

„System mikroprocesorowy do wykrywania i lokalizacji wycieków z rurociągów magistralnych ciecży”

1. WSTĘP.

Przy transporcie rurociągami ciecży (a także gazów) na duże odległości nierzadko pojawiają się nieszczelności rurociągu, powstałe z różnych przyczyn. Nieszczelności te powodują wycieki tłoczonego produktu, a szkody z tego tytułu wynikają w jakiejś mierze z utraty części produktu, na ogół głównie jednak z zanieczyszczeń środowiska naturalnego i obowiązku jego rekultywacji przez właściciela rurociągu. Dlatego też od wielu lat opracowywane są różne metody i urządzenia dla wykrywania i lokalizacji wycieków, a tym samym umożliwienia szybkiego likwidowania nieszczelności.

Przedstawiony w niniejszej pracy system dotyczy rurociągów ciecży. Jest on oparty na metodzie Sieberta i Isermanna, która wykorzystuje fakt, że na skutek wycieku gradienty ciśnienia w rurociągu ulegają zmianie.

System jest opracowany dla konkretnej instalacji, w której średnica rurociągu wynosi około 310 mm, a długość około 125 km. Krótki opis tej instalacji podano w p.2. Ale wyniki badań mają charakter na tyle uniwersalny, że może on być zastosowany w dowolnej instalacji tłoczenia ciecży, wyposażonej w niezbędne opomiarowanie.

Prace obejmują pełen cykl badawczy, a w tym: opracowanie modelu matematycznego procesu tłoczenia i weryfikacja modelu w oparciu o rzeczywiste pomiary; opracowanie procedur wykrywania i lokalizacji wycieków; opracowanie i zainstalowanie na obiekcie układu komputerowego dla rejestracji i archiwizacji danych pomiarowych; badania symulacyjne skuteczności procedur wykrywania i lokalizacji wycieków.

Warto wspomnieć, że w okresie rejestracji danych wystąpiły trzy przypadki rzeczywistych wycieków. Wszystkie te wycieki zostały wykryte i zlokalizowane.

2. OPIS INSTALACJI.

Uproszczony schemat instalacji pokazano na rys. 1.



Rys. 1

Ciecz pobierana jest ze zbiornika ZA i przy pomocy pompy głównej 1 (czasami wspomaganą pompą podporową 2) przetłaczana do zbiornika ZB. Zakłada się przy tym, że między pompą główną i zbiornikiem ZB nie występują odgałęzienia bądź zbiorniki retencyjne.

Rzeczywistość obiektów jest znacznie bardziej złożona, gdyż:

- instalacja składa się z m zbiorników ZA_m , n zbiorników ZB_n , o różnych stopniach wypełnienia i zawierających media o na ogół różnych parametrach fizycznych; w zależności od potrzeb, tłoczenie przełączane jest na odpowiednie zbiorniki,
- tłoczenie odbywa się przy użyciu jednej lub dwóch pomp (w przypadku pracy dwóch pomp są one zawsze połączone szeregowo).

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

W niniejszym referacie rozpatrzemy jedynie przypadek tłoczenia jednego medium przez jedną lub dwie pompy i przy braku skokowych zakłóceń ciśnienia na początku i na końcu rurociągu. W takiej sytuacji pomiary bieżące zakłócanie są jedynie „białym szumem”.

Rurociąg wyposażony jest w pomiary:

- objętościowego natężenia przepływu za pompą i przed zbiornikiem ZB,
- ciśnienia za pompą, przed zbiornikiem ZB oraz przed każdą z kilku-kilkunastu stacji zasuw, rozmieszczonych wzdłuż rurociągu,
- temperatury w miejscach pomiaru ciśnienia.

Pomiary są przez system komputerowy przetwarzane na sygnały cyfrowe i z okresem próbkowania T_0 przesyłane do centralnej dyspozytorski procesy.

3. MODEL MATEMATYCZNY PROCESU TŁOCZENIA.

Jak już wspomniano, w niniejszej publikacji zajmujemy się jedynie wyciekami powstałymi w okresie stabilnej pracy rurociągu. Interesuje nas zatem tylko model dla stanu ustalonego procesu oraz model dla stanu nieustalonego, spowodowanego faktem wycieku.

Ze względu na ograniczoną objętość publikacji, w opisie modelu ograniczymy się do najbardziej istotnych komentarzy.

