Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

074 A

OŚRODEK MECHATRONIKI
Nazwa ONB/ZNB

Główny wykonawca dr inż. Ryszard Sobczak

Wykonawcy: dr inż. Ryszard Sobczak

Opracowanie procedur wykrywania i ewentualnie lokalizacji przecieków w rurociągach przy przewidywanym opomiarowaniu, w sytuacjach nietypowych.

DOKUMENT WZORCOWY

(Tytuł pracy, numer i tytuł etapu)

Zleceniodawca Komitet Badań Naukowych

KIEROWNIK
OŚRODKA MECHATRONIKI
mgr inż. Zbigniew Pilat

ZASTĘPCA DYREKTORA
d/s Badawczo-Rozwojowych
dr inż. Jan Jabłkowski
(1)

Pracę zakończono dnia 1997.06.30

Nr arch. 7561 Nr zlecenia umowy 101/97

1

1. WSTĘP.

Za „nietypowe" uznamo te sytuacje, w których nieszczelność rurociągu może realnie wystąpić, a wykrycie jej metodą, opartą o pomiary na poszczególnych stacjach różnic ciśnień i natężeń przepływów przed i po wystąpieniu nieszczelności jest będzie niemożliwe, będzie nieefektywne. Wytypowanie tych sytuacji stanowi jednoznacznie definicję SWLP. W dotychczasowych kontaktach formalnych i korespondencji z PERN operowano jedynie pojęciem „wykrywanie i lokalizacja przecieków" przez co rozumiano wykrywanie i lokalizację przecieków w okresie normalnej pracy instalacji (t. zn. tłoczenia mediów) i to raczej z wyłączeniem przypadków jednoczesnego wystąpienia przecieku oraz skokowej zmiany ciśnienia na początku lub na końcu rurociągu.

Proponuje się, aby poza sytuacjami standardowymi, SWLP uwzględniał również następujące przypadki:

(1) Wystąpienie nieszczelności w okresie postoju instalacji (brak tłoczenia).

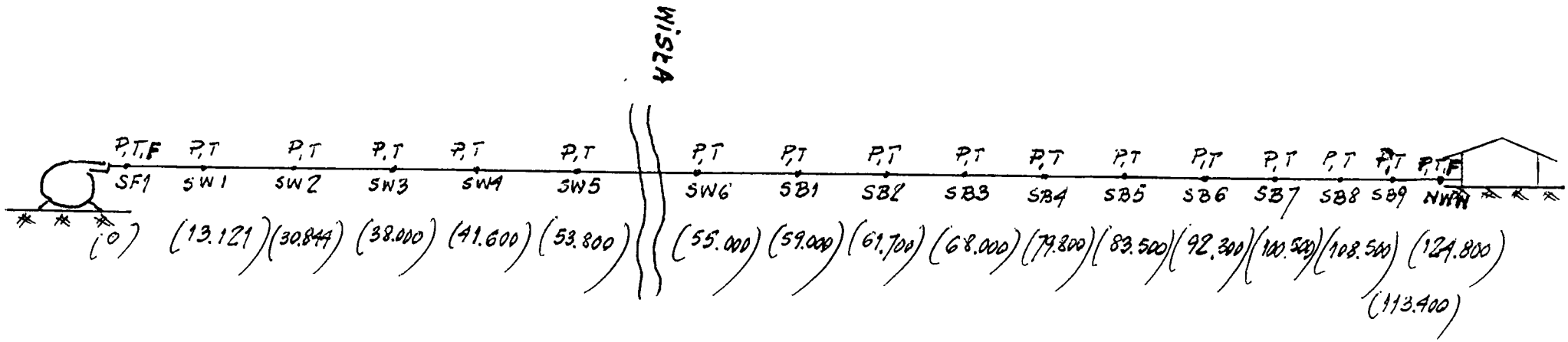
(2) Wystąpienie nieszczelności w pobliżu granicy rozdziału mediów.

(3) Jednoczesne wystąpienie nieszczelności i skokowa zmiana ciśnienia na końcu rurociągu.

(4) Jednoczesne wystąpienie nieszczelności i skokowa zmiana ciśnienia na początku rurociągu.

Za „typową" można uznać jedynie sytuację (2), lecz i ona wymaga pogłębionej analizy.

Schemat rozmieszczenia stacji pomiarowych na rurociągu pokazano na rys. 1.1.



Schemat rozmieszczenia pomiarów na rurociągu.

Rys. 1.1

2. WYSTĄPIENIE NIESZCZELNOŚCI W OKRESIE POSTOJU INSTALACJI LUB W OKRESIE OD URUCHOMIENIA TŁOCZENIA DO WYKONANIA TESTÓW SZCZELNOŚCI.

Wykrycie faktu wystąpienia nieszczelności (a tym bardziej jej lokalizacja) w okresie postoju instalacji jest niemożliwe. Możliwe jest natomiast po uruchomieniu tłoczenia przetestowanie rurociągu na nieszczelność. Ale procedury testowania mogą być oparte jedynie na pomiarach bezwzględnych wartości parametrów (ciśnień, natężeń przepływów), a w związku z tym będą one i mniej wrażliwe na przecieki i mniej dokładne od procedur, stosowanych w trakcie normalnej pracy instalacji.

Uruchomienie testów może nastąpić dopiero po czasie, potrzebnym do ustabilizowania się ciśnień i przepływów. Jak wynika z badań [4], czas ustabilizowania się ciśnienia wynosi 15÷25 min. Dlatego po uruchomieniu tłoczenia należy:

- odczekać pewien czas T_0,
- po tym czasie dla m kolejnych wartości średnich z okresów $T_M = M \cdot T_o$ wyznaczać $\bar{p}_i(m)$ oraz $\bar{Q}_i(m)$ i sprawdzać:

$$\bar{p}_i(m) - \bar{p}_i(m-1) \leq \delta p_i \qquad (2.1)$$

$$\bar{Q}_{p,k}(m) - \bar{Q}_{p,k}(m-1) \leq \delta Q \qquad (2.2)$$

gdzie: M - liczba cykli pomiarów

$T_o \cong 3\,s$ - cykl próbkowania

Q_p, Q_k - wielkie natężenia przepływu na początku i końcu rurociągu $\left[\frac{m^3}{h}\right]$

Kreska nad zmienną oznacza wartość średnią arytmetyczną (z tym przypadku z M kolejnych pomiarów).

Wstępnie można przyjąć: $M = 60$, $\delta p_i = 6\,kPa$, $\delta Q = 0{,}5\%\,Q_p$.

Jeżeli warunki (2.1) i (2.2) nie są spełnione - kontynuujemy sprawdzanie dla $n \to n+1$.

Jeżeli są spełnione dla wszystkich $\bar{p}_i$ oraz $\bar{Q}_p$ i $\bar{Q}_k$ - wówczas możemy rozpocząć testowanie.

Proponuje się wprowadzenie 3 testów:

2.1. Wykrywanie faktu nieszczelności.

Istota testu: w przypadku braku przecieku powinno być $\bar{Q}_k = \bar{Q}_p$. Należy jednak uwzględnić dwie korekty:

(1) Warunki termodynamiczne (temperatury, ciśnienia) na początku i na końcu rurociągu są różne, zmienia się zatem wzdłuż rurociągu gęstość medium (a ściślej - objętość właściwa). Wobec tego przeliczamy Q_k na warunki, panujące na początku rurociągu:

$$\bar{Q}_{k,\varrho} = \bar{Q}_k \cdot \frac{\varrho_k}{\varrho_p} \tag{2.3}$$

W przybliżeniu [1 etap 1 ÷ 3]:

$$\frac{\varrho_k}{\varrho_p} = 1 - 1{,}1 \cdot 10^{-3}\left(\bar{t}_k - \bar{t}_p\right) + 961 \cdot 10^{-6}\left(\bar{p}_k - \bar{p}_p\right) \tag{2.4}$$

t. zn.: $$\bar{Q}_{k,\varrho} = \bar{Q}_k \left[1 - 1{,}1 \cdot 10^{-3}\left(\bar{t}_k - \bar{t}_p\right) + 961 \cdot 10^{-6}\left(\bar{p}_k - \bar{p}_p\right)\right] \tag{2.5}$$

Zgodnie z danymi PERN, współczynniki ściśliwości objętościowej oraz moduły sprężystości etylenu i olejów napędowych są także same. W związku z tym nie jest w tej korekcie istotne ani to, jakie medium wypełnia rurociąg, ani to, czy jest to jednorodny ciekły medium.

Warto dodać, że w przypadku tłoczenia mediów przez jednostkę pompową gęstość w funkcji zmian ciśnienia zmienia się w granicach 0,3%, natomiast w funkcji temperatury - 2,5 ÷ 3,5% (t. zn. nawet w granicach $10\ \frac{m^3}{h}$).

Przykład: $\bar{Q}_p = 220 \frac{m^3}{h}$, $\bar{p}_p = 2{,}5\ MPa$, $\bar{t}_p = 40°C$

$\bar{Q}_k = 213 \frac{m^3}{h}$, $\bar{p}_k = 0{,}2\ MPa$, $\bar{t}_k = 8°C$

Bezpośrednie porównanie $\bar{Q}_p$ i $\bar{Q}_k$ sugerowałoby przeciek w granicach $7 \frac{m^3}{h}$. Po uwzględnieniu korekty (2.5):

$$\bar{Q}_{k,\varrho} = 213 \cdot 1{,}033 \cong 220 \frac{m^3}{h}$$

to zn. przeciek nie występuje.

(2) Przetworniki Q_p i Q_k nie będą względem siebie zestrojone, a różnice ich wskazań (w funkcji nie tylko Q_p, ale również innych parametrów, np. ϱ, λ bądź μ) będą zapewne duże, gdyż pomiary obu przepływów oparte są na różnych zjawiskach fizycznych. Dlatego też niezbędne jest uwzględnienie poprawki:

$$\Delta Q(\bar{Q}_p, z) \cdot \frac{\varrho_k}{\varrho_p} = \bar{Q}_p - \bar{Q}_{k,\varrho} \qquad (2.6)$$

dla stanu rurociągu bez przecieku (gdzie z - uogólnione parametry fizyczne medium). Parametry, określone jako z, nie będą znane (mierzone). Wobec tego możliwe jest jedynie doświadczalne wyznaczenie 4-ch charakterystyk, oznaczonych np.:

$\Delta Q(Q_p)_1$ - dla sytuacji etylina (na początku) - etylina (na końcu),

$\Delta Q(Q_p)_2$ - dla sytuacji olej napędowy - olej napędowy,

$\Delta Q(Q_p)_3$ - dla sytuacji etylina - olej,

$\Delta Q(Q_p)_4$ - dla sytuacji olej - etylina

Skorygowana wartość $\bar{Q}_k$:

$$\bar{Q}_{k,s} = [\bar{Q}_k + \Delta Q(Q_p)_z] \cdot [1 - 1{,}1 \cdot 10^{-3}(\bar{t}_k - \bar{t}_p) + 961 \cdot 10^{-6}(\bar{p}_k - \bar{p}_p)] \qquad (2.7)$$

Test szczelności:

$$\bar{Q}_p - \bar{Q}_{k,s} \leq \delta Q \qquad (2.8)$$

Jeżeli tak - uznajemy brak przecieku.

