

Комп'ютерне Моделювання Розриву Трубопроводу Методом Характеристик

Іріна Гусарова
кафедра прикладної математики
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
gusar55555m@gmail.com

Дмитро Абрамов
студент магістр
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
abramov.dmitry21@gmail.com

Computer Modeling of Pipeline Rupture Using Characteristics Method

Iryna Husarova
Department of Applied Mathematics
Kharkiv National University
of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
gusar55555m@gmail.com

Dmytro Abramov
Graduate Student
Kharkiv National University
of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
abramov.dmitry21@gmail.com

Анотація—Розглядається задача моделювання розриву трубопроводу на ділянці трубопроводу методом характеристик. Математичною моделлю режимів течії газу при розриві трубопроводу є квазілінійна система диференціальних рівнянь у частинних похідних гіперболічного типу з заданими початковими та крайовими умовами. Наведений алгоритм розрахунку параметрів газового потоку при розриві трубопроводу методом характеристик.

Abstract— The problem of modeling the pipeline rupture in the pipeline section by the method of characteristics is considered. The mathematical model of the gas flowing mode pipeline rupture is a quasi-linear system of differential equations in partial derivatives of a hyperbolic type with given initial distribution and boundary conditions. The algorithm of calculation the gas flowing parameters with a pipeline rupture by the method of characteristics is given.

Ключові слова— квазілінійна система диференціальних рівнянь; частинні похідні; ділянка трубопроводу; розрив трубопроводу; метод характеристик; моделювання; нестационарний неізотермічний режим течія газу

Keywords— quasi-linear system of differential equations; partial derivatives; pipeline section; pipeline rupture; method of characteristics; modeling; non-stationary non-isothermal gas flowing mode

I. ВСТУП

Актуальність дослідження. Актуальною проблемою для нафтогазових компаній України залишається транспортування газу до споживача без втрат.

Цю проблему можна вирішити при використанні оперативного управління транспортом газу, яке, в свою чергу, неможливо без повної автоматизації технологічних процесів. А остання неможлива без попереднього створення математичних моделей і підбору найбільш раціональних чисельних методів, які дозволяють врахувати всі особливості режимів течії газу (РТГ), особливо в аварійних ситуаціях, а також проводити розрахунок з найбільшою точністю і швидкодією. Таке доповнення технологій експлуатації газопроводів гарантовано забезпечує вироблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення безпеки та ефективності роботи трубопровідної системи.

В роботі розглядаються режими течії газу в разі розриву трубопроводу. Такі РТГ є нестационарними неізотермічними.

Актуальність даних досліджень визначається необхідністю наукової розробки і аргументування нових чисельних методів, які б дозволили проводити моделювання нестационарних процесів течії газу і на їх основі управління в позаштатних і аварійних ситуаціях в

газотранспортній системі (ГТС) з урахуванням граничних умов. Був проведений аналіз чисельних методів розв'язання системи гіперболічних диференціальних рівнянь в частинних похідних, за допомогою якої описується математична модель (ММ) РТГ при розриві трубопроводу. Для чисельного розв'язання таких систем часто використовуються такі методи як метод скінченних різниць з використанням різних рівномірних і нерівномірних скінченно-різницевої сіток [1-7], метод характеристик [8-11], метод скінченного об'єму [5], метод скінченних різниць з використанням методу Лагранжевих частинок [6], інтегро-інтерполяційний метод [5] та ін. Кожен з цих методів має як переваги, так і недоліки, але ми зупинимося на методі характеристик.

Цілі та задачі дослідження. Метою роботи є вибір математичної моделі нестационарних неізотермічних режимів течії газу в разі розриву наприкінці ділянки трубопроводу (ДТ), застосування методу характеристик і розробка алгоритму для вирішення системи диференціальних рівнянь гіперболічного типу з відомим початковим розподілом і граничними умовами, аналіз отриманих результатів.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В роботі досліджується ДТ довжиною L постійного діаметру. Вважаємо, що, наприкінці ДТ у мить часу t_0 відбувається розрив трубопроводу, далі у мить часу t_1 з'ясовується, що відбувся розрив і на початку ДТ закривається засувка. Таким чином, на границях трубопроводу відбувається різка зміна граничних умов, тому режими течії газу по ДТ є нестационарними і неізотермічними.