3.1. Pompa.

W rozpatrywanej instalacji zastosowana jest pompa odśrodkowa, której ciśnienie tłoczenia p_t odpowiada pewnej wysokości podnoszenia słupa cieczy $H(Q)$; wysokość podnoszenia zależy wyłącznie od objętościowego natężenia przepływu cieczy za pompą Q_p .

Mamy zatem:

$$p_t = p_s + H(Q_p) \rho \cdot g \quad (1)$$

gdzie: p_s , p_t - ciśnienia po stronach ssania i tłoczenia [Pa]

$H(Q)$ - wysokość podnoszenia [m]

ρ - gęstość cieczy [kg/m^3]

g - przyspieszenie ziemskie [m/s^2]

W zbiornikach ZA (podobnie jak i w zbiornikach ZB) nad lustrem cieczy panuje ciśnienie atmosferyczne. Wobec tego w przypadku pracy jednej pompy:

$$p_x = (Z_H - Z_S) \rho g + p_r \quad (2)$$

gdzie: $(Z_H - Z_S)$ - różnica poziomów lustra cieczy w zbiorniku ZA i króćca ssącego pompy podporowej [m]

p_r - przyrost ciśnienia, wytwarzany przez pompę podporową [Pa]

a ciśnienie na początku rurociągu:

$$p_p = p_r \quad (3.1)$$

W przypadku pracy dwóch pomp, ciśnienie p_{s2} dla drugiej pompy stanowi ciśnienie p_{r1} pompy pierwszej, a ciśnienie na początku rurociągu:

$$p_p = p_{r2} \quad (3.2)$$

Katalogową zależność $H(Q_p)$ dobrze aproksymuje równanie:

$$H(Q) = A[1 - \exp(C Q_p - B)] \quad (4)$$

gdzie: A, B, C - stałe

3.2. Rurociąg.

3.2.1. Model statyki procesu.

W warunkach normalnej pracy rurociągu, liczba Reynolds'a jest bardzo duża: $Re > 5 \cdot 10^5$. Wobec tego równanie Bernoulli'ego można napisać w postaci:

$$p_x = p_p + g(\rho_p h_p - \rho_x h_x) - \frac{\bar{\rho}(x)}{2\bar{D}(x)} \bar{w}^2(x) \cdot x \quad (5)$$

gdzie: p_x - ciśnienie w przekroju rurociągu, oddalonym o odległość x od pompy [Pa],

h_p, h_x - wysokości początku i przekroju x rurociągu od pewnego poziomu odniesienia [m]

ρ_p, ρ_x - gęstości medium na początku i w przekroju x rurociągu [kg/m^3],

λ - współczynnik tarcia [l. bezwartościowa],

D - średnica wewnętrzna rurociągu [m],

w - prędkość przepływu cieczy [m/s],

\bar{x} - odległość rozpatrywanego przekroju od początku rurociągu [m],

Zmienne $\bar{\lambda}(x)$, $\bar{\rho}(x)$, $\bar{w}(x)$, $\bar{D}(x)$ oznaczają wartości średnie na długości x . Współczynnik $\lambda(x)$ zawiera w sobie również straty miejscowe, występujące na odcinku x .

Wartości w i Q wiąże oczywista zależność:

$$Q = 3600 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot w \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (6)$$

Gęstość cieczy ρ_x zmienia się wzdłuż rurociągu w granicach 2 - 4%, głównie w wyniku zmian temperatury. Rurociąg jest prowadzony w ziemi. Temperatura cieczy praktycznie osiąga temperaturę gruntu już w odległości $x = 40+60$ km.

Przy pewnych założeniach upraszczających można wyprowadzić równanie:

$$t_x = t_k + (t_p - t_k) \exp \left[-\frac{K}{c\rho Q} x \right] \quad [\text{deg}] \quad (7)$$

gdzie: t_x, t_p, t_k - temperatury cieczy w odległości x , na początku rurociągu i na końcu rurociągu (którą utożsamia się z temperaturą gruntu) [deg]

c - ciepło właściwe cieczy [$\text{Jkg}^{-1} \text{deg}^{-1}$]

K - współczynnik, który należy wyznaczyć doświadczalnie [$\text{Jdeg}^{-1}\text{s}^{-1} / \text{m}^2$]

Błąd równania (7) nie wykracza poza 1,5 deg.

