Henryk Pełka

Metoda optymalnego wyboru rurociągów sieci wodociągowej do renowacji

Renowacja przewodów sieci wodociągowej jest jednym z elementów modernizacji systemu dystrybucji wody podejmowanej wówczas, gdy istniejący system nie spełnia należycie swoich zadań lub gdy nie jest w stanie sprostać zwiększonemu ich zakresowi [1]. W pierwszym przypadku powodem modernizacji jest niewystarczająca niezawodność działania systemu, wynikająca z następujących przyczyn:

– wadliwego rozwiązania technicznego systemu,
– nadmiernej uszkadzalności jego elementów składowych,
– nadmiernych strat wody w sieci,
– nadmiernego obniżenia ciśnienia w sieci,
– wtórnego zanieczyszczenia wody w sieci,
– wzrostu zapotrzebowania na wodę ponad zdolność produkcyjną systemu [1].

W drugim wypadku modernizację systemu wymusza rozbudowa miasta, czy aglomeracji, i związane z tym powiększenie obszaru zaopatrywanego w wodę, a także zwiększenie zapotrzebowania na wodę. W obydwu wypadkach podstawę do racjonalnej decyzji o sposobie i zakresie modernizacji stanowi rzetelna znajomość obecnego i prognozowanego stanu technicznego systemu dystrybucji wody i warunków jego działania [1]. Najbardziej wiarygodna jest ocena istniejącego i prognozowanego stanu technicznego systemu, dokonana na podstawie kompleksowych badań i pomiarów terenowych, uzupełnionych analizami i symulacjami komputerowymi [2–9]. Program takich badań i analiz powinien być opracowany na podstawie szczegółowych informacji o systemie [2,8–11].

Badania poprzedzające renowację sieci wodociągowej

Kompleksowe badania sieci wodociągowej powinny umożliwić określenie następujących elementów:

– wskaźników uszkadzalności elementów systemu i kosztów ich napraw [12–15],
– wskaźnika niezawodności systemu [14,15],
– charakterystyk wydajności, sprawności i mocy agregatów pompowych,
– zapotrzebowania na wodę i sieciowych strat w systemie, a lepiej w jego wydzielonych rejonach [3,16–19],
– wysokości ciśnień w węzłach sieci i w źródłach zasilania, dla różnych wartości krótkotrwałych poborów wody [2,5,8,11],
– oporności hydraulicznej wszystkich czynnych rurociągów [2,4,8,11,20–22],
– kosztów eksploatacji i napraw pompowni, sieci i zbiorników.

Dr inż. H. Pełka: Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50–370 Wrocław

Tak opisany stan wyjściowy istniejącego systemu daje podstawy do prognozowania jego stanu po dalszej eksploatacji, a także do programowania działań dotyczących usprawnienia, modernizacji i dostosowania systemu do jego przyszłych zadań. Wszechstronne badania systemu umożliwiają również wykazanie wszelkich nieprawidłowości w pracy systemu i wyjaśnienia ich przyczyn, jak np. zbyt niskie ciśnienie wody u odbiorców, nadmierne sieciowe straty wody i nadmierne straty ciśnienia w sieci, zbyt duże koszty ruchu pompowni itp.

Renowacja sieci wodociągowej zapewni podwyższenie ciśnienia w sieci, zmniejszenie sieciowych strat wody, poprawę jakości wody wtórnie zanieczyszczonej osadami z rurociągów, zmniejszenie uszkadzalności sieci i kosztów jej napraw, zwiększenie niezawodności całego systemu i obniżenie zużywanej w pompowniach energii elektrycznej, a także zwiększenie dostawy wody do odbiorców.

Renowacja przewodów wodociągowych obejmuje następujące elementy:

– czyszczenie mechaniczne wnętrza rurociągów z osadów, inkrustacji i resztek starej izolacji wewnętrznej,
– wykonanie nowej wewnętrznej powłoki izolacyjno-wzmacniającej,
– wymianę zasuw i ewentualnie hydrantów,
– wymianę przyłączy domowych.

Ze względu na duże koszty tak ujętej renowacji rozkłada się ją na dłuższy okres, tj. na kilka, kilkanaście lub więcej lat. Konieczne jest zatem opracowanie na wstępie programu renowacji obejmującego co najmniej kilka najbliższych lat. Program ten powinien być wykonany na podstawie wyników kompleksowych badań stanu systemu wspomnianych na wstępie. O wyborze i uszeregowaniu kolejności rurociągów do renowacji mogą decydować kryteria ekonomiczne i pozaekonomiczne, a także względy techniczne i społeczne [3,9].

