

УДК [519.95+518.5]:622.692.4

*У статті розглядається аналітичний метод знаходження точки втручання в технологічний процес транспортування вуглеводневої сировини: витоків або кримінального відбору. Аналітичний метод може бути використаний для стаціонарних режимів транспорту вуглеводневої сировини в магістральних продуктопроводах та дозволяє визначити місце розташування точки втручання в технологічний процес, оцінити метрологічні характеристики*

*Ключові слова: метод, продуктопровід, витік, вуглеводнева сировина*

*В статье рассматривается аналитический метод нахождения точки вмешательства в технологический процесс транспортировки углеводородного сырья - утечки или криминального отбора. Аналитический метод может быть использован для стационарных режимов транспорта углеводородного сырья в магистральных продуктопроводах и позволяет определить местоположение точки вмешательства в технологический процесс, оценить метрологические характеристики*

*Ключевые слова: метод, продуктопровод, виток, углеводородное сырье*

# ЧИСЕЛЬНО - АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД ВІЯВЛЕННЯ ВИТОКІВ ВУГЛЕВОДНОЇ СИРОВИНИ В МАГІСТРАЛЬНИХ ПРОДУКТОПРОВОДАХ

**А.Д. Тевяшев**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри\*

Контактний тел.: (057) 702-14-36

E-mail: tevjshev@kture.kharkov.ua

**Ю.С. Асаєнко**

Аспірант\*

Контактний тел.: (066) 304-05-74

E-mail: esset8@gmail.com

\*Кафедра «Прикладна математика»

Харківський національний університет

радіоелектроніки

пр. Леніна, 14, м. Харків, Україна, 61166

## 1. Вступ

Втручання у технологічний процес транспортування вуглеводневої сировини (ВС) магістральними трубопроводами, крім прямих економічних витрат, значно збільшують і ризики екологічних катастроф, пов'язаних з розливом ВС, вибухами та пожежами. Для ефективної роботи служб безпеки трубопровідних компаній вони повинні забезпечуватися оперативною і достовірною інформацією про факт виявлення втручання в технологічний процес транспортування ВС, його інтенсивності, часу початку і місця розташування на трасі продуктопроводу (ПП).

Забезпечення цією інформацією можливо за рахунок включення до складу інформаційно-аналітичних систем управління режимами транспорту і розподілу цільового продукту в трубопровідних системах модуля інтелектуальної системи виявлення втручання в технологічний процес транспортування трубопроводами ВС.

Сьогодні всі трубопровідні компанії мають власні служби безпеки, які забезпечують збереження, як самих трубопровідних систем, так і цільових продуктів (ЦП), що транспортуються за цими системами. Кожна компанія застосовує свої власні моделі оцінки ризику кримінальних відборів і визначає прийнятний для неї рівень ризику, залежно від якого формується структура, склад та ступінь технічної

оснащеності її служби безпеки в умовах обмеження як технічних, так і фінансових ресурсів. Наявність мобільних і добре оснащених служб безпеки є необхідною, але не достатньою умовою для ефективної боротьби з кримінальними відборами.

Для ефективної роботи служб безпеки вони повинні забезпечуватися оперативною і достовірною інформацією про факт виявлення кримінального відбору, його інтенсивності, часу початку і місця розташування на трасі ПП. Забезпечення цією інформацією можливо за рахунок включення до складу інформаційно-аналітичних систем управління режимами транспорту та розподілу ЦП у трубопровідних системах модуля інтелектуальної системи виявлення кримінальних відборів. Необхідність в новому методі виявлення витоків, на відміну від систем виявлення витоків ЦП з ПП, обумовлена її цільовим призначенням, інтелектуальної протидії кримінальним групам про приховування факту, інтенсивності, часу та місця відбору ЦП з ПП. Це протидія полягає у використанні кримінальними групами безлічі різних стратегій відбору: від найпростіших, максимального відбору протягом усього часу, необхідного для запобігання наявної ємності шляхом повного відкриття вентиля, через який здійснюється відбір на тлі квазістаціонарного режиму, до комбінованих стратегій: послідовного збільшення або зменшення відборів з малими приростами на тлі істотно нестационарних режимів, виклика-

них включенням/виключенням насосних агрегатів (НА), перемиканням резервуарів (Р) на вході або виході ПП, значними змінами оборотів приводів НА у насосних станціях (НС).

У даній роботі запропоновано аналітичний метод знаходження точки втручання в технологічний процес транспортування ВС: витоку або кримінального відбору. Аналітичний метод може буде використаний для стаціонарних режимів транспорту ВС у магістральних ПП та дозволяє не тільки визначити місце розташування точки втручання в технологічний процес, але й оцінити метрологічні характеристики, тобто дисперсію оцінки місця розташування точки втручання в залежності від метрологічних характеристик засобів вимірювань технологічних параметрів ВС (тиску, витрати, температури щільності), а також статистичних оцінок коефіцієнта ефективності та коефіцієнта теплопередачі [1].

## 2. Структура та параметри магістральних трубопроводів і системи збору оперативних даних

Розглядаються магістральні трубопроводи, що мають лінійну одноступову структуру й транспортують ВС.

Структурою трубопроводу є послідовне з'єднання технологічних елементів, до яких належать: ділянки трубопроводу, запірні арматури й насосні агрегати. Мають бути відомі такі параметри ділянок трубопроводу:

- довжина продуктопроводу  $L$ , м;
- кількість ділянок трубопроводу  $N$ ;
- координати початку  $X_{i-1}$  (м) і кінця  $X_i$  кожної  $i$ -ї ділянки трубопроводу,  $i=1,2,\dots,N$ , причому  $X_0=0$ ,  $X_N=L$ ;
- довжина  $L_i$  (м), внутрішній діаметр  $d_i$  (м) і товщина стінок  $\delta_i$  (м) кожної  $i$ -ї ділянки трубопроводу, причому довжина ділянки трубопроводу охоплює також і довжину запірних арматур, тому  $L_i=X_i-X_{i-1}$ ,  $i=1,2,\dots,N$ ;
- нижні геодезичні оцінки початку  $z_{i-1}$  (м) і кінця  $z_i$  кожної  $i$ -ї ділянки трубопроводу,  $i=1,2,\dots,N$ ;

Магістральний трубопровід має систему збору оперативних даних, що забезпечує: збір вимірювань фізичних параметрів ВС у вимірювальних вузлах ВВ; передачу оперативних даних з ВВ на сервер; зберігання на сервері оперативних даних. Відстань між суміжними ВВ на трубопроводі не повинна перевищувати 100 км.

Мають бути відомі такі параметри ВВ ПП:

- кількість ВВ  $N_{ВВ}$ ;
- координати розташування ВВ  $\{X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_N}\}$ , що збігаються з координатами початків і кінців деяких ділянок трубопроводу;
- відстані між суміжними ВВ  $L_n^{(ВВ)}$  (м), причому  $L_n^{(ВВ)}=X_{i_{n+1}}-X_{i_n}$ ,  $n=1,2,\dots,N_{ВВ}-1$ .

