszej przepuszczalności niż badany grunt, uzyskane z danych literaturowych [24] (grunty C i D – tab. 1). Jako warunek początkowy przyjęto wilgotność odpowiadającą $pF=2$ we wszystkich węzłach położonych powyżej zwierciadła wody gruntowej, natomiast w pozostałych węzłach – wilgotność w warunkach pełnego nasycenia gruntu. Jako górny warunek brzegowy przyjęto parowanie z powierzchni terenu równe $0,002 \text{ m/d}$ (warunek Neumana). Dolny warunek brzegowy (warunek Dirichleta) w przypadku wariantów VI–IX odpowiadał różnicy przyjętej rzędnej zwierciadła wody gruntowej i rzędnej dolnej granicy modelu, a w pozostałych wariantach wynosił $-1,0 \text{ m}$ ($pF=2$). Warunek Dirichleta przyjęto również w miejscu posadowienia przewodu, uwzględniając ciśnienie wody w jego wnętrzu. Schemat analizowanego obszaru z siatką elementów skończonych i założonymi warunkami brzegowymi przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Analizowany profil gruntu z siatką elementów skończonych i warunkami brzegowymi

Fig. 2. The analyzed soil profile with a finite element mesh and boundary conditions

Symulację numeryczną przeprowadzono według różnych wariantów, zmieniając wartości ciśnienia hydraulicznego w wodociągu, położenia zwierciadła wody gruntowej oraz rodzaj gruntu. Charakterystykę poszczególnych wariantów zestawiono w tabeli 2. Warianty III i XI odpowiadały warunkom rzeczywistym, w których przeprowadzono fizyczną symulację awarii w pierwszym etapie badań.

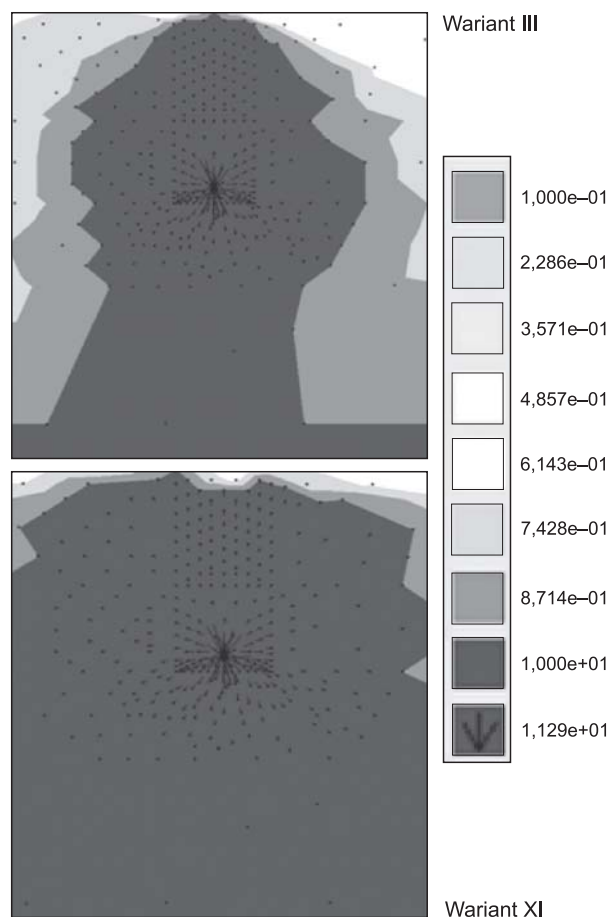
Tabela 1. Parametry hydrauliczne gruntów wykorzystanych w badaniach
Table 1. Hydraulic parameters of the investigated soils

Symbol gruntu	Rodzaj gruntu	θ , % obj.	K_s , 10^{-4} m/s	P, % obj.	α , 1/m	n
A	piasek średnioziarnisty	6,60	3,70	63,34	15,157	1,393
B	grunt rodzimy	7,77	3,34	66,22	1,662	1,334
C	piasek [24]	–	0,6262	36,58	2,800	2,239
D	il [24]	–	0,01516	48,86	1,040	1,395

θ – wilgotność aktualna, K_s – współczynnik filtracji, P – porowatość, α i n – empiryczne parametry krzywej retencji wodnej

