

Matematyczny opis zjawiska eksfiltracji ścieków z nieszczelnych przewodów kanalizacyjnych do gruntu

Mathematical description of the phenomenon of exfiltration of sewage from leaking sewage pipes into the ground

BARTOSZ SZELĄG, JUSTYNA LISOWSKA

DOI 10.36119/15.2022.12.10

Eksfiltracja jest zjawiskiem niekorzystnym i może powodować zrzuty patogenów na tereny mieszkalne (zurbanizowane), powodować przekroczenia standardów jakości wody i/lub stwarzać zagrożenie dla zdrowia ludzi mieszkających w sąsiedztwie zanieczyszczonych ściekami jezior i rzek. Ścieki pochodzące z eksfiltracji zawierają duże ilości zawieszin, mikroorganizmów chorobotwórczych, zanieczyszczeń toksycznych, związków organicznych, olejów i tłuszczów. Podejrzewa się, że w skali kraju występuje znaczna eksfiltracja ścieków z systemów kanalizacyjnych do gruntu i wód gruntowych, ale istnieje niewiele opublikowanych dowodów na istnienie tego problemu.

W artykule podjęto próbę opracowania modelu matematycznego zjawiska eksfiltracji ścieków. Zaprezentowane przez autorów inżynierskie narzędzie do matematycznego opisu strumienia eksfiltrujących ścieków z pustki powstałej w gruncie spoistym do gruntu i wód gruntowych pozwala na oszacowanie objętości strumienia eksfiltrujących ścieków. Dalsze prace przewidują weryfikację otrzymanej zależności za pomocą symulatorów numerycznych (HYDRUS, FEFLOW) i potencjalną modyfikację opisaną w niniejszej pracy metody.

Słowa kluczowe: kanalizacja sanitarna, eksfiltracja ścieków, nieszczelność, hydraulika przepływu

Exfiltration is an unfavorable phenomenon and can cause discharges of pathogens into residential areas (urbanized areas), cause water quality standards to be exceeded and/or pose health risks to people living in the vicinity of sewage-polluted lakes and rivers. Exfiltration wastewater contains large amounts of suspended solids, pathogenic microorganisms, toxic pollutants, organic compounds, oils and fats. It is suspected that on a national scale there is significant exfiltration of wastewater from sewage systems into the ground and groundwater but there is little published evidence of this problem.

This paper attempts to develop a mathematical model of the phenomenon of wastewater exfiltration. The engineering tool presented by the authors for the mathematical description of the flux of exfiltrating wastewater from the void formed in cohesive soil into the ground and groundwater allows estimating the volume of the flux of exfiltrating wastewater.

Further work envisages verification of the obtained relationship using numerical simulators (HYDRUS, FEFLOW) and potential modification of the method given in this paper

Keywords: sanitary sewers, sewage exfiltration, leakage, flow hydraulics

Wprowadzenie

Podstawą poprawnego funkcjonowania systemów kanalizacyjnych transportujących ścieki bytowo – gospodarcze z miejsca ich powstawania do miejsca odbioru tj. oczyszczalni ścieków jest ich szczelność. Brak szczelności w systemach kanalizacyjnych spowodowany wieloma czynnikami, skutkuje występowaniem negatywnych zjawisk między innymi, takich jak infiltracja wód gruntowych do wnętrza nieszczelnych przewodów kanalizacyjnych oraz eksfiltracja ścieków z nieszczelnych przewodów kanalizacyjnych do gruntu. Przyczyny oraz skutki zjawiska infiltracji opisane zostały w wielu publikacjach m.in. w [1 – 7],

[24-25], natomiast w przypadku eksfiltracji dane literaturowe są nadal niewystarczające. Mimo iż podejrzewa się, że w skali kraju występuje znaczna eksfiltracja ścieków z przewodów kanalizacyjnych do gruntu i wód gruntowych, to istnieje niewiele opublikowanych dowodów na istnienie tego problemu.