Jeżeli nie - podejrzewamy występowanie przecieku o natężeniu:

$$Q_u = \bar{Q}_p - \bar{Q}_{k,s} \pm \delta Q \qquad (2.9)$$

6

2.2. Poszukiwanie odcinka rurociągu, na którym wystąpił przeciek.

Test oparty jest na porównaniu dla poszczególnych odcinków i/i+1 rurociągu natężeń przepływów, wynikających z:

- pomiaru $\bar{Q}_p$,
- pomiar $\bar{Q}_k$,
- spadku ciśnień między punktami i oraz i+1.

Procedura obejmuje następujące działania:

- Ustalenie rodzajów mediów, wypełniających rurociąg, oraz granic ich rozdziału. Dane te powinny być zaczerpnięte z systemu informatycznego PERN.
- Skorygowanie ciśnień, mierzonych w poszczególnych stacjach „i" o wartości naporów hydraulicznych (t. zn. niejako „wyporiomowanie rurociągu"). W tym celu:

* Wyznaczamy gęstości mediów w poszczególnych stacjach:

$$\varrho_i = \varrho_k \left[1 - 1{,}1 \cdot 10^{-3}(\bar{t}_i - 20) + 961 \cdot 10^{-6}(\bar{p}_i - 0{,}1)\right] \left[\frac{kg}{m^3}\right] \qquad (2.10)$$

gdzie: k - rodzaj medium w danej stacji,

ϱ_k - gęstość medium k dla parametrów odniesienia (20°C, 100 kPa).

Ponieważ aktualnie brak jest pomiaru ϱ_k, przyjmujemy wartości średnie:

** dla etylinu : $\varrho_E = 755 \frac{kg}{m^3}$,

** dla olejów napędowych: $\varrho_o = 830 \frac{kg}{m^3}$.

* Wyznaczamy gęstości średnie mediów w poszczególnych odcinkach rurociągu:

$$\varrho_{i-1/i} = \frac{1}{2}(\varrho_{i-1} + \varrho_i) \qquad (2.11)$$

* Wyznaczamy skorygowane wartości ciśnień dla stacji od i=2

do $i=N$ (przyjmując jako „poziom zerowy" poziom stacji $i=1$):

$$\bar{p}_{si} = \bar{p}_i + g\sum_{i=2}^{N} \Delta h_{i-1/i} \cdot \varrho_{i-1/i} \qquad (2.12)$$

gdzie $\Delta h_{i-1/i} = h_{i-1} - h_i$ – różnica poziomów między stacjami $(i-1)$ oraz i [m]

UWAGA: 1) mierzone ciśnienie $p_{17} = p_t \cong 0{,}2$ MPa, natomiast $\Delta h_{1/17} = 28$ m. Wobec tego nawet przy wypełnieniu rurociągu etyliną, napór hydrostatyczny wynosi 0,207 MPa, co oznacza, że zawsze $p_{s17} < 0$.

2) Przy przyjętym „poziomie zerowym", $\bar{p}_{s1} = \bar{p}_1$.

– Wyznaczamy średnie natężenia przepływów przez poszczególne odcinki rurociągu, wynikające z pomiarów Q_p i Q_k:

$$\bar{Q}_{p\,i-1/i} = \bar{Q}_p\left[1 - 1{,}1\cdot 10^{-3}\left(\bar{t}_p - \bar{t}_{SR\,i-1/i}\right) + 961\cdot 10^{-6}\left(\bar{p}_p - \bar{p}_{SR\,i-1/i}\right)\right] \qquad (2.13)$$

$$\bar{Q}_{k\,i-1/i} = \bar{Q}_{k,s}\left[1 - 1{,}1\cdot 10^{-3}\left(\bar{t}_p - \bar{t}_{SR\,i-1/i}\right) + 961\cdot 10^{-6}\left(\bar{p}_p - \bar{p}_{SR\,i-1/i}\right)\right] \qquad (2.14)$$

gdzie: $\bar{t}_{SR\,i-1/i} = \frac{1}{2}\left(\bar{t}_{i-1} + \bar{t}_i\right)$

$$\bar{p}_{SR\,i-1/i} = \frac{1}{2}\left(\bar{p}_{i-1} + \bar{p}_i\right)$$

– Wyznaczamy średnie natężenia przepływów przez poszczególne odcinki rurociągu, wynikające ze spadków ciśnień:

$$\bar{Q}^{*}_{i-1/i} = 3600\cdot\frac{\pi D_w^2}{4}\sqrt{\frac{p_{si-1} - p_{si}}{\lambda_{M\,i-1/i}\cdot\varrho_{M\,i-1/i}\cdot\frac{1}{2D_w}\cdot\Delta x_{i-1/i}}} \qquad (2.15)$$

gdzie: $\lambda_{M\,i-1/i}$ – średni współczynnik tarcia,

$\varrho_{M\,i-1/i}$ – średnia gęstość,

$D_w = 0{,}308$ m – średnia średnica wewnętrzna rurociągu,

$\Delta x_{i-1/i} = x_i - x_{i-1}$ [m]

- Wyznaczamy dla kolejnego odcinka rozpiętego zmienną:

$$DEL\,Q_{i-1/i} = \Sigma \bar{Q}^*_{i-1/i} - \left(\bar{Q}_{pi-1/i} + Q_{ki-1/i}\right) \qquad (2.16)$$

- Badamy rozkład $DEL\,Q_{i-1/i}$ wzdłuż rozpiętego:

* jeżeli dla wszystkich $i-1/i$:

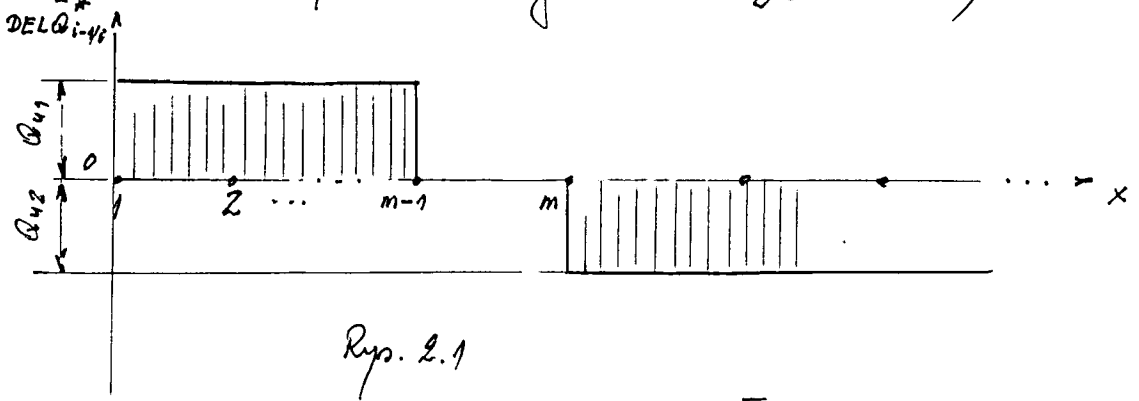
$$| DEL\,\bar{Q}^*_{i-1/i} | \leq \delta Q \qquad (2.17)$$

przecięć nie występuje (przyjmujemy z punktu widzenia tego testu),

* jeżeli rozkład $DEL\,\bar{Q}^*_{i-1/i}$ przedstawia się jak na rys. 2.1:

** przecięć występuje na odcinku $m-1/m$,

** natężenie powodzi wynosi $Q_u = \frac{1}{2}(Q_{u1} - Q_{u2})$



Rys. 2.1

Na odcinku $m-1/m$ zmienna $DEL\bar{Q}^*$ może przyjmować różne wartości, zawarte w przedziale od $-Q_u$ do $+Q_u$.

Można przypuszczać, że wrażliwość procedury z wielu względów nie będzie duża. Dla zwiększenia tej wrażliwości należy:

- wyznaczyć rozkłady $\lambda_M(x)$,
- możliwie dokładnie wyznaczyć wartości Q_M,
- sprawdzić wartości $\Delta h_{i-1/i}$,
- uśrednić odcinki $\Delta x_{i-1/i}$ niektóre krótkie, łącząc je z sąsiednimi (krótkimi) odcinkami pomiarowymi, np: SF1 - SW1 (13,1 km), SW1 - SW2 (17,7 km), SW2 - SW3 (7,2 km), SW3 - SW5 (15,8 km), SW5 - SB2 (7,9 km), SB2 - SB3 (7,1 km), SB3 - SB4 (11,0 km), SB4 - SB6 (15,5 km), SB6 - SB7 (8,2 km), SB7 - SB9 (12,9 km), SB9 - NWW (11,4 km).

2.3. Poszukiwanie miejsca przecieku.

Przy przepływie przez rurociąg jednego medium oraz braku przecieku, obserwowane ciśnienie $p_s(x)$ powinno być liniową funkcją x. Załamanie prostej $p_s(x)=f(x)$ może nastąpić w przypadku:

- niestechniości rurociągu; załamanie $p_s(x)$ występuje wówczas zawsze ku dołowi w miejscu przecieku x_v (rys. 3.4),
- jednoczesnego przepływu przez rurociąg dwóch mediów z granicą ich rozdziału w odległości x_G. W tym przypadku, jeżeli iloczyn $\lambda\varrho$ medium na odcinku $0-x_v(x_G)$ jest większy niż iloczyn $\lambda\varrho$ medium na odcinku $x_v(x_G)-L$, wówczas załamanie to jest ku dołowi (rys. 3.4); jeżeli natomiast układ wartości iloczynów $\lambda\varrho$ jest odwrotny, wówczas załamanie to jest ku górze (rys. 3.8). Bliżej zostanie to wyjaśnione w rozdz. 3. W rzeczywistości przez rurociąg mogą płynąć jednocześnie nawet 4 media.

Uwzględniając powyższe, proponuje się następującą procedurę poszukiwania miejsca przecieku:

- wyznaczamy średni gradient ciśnienia:

$$G_s = \frac{\bar{p}_p - \bar{p}_k}{L} \qquad (2.18)$$

- wyznaczamy dla każdej stacji zlinearyzowane ciśnienie:

$$\bar{p}_{Ri} = \bar{p}_p - G_s \cdot x_i \qquad (2.18)$$

oraz różnicę ciśnień:

$$\Delta\bar{p}_{Rsi} = \bar{p}_{si} - \bar{p}_{Ri} \qquad (2.19)$$

gdzie: $\bar{p}_{si}$ - otrzyma równanie (2.12)

- Dla kazdej stagji i sprawdzamy warunek:

$$|\Delta p_{RSi}| \leq \delta p \qquad (2.20)$$

gdzie $\delta p \overset{np}{=} 10\,kPa$

* jezeli tak, uznajemy ze nie wystepuje ani przeciek, ani granica rozdziału mediów,
* jezeli nie:
* * wyznaczamy „i" dla max $|\Delta \bar{p}_{RSi}|$ z warunku:

$$\max_i |\Delta \bar{p}_{RSi}| \qquad (2.21)$$

* * sprawdzamy:

$$\Delta \bar{p}_{RSi} > 0 \qquad (2.22)$$

* * * jezeli tak, uznajemy, ze załamanie charakterystyki $p_s(x)$ jest spowodowane występowaniem granicy rozdziału mediów; powinny to potwierdzić dane z systemu informatycznego PERM,
* * * jezeli nie - oznacza to, ze występuje albo przeciek, albo granica rozdziału mediów
  - jezeli granica rozdziału mediów - powinny to potwierdzić dane z systemu informatycznego PERM,
  - jezeli przeciek - powinna to potwierdzić procedura z p. rozdz. 2.1 (i ew. 2.3)

W przypadku, gdy stwierdzilismy występowanie przecieku:

- Dzielimy rurociąg na dwa odcinki:
* od $i = 1$ do i odpowiadającemu warunkowi $\max_i |\Delta p_{RSi}|$
* od i odpowiadającemu w/w warunkowi do $i = 17$
- Wyznaczamy przyrosty gradientów:

11

$$\Delta G_p = G_s - G_p$$

$$\Delta G_k = G_s - G_k$$

analogicznie, jak w normalnej procedurze wyznaczania x_v

- Wyznaczamy miejsce przecieku:

$$x_v = L\left(1 - \frac{\Delta G_p}{\Delta G_k}\right)^{-1} \qquad (2.23)$$

- Wyznaczamy natężenie przecieku Q_u - analogicznie, jak w normalnej procedurze wyznaczania x_v i Q_u.