Математичною моделлю геометричної структури ПП є модель трубопроводу довжини  $L$ , параметри якої описуються такими функціями:

- залежністю зміни діаметру трубопроводу уздовж траси трубопроводу:

$$d(x) = \begin{cases} d_i, & \text{якщо } X_{i-1} \leq x < X_i, \quad i=1,2,\dots,N-1; \\ d_N, & \text{якщо } x \geq X_{N-1}, \end{cases} \quad (1)$$

– залежністю зміни товщини стінок трубопроводу уздовж траси трубопроводу:

$$\delta(x) = \begin{cases} \delta_i, & \text{якщо } X_{i-1} \leq x < X_i, \quad i=1,2,\dots,N-1; \\ \delta_N, & \text{якщо } x \geq X_{N-1}, \end{cases} \quad (2)$$

– залежністю зміни геодезичної висоти нижньої оцінки трубопроводу уздовж траси трубопроводу:

$$z(x) = \begin{cases} z_{i-1} + \frac{x-X_{i-1}}{L_i} \cdot (z_i - z_{i-1}), & \text{якщо } X_{i-1} \leq x < X_i, \quad i=1,2,\dots,N-1; \\ z_{N-1} + \frac{x-X_{N-1}}{L_N} \cdot (z_N - z_{N-1}), & \text{якщо } x \geq X_{N-1}. \end{cases} \quad (3)$$

Оперативними даними, що надходять із ВВ ПП, є такі вимірювання фізичних параметрів стабільної ВС:

- масова витрата  $\tilde{W}_n^t$ , кг/с;
- густина  $\tilde{\rho}_n^t$ , кг/м<sup>3</sup>;
- надлишковий тиск  $\tilde{P}_n^t$ , Па;
- температура  $\tilde{T}_n^t$ , °С,

де  $n$  – порядковий номер ВВ,  $n=1,2,\dots,N_{ВВ}$ ,  $t$  – дискретні моменти часу (сек.), причому крок дискретизації дорівнює  $\delta t$ . Вимірювання на усіх ВВ мають зніматися синхронно з інтервалом часу  $\delta t$  (с). Рекомендоване значення  $\delta t - 1$  с. Пропуски у кожному ряді значень оперативних даних не повинні перевищувати 30 послідовних значень і мають заповнюватися результатами лінійної інтерполяції по найближчих точках.

Клас точності засобів вимірювальної техніки, що використовуються для вимірювання фізичних параметрів стабільної ВС, у кожному ВВ мав бути не більш ніж 0,5.

Систематичні похибки вимірів масової витрати в кожному ВВ не повинні перевищувати  $\Delta_W^+ = 0,5\%$  відносно максимальної пропускної здатності у трубопроводі  $W_{\max}$  (кг/сек.). Систематичні похибки вимірювань густини в кожному ВВ не мають перевищувати  $\Delta_p^+ = 0,5\%$  відносно середньої густини стабільної ВС  $\rho_{cp}$  (кг/м<sup>3</sup>).

Розрахунок і чисельний аналіз балансу ВС виконують окремо для кожної ділянки ПП, обмеженої суміжними ВВ, і по всьому ПП для заданого інтервалу часу при відомій структурі й параметрах ПП та за наявності необхідного обсягу оперативних даних із ВВ. Факторами, що впливають на баланс ВС, є:

- неоднорідність густини ВС уздовж трубопроводу, зумовлена різним хімічним складом ВС, що транспортується;
- залежність густини ВС від тиску й температури (стисливість і розширюваність);
- залежність геометричних розмірів (довжини й діаметру) трубопроводу від тиску й температури.

## 3. Математичні моделі стану ВС й трубопроводу

Математична модель стану ВС у точці  $x$  (м) трубопроводу в момент часу  $t$  (сек.) описується рівнянням

[1], що враховує розширюваність та стисливість ВС, обумовлених впливом тиску й температури:

$$\rho(x,t) = \rho_0(x,t) \cdot k_p(x,t), \quad (4)$$

$$k_p(x,t) = 1 + \frac{1}{K_{\text{конд}}} \cdot (P(x,t) - P_0) - \xi_{\text{конд}} \cdot (T(x,t) - T_0); \quad (5)$$

де  $\rho(x,t)$  – густина ВС у точці  $x$  в момент часу  $t$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_0(x,t)$  – густина ВС при стандартних умовах у точці  $x$  в момент часу  $t$ ,  $\text{кг/м}^3$  (залежність приведеної густини  $\rho_0$  від  $x$  та  $t$  обумовлена різним хімічним складом ВС уздовж трубопроводу);  $P(x,t)$  – тиск ВС у точці  $x$  в момент часу  $t$ , Па;  $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$  Па – тиск за стандартних умов;  $T(x,t)$  – температура ВС у точці  $x$  в момент часу  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_0 = 20$   $^{\circ}\text{C}$  – температура за стандартних умовах;  $K_{\text{конд}} = 10^9$  Па – модуль пружності ВС;  $\xi_{\text{конд}} = 10^{-3}$   $1/^{\circ}\text{C}$  – коефіцієнт об'ємного розширення ВС.

Математична модель стану трубопроводу в точці  $x$  на ділянці довжиною  $\Delta x$  в момент часу  $t$  описується рівнянням внутрішньої місткості даної ділянки трубопроводу [2], що враховує розширюваність та стисливість трубопроводу, обумовлених впливом тиску й температури:

$$V_{[x;x+\Delta x]}(t) = S_0(x) \cdot k_s(x,t) \cdot k_1(x,t) \cdot \Delta x, \quad (6)$$

де

$$S_0(x) = 0,25 \cdot \pi \cdot d^2(x); \quad (7)$$

$$k_s(x,t) = 1 + \frac{d(x)}{E \cdot \delta(x)} \cdot (P(x,t) - P_0) + 2 \cdot \alpha_L \cdot (T(x,t) - T_0); \quad (8)$$

$$k_1(x,t) = 1 + \alpha_L \cdot (T(x,t) - T_0), \quad (9)$$

де  $d(x)$  – внутрішній діаметр трубопроводу в точці  $x$ , м;  $\delta(x)$  – товщина стінок трубопроводу в точці  $x$ , м;  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па – модуль Юнга для сталі;  $\alpha_L = 1,2 \cdot 10^{-5}$   $1/^{\circ}\text{C}$  – коефіцієнт лінійного розширення для сталі.

#### 4. Попередня обробка оперативних даних

Попередня обробка оперативних даних проводиться з метою мінімізації випадкових похибок вимірювань фізичних параметрів ВС для кожного моменту часу  $t$  і розрахунку інтегральних оцінок деяких параметрів ВС для кожного інтервалу часу  $(t_{k-1}; t_k]$ , причому  $t_k = t_{k-1} + K_{\delta} \cdot \delta t$ , де  $k$  – номер моменту часу,  $K_{\delta}$  – задана кількість моментів часу, за якими провадиться розрахунок кожної інтегральної оцінки.

Мінімізація випадкових похибок вимірювань фізичних параметрів ВС здійснюється шляхом згладжування вимірювань методом ковзного середнього, причому для  $n$ -го ВВ,  $n = 1, 2, \dots, N_{\text{ВВ}}$ , для кожного моменту часу  $t$  обчислюються наступні оцінки фізичних параметрів ВС:

оцінка масової витрати

$$\widehat{W}_n^t = \frac{1}{2 \cdot M + 1} \cdot \sum_{j=-M}^M \widetilde{W}_n^{t+j\delta t}; \quad (10)$$

оцінка густини

$$\widehat{\rho}_n^t = \frac{1}{2 \cdot M + 1} \cdot \sum_{j=-M}^M \widetilde{\rho}_n^{t+j\delta t}; \quad (11)$$

оцінка надлишкового тиску

$$\widehat{P}_n^t = \frac{1}{2 \cdot M + 1} \cdot \sum_{j=-M}^M \widetilde{P}_n^{t+j\delta t}; \quad (12),$$

оцінка температури

$$\widehat{T}_n^t = \frac{1}{2 \cdot M + 1} \cdot \sum_{j=-M}^M \widetilde{T}_n^{t+j\delta t}; \quad (13)$$

оцінка приведеної об'ємної витрати

$$\widehat{Q}_{0n}^t = \frac{1}{2 \cdot M + 1} \cdot \sum_{j=-M}^M \widetilde{Q}_{0n}^{t+j\delta t}; \quad (14)$$

де

$$\widetilde{Q}_{0n}^t = \frac{\widetilde{W}_n^t}{\widehat{\rho}_n^t} \cdot \left( 1 + \frac{1}{K_{\text{конд}}} \cdot (\widetilde{P}_n^t - P_0) - \xi_{\text{конд}} \cdot (\widetilde{T}_n^t - T_0) \right), \quad (15)$$

де  $M$  – задане ціле число, причому значення  $M$  має бути не менше 10 і не більше  $K_{\delta}$ ;  $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$  Па – тиск за стандартних умов;  $T_0 = 20$   $^{\circ}\text{C}$  – температура за стандартних умов;  $K_{\text{конд}} = 10^9$  Па – модуль пружності ВС;  $\xi_{\text{конд}} = 10^{-3}$   $1/^{\circ}\text{C}$  – коефіцієнт об'ємного розширення ВС.