Kryteria wyboru rurociągów do renowacji

Kryterium ekonomiczne stanowi warunek minimalizacji sumy rocznych kosztów renowacji wybranych rurociągów, kosztów energii niezbędnej do pokonania nadmiernych oporów przepływu wody przez układ rurociągów, kosztów napraw rurociągów, a także kosztów strat wody na przecieki przez nieszczelności rurociągów. Kryteria pozaekonomiczne to głównie konieczność poprawy wysokości ciśnienia na określonych obszarach sieci, poprawy jakości wody wtórnie zanieczyszczonej przez osady zalegające w rurociągach i inne.

Założenia wstępne

Metoda wyboru rurociągów polega na poszukiwaniu takiego ciśnienia w pompowniach zasilających, przy którym wskaźnik efektywności ekonomicznej renowacji sieci (ER_s) osiąga najmniejszą wartość. Po opracowaniu na tej podstawie programu renowacji w danym etapie sprawdza się, czy sieć po takiej renowacji będzie spełniać przyjęte ograniczenia techniczne. Jeśli któreś z ograniczeń technicznych tego wymaga, następuje odpowiednia korekta programu. Analogiczna procedura obowiązuje w odniesieniu do wszystkich kolejnych etapów z tym, że w obliczeniach odnoszących się do kolejnego etapu uwzględnia się odpowiednio zaktualizowaną strukturę i prognozę stanu sieci i fakt, że rurociągi wybrane do renowacji w poprzednich etapach zostały jej poddane.

Jako kryteria optymalizacji w opracowanej metodzie, odnoszącej się do pompowych systemów dystrybucji wody, przyjęto minimum wskaźnika efektywności ekonomicznej renowacji wybranych rurociągów sieci (ER_s), nadających się do tego zabiegu, na który składają się:

– koszty renowacji wybranych rurociągów (I_r),

– różnica kosztów eksploatacji układu dystrybucji wody (K_e), wynikająca z poddania renowacji jedynie wybranych, a nie wszystkich rurociągów sieci nadających się do tego zabiegu.

Pod nazwą rurociągi nadające się do renowacji należy rozumieć rurociągi żeliwne i stalowe o wystarczającej wytrzymałości mechanicznej, nie poddane wcześniej procesowi renowacji i nie przewidziane do wymiany i kasacji w ramach zaplanowanej modernizacji i rozbudowy systemu dystrybucji wody. Do określenia różnicy K_e konieczna jest znajomość sprawności hydraulicznej sieci, uszkadzalności jej przewodów, rozkładu ciśnień i strat wody w sieci. Do opracowania optymalnego wyboru rurociągów do renowacji przyjęto następujące założenia:

– oporność właściwa żeliwnych i stalowych rurociągów eksploatowanej sieci wodociągowej jest określona na podstawie odpowiednich badań sieci *in situ*, albo, przy braku badań, na podstawie formuł empirycznych; w przypadku rurociągów z innych materiałów należy przyjąć ich prognozowaną oporność,

– wewnętrzna średnica rurociągów żeliwnych i stalowych po renowacji (d_r) jest mniejsza od średnicy rurociągu nowego o podwójną grubość wykładziny,

– zastępcza chropowatość piaskowa rurociągów po renowacji (k_r) zależy od przyjętej metody renowacji,

– jednostkowy koszt renowacji rurociągu (K_r) będzie określony na podstawie rzeczywistych kosztów renowacji rurociągów o tej samej średnicy,

– jednostkowy koszt napraw rurociągów przed renowacją liczony na 1 m rurociągu będzie określony na podstawie kosztów napraw w roku poprzednim, z uwzględnieniem intensywności uszkodzeń,

– jednostkowy koszt napraw rurociągu po renowacji liczony na 1 m rurociągu będzie określony na podstawie średnich kosztów napraw rurociągów o danej średnicy, poddanych renowacji w latach poprzednich lub na podstawie literatury technicznej,

– koszty energii elektrycznej zużywanej na tłoczenie wody do sieci po renowacji wszystkich rurociągów żeliwnych i stalowych nadających się do renowacji są kosztami minimalnymi,

– jednostkowy koszt energii elektrycznej będzie określony jako średni koszt jednostkowy z poprzedniego roku, pokrywany przez dane przedsiębiorstwo wodociągowe, za moc zainstalowaną i czynną,

– jednostkowy koszt strat wody na przecieki z sieci liczony na 1 m sieci będzie określony na podstawie rzeczywistych kosztów produkcji wody i rzeczywistej wielkości strat wody w roku poprzednim,

– inne koszty eksploatacyjne, jak i koszty działalności przedsiębiorstwa nie związane z procesem renowacji, zostają pominięte.