Dyskusja wyników badań

Na stanowiskach badawczych nr 1 i nr 2, w których jako zasypkę wykorzystano grunt rodzimy, woda wskutek kontrolowanej awarii wypłynęła na powierzchnię terenu w obrębie wykopu (tab. 3), natomiast na dwóch pozostałych stanowiskach (nr 3 i nr 4) woda wypłynęła poza wykopem, mimo że w tym miejscu przepuszczalność gruntu była mniejsza niż w obrębie wykopu. Przyczyną tego mogła być obserwowana przez wykonawców sieci wodociągowych, pracujących w terenie, gdzie prowadzono badania, duża niejednorodność gruntu rodzimego. Ponadto na stanowisku nr 2 woda znalazła tzw. drogę łatwego przepływu wzdłuż przewodu i wypłynęła tuż przy jednym z jego końców wyprowadzonych na powierzchnię terenu. Było to jedyne stanowisko, na którym woda wypłynęła na powierzchnię terenu tylko jednym otworem. Z lokalizacją miejsca wypływu wiązał się również czas wypływu wody na powierzchnię terenu – był on krótszy, gdy woda, mając krótszą drogę do przebycia, wypływała w obrębie wykopu.



Rys. 3. Stopień nasycenia profilu gruntowego wodą w 9. sekundzie

Fig. 3. Saturation of the soil profile in the 9th second

Tabela 2. Charakterystyka wariantów symulacji numerycznej
Table 2. The characteristics of numerical simulation variants

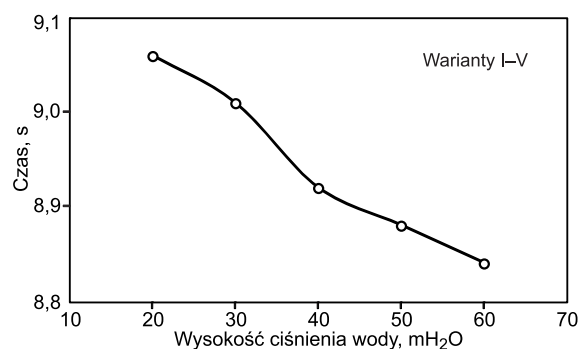
Numer wariantu	Ciśnienie w przewodzie, mH ₂ O	Położenie zwierciadła wody gruntowej, m p.p.t.	Rodzaj gruntu na stanowisku według tabeli 1						
			podsyпка	obsypka	zasyпка	wokół wykopu			
I	20	>5,0	A	A	A	B			
II	30								
III	40								
IV	50								
V	60								
VI	40	1,00	B	B	B	D			
VII		1,75							
VIII		2,50							
IX		5,0							
X		>5,0					D	D	D
XI									
XII									
XIII									
XIV									

Tabela 3. Wyniki fizycznej symulacji awarii wodociągu
Table 3. Results of the physical simulation of water pipe failure

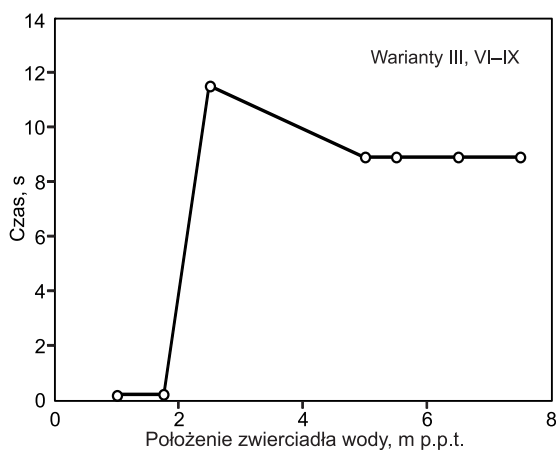
Numer stanowiska	Rodzaj gruntu (zasyпка)	Ciśnienie wody w przewodzie, mH ₂ O	Liczba otworów	Pozioma odległość od rury do otworu, m		Czas wypływu wody na powierzchnię, s
				najbliższego	najdalszego	
1	rodzimy	40,68	2	0,25	0,26	13,39
2		41,50	1	0	0	17,28
3	piasek	40,40	4	0,75	0,85	25,38
4		39,40	3	0,60	0,76	19,03

Kolejnym etapem badań była symulacja numeryczna awarii sieci wodociągowej polegającej na jej rozszczelnieniu. Przykładowy rozkład wody w gruncie w momencie jej wypływu na powierzchnię terenu w wariantach III i XI, odpowiadających warunkom rzeczywistym, przedstawiono na rysunku 3. Porównując symulowany czas wypływu wody na powierzchnię terenu od momentu wystąpienia awarii w wariantcie III, z odpowiadającym mu czasem zmierzonym podczas awarii przewodu zasypanego piaskiem na całej głębokości wykopu, można stwierdzić, że w warunkach modelowych wypływ nastąpił około 2,5-krotnie szybciej niż w badaniach terenowych. Również przy porównaniu symulowanego czasu w wariantcie XI, z odpowiadającym mu czasem zmierzonym w przypadku przewodu ułożonego w gruncie rodzimym obserwowano szybszy wypływ wody na powierzchnię terenu (ok. 1,7-krotnie), przy czym rozbieżności te wynikały zapewne z uproszczeń zastosowanych w modelu, a w szczególności z nieuwzględnienia niejednorodności i anizotropii ośrodka gruntowego. Wyniki symulacji według wszystkich wariantów przedstawiono na wykresach (rys. 4–6) oraz w tabeli 4.