Будемо описувати нестационарний неізотермічний режим течії газу (ННРТГ) за допомогою функцій масової витрати $G(x,t)$, тиску $P(x,t)$, температури $T(x,t)$, заданих в області $G' = \{(x,t) : 0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq T_k\}$, де T_k – час закінчення процесу.

Для загального випадку ННРТГ по ДТ, яка представляє собою циліндричну трубу постійного діаметра, описується квазілінійною системою диференціальних рівнянь в частинних похідних, отриманої із загальних рівнянь Нав'є-Стокса газової динаміки для одновимірного випадку [1,8]

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + B(x,t,\phi) \frac{\partial \phi}{\partial x} = \Phi(x,t,\phi), \quad (1)$$

$$\text{де } B = \begin{pmatrix} 2\alpha TS \frac{W}{p} & 1 - \alpha TS \frac{W^2}{p^2} & 0 \\ \alpha TS & 0 & 0 \\ \alpha S \frac{T^2}{p} (\gamma - 1) & 0 & \alpha TS \frac{W}{p} \gamma \end{pmatrix},$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} -\beta TS \frac{W|W|}{p} - \frac{gp}{\alpha TS} \frac{dh}{dx} \\ 0 \\ -\frac{4K}{D} (\gamma - 1) \frac{T}{p} (T - T_{ep}) - g(\gamma - 1) \frac{TW}{p} \frac{dh}{dx} \end{pmatrix}$$

матриці, елементи яких задані безперервно диференціюються в деякій області зміни своїх аргументів функції змінних x, t, W, P, T ; $\phi = (W(x,t), P(x,t), T(x,t))$ – деякий безперервно диференційований в області розв'язок рівняння (1).

Розглянемо аварійну ситуацію при розриві трубопроводу. Першим етапом буде відсутність розриву і аварійної ситуації, математичною моделлю буде система (1) з заданими початковими умовами і з граничними умовами. Граничні умови при $0 \leq t < t_0$ матимуть вид

$$\begin{cases} P(0,t) = P^0(t), \\ T(0,t) = T^0(t), \end{cases} \quad G(L,t) = G^0(t), \quad (2)$$

де $P^0(t), T^0(t), G^0(t)$ – задані функції.

Початкові умови матимуть вид

$$\begin{aligned} W(x,0) &= W_0(x), \quad P(x,0) = P_0(x), \\ T(x,0) &= T_0(x), \quad x \in [0, L], \end{aligned} \quad (3)$$

де $W(x,t)$ – питома масова витрата газу;

$W_0(x), P_0(x), T_0(x)$ – відомі функції.

Зазвичай, в якості початкового розподілу береться розподіл параметрів газового потоку при стаціонарному режимі.

Другим етапом буде моделювання розриву труби до моменту закриття аварійної засувки. Тоді попередні граничні умови змінюються на

$$\begin{cases} P(0,t) = P^0(t); \\ T(0,t) = T^0(t), \text{ якщо } W(0,t) > 0, \end{cases} \quad W(L,t) = \frac{P(L,t)}{\sqrt{ZgRT}}, \quad t_0 \leq t < t_1, \quad (4)$$

де t_1 – час, коли закрилася аварійна засувка, тобто визначили, що трапився розрив трубопроводу.

Третім етапом буде моделювання розриву труби з моменту закриття аварійної засувки. Тоді попередні граничні умови змінюються на

$$\begin{cases} W(L,t) = \frac{P(L,t)}{\sqrt{ZgRT}}, \text{ якщо } P(L,t) \geq P_{am}, \\ P(L,t) = P_{am}, \text{ якщо } W(L,t) < \frac{P(L,t)}{\sqrt{ZgRT}}, \end{cases} \quad (5)$$

$$W(0,t)=0, \quad t_1 \leq t \leq T_k, \quad (6)$$

де P_{atm} – атмосферний тиск.

III. МЕТОД ТА АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ РОЗРИВУ ТРУБОПРОВОДУ

Застосовуючи метод характеристик до системи (1), доповненої початковими умовами (3) і граничними умовами або (2), або (4), або (5),(6), в залежності від того, якому проміжку часу належить часова змінна t , та знайдемо її розв'язок.