Sytuacja znacznie się komplikuje, jeżeli w rurociągu występują dwa media (oraz granica ich rozdziału x_G) oraz przeciek w miejscu x_v.

Rozpatrzmy przykład: (1) $x_G = 70\,km$, $\Delta\bar{p}_G = 150\,kPa$

$x_v = 30\,km$, $\Delta\bar{p}_u = -80\,kPa$

Dodatnia wartość $\Delta\bar{p}_G$ oznacza, że najpierw pompowane było medium o większej wartości iloczynu $\lambda \cdot \varrho$ (np. olej napędowy), a następnie o mniejszej wartości tego iloczynu (np. etylina).

Wynikowy rozkład $\Delta\bar{p}_{RS}$ pokazano na rys. 2.2.

(2) $x_G = 70\,km$, $\Delta\bar{p}_G = -150\,kPa$

$x_v = 30\,km$, $\Delta\bar{p}_u = -80\,kPa$

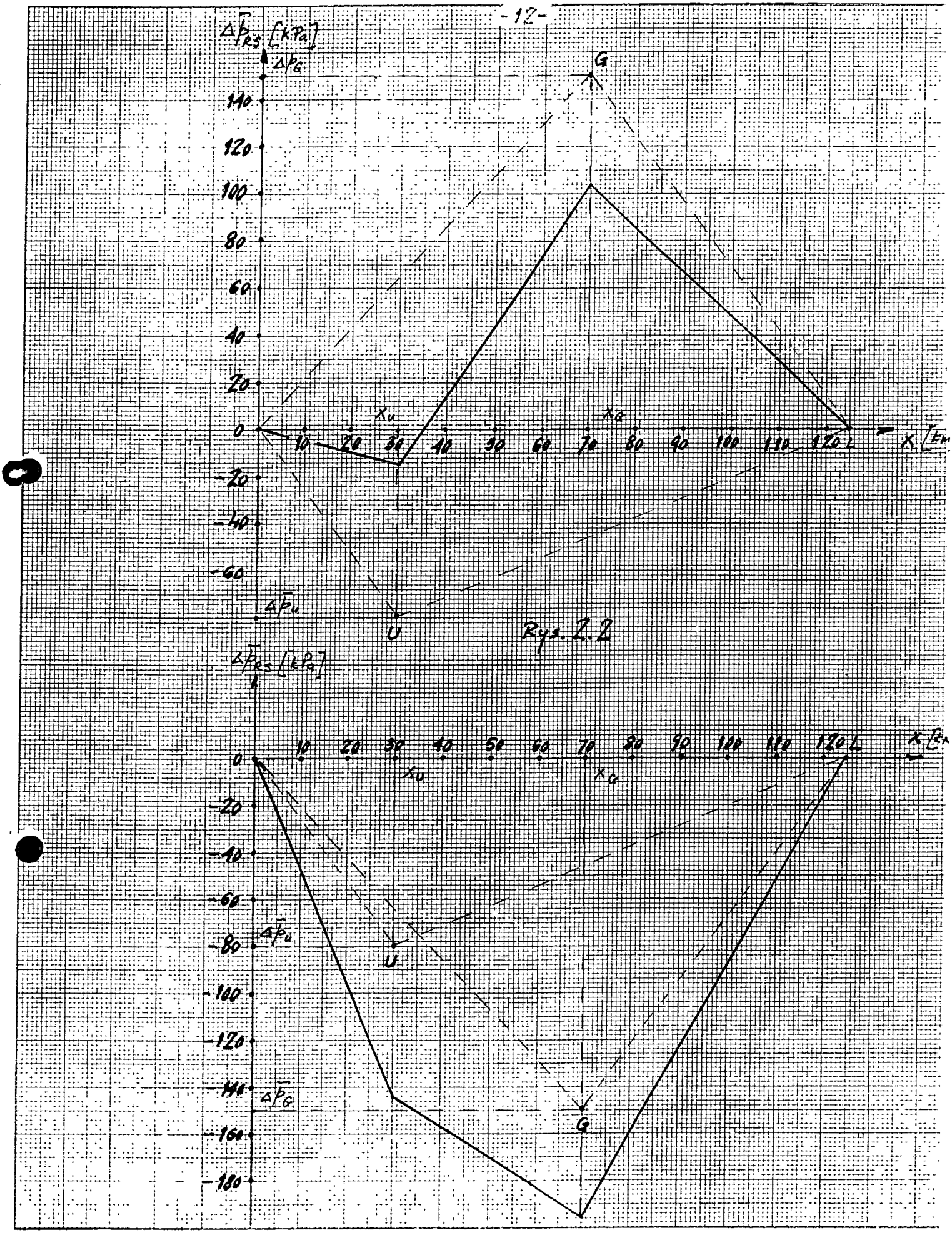
Ujemna wartość $\Delta\bar{p}_G$ oznacza, że najpierw pompowane było medium o mniejszej, a następnie o większej wartości iloczynu $\lambda \cdot \varrho$.

Wynikowy rozkład $\Delta\bar{p}_{RS}$ pokazano na rys. 2.3.

Jak widać, w obu przypadkach $\Delta\bar{p}_{RS}(x)$ wykazuje dwa załamania:

- w punkcie x_G,
- w punkcie x_v.

W takiej sytuacji można bądź dalej poszukiwać komputerowo x_v (czerpiąc dane o x_G z systemu informatycznego PEKN), bądź


$\Delta\bar{p}_{ks}$ [kPa]
$\Delta\bar{p}_G$
G
140
120
100
80
60
40
20
0
x_u
x_G
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120 L
x [km]
-20
-40
-60
$\Delta\bar{p}_u$
U

Rys. 2.2

$\Delta\bar{p}_{ks}$ [kPa]
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120 L
x [km]
x_u
x_G
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
$\Delta\bar{p}_u$
U
$\Delta\bar{p}_G$
G

Rys. 2.3

ograniczyć się do pokazania rozkładu $\Delta\bar{p}_{RS}(x)$ na monitorze na tle wypełnienia rurociągu (gdzie różne media - przynajmniej w systemie PERN - przedstawione są różnymi barwami).

Wydaje się, że przy dalszej analizie komputerowej wejdziemy w obszar, w którym $\Delta\Delta\bar{p}_{RSi}$ będą mniejsze niż zakłócenia pomiarowe. Dlatego też proponuje się, aby w omawianej sytuacji procedurę zakończyć zmonitorowaniem - j.w.

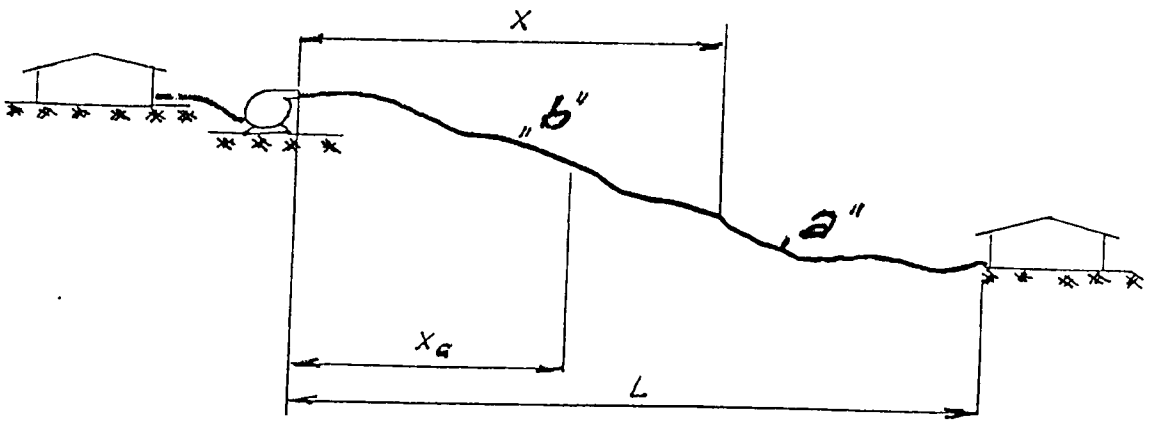
3. WYSTĄPIENIE PRZECIEKU W POBLIŻU GRANICY ROZDZIAŁU MEDIÓW.

3.1. Przepływ i rozkład ciśnienia w rurociągu przy jednoczesnym przepływie dwóch mediów.

Jednoczesny przepływ przez rurociąg dwóch (a tym bardziej większej liczby) mediów utrudnia dokładną lokalizację przecieku, a w przypadku niesprawności choćby jednego z przetworników pomiarowych przepływu - również wykrycie faktu przecieku.

Aby wyjaśnić istotę tych utrudnień założymy, że jednocześnie tłoczymy dwa media (rys. 3.1):

- etylinę o średniej gęstości $\varrho = 755 \frac{kg}{m^3}$ i średnim współczynniku tarcia $\lambda = 15,61 \cdot 10^{-3}$,
- olej napędowy o średniej gęstości $\varrho = 830 \frac{kg}{m^3}$ i średnim współczynniku tarcia $\lambda = 22,16 \cdot 10^{-3}$.



Rys. 3.1

W analizie pomijamy straty i zakłócenia pomiarowe, a także stan nieustalony w rurociągu. Wyniki obliczeń, przedstawione na odrębnych wykresach, otrzymano w oparciu o założenia sformuło-

wane uprzednio w [1, Etap 1] oraz [3].

Rozpatrzmy najpierw przypadek, gdy medium „a" (wcześniejsze) stanowi etylina, a medium „b" (późniejsze) olej napędowy.

Zmiana tłoczenia nastąpiła w momencie $t=0$, a ściślej $x_G=0$ (rys. 3.2). Przed przełączeniem tłoczenia, t. zn. dla $t<0$, przez rurociąg płynęła tylko etylina. Ciśnienie za pompą było stałe i wynosiło 2,2329 MPa; stałe było również natężenie przepływu za pompą $Q_p = 261{,}96 \frac{m^3}{h}$.