Podkreślić należy fakt, iż eksfiltracja może powodować zrzuty patogenów na tereny mieszkalne (zurbanizowane), powodować przekroczenia standardów jakości wody [9] i/lub stwarzać zagrożenie dla zdrowia ludzi mieszkających w sąsiedztwie jezior czy rzek oraz zagrażać życiu organizmów wodnych i ich siedliskom, zaburzać funkcjonowanie systemów wodociągowych w całym kraju

posadowionych w bezpośrednim sąsiedztwie nieszczelnych systemów kanalizacyjnych [8].

W artykule podjęto próbę opisu matematycznego zjawiska eksfiltracji. Artykuł stanowi punkt wyjścia do dalszych analiz i opracowania bardziej złożonych modeli opisujących rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń pochodzących ze ścieków w otoczeniu nieszczelnych systemów kanalizacyjnych.

Matematyczny opis zjawiska eksfiltracji ścieków z nieszczelnych przewodów kanalizacyjnych

Występowanie zjawiska eksfiltracji ścieków jest procesem złożonym i zależnym od

wielu czynników (zmiennych) m.in. rodzaju gruntu, poziomu wód gruntowych w otoczeniu przewodów, materiału konstrukcyjnego przewodów, wielkości szczeliny (nieszczelności) i jej lokalizacji.

Założenia

W przykładzie analizie poddano przypadek przewodu kanalizacyjnego posadowionego w gruncie spoiwym, kiedy to pod przewodem tworzy się pustka powietrzna. Pustki powstałe w otoczeniu nie szczelności stanowią zagrożenie nie tylko dla samej konstrukcji przewodu, ale niejednokrotnie prowadzą do katastrof budowlanych i ekologicznych. Wyciekające z przewodów kanalizacyjnych zanieczyszczenia powodują skażenie gruntu i wód gruntowych wokół nie szczelności. Przypadek powyższy występujący na granicy dwóch faz (powierzchnia kanału i ośrodek gruntowy) jest bardzo skomplikowany i wymaga rozwiązania równania różniczkowego Laplace'a opisującego układ linii potencjału i prądu [10]. Liczne dane literaturowe na temat szczegółowego rozwiązania powyższego równania można znaleźć w pracy [15]. Opracowano również wiele innych metod służących do określania wielkości eksfiltracji. Jednymi z najczęściej stosowanych jest równanie Darcy, Hortona opisane w [12], lub Greena – Ampta [13], [14]. Wadą dwóch pierwszych równań jest fakt, iż nie uwzględniają poziomu wody na powierzchni, z której ścieki infiltrują do gruntu. W większości rozważań praktycznych w równaniu Greena – Ampta poziom ścieków jest również pomijany, przy czym modyfikacja opracowana przez Osmana Akana daje możliwość uwzględnienia tego czynnika.

Mając na względzie powyższe uwagi w artykule podjęto próbę matematycznego opisu zmienności ilości ścieków eksfiltrujących z przewodu do pustki powietrznej powstałej w otoczeniu nie szczelności. Ilość ścieków trafiających do pustki a następnie do gruntu opisano równaniem Darcy. W celu prezentacji opracowanej metodyki wykonano również przykład obliczeniowy.

Przykład obliczeniowy

W analizach przyjęto, że powstała pustka na kształt kuli (rys. 1), z której ścieki eksfiltrują następnie do gruntu. Ilość ścieków dostających się do gruntu opisano równaniem Darcy o postaci:

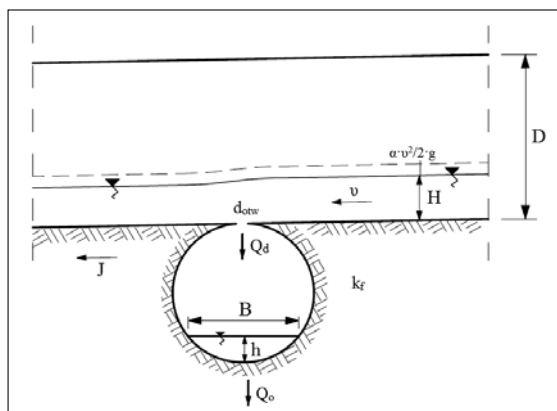
$$Q_o = k_f \cdot A \cdot l = \pi \cdot k \cdot D \cdot h \cdot l \quad (1)$$

gdzie:

- A – pole powierzchni zwilżonej pustki,
- h – napętnienie pustki,
- D – średnica pustki w kształcie kuli,
- k_f – współczynnik filtracji,
- l – spadek hydrauliczny wyrażony różnicą wysokości słupów wody lub różnicą ciśnień na drodze przepływu

Z tego powodu, że wartość współczynnika filtracji w gruntach spoiwych nie jest możliwa do precyzyjnego ustalenia i przyjęcia stałej wartości, w związku z tym w powyższych analizach przyjęto, że wartość k może się zmieniać i dlatego też ma charakter sto-

Rys. 1. Schemat hydrauliczny pustki powietrznej przyjęty do obliczeń



chastyczny. W analizach wykonano obliczenia dla kilku wariantów współczynnika filtracji (k), w celu wykazania wpływu warunków gruntowych na ilość eksfiltrujących ścieków.

Ilość ścieków dopływających do pustki z nie szczelnego kanału wyrażono jako wydatek małego otworu niezatopionego i opisano równaniem:

$$Q_d = \mu \cdot \pi \cdot d_{otw}^2 / 4 \cdot (2 \cdot g \cdot H + \alpha \cdot v^2 \cdot (2 \cdot g)^{-1})^{0,50} \quad (2)$$

w którym:

- d_{otw} – średnica otworu w dnie kanału,
- H – napętnienie kanału,
- v – prędkość przepływu w kanale,
- α – współczynnik Saint Venanta,
- μ – współczynnik wydatku.

Do opisu zmienności napętniania pustki zastosowano równanie bilansu objętości ścieków o postaci [14]:

$$Q_d(t) - Q_o(t) = \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

w którym:

- $Q_d(t)$ – natężenie odpływu ścieków z pustki powietrznej,
- dh – zmiana napętnienia pustki powietrznej w czasie dt,
- $Q_o(t)$ – natężenie dopływu ścieków do pustki powietrznej,
- dV – zmiana objętości ścieków w czasie dt zakumulowanych w pustce powietrznej określanej następująco:

$$dV = \frac{\pi \cdot B^2}{4} \cdot dh = (h \cdot D - h^2) \cdot dh \quad (4)$$

gdzie:

- B – szerokość zwierciadła ścieków szczeliny wg rysunku 1,
- dh = $h_2 - h_1$ – zmiana napętnienia pustki powietrznej w czasie dt.

Szerokość zwierciadła ścieków w szczelinie (B) wzór (4) jest wartością zmienną w czasie (dt) i wyznaczona zgodnie z literaturą branżową [23]. W równaniu (3) można przyjąć 3 etapy przebiegu zmienności napętnienia w pustce powietrznej. Pierwszy etap, w którym odbywa się napętnianie ($Q_o \neq \text{const}$), drugi podczas którego pustka jest całkowicie wypełniona i ilość eksfiltrujących ścieków jest stała ($Q_o = \text{const}$) oraz trzeci etap, w trakcie którego pustka powietrzna jest opróżniana ($Q_d = 0$). Podstawiając do (3) powyższe zależności uzyskuje się:

$$Q_d(t) - \pi \cdot k \cdot D \cdot h \cdot l = \pi \cdot (h \cdot D - h^2) \cdot \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

Rozdzielając zmienne w równaniu (4) oraz przyjmując wartość $H = \text{const}$ dla poszczególnych kroków dt można zapisać równanie w postaci:

$$dt = \frac{\pi \cdot (h \cdot D - h^2)}{Q_d - \pi \cdot k \cdot D \cdot h \cdot l} \cdot dh \quad (6)$$

