

Mike Shepherd – *Thames Water*,
Alan Headford – *GPS*
Richard Jordan, Sarah Reeves – *TRL Ltd.*
David Walton – *Borealis AB*

OPRACOWANIE MODELU KOSZTÓW PEŁNEGO CYKLU ŻYCIA MAGISTRAL WODOCIĄGOWYCH

STRESZCZENIE

W Europie, od wielu lat z powodów ekonomicznych, technicznych i bezpieczeństwa do budowy gazociągów jest niemalże wyłącznie używany polietylen (PE). W przypadku wodociągów wciąż wykorzystywane są różne materiały. Do budowy wodociągów o średnicy większej od 355 mm w większości przypadków są wykorzystywane rury z żeliwa sferoidalnego.

Bardzo często wodociągowe sieci magistralne są projektowane przez projektantów, którzy nie zdają sobie sprawy z korzyści, jakie mogłyby być osiągnięte w przypadku zastosowania elastycznych rur PE łączonych metodą zgrzewania. W tych przypadkach wybór materiału jest często uzależniony jedynie od ceny rury, zaś całkowity koszt inwestycji, wliczając koszt wykonania wykopów i prac montażowych, nie jest brany pod uwagę. Tym mniej prawdopodobne jest też, że uwzględniane są koszty eksploatacji tego rurociągu.

Dlatego też, postanowiono opracować model kosztów pełnego cyklu życia magistral wodociągowych pozwalający na porównywanie kosztów ponoszonych w pełnym okresie żywotności rur o średnicach od 400 do 900 mm wykonanych z polietylenu (PE), żywic wzmocnianych włóknem szklanym (GRP) i żeliwa sferoidalnego (możliwe jest dostosowanie modelu również do innych zakresów średnic).

1. WPROWADZENIE

W Europie, od wielu lat z powodów ekonomicznych, technicznych i bezpieczeństwa do budowy gazociągów jest niemalże wyłącznie używany polietylen (PE). W przypadku wodociągów wciąż wykorzystywane są różne materiały.

Do wykonywania przyłączy domowych o średnicy od 20 do 63 mm ze względu na swoją elastyczność i łatwość instalacji stosowany jest prawie wyłącznie polietylen. Rury w tych rozmiarach są dostarczane w odcinkach o długości do 100 metrów zwijanych w kręgi, z którymi na budowie łatwo poradzi sobie jeden człowiek.

W przedziale średnic od 90 do 300 mm PE jest również najczęściej wybieranym w Europie materiałem do budowy wodociągowej sieci rozdzielczej. Dane przedstawione w tabeli 1(a) potwierdzają, że w 2001 roku ponad połowa nowo instalowanych wodociągów w Europie została wykonana z PE [1]. Źródłem tego powodzenia PE jest fakt, że rury do średnicy co najmniej 180 mm mogą być zwijane w kręgi lub nawijane na bębny i nadal są na tyle giętkie by łatwo omijać przeszkody, bez konieczności stosowania dodatkowych kształtek. Ponadto, w pewnych okolicznościach, rury można układać metodami bezwykopowymi, co dodatkowo obniża koszty realizacji inwestycji.

Jednakże, do budowy magistral wodociągowych w Europie zazwyczaj wybierane są materiały inne niż PE. W tabeli 1(b) przedstawiono preferencje materiałowe przy budowie wodociągów o średnicy 300 mm i większych, w pięciu największych krajach Europy w 2003 r. [1]. Ewidentnie, najbardziej popularnym materiałem dla tego zakresu średnic jest żeliwo sferoidalne, jednakże w zależności od indywidualnych okoliczności i nie bez udziału osobistych preferencji wybieranych jest wiele innych materiałów.

Tabela 1(a). Preferencje materiałowe w zakresie rur wodociagowych o średnicy od 90 do 299 mm w pięciu największych krajach Europy w 2001 r. [1].

Kraj	PCV	PE	Żeliwo sfer.	Stal	GRP	Beton
Niemcy	2491	6956	3150	1140	28	0
Francja	8020	2343	4880	0	0	0
Wielka Brytania	1228	7489	990	0	25	0
Włochy	2245	13340	1250	1210	320	0
Hiszpania	3299	8307	1745	39	33	130
W sumie	17283	38435	12015	2389	406	130
Procentowo	24,4	54,4	17,0	3,4	0,6	0,2

Tabela 1(b). Preferencje materiałowe w zakresie wodociągów magistralnych w Europie w 2001 r. [1]

Kraj	PCV	PE	Żeliwo sfer.	Stal	GRP	Beton
Niemcy	89	350	358	207	91	180
Francja	29	55	360	27	12	7
Wielka Brytania	56	136	385	7	53	9
Włochy	97	190	270	388	170	152
Hiszpania	29	135	376	46	62	245
W sumie	300	866	1749	675	388	593
Procentowo	6,6	18,9	38,3	14,8	8,5	13,0

