

Lokalizacja wycieków z rurociągów

Ryszard Sobczak

Przedstawiono podstawy fizyczne, koncepcję oraz uzyskane wyniki badań symulacyjnych i obiektowych względnie tanich i szybkich procedur wykrywania i lokalizacji wycieków cieczy z rurociągów dalekiego zasięgu. Szybka lokalizacja i likwidacja wycieku cieczy tłoczonych w rurociągu – to sprawy bardzo ważne dla ochrony środowiska i oszczędności.

Wycieki produktów tłoczonych rurociągami dalekiego zasięgu na ogół powodują skażenie środowiska i straty ekonomiczne (koszty rekultywacji terenu i utrata części tłoczonego produktu). Od wielu lat są prowadzone prace nad urządzeniami i metodami, które zapewniłyby wykrycie, lokalizację i oszacowanie natężenia wycieku, aby umożliwić jego szybką likwidację.

W artykule przedstawiono system wykrywania pojawienia się wycieku i jego lokalizacji, opracowany w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów (PIAP) przy współpracy z Przedsiębiorstwem Eksploatacji Rurociągów Naftowych „PRZYJAŻŃ” (PERN), oraz wyniki badań tego systemu. Badania wykonano na wytypowanej przez PERN instalacji, która zawierała rurociąg o średnicy około 310 mm i długości około 125 km. System ten jest uniwersalny, można go adaptować do dowolnej instalacji tłoczenia cieczy.

Prace obejmowały pełny cykl badawczy, w tym:

- zainstalowanie na rurociągu przetworników pomiarowych i podłączenie ich do istniejącego już systemu informatycznego PERN,
- zainstalowanie układu mikroprocesorowego do rejestracji i archiwizacji danych pomiarowych oraz sprzężenie tego układu z systemem informatycznym PERN,
- opracowanie modelu matematycznego procesu tłoczenia [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] i weryfikacja modelu oparta na wynikach pomiarów na obiekcie,
- opracowanie procedur wykrywania i lokalizacji wycieków,
- badania symulacyjne i obiektowe ww. procedur.

Instalacja

Uproszczony schemat instalacji pokazano na rys. 1. Ciecz pobierana jest ze zbiornika ZA i za pomocą pompy głównej 2, wspomaganej pompą podporową 1, przetrzaczana do zbiornika ZB. Zakłada się, że między pompą główną i zbiornikiem ZB nie występują odgałęzienia bądź zbiorniki retencyjne.



Rys. 1

Dr inż. Ryszard Sobczak jest adiunktem w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów. Od kilkunastu lat zajmuje się symulacją i automatyzacją procesów przemysłowych.

Rzeczywista instalacja jest bardziej złożona, gdyż:

- składa się z m zbiorników ZA_m oraz n zbiorników ZB_n , o różnych stopniach wypełnienia i zawierających media zwykle o różnych parametrach fizycznych; w zależności od potrzeb tłoczenie przełączane jest na odpowiednie zbiorniki,
- tłoczenie odbywa się przy użyciu jednej lub dwóch pomp głównych.

Każda zmiana, czy to liczby pomp tłoczących, czy też zbiornika ZA lub ZB powoduje skokowe zakłócenie ciśnienia na początku lub na końcu rurociągu. Ponadto, jeżeli przez rurociąg płyną jednocześnie dwa media (lub więcej), to zasadniczo zmienia się rozkład gradientów ciśnienia.

Rurociąg wyposażony jest w przyrządy do pomiarów m.in:

- strumienia objętości za pompą i przed zbiornikiem ZB,
- ciśnienia za pompą, przed zbiornikiem ZB oraz przed każdą z kilkunastu stacji zasuw, rozmieszczonych wzdłuż rurociągu,
- temperatury w miejscach pomiaru ciśnienia.

System komputerowy przetwarza wyniki pomiarów na sygnały cyfrowe i z okresem próbkowania T_o przesyła do centralnej dyspozytorskiej procesowi. Dla uzyskania dużej dokładności lokalizacji wycieku okres próbkowania powinien być możliwie jak najkrótszy (dziesiątne lub nawet setne części sekundy). W rozpatrywanej instalacji w PERN okres próbkowania T_o skrócono z 5 min do 3 s; dalsze skracanie T_o wymagałoby zbyt dużych zmian wdrożonego już oprogramowania systemu.

