AUTOREFERAT

dotyczący osiągnięcia naukowego, stanowiącego przedmiot postępowania habilitacyjnego

dr inż. Emilia Kuliczkowska
Wydział Inżynierii Środowiska,
Geomatyki i Energetyki
Politechnika Świętokrzyska

1. INFORMACJE OGÓLNE

1.1. Imię i nazwisko

Emilia Kuliczkowska

1.2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

16.04.1981r. – tytuł zawodowy – *magister inżynier budownictwa rolniczego, specjalność: budownictwo sanitarne*. Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Wydział Melioracji Wodnych, Oddział Budownictwa Rolniczego. Temat pracy dyplomowej: *Modernizacja oczyszczalni ścieków w miejscowości Bęsia*. Opiekun pracy – prof. dr hab. inż. Henryk Mańczak.

26.09.2007r. – stopień naukowy – *doktor nauk technicznych w dyscyplinie: inżynieria środowiska, w specjalności: inżynieria komunalna.* Temat rozprawy doktorskiej: *Kryteria planowania bezwykopowej odnowy nie przełazowych przewodów kanalizacyjnych.* Promotor – prof. dr hab. inż. Wojciech Dąbrowski.

1.3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu

08.06.1981 do 30.11.1982	–	Przedsiębiorstwo Usług Remontowo-Budowlanych w Wałbrzychu, stanowisko: stażysta i asystent projektanta.
01.12.1982 do 30.11.1983	–	Przedsiębiorstwo Budownictwa Komunalnego Nr 1 w Wałbrzychu, stanowisko: specjalista do spraw technicznych.
01.12.1983 do 14.02.1990	–	Wojewódzkie Biuro Projektów we Wrocławiu, stanowisko: asystent projektanta.
15.02.1990 do 30.09.1991	–	Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, stanowisko: asystent.
15.02.1992 do 28.02.1995	–	Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, stanowisko: asystent, w tym 3-letni urlop wychowawczy.
01.03.1995 do 31.05.1997	–	RenoRurCentrum Sp. z o.o. w Kielcach, stanowisko: pracownik techniczny.

Ec

01.06.1997 do 30.09.2001	–	EKO-Inżynieria w Kielcach – samodzielna działalność gospodarcza.
01.10.2001 do 30.09.2007	–	Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, stanowisko: asystent.
od 01.10.2007		Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, stanowisko: adiunkt.

2. OSIĄGNIĘCIE NAUKOWE STANOWIĄCE PRZEDMIOT POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO

2.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Metoda wyznaczania ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych z analizą i uwzględnieniem w niej wszystkich możliwych uszkodzeń, łącznie z uszkodzeniami występującymi tylko w rurach lepkosprężystych, oraz jej adaptacja do wyznaczania ryzyka zapadnięć nawierzchni drogowych spowodowanych uszkodzeniami przewodów kanalizacyjnych.

2.2. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

[1] Kuliczkowska E., Zwierzchowska A., 2016, A qualitative analysis of early defects present in PVC-U sewers but not observed in rigid pipes, Tunnelling and Underground Space Technology, 56, 202-210, (35 pkt, IF 2014 = 1.490). *Mój udział procentowy szacuję na 80%.*

[2] Kuliczkowska E., Gierczak M., 2013, Buckling failure numerical analysis of HDPE pipes used for the trenchless rehabilitation of a reinforced concrete sewer, Engineering Failure Analysis, 32, 106-112, (30 pkt., IF 2013 = 1,130). *Mój udział procentowy szacuję na 75%.*

[3] Kuliczkowska E., 2015, Influence of PVC pipe deflection on the thickness of CIPP rehabilitation liners, Underground Infrastructure of Urban Areas 3, Madryas et al. (Eds), Taylor & Francis Group, London, 63-72, (7 pkt.)

[4] Kuliczkowska E., 2015, Prognozowany a rzeczywisty stan techniczny XIX. wiecznych kamionkowych przewodów kanalizacyjnych, Instal, 9, 74-79, (7 pkt.)

[5] Kuliczkowska E., 2015, Analysis of defects with a proposal of the method of establishing structural failure probability categories for concrete sewers, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 15 (4), 1078–1084, (30 pkt., IF 2014 = 1.793)

[6] Kuliczkowska E., 2016, Risk of structural failure in concrete sewers due to internal corrosion, Engineering Failure Analysis, 66, 110-119, (30 pkt., IF 2014 = 1.028)

E

[7] Kuliczkowska E., The interaction between road traffic safety and the condition of sewers laid under roads, Transportation Research Part D: Transport and Environment, artykuł na etapie uzyskania pozytywnych recenzji dołączonych do publikacji, (35 pkt., IF 2014 = 1.937)

2.3. Naukowy cel pracy, jej zakres, uzyskane wyniki i propozycja wdrożenia zaproponowanej metody

2.3.1. Naukowy cel pracy

Sformułowano następujące cztery cele naukowe pracy:

- dokonanie jakościowej i ilościowej analizy uszkodzeń występujących w przewodach kanalizacyjnych o konstrukcjach lepkosprężystych, wykonanych z rur PVC i PE-HD, ze szczególnym uwzględnieniem tych uszkodzeń, które nie występują w rurach o konstrukcji sztywnej,
- ustalenie, czy w metodzie wyznaczania ryzyka awarii konstrukcyjnej przewodów kanalizacyjnych należy uwzględniać ich wiek,
- opracowanie metody wyznaczania kategorii prawdopodobieństwa wystąpienia awarii konstrukcyjnej przewodów kanalizacyjnych, kategorii konsekwencji awarii oraz metody wyznaczania ryzyka awarii,
- dokonanie adaptacji opracowanej metody wyznaczania ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych do wyznaczania ryzyka zapadania się nawierzchni ulicznych spowodowanego wystąpieniem uszkodzeń przewodów kanalizacyjnych z uwzględnieniem w niej także uszkodzeń występujących w rurach o konstrukcjach lepkosprężystych.