Для кожного моменту часу  $t_k$  необхідно обчислити такі інтегральні оцінки фізичних параметрів ВС, що пройшов через  $n$ -й ВВ,  $n = 1, 2, \dots, N_{\text{ВВ}}$ , за інтервал часу  $(t_{k-1}; t_k]$ :

оцінка маси

$$\widehat{M}_n^{t_k} = \delta t \cdot \sum_{j=0}^{K_{\delta}-1} \widehat{W}_n^{t-j\delta t}; \quad (16)$$

оцінка приведенного об'єму

$$\widehat{V}_{0n}^{t_k} = \delta t \cdot \sum_{j=0}^{K_{\delta}-1} \widehat{Q}_{0n}^{t-j\delta t}; \quad (17)$$

оцінка середньої приведеної густини

$$\widehat{\rho}_{0n}^{t_k} = \frac{\widehat{M}_n^{t_k}}{\widehat{V}_{0n}^{t_k}}. \quad (18)$$

#### 5. Розрахунок і чисельний аналіз балансу ВС у трубопроводі

Розрахунок і чисельний аналіз балансу ВС виконують окремо для кожної ділянки ПП між  $n$ -м й  $(n+1)$ -м ВВ,  $n = 1, 2, \dots, N_{\text{ВВ}} - 1$ , та по всьому ПП для заданого

інтервалу часу  $[t_{k_1}; t_{k_2}]$ , де  $t_{k_1}, t_{k_2}$  – відповідно початковий і кінцевий моменти часу,  $k_1, k_2$  – задані номери моментів часу.

Математична модель балансу ВС на ділянці ПП між  $n$ -м й  $(n+1)$ -м ВВ,  $n = 1, 2, \dots, N_{BB} - 1$ , для інтервалу часу  $[t_{k_1}; t_{k_2}]$  описується такими рівняннями:

$$M_n^{(BB)}(t_{k_1}, t_{k_2}) - M_{n+1}^{(BB)}(t_{k_1}, t_{k_2}) + M_{n,n+1}^{(TP)}(t_{k_1}) - M_{n,n+1}^{(TP)}(t_{k_2}) = M_{n,n+1}^{(BTP)}(t_{k_1}, t_{k_2}), \quad (19)$$

де  $M_n^{(BB)}(t_{k_1}, t_{k_2}), M_{n+1}^{(BB)}(t_{k_1}, t_{k_2})$  – маса ВС, що пройшла відповідно через  $n$ -й та  $(n+1)$ -й ВВ за інтервал часу  $[t_{k_1}; t_{k_2}]$ ;  $M_{n,n+1}^{(TP)}(t_{k_1}), M_{n,n+1}^{(TP)}(t_{k_2})$  – маса ВС, що акумульована на ділянці ПП між  $n$ -м та  $(n+1)$ -м ВВ відповідно в початковий момент часу  $t_{k_1}$  й у кінцевий момент часу  $t_{k_2}$ ;  $M_{n,n+1}^{(BTP)}(t_{k_1}, t_{k_2})$  – маса втрат ВС на ділянці ПП між  $n$ -м й  $(n+1)$ -м ВВ за інтервал часу  $[t_{k_1}; t_{k_2}]$ .

Результатом розрахунку балансу ВС на кожній ділянці ПП є оцінки всіх компонентів, що входять у рівняння балансу (1).

Оцінка маси ВС, що пройшла через  $n$ -й ВВ,  $n = 1, 2, \dots, N_{BB}$ , за інтервал часу  $[t_{k_1}; t_{k_2}]$ , обчислюється за формулою

$$\hat{M}_n^{(BB)}(t_{k_1}, t_{k_2}) = \sum_{k=k_1+1}^{k_2} \hat{M}_n^{t_k}. \quad (20)$$

Для обчислення оцінки маси ВС, акумульованого на кожній ділянці ПП у заданий момент часу, необхідно попередньо розрахувати профілі розподілу надлишкового тиску, температури й приведеної густини вздовж траси трубопроводу.

Розрахунок профілів розподілу надлишкового тиску й температури заснований на використанні математичної моделі стаціонарного неізотермічного режиму транспорту ВС по магістральному трубопроводу [1].

Розрахунковий профіль розподілу надлишкового тиску вздовж траси всього трубопроводу в момент часу  $t_k$  описується функцією такого вигляду:

$$\hat{P}(x, t_k) = \begin{cases} \hat{P}_{n,n+1}(x, t_k), & \text{якщо } X_{i_n} \leq x < X_{i_{n+1}}, n = 1, 2, \dots, N_{BB} - 2; \\ \hat{P}_{N_{BB}-1, N_{BB}}(x, t_k), & \text{якщо } x \geq X_{N_{BB}-1}, \end{cases} \quad (21)$$

де  $\hat{P}_{n,n+1}(x, t_k)$  – розрахунковий профіль розподілу надлишкового тиску уздовж траси трубопроводу між  $n$ -м та  $(n+1)$ -м ВВ,  $n = 1, 2, \dots, N_{BB} - 1$ , причому

$$\hat{P}_{n,n+1}(x, t_k) = \begin{cases} \hat{P}_n^{t_k} - \hat{c}_{n,n+1} \cdot \left( \sum_{i=i_n+1}^j \frac{L_i}{d_i^5} + \frac{x - X_j}{d_{j+1}^5} \right) + \rho_{cp} \cdot g \cdot (z_{i_n} - z(x)), & \text{якщо } X_j \leq x < X_{j+1}, j = i_n, i_n + 1, \dots, i_{n+1} - 2; \\ \hat{P}_{n+1}^{t_k} + \hat{c}_{n,n+1} \cdot \frac{X_{i_{n+1}} - x}{d_{i_{n+1}}^5} + \rho_{cp} \cdot g \cdot (z_{i_{n+1}} - z(x)), & \text{якщо } x \geq X_{i_{n+1}-1}, \end{cases} \quad (22)$$

де

$$\hat{c}_{n,n+1}^{t_k} = \frac{8\lambda}{g\pi^2 \rho_{cp} E_1^2} \cdot \tilde{W}_n^t \cdot |\tilde{W}_n^t| \quad (23)$$

де  $d_i$  – внутрішній діаметр трубопроводу,  $m$ ;  $E_i$  – коефіцієнт ефективності;  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння;  $\hat{c}_{n,n+1}^{t_k}$  вимірюється в ПА.