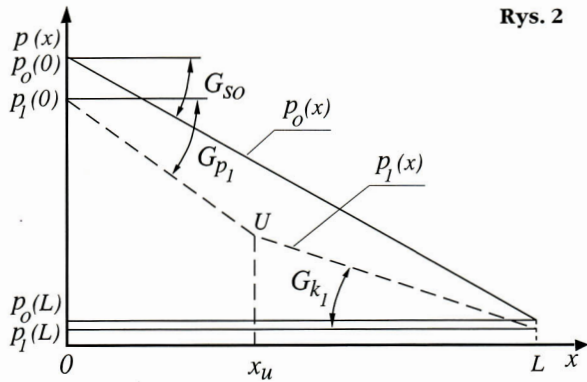
Podstawy fizyczne procedur wykrywania i lokalizacji wycieków

Założmy, że:

- rurociąg jest ułożony poziomo i jego średnica wewnętrzna na całej długości jest stała $d(x) = const$,
- przez rurociąg płynie jedno medium, współczynnik tarcia $\lambda(x) = const$, strumień objętości $Q(x) = const$, gęstość tłoczonego medium $\rho(x) = const$.

Dla takiej sytuacji rozkłady ciśnień pokazano na rys. 2, na którym:

- indeks „0” – dotyczy stanu ustalonego bez wycieku,
- indeks „1” – dotyczy stanu ustalonego w przypadku wycieku w odległości $x = x_w$,
- x – odległość od początku rurociągu,
- $p(x)$ – rozkład ciśnienia wzdłuż rurociągu,
- L – długość rurociągu.



Rys. 2

Przy braku wycieku (linia ciągła na rys. 2), ciśnienie $p_0(x)$ zmienia się liniowo:

$$p_0(x) = p_0(0) - G_{so} \cdot x \quad (1)$$

gdzie:

$p_0(0)$ – ciśnienie na początku rurociągu (dla $x = 0$),
 G_{so} – średni gradient ciśnienia.

Bieżące wartości $p_0(x)$ oraz $Q_0(x)$ są względnie stabilne, zakłócone jedynie szumami pomiarowymi o zerowej wartości średniej.

Gdy pojawi się wyciek medium o natężeniu Q_u w odległości x_u , wówczas w miejscu wycieku następuje szybki spadek ciśnienia. Powoduje on tzw. falę rozprężeniową, która rozchodzi się w obu kierunkach z prędkością dźwięku c . Wartość c zależy głównie od parametrów fizycznych tłoczonego medium (gęstości, współczynnika ściśliwości) i w niewielkim stopniu od parametrów rurociągu (w badanej instalacji $c = 1000 \div 1400$ m/s, w zależności od rodzaju medium).

Za czołem fali rozprężeniowej ciśnienie w rurociągu maleje o wartość tym mniejszą, im większa jest odległość danego przekroju od miejsca wycieku. Po pewnym czasie dochodzi do nowego stanu ustalonego, przy którym:

◆ rozkład strumienia objętości $Q_i(x)$:

$$\text{dla } x < x_u : Q_i(x) = Q_i(0) = \text{const} \quad (2.1)$$

$$\text{dla } x > x_u : Q_i(x) = Q_i(L) = Q_i(0) - Q_u = \text{const} \quad (2.2)$$

$$\text{przy czym: } Q_i(0) > Q_0(0), Q_i(L) < Q_0(L) \quad (2.3)$$

◆ rozkład ciśnienia $p_i(x)$ stanowi linię łamaną (linia przerywana na rys. 2), którą tworzą dwie półproste, przecinające się w punkcie U , a gradienty ciśnienia:

$$\text{dla } x < x_u : G_{pl} < G_{so} \quad (3.1)$$

$$\text{dla } x > x_u : G_{kl} > G_{so} \quad (3.2)$$

Jednocześnie $p_i(0) - p_0(0) < 0$ (różnica ta zależy od charakterystyki pompy oraz natężenia i miejsca wycieku), natomiast gdy w zbiorniku ZB nad lustrem cieczy jest ciśnienie atmosferyczne, wówczas $p_i(L) \cong p_0(L)$.

Przy stałym strumieniu objętości $Q(x)$ gradient ciśnienia zależy od iloczynu $\lambda \rho$. Jeśli przez rurociąg płynie jednocześnie kilka mediów o różnych współczynnikach tarcia λ i różnych gęstościach ρ , to rozkład ciśnienia wzdłuż rurociągu jest linią łamaną (przesuwającą się w czasie z prędkością przepływu medium) również przy braku wycieku. To bardzo komplikuje procedury zarówno lokalizacji wycieku, jak i wyznaczania jego natężenia. Aby nie zaciemniać obrazu omawianej metody, w artykule przypadek ten pominięto.