Oczywistym jest, że jeżeli więcej firm wodociagowych ma wybierać rury PE do budowy przewodów magistralnych, to muszą być przekonane o konkretnych oszczędnościach. Niestety, wybór materiału jest w większości przypadków uzależniony jedynie od ceny rury, zaś całkowity koszt instalacji, wliczając koszt przygotowania wykopów i ułożenia rurociągu, nie jest w ogóle brany pod uwagę. Tym mniej prawdopodobne jest to, że uwzględnia się przy podejmowaniu tych decyzji koszty eksploatacji rurociągu.

Zaletą modelu kosztów pełnego cyklu życia (WLC) jest to, że pozwala on uwzględnić te wszystkie elementy oraz długotrwałą niezawodność i koszty eksploatacji.

2. ROZWAŻANIA PROJEKTOWE

2.1. Materiały wybierane do budowy wodociągów magistralnych

W Wielkiej Brytanii, w przeszłości, do budowy wodociągów magistralnych stosowane były rury z żeliwa szarego. Początkowo rury te były odlewane w formach pionowych a w późniejszym okresie stosowano odlewanie odśrodkowe. Tak w pierwszym jak i w drugim przypadku rury miały bardzo grube ścianki. Głównie ze względu na tę grubość wiele rur ułożonych w XIX wieku jest nadal w użyciu [2], aczkolwiek są one mocno zgrafityzowane, a więc i podatne na kruche pęknięcia.

W latach 60. XX wieku wyprodukowano pierwsze rury z żeliwa sferoidalnego, w których wewnętrzne formacje grafitowe przybierały postać kulek (sfer), co wpływało na zmniejszenie kruchości rur. Ponieważ uznano, że pękanie nie jest już problemem, grubość rur została zmniejszona. W późniejszym okresie, w celu ochrony przed korozją, zaczęto stosować pokrycie cynkowe i bitumiczne. W 2000 roku francuska firma Saint Gobain na brytyjski rynek wodociagowy wprowadziła linię rur z żeliwa sferoidalnego „Natural”. W rurach tych zewnętrzne powierzchnie są chronione przed korozją przez powłoki ze stopu cynku oraz żywicy epoksydowej, zaś wewnętrzne powierzchnie pokryto zaprawą cementową, aby poprawić charakterystykę hydrauliczną i ograniczyć problemy z jakością wody.

Rury z PVC zaczęto wykorzystywać do budowy wodociągów w latach 60 tych, ale problem kruchości oraz przedwczesne awarie rur o dużej średnicy i grubych ściankach ograniczyły ich udział rynku. Obecnie w Wielkiej Brytanii stosuje się jedynie systemy wodociągowe ze zmodyfikowanego PVC. Są to albo rury z orientowanego molekularnie PVC (MOPVC) albo rury z plastyfikowanego PVC (MPVC), produkowane w średnicach do 630 mm.

Wysokie wytrzymałe rury z żywicy zbrojone nawijanym włóknem szklanym (GFRP) są zbyt drogie do zastosowań wodociągowych, dlatego też wybiera się tańsze rury kompozytowe o konstrukcji warstwowej typu „Hobas”. Problemy ze szczelnością połączeń i przedwczesne awarie strategicznych wodociągów sprawiły, że materiału tego nie stosuje się do budowy rurociągów ciśnieniowych w Wielkiej Brytanii.

Rury polietylenowe o małej średnicy stosuje się na przyłącza domowe od lat 60 tych, ale pierwsze pełne systemy polietylenowe zaczęto stosować w brytyjskiej branży wodociągowej w 1984 r. Były to rury MDPE PE80 z kształtkami mufowymi i do zgrzewania doczołowego, które od razu stały się popularne w średnicach do 180 mm. Powyżej tej średnicy rury PE były droższe od systemów alternatywnych i penetracja rynku była ograniczona do momentu wprowadzenia PE100 w 1990 r. Cieńsze ścianki rur wykonanych z PE100 dla danej klasy ciśnienia, uczyniły te rury bardziej konkurencyjnymi jak też ilżejszymi i łatwiejszymi do użytku na budowie, co zwiększyło udział PE w rynku rur większych średnic.

2.2. Hydraulika

Rury żeliwne produkowane w XIX wieku nie były szczególnie gładkie i zazwyczaj wartość współczynnika chropowatości k_s we wzorze Colebrooka przyjmowano na poziomie 0,25 mm [3]. Co więcej wartość oporów przepływu wzrasta wraz z upływem czasu użytkowania rury, ze względu na odkładające się wewnątrz osady. Dlatego też, dla 50. letniej rury żeliwnej, przyjmowane są często wartości k_s nawet do 2,5 mm [4].