Для розрахунку значення коефіцієнта  $\lambda$  А.Д. Альтшулем було запропоновано таку напівемпіричну формулу:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_{ei}}{d_i} + \frac{68v}{4 \cdot \hat{Q}_{0n}^t} \right)^{0,25}, \quad (24)$$

де  $k_{ei}$  еквівалентна шорсткість стінок труб,  $m$ ;  $v$  кінематична в'язкість ЦП,  $m^2/s$ .

Розрахунковий профіль розподілу температури уздовж траси всього трубопроводу в момент часу  $t_k$  описується функцією виду

$$\hat{T}(x, t_k) = \begin{cases} \hat{T}_{TP,n,n+1}^{t_k} + (\hat{T}_n^{t_k} - \hat{T}_{TP,n,n+1}^{t_k}) \cdot e^{-\hat{\gamma}_{n,n+1}^{t_k} \frac{x - X_{i_n}}{L_{(TP)}^{(n)}}}, & \text{якщо } X_{i_n} \leq x < X_{i_{n+1}}, n = 1, 2, \dots, N_{BB} - 2; \\ \hat{T}_{TP,N_{BB}-1,N_{BB}}^{t_k} + (\hat{T}_{N_{BB}-1}^{t_k} - \hat{T}_{TP,N_{BB}-1,N_{BB}}^{t_k}) \cdot e^{-\hat{\gamma}_{N_{BB}-1,N_{BB}}^{t_k} \frac{x - X_{i_{N_{BB}-1}}}{L_{(TP)}^{(N_{BB})}}}, & \text{якщо } x \geq X_{N_{BB}-1}, \end{cases} \quad (25)$$

де

$$\hat{T}_{TP,n,n+1}^{t_k} = 1,25 \cdot \hat{T}_{n+1}^{t_k} - 0,25 \cdot \hat{T}_n^{t_k}; \quad (26)$$

$$\hat{\gamma}_{n,n+1}^{t_k} = \ln \frac{\hat{T}_n^{t_k} - \hat{T}_{TP,n,n+1}^{t_k}}{\hat{T}_{n+1}^{t_k} - \hat{T}_{TP,n,n+1}^{t_k}}, \quad n = 1, 2, \dots, N_{BB} - 1. \quad (27)$$

Розрахунковий профіль розподілу приведеної густини вздовж траси трубопроводу між  $n$ -м й  $(n+1)$ -м ВВ,  $n = 1, 2, \dots, N_{BB} - 1$ , у момент часу  $t_k$  описується функцією такого вигляду:

$$\hat{\rho}_0^{(n)}(x, t_k) = \begin{cases} \hat{\rho}_{0n}^{t_k}, & \text{якщо } X_{i_n} \leq x < \hat{X}_{k-1}^{(n)}; \\ \hat{\rho}_{0n}^{t_r}, & \text{якщо } \hat{X}_r^{(n)} \leq x < \hat{X}_{r-1}^{(n)}, r = k - 1, k - 2, \dots, K^{(n)}; \\ \hat{\rho}_{0n}^{t_{K^{(n)}}}, & \text{якщо } \hat{X}_{K^{(n)}}^{(n)} \leq x \leq X_{i_{n+1}}, \end{cases} \quad (28)$$

де кожне значення  $\hat{X}_r^{(n)}$ ,  $r = k - 1, k - 2, \dots, K^{(n)}$ , визначається в результаті розв'язання одним із чисельних методів [3] наступного рівняння відносно  $x$ :

$$\hat{V}_{0TP}^{(n)}(x, t_k) - \sum_{j=r+1}^k \hat{V}_{0n}^{t_j} = 0, \quad (29)$$

де

$$\widehat{V}_{0\text{тp}}^{(n)}(x, t_k) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{j-1} S_{0i+1} \cdot \widehat{k}_M(X_i, t_k) \cdot L_{i+1} + S_{0j+1} \cdot \widehat{k}_M(X_j, t_k) \cdot (x - X_j), \\ \text{якщо } X_j \leq x < X_{j+1}, \quad j = i_n, i_n + 1, \dots, N-2; \\ \sum_{i=1}^{N-2} S_{0i+1} \cdot \widehat{k}_M(X_i, t_k) \cdot L_{i+1} + S_{0N} \cdot \widehat{k}_M(X_{N-1}, t_k) \cdot (x - X_{N-1}), \\ \text{якщо } x \geq X_{N-1}; \end{cases} \quad (30)$$

Оцінка маси втрат ВС на всьому продуктопроводі за інтервал часу  $[t_{k_1}; t_{k_2}]$  обчислюється за формулою

$$\widehat{M}^{(\text{втр})}(t_{k_1}, t_{k_2}) = \widehat{M}_1^{(\text{BB})}(t_{k_1}, t_{k_2}) - \widehat{M}_{N_{\text{зв}}}^{(\text{BB})}(t_{k_1}, t_{k_2}) + \widehat{M}^{(\text{тр})}(t_{k_1}) - \widehat{M}^{(\text{тр})}(t_{k_2}). \quad (42)$$

$$S_{0i} = 0,25 \cdot \pi \cdot d_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (31)$$

$$\widehat{k}_M(x, t_k) = \widehat{k}_p(x, t_k) \cdot \widehat{k}_s(x, t_k) \cdot \widehat{k}_l(x, t_k); \quad (32)$$

$$\widehat{k}_p(x, t_k) = 1 + \frac{1}{K_{\text{конд}}} \cdot (\widehat{P}(x, t_k) - P_0) - \xi_{\text{конд}} \cdot (\widehat{T}(x, t_k) - T_0); \quad (33)$$

$$\widehat{k}_s(x, t_k) = 1 + \frac{d(x)}{E \cdot \delta(x)} \cdot (\widehat{P}(x, t_k) - P_0) + 2 \cdot \alpha_L \cdot (\widehat{T}(x, t_k) - T_0); \quad (34)$$

$$\widehat{k}_l(x, t_k) = 1 + \alpha_L \cdot (\widehat{T}(x, t_k) - T_0). \quad (35)$$

$E = 2 \cdot 10^{11}$  Па – модуль Юнга для сталі;  $\alpha_L = 1,2 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$  – коефіцієнт лінійного розширення для сталі. Значення  $K^{(n)}$  визначається як останній номер  $r$  для послідовності  $\{\widehat{X}_r^{(n)}, r = k-1, k-2, \dots\}$ , за якого виконується умова

$$\widehat{X}_r^{(n)} < X_{i_{n+1}}. \quad (36)$$

Оцінка маси ВС, акумульованого на ділянці ПП між  $n$ -м й  $(n+1)$ -м ВВ,  $n = 1, 2, \dots, N_{\text{ВВ}} - 1$ , у момент часу  $t_k$  ( $k = k_1, k_2$ ) визначається за формулою

$$\widehat{M}_{n,n+1}^{(\text{тр})}(t_k) = \sum_{r=K^{(n)}}^k \rho_0^{(n)}(\widehat{X}_r^{(n)}, t_k) \cdot (\widehat{V}_{\text{тp}}^{(n)}(\widehat{X}_{r-1}^{(n)}, t_k) - \widehat{V}_{\text{тp}}^{(n)}(\widehat{X}_r^{(n)}, t_k)), \quad (37)$$

$$\widehat{X}_{K^{(n)}-1}^{(n)} = X_{i_{n+1}}; \quad (38)$$

$$\widehat{X}_k^{(n)} = X_{i_n}. \quad (39)$$

$$\widehat{M}^{(\text{тр})}(t_k) = \sum_{n=1}^{N_{\text{ВВ}}-1} \widehat{M}_{n,n+1}^{(\text{тр})}(t_k). \quad (40)$$