Równanie różniczkowe (6) wyraża zmienność napętnienia pustki powietrznej w fazie jej napętniania. Dla całkowicie wypełnionej pustki można zapisać, że $h = D = \text{const}$. Z kolei gdy pustka jest opróżniana równanie różniczkowe (5) przekształca się następująco:

$$dt = \frac{h^2 - h \cdot D}{k \cdot D \cdot h \cdot l} \cdot dh \quad (7)$$

W równaniu (7) dokonując odpowiednich przekształceń oraz całkując uzyskane ułamki proste otrzymuje się zależność w postaci:

$$\frac{c \cdot h \cdot (-\pi \cdot D \cdot c + c \cdot h + 2 \cdot Q_d) + 2 \cdot Q_d \cdot (Q_d - \pi \cdot c) \cdot \log(c \cdot h - Q_d)}{\pi \cdot k \cdot D} \Big|_{h_1}^{h_2} = t_2 - t_1 \quad (8)$$

w którym:

- c – parametr pomocniczy określany ze wzoru $c = \pi \cdot k \cdot D \cdot l$.

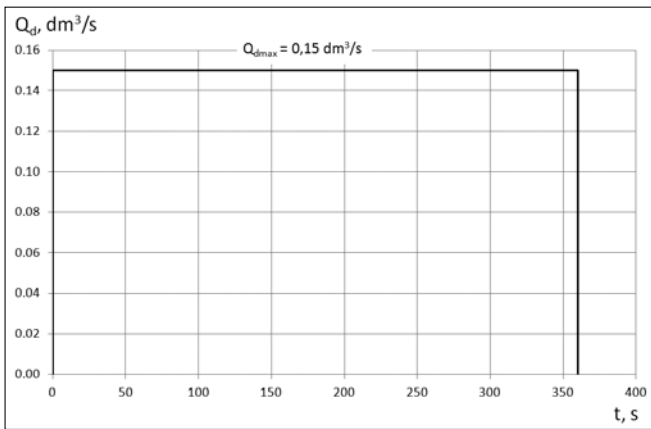
W równaniach (6) i (8) ze względu na to, że wartość Q_d tj. ilość ścieków dopływająca do otworu (nie szczelności) zmienia się w czasie dlatego też w analizach należy przyjmować taką wartość $t_2 - t_1$ aby $Q_d(t_1) \approx Q_d(t_2)$.

W równaniu (7) wykonując dzielenie licznika i mianownika po scałkowaniu uzyskuje się zależność:

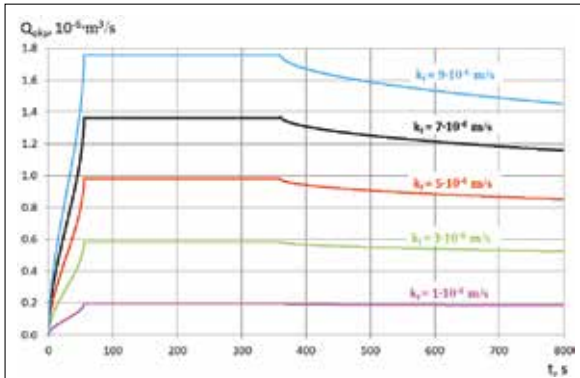
$$\frac{h^2}{2 \cdot k \cdot D} - \frac{h}{k} \Big|_{h_1}^{h_2} = t_2 - t_1 \quad (9)$$

Do rozwiązania równań różniczkowych (6) i (7) można zastosować również metody numeryczne (Rungego Kutty IV rzędu, Eulera, Adama – Bosfortha [16]).