Większość nowoczesnych rur z żeliwa sferoidalnego jest od wewnątrz pokryta warstwą z zaprawy cementowej, co początkowo daje względnie małe opory przepływu – dla powłok nanoszonych metodą Tate producenci rur z żeliwa sferoidalnego podają wartość $k_s = 0,38$ mm. Jednakże trwałość pokrycia jest sprawą dyskusyjną i nie jest niczym szczególnym stosowanie płukania w rurach z żeliwa sferoidalnego z wykładziną cementową, aby ze starszych rur usunąć gruz cementowy. Zazwyczaj przyjmowana przez brytyjskie firmy wodociągowe efektywna wartość współczynnika chropowatości w dłuższym okresie czasu wynosi od 1 mm (przy 1,5 m/s) do 3 mm (przy 1,0 m/s).

Wewnętrzna powierzchnia rur z tworzyw sztucznych, zarówno PE, jak i GRP, jest bardzo gładka i jest właściwym przyjmowanie długotrwałych wartości współczynników chropowatości k_s równe 0,01 mm dla rur o średnicy wewnętrznej do 200 mm i k_s równe 0,05 mm dla rur o większych średnicach [6]. Źródło to podaje, że powyższe wartości w dostatecznym stopniu uwzględniają wpływ wewnętrznych wypływek zgrzein doczołowych (patrz niżej) oraz inne pomniejsze osady pochodzenia biologicznego na opory przepływu. Właściwym jest też zwrócenie uwagi na to, że osady tłuszczu na wewnętrznej powierzchni rur kanalizacyjnych z tworzywa sztucznego są łatwiejsze do usunięcia przy czyszczeniu przez przepuszczanie korków czyszczących, niż ma to miejsce w przypadku rur żeliwnych z powłokami wewnętrznymi lub bez.

Dla zgrzewanych doczołowo rur PE wypływki wewnętrzne zgrzein mogą powodować drobne ograniczenie przepływu. Jeżeli wypływka wewnętrzna nie została usunięta, ograniczenie to musi być brane pod uwagę w przypadku rur o średnicy mniejszej od 300 mm, zwłaszcza w gazociągach. Jednakże, dla przewodów wodociągowych podane wyżej wartości są odpowiednie [7].

Stosownie do powyższych informacji, wartości k_s przyjmowane w modelu kosztów pełnego cyklu życia magistral wodociągowych wynoszą 0,05 mm dla PE i 0,5-1,0 mm dla rur z żeliwa sferoidalnego.

2.3. Nowe metody układania rurociągów

Większość wodociągów magistralnych (>300 mm), to rurociągi z niewielką ilością odgałęzień, często biegnące przez obszary niezurbanizowane, aczkolwiek w większości przypadków konieczne jest parokrotne przekroczenie drogi. Na obszarach pozamiejskich, na których szerokość wykopu nie jest tak istotna, zazwyczaj stosuje się wykopy o szerokości D+300 mm zarówno dla rur PE, jak i z żeliwa sferoidalnego, aczkolwiek dla tych ostatnich większa szerokość jest wymagana przy wykonywaniu niektórych rodzajów połączeń.

Dla rur GRP szczególna ostrożność wymagana jest przy łączeniu i zasypywaniu rur, co oznacza konieczność stosowania odrobinę szerszego wykopu: D+400 mm.

Dla rur PE o średnicy do 400 mm można stosować takie bezwykopowe metody układania, jak płuzenie czy przewiertki sterowane. Jednakże w Wielkiej Brytanii metody te zazwyczaj stosuje się jedynie w specjalnych przypadkach, takich jak przekraczanie rzek lub układanie rurociągów w polach uprawnych.

2.4. Obliczenia wytrzymałościowe

Dla ułożonych w gruncie rur sztywnych, takich jak rury z żeliwa sferoidalnego, dostępne są uznane metody, umożliwiające wykonanie obliczeń wytrzymałościowych [8]. Jednakże metody te wykazują jedynie ograniczoną przydatność dla elastycznych rur z tworzyw sztucznych a w przypadku rur wykonanych z nowoczesnych materiałów PE charakteryzującymi się wysoce plastycznymi właściwościami lepkosprężystymi są jeszcze mniej przydatne. Rzeczywiście, w momencie opracowywania tych metod obliczeniowych, inżynierowie nie przewidzieli powstania takich materiałów, z których wykonane rury mogłyby harmonijnie współpracować z otaczającym je gruntem [9].