Gęstość medium w przekroju x w przybliżeniu wynosi:

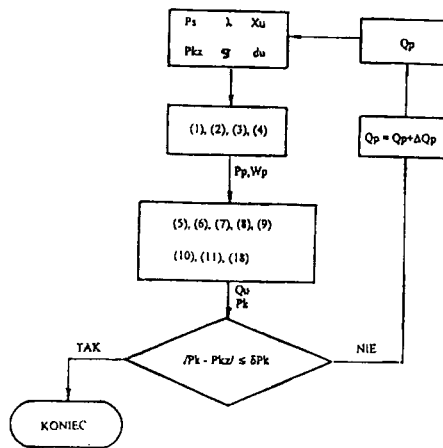
$$\rho_x = \rho_p [1 - \beta(t_k - t_p) - \phi(p_x - p_p)] \quad (8)$$

a prędkość przepływu cieczy:

$$w_x = w_p \cdot \frac{\rho_p}{\rho_x} \quad (9)$$

gdzie: β - współczynnik rozszerzalności objętości cieczy [deg^{-1}],

ϕ - suma współczynników ściśliwości cieczy i sprężystości rurociągu [Pa^{-1}];
współczynnik ϕ omówiono w p. 3.2.2.



Jeżeli nastąpi wyciek przez nieszczelność rurociągu, a na zewnątrz rurociągu panuje ciśnienie atmosferyczne, wówczas w każdej realnej sytuacji mamy przepływ burzliwy, a $Re > 10^5$. Uwzględniając ponadto, że w rurociągu mierzone jest nadciśnienie (t.zn. różnica między ciśnieniem absolutnym a ciśnieniem atmosferycznym), prędkość wycieku można wyrazić równaniem:

$$W_u = \sqrt{\frac{2p_x}{\rho_x}} \quad [\text{m/s}] \quad (10)$$

a natężenie wycieku:

$$Q_u = \mu \cdot 3600 \cdot S_u \cdot W_u \quad [\text{m}^3 / \text{h}] \quad (11)$$

Rys. 2

gdzie: S_u - powierzchnia przekroju wycieku [m^2]

μ - współczynnik zwężenia strumienia; dla $Re > 10^5$, $\mu \approx 0,6$.

Przykładową procedurę obliczania modelu pokazano na rys. 2.

3.2.2. Model dynamiki, spowodowanej wyciekami.

Wprowadzamy oznaczenia:

$p(x,0)$, $w(x,0)$ - rozkłady ciśnienia i prędkości przepływu cieczy w rurociągu w stanie ustalonym przed wystąpieniem wycieku,

$p(x,t)$, $w(x,t)$ - rozkłady ciśnienia i przepływu w stanie nieustalonym po wystąpieniu wycieku,

$$\Delta p(x,t) = p(x,t) - p(x,0)$$

$$\Delta w(x,t) = w(x,t) - w(x,0)$$

Mamy wówczas: $\Delta p(x,t) \ll p(x,0)$

$$\Delta w(x,t) \ll w(x,0), \text{ a wobec tego: } w^2(x,t) \cong 2w(x,0) \cdot \Delta w(x,t)$$

Uwzględniając powyższe, na podstawie równania równowagi sił: ciśnienia, bezwładności i tarcia oraz równania ciągłości płynu, możemy napisać:

$$\frac{\partial \Delta p(x,t)}{\partial x} + \rho \frac{\partial \Delta w(x,t)}{\partial t} + \frac{\lambda \rho}{D} w(x,0) \cdot \Delta w(x,t) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \Delta w(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{E} \frac{\partial \Delta p(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

Moduł sprężystości układu:

$$E = \frac{1}{\phi} \quad [\text{Pa}] \quad (14)$$

przy czym:

$$\phi = \phi_c + \phi_R \quad [\text{Pa}^{-1}] \quad (15)$$

gdzie: ϕ_c - współczynnik ściśliwości cieczy,

ϕ_R - współczynnik sprężystości rurociągu

Można wykazać, że:

$$\phi_R = \frac{3D}{2E_r \cdot b} (1 - \nu)$$

gdzie: E_r - moduł sprężystości objętościowej materiału rurociągu (moduł Yonng'a) [Pa],

b - grubość ścianki rurociągu [m],

ν - współczynnik Poissona'a materiał rurociągu [l. bezwzwymiarowa]

Stąd:

$$E = \frac{1}{\phi} = \frac{E_c}{1 + \frac{3D}{b} (1 - \nu) \cdot E_c/E_r}$$

gdzie: $E_c = 1/\phi_c$ - moduł sprężystości cieczy

oraz prędkość rozchodzenia się dźwięku:

$$\text{- w ośrodku nieograniczonym: } a_0 = \sqrt{\frac{E_c}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (16.1)$$

$$\text{- w rurociągu: } a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \phi_R E_c}} \quad [\text{m/s}] \quad (16.2)$$

Układ równań (12), (13) rozwiązywano metodą odwrotnego przekształcenia Laplace'a.