Рівняння напрямків характеристик мають вигляд: $dt = \bar{\lambda}_i(x,t,\phi)dx$, $i=1,2,3$, де $\bar{\lambda}_i$ – корені рівнянь

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 - 2\alpha TS \frac{W}{p} \bar{\lambda} & -\bar{\lambda}(1 - \alpha TS \frac{W^2}{p^2}) & 0 \\ -\bar{\lambda}\alpha TS & 1 & 0 \\ -\bar{\lambda}\alpha S \frac{T^2}{p}(\gamma - 1) & 0 & 1 - \bar{\lambda}\alpha TS \frac{W}{p}\gamma \end{vmatrix} = 0.$$

Звідси, позначимо за $a^2 = \alpha ST$, отримаємо

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{1}{a + a^2 \frac{W}{p}}, \quad \bar{\lambda}_2 = \frac{p}{a^2 W \gamma}, \quad \bar{\lambda}_3 = \frac{1}{-a + a^2 \frac{W}{p}}.$$

При даному в області G' розв'язку системи (1) ми маємо три сімейства характеристик і на кожному з цих сімейств маємо своє диференціальне співвідношення:

$$\begin{aligned} & -\frac{a^2 T(-1+\gamma)}{P} dW + \frac{aT(-P+aW)(-1+\gamma)}{P^2} dP - \\ & -\frac{aST^2 W \beta(-1+\gamma)|W|}{P(P+aW)} dx = 0. \\ & -\frac{a^2 T(-1+\gamma)}{P} dW + \left(-\frac{T(P^2 - a^2 W^2)(-1+\gamma)}{P^2 W \gamma} \right) dP + \\ & + \frac{(P^2 - a^2 W^2)(-1+\gamma)^2}{PW \gamma} dT + \\ & + \frac{a^2 TW(-1+\gamma)\gamma \Phi_1 + (-P^2 + a^2 W^2)(-1+\gamma)^2 \Phi_2}{a^2 W^2 \gamma^2} dx = 0, \\ & -\frac{a^2 T(-1+\gamma)}{P} dW + \frac{aT(P+aW)(-1+\gamma)}{P^2} dP + \\ & + \frac{aST^2 W \beta(-1+\gamma)|W|}{P(P-aW)} dx = 0. \end{aligned}$$

Або у скороченому виді [8]:

$$dt = \bar{\lambda}_i dx, \quad M_i dW + N_i dP + P_i dT - C_i dx, \quad i=1, 2, 3.$$

Для чисельного розв'язання отриманих

диференціальних рівнянь характеристик застосовується метод Массо (ММА) [8,9]. В якості алгоритму ММА розрахунок параметрів газового потоку для вузлів сітки (рис. 1), які залежать від початкового розподілу береться алгоритм, наведений в роботі [8], у роботі [9] наведений алгоритм, який дозволяє враховувати граничні умови (2).

Наведемо алгоритм, який дозволяє враховувати граничні умови (4) або (5), при умові $P(L,t) \geq P_{atm}$, наприкінці ДТ. Зауважимо, тому що

$$a = \sqrt{\alpha ST} = \sqrt{\frac{ZgR}{S}} \cdot ST = \sqrt{ZgRT}, \quad \text{то на границі наприкінці}$$