Unikatową właściwością PE jest to, że pod wpływem występujących obciążeń rura się ugnie, a przy stałym poziomie tego odkształcenia naprężenia w ścianie rury będą ulegać relaksacji. Naprężenia w ścianie rury są przekazywane na materiał zasyпки tak, że rura i otaczający ją grunt zmierzają do uzyskania stanu równowagi. Główne ograniczenie dla wielkości ugięcia rury jest więc jedynie podyktowane wymogiem uzyskania stabilności górnej warstwy przykrycia. Oznacza to, że na otwartej przestrzeni obszarów pozamiejskich można dopuścić całkiem duże ugięcia rur (10% ugięcia rury zmniejszy przepustowość jedynie o 2,5%).

Ważny europejski projekt branżowy realizowany w latach 90. XX wieku, sponsorowany przez TEPFPA i AMPE [10] zaowocował opracowaniem realistycznej metody projektowania dla bardzo elastycznych materiałów, takich jak PE. Po raz pierwszy umożliwia ona projektantom rurociągów określenie wartości ich ugięcia dla różnych obciążeń zewnętrznych, różnych warunków gruntowych i jakości prac montażowych. Ostatnio, zakres tego projektu rozszerzono o analizę naprężeń zginających w zewnętrznej warstwie rury wywoływanych jej ugięciem [11]. Wykazała ona, że niewłaściwym w obliczeniach wytrzymałościowych rurociągów z tworzyw sztucznych było stosowanie zasady składania naprężeń. Zalecenie to zostało wykorzystane do modyfikacji brytyjskiego aneksu do normy BS EN 1295-1.

2.5. Renowacja wodociągów

W przypadku, gdy istniejący rurociąg tranzytowy jest w złym stanie technicznym, lepszym rozwiązaniem jest poddanie go renowacji z wykorzystaniem rury PE niż jego wymiana metodą tradycyjną. Może to doprowadzić do znaczących oszczędności w budżecie inwestycji oraz znacząco ograniczyć poziom utrudnień związanych z jej realizacją.



Rysunek 1. Renowacja starego wodociągu żeliwnego rurą PE o dużej średnicy.

Niższy współczynnik chropowatości dla rur PE, w porównaniu do współczynnika dla starego rurociągu żeliwnego, który był w użyciu przez wiele lat. Oznacza to, że możliwe jest zastąpienie go rurą PE o mniejszej średnicy, którą można po prostu zainstalować we wnętrzu starego rurociągu. Na przykład rura PE 710 mm ma tę samą przepustowość jak 30 calowy (757,2 mm) rurociąg, który był w użyciu ponad 20 lat [4].

3. INSTALACJA I ŁĄCZENIE

Zarówno rury z żeliwa sferoidalnego, jak i rury GRP są łączone kielichowo na uszczelkę gumową. Chociaż połączenia te są łatwe i szybkie w montażu, to nie przenoszą sił wzdłużnych i dlatego przy zasuwach, odgałęzieniach i zmianach kierunku są wymagane bloki oporowe. W przypadku rur o dużej średnicy bloki oporowe mogą być bardzo drogie i czasochłonne w wykonaniu.

Wąskim gardłem w realizacji większości projektów jest zazwyczaj czas potrzebny na wykonanie wykopów. Chociaż łączenie rur z żeliwa sferoidalnego może być szybsze niż zgrzewanie doczołowe rur PE, to jednak prędkość układania rurociągów PE zazwyczaj jest większa dzięki większej długości rur (rury z żeliwa sferoidalnego mają 6-7 m długości w porównaniu do 12 m odcinków rur PE).

Rury PE są zazwyczaj zgrzewane, a dobrze wykonana zgrzeina jest często mocniejsza niż sama rura. Oznacza to, że rurociąg może przenosić obciążenia osiowe bez groźby jego uszkodzenia i potrzeby stosowania bloków oporowych. Odporność rurociągów PE na obciążenia i ruchy gruntu została wykazana w 1995 roku podczas dramatycznego trzęsienia ziemi w Kobe w Japonii. Kiedy po trzęsieniu ziemi, w którym zginęło 6.000 osób a 440.000 domów zostało zniszczonych, firma Osaka Gas zbadała stan sieci gazowej [12], to stwierdzono wysoki poziom uszkodzeń na rurociągach żeliwnych i stalowych, i żadnych awarii w części sieci wykonanej z PE. Po tej analizie rury PE stały się niezwykle popularne w Japonii i innych obszarach, na których występują trzęsienia ziemi.