Sformułowanie zadania

Kryterium optymalnego wyboru przewodów sieci wodociągowej do renowacji stanowi minimum wartości wskaźnika efektywności ekonomicznej renowacji sieci (ER_s, zł/m^3) zdefiniowanego wzorem:

$$ER_s = [I_r (r + s) + K_e] \, w^{-1} \tag{1}$$

w którym:
I_r – koszt renowacji wybranych l rurociągów, zł,
r – stopa dyskonowa,
s – średnia stopa amortyzacji rurociągów,
K_e – różnica rocznego kosztu eksploatacji układu dystrybucji wody po renowacji wybranych l rurociągów sieci, zł/a; jest ona równa różnicy kosztu eksploatacji układu po renowacji wybranych l rurociągów dla danego etapu i kosztu eksploatacji sieci w warunkach, gdyby renowacją objęto wszystkie rurociągi nadające się do renowacji,
w – średnia roczna dostawa wody, m^3/a.

Koszt renowacji wybranych rurociągów

Jednostkowy koszt renowacji rurociągu wykładziną cementową jest proporcjonalny do jednostkowego kosztu jego budowy [23] i w niewielkim stopniu zależy od grubości warstwy wyścielających go osadów, czy też od chropowatości powierzchni jego ścian. Koszt renowacji wybranych l rurociągów (zł) wynosi:

$$I_r = \sum_{i=1}^{l} K_{ri} L_i \tag{2}$$

gdzie:
l – liczba rurociągów wybranych do renowacji, w kolejnym wariancie renowacji danego etapu,
L_i – długość i-tego rurociągu, m,
K_{ri} – jednostkowy koszt renowacji i-tego rurociągu, zł/m; jego wartość można określić na podstawie informacji o rzeczywistych kosztach renowacji rurociągów o tej samej średnicy, wykonanej w podobnych warunkach [23].

Różnica kosztów eksploatacji układu dystrybucji wody

Różnica kosztów eksploatacji układu dystrybucji wody (K_e), wynikająca z objęcia renowacją jedynie wybranych l rurociągów, a nie wszystkich rurociągów nadających się do renowacji, wynosi:

$$K_e = \Delta El_r + \Delta K_n + \Delta K_s \tag{3}$$

gdzie:
ΔEl_r – różnica kosztów energii elektrycznej zużytej w pompowniach na pokonanie oporów hydraulicznych sieci po renowacji l rurociągów i kosztów energii elektrycznej, jaka zużywana byłaby po renowacji wszystkich rurociągów nadających się do renowacji, zł/a,

ΔK_n – różnica kosztów napraw sieci po renowacji wybranych l rurociągów i kosztów napraw sieci, jakie wystąpiłyby po renowacji wszystkich rurociągów nadających się do tego zabiegu, ΔK_s – różnica kosztu strat wody przez nieszczelności i awarie sieci po renowacji wybranych l rurociągów i kosztu tych strat po renowacji wszystkich rurociągów nadających się do renowacji.

Różnica kosztów zużytej energii elektrycznej

Do optymalnego wyboru rurociągów do renowacji istotny jest jedynie koszt energii elektrycznej zużywanej w pompowni na podnoszenie wody ponad wysokość wystarczającą do pokonania oporów hydraulicznych sieci w warunkach, gdy wszystkie nadające się do renowacji rurociągi stalowe i żeliwne są po renowacji i charakteryzują się średnicami (d_r) i chropowatością (k_r), a rurociągi z innych materiałów i nie nadające się do renowacji charakteryzują się prognozowaną średnicą wewnętrzną i chropowatością. Zatem różnicę kosztów energii elektrycznej można obliczyć z równania:

$$\Delta El_r = El_t - El_r \tag{4}$$

gdzie:
El_t – koszt energii elektrycznej zużytej na tłoczenie wody do sieci po renowacji l wybranych rurociągów, zł/a,
El_r – koszt energii elektrycznej zużytej na tłoczenie wody do sieci po jej całkowitej renowacji, zł/a.

Przy założeniu równomiernej pracy każdej j-tej pompowni, zasilającej sieć z wydajnością Q_{tj}, roczny koszt energii elektrycznej (El_t), zużytej przez wszystkie pompownie po renowacji wybranych rurociągów wynosi:

$$El_t = \sum_{j=1}^{z} \varepsilon_j Q_{tj} (H_{gj} + h_{dtj}) \tag{5}$$

gdzie:
ε_j – średni roczny koszt energii elektrycznej zużywanej w j-tej pompowni do podnoszenia 1 m^3/s wody na wysokość 1 m, przy współczynniku sprawności η_j,
Q_{tj} – średnia wydajność j-tej pompowni, m^3/s,
H_{gj} – geometryczna wysokość podnoszenia wody w j-tej pompowni, m,
h_{dtj} – wysokość sumy strat hydraulicznych występujących po renowacji l rurociągów między j-tą pompownią i miarodajnym węzłem końcowym sieci, tj. węzłem, w którym rzędna linii ciśnienia podczas zapotrzebowania wody w ilości $Q_{śrt}$ jest równa wymaganej rzędnej linii ciśnienia,
$Q_{śrt}$ – śr. godzinowe zapotrzebowanie na wodę w dobie o maksymalnym zapotrzebowaniu dobowym, występującym w określonym roku danego etapu programu renowacji ($Q_{śrt}=Q_{maxdt}/24$).

Występującą we wzorze (5) wysokość h_{dtj} można utożsamić z sumą wysokości strat hydraulicznych między j-tym węzłem zasilania a miarodajnym węzłem końcowym sieci, liczonych po dowolnej drodze łączącej te dwa węzły pod warunkiem, że spełnione jest w sieci II prawo Kirchhoffa ($\Sigma_{obw}\Delta h=0$).

Roczny koszt energii elektrycznej (El_r), zużywanej w pompowniach na tłoczenie wody do sieci po jej całkowitej renowacji, można obliczyć wprowadzając do wzoru (5) w miejsce h_{dtj} wysokość h_{rtj}, obliczoną przy tej samej wydajności pompowni Q_{tj} i chropowatości k_r ścian przewodów nadających się do renowacji oraz chropowatości k_t pozostałych rurociągów. Wówczas:

$$El_r = \sum_{j=1}^{z} \varepsilon_j Q_{tj} (H_{gj} + h_{rtj}) \tag{6}$$

gdzie:
h_{rtj} – wysokość strat hydraulicznych w sieci o chropowatości k_r przewodów żeliwnych i stalowych nadających się do renowacji i średnicach d_r, licząc po dowolnej drodze między j-tą pompownią a miarodajnym węzłem końcowym sieci, m.

Wprowadzając do wzoru (4) zależności (5) i (6) otrzymuje się:

$$\Delta El_r = \sum_{j=1}^{z} \varepsilon_j Q_{tj} (H_{dtj} - h_{rtj}) \tag{7}$$

Jeśli w systemie dystrybucji wody występuje tylko jedna pompownia, wówczas wzór (7) uprości się do postaci:

$$\Delta El_{rt} = \varepsilon Q_t (h_{dt} - h_{rt}) \tag{8}$$

Różnica rocznego kosztu napraw sieci

Na skutek renowacji l wybranych rurociągów zmniejszy się intensywność ich uszkodzeń, a tym samym roczny koszt ich napraw, co wpłynie bezpośrednio na obniżenie sumarycznych kosztów napraw całej sieci. Roczna oszczędność w kosztach napraw sieci (ΔK_n, zł/a), którą można uzyskać na skutek renowacji pozostałych m rurociągów nadających się do renowacji, wynosi:

$$\Delta K_n = \sum_{i=1}^{m} (K_{ni} - K_{nri}) L_i \tag{9}$$

gdzie:
K_{ni} – jednostkowy roczny koszt napraw i-tego rurociągu przed jego renowacją, zł/m·a [13],
K_{nri} – jednostkowy roczny koszt napraw i-tego rurociągu po renowacji, zł/m·a,
m – liczba rurociągów nadających się do renowacji po renowacji wybranych l rurociągów, $m=n-n_l-p-l$,
n – liczba wszystkich rurociągów sieci,
n_l – liczba rurociągów nie nadających się do renowacji (rurociągi z PCW, PE, azb.-cem. oraz żeliwne i stalowe o zbyt niskiej wytrzymałości, planowane do kasacji lub do wymiany przy modernizacji ciągów komunikacyjnych i in.),
p – liczba rurociągów poddanych uprzednio renowacji,
l – iczba rurociągów wybranych do renowacji w kolejnym wariancie danego etapu,
L_i – długość i-tego rurociągu, m.

Jednostkowy roczny koszt napraw i-tego rurociągu przed renowacją (K_{ni}) można określić na podstawie statystycznych kosztów napraw w danym mieście, natomiast jednostkowy koszt napraw rurociągu po renowacji (K_{nri}) – na podstawie danych o kosztach renowacji rurociągów w tym mieście lub z innych miast, albo też na podstawie danych literaturowych.