Wykrywanie, lokalizacja i wyznaczenie natężenia wycieku

Zjawiska fizyczne towarzyszące wyciekowi pozwalają na wykrycie wycieku oraz wyznaczenie jego miejsca i natężenia poprzez analizę przyrostów ciśnień Dp_i i strumieni objętości DQ_i między chwilą bieżącą t i stanem bez wycieków. Za stan bez wycieku przyjmuje się przy tym stan z okresu wcześniejszego o τ w stosunku do chwili bieżącej.

Tworzymy zatem nowe zmienne:

$$Dp_i(t) = p_i(t) - p_i(t - \tau) \quad (4.1)$$

$$DQ_i(t) = Q_i(t) - Q_i(t - \tau) \quad (4.2)$$

gdzie:

i – numer punktu pomiarowego (odległego od początku rurociągu o x_i),

$p_i(t)$, $Q_i(t)$ – wartość średnia arytmetyczna z N_i kolejnych wyników pomiarów danego parametru w chwili bieżącej,

$p_i(t - \tau)$, $Q_i(t - \tau)$ – wartość średnia arytmetyczna z N_0 kolejnych wyników pomiarów danego parametru z okresu wcześniejszego o τ w stosunku do chwili bieżącej.

Dla pomiarów przepływu mamy tu oczywiście tylko i , odpowiadające $x = 0$ oraz $x = L$.

Zmienne Dp_i i DQ_i pozwalają wyeliminować błędy systematyczne pomiarów p_i oraz Q_i , a ponadto w równaniu (4.1) zlikwidować wpływ naporu hydraulicznego na pomiary p_i (w związku z czym założenie, że rurociąg jest ułożony poziomo, staje się zbędne).

Przykład przebiegu zmiennych $Dp_i(t)$, zarejestrowany po rzeczywistym wycieku na rurociągu w PERN w pobliżu punktu pomiarowego $i = 6$, pokazano na rys. 4, gdzie odcięta k oznacza numer cyklu pomiarowego (a tym samym czas t , gdyż $t = k \cdot T_0$), natomiast rzędna – wartości $Dp_i(t)$, w których $p_i(t - \tau)$ stanowią wartości średnie z 20 kolejnych pomiarów (tzn. $N_0 = 20$), natomiast $p_i(t)$ – pomiary bieżące (tzn. $N_i = 1$). Jak widać:

◆ **przed wyciekem**

zmienne $Dp_i(t)$ wahają się w niewielkim przedziale w okolicach zera; podobny przebieg powinny wykazywać zmienne $DQ_i(t)$. Wobec tego powinny być spełnione ograniczenia dwustronne:

$$-\partial p_i < Dp_i(t) < +\partial p_i \quad (5.1)$$

$$-\partial Q_i < DQ_i(t) < +\partial Q_i \quad (5.2)$$

gdzie:

∂p_i , ∂Q_i – pewne wartości graniczne, ustalone a priori, a wynikające z czułości układów pomiarowych oraz poziomu i charakteru szumów pomiarowych;

◆ **po wycieku**

– wartości ustalone $Dp_i(t)$ w poszczególnych punktach pomiarowych i są różne, tym mniejsze, im większa jest odległość $|x_i - x_u|$,

– malenie zmiennych $Dp_i(t)$ w poszczególnych punktach i zaczyna się tym później, im większa jest odległość $|x_i - x_u|$:

$$t_{ui} = |x_i - x_u| \cdot c^{-1} \quad (6)$$

Wykrywanie wycieku

Na skutek wycieku ograniczenia (5.1) i (5.2) przestają obowiązywać, natomiast pojawiają się ograniczenia jednostronne:

$$Dp_i(t) < -\delta p_i \quad (7.1)$$

ponadto:

$$\text{dla } x_i = 0, \quad DQ_i(t) > 0 \quad (7.2)$$

$$\text{dla } x_i = L, \quad DQ_i(t) < 0 \quad (7.3)$$

Porównanie w poszczególnych punktach i wartości t_{ui} , Dp_i , a ponadto DQ_i pozwala zatem nie tylko stwierdzić istnienie wycieku, lecz również określić rejon wycieku.

Lokalizacja i wyznaczenie natężenia wycieku

Do zlokalizowania wycieku zastosowano dwie metody: gradientową i opartą na śledzeniu czoła fali rozprężeniowej ciśnienia. Wyznaczenie natężenia wycieku oparto na znajomości przyrostów gradientów ciśnień. **Metoda gradientowa** [7, 8] polega na lokalizacji wycieków na podstawie wyznaczonych przyrostów gradientów ciśnień w stanach ustalonych bez wycieku i z wyciekem (rys. 2).