ділянки ми маємо рівняння $W(L,t) - \frac{P(L,t)}{a} = 0$, де

$$a = \sqrt{ZgRT(L,t)}.$$

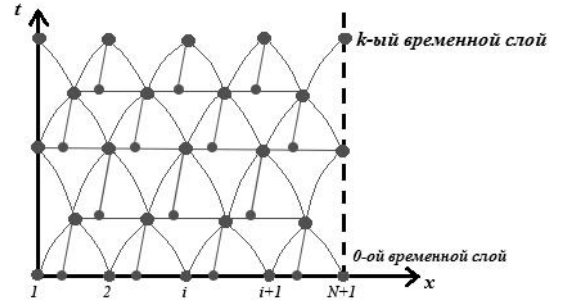


Рис. 1 – Сітка для розрахунку параметрів газового потоку

Розглянемо алгоритм для знаходження параметрів $(N+1)$ -ї точки $(x_{N+1}, t_{N+1}, W_{N+1}(x_{N+1}, t_{N+1}), P_{N+1}(x_{N+1}, t_{N+1}), T_{N+1}(x_{N+1}, t_{N+1}))$ на парному часовому шарі $(k+1=2,4,\dots)$, по параметрам $(N+1)$ -ї точки $(x_{N+1}, t_{N+1}, W_{N+1}(x_{N+1}, t_{N+1}))$ на попередньому непарному k -у часовому шарі і по параметрам $(N+1)$ -ї точки $(x_{N+1}, t_{N+1}, W_{N+1}(x_{N+1}, t_{N+1}), P_{N+1}(x_{N+1}, t_{N+1}), T_{N+1}(x_{N+1}, t_{N+1}))$ на попередньому парному $(k-1)$ -у часовому шарі з урахуванням граничних умов в кінці ділянки:

1) Беремо параметри точки т.1 $(x_1, t_1, W_1(x_1, t_1), P_1(x_1, t_1), T_1(x_1, t_1))$ на k -у часовому шарі, і параметри т.2 $(x_2, t_2, W_2(x_2, t_2), P_2(x_2, t_2), T_2(x_2, t_2))$ на $(k-1)$ -у часовому шарі, знаходимо параметри третьої точки т.3 $(x_3, t_3, W_3(x_3, t_3), P_3(x_3, t_3), T_3(x_3, t_3))$ на наступному $(k+1)$ -у (парному) часовому шарі (рис.2). Т.3 знаходиться на осі ординат, тому $x_3 = L$.

2) Позначимо через 0 середину відрізка, що з'єднує точки 1 і 2. Координати цієї точки обчислюються за формулами

$$x_0 = \frac{1}{2}(x_1 + x_2); \quad t_0 = \frac{1}{2}(t_1 + t_2),$$

$$P_0 = \frac{1}{2}(P_1 + P_2); \quad T_0 = \frac{1}{2}(T_1 + T_2); \quad W_0 = \frac{1}{2}(W_1 + W_2).$$

3) Так як т.3 знаходиться на осі ординат, тому $x_3 = L$. Знаходимо другу координату т.3 $t_3^{(1)}$: $t_3^{(1)} = t_1 + \overline{\lambda_{11}}(L - x_1)$, яка є точкою перетину прямої, проведеної з точки 1 і віссю ординат.

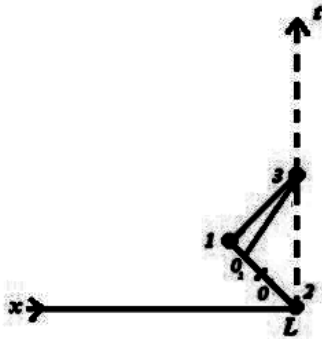


Рис. 2 – Розрахунок параметрів газового потоку наприкінці ділянки

4) Знайдемо нові координати точки $O_1 = (x_0^{(1)}, t_0^{(1)})$:

$$\begin{cases} t_3^{(1)} - t_0^{(1)} = \overline{\lambda_{20}}(L - x_0^{(1)}), \\ t_1 - t_0^{(1)} = \frac{t_2 - t_1}{x_2 - x_1}(x_1 - x_0^{(1)}). \end{cases}$$

5) Вводимо позначення виду

$$\nu^{(1)} = \frac{x_0^{(1)} - x_1}{x_2 - x_0^{(1)}} = \frac{t_1 - t_0^{(1)}}{t_0^{(1)} - t_2}$$

6) Визначаємо значення $W(x, t)$, $P(x, t)$, $T(x, t)$ у точці O_1 по формулі

$$\begin{cases} W_0^{(1)} = \frac{W_1 + \nu^{(1)}W_2}{1 + \nu^{(1)}}; \\ P_0^{(1)} = \frac{P_1 + \nu^{(1)}P_2}{1 + \nu^{(1)}}; \\ T_0^{(1)} = \frac{T_1 + \nu^{(1)}T_2}{1 + \nu^{(1)}}. \end{cases}$$

7) Покладемо $T_3^{(0)} = T_2(X_2, t_2)$, $a^{(0)} = \sqrt{ZgRT_3^{(0)}}$.