Różnica rocznych kosztów strat wody w sieci

Renowacja rurociągu powoduje jego uszczelnienie i zmniejszenie intensywności uszkodzeń, a tym samym zmniejszenie strat wody na przecieki przez nieszczelności i na skutek awarii, a co za tym idzie, kosztu wody wyciekającej bezużytecznie z sieci. Różnica kosztów strat wody (ΔK_s, zł/a), powstających w rurociągach nadających się do renowacji, przed i po całkowitej renowacji sieci, wynosi:

$$\Delta K_s = \sum_{i=1}^{m} (K_{si} - K_{sri}) L_i \tag{10}$$

gdzie:
K_{si} – jednostkowy koszt strat wody z i-tego rurociągu przed jego renowacją, zł/m·a,
K_{sri} – jednostkowy koszt strat wody z i-tego rurociągu po jego renowacji, zł/m·a,

L_i – długość i-tego rurociągu, m,
m – liczba rurociągów nadających się do renowacji po renowacji wybranych l rurociągów w kolejnym wariancie etapu renowacji.

Jednostkowe straty wody w sieci wodociągowej można oszacować na podstawie danych statystycznych z danego miasta lub z innych podobnych miast, albo też na podstawie danych literaturowych, natomiast jednostkowy koszt wody należy określić jako jednostkowy koszt własny produkcji wody w danym mieście.

Wyznaczenie optymalnego wariantu renowacji sieci

Wprowadzając do wzoru (1) wyrażenia (2), (7), (9) i (10) uzyskuje się rozwiniętą postać wzoru, na podstawie którego można wyznaczyć wartość wskaźnika efektywności ekonomicznej renowacji sieci wodociągowej:

$$ER_s = \frac{1}{w}\left[(r+s)\sum_{i=1}^{l} K_{ri} L_i + \sum_{i=1}^{m}(K_{ni} - K_{nri}) L_i + \sum_{i=1}^{m}(K_{si} - K_{sri}) L_i + \sum_{j=1}^{z} \varepsilon_{tj} Q_{tj} (h_{dtj} - h_{rtj})\right] \quad (11)$$

Minimum wartości wskaźnika efektywności renowacji (ER_s) można obliczyć metodą przeglądu zupełnego wartości obliczonych dla wszystkich wariantów renowacji sieci, odpowiadających technicznie możliwym stanom zasilania sieci, przy założeniu stałych dla danego etapu wydajności pompowni (Q_{tj}) i regulowanych wysokości podnoszenia, osiąganych przez włączenie odpowiedniego zestawu pomp lub zmianę prędkości obrotowej (zastosowanie regulatorów prędkości obrotowej). Znalezienie minimalnej wartości ER_s metodą przeglądu zupełnego wymaga obliczeń bardzo dużej liczby wariantów, wśród których będą warianty techniczne i ekonomiczne nieuzasadnione. W związku z tym proponuje się wprowadzić dodatkowe kryterium ekonomiczne w postaci wskaźnika efektywności ekonomicznej renowacji (E_r) poszczególnych rurociągów.

W celu eliminacji z obliczeń rurociągów, których renowacja nie poprawi w istotny sposób działania układu dystrybucji wody zakłada się, że wybrane zostaną tylko te rurociągi, których renowacja spowoduje zmniejszenie niedoborów ciśnienia w sieci lub wysokości podnoszenia wody w pompowniach. Wybór rurociągów następowałby z drzewa grafu zbudowanego z rurociągów nadających się do renowacji o największym wskaźniku efektywności renowacji i z rurociągów nie nadających się do renowacji, ale o najmniejszej oporności hydraulicznej (aby można było zbudować drzewo grafu).

W każdym kolejnym wariancie renowacji wybiera się, oprócz wybranych uprzednio, tylko jeden rurociąg o największej efektywności renowacji, leżący na jednej z dróg łączących pompownie z węzłem miarodajnym, tj. takim węzłem, w którym ciśnienie jest równe wymaganemu ciśnieniu gospodarczemu. Po każdym kroku (wariancie), czyli po wyborze kolejnego rurociągu, wykonuje się obliczenia hydrauliczne sieci w celu określenia wymaganych wysokości podnoszenia pomp przy założeniu, że ciśnienie w węźle miarodajnym jest równe wymaganemu ciśnieniu gospodarczemu.

Dla każdego wariantu renowacji oblicza się wskaźnik efektywności renowacji sieci ze wzoru (11). Liczba wariantów renowacji jest równa liczbie rurociągów nadających się do renowacji w danym etapie plus wariant pierwszy, dla którego liczba wybranych do renowacji rurociągów jest równa zero (l=0).