Zgodnie z oczekiwaniami, czas wypływu wody na powierzchnię terenu od momentu wystąpienia awarii zmniejszał się wraz ze wzrostem ciśnienia wody w przewodzie (warianty I–V, rys. 4), przy czym nie były to różnice znaczące. Czas w wariantcie I był o 0,22 s dłuższy niż w wariantcie V, co stanowiło zaledwie 2,5% średniego czasu wypływu w wariantach I–V.

Rys. 4. Zależność czasu wypływu wody na powierzchnię terenu od wysokości ciśnienia wody w uszkodzonym przewodzie
Fig. 4. Correlation between the time of water outflow on a soil surface and pressure head in a damaged water pipe

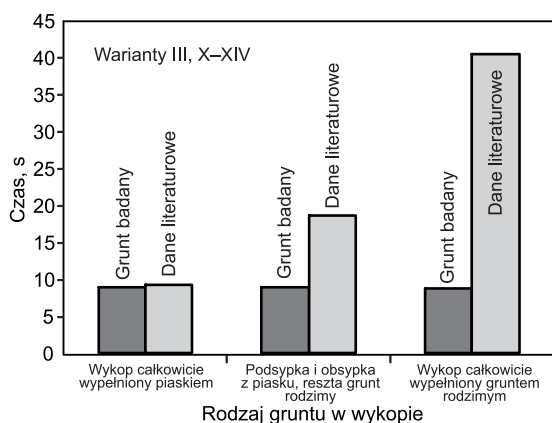
Na analizowany czas wpływało także położenie zwierciadła wody gruntowej (warianty VI–X i III, rys. 5). Gdy zwierciadło wody znajdowało się w obrębie wykopu (warianty VI i VII), wypływ wody na powierzchnię terenu nastąpił niemal natychmiast, natomiast gdy obszar nasycony znajdował się 2,5 m p.p.t. (0,75 m poniżej dna wykopu – wariant VIII), wtedy czas ten był o dwa rzędy wielkości większy (11,53 s). Gdy zwierciadło wody zostało obniżone do dolnej granicy rozpatrywanego obszaru, wówczas czas wypływu zmalał do 8,92 s (wariant IX). Dalsze obniżenie zwierciadła wody nie przyniosło znaczących różnic w czasie wypływu wody na powierzchnię terenu (wariant III).



Rys. 5. Zależność czasu wypływu wody na powierzchnię terenu od położenia zwierciadła wody gruntowej poniżej poziomu terenu

Fig. 5. Correlation between the time of water outflow on a soil surface and water table location below the soil surface

Analizując różne warianty badanych gruntów A i B, gdy wodociąg był układany z całkowitą wymianą gruntu w wykopie na piasek (wariant III), z podsypką i obsypką z piasku (wariant X) oraz w gruncie rodzimym (wariant XI) stwierdzono, że czas wypływu wody na powierzchnię terenu był porównywalny i wynosił średnio 8,83 s (rys. 6), przy czym różnica między skrajnymi wartościami była równa zaledwie 0,1 s (1,1% średniej wartości czasu), co wynikało ze zbliżonej przepuszczalności badanych gruntów. Porównując analogiczne przypadki z udziałem gruntów C i D opisywanych w literaturze, znacznie różniących się przepuszczalnością (warianty XII–XIV), stwierdzono istotne różnice w czasie wypływu wody na powierzchnię terenu. Jak można było oczekiwać, czas ten był najkrótszy w przypadku całkowitej wymiany gruntu w wykopie, 2-krotnie dłuższy, gdy z piasku była wykonana tylko podsypka i obsypka oraz 4,4-krotnie dłuższy, gdy przewód był ułożony w gruncie rodzimym słabo przepuszczalnym.