2.3.2. Zakres pracy stanowiącej znaczny wkład autorki w rozwój nowo powstającej dyscypliny – inżynierii bezwykopowej, tworzonej na pograniczu dyscyplin: budownictwo oraz inżynieria środowiska

Osiągnięcie naukowe, którym jest metoda wyznaczania ryzyka przewodów kanalizacyjnych, uwzględniająca uszkodzenia występujące zarówno w rurach o konstrukcjach sztywnych, jak i lepkosprężystych, zestawione zostało w siedmiu publikacjach dołączonych do wniosku.

Publikacje [1-3] dotyczą analizy uszkodzeń początkowych występujących w rurach lepkosprężystych. Okres stosowania tych rur jest kilkakrotnie krótszy od okresu stosowania rur wykonywanych z materiałów tradycyjnych, takich jak beton czy kamionka, a także krótszy niż

Eg

prognozowany okres ich eksploatacji. Ciągle brak jest wielu danych dotyczących pogarszania się ich stanu technicznego w funkcji czasu. W normie europejskiej PN-EN 13508-1 i amerykańskich wytycznych Nassco's PACP nie ujęto uszkodzeń charakterystycznych dla rur wykonanych z materiałów lepkosprężystych (coraz częściej obecnie stosowanych do budowy sieci kanalizacyjnych), takich jak: lokalne wgniecenia i utrata stateczności powłoki. W wielu zaleceniach występują także znaczące rozbieżności dotyczące oceny wpływu ugięć tych rur na klasyfikowanie ich do określonych klas stanu technicznego. Fakty te stanowiły inspirację dla autorki do dokonania w [1-3] szczegółowych analiz tych uszkodzeń. Zostały one wykonane dla najczęściej stosowanych obecnie lepkosprężystych rur PVC i PE-HD. Efektem tych analiz było zaproponowanie w [1,3] zasad klasyfikowania analizowanych uszkodzeń do pięciu klas, określających kategorie prawdopodobieństwa awarii przewodów kanalizacyjnych, spowodowanych wystąpieniem tych uszkodzeń. Kategorie te są niezbędne do wyznaczania ryzyka wystąpienia awarii rur.

Wyniki badań i analiz podane w publikacjach [1-3] umożliwiły włączenie do zaproponowanej w [7] metody wyznaczania ryzyka awarii nawierzchni ulicznych spowodowanych uszkodzeniami rur kanalizacyjnych, uszkodzeń typowych tylko dla rur lepkosprężystych.

W publikacji [4] rozstrzygnięto kontrowersyjny problem, czy należy uwzględniać wiek kanału w planowaniu odnowy przewodów kanalizacyjnych. Rozstrzygnięcie to uwzględniono w zaproponowanych w [6,7] metodach wyznaczania ryzyka, poprzez pominięcie wieku kanału w macierzy konsekwencji awarii. Decyzję tę podjęto bazując na analizach wykonanych w kraju w 2015r. badań CCTV najstarszej z dotychczas badanych na świecie populacji rur kamionkowych o przedziale wiekowym 121-142 lata. Zawarte w [4], a następnie powtórzone w [1] uzasadnienie pominięcia wieku rur potwierdza tezę, już wcześniej sformułowaną i udowodnioną na Uniwersytecie Waterloo w Kanadzie w oparciu o wyniki badań rur kamionkowych eksploatowanych do 110 lat, że ich wiek nie ma wpływu na pogarszanie się ich stanu technicznego.

Racjonalne zarządzanie ryzykiem awarii przewodów kanalizacyjnych wymaga w pierwszej kolejności dokonania analizy ryzyka, obejmującej identyfikację zagrożeń (stanowią one przedmiot wszystkich publikacji tworzących osiągnięcie naukowe) oraz konsekwencji ich wystąpienia [6,7], a w dalszej kolejności wyznaczania wielkości ryzyka [6,7].

Zaproponowana metoda wyznaczania ryzyka została opracowana w oparciu o studia literaturowe i własne analizy stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych zbadanych

techniką CCTV, głównie przez Politechnikę Świętokrzyską. Zawiera ona metodę ustalania kategorii prawdopodobieństwa awarii przewodów kanalizacyjnych [5,6,7], a także metodę ustalania kategorii konsekwencji awarii [6,7]. Zaproponowana w [6] metoda umożliwia wyznaczanie ryzyka awarii konstrukcyjnej przewodów kanalizacyjnych. Dzięki ustaleniu wartości numerycznych w zaproponowanych macierzach kategorii prawdopodobieństwa i konsekwencji awarii, możliwe jest jej wdrożenie, umożliwiające efektywne zarządzanie stanem technicznym przewodów kanalizacyjnych w zakresie planowania ich bezwykopowej odnowy.

W publikacji [7] zaadaptowano metodę zaproponowaną w [6] do wyznaczania ryzyka zapadnięć nawierzchni ulicznych, uwzględniając w niej wszystkie te uszkodzenia przewodów kanalizacyjnych, łącznie z uszkodzeniami występującymi tylko w rurach z materiałów lepkosprężystych, które mają wpływ na zapadanie się nawierzchni ulicznych.

2.3.3. Definicje podstawowych pojęć

Ryzyko. Ryzyko jest ważną miarą i podstawowym wskaźnikiem bezpieczeństwa wywodzącym się z teorii niezawodności i bezpieczeństwa systemów. Jest ono pojęciem wieloznacznym i różnie definiowanym. Jako definicję miary ryzyka awarii, w odniesieniu do eksploatowanych przewodów kanalizacyjnych, przyjęto iloczyn miary prawdopodobieństwa wystąpienia awarii, spowodowanych wystąpieniem i-tych uszkodzeń i miary j-tych konsekwencji spowodowanych ich zaistnieniem.