Wskaźnik ekonomicznej efektywności renowacji rurociągu

Przy wyborze rurociągu do renowacji najbardziej istotne są następujące czynniki:

– koszty renowacji rurociągu,

– efekt energetyczny renowacji, czyli zmniejszenie kosztów energii elektrycznej zużywanej na pokonanie oporów hydraulicznych w rurociągu,

– zmniejszenie kosztów napraw rurociągu i kosztów strat wody na przecieki na skutek jego renowacji,

– natężenie przepływu wody rurociągiem przed jego renowacją,

– oporność rurociągu zależna od czasu eksploatacji, jakości wody i średnicy przewodu,

– oporność rurociągu po renowacji.

Wskaźnik efektywności ekonomicznej renowacji odcinka rurociągu o długości 1 m można obliczyć ze wzoru:

$$Er_i = [El_{ri} + K_{ni} + K_{si} - I_{ri}(r+s)]\, L_i^{-1} \quad (12)$$

gdzie:
Er_i – wskaźnik efektywności ekonomicznej renowacji i-tego rurociągu, zł/am,
El_{ri} – obniżenie rocznego kosztu energii elektrycznej zużywanej na pokonanie oporów hydraulicznych, przy przepływie wody o natężeniu q_i, osiągnięte na skutek renowacji, zł/a,
K_{ni} – obniżenie rocznych kosztów napraw rurociągu, osiągnięte na skutek jego renowacji, zł/a,
K_{si} – obniżenie rocznych kosztów strat wody z rurociągu, osiągnięte na skutek zwiększenia jego szczelności po renowacji, zł/a,
I_{ri} – koszt renowacji i-tego rurociągu obliczony ze wzoru (2), zł,
r – stopa dyskontowa jak we wzorze (1),
s – stawka amortyzacyjna jak we wzorze (1),
L_i – długość i-tego rurociągu.

Obniżenie rocznego kosztu energii elektrycznej zużywanej na pokonanie oporów przepływu w i-tym rurociągu, osiągnięte na skutek jego renowacji, wynosi:

$$\Delta El_{ri} = \varepsilon\, q_i\, (h_i - h_{ri}) \quad (13)$$

gdzie:
ε – średni roczny koszt energii elektrycznej podnoszenia wody o natężeniu 1 m^3/s na wysokość 1 m, zł/a,
q_i – natężenie przepływu wody w rurociągu przed renowacją, m^3/s,
h_i – strata hydrauliczna w rurociągu przed renowacją, m,
h_{ri} – strata hydrauliczna w rurociągu po renowacji dla natężenia przepływu q_i, m.

Uwzględniając we wzorze (13) zależność:

$$h_i = C_i\, L_i\, q_i^2 \quad (14)$$

oraz

$$h_{ri} = C_{ri}\, L_i\, q_i^2 \quad (14)$$

otrzymuje się:

$$\Delta El_{ri} = \varepsilon\, q_i^3\, (C_i - C_{ri}) L_i \quad (15)$$

gdzie:
C_i – współczynnik oporności właściwej rurociągu przed renowacją, s^2/m^6 [20,21],

C_{ri} – współczynnik oporności właściwej rurociągu po renowacji, s^2/m^6.

Podczas eksploatacji oporność rurociągu żeliwnego rośnie na skutek wzrostu chropowatości piaskowej i zmniejszania się jego średnicy wewnętrznej [20,21,24], co należy uwzględnić przy obliczaniu oporów przepływu wody [20].

Algorytm optymalnego wyboru rurociągów do renowacji

Optymalny wybór rurociągów odbywa się metodą przeglądu zupełnego technicznie możliwych wariantów renowacji, dla przyjętego stanu zasilania systemu, według następującego algorytmu programu RENOS.

1. Obliczenie hydrauliczne sieci przy założeniu, że wszystkie rurociągi nadające się do renowacji są po renowacji. Obliczenia hydrauliczne wykonuje się przy średnim godzinowym rozbiorze wody ($Q_{śrt}$) oraz zadanych wydajnościach pompowni (Q_{tj}) w dobie o zużyciu maksymalnym w ostatnim roku etapu programowania.

2. Obliczenie rzędnych linii ciśnienia w węzłach sieci i w pompowniach oraz strat hydraulicznych (h_{dtj}) między pompowniami i węzłem miarodajnym, występujących w warunkach jak w p. 1. W obliczeniach rzędnych przyjmuje się, że ciśnienie w węźle miarodajnym jest równe wymaganemu ciśnieniu gospodarczemu.

3. Obliczenie hydrauliczne sieci dla warunków zasilania jak w p. 1, lecz przy założeniu, że sieć jest po renowacji wybranych do tego zabiegu l rurociągów. W pierwszym wariancie renowacji liczbę wybranych rurociągów przyjmuje się równą zeru (l=0).