8) Беручи відрізки 13 і 0₁3 за характеристики і використовуючи диференціальні співвідношення уздовж характеристик, пишемо систему рівнянь для визначення перших наближень $W(x, t)$, $P(x, t)$, $T(x, t)$ у точці 3, використовуючи при цьому граничну умову на кінці трубопроводу:

$$\begin{cases} -\frac{a^2 T_1(-1+\gamma)}{P_1}(W_3^{(1)} - W_1) + \frac{a T_1(-P_1 + a W_1)(-1+\gamma)}{P_1^2}(P_3^{(1)} - P_1) - \frac{a S T_1^2 W_1 \beta(-1+\gamma)|W_1|}{P_1(P_1 + a W_1)}(L - x_1) = 0, \\ W_3^{(1)} - \frac{P_3^{(1)}}{a^{(0)}} = 0, \\ -\frac{a^2 T_0^{(1)}(-1+\gamma)}{P_0^{(1)}}(W_3^{(1)} - W_0^{(1)}) + \left(-\frac{T_0^{(1)}(P_0^{(1)2} - a^2 W_0^{(1)2})(-1+\gamma)}{P_0^{(1)2} W_0^{(1)} \gamma}\right)(P_3^{(1)} - P_0^{(1)}) + \\ + \frac{(P_0^{(1)2} - a^2 W_0^{(1)2})(-1+\gamma)^2}{P_0^{(1)2} W_0^{(1)} \gamma}(T_3^{(1)} - T_0^{(1)}) + \frac{a^2 T_0^{(1)} W_0^{(1)}(-1+\gamma) \gamma \Phi_1 + (-P_0^{(1)2} + a^2 W_0^{(1)2})(-1+\gamma)^2 \Phi_2}{a^2 W_0^{(1)2} \gamma^2}(L - x_0^{(1)}) = 0. \end{cases}$$

Покладемо $l = 1$.

9) Знайшовши параметри точки 3: $(L, t_3^{(1)}, W_3^{(1)}, P_3^{(1)}, T_3^{(1)})$, зробимо її уточнення в такий спосіб, обчислимо значення $\overline{\lambda_{13}^{(1)}}$, $\overline{\lambda_{23}^{(1)}}$:

$$\overline{\lambda_{13}^{(1)}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha S T_3^{(1)}} + S T_3^{(1)} \frac{W_3^{(1)}}{P_3^{(1)}} \alpha}, \quad \overline{\lambda_{23}^{(1)}} = \frac{P_3^{(1)}}{\alpha S T_3^{(1)} W_3^{(1)} \gamma}.$$

10) Знаходимо величини

$$\overline{\lambda_{11}^{(1+1)}} = \frac{1}{2}(\overline{\lambda_{11}} + \overline{\lambda_{13}^{(1)}}), \quad \overline{\lambda_{20}^{(1+1)}} = \frac{1}{2}(\overline{\lambda_{20}^{(1)}} + \overline{\lambda_{23}^{(1)}}).$$

11) Для точки т.1, отримаємо:

$$\begin{aligned} M_1^{(1+1)} &= \frac{1}{2} \left(-\frac{a^2 T_1(-1+\gamma)}{P_1} - \frac{a^2 T_3^{(1)}(-1+\gamma)}{P_3^{(1)}} \right), \\ N_1^{(1+1)} &= \frac{1}{2} \left(\frac{a T_1(-P_1 + a W_1)(-1+\gamma)}{P_1^2} + \frac{a T_3^{(1)}(-P_3^{(1)} + a W_3^{(1)})(-1+\gamma)}{P_3^{(1)2}} \right), \\ P P_1^{(1+1)} &= 0, \\ C_1^{(1+1)} &= \frac{1}{2} \left(-\frac{a S T_1^2 W_1 \beta(-1+\gamma)|W_1|}{P_1(P_1 + a W_1)} - \frac{a S T_3^{(1)} W_3^{(1)} \beta(-1+\gamma)|W_3^{(1)}|}{P_3^{(1)}(P_3^{(1)} + a W_3^{(1)})} \right). \end{aligned}$$