Оцінка маси втрат ВС на ділянці ПП між  $n$ -м й  $(n+1)$ -м ВВ,  $n = 1, 2, \dots, N_{\text{ВВ}} - 1$ , за інтервал часу  $[t_{k_1}; t_{k_2}]$  обчислюється за формулою

$$\widehat{M}_{n,n+1}^{(\text{втр})}(t_{k_1}, t_{k_2}) = \widehat{M}_n^{(\text{BB})}(t_{k_1}, t_{k_2}) - \widehat{M}_{n+1}^{(\text{BB})}(t_{k_1}, t_{k_2}) + \widehat{M}_{n,n+1}^{(\text{тр})}(t_{k_1}) - \widehat{M}_{n,n+1}^{(\text{тр})}(t_{k_2}). \quad (41)$$

Оцінка втрат  $\widehat{M}^{(\text{втр})}(t_{k_1}, t_{k_2})$  є випадковою величиною, статистичні властивості якої залежать від безлічі випадкових чинників, до яких відносяться метрологічні властивості помилок вимірювань параметрів ВС у вимірювальних вузлах. Оцінка маси ВС, акумульованого на всьому продуктопроводі в момент часу  $t_k$  ( $k = k_1, k_2$ ), статистичні властивостей оцінки коефіцієнтів ефективності і теплопередачі по кожній ділянці трубопроводу між замірними вузлами, обчислюється за формулою (42).

Не порушуючи спільності припускати, що оцінка має нормальний розподіл з нульовим математичним очікуванням і дисперсією оцінок, залежної від вищезазначених метрологічних характеристик, розглянутих вище.

Чисельний аналіз результатів розрахунку балансу ВС на продуктопроводі полягає у формуванні одного з таких висновків для кожної ділянки ПП між  $n$ -м й  $(n+1)$ -м ВВ,  $n = 1, 2, \dots, N_{\text{ВВ}} - 1$ :

– втрат ВС немає, якщо

$$\widehat{M}_{n,n+1}^{(\text{втр})}(t_{k_1}, t_{k_2}) \leq M_{n,n+1}^+; \quad (43)$$

– є втрати ВС, якщо

$$\widehat{M}_{n,n+1}^{(\text{втр})}(t_{k_1}, t_{k_2}) > M_{n,n+1}^+, \quad (44)$$

де  $M_{n,n+1}^+$  – граничне значення розбалансу на ділянці ПП між  $n$ -м й  $(n+1)$ -м ВВ.

Як показали експериментальні дослідження, кожне граничне значення розбалансу  $M_{n,n+1}^+$ ,  $n = 1, 2, \dots, N_{\text{ВВ}} - 1$ , необхідно попередньо оцінити як максимальне значення розбалансу у серії експериментів, про які достовірно відомо, що відсутні аварійні витoki та технологічні й несанкціоновані відбори ВС, при умові, що усунені систематичні похибки вимірів масової витрати і густини на усіх ВВ ПП.

Якщо величина дисбалансу між вимірювальними вузлами  $N$  та  $N+1$  перевищує задану величину, то це означає, що між вузлами  $N$  та  $N+1$  існує виток ВС. Розглянемо аналітичний метод визначення місця розташування витoku на ділянці ПП між вузлами  $N$  та  $N+1$ .

## 6. Метод виявлення місця розташування витoku на магістральному продуктопроводі

Використовуючи моделі насосного агрегату і ділянки ПП, можна отримати дві моделі, що описують трубопровід з різною витратою. В залежності від розташування точки відбору, тиск при реальному кримінальному відборі буде ближче до одного з можливих значень.

Метод полягає в знаходженні точки відбору шляхом вирішення монотонного лінійного рівняння математичної моделі зміни тиску і температури на ділянці ПП.

Продуктопровід розділяється на дві частини (1,2) з різними параметрами витрати і довжини трубопроводу.

Невідомим є довжина кожної з ділянок, при тому що відома сумарна довжина ділянок.

Шукана точка знаходиться шляхом зміни співвідношення довжин ділянок у рівнянні зміни тиску на ділянці ПП.

Якщо  $X_{i_{n+1}} - X_{i_n} = L_1 + L_2$ , де  $L_1$  - відстань від замірної точки до витоку,  $L_2$  - відстань від витоку до замірної точки, а  $\widehat{W}_1^t$  та  $\widehat{W}_2^t$  - маса сировини до й після витоку, тоді різниця на в тиску буде задана наступною формулою:

$$\widehat{P}_n^{tk} - \widehat{P}_{n+1}^{tk} = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L_1}{\pi^2 \cdot d_i^5 \cdot \widehat{\rho}_n^t \cdot E_i^2} \cdot (\widehat{W}_1^t)^2 +$$

$$+ \frac{8 \cdot \lambda \cdot L_2}{\pi^2 \cdot d_i^5 \cdot \widehat{\rho}_n^t \cdot E_i^2} \cdot (\widehat{W}_2^t)^2 + \widehat{\rho}_n^t \cdot g \cdot (z_{i_{n+1}} - z_{i_n}),$$

$$(45)$$

$$\widehat{P}_n^{tk} - \widehat{P}_{n+1}^{tk} + \widehat{\rho}_n^t \cdot g \cdot (z_{i_{n+1}} - z_{i_n}) + \frac{8 \cdot \lambda_2 \cdot (\widehat{W}_2^t)^2}{\pi^2 \cdot d_i^5 \cdot \widehat{\rho}_n^t \cdot E_i^2}$$

$$L_1 = \frac{8 \cdot (\lambda_2 \cdot (\widehat{W}_2^t)^2 - \lambda_1 \cdot (\widehat{W}_1^t)^2)}{\pi^2 \cdot d_i^5 \cdot \widehat{\rho}_n^t \cdot E_i^2}.$$

$$(46)$$

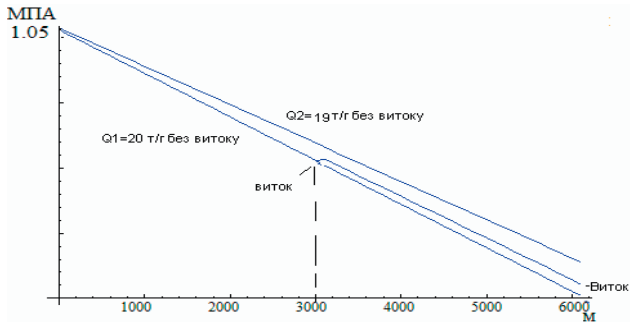


Рис. 1. Приклад зміни тиску (до 1 МПа) при витoku на ділянці газопроводу з урахуванням максимального і мінімального значень тиску на виході

Шукана точка також може знаходитися шляхом зміни співвідношення довжин ділянок  $L_1, L_2$  у рівнянні зміни температури на ділянці ПП.

Якщо  $X_{i_{n+1}} - X_{i_n} = L_1 + L_2$ , а  $\widehat{W}_1^t$  та  $\widehat{W}_2^t$  - приведений об'єм сировини до й після витоку, тоді

$$T_k = T_{gp} + (T_n - T_{gp}) \exp\left(-\frac{\tilde{L} \cdot \pi \cdot d_i \cdot K}{\rho_0 \cdot C_p \cdot \tilde{Q}_{0n}^t}\right);$$

$$(47)$$

$$T_k = \left( \left( T_{gp} + (T_n - T_{gp}) \exp\left(-\frac{L_1 \cdot \pi \cdot d_i \cdot K}{\rho_0 \cdot C_p \cdot \tilde{Q}_{0n}^t}\right) \right) - T_{gp} \right) \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{L_2 \cdot \pi \cdot d_i \cdot K}{\rho_0 \cdot C_p \cdot \tilde{Q}_{0n}^t}\right),$$

$$(48)$$

$$L_1 = \frac{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot L \cdot \tilde{Q}_1^t - C_p \cdot \tilde{Q}_1^t \cdot \tilde{Q}_2^t \cdot \lg\left(\frac{T_{gp} - T_n}{T_{gp} - T_k}\right)}{d_i \cdot K \cdot \pi (\tilde{Q}_1^t - \tilde{Q}_2^t)}.$$

$$(49)$$

де  $C_p$  - питома теплоємність ЦП, Дж/(кг·°С,  $K$  - коефіцієнт теплопередачі від ЦП до ґрунту, (Вт/(м<sup>2</sup>·°С)),  $T_n$  - температура на початку ділянки, °С,  $T_k$  - температура в кінці ділянки, °С,  $T_{gp}$  - температура ґрунту °С.