4. Obliczenie rzędnych linii ciśnienia w węzłach, wysokości podnoszenia pomp w pompowniach, a także strat hydraulicznych (h_{dtj}) między pompowniami i węzłem miarodajnym, występujących w sieci po renowacji wybranych l rurociągów.

5. Obliczenie wskaźnika efektywności ekonomicznej renowacji sieci ze wzoru (11), przy czym w pierwszym wariancie (kroku) koszt renowacji (I_r) wchodzący do tego wzoru będzie równy zeru, jako że żaden rurociąg nie został w tym wariancie poddany renowacji.

6. Obliczenie wskaźników renowacji rurociągów nadających się do renowacji, przy wykorzystaniu wzoru (12).

7. Budowa drzewa grafu renowacji składającego się z rurociągów o możliwie wysokich wskaźnikach efektywności renowacji. Na odcinki domykające obwody wybiera się rurociągi nie nadające się do renowacji o najwyższej oporności hydraulicznej, a gdy takich brak w obwodzie – rurociągi o najniższym wskaźniku efektywności renowacji.

8. Wybór z drzewa grafu dróg renowacji łączących pompownie z węzłem miarodajnym wyznaczonym w obliczeniach rzędnych ciśnienia w p. 4. Dróg renowacji jest tyle ile jest pompowni.

9. Wybór z wyznaczonych w p. 8 dróg renowacji jednego rurociągu o najwyższym wskaźniku efektywności renowacji.

10. Wykonanie obliczeń według p. 3–8 tyle razy, ile jest rurociągów nadających się do renowacji.

11. Wybór optymalnego wariantu renowacji charakteryzującego się najniższą wartością wskaźnika ER_s.

Do ograniczeń technicznych, jakie wymagają spełnienia przez sieć po renowacji, zalicza się:

– utrzymanie we wszystkich węzłach sieci odpowiedniego ciśnienia, niezależnie od warunków rozbioru wody,

– nie przekroczenie dopuszczalnych przez przepisy lub projektanta maksymalnych ciśnień we wszystkich rurociągach sieci, niezależnie od warunków rozbioru wody,

– nieuwzględnienie w programie renowacji rurociągów z PCW, PE, azbestowo-cementowych oraz tych, które mogłyby ulec zniszczeniu podczas ich czyszczenia, a także tych, które zostały poddane renowacji w poprzednich etapach renowacji,

– nie przekroczenie dopuszczalnych przez przepisy maksymalnych prędkości przepływu wody we wszystkich rurociągach sieci, niezależnie od warunków rozbioru wody,

– uwzględnienie w programie renowacji maksymalnych dopuszczalnych ciśnień, jakie mogą być uzyskane w pompowni i w rurociągu tranzytowym,

– uwzględnienie w programie renowacji tych rurociągów, które ze względu na konieczność wymiany przyłączy do nich lub ze względu na konieczność przebudowy ulicy muszą być poddane renowacji w danym etapie.

Ponadto sieć powinna spełniać swoje zadanie również w warunkach wyjątkowych, takich jak:

– awarie pompowni,

– awarie magistralnych rurociągów sieci,

– gaszenie pożarów.

Korekta programu renowacji sieci, wynikająca z analizy pracy sieci w warunkach wyjątkowych, jak również wynikająca z przytoczonych ograniczeń technicznych, może być realizowana w większości przypadków przez omawiany algorytm, po odpowiednim wprowadzeniu danych do programu.

W przypadkach, gdy:

– na skutek wzrostu zapotrzebowania na wodę lub kasacji wielu rurociągów sieć ma za małą przepustowość, nawet po całkowitej jej renowacji, tzn. ciśnienie w niektórych węzłach sieci, rurociągach tranzytowych i w pompowniach przekroczyłoby wartości dopuszczalne,

– prędkości przepływu przekroczą wartości określone przez normę, mimo całkowitej renowacji sieci,

konieczna jest rozbudowa sieci, którą można zaprojektować korzystając z programu SWH1 do analizy działania sieci wodociągowej, opracowanego w Instytucie Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej.

LITERATURA

1. E. W. MIELCARZEWICZ: Zasady modernizacji systemów dystrybucji wody. Mat. konf. „Modernizacja wodociągów i kanalizacji – aspekty finansowe, organizacyjne i techniczne", PZITS, Warszawa 1996, ss. 95–106.

2. Z. LEWICKI, E. W. MIELCARZEWICZ: Ocena sprawności hydraulicznej eksploatowanych sieci wodociągowych. Mat. XIII konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi", PZITS, Poznań 1994, s. 631.

3. E. W. MIELCARZEWICZ i inni: Optymalne programowanie eksploatacji (renowacji) sieci wodociągowych ze względu na ich sprawność hydrauliczną i niezawodność działania. Projekt badawczy KBN, nr 60339.91.01, Wrocław 1993.