Przyrosty gradientów wynoszą odpowiednio:

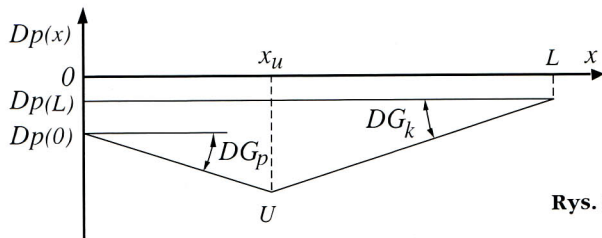
$$\text{dla } x < x_u: \quad DG_p = G_{so} - G_{p1} \quad (8.1)$$

$$\text{dla } x > x_u: \quad DG_k = G_{so} - G_{k1} \quad (8.2)$$

gdzie:

G_{p1} , G_{k1} – gradient ciśnienia po wystąpieniu wycieku na początku (p) i na końcu (k) rurociągu (rys. 2).

Po wystąpieniu wycieku rozkład wzdłuż rurociągu zmiennej $Dp(x) = p_1(x) - p_o(x)$ jest linią łamaną – jak pokazano na rys. 3.



Rys. 3

Zgodnie z rys. 3:

$$\text{dla } x < x_u: Dp(x) = Dp(0) + DG_p x \quad (9.1)$$

$$\text{dla } x > x_u: Dp(x) = Dp(L) - DG_k(L - x) \quad (9.2)$$

Jeżeli wyciek wystąpił nie między dwoma pierwszymi lub dwoma ostatnimi punktami pomiaru ciśnienia, to znając wartości Dp_i oraz odpowiadające im odległości x_i , przyrosty gradientów DG_p i DG_k można wyznaczyć jako współczynniki równań (9) przy użyciu metod statystycznych. Wprowadzono dwa warianty wyznaczania wartości DG :

- oparty na statystycznej obróbce zmiennych Dp_i ,
- oparty na statystycznej obróbce przyrostów gradientów między każdą parą zmiennych Dp_i

zakładając, że w wersji docelowej zastosowany zostanie wariant zapewniający wyniki bliższe wartościom rzeczywistym. Jeżeli wyciek wystąpił na jednym ze skrajnych odcinków rurociągu, to od strony tego odcinka DG można wyznaczyć tylko na podstawie pomiaru przyrostu strumienia objętości:

$$DG = \frac{1}{d} \cdot \lambda \cdot w_o \cdot Dw \quad (10)$$

przy czym:

$$w = \frac{1}{3600} \cdot \frac{4}{\pi d^2} \cdot Q$$

$$Dw = w(t) - w(t - \tau) \quad (10.1)$$

gdzie:

w – prędkość przepływu medium,

Q – strumień objętości,

d – średnica wewnętrzna rurociągu.

Na podstawie rys. 3 i równań (9) łatwo wykazać, że:

$$x_u = L \left(1 - \frac{DG_p}{DG_k} \right)^{-1} - \frac{Dp_p - Dp_k}{DG_p - DG_k} \quad (11)$$

Na podstawie modelu matematycznego rurociągu można ponadto wyprowadzić zależność:

$$Q_u = Q_o(0) \left(1 - \sqrt{\frac{1 - DG_k/G_{so}}{1 - DG_p/G_{so}}} \right) \quad (12)$$

gdzie:

$$G_{so} = \frac{[p_o(0) - p_o(L)] + g\rho(h_p - h_k)}{L}$$

$(h_p - h_k)$ – różnica poziomów początku i końca rurociągu,

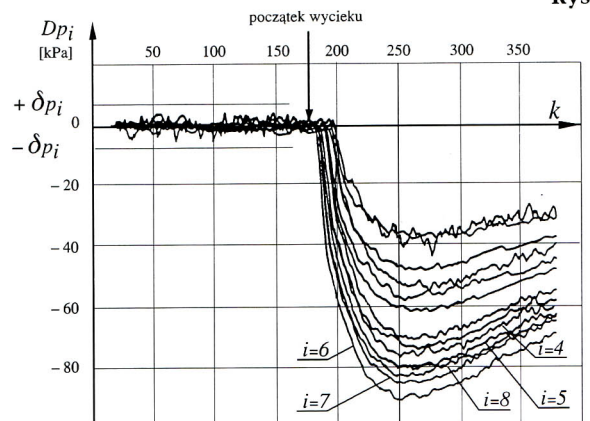
ρ – gęstość tłoczonego medium,

g – przyspieszenie ziemskie.