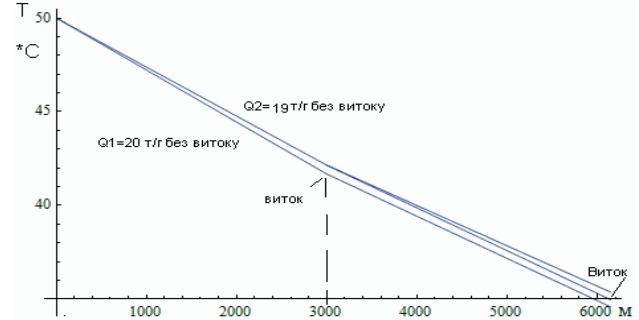


Рис. 2. Приклад зміни температури Т (Т до 50°С) при витoku на ділянці газопроводу (до 6125 м) з урахуванням максимального і мінімального значень температури на виході

В формулах 47, 48, 49  $L_1, L_2, L$ , є випадковими величинами,

$\widehat{E}, \widehat{\lambda}_1, \widehat{\lambda}_2, \widehat{K}, \widehat{C}_p$  - є оціненими величинами.

$\tilde{Q}_1, \tilde{Q}_2, \tilde{W}_1^t, \tilde{W}_2^t, \tilde{P}_n^t, \tilde{P}_{n+1}^t, \tilde{T}_n, \tilde{T}_k, \tilde{T}_{gp}, \tilde{z}_i, \tilde{z}_{i+1}$  є вимірними величинами. Обчислювальну помилку можливо знайти методом лінеаризації випадкових величин.

## 6. Метод оцінювання метрологічних характеристик місцеположення витоку на магістральному продуктопроводі

Нехай є випадкова величина  $L_1$  і відомі її характеристики: математичне сподівання  $m_{L_1}$  та дисперсія  $D_{L_1}$ .

Можливі значення випадкової величини  $L_1$  обмежені довжиною ПП, і мають вигляд інтервалу  $(0, L_{max})$ .

Існують інші випадкові величини:

$\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \tilde{W}_1, \tilde{W}_2, L, \tilde{d}_i, \widehat{E}, \widehat{\lambda}_1, \widehat{\lambda}_2, \rho_0$ , пов'язана з  $X$  функціональною залежністю:

$L_1 = f(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \tilde{W}_1, \tilde{W}_2, L, \tilde{d}_i, \widehat{E}, \widehat{\lambda}_1, \widehat{\lambda}_2, \rho_0)$ , причому функція хоча не є лінійною, але мало відрізняється від лінійної на ділянці  $(0, L_{max})$ .

Знайдемо числові характеристики величини  $L_1$  - математичне сподівання  $m_{L_1}$  дисперсію  $D_{L_1}$ .

Розглянемо криву на ділянці і замінимо її наближено на дотичну, проведену в точці з абсцисою. Рівняння дотичної має вигляд:

$$y = f(m_{\tilde{P}_1}, m_{\tilde{P}_2}, m_{\tilde{W}_1}, m_{\tilde{W}_2}, m_{L_1}, m_{\tilde{d}_i}, m_{\rho_0}) +$$

$$+ f'(m_{\tilde{P}_1}, m_{\tilde{P}_2}, m_{\tilde{W}_1}, m_{\tilde{W}_2}, m_{L_1}, m_{\rho_0}) \cdot$$

$$(m_{\tilde{P}_1} - \tilde{P}_1, m_{\tilde{P}_2} - \tilde{P}_2, m_{\tilde{W}_1} - \tilde{W}_1, m_{\tilde{W}_2} - \tilde{W}_2, m_{L_1} - L, m_{\rho_0} - \rho_0).$$

$$(50)$$

Інтервал практично можливих значень кожного аргументу достатньо вузький, якщо в межах цього інтервалу крива і дотична мало відрізняється, тому ділянка кривої практично можна замінити ділянкою дотичної, на ділянці функція майже лінійна. Тоді випадкові величини  $L_1$  і  $f$  наближено зв'язані лінійною залежністю:

$$L_1 = f(m_{\tilde{P}_1}, m_{\tilde{P}_2}, m_{\tilde{W}_1}, m_{\tilde{W}_2}, m_L, m_{\rho_0}) + f'(m_{\tilde{P}_1}, m_{\tilde{P}_2}, m_{\tilde{W}_1}, m_{\tilde{W}_2}, m_L, m_{\rho_0}) \cdot (m_{\tilde{P}_1} - \tilde{P}_1, m_{\tilde{P}_2} - \tilde{P}_2, m_{\tilde{W}_1} - \tilde{W}_1, m_{\tilde{W}_2} - \tilde{W}_2, m_L - L, m_{\rho_0} - \rho_0) \quad (51)$$

або, позначаючи

$$(m_{\tilde{P}_1} - \tilde{P}_1, m_{\tilde{P}_2} - \tilde{P}_2, m_{\tilde{W}_1} - \tilde{W}_1, m_{\tilde{W}_2} - \tilde{W}_2, m_L - L, m_{d_i} - d_i, m_{\hat{E}} - \hat{E}, m_{\hat{\lambda}_1} - \hat{\lambda}_1, m_{\hat{\lambda}_2} - \hat{\lambda}_2, m_{\rho_0} - \rho_0) = \dot{f},$$

маємо:

$$L_1 = f(m_{\tilde{P}_1}, m_{\tilde{P}_2}, m_{\tilde{W}_1}, m_{\tilde{W}_2}, m_L, m_{\rho_0}) + f'(m_{\tilde{P}_1}, m_{\tilde{P}_2}, m_{\tilde{W}_1}, m_{\tilde{W}_2}, m_L, m_{\rho_0}) \cdot \dot{f} \quad (52)$$

До лінійної функції (52) можна застосувати відомі прийоми визначення числових характеристик лінійних функцій, математичне очікування цієї лінійної функції знайдемо, підставляючи в неї вираз математичне сподівання аргументу  $\dot{f}$ , що дорівнює нулю. Отримаємо:

$$m_{L_1} = m_{\tilde{P}_1} + m_{\tilde{P}_2} + m_{\tilde{W}_1} + m_{\tilde{W}_2} + m_L + m_{d_i} + m_{\hat{E}} + m_{\hat{\lambda}_1} + m_{\hat{\lambda}_2} + m_{\rho_0} \quad (53)$$

Дисперсія величини визначиться за формулою:

$$D_{L_1} = \left(\frac{\partial f}{\partial P_1}\right)^2 \sigma_{P_1} + \left(\frac{\partial f}{\partial P_2}\right)^2 \sigma_{P_2} + \left(\frac{\partial f}{\partial W_2}\right)^2 \sigma_{P_1} + \left(\frac{\partial f}{\partial W_2}\right)^2 \sigma_{W_2} + \left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 \sigma_L + \left(\frac{\partial f}{\partial \rho_0}\right)^2 \sigma_{\rho_0} \quad (54)$$

Переходячи до середнього квадратичного відхилення, маємо:

$$(\sigma_{L_1})^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial P_1}\right)^2 \sigma_{P_1} + \left(\frac{\partial f}{\partial P_2}\right)^2 \sigma_{P_2} + \left(\frac{\partial f}{\partial W_2}\right)^2 \sigma_{P_1} + \left(\frac{\partial f}{\partial W_2}\right)^2 \sigma_{W_2} + \left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 \sigma_L + \left(\frac{\partial f}{\partial \rho_0}\right)^2 \sigma_{\rho_0} \quad (55)$$

Формули 53,54,55, зрозуміло, є наближеними, оскільки наближеною є і сама заміна нелінійної функції.