Rys. 6. Zależność czasu wypływu wody na powierzchnię terenu od rodzaju gruntu otaczającego uszkodzony wodociąg

Fig. 6. Correlation between the time of water outflow on a soil surface and soil type in which the damaged water pipe is buried

Biorąc pod uwagę miejsce wypływu wody na powierzchnię terenu, wystąpił on bezpośrednio nad miejscem awarii w dziesięciu na czternaście badanych wariantów, z czego pięć stanowiły wypływy punktowe. Wśród pozostałych czterech wariantów w jednym wystąpił wypływ punktowy – na krawędzi wykopu (wariant XI, rys. 3). We wszystkich wariantach wypływ wody wystąpił w obrębie wykopu (tab. 4).

Tabela 4. Zasięg wypływu wody na powierzchnię terenu podczas symulacji awarii rurociągu

Table 4. Water outflow radius in water pipe failure simulation

Numer wariantu	Zasięg, m
I	0
II	0,19
III	0
IV	0
V	0,35
VI	0,19
VII	0
VIII	0,36
IX	0
X	0,52
XI	0
XII	0,36
XIII	0,36
XIV	0,70

Podsumowanie

Badania terenowe wykazały, że czas i miejsce wypływu wody na powierzchnię terenu po wystąpieniu awarii przewodu wodociągowego w znacznym stopniu zależały od parametrów gruntu występującego w sąsiedztwie rurociągu (niekoniecznie bezpośrednim). Badanie tej zależności w warunkach rzeczywistych nie jest łatwe, ponieważ cechy ośrodka gruntowego mogą zmieniać się zarówno w przestrzeni, jak i w czasie, przez co trudno uzyskać powtarzalność warunków doświadczenia.

Alternatywą badań terenowych są symulacje numeryczne. Analizy wykonane w programie FEFLOW v. 5.3, obejmujące czternaście wariantów, wykazały wpływ wszystkich rozpatrywanych parametrów (ciśnienie wody w przewodzie, poziom zwierciadła wody gruntowej i przepuszczalność gruntu) na czas wypływu wody na powierzchnię terenu po pojawieniu się wycieku wody z przewodu, przy czym najmniejsze zmiany tego czasu zaobserwowano przy wzroście ciśnienia w przewodzie. Miejsce wypływu wody we wszystkich rozpatrywanych wariantach znajdowało się w obrębie wykopu i nie zaobserwowano tak wyraźnego wpływu analizowanych parametrów, jak w przypadku czasu. Należy podkreślić, że uzyskane wyniki symulacji numerycznej stanowią pewne przybliżenie i nie odzwierciedlają dokładnie warunków rzeczywistych ze względu na konieczność wprowadzenia założeń upraszczających.

LITERATURA

1. R. PUUST, Z. KAPELAN, D.A. SAVIC, T. KOPPEL: A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal* 2010, Vol. 7, No. 1, pp. 25–45.
2. M. KWIETNIEWSKI: Awaryjność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce w świetle badań eksploatacyjnych. *Mat. konf. „Awaryjne Budowlane”*, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin 2011, t. I, ss. 127–140.