Równanie (11) pozwala wyznaczyć miejsce wycieku, a równanie (12) – natężenie wycieku.

Metoda oparta na śledzeniu czoła fali rozprężeniowej ciśnienia

Do lokalizacji wycieku można również wykorzystać zjawisko rozprzestrzeniania się w rurociągu (od miejsca wycieku w obu kierunkach) czoła fali ciśnienia z ograniczoną prędkością c . Na rys. 4 widać, że zmiana



Rys. 4

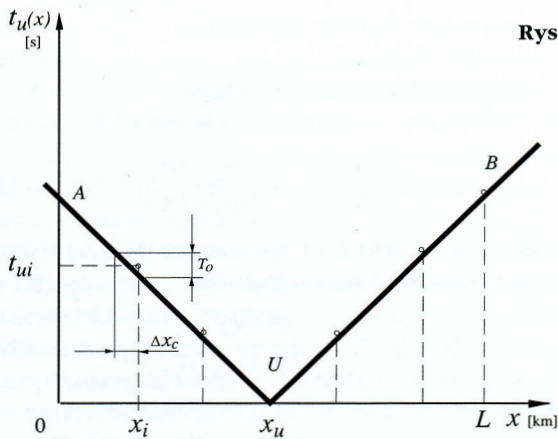
wartości $Dp_i(t)$, wykraczająca (zgodnie z 7.1) poza pasmo szumów pomiarowych $\hat{\partial}p_p$, pojawia się najpierw w punkcie pomiaru $i = 6$ (położonym najbliższej miejsca wycieku), a następnie z pewnym opóźnieniem w kolejnych punktach $i = 7, 8, 5, 4$ itd. W każdym z punktów i czas wystąpienia tej zmiany określa równanie (6) (dwóch prostych), które można napisać w postaci:

$$\text{dla } 0 < x < x_u: t_u(x) = a_p - c^{-1} \cdot x \quad (14.1)$$

$$\text{dla } x_u < x < L: t_u(x) = a_k + c^{-1} \cdot x \quad (14.2)$$

gdzie:

c – prędkość dźwięku w płynie wypełniającym rurociąg, a_p, a_k – pewne stałe; zgodnie z (6) powinny one wynosić: $a_p = -a_k = x_u \cdot c^{-1}$.



Rys. 5.

Na rys. 5 oś odciętych przedstawia odległość x od początku rurociągu z zaznaczeniem punktów x_p , a oś rzędnych zmierzone w tych punktach czasy t_{ui} . Prosta AU odpowiada równaniu (14.1), a prosta UB – równaniu (14.2). Współczynniki a_p, a_k oraz c tych równań można wyznaczyć na podstawie zbioru danych $\{x_p, t_{ui}\}$ przy użyciu metod statystycznych (np. metody analizy regresyjnej), a wówczas miejsce wycieku x_u określa punkt U przecięcia się prostych AU i UB :

$$x_u = \frac{1}{2}(a_p + a_k) \cdot c \quad (15)$$

Dokładność lokalizacji wycieku zależy od kilku czynników, zwłaszcza od:

- prędkości dźwięku c ,
- okresu próbkowania T_0 ,
- miejsca wycieku x_u i natężenia wycieku Q_u ,
- charakteru i poziomu szumów pomiarowych i zakłóceń.

Badania symulacyjne i obiektowe wykazały, że dla instalacji w PERN przy $T_0 = 3$ s dokładność lokalizacji powyższą metodą może być porównywalna z dokładnością metod gradientowych, jeżeli od miejsca wycieku do krańca rurociągu dysponuje się co najmniej trzema pomiarami ciśnienia lub jeżeli znana jest prędkość dźwięku c . Jeżeli warunki te nie są spełnione, to błąd lokalizacji wycieku w pobliżu krańców rurociągu może być duży i nawet przekroczyć wartość $(1 \div 2) c \cdot T_0$.

Zwraca się uwagę, że czas przejścia czoła fali przez każdą ze stacji można określić z dokładnością nie większą niż okres próbkowania T_0 (a czasami, przy niekorzyst-

nym kształcie czoła fali, nawet $2 \div 3 T_0$). Wobec tego położenie czoła fali jest śledzone z błędem nominalnym $\Delta x_c = c \cdot T_0$ (a czasami większym). Przy $c = 1400$ m/s i $T_0 = 3$ s, $\Delta x_c = 4200$ m (lub więcej).