Таким чином, ми провели лінеаризацію функції похибки відстані до витоку на ділянці ПП за формулою змінення тиску. Так само проведемо лінеаризацію функції похибки відстані до витоку на ділянці ПП за формулою змінення температури.[3]

$$L_1 = f(\tilde{T}_n, \tilde{T}_k, \tilde{T}_{gr}, \hat{K}, \tilde{Q}_1, \tilde{Q}_2, L, \tilde{d}_i, \hat{C}_p, \rho_0) \quad (56)$$

$$L_1 = f(m_{\tilde{T}_n}, m_{\tilde{T}_k}, m_{\tilde{T}_{gr}}, m_{\hat{K}}, m_{\tilde{Q}_1}, m_{\tilde{Q}_2}, m_{\hat{K}}, m_L, m_{\hat{C}_p}, m_{\rho_{cp}}) + f'(m_{\tilde{T}_n}, m_{\tilde{T}_k}, m_{\tilde{T}_{gr}}, m_{\hat{K}}, m_{\tilde{Q}_1}, m_{\tilde{Q}_2}, m_{\hat{K}}, m_L, m_{\hat{C}_p}, m_{\rho_{cp}}) \cdot \dot{f} \quad (57)$$

$$m_{L_1} = m_{\tilde{T}_n} + m_{\tilde{T}_k} + m_{\tilde{T}_{gr}} + m_{\hat{K}} + m_{\tilde{Q}_1} + m_{\tilde{Q}_2} + m_{\hat{K}} + m_L + m_{\hat{C}_p} + m_{\rho_{cp}} \quad (58)$$

$$(\delta_{L_1})^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial T_n}\right)^2 \delta_{T_n} + \left(\frac{\partial f}{\partial P_2}\right)^2 \delta_{T_k} + \left(\frac{\partial f}{\partial W_2}\right)^2 \delta_{T_{gr}} + \left(\frac{\partial f}{\partial Q_1}\right)^2 \delta_{Q_1} + \left(\frac{\partial f}{\partial Q_2}\right)^2 \delta_{Q_2} + \left(\frac{\partial f}{\partial K}\right)^2 \delta_K + \left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 \delta_L + \left(\frac{\partial f}{\partial \rho_{cp}}\right)^2 \delta_{\rho_{cp}} \quad (59)$$

Чисельні значення цієї похибки з використанням значень реальних агрегатів будуть такими:

$$\frac{df}{dP_1} = \frac{1}{\frac{8 \cdot \lambda_2}{\pi^2 \cdot d_i^5 \cdot \tilde{\rho}_n^t \cdot E_i^2} \cdot (\hat{W}_2^t)^2 - \frac{8 \cdot \lambda_1}{\pi^2 \cdot d_i^5 \cdot \tilde{\rho}_n^t \cdot E_i^2} \cdot (\hat{W}_1^t)^2} = 0.11692;$$

$$\frac{df}{dP_2} = -\frac{1}{\frac{8 \cdot \lambda_2}{\pi^2 \cdot d_i^5 \cdot \tilde{\rho}_n^t \cdot E_i^2} \cdot (\hat{W}_2^t)^2 - \frac{8 \cdot \lambda_1}{\pi^2 \cdot d_i^5 \cdot \tilde{\rho}_n^t \cdot E_i^2} \cdot (\hat{W}_1^t)^2} = -0.116918;$$

$$\frac{df}{dW_1} = -\frac{16LW_2 \lambda_2 \left( P_1 - P_2 + \frac{8\lambda_2 (\tilde{W}_2^n)^2}{d_i^5 E_i \pi^2 \tilde{\rho}_n^t} + g(z_{n+1} - z_n) \tilde{\rho}_n^t \right)}{\left( 8(\lambda_2 (\tilde{W}_2^n)^2 - \lambda_1 (\tilde{W}_1^n)^2) \right)^2 \cdot d_i^5 E_i \pi^2 \tilde{\rho}_n^t} = -12321.5;$$

$$\frac{df}{dW_2} = -\frac{16LW_2 \lambda_2}{\left( 8(\lambda_2 (\tilde{W}_2^n)^2 - \lambda_1 (\tilde{W}_1^n)^2) \right)^2} + \frac{16LW_2 \lambda_2 \left( P_1 - P_2 + \frac{8\lambda_2 (\tilde{W}_2^n)^2}{d_i^5 E_i \pi^2 \tilde{\rho}_n^t} + g(z_{n+1} - z_n) \tilde{\rho}_n^t \right)}{\left( 8(\lambda_2 (\tilde{W}_2^n)^2 - \lambda_1 (\tilde{W}_1^n)^2) \right)^2 \cdot d_i^5 E_i \pi^2 \tilde{\rho}_n^t} = -26431.6;$$

$$\frac{df}{dL} = \frac{8(\tilde{W}_2^n)^2 \lambda}{8(\tilde{W}_2^n)^2 \lambda_2 - 8(\tilde{W}_1^n)^2 \lambda_1} = -10.4101;$$

$$\frac{df}{d\rho_{cp}} = \frac{g(z_{n+1} - z_n) \tilde{\rho} - \frac{8\lambda_2 W_2^2}{d_i^5 E_i \pi^2 \tilde{\rho}_n^t}}{8(\lambda_1 (\tilde{W}_2^n)^2 - \lambda_2 (\tilde{W}_1^n)^2) \frac{d_i^5 E_i \pi^2 \tilde{\rho}_n^t}{d_i^5 E_i \pi^2 \tilde{\rho}_n^t}} =$$

$$\frac{\frac{1}{\tilde{\rho}_n^t} \left( P_1 - P_2 + \frac{8\lambda_2 (\tilde{W}_2^n)^2}{d_i^5 E_i \pi^2 \tilde{\rho}_n^t} + g(z_{n+1} - z_n) \tilde{\rho}_n^t \right)}{8(\tilde{W}_2^n)^2 - (\tilde{W}_1^n)^2 \frac{d_i^5 E_i \pi^2 \tilde{\rho}_n^t}{d_i^5 E_i \pi^2 \tilde{\rho}_n^t}} = 83.3002;$$

$$\begin{aligned} (\sigma_{L_1})^2 &= \left( \frac{\partial f}{\partial P_1} \right)^2 \sigma_{P_1} + \left( \frac{\partial f}{\partial P_2} \right)^2 \sigma_{P_2} + \left( \frac{\partial f}{\partial W_2} \right)^2 \sigma_{P_1} + \\ &+ \left( \frac{\partial f}{\partial W_2} \right)^2 \sigma_{W_2} + \left( \frac{\partial f}{\partial L} \right)^2 \sigma_L + \left( \frac{\partial f}{\partial E} \right)^2 \sigma_E + \left( \frac{\partial f}{\partial d_i} \right)^2 \sigma_{d_i} + \\ &+ \left( \frac{\partial f}{\partial \lambda_1} \right)^2 \sigma_{\lambda_1} + \left( \frac{\partial f}{\partial \lambda_2} \right)^2 \sigma_{\lambda_2} + \left( \frac{\partial f}{\partial \rho_0} \right)^2 \sigma_{\rho_0} = (199.863)^2, \end{aligned}$$

де  $\delta L_1$  - середньоквадратична похибка відстані до витоку по моделі тиску на ділянці ПП.