Awaria. Awarią nazwano wystąpienie w przewodzie kanalizacyjnym i-tego uszkodzenia o wielkości kwalifikującej go do jednej z zaproponowanych pięciu kategorii prawdopodobieństwa wystąpienia awarii.

Odnowa. Odnową nazwano proces przejścia przewodu kanalizacyjnego, należącego do grupy obiektów naprawialnych, ze stanu częściowej bądź całkowitej niezdolności funkcjonalnej (konstrukcyjnej lub eksploatacyjnej) w stan zdolności funkcjonalnej, w którym spełnia on wymogi nowo budowanego przewodu. Dokonuje się jej poprzez wymianę wykopową przewodu na nowy lub poprzez zastosowanie bezwykopowych technologii napraw, rehabilitacji lub wymian.

2.3.4. Uzyskane wyniki

Najistotniejszym osiągnięciem zaprezentowanym w publikacji [1] jest dokonanie, w oparciu o wykonane badania CCTV, analizy jakościowej i ilościowej uszkodzeń początkowych

występujących w lepkosprężystych rurach PVC, ze szczególnym uwzględnieniem tych uszkodzeń, które nie występują w powszechnie stosowanych dotychczas rurach betonowych i kamionkowych o konstrukcji sztywnej. Należą do nich: utrata stateczności powłoki, lokalne wgniecenia ścian rur i ponadnormatywne ugięcia. Wskazano, że dotychczas stosowane modele do prognozowania pogarszania się stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych, zarówno deterministyczne, jak i wielomianowe, statystyczne (np. model Markowa) czy sztucznej inteligencji (np. bazujące na sieciach neuronowych), nie są wdrażane z powodu braku danych dotyczących stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych. Dane takie, dotyczące stanu technicznego ponad 11 km przewodów kanalizacyjnych wykonanych z rur PVC zamieszczono w [1]. Dokonano identyfikacji rodzaju uszkodzeń, ich wielkości oraz częstotliwości występowania. W przypadku pozyskania danych z większej populacji rur, także z innych krajów, mogą one umożliwić opracowanie poprawnych modeli pogarszania się stanu technicznego przewodów z rur PVC, oraz ich wdrożenie.

Z uwagi na brak w wymienionych wcześniej zaleceniach europejskich i amerykańskich propozycji kategoryzacji dwu spośród zaobserwowanych uszkodzeń, tj. lokalnych wgnieceń w ścianach rur oraz utraty stateczności powłok rur, zamieszczono w [1] taką propozycję. Uwzględniono ją następnie w metodzie wyznaczania ryzyka zamieszczonej w [7]. Drugi ze sformułowanych celów w tej publikacji, tj. określenie ograniczeń w zakresie doboru bezwykopowych technik odnowy przewodów kanalizacyjnych z uszkodzeniami specyficznymi dla rur lepkosprężystych, stanowi przedmiot rozdziału 4.1 w [1], w którym wskazano wpływ każdego z uszkodzeń na zmniejszenie się liczby możliwych do zastosowania technik odnowy. Trzeci z założonych celów, wskazujący na konieczność skorygowania założeń wymienionych wcześniej modeli pogarszania się stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych, osiągnięto formułując w rozdz. 4.2. zalecenia wynikające z wykonanych badań i analiz dotyczące:

- konieczności oddzielnego opracowania modeli dla rur wykonanych z różnych materiałów,
- konieczności oddzielnego opracowania modeli dla rur ułożonych powyżej i poniżej zwierciadła wody gruntowej,
- uwzględnienia w opracowywanych modelach trzech wymienionych wcześniej uszkodzeń początkowych nie występujących w rurach o konstrukcji sztywnej,
- rozróżnienia i oddzielnego uwzględniania w modelach uszkodzeń pierwotnych i wtórnych.

Przedmiotem publikacji [2] jest utrata stateczności powłoki lepkosprężystych rur, na przykładzie rur PE-HD, uwzględniana następnie w metodzie wyznaczania ryzyka

Eu

zamieszczonej w [7]. W odróżnieniu od publikacji [1], w której dokonano analizy badań CCTV w zakresie częstotliwości występowania tego uszkodzenia w rurach PVC, w [2] dokonano analizy utraty stateczności rur PE-HD na wybranym przykładzie. Przedmiotem tej analizy była zależność między wielkością krytycznych ciśnień, stanowiących przyczynę wystąpienia utraty stateczności powłoki, a pozostałymi parametrami mającymi wpływ na wielkość obciążeń, w tym m.in. konstrukcyjnymi, technologicznymi oraz funkcją czasu eksploatacji tych rur. Porównano najczęściej stosowane metody europejskie i amerykańskie dotyczące ustalania krytycznych ciśnień, stwierdzono rozbieżności w uzyskiwanych ocenach, wskazano na przyczyny rozbieżności oraz wskazano kierunki dalszych niezbędnych analiz i badań, mających na celu weryfikację poprawności tych metod.

Przedmiotem publikacji [3] jest analiza ugięć rur PVC. Wskazano w niej na rozbieżności w zaleceniach norm i wytycznych stosowanych w różnych krajach. Z analizy tej wynika pilna potrzeba ujednolicenia tych zaleceń, co umożliwi pozyskiwanie porównywalnych danych wejściowych do modeli pogarszania się stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych. W wyniku powyższej analizy zaproponowano, przyjęte następnie w metodzie wyznaczania ryzyka awarii zamieszczonej w [7], wartości numeryczne określające kategorie prawdopodobieństwa wystąpienia awarii konstrukcyjnej spowodowanej ponadnormatywnymi ugięciami rur PVC. W [3] zamieszczono także wyniki badań przewodów kanalizacyjnych z rur PVC w zakresie ugięć, wskazując na przyczyny ich wystąpienia. Nowością w tej publikacji jest wykazanie, że ugięcia rur mają wpływ na koszty ich bezwykopowej rehabilitacji. Określono liczbowo w jakim stopniu wielkość ugięć wpływa na wzrost kosztów, w przypadku użycia najczęściej stosowanych w tym celu ciasnopasowanych powłok CIPP (ang. Cured-In-Place-Pipe), zarówno dla przypadku ich bezwykopowej renowacji (ang. non structural rehabilitation), jak i bezwykopowej rekonstrukcji (ang. fully structural rehabilitation).