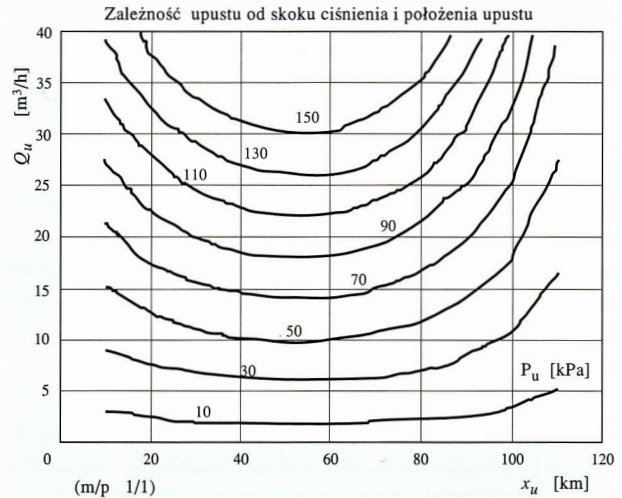
Dla zminimalizowania błędów do programów lokalizacji wprowadzono specjalne procedury, które analizują zbiór danych $\{x_p, t_{ui}\}$, eliminują z niego dane niewiarygodne, a dane, uznane za wiarygodne, poddają obróbce statystycznej.

Należy dodać, że dokładność lokalizacji wycieku metodą śledzenia czoła fali ciśnienia można znacznie zwiększyć (nawet kilkakrotnie) przez radykalne skrócenie okresu próbkowania T_0 (np. do setnych części sekundy).

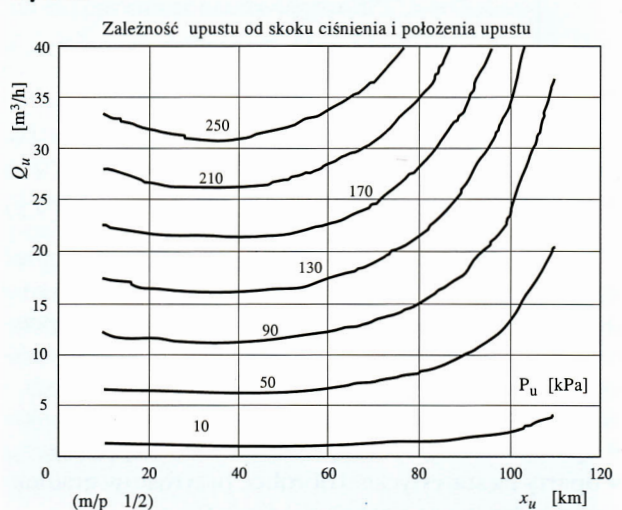
Wyniki badań symulacyjnych i obiektowych

Na rys. 6a i 6b pokazano zależności między natężeniem wycieku Q_u (osie rzędnych), miejscem wycieku x_u (osie odciętych) i uskokiem ciśnienia $\Delta p_u = Dp(x_u)$ (parametryczne zbiory krzywych), otrzymane na podstawie obliczeń modelu matematycznego instalacji. Rys. 6a dotyczy tłoczenia jednego z mediów przez jedną pompę, rys. 6b – tłoczenia tego samego medium przez dwie pompy.

Rys. 6a



Rys. 6b



Z badań symulacyjnych wynika, że w rozpatrywanej instalacji minimalny uskok ciśnienia $Dp(x_u)$, pozwalający na wykrycie i zlokalizowanie wycieku, wynosi około 15 kPa (co stanowi wartość 2÷2,5-krotnie większą od katalogowej dokładności przetworników pomiarowych ciśnienia). Przy tłoczeniu medium przez jedną pompę (rys. 6a) odpowiada to natężeniu wycieku Q_u : w środkowej części rurociągu 3÷4 m³/h (1,2÷1,6% strumienia objętości Q), w skrajnych częściach rurociągu 5÷6 m³/h (2÷2,5% Q). Przy tłoczeniu przez dwie pompy (rys. 6b), tzn. przy wyższym ciśnieniu w rurociągu, wrażliwość procedury na wycieki wzrasta i wynosi: na długości około 2/3 rurociągu 2÷3 m³/h (0,6÷0,9% Q), w końcowej części rurociągu 5÷6 m³/h (1,5÷1,8% Q).