Середньоквадратична похибка температури при витоку:

$$\frac{df}{dT_n} = \frac{C_p \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot \rho_0}{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot (Q_1 - Q_2) (T_{gr} - T_k)} = -8256.64;$$

$$\frac{df}{dT_k} = -\frac{C_p \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot \rho_0}{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot (Q_1 - Q_2) (T_{gr} - T_k)} = 11389;$$

$$\begin{aligned} \frac{df}{dT_{gr}} &= -\frac{C_p \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot (T_{gr} - T_k) \left( \frac{1}{T_{gr} - T_k} + \frac{T_{gr} - T_n}{(T_{gr} - T_k)^2} \right) \rho_0}{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot (Q_1 - Q_2) (T_{gr} - T_k)} = \\ &= -3132.32; \end{aligned}$$

$$\frac{df}{dK} = \frac{L \cdot Q_1}{K \cdot (Q_1 - Q_2)} =$$

$$\frac{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot L \cdot Q_1 - C_p \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot \lg \left( \frac{T_{gr} - T_n}{T_{gr} - T_k} \right) \rho_0}{d_i \cdot K^2 \cdot \pi \cdot (Q_1 - Q_2)} = 56904.7;$$

$$\frac{df}{dQ_1} = \frac{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot L - C_p \cdot Q_2 \cdot \lg \left( \frac{T_{gr} - T_n}{T_{gr} - T_k} \right) \rho_0}{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot (Q_1 - Q_2) (T_{gr} - T_k)} =$$

$$\frac{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot L \cdot Q_1 - C_p \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot \lg \left( \frac{T_{gr} - T_n}{T_{gr} - T_k} \right) \rho_0}{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot (Q_1 - Q_2)^2} = -8.00304 \cdot 10^6;$$

$$\frac{df}{dQ_2} = -\frac{C_p \cdot Q_1 \cdot \lg \left( \frac{T_{gr} - T_n}{T_{gr} - T_k} \right) \rho_0}{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot (Q_1 - Q_2) (T_{gr} - T_k)} =$$

$$\frac{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot L \cdot Q_1 - C_p \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot \lg \left( \frac{T_{gr} - T_n}{T_{gr} - T_k} \right) \rho_0}{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot (Q_1 - Q_2)^2} = -9.23658 \cdot 10^6$$

$$\frac{df}{dL} = \frac{Q_1}{(Q_1 - Q_2)} = 20;$$

$$\frac{df}{dC_p} = -\frac{Q_1 \cdot Q_2 \cdot \lg \left( \frac{T_{gr} - T_n}{T_{gr} - T_k} \right) \rho_0}{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot (Q_1 - Q_2)} = -57.177;$$

$$\frac{df}{d\rho_0} = -\frac{C_p \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot \lg \left( \frac{T_{gr} - T_n}{T_{gr} - T_k} \right) \rho_0}{d_i \cdot K \cdot \pi \cdot (Q_1 - Q_2)} = -153.205;$$

$$\begin{aligned} (\delta_{L_1})^2 &= \left( \frac{\partial f}{\partial T_n} \right)^2 \delta_{T_n} + \left( \frac{\partial f}{\partial P_2} \right)^2 \delta_{T_k} + \left( \frac{\partial f}{\partial W_2} \right)^2 \delta_{T_{gr}} + \\ &+ \left( \frac{\partial f}{\partial Q_1} \right)^2 \delta_{Q_1} + \left( \frac{\partial f}{\partial Q_2} \right)^2 \delta_{Q_2} + \left( \frac{\partial f}{\partial K} \right)^2 \delta_K + \left( \frac{\partial f}{\partial d_i} \right)^2 \delta_{d_i} + \\ &+ \left( \frac{\partial f}{\partial L} \right)^2 \delta_L + \left( \frac{\partial f}{\partial \rho_{cp}} \right)^2 \delta_{\rho_{cp}} = (0.04838)^2, \end{aligned}$$

де  $\delta L_1$  - середньоквадратична похибка відстані до витоку по моделі температури на ділянці ПП.

## 7. Висновок

У результаті виконаної роботи було виведено новий аналітичний метод знаходження точки кримінального відбору, який полягає в побудові математичної моделі ділянки ПП до і після відбору, та вибору оптимальної позиції відбору, шляхом розв'язання лінійного рівняння, де вибрано невідома відстань до точки відбору.



## Література

1. Тевяшев, А.Д. Интеллектуальная система обнаружения криминальных отборов из продуктопроводов [Текст] / А.Д. Тевяшев, К.В. Кобылинский // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. – 2006. – №1(64). – С. 6 - 18.
2. Лурье, М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. [Текст] / М.В. Лурье – М: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 336 с.
3. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей 4-е изд. [Текст] / Е. С. Вентцель. М.: Наука, 1969. - 576с

**Abstract**

*The article considers the analytical method of finding the point of intervention in the process of transportation of hydrocarbons - leaking or criminal deprivation.*

*The analytical method is the most efficient one for steady-state conditions of transport of hydrocarbons in the main delivery ducts. It permits to determine the location of the point of intervention in the process, as well as to evaluate the metrological characteristics of the method: the variance of this estimate of leak location, depending on the metrological characteristics of the measurement devices of process parameters of hydrocarbons (pressure, flow, temperature and density), the variance of estimates and heat transfer coefficients.*

*The suggested method could be the most effective for the main delivery ducts, which have the distance between the metering units of five - ten kilometers. Nowadays, the designed method is tested at one of the condensate lines*

**Keywords:** *delivery duct, criminal deprivation, hydrocarbons*

В статті описано метод розпізнавання періодичного еталонного сигналу при наявності адитивної періодичної завади, яка накладається на нього на частотах, що невідомі заздалегідь. Відомою є полоса частот завади, однак її спектральна характеристика невідома

**Ключові слова:** *розпізнавання періодичного сигналу, функції непропорційностей, адитивна завада, періодична завада*

В статье описан метод распознавания периодического эталонного сигнала при наличии аддитивной периодической помехи, которая накладывается на него на заведомо неизвестных частотах. Известна полоса частот, занимаемая помехой, однако ее спектральная характеристика неизвестна

**Ключевые слова:** *распознавание периодического сигнала, функции непропорциональностей, аддитивная помеха, периодическая помеха*

УДК 517.17:681.518.5:004.93:004.522

## РАСПОЗНАВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ЭТАЛОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОМЕХ

**В. В. Авраменко**

Кандидат технических наук, доцент\*

Контактный тел.: 099-555-40-06

E-mail: avr@sumdu.edu.ua

**Ю. И. Прохненко**

Аспирант\*

Контактный тел.: 066-962-89-31

E-mail: prokhnenko.mail@yandex.ru

\*Кафедра компьютерных наук

Сумской государственной университет

ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 40007

### 1. Введение

Распознавание эталонных сигналов при наличии аддитивной помехи является актуальной задачей и рассматривается во множестве работ [1, 2, 3]. Однако в основном рассматривается случай, когда помеха носит

случайный характер. На практике часто встречаются задачи, когда помеха является периодической и ее спектр частично накладывается на спектр эталонного сигнала на заведомо неизвестных частотах. В частности, подобная задача возникает при автоматическом распознавании голосовых команд в случае, когда на