Przełączenie tłoczenia na olej napędowy spowodowało:

- skokowy wzrost ciśnienia za pompą do wartości $p_p = 2{,}4604$ MPa; w miarę przesuwania się granicy rozdziału mediów x_G ciśnienie to monotonicznie rośnie, osiągając dla $x_G = L$ wartość $p_p = 2{,}5578$ MPa (t. zn. wzrastając o około 4% wartości p_p dla $t=0$),
- skokowy wzrost natężenia przepływu do wartości $Q_p = 273{,}44 \frac{m^3}{h}$; przy wzroście x_G przepływ ten monotonicznie maleje, osiągając dla $x_G = L$ wartość $Q_p = 223{,}78 \frac{m^3}{h}$ (t. zn. malejąc aż o około 14,5% wartości Q_p przy $t=0$).

Położenie granicy rozdziału mediów x_G jest funkcją (nieliniową - wobec nieliniowej zmiany Q_p, a tym samym prędkości przepływu w) czasu; czas ten na rys. 3.2 pokazano w nawiasach.

Gdy przez rurociąg płynęło jedno medium (etylina), ciśnienie w każdym punkcie rurociągu (przy braku szumów i zakłóceń pomiarowych) było stałe. Przebiegi ciśnień w wybranych punktach x rurociągu w funkcji x_G (a więc i czasu) po przełączeniu tłoczenia na olej napędowy pokazano na rys. 3.3. Jak widać, ciśnienie na początku rurociągu monotonicznie rośnie (co było już pokazane na rys. 3.2). W obliczeniach przyjęto, że ciśnienie na końcu rurociągu

jest stałe i wynosi $p_k = 0{,}2\,MPa$ (ciśnienie to wynika z ciśnienia w zbiorniku końcowym - patrz rys. 3.1). Natomiast we wszystkich pozostałych punktach rurociągu ciśnienie najpierw nieliniowo maleje (do granicy $x = x_G$), a następnie nieliniowo rośnie, przy czym zmiany te są bardzo duże (nawet do $0{,}3\,MPa$).

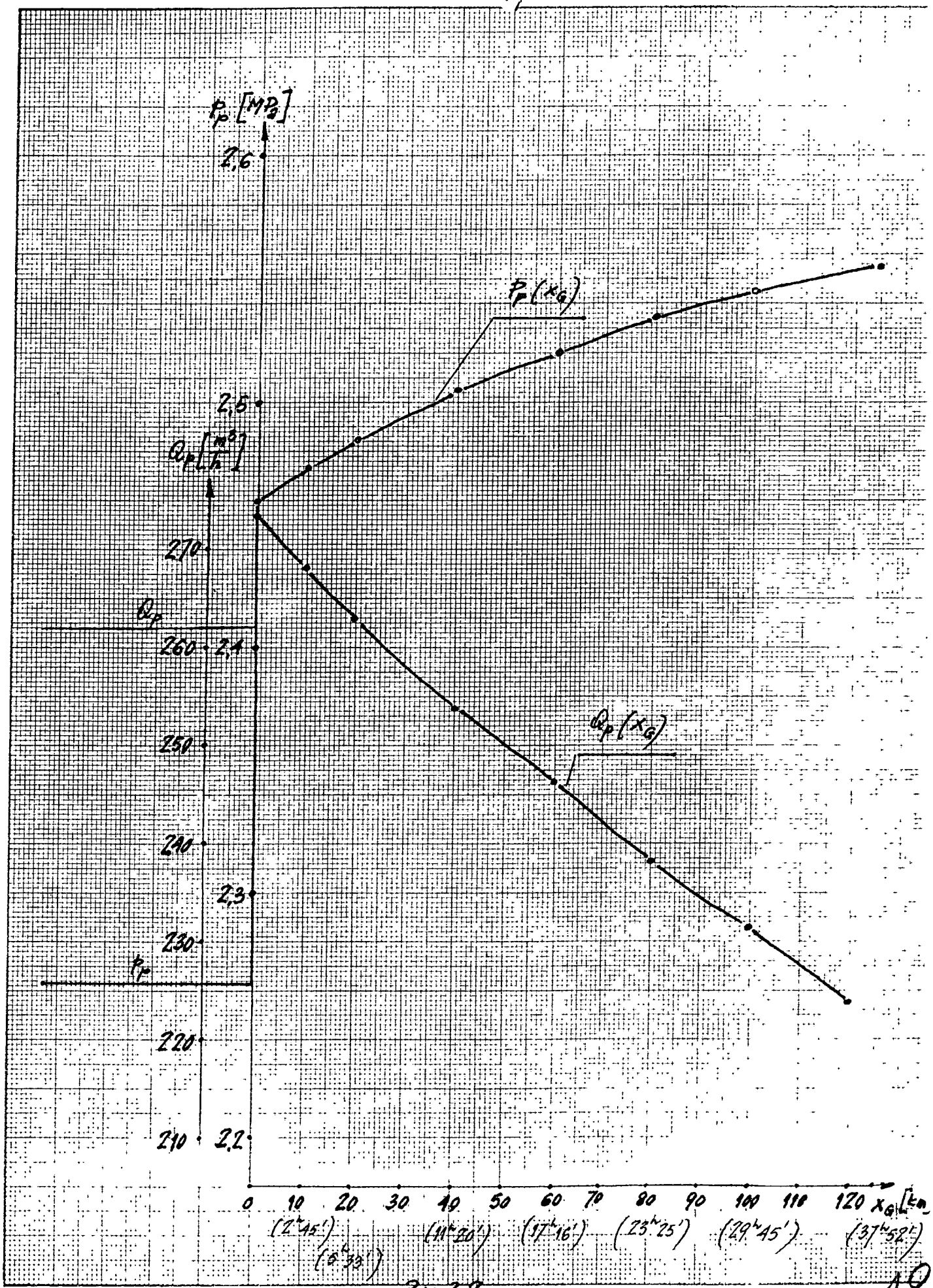
Aby odfiltrować siły wpływu na rozkład ciśnienia napływu hydraulicznego (zmieniającego się w ślad za zmianą x_G), na rys. 3.4 pokazano przykładowo rozkłady $p_S(x)$ oraz $p_{SR}(x)$ dla $x_G = 60\,km$. Warto zwrócić uwagę na to, że $p_S(x)$ stanowią dwie półproste (a nie krzywe - jak na rys. 3.3 !!!), przecinające się w punkcie $x = x_G$.

Na rys. 3.5 pokazano dla kilku wartości x_G wykresy $\Delta p_{SR}(x)$. Również i te wykresy dla każdej wartości x_G składają się z dwóch półprostych, przecinających się w punkcie $x = x_G$.

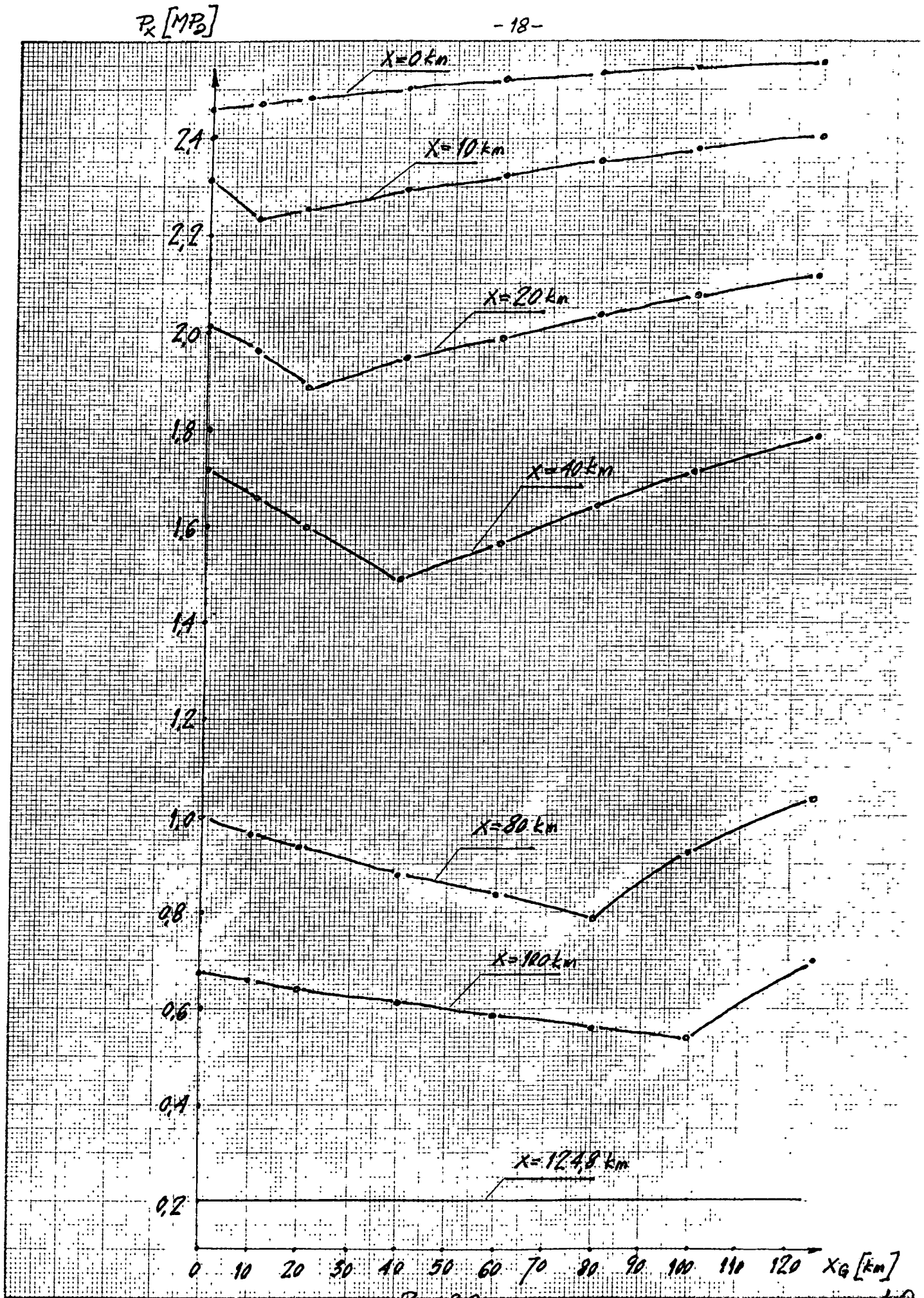
Rozpatrzmy z kolei przypadek, gdy medium „a" (wcześniejsze) stanowi olej smarowy, a medium „b" (późniejsze) etylina. Wykresy, odpowiadające omówionym wyżej (rys. 3.2 ÷ 3.5) pokazano na rysunkach 3.6, 3.7, 3.8 i 3.9

Powyższą analizę przeprowadzono dla osiągnięcia dwóch celów:

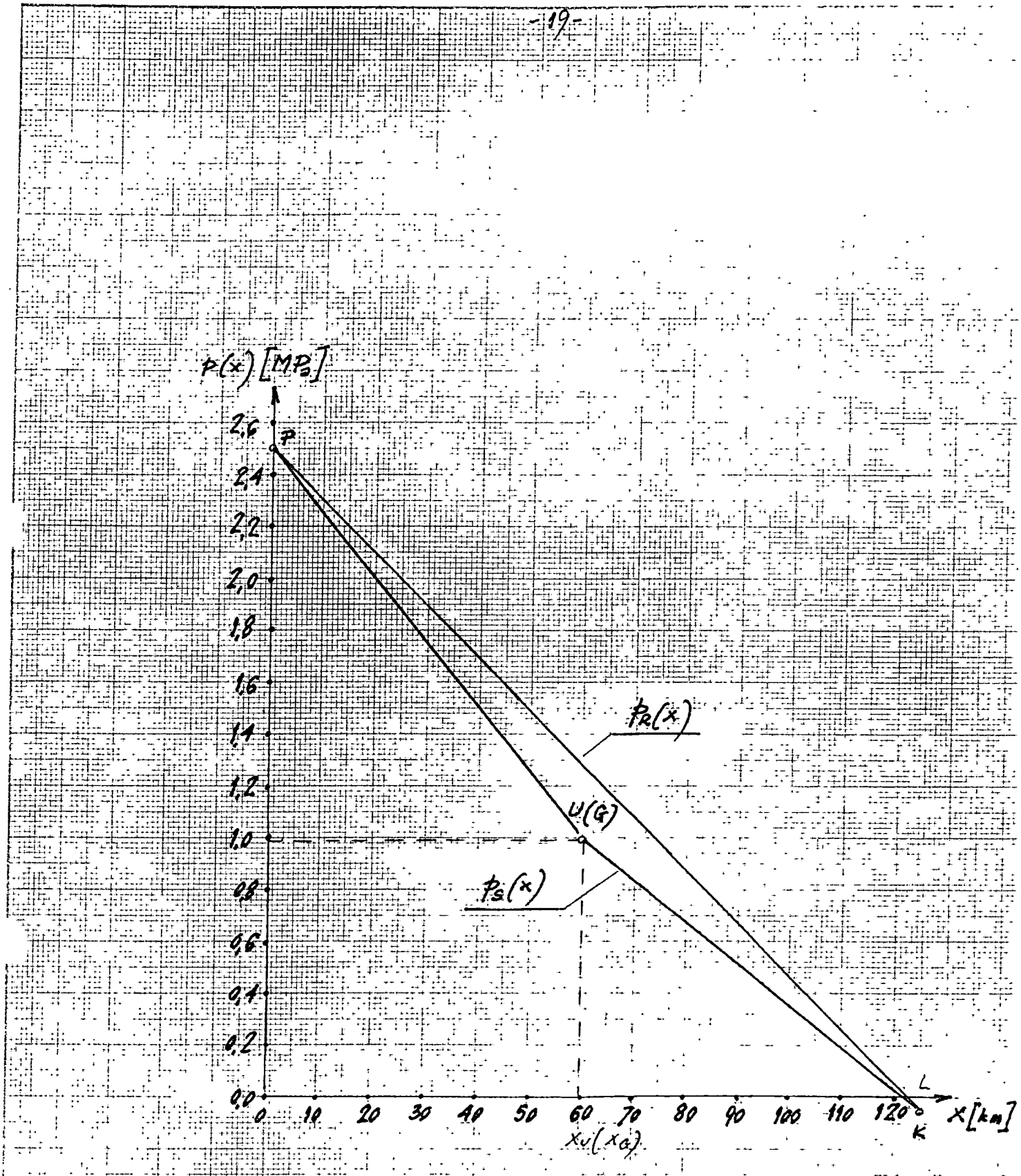
- zaleceniu procedury bieżącego śledzenia granicy rozdziału mediów x_G,
- zaleceniu sposobu takiego korygowania wartości $\bar{p}_i(t)$ w stosunku do wartości $\bar{p}_i(t-T)$ w procedurze lokalizacji przecieków, które uwzględniałoby zmiany $p_i(t)$, spowodowane przemieszczaniem się x_G (gdzie T - szerokość „okienka" między


p_p [MPa]
2,6
2,5
2,4
2,3
2,2
$p_p(x_G)$
Q_p [m³/s]
270
260
250
240
230
220
210
Q_p
p_p
$Q_p(x_G)$
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 x_G [km]
(1h45') (5h33') (11h30') (17h16') (23h25') (29h45') (37h52')

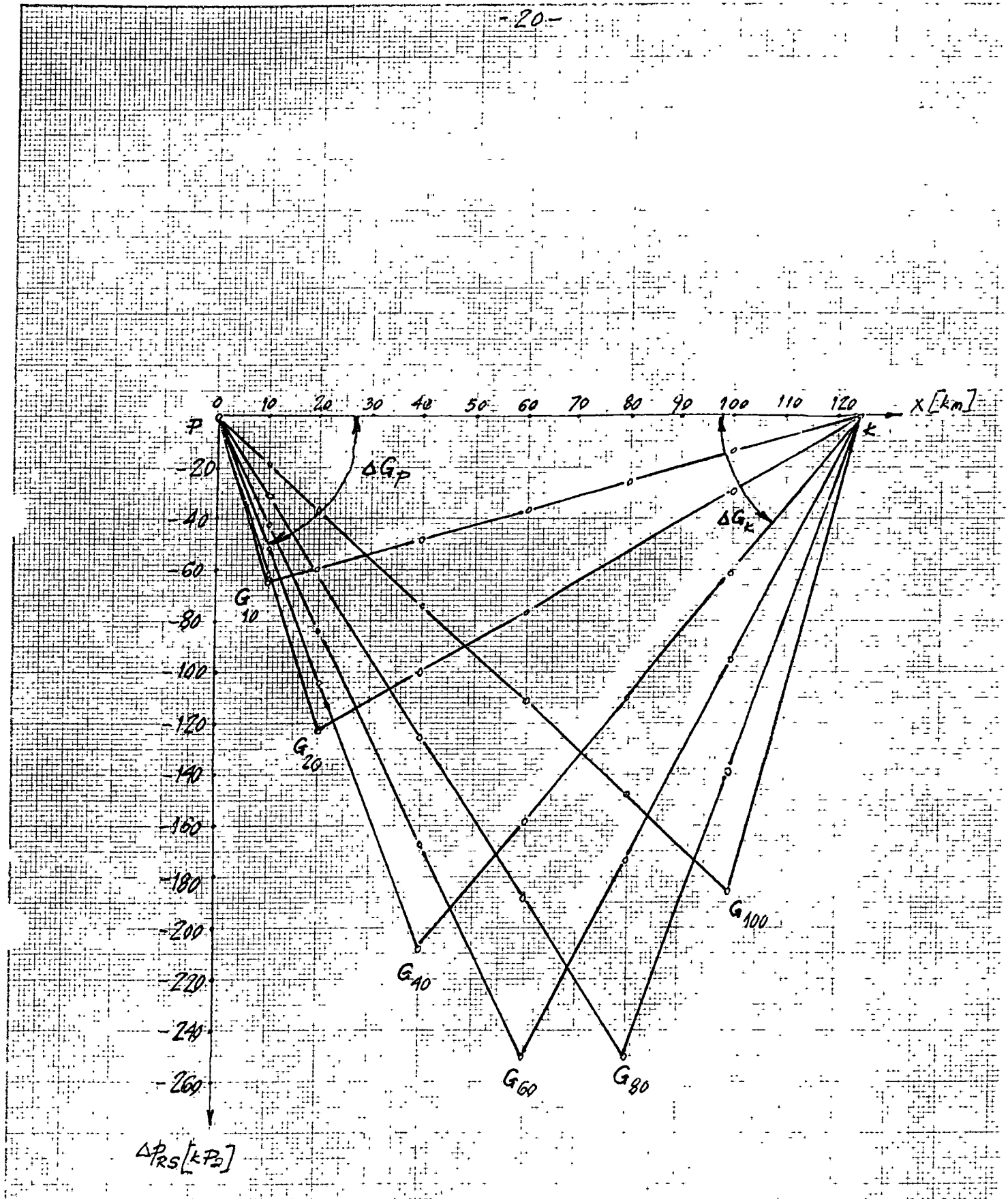
Rys. 3.2


P_x [MPa]
X=0 km
X=10 km
X=20 km
X=40 km
X=80 km
X=100 km
X=124,8 km
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
X_G [km]

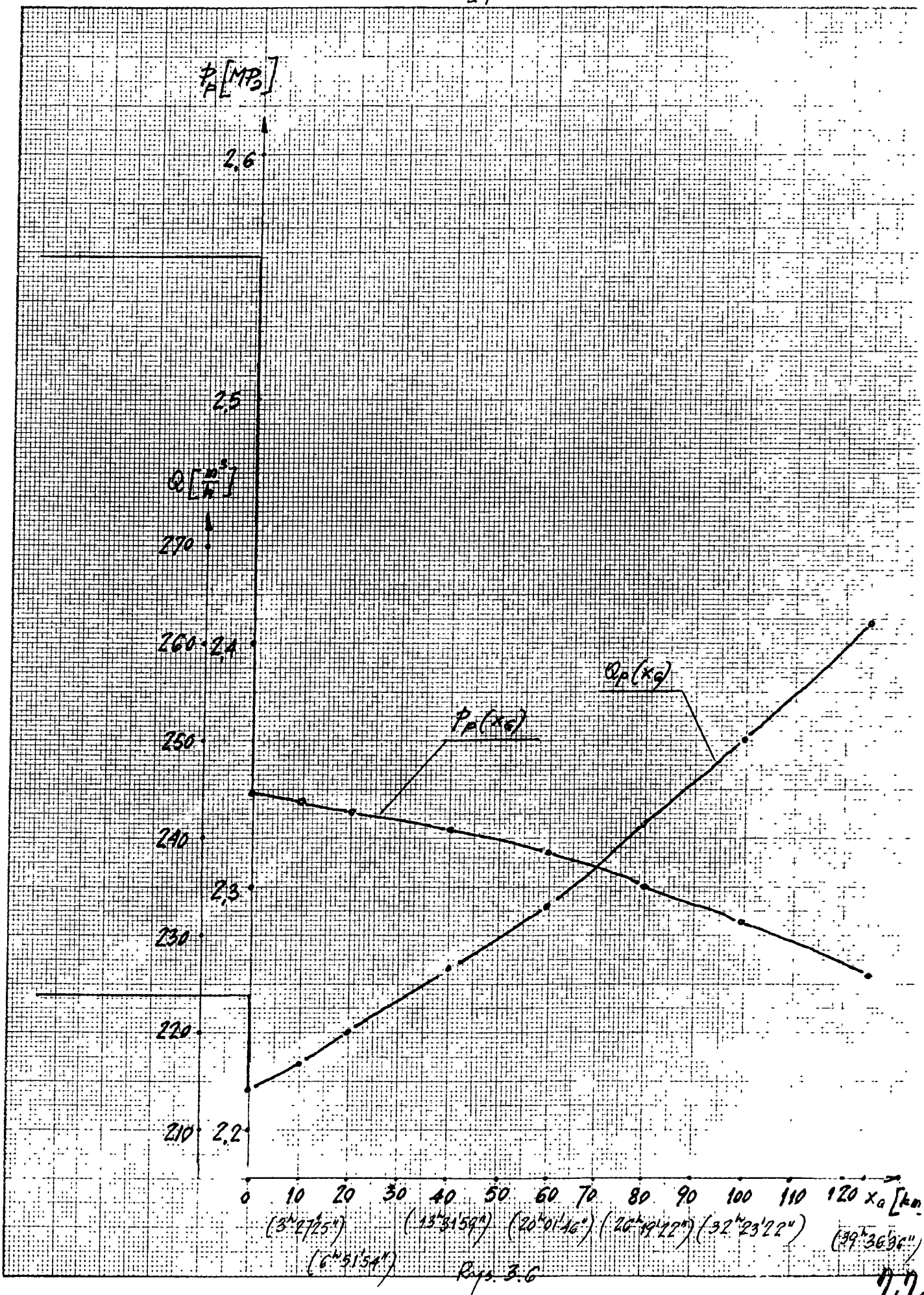
Rys. 3.3


p(x) [MPa]
2,6
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
P
$p_R(x)$
U(G)
$p_S(x)$
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
L
K
x [km]
$x_U(x_G)$