3.3. Zbiorniki ZA i ZB.

Prędkość zmiany poziomu w zbiorniku:

$$V_z = \frac{dh}{dt} = \frac{\Delta Q}{S_z} \quad (17)$$

gdzie: ΔQ - różnica między natężeniami dopływu i odpływu [m^3/h]

S_z - powierzchnia przekroju poprzecznego zbiornika [m^2]

W rozpatrywanym przypadku, wobec dużych wartości S_z , prędkości V_z są małe i wynoszą od $90 \cdot 10^{-3}$ m/h do $140 \cdot 10^{-3}$ m/h.

4. PROCEDURA WYKRYWANIA I LOKALIZACJI WYCIEKÓW.

Jak już wspomniano, procedury wykrywania i lokalizacji wycieków oparto na koncepcji Sieberta i Isermanna. Istotą tej koncepcji można wyjaśnić następująco:

Jeżeli założymy, że:

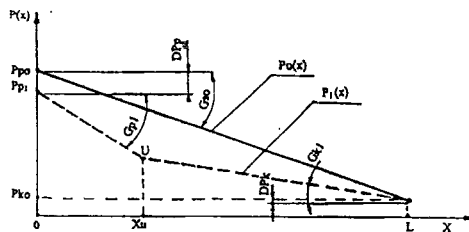
- rurociąg jest usytuowany poziomo, a jego średnica wewnętrzna $D(x) = \text{const}$,

- przez rurociąg płynie jedno medium, $\lambda(x) = \text{const}$, $w(x) = \text{const}$, $\rho(x) = \text{const}$,

wówczas, przy braku wycieku, ciśnienie $p(x)$ zmienia się liniowo (rys. 3, linia ciągła). W przypadku wycieku o natężeniu Q_u w miejscu x_u , natężenie przepływu w rurociągu wynosi:

$$\text{- dla } x < x_u : \quad Q_x = Q_p \quad (18.1)$$

$$\text{- dla } x > x_u : \quad Q_x = Q_p - Q_u \quad (18.1)$$



Rys. 3

W wyniku tego rozkład $p(x)$ staje się linią łamaną, przecinającą się w punkcie U (rys. 3, linia przerywana). W rurociągu rzeczywistym, dla wyeliminowania wpływu naporu hydraulicznego, spowodowanego posadowieniem, oraz błędów systematycznych czujników, dla każdego punktu i pomiaru ciśnienia wprowadza się zmienną:

$$Dp_i(N_0, N_1, \tilde{T}) = p_i(N_1, t) - p_i(N_0, t - \tilde{T}) \quad (19)$$

gdzie: i - numer stacji pomiarowej ciśnienia,

$p_i(N_1, t)$ - wartość średnia p_i z N kolejnych pomiarów w czasie t ,

$p_i(N_0, t - \tilde{T})$ - wartość średnia p_i z N kolejnych pomiarów w czasie $(t - \tilde{T})$.

Przy braku wycieku, dla każdego p_i powinny być spełnione ograniczenia:

$$-\delta p_i < D p_i(N_0, N_1, \tilde{T}) < +\delta p_i \quad (20)$$

gdzie: δp_i - pewna wartość graniczna, wynikająca z czułości przetworników pomiarowych i poziomu szumów pomiarowych.

W przypadku pojawienia się wykrywalnego wycieku, powinna zaistnieć nierówność:

$$D p_i (N_0, N_1, \bar{T}) < - \delta p_i \quad (21)$$

Nierówność ta pojawi się najpierw w stacji i położonej najbliższej x_u (jednocześnie w tej stacji w nowym stanie ustalonym wystąpi min Dp_i), a następnie, po czasach $t_i = |x_i - x_u| a^{-1}$ - również

w pozostałych stacjach. To pozwala nie tylko stwierdzić fakt wycieku, ale również określić rejon jego wystąpienia.