W kolejnej publikacji [4] zaprezentowano dokonaną przez autorkę analizę wyników najnowszych, wykonanych w 2015 roku badań CCTV kamionkowych sanitarnych przewodów kanalizacyjnych, eksploatowanych dłużej niż 120 lat (od 121 do 142 lat), o średnicach od 200 do 350 mm i łącznej długości ponad 7 km. Badania te wnoszą istotny wkład do dotychczasowej wiedzy o stanie technicznym długo eksploatowanych kamionkowych przewodów kanalizacyjnych, ponieważ wszelkie dotychczasowe analizy ich stanu technicznego, zarówno krajowe jak i zagraniczne, dotyczyły przewodów nie starszych niż 110 lat. Analiza wyników tych badań potwierdziła tezę sformułowaną na kanadyjskim Uniwersytecie w Waterloo w 2010 roku i opublikowaną w jednym z artykułów w czasopiśmie Tunnelling and Underground Space

E.

Technology, zacytowanym w przedmiotowym artykule, że brak jest wzajemnych relacji między wiekiem a stanem technicznym kamionkowych przewodów kanalizacyjnych, co pozostaje w sprzeczności z prognozami pogarszania się ich stanu technicznego, opracowanymi przez niektóre inne ośrodki naukowe, wymienione w [4]. Tezę sformułowaną na tym Uniwersytecie można uznać za słuszną, jak wykazały to wyniki badań zamieszczone w [4], ale wyłącznie w przypadku kanałów kamionkowych bez uszkodzeń konstrukcyjnych początkowych i ułożonych w gruntach suchych. Zaprezentowane w [4] badania podważają celowość opracowywania w dotychczas proponowanej formule podanej w [1,4] deterministycznych, sztucznej inteligencji czy stochastycznych modeli pogarszania się stanu technicznego tych przewodów. Syntetyczne podsumowanie wyników badań i analiz zamieszczonych w [4] podano także w [1]. Z badań zaprezentowanych w [4] wynika bardzo istotny wniosek, zamieszczony także w [1], iż modele te, bazując na przykład na tzw. krzywych przeżycia czy łańcuchach Markowa, byłyby poprawne w zakresie prognozowania pogarszania się stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych tylko wtedy, gdyby – po pierwsze – opracowywano je oddzielnie dla przewodów kanalizacyjnych ułożonych w gruntach suchych i nawodnionych oraz – po drugie – gdyby uwzględniano w nich uszkodzenia początkowe, obecnie nie brane w tych modelach pod uwagę.

Dyskusyjnym problemem jest to, czy wiek kanału powinien być jednym z kryteriów branych pod uwagę w planowaniu bezwykopowej odnowy przewodów kanalizacyjnych. W publikacjach dawniej opracowywanych, jeszcze przed szerszym zastosowaniem techniki CCTV i innych metod badań stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych, zalecano uwzględnianie wieku przewodów, z uwagi na brak możliwości obserwacji ich stanu technicznego. Wyniki badań opisanych w [4], a także badań wykonanych w kanadyjskim Uniwersytecie w Waterloo potwierdzają słuszność pominięcia kryterium wieku przewodów kanalizacyjnych w metodach zaproponowanych w [6,7] przy wyznaczaniu ryzyka awarii.

Najistotniejszym osiągnięciem zaprezentowanym w kolejnej publikacji [5] jest propozycja metody wyznaczania kategorii prawdopodobieństwa awarii betonowych przewodów kanalizacyjnych dla kryterium bezpieczeństwa konstrukcyjnego. Bazując na wynikach badań CCTV wykonywanych przez Politechnikę Świętokrzyską, a obejmujących swym zakresem ponad 14 km betonowych przewodów kanalizacyjnych, ponad 14 km przewodów kamionkowych oraz ponad 11 km przewodów z rur PVC, a także na wykonanych ekspertyzach konstrukcyjnych, wyszczególnionych w „Wykazie opublikowanych prac naukowych, twórczych prac zawodowych ....", zidentyfikowano zagrożenia bezpieczeństwa

konstrukcji przewodów kanalizacyjnych, spowodowane uszkodzeniami konstrukcyjnymi, opisanymi w [5] jako s_i, mogącymi wystąpić w przewodach kanalizacyjnych. Są nimi: ścieralność dna, korozja, pęknięcia podłużne, poprzeczne i ukośne, ubytki fragmentów konstrukcji, deformacja spękanych fragmentów ścian kanału, ponadnormatywne ugięcie wierzchołka rur podatnych, utrata stateczności powłoki rur i lokalne wgniecenia. Zidentyfikowano także uszkodzenia stwarzające zagrożenia eksploatacyjne i środowiskowe opisane w [5] jako e_i. Są nimi: osady denne przemieszczające się i stałe, przerastające korzenie drzew, przykanaliki wystające do wnętrza kanału, inne przewody ułożone w poprzek przekroju poprzecznego, nieprawidłowe (z uwagi na rodzaj ścieków) podłączenie przykanalików, infiltracja wody gruntowej, narosty infiltracyjne, przemieszczenia rur podłużne i poprzeczne. W [5] poddano analizie tylko uszkodzenia konstrukcyjne występujące w przewodach kanalizacyjnych betonowych, dokonując ich ilościowej oceny oraz podając przyczyny ich wystąpienia. Zaproponowano zestawienie wszystkich możliwych uszkodzeń, jakie mogą wystąpić w betonowych przewodach kanalizacyjnych, w formie macierzy $[P^S]$:

$$[P^S] = \begin{vmatrix} p^S_{1,1} & p^S_{1,2} & \cdots & p^S_{1,j} & \cdots & p^S_{1,n} \\ p^S_{2,1} & p^S_{2,2} & \cdots & p^S_{2,j} & \cdots & p^S_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p^S_{i,1} & p^S_{i,2} & \cdots & p^S_{i,j} & \cdots & p^S_{i,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p^S_{m,1} & p^S_{m,2} & \cdots & p^S_{m,j} & \cdots & p^S_{m,n} \end{vmatrix} \tag{1}$$

gdzie:

$p^S_{i,j}$ – element macierzy stanowiący najniższą wielkość i-tego uszkodzenia przyjętą z przedziału $[p_{i,j}, p_{i,j+1})$, wyrażoną w %, mm lub cm^2 w zależności od przyjętej miary ilościowej oceniającej to uszkodzenie, dla j-tej kategorii prawdopodobieństwa wystąpienia awarii konstrukcyjnej przewodu kanalizacyjnego,

m – liczba uszkodzeń konstrukcyjnych, możliwych do wystąpienia w betonowych przewodach kanalizacyjnych,

n – liczba kategorii prawdopodobieństwa awarii konstrukcyjnej przewodu kanalizacyjnego.

Przyjęto pięć kategorii prawdopodobieństwa wystąpienia awarii konstrukcyjnej, od wysoce nieprawdopodobnej (j = 1), poprzez nieprawdopodobną (j = 2), częściowo prawdopodobną (j = 3), prawdopodobną (j = 4) do wysoce prawdopodobnej (j = 5).

Badania przewodów kanalizacyjnych wykonane metodą CCTV przy zastosowaniu specjalistycznych kamer, które w trakcie przemieszczania się wnętrzem przewodów

Ku.

umożliwiają rejestrację obserwowanych uszkodzeń, dostarczają wyniki w postaci liczby i wielkości tych uszkodzeń. Wyniki te są podstawą do ustalenia składowych wektora uszkodzeń $[f^L]$, opisanego wzorem (2):

$$[f^L] = [f_1^L, f_2^L, \dots f_i^L, \dots f_m^L] \tag{2}$$

gdzie:

f_i^L – i-ta składowa wektora $[f^L]$ podająca maksymalną wielkość i-tego uszkodzenia konstrukcyjnego uzyskaną z badań CCTV analizowanego odcinka przewodu kanalizacyjnego, wyrażoną w odpowiedniej jednostce miary (mm, cm^2, %).

Posiadając zestawione w wektorze $[f^L]$ wielkości największych i-tych uszkodzeń oraz bazując na zaproponowanych w macierzy $[P^S]$ zasadach ustalania j-tych kategorii prawdopodobieństwa awarii, w zależności od wielkości i-tych uszkodzeń, możliwe jest ustalenie wektora kategorii prawdopodobieństwa awarii konstrukcyjnej przewodu kanalizacyjnego dla każdego i-tego uszkodzenia i zapisanie go w postaci wektora $[c^L]$:

$$[c^L] = [c_1^L, c_2^L, \dots c_i^L, \dots c_m^L] \tag{3}$$

gdzie:

c_i^L – i-ta składowa wektora $[c^L]$ podająca kategorię prawdopodobieństwa awarii konstrukcyjnej przewodu kanalizacyjnego ustaloną dla i-tego uszkodzenia.

W następnej kolejności ustala się ze wzoru (4) kategorię m_p prawdopodobieństwa awarii konstrukcyjnej przewodu kanalizacyjnego równą największej spośród wszystkich kategorii zawartych w wektorze $[c^L]$:

$$m_p = max\ c_i^L \tag{4}$$

Zaproponowana w [5] metoda ustalania kategorii prawdopodobieństwa awarii konstrukcyjnej betonowych przewodów kanalizacyjnych umożliwia typowanie do odnowy w pierwszej kolejności te przewody, które zostały zakwalifikowane do najwyższej kategorii prawdopodobieństwa wystąpienia awarii.

W [5] zamieszczono wyniki badań betonowych przewodów kanalizacyjnych ujęte oddzielnie dla kanałów sanitarnych, deszczowych i ogólnospławnych, dodatkowo z podziałem ich na dwie grupy: uszkodzenia liniowe i punktowe. Bazując na zaproponowanej metodzie dokonano przyporządkowania zbadanych przewodów kanalizacyjnych do zaproponowanych kategorii prawdopodobieństwa wystąpienia awarii konstrukcyjnej.

W kolejnej publikacji [6] metodę ustalania kategorii prawdopodobieństwa wystąpienia awarii konstrukcyjnej zaproponowaną w [5] zastosowano do analizy zjawiska korozji wewnętrznej, występującej w przewodach kanalizacyjnych wykonanych z rur betonowych.

G.

Z uwagi na fakt, iż przedmiotem analizy jest w tym przypadku jedno uszkodzenie, kategorie prawdopodobieństwa awarii konstrukcyjnej ujęte są w formie wektora:

$$[c] = [c_1, c_2, \dots c_j, \dots c_m] \tag{5}$$

gdzie:

c_j – j-ta składowa wektora $[c]$ zawierającego dolne wartości z przedziału $[c_j, c_{j+1})$ określającego wielkości ubytków korozyjnych w ścianie kanału wyrażone procentowo w stosunku do początkowej grubości.