Rury PE o dużej średnicy są zazwyczaj zgrzewane metodą doczołową. Jest to bardzo solidna metoda łączenia, a większość zgrzewarek pracuje w trybie półautomatycznym. Ponieważ zgrzewarki do rur dużych średnic są drogie, większość firm wykonawczych albo wypożycza taką zgrzewarkę albo zleca wykonanie zgrzewów specjalistycznej firmie. Ta druga opcja jest droga, gdyż wyspecjalizowana ekipa może kosztować do £800 (\$1.500) dziennie, ale ponieważ mogą wykonać dziennie średnio 8-10 połączeń rur 500 mm (5-6 połączeń rur 1000 mm), z łatwością dotrzymują kroku przygotowaniom wykopu.

Mufy elektrooporowe są dostępne do średnicy 710 mm i zazwyczaj są wykorzystywane w rurociągach PE w miejscach przekraczania dróg, kiedy to łączenie musi być wykonane w wykopie. W przypadku rur o większych średnicach zamiast muf elektrooporowych stosowane są połączenia kołnierzowe. W przeszłości zgrzewanie rur o dużej średnicy metodą elektrodyfuzyjną okazywało się trudne. Ostatnio wprowadzone na rynek kształtki elektrooporowe, wykorzystują nową metodę zamykania szczeliny między rurą a kształtką, co czyni połączenia bardziej niezawodnymi.

4. PRÓBY TECHNICZNE I PRZEKAZANIE DO EKSPLOATACJI

4.1. Próba szczelności rur o dużej średnicy

Kiedy rurociąg PE jest poddany działaniu wewnętrznego ciśnienia hydrostatycznego zaczyna pełzać, co wywołuje spadek ciśnienia, nawet wówczas, kiedy rurociąg jest szczelny. Dlatego też należy skompensować tę redukcję ciśnienia, aby prawidłowo ocenić integralność rurociągu.

Jedną z metod odpowiednich dla rurociągów PE opracował L-E. Janson [13]. Metoda ta opiera się na liniowej zależności pomiędzy odkształceniem a logarytmem czasu trwania próby szczelności. Ponieważ zmiana objętości wody wewnątrz rurociągu jest również liniowo zależna od odkształcenia, możliwe jest określenie relacji na zmianę objętości w kolejnych okresach czasu.

Jeżeli rurociąg jest szczelny to związek pomiędzy kolejnymi okresami czasu powinien być taki, jak przedstawiono w równaniu 1:

$$\Delta V_{(5h-4h)} = 0.550 \Delta V_{(3h-2h)} \dots\dots\dots (1)$$

gdzie:

$\Delta V_{(5h-4h)}$ - zmiana objętości wody pomiędzy 4 a 5 godziną,

$\Delta V_{(3h-2h)}$ - zmiana objętości wody pomiędzy 2 a 3 godziną.

Jeżeli objętość wody pomiędzy 4 i 5 godziną jest większa niż wynikająca z równania (1), to w rurociągu występuje nieszczelność.

Procedura badania szczelności wykorzystywana przez brytyjskie wodociągi jest oparta na pracy G.P. Marshalla [14]. Została ona później wprowadzona, wraz z pewnymi modyfikacjami, do wytycznych przygotowanych przez WRc. Brytyjska branża wodociągowa przygotowuje obecnie nowe zalecenia w zakresie przeprowadzania prób szczelności dla rurociągów ze wszystkich materiałów.

4.2. Wykrywanie nieszczelności i naprawa

Koszt znalezienia i usunięcia nieszczelności w rurociągu o dużej średnicy może być bardzo wysoki, zazwyczaj do £20.000 (\$34.000) za naprawę.

Najwięcej nieszczelności podczas odbioru rurociągu występuje na połączeniach. W rurociągach z żeliwa sferoidalnego lub GRP potencjalnym miejscem nieszczelności jest każde połączenie kielichowe. Dlatego też, w przypadku stwierdzenia nieszczelności cały rurociąg musi być dzielony na części i testowany zapewne kilkakrotnie, lub połączenia odkryte i sprawdzone pod kątem ich szczelności. Jeżeli instalator stosuje się do dobrej praktyki montażowej, próbie szczelności poddawane są odcinki o długości do 500 m. Każda taka sekcja powinna być testowana oddzielnie, co ogranicza czas badania, ale bardzo często próbie poddawane są dłuższe odcinki rurociągów.

Zgrzewane doczołowo połączenia rur PE prawie nigdy nie przeciekają, więc poszukiwania mogą być skoncentrowane na połączeniach kołnierzowych przy zasuwach i odgałęzieniach, co ograniczy czas i koszty poszukiwań. Ze względu na pełzanie pod wpływem ciśnienia, po upływie pewnego czasu koniecznym może okazać się ponowne dokręcenie niektórych śrub w połączeniach kołnierzowych. Aby zminimalizować problem nieszczelności połączeń kołnierzowych w rurociągach PE o dużej średnicy, pracujących pod ciśnieniem większym niż 6 bar, zaleca się stosowanie profilowanych uszczelek gumowych ze wzmocnieniem stalowym.