Dla zlokalizowania wycieku musimy najpierw wyznaczyć przyrosty gradientów ciśnień, spowodowane wyciekami (rys.3):

$$\Delta Gp = G_{s_0} - Gp_1 \quad (22.1)$$

$$\Delta Gk = G_{s_0} - Gk_1 \quad (22.2)$$

gdzie: G_{s_0} - średni gradient ciśnienia przed wyciekami [Pa/m = kPa/km]

Gp_1, Gk_1 - średnie gradienty ciśnienia po wystąpieniu wycieku dla - odpowiednio:

$$x < x_u, \text{ oraz } x > x_u.$$

Powyższe przyrosty gradientów stanowią współczynniki równań:

$$\text{dla } x < x_u: \quad Dp(x) = \Delta Gp \cdot x \quad (23.1)$$

$$\text{dla } x > x_u: \quad Dp(x) = \Delta Gk (L-x) \quad (23.2)$$

gdzie: L - całkowita długość rurociągu

Jeżeli zatem wyciek wystąpił nie między dwoma pierwszymi lub dwoma ostatnimi punktami pomiaru ciśnienia, wówczas znając wartości Dp_i oraz x_i , współczynniki ΔGp i ΔGk możemy wyznaczyć przy użyciu metod statystycznych (np. metodą analizy regresyjnej). Jeżeli natomiast wyciek wystąpił na jednym ze skrajnych odcinków rurociągu, wówczas ΔG możemy wyznaczyć jedynie w oparciu o pomiar przepływu:

$$\Delta G = \frac{1}{D} \cdot \lambda w_0 \cdot Dw \quad (24)$$

gdzie: w_0, Dw - są zdefiniowane jak p_0, Dp .

Powinno być przy tym spełnione: $\Delta Gp < 0, \Delta Gk > 0$

Na podstawie rys. 3 łatwo wykazać, że miejsce wycieku:

$$x_u = L \left(1 + \frac{\Delta Gp}{\Delta Gk} \right)^{-1} - \frac{Dp_p - Dp_k}{\Delta Gp - \Delta Gk} \quad (25)$$

a uwzględniając ponadto (5), natężenie wycieku:

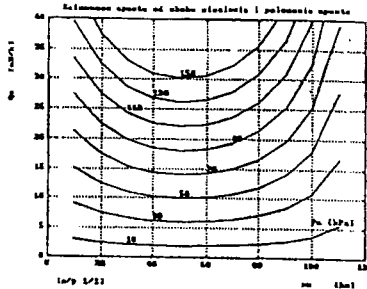
$$Q_u = Q_p \left(1 - \sqrt{\frac{1 - \Delta Gk / G_{s_0}}{1 - \Delta Gp / G_{s_0}}} \right) \quad (26)$$

gdzie:

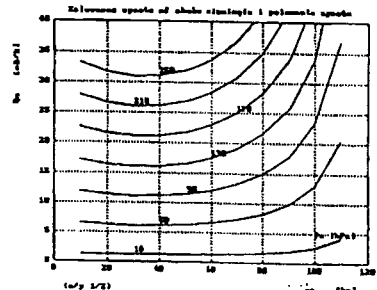
$$G_{s_0} = \frac{(p_p - p_k) + g\rho (h_p - h_k)}{L} \quad (27)$$

5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH.

Na rys. 4a i 4b pokazano zależności między natężeniem wycieku Q_u , miejscem wycieku x_u i uskokiem ciśnienia $\Delta p_u = Dp(x_u)$. Rys 4a dotyczy tłoczenia jednego z mediów przez jedną pompę, rys. 4b - tłoczenia tego samego medium przez dwie pompy.



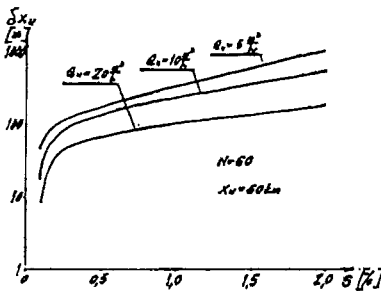
Rys 4a



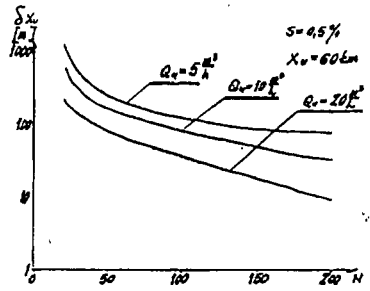
Rys. 4b.

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). Przy tłoczeniu medium przez jedną pompę (rys. 4a) odpowiada to natężeniu wycieku Q_u : w środkowej części rurociągu 3÷4 m³/h (1,2÷1,6% natężenia przepływu Q), w skrajnych częściach rurociągu 5÷6 m³/h (2 ÷ 2,5% Q). Przy tłoczeniu przez dwie pompy (rys. 4b), t.j. 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).