Przyjęto podobnie jak w [5] pięć kategorii awarii konstrukcyjnej przewodów kanalizacyjnych spowodowanych korozją wewnętrzną ścian przewodów. Gdy znana jest wielkość ubytku korozyjnego c_c kategoria awarii konstrukcyjnej przewodu $m_p = j$ dla j spełniającego zależność $c_j \leq c_c < c_{j+1}$.

Nowością w metodzie zamieszczonej w [6], w odniesieniu do metody podanej w [5], jest zaproponowanie w niej jako kryterium planowania odnowy przewodów kanalizacyjnych przyjmowanie nie kryterium kategorii prawdopodobieństwa awarii lecz kryterium ryzyka awarii. Stąd wyłoniła się potrzeba uzupełnienia opracowanej wcześniej metody o uwzględnienie w niej również konsekwencji ewentualnych awarii, które powinny być brane pod uwagę w planowaniu odnowy przewodów kanalizacyjnych. Przykładowo konsekwencje zawalenia się przewodu kanalizacyjnego o niewielkiej średnicy, płytko ułożonego pod powierzchnią terenu zielonego, w gruncie suchym są zupełnie inne niż przewodu kanalizacyjnego o dużej średnicy, ułożonego głęboko w gruncie nawodnionym, pod nawierzchnią ulicy o dużym natężeniu ruchu. Studia literaturowe oraz analiza ponad stu zapadnięć nawierzchni ulicznych spowodowanych awariami przewodów kanalizacyjnych dokonana w [7], stanowiły podstawę do identyfikacji możliwych konsekwencji awarii oraz zaproponowania w [6] macierzy $[K]$ konsekwencji awarii:

$$[K] = \begin{vmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \dots & k_{1,j} & \dots & k_{1,m} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \dots & k_{2,j} & \dots & k_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{i,1} & k_{i,2} & \dots & k_{i,j} & \dots & k_{i,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n,1} & k_{n,2} & \dots & k_{n,j} & \dots & k_{n,m} \end{vmatrix} \tag{6}$$

gdzie:

$k_{i,j}$ – element macierzy konsekwencji awarii przewodów kanalizacyjnych wyrażony w mm, m albo wartościach liczbowych (liczby od 1 do n), dla i-tego czynnika mającego wpływ na konsekwencje awarii przewodu kanalizacyjnego i j-tej kategorii konsekwencji,

n – liczba czynników mających wpływ na konsekwencje awarii przewodu kanalizacyjnego,

m – liczba kategorii konsekwencji awarii.

W zaproponowanej metodzie przyjęto $m = 5$ kategorii konsekwencji: $j = 1$ nieistotne, $j = 2$ marginalne, $j = 3$ znaczne, $j = 4$ poważne i $j = 5$ bardzo poważne.

W macierzy [K] zestawiono $n = 11$ czynników mających wpływ na końcową miarę k_K konsekwencji awarii. Są nimi: średnica kanału ($i = 1$), głębokość posadowienia ($i = 2$), rodzaj gruntu nad kanałem ($i = 3$), funkcja jaką pełni kanał w systemie kanalizacyjnym ($i = 4$), posadowienie przewodu kanalizacyjnego w odniesieniu do poziomu zwierciadła wody gruntowej ($i = 5$), rodzaj nawierzchni ulicznej pod którą posadowiony jest kanał ($i = 6$), natężenie ruchu ulicznego ($i = 7$), lokalizacja przewodu kanalizacyjnego: tereny zielone, rodzaj zabudowy w sąsiedztwie, lokalizacja np. pod rzeką, torami kolejowymi, pasem startowym na lotnisku itp. ($i = 8$), występowanie zjawiska cofki lub podtopień ($i = 9$), możliwość dostępu do przewodu kanalizacyjnego celem dokonania jego naprawy ($i = 10$), oddziaływanie przewodu kanalizacyjnego na środowisko, w tym głównie możliwość skażenia wód gruntowych przez eksfiltrujące ścieki sanitarne z kanału do gruntu ($i = 11$). Wielkości liczbowe opisujące konsekwencje awarii konstrukcyjnej dla konkretnego analizowanego przewodu kanalizacyjnego zapisywane są w wektorze [f]:

$$[f] = [f_1, f_2, \dots f_i, \dots f_n] \tag{7}$$

gdzie:

f_i – i-ta składowa wektora [f] zawierająca wartość liczbową przypisaną i-temu czynnikowi w macierzy [K] dla analizowanego przewodu kanalizacyjnego.

Posiadając dane liczbowe zawarte w wektorze [f] oraz bazując na zaproponowanych w macierzy [K] zasadach ustalania j-tych kategorii konsekwencji awarii dla i-tych czynników, mających wpływ na konsekwencje awarii, można ustalić składowe wektora kategorii konsekwencji awarii przewodu kanalizacyjnego [s] opisanego wzorem:

$$[s] = [s_1, s_2, \dots s_i, \dots s_n] \tag{8}$$

gdzie:

s_i – i-ta składowa wektora [s] podająca kategorię konsekwencji awarii i-tego czynnika mającego wpływ na konsekwencje awarii.

Biorąc pod uwagę fakt, iż duża liczba i-tych czynników ma wpływ na ostateczną ocenę konsekwencji awarii przewodów kanalizacyjnych, oraz że istnieją zróżnicowane preferencje różnych decydentów w odniesieniu do wpływu analizowanych czynników na ustalenie ostatecznej wartości miary konsekwencji m_k zaproponowano, aby była ona ustalana w oparciu o wzór (9):

$$m_k = \sum_{i=1}^{n} s_i \cdot w_i \tag{9}$$

gdzie:

w_i – i-ta składowa wektora $[w] = [w_1, w_2, \dots w_i \dots w_n]$ zawierająca wyrażoną w procentach wagę przyporządkowaną i-temu analizowanemu czynnikowi mającemu wpływ na konsekwencje awarii przy założeniu, że $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$.