3. M.S. ISLAM, R. SADIQ, M.J. RODRIGUEZ, A. FRANCISQUE, H. NAJJARAN, B. NASER, M. HOORFAR: Evaluating leakage potential in water distribution systems: A fuzzy-based methodology. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA* 2012, Vol. 61, No. 4, pp. 240–252.
4. D. KOWALSKI, B. KOWALSKA, M. KWIETNIEWSKI, A. WDOVIK: Analiza uszkodzeń sieci wodociągowej Lublina w latach 2008–2010. W: W. SAWINIAK, I. ZIMOCZ [red.]: Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody, Politechnika Śląska, Gliwice 2013, vol. 3, ss. 401–412.
5. D. KOWALSKI, K. MISZTA-KRUK: Failure of water supply networks in selected Polish towns based on the field reliability tests. *Engineering Failure Analysis* 2013, Vol. 35, pp. 736–742.
6. M. IWANEK, B. KOWALSKA, D. KOWALSKI, M. KWIETNIEWSKI, K. MISZTA-KRUK, P. MIKOŁAJUK: Wpływ różnych czynników na awaryjność sieci wodociągowej w układzie przestrzennym – studium przypadku. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury* 2015, vol. 32, z. 62, ss. 167–183.
7. M. KUTYŁOWSKA, H. HOTŁOŚ: Failure analysis of water supply system in the Polish city of Głogów. *Engineering Failure Analysis* 2014, Vol. 41, pp. 23–29.
8. T. ŻABA, A. LANGER: Monitoring strat wody elementem ograniczenia kosztów działalności przedsiębiorstwa. *Napędy i sterowanie* 2012, nr 4, ss. 100–103
9. H. HOTŁOŚ: Analiza uszkodzeń i kosztów naprawy przewodów wodociągowych w okresie zimowym. *Ochrona Środowiska* 2009, vol. 31, nr 2, ss. 41–48.
10. V.P. KHOMENKO: Suffosion hazard: today's and tomorrow's problem for cities. In: M.G. CULSHAW, H.J. REEVES, I. JEFFERSON, T.W. SPINK [Eds.]: *Engineering Geology for Tomorrow's Cities*. Geological Society, Engineering Geology Special Publication, London 2009.
11. D. KOWALSKI, K. JAROMIN: Metoda wyznaczenia zasięgu strefy ochrony wodociągowych przewodów tranzytowych. *Proceedings of ECOpole* 2010, vol. 4, nr 2, ss. 419–424.
12. M. IWANEK, D. KOWALSKI, B. KOWALSKA, E. HAWRYLUK, K. KONDRACIUK: Experimental investigations of zones of leakage from damaged water network pipes. In: C.A. BREBBIA, S. MAMBRETTI [Eds.]: *Urban Water II*, WIT Press Southampton, Boston 2014, pp. 257–268.
13. M. IWANEK: Zjawisko sufozji jako skutek awarii infrastruktury wodociągowej lub kanalizacyjnej. Przegląd literatury. W: K. KUŚ, F. PIECHURSKI [red.]: *Nowe Technologie w Sieciach i Instalacjach Wodociągowych i Kanalizacyjnych*, Politechnika Śląska, Gliwice 2014, ss. 57–78.
14. F.G. PIECHURSKI: Urządzenia do wyszukiwania wycieków. *Wodociągi-Kanalizacja* 2013, nr 4, ss. 40; 42–45.
15. M. ROMANO, Z. KAPELAN: Geostatistical techniques for approximate location of pipe burst events in water distribution systems. *Journal of Hydroinformatics* 2013, No. 15, No. 3, pp. 634–635.
16. M. FARLEY, S. TROW: *Losses in water distribution networks: A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control*. IWA Publishing, London 2003.
17. S. SPERUDA: Aktywna kontrola wycieków a szybkość napraw. *Wodociągi-Kanalizacja* 2005, nr 7–8, pp. 16–17.
18. X. DELGADO-GALVÁN, R. PÉREZ-GARCÍA, J. IZQUIERDO, J. MORA-RODRÍGUEZ: An analytic hierarchy process for assessing externalities in water leakage management. *Mathematical and Computer Modelling* 2010, Vol. 52, No 7, pp. 1194–1202.
19. F.G. PIECHURSKI: Wykorzystanie monitoringu sieci wodociągowej do obniżenia poziomu strat wody. *Napędy i Sterowanie* 2013, vol. 15, nr 2, ss. 66–71.
20. F.G. PIECHURSKI: Efekty wdrożenia monitoringu i zarządzania ciśnieniem w sieci dystrybucji wody. *Instal* 2015, nr 10, ss. 65–71.
21. PN-B-04481:1988 – Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu.
22. K. TWARDOWSKI, R. DROŻDŻAK: Pośrednie metody oceny właściwości filtracyjnych gruntów. *Wiertnictwo Nafta Gaz* 2006, t. 23, z. 1, ss. 477–486.
23. M.T. van GENUCHTEN: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 1980, Vol. 44, pp. 892–898.
24. M.R. KIRKLAND, R.G. HILLS, P.J. WIERENGA: Algorithms for solving Richards' equation for variably saturated soils. *Water Resources Research* 1992, Vol. 28, No. 8, pp. 2049–2058.

Iwanek, M., Kowalski, D., Kwietniewski, M. Model Studies of a Water Outflow from an Underground Pipeline upon its Failure. *Ochrona Środowiska* 2015, Vol. 37, No. 4, pp. 13–17.

Abstract: Water pipe failures and leakages result not only in water and financial losses but also cause danger to personal and property safety due to possible soil suffusion. Thus, water corporations attempt to establish protection zones in vicinity of the pipes. At present, there are no standards that would determine the size of such zones. An analysis of the influence of selected parameters (hydraulic pressure in a water pipe, water table and soil hydraulic conductivity) on water outflow time and location during an underground water pipe failure was presented. Numerical

simulation analysis of the 14 variants of a pipe failure, conducted using the FEFLOW v. 5.3 software, indicated influence of all the considered parameters. That influence was more pronounced with reference to the time of water outflow than to its place (within the trench in all the variants considered). The simulation results were empirically verified on the basis of the water outflow time in the controlled water pipe failure scenario under the actual conditions. It should be emphasized that obtained numerical simulation results are an approximation only and do not reflect the actual conditions due to some simplifying assumptions.

Keywords: Water supply system, hydraulic parameters, pipe failure, modeling, safety.