5. TRWAŁOŚĆ I EKSPLOATACJA RUROCIĄGÓW MAGISTRALNYCH

5.1. Awaryjność wodociągów

Awarie przewodów magistralnych, które są często rurociągami strategicznymi, stanowią bardzo ważną kwestię dla każdego operatora i z tego powodu są wbudowane w model kosztów pełnego cyklu życia. Ubytki wody z nieszczelnych rurociągów stają się coraz bardziej istotnym problemem, zwłaszcza na tych obszarach Wielkiej Brytanii, na których dla odbiorców wprowadzono ograniczenia ze względu na występujące jej deficyty.

Koszt strat spowodowanych przez „osoby trzecie” również mogą być bardzo wysokie, jako że woda może być niezwykle niszczycielska dla fundamentów budowli, mostów i dróg. Choć operatorzy są ubezpieczeni od takich zdarzeń, to utrudnienia i negatywna opinia, powstała na skutek zniszczonych domów lub zamkniętych dróg, może być dla nich bardzo szkodliwa i kosztowna.

Podstawową przyczyną awarii rur żeliwnych jest korozja. Żeliwo szare jest podatne na grafityzację, która polega na korozji żelaza, pozostawiającej płytkową strukturę grafitową, wypełnioną dużą ilością tlenku żelaza (rdzą). Rura może nie przeciekać, ale jej wytrzymałość mechaniczna jest znacząco zredukowana i jej uszkodzenie może nastąpić pod wpływem nawet drobnych ruchów gruntu. Nowoczesne żeliwo sferoidalne nie ulega grafityzacji, ale jest bardziej podatne na korozję punktową przy uszkodzeniach powłoki ochronnej.

Jeżeli włókna szklane w rurach GRP są wystawione na kontakt z wodą, siły adhezji między włóknami i żywicą zostaną osłabione, a rura spęcznieje i straci wytrzymałość. Producenci pokrywają rury GRP warstwą żelkotu od zewnątrz i od środka, aby ochronić włókna szklane przed kontaktem z wodą. Jednakże, jeśli podczas prac montażowych warstwa żelkotu zostanie uszkodzona, to woda będzie wchłaniana w ściankę rury i z czasem dojdzie do jej uszkodzenia. Zwłaszcza w ostatnich latach wystąpiło kilka „publicznie znanych” awarii rurociągów GRP, co sprawiło, że są one obecnie stosowane jedynie w warunkach dalekich od krytycznych.

Awarie rurociągów PE o dużej średnicy są niezwykle rzadkie. Jednak, jeśli wystąpią, to najprawdopodobniej z powodu złej praktyki montażowej lub pełzania PE w połączeniach kołnierзовych.

Wodociągi z Århus (Dania) posiadają duże doświadczenie w eksploatacji rurociągów z tworzyw sztucznych, które stanowią obecnie znaczną część ich sieci (50% PVC i 23% PE). Przez wiele lat rejestrowane były awarie występujące na ich sieci, a dane za rok 2003 przedstawiono w tabeli 2. Z materiałów rurowych używanych przez wodociągi z Århus PE charakteryzuje się najmniejszą częstotliwością występowania awarii.

Tabela 2. Dane nt. awaryjności sieci wodociągowej Århus Water Company (2003) [15].

Materiał rury	Udział w sieci [%]	Długość rurociągu (km)	Średnia liczba wycieków rocznie	Wskaźnik awaryjności [1/km/rok]
Żeliwo	16	216	86	0,40
Azbestocement	10	135	11	0,08
PVC	50	675	48	0,07
PE	23	310.5	7	0,02
Stal Galwanizowana	1	135	16	0,30
Sumy	100	1350	168	0,11

6. MODEL KOSZTÓW PEŁNEGO CYKLU ŻYCIA

Zasada analizy kosztów pełnego cyklu życia (WLC) opiera się na obliczeniu wszystkich kosztów związanych z projektowaniem, poprzez jego życie przy wspólnej podstawie, tak, aby można było przeprowadzić rzetelne porównanie między poszczególnymi opcjami. Dlatego też, całkowity rachunek kosztów (WLC) reprezentuje sumę pieniędzy, jaką trzeba obecnie odłożyć, aby pokryć wszystkie ewentualne koszty, zarówno obecne, jak i przyszłe, przy dopuszczeniu akumulacji oprocentowania w części przeznaczona na przyszłe zobowiązania.