W zaproponowanej metodzie, zgodnie z wcześniej podaną w pkt. 2.3.3 definicją ryzyka, jego wartość liczbową wyznacza się kolejno ze wzoru (10):

$$r = m_p \cdot m_k \tag{10}$$

W przypadku ryzyka bardzo dużego ($r \geq 20$) zaproponowano podjęcie natychmiastowych działań w zakresie bezwykopowej odnowy przewodu kanalizacyjnego. W przypadku dużego ryzyka ($12 \leq r < 20$) zaproponowano podjęcie działań rehabilitacyjnych w okresie krótkoterminowym, przy ryzyku średnim ($8 \leq r < 12$) w okresie średnioterminowym, a przy ryzyku niskim ($4 \leq r < 8$) w okresie długoterminowym. W przypadku ryzyka bardzo niskiego ($r < 4$) założono, że bezwykopowa odnowa nie jest wymagana.

Awarie konstrukcyjne przewodów kanalizacyjnych nie zawsze przyczyniają się do powstawania awarii środowiskowych, polegających na znaczącym lub całkowitym wstrzymaniu przepływu ścieków. Awaria konstrukcyjna przewodu kanalizacyjnego może jednak zainicjować pewne niekorzystne zmiany w otoczeniu gruntowym na zewnątrz przewodu (spowodowane najczęściej infiltracją wód gruntowych z cząsteczkami gruntu do wnętrza kanału lub eksfiltracją ścieków z kanału do gruntu), które mogą spowodować zapadnięcie nawierzchni ulicznej. Mimo, iż problem zapadnięć nawierzchni ulicznych spowodowanych awariami przewodów kanalizacyjnych występuje w wielu krajach, temat ten nie został wcześniej opracowany w formie publikacji. Bazując na własnych analizach badań CCTV przewodów kanalizacyjnych ustalono 18 różnych uszkodzeń występujących w przewodach kanalizacyjnych, które mają wpływ na zapadanie się nawierzchni ulicznych. Ujęto je w dwu grupach: uszkodzenia punktowe i liniowe. Zaproponowano także dodatkowy podział tych uszkodzeń na cztery grupy:

a) uszkodzenia potwierdzające nieszczelność przewodów (np. infiltracja wód gruntowych do wnętrza przewodów kanalizacyjnych),
b) uszkodzenia wskazujące na wcześniejsze lub okresowo występujące nieszczelności (np. występowanie narostów poinfiltracyjnych w obszarze złączy rur),
c) uszkodzenia wskazujące na możliwość występowania nieszczelności (np. przemieszczenia rur na złączach),
d) uszkodzenia mogące w przyszłości spowodować nieszczelność przewodów kanalizacyjnych (np. wewnętrzna korozja ścian kanału).

W [7] wskazano także na skalę zagrożeń w zakresie zapadania się nawierzchni ulicznych, spowodowanych każdym z analizowanych 18 uszkodzeń oraz na metody zapobiegania ich występowaniu. Jednak najistotniejszym osiągnięciem, podanym w publikacji [7], jest dokonanie adaptacji metod zaprezentowanych w [5,6] do wyznaczania ryzyka awarii zapadania się nawierzchni ulicznych. Uwzględniono w niej te uszkodzenia przewodów kanalizacyjnych, które mają wpływ na zapadanie się nawierzchni ulicznych. Nowością zaproponowanej metody jest uwzględnienie w niej macierzy $[D^L]$ zawierającej także uszkodzenia typowe tylko dla rur lepkosprężystych, które stanowiły przedmiot analiz w [1-3], tj. ugięć rur, lokalnych wgnieceń ścian rur i utraty stateczności ich powłoki. Oryginalnym elementem publikacji [7] jest także pokazanie problematyki zapadania się nawierzchni drogowych w szerszym aspekcie wskazując, że wystąpienie awarii tych nawierzchni może być spowodowane także przez inne przewody infrastruktury podziemnej. Podano przykłady dotyczące stopniowego osiadania nawierzchni ulicznych, które mogą mieć miejsce w wyniku nieprawidłowego zagęszczania gruntu w wykopach w trakcie budowy nowych przewodów, w przypadku wystąpienia ponadnormatywnych deformacji rur z tworzyw sztucznych lub utraty przez nie stateczności, a także niepoprawnie wykonanej bezwykopowej rehabilitacji przewodów infrastruktury podziemnej. Podano również przykłady pęknięć i unoszenia się nawierzchni drogowych, które zaistniały w trakcie nieprawidłowo realizowanej bezwykopowej budowy i bezwykopowej wymiany przewodów płytko ułożonych pod nawierzchniami ulicznymi.

Jednak głównym celem publikacji [7] było opracowanie metody wyznaczania ryzyka zapadnięć nawierzchni drogowych spowodowanych awariami przewodów kanalizacyjnych. Metoda wyznaczania ryzyka wystąpienia zapadnięć nawierzchni spowodowanych awariami przewodów kanalizacyjnych zawiera macierz $[D^L]$, analogicznie skonstruowana jak macierz $[P^S]$ zamieszczona w [5], zawierająca $m = 5$ kategorii prawdopodobieństwa wystąpienia

zapadnięcia nawierzchni drogowej oraz n = 18 uszkodzeń przewodów kanalizacyjnych mających lub mogących mieć wpływ na powstanie tej awarii. Macierz $[K^L]$ konsekwencji zapadnięć nawierzchni drogowych przyjęto identyczną, jak macierz $[K]$ w [6]. Zaproponowana w [7] metoda wyznaczania ryzyka zapadania się nawierzchni drogowych, w zakresie wyznaczania ryzyka, w niewielkim stopniu różni się od metody podanej w [6]. W macierzy $[D^L]$ uwzględniono 18 uszkodzeń przewodów kanalizacyjnych, a w macierzy $[P^S]$ liczba uszkodzeń była równa 7.