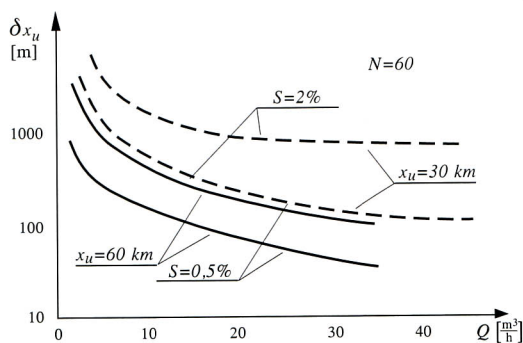
Powyższe wyniki dotyczą badań opartych wyłącznie na zmiennych Dp_i . Wrażliwość procedur na wycieki można zwiększyć, stosując odpowiednio czule i powtarzalne przyrządy do pomiaru strumienia objętości $Q(0)$ i $Q(L)$.

W czasie badań symulacyjnych, mających na celu określenie dokładności lokalizacji i natężenia wycieku metodą gradientową, ciśnienia wynikające z modelu matematycznego rurociągu zakłócano szumami gaussowskimi o zerowej wartości średniej i odchyleniu standardowym s , równym 0,1%; 0,2%; 0,5% i 2,0% wartości każdej zmiennej. Wartości średnie w równaniu (4.1) wyznaczano z $N_0 = N_I = 20; 40; 60$ i 200 próbek pomiarowych.

We wszystkich badanych przypadkach (tłoczenie różnych mediów przez jedną i dwie pompy, różne wartości Q_u , x_u , s oraz N), poczynając od $Q_u \geq 0,5\%Q$ i $N \geq 20$, uzyskiwano wartości średnie błędów lokalizacji z kilku ÷ kilkunastu obliczeń bliskie zeru, natomiast rozkłady błędów zbliżone do krzywej Gaussa.

Zgodnie ze statystyką, przy takim charakterze rozkładu błędy x_u w około 68 procentach przypadków nie powinny wykraczać poza przedział $\pm \delta x_u$, a w ponad 95 procentach przypadków – poza przedział $\pm 2\delta x_u$, gdzie δx_u – odchylenie standardowe błędu lokalizacji.

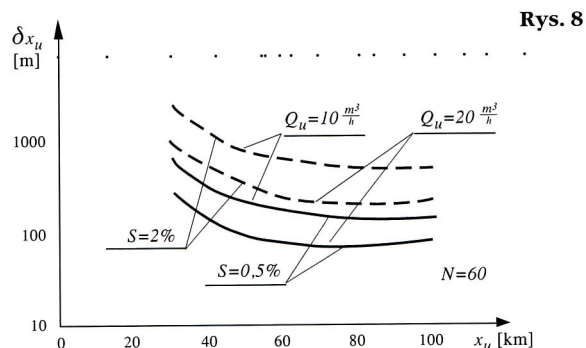
Odchylenia standardowe błędu δx_u (przy tłoczeniu jedną pompą) pokazano na rys. 7 – w funkcji natężenia wycieku Q_u (dla $x_u = 30$ km i 60 km, $s = 0,5\%$ i 2,0%, oraz $N_0 = N_I = 60$), na rys. 8 – w funkcji miejsca wycieku x_u (dla $Q_u = 10$ m³/h i 20 m³/h, $s = 0,5\%$ i 2,0%, oraz $N_0 = N_I = 60$).



Rys. 7 pokazuje, że δx_u maleje ze wzrostem natężenia wycieku (co jest intuicyjnie oczywiste). Z rys. 8 wynika natomiast, że δx_u wzrasta, gdy x_u zbliża się do koń-

ca lub (szczególnie) do początku rurociągu. Jest to spowodowane dwiema przyczynami:

- mniejszą wrażliwością na wycieki w częściach skrajnych rurociągu (rys. 6),
- mniejszą liczbą zmiennych Dp_i , uwzględnianą przy wyznaczaniu bądź DG_p bądź DG_k ; liczby tych zmiennych zależą z jednej strony od miejsca wycieku, a z drugiej – od rozmieszczenia punktów pomiaru ciśnienia. Rozmieszczenie punktów pomiaru, przyjęte w badaniach symulacyjnych, zaznaczono kropkami w górnej części rys. 8.



Wyniki badań, pokazane na rys. 7 i 8, są uzyskane przy uwzględnianiu wyłącznie zmiennych Dp_i . Dokładność lokalizacji można zwiększyć (zwłaszcza w pobliżu początku i końca rurociągu, gdzie błędy są największe) przez zastosowanie dostatecznie czułych i powtarzalnych przyrządów do pomiaru strumienia objętości $Q(0)$ i $Q(L)$.