WLC jest estymowany poprzez dyskontowanie wszystkich przewidywanych kosztów eksploatacji, obliczonych przy obecnych cenach, przez współczynnik, który bierze pod uwagę czas od początku projektu do czasu przewidywanego zakończenia życia rurociągu używając poniższego równania:

$$WLC = \sum_{t=1}^N \frac{(c_t)}{(1 + r / 100)^t} \quad \text{.....(2)}$$

gdzie:

N - Okres objęty analizą (lata)

r - Stopa dyskontowa (%)

t - Rok kosztu/zysku

c_t - Koszt (koszt początkowy, koszty eksploatacji)

Opracowano program komputerowy umożliwiający porównanie rurociągów wykonanych z trzech różnych materiałów – żeliwa sferoidalnego (DI), żywicy wzmacnianych włóknem szklanym (GRP) i polietylenu (PE) dla dwóch różnych średnic nominalnych – DN 400 i DN 900. Aby uwzględnić różnicę w wymiarowaniu rur PE, do analizy wybrano dwie średnice najbliższe

analizowanym wielkościom – odpowiednio 450 mm i 1000 mm. Ceny rur oparte są na cenach z rynku brytyjskiego aktualnych w chwili przygotowywania artykułu – czerwcu 2006 r.

Koszty instalacji są oparte na kosztorysach otrzymanych od brytyjskich firm wykonawczych na wybrane pozycje:

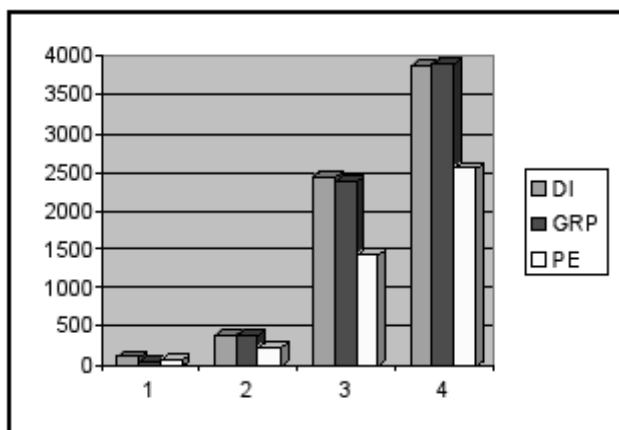
- 1 Liczba połączeń wykonanych w ciągu jednego dnia
- 2 Koszt roboczogodziny dla prac montażowych
- 3 Koszt wynajęcia urządzenia do wykonywania połączeń na jeden dzień
- 4 Koszt zakupu 1 metra rury
- 5 Koszt jednego dnia prac zdawczo-odbiorczych

Koszty eksploatacji wyliczono używając średnich kosztów usunięcia awarii i prawdopodobieństwa ich wystąpienia dla każdego rodzaju rurociągu w oparciu o bazę danych UKWIR. Może to zostać poprawione w przyszłości, o ile pojawi się więcej informacji związanych z wiekiem rur.

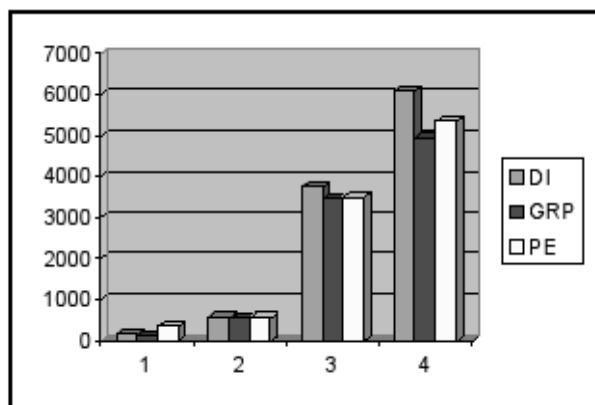
Na koniec, aby przedstawić praktycznie rachunek kosztów pełnego cyklu życia magistral wodociągowych, wykonano obliczenia dla typowego rurociągu magistralnego, składającego się z 5 km rur i zawierającego dwa odgałęzienia, cztery zawory spustowe i dwa zawory odpowietrzające. W obliczeniach zastosowano stopę dyskontową w wysokości 5,1%, co jest obecnie stosowaną stopą zwrotu kapitału w brytyjskim przemyśle wodociągowym.

Prezentowany model pozwala porównywać następujące koszty:

1. Jednostkowy koszt rury (£/metr)
2. Jednostkowy całkowity koszt instalacji (£/metr)
3. Całkowity koszt instalacji projektu modelowego (tys. £)
4. Koszt pełnego cyklu życia projektu modelowego – 50 lat (tys. £)



Rysunek 2. Magistrala wodociągowa 400 mm na obszarze zurbanizowanym



Rysunek 3. Magistrala wodociągowa 900 mm na obszarze zurbanizowanym

Wyniki analizy przeprowadzonej dla dwóch różnych średnic rurociągów układanych na obszarze zurbanizowanym przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

W projekcie magistrali 400 mm, na obszarze zurbanizowanym PE okazuje się być najtańszym rozwiązaniem pod kątem kosztów instalacji i o najniższym koszcie pełnego cyklu życia pomimo tego, że jest znacząco droższy od rur GRP. Pomimo dodatkowego kosztu urządzenia do zgrzewania doczołowego dłuższe odcinki rur owocują niższymi kosztami instalacji. Węższe wykopy również obniżają koszty instalacji, jako że koszt odtwarzania powierzchni dróg jest wysoki.