Wrażliwość procedur na wycieki można zwiększyć uwzględniając również zmiany prędkości przepływu Dw .



Rys. 5

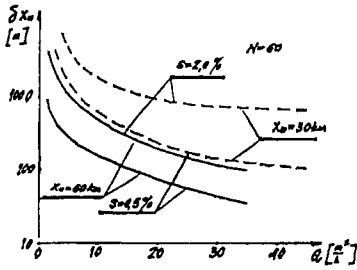


Rys. 6

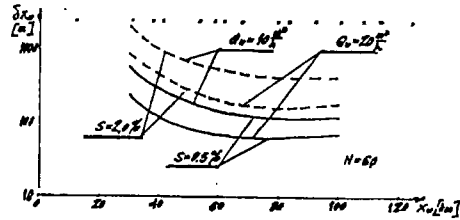
W trakcie badań symulacyjnych ciśnienia i przepływy, wynikające z modelu rurociągu, zakłócano szumami gaussowskimi o zerowej wartości oczekiwanej i dyspersji $s = 0,1\%$; $0,2\%$; $0,5\%$ i $2,0\%$ wartości każdego z parametrów. W (19) wartości średnie wyznaczono z $N = 20$; 40; 60 i 200 próbek pomiarowych (przyjmując $N_1 = N_0$).

Dla wszystkich badanych przypadków (tłoczenie różnych mediów przez jedną i dwie pompy, różne wartości Q_u , x_u , s oraz N), poczynając od $Q_u \geq 0,5\%$ i $N \geq 20$, uzyskiwano wartości średnie błędów lokalizacji z kilku-kilkunastu obliczeń bliskie zera. Natomiast dyspersje błędów δx_u (przy tłoczeniu przez jedną pompę) pokazano na rys. 5, 6, 7 i 8.

Wydaje się, że rys. 5, 6 i 7 nie wymagają omówienia. Warto jedynie zwrócić wagę na rys. 6, z którego wynika, że δx_u można znacznie zmniejszyć zwiększając liczbę uśrednionych próbek N



Rys. 7



Rys. 8

(co przy stałym okresie próbkowania T_0 oznacza wydłużenie czasu zbierania danych). Wniosek ten jest jednak słuszny tylko wtedy, gdy wartości średnie w tym okresie $\bar{p}_i(t) = \text{const}$ oraz $\bar{w}(t) = \text{const}$.

Z rys. 8 wynika, że δx_u wzrasta, gdy x_u zbliża się do końca lub (szczególnie) do początku rurociągu. Jest to spowodowane dwiema przyczynami:

- mniejszą wrażliwością na wycieki w częściach skrajnych rurociągu (rys. 4),
- mniejszą liczbą zmiennych D_{pi} , uwzględnianą przy wyznaczaniu bądź ΔG_p , bądź ΔG_k ; liczby tych zmiennych zależą z jednej strony od miejsca wycieku, a drugiej zaś - od rozmieszczenia punktów pomiaru ciśnienia. Rozmieszczenie punktów pomiaru, przyjęte w badaniach symulacyjnych, pokazano kropkami w górnej części rys. 8.

Badania systemu są nadal kontynuowane, a jego ocena przez potencjalnego użytkownika prawdopodobnie będzie sformułowana w I półroczu br.

6. LITERATURA.

1. H. Siebert, R. Isermann: „Leckerkennung und Lokalisierung bei Pipelines durch on-line-Korrelation mit einem Prozeszrechner”, Regelungstechnik, 1977.
2. L. Billman, R. Isermann: „Leak detection methods for pipelines”, Automatica, vol. 23, no. 3, 381-385, 1987.
3. K. Gunawikrama: „Leak detection for pipelines”, Msc Dissertation TU Gdańsk, Faculty of Electronics, Telekom. and Computer Science, no PG/KSA/ZK34D/02/96, 1996.
4. Z. Kowalczyk, K. Gunawikrama: „Wykrywanie przecieków w transporcie gazów i płynów”, I Krajowa Konferencja N-T: „Diagnostyka procesów Przemysłowych”, 10 - 12.06.1996, Podkowa Leśna.
5. J. Malczewski, M. Piekarski: „Modele procesów transportu masy, pędu i energii”, WNT, W-wa, 1992.
6. PN-76/M - 34034: „Rurociągi - Zasady obliczeń strat ciśnienia”.