12) Для точки т. O_1 , отримаємо:

$$\begin{aligned} M_{0_1}^{(1+1)} &= \frac{1}{2} \left(-\frac{a^2 T_0^{(1)}(-1+\gamma)}{P_0^{(1)}} - \frac{a^2 T_3^{(1)}(-1+\gamma)}{P_3^{(1)}} \right), \\ N_{0_1}^{(1+1)} &= \frac{1}{2} \left(-\frac{T(P_0^{(1)2} - a^2 W_0^{(1)2})(-1+\gamma)}{P_0^{(1)2} W_0^{(1)} \gamma} - \frac{T_3^{(1)}(P_3^{(1)2} - a^2 W_3^{(1)2})(-1+\gamma)}{P_3^{(1)2} W_3^{(1)} \gamma} \right), \\ P P_{0_1}^{(1+1)} &= \frac{1}{2} \left(\frac{(P_0^{(1)2} - a^2 W_0^{(1)2})(-1+\gamma)^2}{P_0^{(1)2} W_0^{(1)} \gamma} + \frac{(P_3^{(1)2} - a^2 W_3^{(1)2})(-1+\gamma)^2}{P_3^{(1)2} W_3^{(1)} \gamma} \right), \\ C_{0_1}^{(1+1)} &= \frac{1}{2} \left(\frac{a^2 T_0^{(1)} W_0^{(1)}(-1+\gamma) \gamma \Phi_1 + (-P_0^{(1)2} + a^2 W_0^{(1)2})(-1+\gamma)^2 \Phi_2}{a^2 W_0^{(1)2} \gamma^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{a^2 T_3^{(1)} W_3^{(1)}(-1+\gamma) \gamma \Phi_1 + (-P_3^{(1)2} + a^2 W_3^{(1)2})(-1+\gamma)^2 \Phi_2}{a^2 W_3^{(1)2} \gamma^2} \right). \end{aligned}$$

13) Знайдемо координати уточнених точок O_1 та 3 за формулами:

$$t_3^{(l+1)} = t_1 + \overline{\lambda_{11}^{(l+1)}}(L - x_1),$$

$$\begin{cases} t_3^{(l+1)} - t_0^{(l+1)} = \overline{\lambda_{20}^{(l+1)}}(x_3^{(l+1)} - x_0^{(l+1)}), \\ t_1 - t_0^{(l+1)} = \frac{t_2 - t_1}{x_2 - x_1}(x_1 - x_0^{(l+1)}). \end{cases}$$

14) Обчислимо значення $v^{(l+1)}$, $W_0^{(l+1)}$, $P_0^{(l+1)}$, $T_0^{(l+1)}$ за формулами, які аналогічні формулам з п. 5 та п. 6.

15) Використовуючи попередні формули, знаходимо значення $W_3^{(l+1)}$, $P_3^{(l+1)}$, $T_3^{(l+1)}$, вирішуючи систему рівнянь

$$\begin{cases} M_1^{(l+1)}(W_3^{(l+1)} - W_1) + N_1^{(l+1)}(P_3^{(l+1)} - P_1) + PP_1^{(l+1)}(T_3^{(l+1)} - T_1) + C_1^{(l+1)}(L - x_1) = 0, \\ W_3^{(l+1)} - \frac{P_3^{(l+1)}}{d^{(l)}} = 0, \\ M_0^{(l+1)}(W_3^{(l+1)} - W_0^{(l+1)}) + N_0^{(l+1)}(P_3^{(l+1)} - P_0^{(l+1)}) + PP_0^{(l+1)}(T_3^{(l+1)} - T_0^{(l+1)}) + C_0^{(l+1)}(L - x_0^{(l+1)}) = 0. \end{cases}$$

16) Якщо

$$\begin{cases} |W_3^{(l+1)} - W_3^{(l)}| < \varepsilon, |P_3^{(l+1)} - P_3^{(l)}| < \varepsilon, |T_3^{(l+1)} - T_3^{(l)}| < \varepsilon, \\ |t_3^{(l+1)} - t_3^{(l)}| < \varepsilon, \end{cases} \quad \text{то параметри} \quad \text{т.3}$$

$(L, t_3^{(l+1)}, W_3^{(l+1)}, P_3^{(l+1)}, T_3^{(l+1)})$ знайдені, це буде $(N+1)$ -а точка на $(k+1)$ -у часовому шарі, і переходимо до п. 16 основного алгоритму, в іншому випадку $a^{(l+1)} = a(W_3^{(l+1)}, P_3^{(l+1)}, T_3^{(l+1)})$, $l = l+1$ переходимо до п. 9.