Wyniki zaprezentowanych badań i analiz wskazują, iż można uznać, że zaproponowane w [5,6] metody ustalania kategorii prawdopodobieństwa awarii konstrukcyjnej przewodów kanalizacyjnych oraz w [7] metoda ustalania kategorii prawdopodobieństwa zapadania się nawierzchni ulicznych spowodowanych wystąpieniem uszkodzeń przewodów kanalizacyjnych, bazujące na wynikach cyklicznie wykonywanych badań stanu technicznego przewodów metodą CCTV, są w pełni przydatne w planowaniu odnowy tych przewodów oraz zapobieganiu wystąpieniom zapadnięć nawierzchni ulicznych. Z uwagi na istnienie szeregu czynników, mających wpływ na konsekwencje ewentualnych awarii przewodów kanalizacyjnych, ostatecznym kryterium typowania przewodów do odnowy powinno być ryzyko wystąpienia awarii, uwzględniające nie tylko prawdopodobieństwo wystąpienia awarii, ale także konsekwencje spowodowane ich wystąpieniem, ustalane w oparciu o metody zaproponowane w [6,7].

2.3.4. Propozycja wdrożenia zaproponowanej metody

Publikacja [7] wskazuje na ścisłą zależność pomiędzy bezpieczeństwem konstrukcyjnym nawierzchni ulicznych, w tym bezpieczeństwem ruchu drogowego, a bezpieczeństwem przewodów infrastruktury podziemnej, w tym w sposób szczególny bezpieczeństwem konstrukcyjnym przewodów kanalizacyjnych.

Przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne eksploatujące przewody kanalizacyjne są zainteresowane głównie bezpiecznym transportem ścieków. Stąd też wdrożenie w nich zaproponowanej w [6] metody wyznaczania ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych umożliwi sprawne zarządzanie bezpieczeństwem konstrukcyjnym tych przewodów, poprzez ich planową odnowę. Nie zawsze jednak przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne w wystarczającym stopniu zainteresowane są eliminacją uszkodzeń mających wpływ na szczelność przewodów kanalizacyjnych, które to uszkodzenia stanowią główną przyczynę zapadnięć nawierzchni ulicznych. Stąd też przedsiębiorstwa zarządzające stanem technicznym

dróg i ulic powinny ściślej współpracować z przedsiębiorstwami wodociągowo-kanalizacyjnymi w zakresie pozyskiwania od nich informacji dotyczących szczelności przewodów kanalizacyjnych. Mając na uwadze bezpieczeństwo nawierzchni drogowych i ruchu drogowego, przedsiębiorstwa zarządzające stanem technicznym dróg i ulic powinny być zainteresowane poszerzeniem wykonywanych przez przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne badań CCTV przewodów kanalizacyjnych o bardziej dokładne badania szczelności przewodów kanalizacyjnych, np. poprzez zastosowanie opisanej w jednej z publikacji autorki metody elektroskanowania, czy poprzez zastosowanie opisanych w innej publikacji autorki georadarów przejeżdżających wnętrzem kanałów, umożliwiających wykrywanie ewentualnych pustek powietrznych w gruncie, w obszarze między nawierzchnią uliczną a kanałem.

Propozycja wdrożenia w przedsiębiorstwach wodociągowo-kanalizacyjnych opracowanej metody pod nazwą ABCDE została zaproponowana przez autorkę na konferencji No-Dig Poland w 2014 roku i opublikowana w czasopiśmie Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne. Polega ona na przyporządkowaniu każdemu odcinkowi sieci kanalizacyjnej w danym mieście pięcioliczbowego kodu A,B,C,D,E, w którym: A – podaje kategorie prawdopodobieństwa awarii konstrukcyjnej, B – ryzyko awarii konstrukcyjnej, C – kategorię prawdopodobieństwa awarii środowiskowej, D – ryzyko awarii środowiskowej oraz E – ostatnie dwie cyfry roku, w którym wykonano badania CCTV i ustalono wielkości A, B, C i D. Taki syntetyczny opis każdego odcinka sieci kanalizacyjnej należałoby korygować po kolejnym cyklicznym badaniu CCTV. Ustalenie numerycznych wartości wszystkich parametrów stanowiących wielkości wejściowe w zaproponowanej metodzie umożliwia jej wdrożenie w przedsiębiorstwach wodociągowo-kanalizacyjnych już w chwili obecnej.

Bazując na publikacjach zestawionych w osiągnięciu naukowym możliwe jest ustalenie jedynie wskaźników A,B i E dotyczących awarii konstrukcyjnej przewodów kanalizacyjnych. Sposób ustalania wielkości C i D charakteryzujących awarię eksploatacyjno-środowiskową autorka zamieściła w publikacji pt. „Environmental and structural risk assessment of long operated vitrified clay sewers", przyjętej do druku w czasopiśmie Environment Protection Engineering, dołączonej do zestawu innych osiągnięć.

Metoda zaproponowana w [7] może być wdrożona także w drogownictwie w wersji czteroliczbowej A,B,E,F, gdzie A – podaje kategorię prawdopodobieństwa zapadnięcia nawierzchni drogowej, B – ryzyko zapadnięcia się nawierzchni, E – ostatnie dwie cyfry roku, w którym wykonano badania CCTV przewodu kanalizacyjnego znajdującego się pod

nawierzchnią drogową, F – ostatnie dwie cyfry roku, w którym wykonano dodatkowe specjalistyczne badania dotyczące szczelności przewodów kanalizacyjnych, na przykład elektroskanowanie przewodu lub zbadanie go georadarem przemieszczającym się jego wnętrzem.

Emilia Kulinkowska