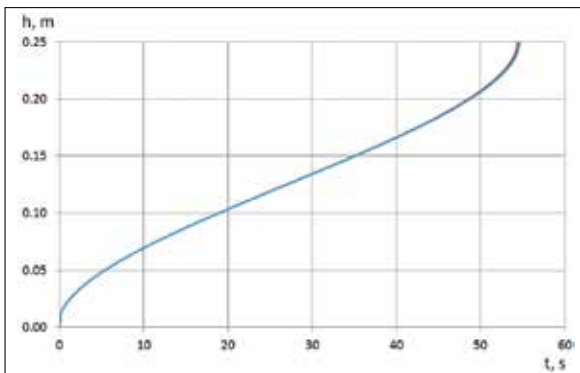
W celu prezentacji graficznej powyższego modelu wykonano przykład obliczeniowy. Przyjęto w nim, że ilość ścieków dopływająca do pustej szczeliny o średnicy $D = 0,25m$ opisano hydrogramem dopływu (rys. 2).



Rys. 2.
Dopływ (Q_d) ilości ścieków w czasie t do szczeliny w dnie kanału



Rys. 3.
Wykresy zależności ilości ścieków eksfiltrujących (Q_{eks}) do gruntu a powierzchnię szczeliny dla różnych wartości współczynników filtracji (k_f)



Rys. 4.
Zmiana napelnienia pustki o średnicy D dla przyjętego dopływu $Q_d = f(t)$ i różnych wartości współczynników filtracji (k_f)

W analizach rozpatrzono 5 różnych wartości współczynnika filtracji $k_f = 1 \cdot 10^{-6}$ m/s, $k_f = 3 \cdot 10^{-6}$ m/s, $k_f = 5 \cdot 10^{-6}$ m/s, $k_f = 7 \cdot 10^{-6}$ m/s i $k_f = 9 \cdot 10^{-6}$ m/s; wyniki obliczeń zobrazowano na rysunku 3.

Podsumowanie

W artykule wykazano, że opracowany model matematyczny zjawiska eksfiltracji ścieków z nieszczelnych przewodów do gruntu i wód gruntowych pozwala na modelowanie zjawiska w różnych rodzajach gruntów (dla różnych wartości współczynnika filtracji). Z uwagi na dynamiczny charakter zjawiska eksfiltracji, analiza wymagała przyjęcia licznych założeń uproszczających. Dalsze prace przewidują weryfikację otrzymanych zależności za pomocą symulatorów numerycznych (HYDRUS, FEFLOW) i potencjalną modyfikację opisaną w artykule metody.

LITERATURA

[1] Kaczor G, Przebinda Analiza uszkodzeń kanałów sanitarnych z różnych materiałów w aspekcie potencjalnego zanieczyszczenia

wód gruntowych; Gaz Woda i Technika Sanitarna, 2009, nr 9, 28-29,
[2] Lisowska J, Szela B Hydrauliczny aspekt zjawiska infiltracji wód gruntowych do wnętrza przewodów kanalizacyjnych, Instal. Zeszyt 12, Strony 103-108; 2014
[3] Kuliczkowski A., Lisowska J., Propozycje klasyfikacji zjawiska infiltracji wody gruntowej do wnętrza nieszczelnych przewodów kanalizacyjnych. Instal. Zeszyt: 12, Strony: 50-54; 2004.
[4] Kuliczkowski A., Lisowska J., Szczelność przewodów kanalizacyjnych. Wymagania normowe. Czasopismo: Rynek Instalacyjny; Zeszyt: 11, Strony: 75-78; 2000.
[5] Kuliczkowski A., Lisowska J., Nieprawidłowości hydrauliczne w kanałach badanych techniką video; Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe NTTB, 2002, nr 3., s.30-33
[6] Dąbrowski W: Oddziaływanie sieci kanalizacyjnych na środowisko, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 200, str.217
[7] Kuliczkowski A, Kuliczowska E: Katastrofy kanalizacyjne i ich przyczyny; Przegląd budowlany nr 3, 2008 s. 31-34
[8] Amick S Robert and Burgess Edward: Exfiltration in sewer system, EPA United States Environmental Protection Agency 2003.
[9] PN-EN 15975-2: 2013 – 12 Bezpieczeństwo zaopatrzenia w wodę do spożycia Wytyczne