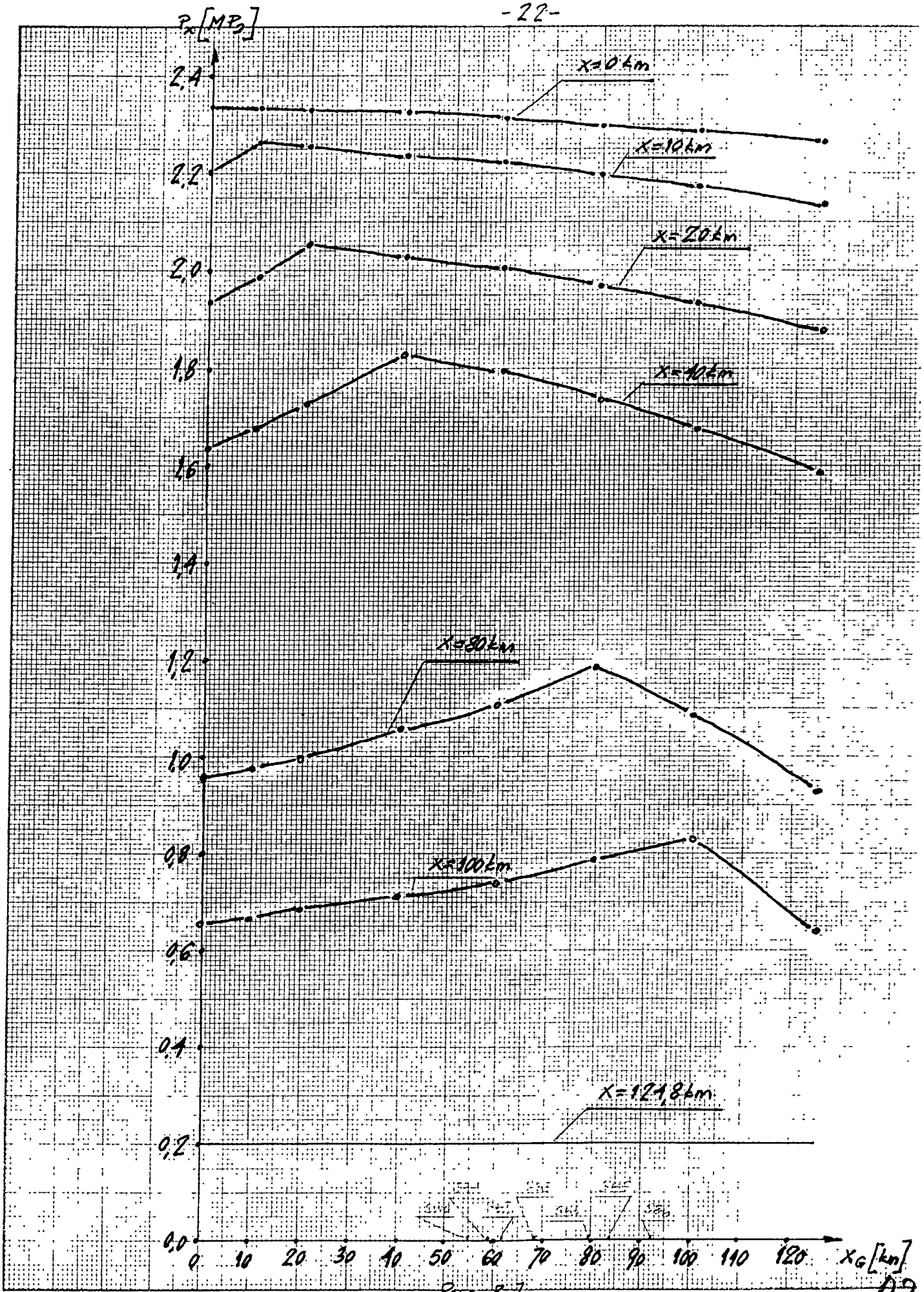
Rys. 3.4


0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
X [km]
P
k
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
-200
-220
-240
-260
ΔG_P
ΔG_k
G_10
G_20
G_40
G_60
G_80
G_100
Δp_RS [kPa]

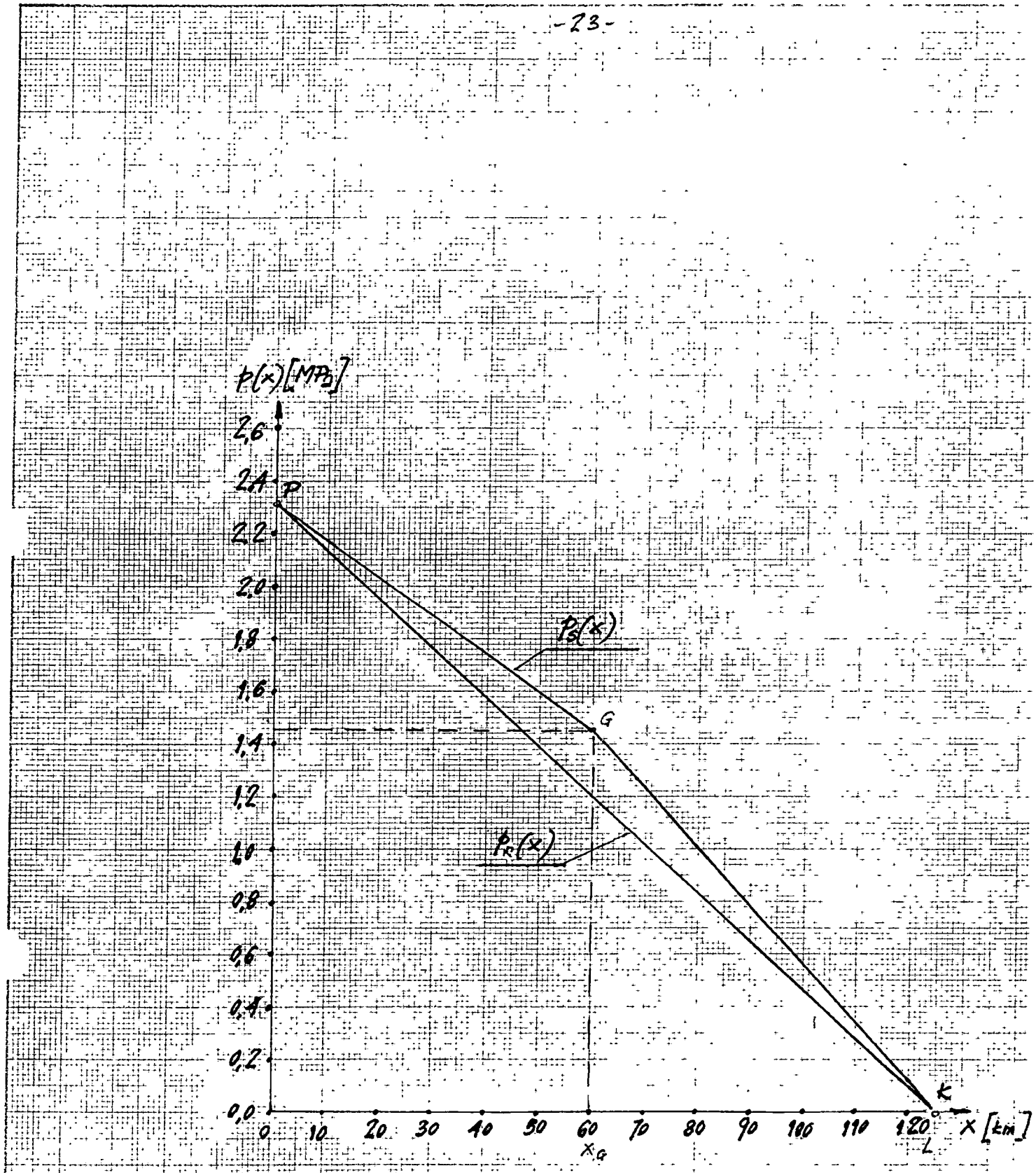
Ry. 3.5


p_p [MPa]
2,6
2,5
Q [m³/h]
270
260
2,4
250
240
2,3
230
220
210
2,2
$Q_p(x_G)$
$p_p(x_G)$
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 x_G [km]
(3h27'25")
(6h51'54")
(13h31'59")
(20h01'16")
(26h19'22")
(32h23'22")
(39h36'36")

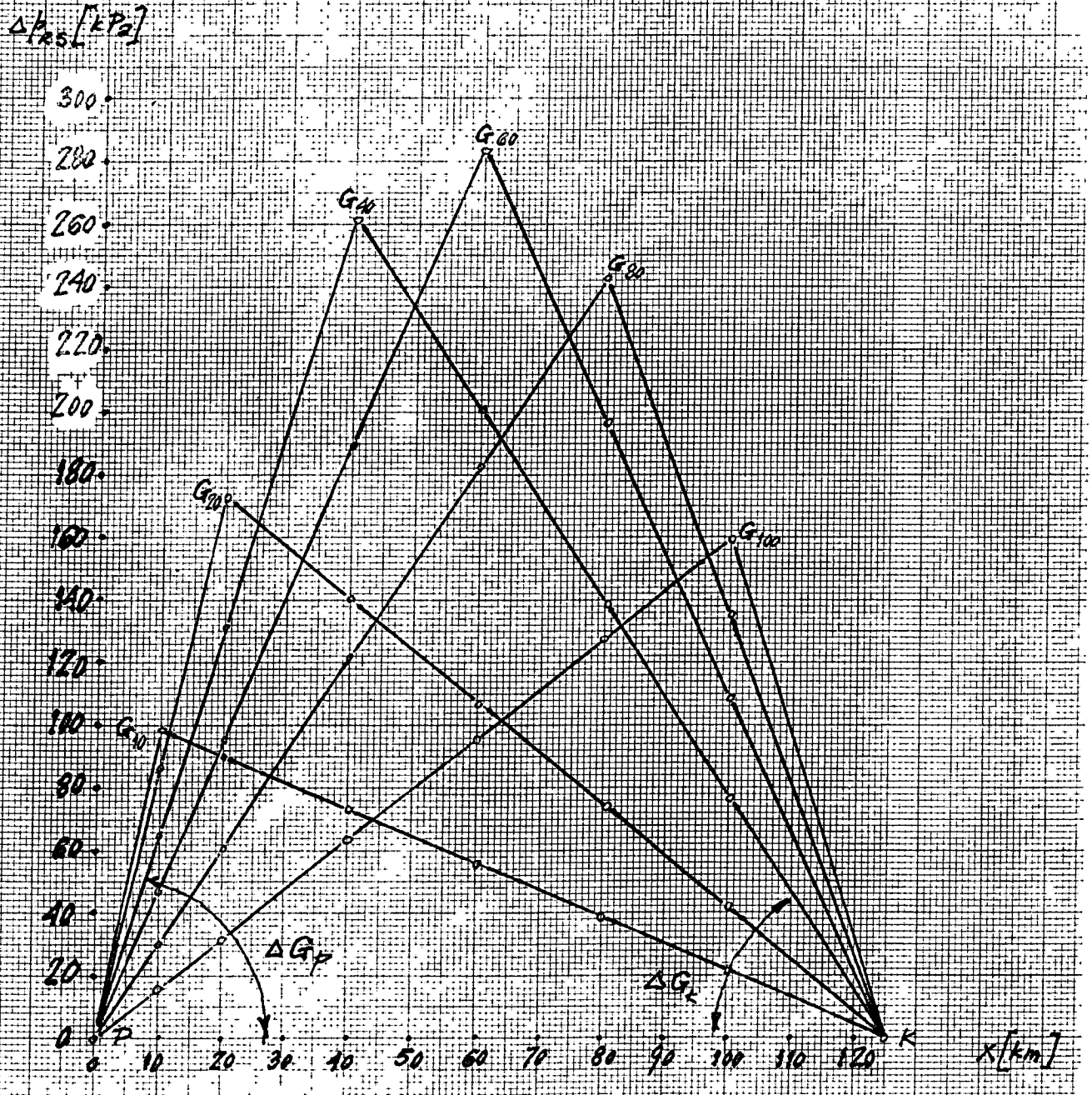
Rys. 3.6


p_x [MPa]
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
x=0 km
x=10 km
x=20 km
x=40 km
x=80 km
x=100 km
x=121,8 km
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
x_G [km]