4. E. W. MIELCARZEWICZ, J. WARTALSKI: Systemy zaopatrzenia w wodę i usuwania ścieków. Wybrane zagadnienia. Wyd. PWr., Wrocław 1990.

5. H. PEŁKA: Wzrost oporności hydraulicznej przewodów wodociągowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1977.

6. H. PEŁKA, E. W. MIELCARZEWICZ: Oporność hydrauliczna eksploatowanych przewodów wodociągowych. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi", PZITS, Poznań 1992.

7. H. PEŁKA, E. W. MIELCARZEWICZ: Wyniki badań procesu wzrostu oporności przewodów wodociągowych. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi", PZITS, Poznań 1994.

8. Z. SIWOŃ: Wybrane problemy praktycznych zastosowań komputerowych modeli sieci wodociągowych. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi", PZITS, Poznań 1996, ss. 549–560.

9. Z. SIWOŃ, S. BOGACZEWICZ, J. CIEŻAK: Badania przedprojektowe czynnych sieci wodociągowych. GWiTS, 1996, nr 4, ss. 123–127.

10. W. HIRNER: Criteria for planning and establishing priorities for distribution network rehabilitation. IWSA Regional Conference „Rehabilitation", Zürich 1994, p. 45.

11. Z. LEWICKI: Programowanie badań czynnych sieci wodociągowych w aspekcie oceny ich sprawności hydraulicznej. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi", PZITS, Poznań 1994, s. 617.

12. H. HOTLOŚ, E. W. MIELCARZEWICZ: Analiza uszkodzeń przewodów sieci wodociągowej w Oleśnicy. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi", PZITS, Poznań 1994, s. 957.

13. H. HOTLOŚ, E. W. MIELCARZEWICZ: Intensywność uszkodzeń i kosztów napraw przewodów sieci wodociągowych. GWiTS, 1996, nr 1, s. 25.

14. M. KWIETNIEWSKI, M. ROMAN, H. KŁOSS-TRĘBACZKIEWICZ: Niezawodność wodociągów i kanalizacji. Arkady, Warszawa 1993.

15. A. WIECZYSTY: Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych, cz. I i II. Wyd. PK., Kraków 1990.

16. P. DOHNALIK, T. ZAPIÓR: Rzeczywiste straty wody w systemach wodociągowych regionu południowej polski. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi", PZITS, Poznań 1996, s. 509.

17. A. KOTOWSKI, H. HOTLOŚ: Analiza porównawcza struktury i wielkości zużycia wody w wybranych miastach. GWiTS, 1994, nr 7, s. 199.

18. A. KOTOWSKI, H. HOTLOŚ: Ocena wielkości strat wody w sieciach wodociągowych wybranych miast. GWiTS, 1994, nr 8, s. 254.

19. Z. SIWOŃ: Stochastyczne modelowanie procesu zużycia wody i prognozowanie zapotrzebowania na wodę w miastach. Prace Naukowe Inst. Inż. Ochr. Środow. PWr. nr 56, seria Monografie nr 25, Wrocław 1986.

20. E. W. MIELCARZEWICZ, H. PEŁKA: Podstawy programowania renowacji przewodów wodociągowych. Prace Naukowe Inst. Inż. Ląd. PWr. nr 46, seria Konferencje nr 17, Wrocław 1996, ss. 164–171.

21. E. W. MIELCARZEWICZ, H. PEŁKA: Hydraulic characterization of old water pipelines. EPE (w druku).

22. Z. SIWOŃ, S. BOGACZEWICZ, J. CIEŻAK: Analiza procesu wzrostu hydraulicznej oporności eksploatowanych przewodów wodociągowych. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi", PZITS, Poznań 1996, ss. 535–548.

23. H. HOTLOŚ, H. PEŁKA: Analiza kosztów renowacji i budowy przewodów sieci wodociągowej we Wrocławiu. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi", PZITS, Poznań 1996, tom III, ss. 421–432.

24. T. GUDRA, E. W. MIELCARZEWICZ, H. PEŁKA: Ultradźwiękowa metoda pomiaru średnicy wewnętrznej czynnych przewodów wodociągowych. GWiTS, 1996, nr 9, ss. 339–341.

On the Optimum Choice of Water Pipes for Rehabilitation

The economic criterion involves minimization of the following items: the total annual rehabilitation costs for suppressing excess flow resistance in the water-pipe network, the costs of pipe damage repair, and the costs of water loss due to leakage.

The method by which an optimum choice can be achieved consists in providing the pumping stations with such pressures that allow the effectiveness ratio of network rehabilitation to be kept at the lowest possible value.