Zgodnie z wynikami badań symulacyjnych, również dla wszystkich badanych przypadków, błąd natężenia wycieku wyznaczonego z równania (12) nie przekraczał $\pm 15\%$ wartości poprawnej.

W 1997 r., w trakcie rejestracji danych pomiarowych, na rurociągu wystąpiły 3 przypadki rzeczywistych wycieków: jeden w odległości około 53 km, dwa w odległości około 15 km od pompy. Wszystkie te wycieki zostały wykryte i zlokalizowane, a błędy lokalizacji Δx_u wynosiły:

◆ przy zastosowaniu metod gradientowych:

dla $x_u \cong 53$ km, $\Delta x_u = 400$ m,

dla $x_u \cong 15$ km, $\Delta x_u = 1200$ m i 600 m;

◆ przy zastosowaniu metody opartej na śledzeniu czoła fali ciśnienia:

dla $x_u \cong 53$ km, $\Delta x_u = 100$ m;

dla $x_u \cong 15$ km, $\Delta x_u = 4500$ m i 1700 m.

W maju 1998 r. przeprowadzono badania obiektowe opisanych procedur. W ramach tych badań pracownicy PERN w sobie tylko znanych miejscach wykonali 9 kontrolowanych wycieków mediów, a pracownicy PIAP, na podstawie danych pomiarowych zarejestrowanych na dyskietkach określali wystąpienie, czas i miejsce wycieku. Również w tym przypadku wszystkie wycieki zostały wykryte i zlokalizowane, a błędy lokalizacji wynosiły:

◆ przy zastosowaniu metod gradientowych:

$\Delta x_u = 400 \div 1500$ m,

◆ przy zastosowaniu metody opartej na śledzeniu czoła fali ciśnienia: $\Delta x_u = 100 \div 1200$ m.

W trakcie badań obiektowych:

- wszystkie wycieki były wykonane w stosunkowo dużej odległości od krańców rurociągu (ponad 30 km), tzn. poza obszarem obniżonej dokładności lokalizacji przy użyciu metody śledzenia czoła fali ciśnienia,
 - sposób wykonywania wycieków nie odzwierciedlał warunków występujących zwykle w rzeczywistości, co spowodowało znaczne obniżenie dokładności lokalizacji przy użyciu metod gradientowych,
 - nie przeprowadzono prób wrażliwości procedur na wyciek; analiza danych pozwala jednak stwierdzić, że wrażliwość rzeczywista jest nie mniejsza od uzyskanej na podstawie badań symulacyjnych.
- Opisane powyżej procedury działają stosunkowo szybko:
- czas wykrywania faktu wycieku i określenia rejonu wycieku nie przekracza 90 s,
 - czas lokalizacji wycieku wynosi:
 - dla metody śledzenia czoła fali ciśnienia: 2-3 min
 - dla metod gradientowych: 6-8 min.

Bibliografia

- [1] Billman L., Isermann R.: Leak detection methods for pipelines. *Automatica*, vol. 23, no. 3, s. 381-385, 1987.
- [2] Gunawikrama K.: Leak detection for pipelines. Msc Dissertation TU Gdańsk, Faculty of Electronisc, Telekom. and Computer Science, no PG/KSA/ZK34D/02/96, 1996.
- [3] Kowalczyk Z., Gunawikrama K.: Wykrywanie przecieków w transporcie gazów i płynów. I Krajowa Konf. N-T: „Diagnostyka procesów Przemysłowych”, 10-12.06.1996, Podkowa Leśna.
- [4] Malczewski J., Piekarski M.: Modele procesów transportu masy, pędu i energii. WNT, Warszawa 1992.
- [5] Sobczak R., Fijołek F.: System mikroprocesorowy do wykrywania i lokalizacji wycieków z rurociągów magistralnych cieczy. *Automation'98*, s. 85-93.
- [6] PN-76/M-34034: Rurociągi – Zasady obliczeń strat ciśnienia.
- [7] Siebert H., Isermann R.: Leckerkennung und Lokalisierung bei Pipelines durch on-line-Korrelation mit einem Prozesrechner. *Regelungstechnik*, 1977.
- [8] Sobczak R.: Wykrywanie i lokalizacja wycieków z rurociągów przesyłowych cieczy. *Rurociągi nr 3/98*.

ABSTRACTS

Leak localisation in pipelines

Ryszard Sobczak – p. 11

The methods of leak detection and localisation for the liquid long way pipelines are presented. Basic ideas of procedures and results of simulation and investigation are described.