Rys. 3.7


p(x)[MPa]
2,6
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
P
G
K
$p_G(x)$
$p_K(x)$
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
x [km]
x_G
L

Rys. 3.8


Δp_rs [kPa]
300
280
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
G10
G20
G40
G60
G80
G100
ΔGp
ΔGL
P
K
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
x [km]

Rys. 3.9

właściwościami $\bar{p}_i$ bieżącymi i odniesienia).

3.2. Procedura bieżącego śledzenia granicy rozdziału mediów.

W systemie informatycznym PERM jest wyznaczana wartość x_G z zależności:

$$x_G = \int_0^t w(t)\,dt \qquad (3.1)$$

gdzie $w = \frac{1}{3600} \cdot \frac{4}{\pi D_H^2} \cdot Q \left[\frac{m}{s}\right]$ - prędkość przepływu medium w rurociągu.

Ale wobec stosunkowo dużych błędów pomiaru Q (w granicach kilku procent), można jedynie traktować jako orientacyjną.

Z rys. 3.5 i 3.9 wynika natomiast, że dla dowolnej wartości x_G:

$$\Delta\bar{p}_{Ri} = \Delta\bar{G}_p \cdot x_G = -\Delta\bar{G}_k (L - x_G)$$

a stąd (w przypadku braku przecieku):

$$x_G = L\left(1 - \frac{\Delta G_p}{\Delta G_k}\right)^{-1} \qquad (3.2)$$

Zależność (3.2) jest identyczna z (2.23) z tym, że inne są przyjęte przedziały przyrostów ΔG_p i ΔG_k. Powinna ona umożliwić bieżące śledzenie x_G poza odcinkami skrajnymi (dla wyznaczenia G_p i G_k potrzebne są minimum dwa punkty); na odcinkach skrajnych pozostaje posługiwanie się zależnością (3.1).

3.3. Korygowanie wartości $p_i(t)$ w stosunku do wartości $p_i(t-\tau)$.

Zależność wyznaczające wartości przyrostów, o jakie należałoby skorygować $p_i(t)$ lub $p_i(t-\tau)$ dla zminimalizowania błędów x_v, wyprowadzone na drodze teoretycznej, zamieszczono w [3]. Ale nie będą one wykorzystane (przynajmniej teraz) z dwóch powodów:

- dla obliczenia w/w przyrostów potrzebna jest znajomość współczynników $n=\frac{\varrho_a}{\varrho_b}$ oraz $m=\frac{\varrho_a \lambda_a}{\varrho_b \lambda_b}$, a współczynniki te nie są znane,
- wyprowadzone zależności są złożone i mocno skomplikowałyby procedurę lokalizacji przecieków.

Analizując rysunki 3.5 i 3.9 łatwo jednak zauważyć, że odcinki PG_j i G_jK stanowią niejako sprzężone promienie wodzące z punktami obrotu P i K oraz „jarzmem" przesuwającym się po krzywej, stanowiącej obwiednię punktów G. Prędkość pozioma (równoległa do osi x) przemieszczania się punktu G jest równa prędkości przepływu mediów; jest ona stosunkowo mała: przy tłoczeniu przez 1 pompę $w_{sr} = 0,8 \div 1,1 \frac{m}{s}$.

Załóżmy (rys. 2.10), że w czasie $(t-\tau)$ granica rozdziału mediów wynosiła x_{G1} (punkt G_1 na obwiedni), a kolejne wartości $\Delta p_{RSi}(t-\tau)$ w kilku stacjach:

- przed granicą rozdziału mediów:

* dla $x = x_V$, $\Delta p_{RSi}(t-\tau) = \Delta p_{RSV}(t-\tau) = VV_1$,

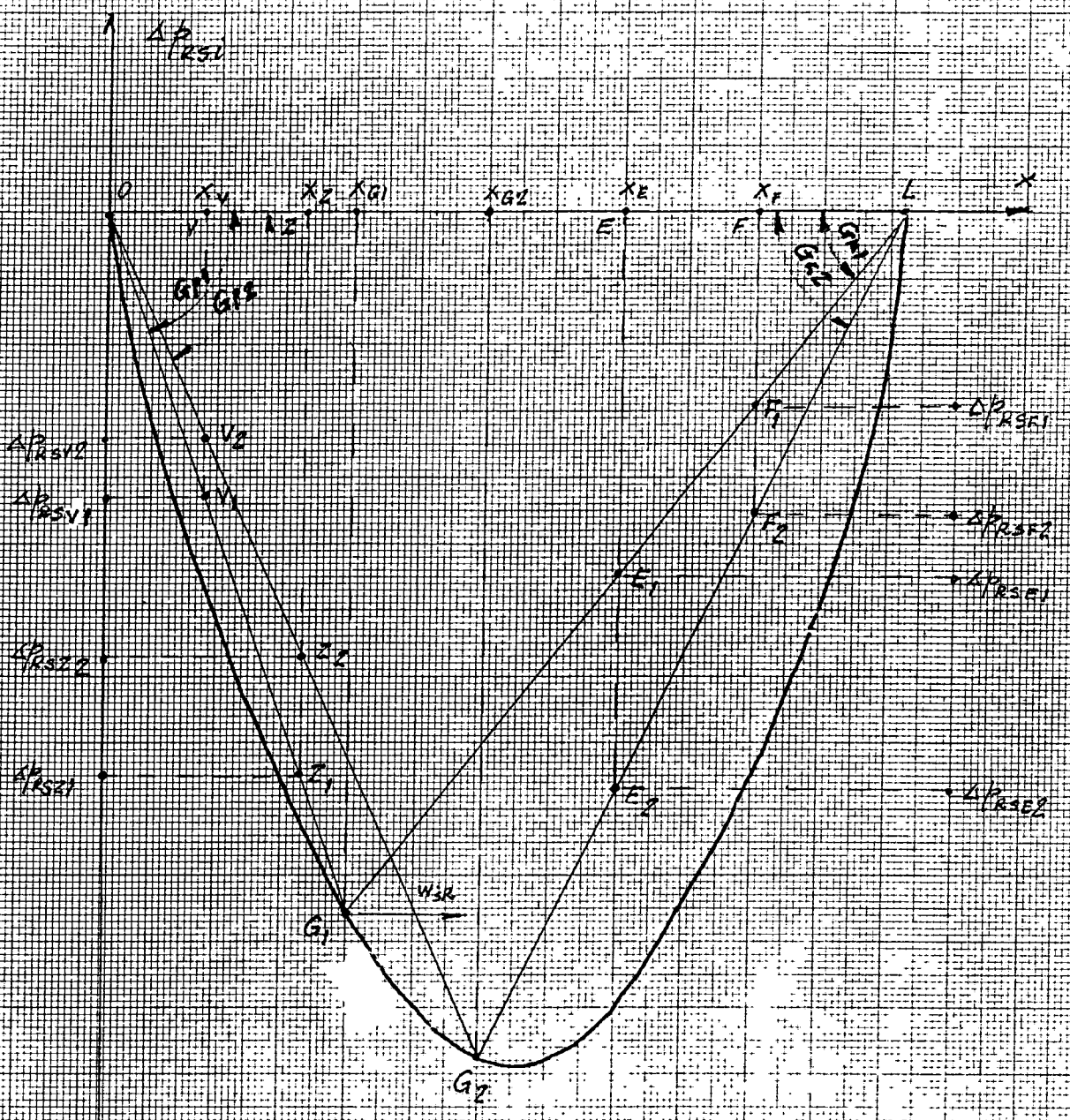
* dla $x = x_Z$, $\Delta p_{RSi}(t-\tau) = \Delta p_{RSZ}(t-\tau) = ZZ_1$,

- za granicą rozdziału mediów:

* dla $x = x_E$, $\Delta p_{RSi}(t-\tau) = \Delta p_{RSE}(t-\tau) = EE_1$,

* dla $x = x_F$, $\Delta p_{RSi}(t-\tau) = \Delta p_{RSF}(t-\tau) = FF_1$.

Po czasie $\Delta t = \tau$ granica rozdziału mediów przesunęła się do x_{G2} (punkt G_2 na obwiedni). Wyszczególnione w w/w punktach



Δp_{RSi}
0
X_V
X_Z
X_{G1}
X_{G2}
X_E
X_F
L
X
V
Z
E
F
G_1^1
G_1^2
G_2^1
G_2^2
Δp_{RSV2}
Δp_{RSV1}
Δp_{RSZ2}
Δp_{RSZ1}
V_2
V_1
Z_2
Z_1
F_1
F_2
E_1
E_2
Δp_{RSF1}
Δp_{RSF2}
Δp_{RSE1}
Δp_{RSE2}
w_{sR}
G_1
G_2

Rys. 3.10

wartości $\Delta p_{RSi}(t)$ wynoszą - odpowiednio:

$$\Delta p_{RSV}(t) = VV_2,\ \Delta p_{RSZ}(t) = ZZ_2,\ \Delta p_{RSE}(t) = EE_2,\ \Delta p_{RSF}(t) = FF_2,$$

a zatem ich przyrosty po czasie τ:

$$\Delta[\Delta p_{RSV}(\tau)] = \Delta p_{RSV}(t) - \Delta p_{RSV}(t-\tau) = V_2V_1,$$

$$\Delta[\Delta p_{RSZ}(\tau)] = \Delta p_{RSZ}(t) - \Delta p_{RSZ}(t-\tau) = Z_2Z_1,$$

$$\Delta[\Delta p_{RSE}(\tau)] = \Delta p_{RSE}(t) - \Delta p_{RSE}(t-\tau) = E_2E_1,$$

$$\Delta[\Delta p_{RSF}(\tau) = \Delta p_{RSF}(t) - \Delta p_{RSF}(t-\tau) = F_2F_1.$$

Łatwo wykazać, że:

$$V_2V_1 = x_V \cdot \Delta G_p \qquad E_2E_1 = (L - x_E) \cdot \Delta G_k$$

$$Z_2Z_1 = x_Z \cdot \Delta G_p \qquad F_2F_1 = (L - x_F) \cdot \Delta G_k$$

gdzie: $\Delta G_p = G_{p2} - G_{p1}$ - przyrost gradientu dla $x < x_G$

$\Delta G_k = G_{k2} - G_{k1}$ - przyrost gradientu dla $x > x_G$.