W przypadku magistrali 900 mm, rura GRP jest znacząco tańsza od rury PE i pomimo niższych kosztów układania, różnicy tej nie można zniwelować. Jednakże, jak mówiono wcześniej, ostatnio odnotowano

bardzo kosztowne awarie rurociągów GRP, które znacząco zmieniają statystyki. Co więcej, awarie te doprowadziły do rezygnacji brytyjskiej branży wodociągowej ze zastosowania tych rur w warunkach krytycznych.

Na obszarach wiejskich, sytuacja jest cokolwiek inna, gdyż koszty odtwarzania nawierzchni są znacząco niższe. Dlatego też, o ile PE daje niższe koszty w przypadku magistrali 400 mm, zarówno żeliwo sferoidalne (DI), jak i GRP są tańsze dla projektu 900 mm. W takich okolicznościach muszą być brane pod uwagę inne czynniki, jak na przykład niezaprzeczalnie większa niezawodność systemów rurowych z PE, co pokazują statystyki awaryjności rozdzielczych sieci wodociągowych.

7. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Obecnie w większości krajów europejskich systemy rurowe z PE są uznane za najlepszy materiał do budowy wodociągowych sieci rozdzielczych i przyłączy domowych. Jednakże do budowy magistral wodociągowych są wybierane inne materiały, a w szczególności żeliwo sferoidalne. Wybór ten jest zazwyczaj oparty na tradycji, „zawsze używaliśmy rur żeliwnych”, lub wynika z obaw związanych z jakością połączeń lub właściwościami wytrzymałościowymi rur PE. Artykuł ten odnosi się do tych problemów i pokazuje, że niemalże we wszystkich przypadkach unikatowe właściwości PE oferują korzyści dla wykonawcy i operatora systemu.

Często wybór materiału rurociągu magistralnego jest oparty na koszcie rury a nie na pełnej analizie kosztów budowy i przyszłych kosztów eksploatacji. W artykule wykazano, że przy uwzględnieniu we wstępnej analizie kosztów projektu wszystkich czynników, najbardziej ekonomiczne rozwiązanie może się zmienić i w wielu przypadkach najlepszym rozwiązaniem staje się PE.

Jednak docelowo to nie koszt będzie nadrzędnym czynnikiem, ponieważ, gdy woda staje się towarem deficytowym, rolę tą przejmie trwałość i niezawodność systemu. W tych warunkach odporność na korozję i szczelność połączeń rur PE uczyni je jedynym wyborem niezależnie od średnicy.

„Whisky jest do picia. O wodę trzeba walczyć..”Mark Twain

BIBLIOGRAFIA

- AMI Consulting, „The market for thermoplastic pressure pipe systems”, May 2003
- W. Becker & M.A. Shepherd, „Replacing London’s Victorian Water Mains”, *Plastics Pipes XIII*, Washington, 2006
- Manual of British Water Engineering Practice, volume 3 – 4th Edition, p158.
- PERseus European Pipeline Design Software (version 2000), Bodycote – PDL. Hydraulic Research Laboratories, Wallingford.
- L-E. Janson, „Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal”, 2003, p205
- L-E. Janson, „Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal”, 2003, p215
- Structural design specification BS EN 1295
- J. Boot et al. „Taking the stress and strain out of buried thermoplastics pipe design”, *Plastics Pipes IX*, Edinburgh, 1995.
- F. Alferink, „Design of buried thermoplastic pipes”, TEPPFA, 1999.
- F. Alferink, „Soil-pipe interaction: a next step in understanding and suggestions for improvements of design methods”, *Plastics Pipes XI*, Munich, 2001
- H. Nishimura et al, „Earthquake resistance – evaluation of polyethylene pipes”, 3R International 40,2001
- L-E. Janson, „Method of tightness testing of plastics pressure pipelines”, *Plastics*

Pipes VIII, Eindhoven, 1992

- G.P. Marshall, et al, „The development of a mains pressure test for PE & PVC pressure pipes”, Plastics Pipes IX, Edinburgh, 1995
- F. Fontenay, et al „Review of properties of pipe and fitting materials for drinking water”, Force Technology Report, 2005
- S. McKellar, „Leakage survey in UK” Plastics Pipes XIII, Washington, 2006