dotyczące zarządzania kryzysowego i ryzyka – Część 2: Zarządzanie ryzykiem
[10] Folczyńska, Karolina Łobos Ewa Zastosowanie transformacji Laplace'a do rozwiązywania pewnych równań różniczkowych zwyczajnych MINUT [online], ISSN, e-ISSN 2719-3063; nr 1,2019 s 42-55
[11] Raczynski A, Równania różniczkowe (A1) Skrypt dla studentów, Wrocław 2010
[12] Rossman L.A. Storm Water Management Model. User's Manual. Version 5.0. Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio U.S. Environmental Protection Agency. EPA/600/R-50/040; 2010
[13] Gądek W. Matematyczny model odpływu ze zlewni z zastosowaniem zdekomponowanej przestrzennie siatki obliczeniowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej. Wydawnictwo PK, Kraków; 2010
[14] Akan O. A. i Houghtalen R. Urban Hydrology, Hydraulics and Stormwater Quality, Engineering Applications and Computer Modeling, John Wiley & Sons; 2003
[15] Dziopak J. Model matematyczny zbiornika retencyjnego kanalizacji deszczowej, Monografia 31, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 1984,
[16] Szymkiewicz R. : Metody numeryczne w inżynierii wodnej. Wydanie I. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk. 2012.
[17] Błaziejewski R, Buczkowski W., Matz R., Fryska M., 2010, Ocena stanu technicznego i potrzeb renowacji kanałów ogólnospławnych i ściekowych m. Poznań, Gaz Woda i Technika Sanitarna, nr 2,15-18 bwmeta1.element.bazatech-article-BPP2-0015-0026.
[18] Błaziejewski R. Kanalizacja wsi. PZITS Oddz. Wielkopolski, Poznań 2003 str. 113,
[19] Kuliczkowski A, Zwierzchowski D; Kania M; Nieprawidłowości hydrauliczno – eksploatacyjne kanałów badanych technika video, Gaz Woda i Technika Sanitarna; 2004, nr 1, 24-27
[20] Lisowska J: Zjawisko infiltracji wód gruntowych do wnętrza nieszczelnych przewodów kanalizacyjnych w aspekcie ekonomicznym. Materiały konferencyjne V Regionalnej Konferencji Firm Wodociągowych, Komunalnych i Projektowych woj. świętokrzyskiego i lubelskiego pt.: Ekonomiczne i praktyczne ujęcie stosowania nowych technologii, systemów i urządzeń w branży wodno-kanalizacyjnej, 2019;
[21] Kuliczowska E Wyniki badań nowo wybudowanych przewodów kanalizacyjnych z rur PVC, Gaz Woda i Technika Sanitarna, 2005, nr 10, 16-20,
[22] Raganowicz A, Dziopak J, Statystyczna prognoza stanu technicznego kamionkowej kanalizacji sanitarnej w Unterhaching, Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury, nr XXXIII(63),399-412,DOI 10.7862/rb.2016.174,
[23] Kisiel A; Poradnik hydromechanika i hydrotechnika; Wydanie trzecie poprawione Częstochowa 2008 r., stron 229
[24] Przybyła B; Diagnostyka eksploatowanych przewodów kanalizacyjnych jako czynnik ograniczający skażenie wód gruntowych; XX JUBILEUSZOWA-KRAJOWA, VIII MIĘDZY-NARODOWA KONFERENCJA NAUKOWO – TECHNICZNA „ZAOPATRZENIE W WODĘ, JAKOŚĆ OCHRONA WÓD” POLAND; 15-18 JUNE 2008;
[25] KRUKOWSKI I, WIDOMSKI M, IWANEK M ŁAGÓD G; PROCES EKSFILTRACJI Z PRZEWODÓW KANALIZACYJNYCH A ROZ-PRZESTRZENIANIE SIĘ WYBRANYCH ZANIECZYSZCZEŃ – BADAŃIA MODELOWE; Proceedings of ECOpole; Vol. 4, No. 2; 2010; str. 425 – 431