Dla niedużego przedziału czasu $\Delta t = \tau$ można przyjąć, że przyrost gradientu jest liniową funkcją czasu:

$$\Delta G_p = a_p \cdot \tau$$

$$\Delta G_k = a_k \cdot \tau$$

Otrzymujemy zatem:

- dla $x < x_G$:

$$\Delta[\Delta p_{RSi}(\tau)] = x_i \cdot a_p \cdot \tau \qquad (3.3)$$

- dla $x > x_G$:

$$\Delta[\Delta p_{RSi}(\tau)] = (L - x_i) \cdot a_k \cdot \tau \qquad (3.4)$$

W tym przypadku wystarczy na bieżąco identyfikować (np. metodą analizy regresyjnej) dwa współczynniki: a_p i a_k.

Korekty (3.3) i (3.4) muszą być oczywiście związane z x_G, a nie z x_V; na przykład w sytuacji - jak poniżej, korekta w/g (3.3) dotyczy stacji na odcinku od $x=0$ do $x=x_G$, a korekta w/g (3.4) - stacji od $x=x_G$ do $x=L$.

0 x_V x_G

Opracowywane dotychczas procedury lokalizacji przecieków oparte były nie na zmiennych $\Delta[\Delta p_{RSi}(\tau)]$, lecz na zmiennych $\Delta p_i(\tau)$. Aby skorzystać z zależności (3.3) i (3.4) należałoby zatem:

- albo zmodyfikować w/w procedury tak, aby bazowały one na zmiennych $\Delta[\Delta p_{RSi}(\tau)]$; wydaje się, że jest to godne rozważenia,
- albo zależności (3.3) i (3.4) rozciągnąć również na zmienne $\Delta p_i(\tau)$.

Ten ostatni wniosek można uzasadnić następująco:

$$\Delta p_{RSi} = p_{Si} - p_{Ri} = \left[p_i - f(\varrho, \Delta h)\big|_t\right] - \left[p_p - G_s \cdot x_i\right]$$

stąd:
$$\Delta\left[\Delta p_{RSi}(\tau)\right] = \left[p_i(t) - f(\varrho, \Delta h)\big|_t - p_p(t) + G_s(t)\cdot x_i\right] - \left[p_i(t-\tau) - f(\varrho, \Delta h)\big|_{t-\tau} - p_p(t-\tau) + G_s(t-\tau)\cdot x_i\right] \qquad (3.5)$$

Dla niezbyt dużego przedziału czasu τ można przyjąć:

(a) $p_p(t) \cong p_p(t-\tau)$; jak już wspomniano, w czasie około 40 h $p_p(t)$ zmienia się o około 4%, t. zn. (przy tłoczeniu medium przez 1 pompę) o około 2,5 kPa;

(b) $p_k(t) \cong p_k(t-\tau)$; ciśnienie $p_k(t)$ zależy bowiem od ciśnienia w zbiorniku końcowym;

(c) wobec (a) i (b): $G_s(t) \cong G_s(t-\tau)$.

Ponadto zakładamy (z kilku powodów), że lokalizacja przecieków nie obejmuje odcinka rurociągu, odległego od x_G o $\pm \Delta x_m$; odcinek Δx_m powinien wynosić 1,5 ÷ 2,0 km.

Przy tym założeniu:

(d) $f(\varrho, \Delta h)_t = f(\varrho, \Delta h)_{t-\tau}$

Uwzględniając (a) ÷ (d) w (3.5), otrzymujemy:

$$\Delta\left[\Delta p_{Rsi}(\tilde{\tau})\right] = \Delta p_i(\tilde{\tau}) \qquad (3.6)$$

W świetle powyższych rozważań proponuje się następującą procedurę korygowania zmiennych Δp_{Rsi} (lub Δp_i):

- wyznaczamy wartość x_6.
- wyznaczamy na bieżąco (np. metodą analizy regresyjnej) zmienne:

* dla $x_i < x_6$: a_p, będącą współczynnikiem równania:

$$\frac{\Delta\left[\Delta p_{Rsi}(\Delta t)\right]}{x_i} = a_p \cdot \Delta t$$

* dla $x_i > x_6$ a_k, będącą współczynnikiem równania:

$$\frac{\Delta\left[\Delta p_{Rsi}(\Delta t)\right]}{L - x_i} = a_k \cdot \Delta t$$

- znając rozdzielczość otrzymania $\tilde{\tau}$, wyznaczamy wartości przyrostów:

* dla $x_i < x_6$: $\Delta\left[\Delta p_{Rsi}(\tilde{\tau})\right] = x_i \cdot a_p \cdot \tilde{\tau}$ (3.7)

* dla $x_i > x_6$: $\Delta\left[\Delta p_{Rsi}(\tilde{\tau})\right] = (L - x_i) \cdot a_k \cdot \tilde{\tau}$

4. JEDNOCZESNE WYSTĄPIENIE PRZECIEKU I SKOKOWEJ ZMIANY CIŚNIENIA NA KOŃCU LUB NA POCZĄTKU RUROCIĄGU.

Próbowano znaleźć procedurę, która umożliwiałaby wykrywanie i lokalizację przecieków po skokowej zmianie ciśnienia na końcu lub na początku rurociągu jeżeli w czasie trwania stanu nieustalonego. Stwierdzono, że stworzenie takiej procedury jest możliwe, jednakże jej skuteczność byłaby bardzo niska, a stopień skomplikowania - wysoki. Dlatego też zrezygnowano się, aby w tego typu sytuacjach wyłączyć działanie procedur wykrywania i lokalizacji przecieków.

Jak wynika z poprzednich badań [4], czas ustalania się ciśnień w rurociągu po wystąpieniu w/w zakłóceń wynosi 15÷25 min (podobnie, jak w przypadku uruchomienia tłoczenia po uprzednim postoju instalacji).

Uwzględniając powyższe, proponuje się następujące postępowanie:

- Sprawdzamy, czy zakłócenie jest wynikiem awarii przetwornika ciśnienia, czy też skokowej zmiany ciśnienia.

Jeżeli jest to skokowa zmiana ciśnienia (niezależnie od jej przyczyny), wówczas:

* sygnał zmiany ciśnienia Δp_i wystąpi najpierw na ostatniej (p_{17}) lub na pierwszej (p_0) stacji pomiarowej,

* sygnał ten powinien pojawić się na następnych stacjach pomiarowych po upływie liczby cykli pomiarowych:

** jeżeli zakłócenie wystąpiło na końcu rurociągu:

$$\Delta k_i = \frac{L - x_i}{T_0 \cdot a} - \pm 2 \qquad (4.1)$$

** jeżeli zakłócenie wystąpiło na początku rurociągu:

$$\Delta k_i = \frac{x_i}{T_0 \cdot a} \pm 2 \qquad (4.2)$$

gdzie: $a = 1170 \frac{m}{s}$ – prędkość dźwięku w rurociągu

Mamy się, że jest to skokowa zmiana ciśnienia, jeżeli w/w reguły zostaną spełnione dla conajmniej 3 kolejnych stacji pomiarowych.

– jeżeli stwierdzimy, że nastąpiła skokowa zmiana ciśnienia, wówczas:

* zatrzymujemy wszystkie procedury (wykrywania i lokalizacji powłoczek, śledzenia granicy rozdziału mediów) i kasujemy wszystkie zmienne z wyjątkiem: x_0, ...

* uruchamiamy procedurę kontroli ustalibizowania się parametrów w rurociągu - analogicznie, jak w p. 1; będzie może procedura ta należałoby uzupełnić warunkiem, że jeżeli kryteria (1.1) i (1.2) nie będą spełnione po czasie T_x (np. $T_x = 25 min$), wówczas postępujemy dalej tak, jak po ich spełnieniu.

* po spełnieniu kryteriów stabilności parametrów ponownie uruchamiamy wszystkie parametry.

5. UWAGI KOŃCOWE.

(1) Jak dotąd, najbardziej skuteczną procedurą wykrywania przecieków okazała się procedura mxdp. Procedura ta powinna działać przez cały czas, z wyjątkiem:
- okresów niestabilności parametrów sprzedawanych silnymi zakłóceniami takimi, jak: włączenie lub wyłączenie tłoczenia, skokowa zmiana ciśnienia na początku i/lub końcu rurociągu,
- awarii przetwornika ciśnienia; w tym przypadku należałoby wyłączyć z procedury dany stopień,
- przechodzenia przez stopień granicy rozdziału mediów; również w tym przypadku należałoby wyłączyć z procedury dany stopień.

Ale przecież, powstały w w/w okresach, procedura mxdp „zgubi". Z tego (między innymi) względu równolegle z procedurą mxdp należy uruchomić procedurę wykrywania przecieków w/g p. 2.1 niniejszego opracowania. Prawdopodobnie będzie ona mniej czuła na przecieki niż procedura mxdp, ale wyłączenie jej na czas niestabilności parametrów nie spowoduje utraty możliwości wykrycia przecieku, który w międzyczasie wystąpił.

(2) W trakcie badania zakłóceń, występujących w procesie tłoczenia [4], stwierdzono kilka przypadków kolejno następujących po sobie (w odstępach kilkanaście ÷ mało kilkadziesiąt min) skokowych zmian ciśnienia, co mocno wydłuża czas trwania stanu niestabilnego w rurociągu. W takich przypadkach również dotych-

czas opracowane procedury lokalizacji przecieków będą niesprawne. W związku z tym po długotrwałych przerwach w działaniu systemu (a niezależnie od tego okresowo, np. co 10÷15 min) należałoby uruchamiać procedury w/g p. 2.2 i 2.3. Jak już wspomniano będą one mniej dokładne, ale za to nie przeszkadzają im tego typu przerwy.

(3) Należy przeanalizować, czy nie warto we wszystkich procedurach oprzeć się na zmiennych Δp_{RSi}.

BIBLIOGRAFIA.

1. R. Sobczak, A. Bratek: „Opracowanie i określenie wrażliwości systemu do wykrywania i lokalizacji powietrzy (SWLP) w rurociągach przy określonym opomiarowaniu".
Etap 1. „Opracowanie i badania komputerowe modelu matematycznego rurociągu". 09. 1994
Etap 2. „Opracowanie SWLP w rurociągach oraz próby komputerowe wrażliwości tego systemu na przecieki przy istniejącym opomiarowaniu, w oparciu o model matematyczny rurociągu." 04. 1995
2. R. Sobczak: „Prace przygotowawcze, związane z kontynuacją badań i wdrożeniem SWLP w rurociągach."
Etap 2. „Przygotowanie założeń dla oprogramowania użytkowego." 08. 1996
3. R. Sobczak: „Uszczegółowienie założeń do oprogramowania systemowego i użytkowego SWLP." 05. 1996
4. R. Sobczak, A. Bratek: „Analiza zakłóceń, występujących na rurociągu SF1-NWW i wpływu tych zakłóceń na procedury:
- wykrywania i lokalizacji powietrzy,
- śledzenia granicy zanieczyszczeń."
04. 1997