IV. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

В ході розв'язання задачі моделювання аварійної ситуації розриву трубопроводу був створений програмний продукт в математичному пакеті Mathematica 11.2, який дозволив провести ряд обчислювальних експериментів.

Розглянемо аварійну ситуацію розриву на кінці трубопроводу довжиною $L=112$ км. Розрив стався одразу після початку розглядання такої ситуації. Одразу після початку розриву він виявився. Початкові умови: $q = 92.266$ млн m^3 / добу, $P_H = 84.6364456$ атм, $t_H = 40C^0$, $N = 10$. Зауважимо, що при $t = 0$ наприкінці ДТ були такі параметри: $q_N = 102.266$ млн. m^3 / добу, $P_N = 60.748977$ атм., $T_N = 31.2762546$ град.

Побудуємо таблицю порівняння параметрів газового потоку в залежності від кількості точок розбиття в останній точці розбиття на кінці ДТ.

Таблиця 1 – Порівняння параметрів газового потоку в залежності від кількості точок розбиття

	t_N	q_N	P_N	T_N
$N = 5$	53.479	1561.776	30.465	4.735
$N = 10$	26.725	1561.529	30.454	4.638
$N = 20$	13.358	1560.902	30.439	4.582
$N = 100$	2.670	1560.127	30.421	4.534

З аналізу параметрів газового потоку після ряду проведених експериментів можна зробити висновок, що

при збільшенні кількості точок розбиття точність розрахунків стає вищою, але при цьому приходиться витрачати більше машинно-обчислювального часу, тому в залежності від потреби необхідне обирати таку кількість точок розбиття, щоб забезпечити необхідну точність обчислень.

V. ВИСНОВКИ

У даній роботі побудовано математичну модель ННРТГ при розриві на кінці трубопроводу, яка задається системою диференціальних рівнянь в частинних похідних гіперболічного типу з заданими початковими і граничними умовами; для розв'язання системи рівнянь ММ був використаний метод характеристик, а для чисельного розв'язання отриманої системи звичайних диференціальних рівнянь - метод Масо. На підставі проведеного дослідження були зроблені висновки, що метод характеристик може бути застосований для моделювання розриву трубопроводу. Був проведений аналіз по вибору шагу по просторовій змінній.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Трубопроводные системы энергетики: Методические и прикладные проблемы моделирования/ Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г., Тевяшев А.Д. и др. Новосибирск: Наука, 2015, Разд. 3.3, С.193-204.
- [2] Селезнев В.Е., Прялов С.Н. Методы построения моделей течений в магистральных трубопроводах и каналах: монография. М.-Берлин: Директ-Медиа, 2014, 557с.
- [3] Ермолаева, Н. Н. "Нестационарные модели теплообмена и транспортировки газа по морским газопроводам," *Труды Карельского научного центра РАН. Серия Математическое моделирование и информационные технологии*, №8. с. 3–10, 2016.
- [4] Гусарова И.Г., Каминская А.В. Математическое моделирование и анализ аварийных ситуаций при разрыве участка трубопровода. *Восточно-Европейский журнал*, № 4/4 (58), С.19-24, 2012.
- [5] Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / Под. ред. В.Е. Селезнева. Изд. 2-е, перер. и доп. М.: МАКС Пресс, 2009, 436с.
- [6] Карпович Д.С., Суша О.Н., Коровкина Н.П., Кобринцев В.П. "Аналитический и численный методы решения уравнения теплопроводности," *Труды БГТУ*, №6(179), с.122-127, 2015.
- [7] Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике / Б. Л. Рождественский, Н. Н. Яненко; изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1978, 688 с.
- [8] Гусарова И.Г., Ягупова Ю.В. "Численное моделирование нестационарных режимов течения газа методом характеристик," *Системы обработки информации*, № 4(129), с.16-19, 2015.
- [9] Гусарова И.Г., Коротенко А.Н. "Результаты численного моделирования переходных режимов течения газа по участку трубопровода методом характеристик," *Системы обработки информации*, № 2(153), С.18-26, 2018.
- [10] Helgaker, J. F. Modeling Transient Flow in Long Distance Offshore Natural Gas Pipelines, Thesis for — PhD. Trondheim, 2013.
- [11] Милехин Ю. М., Ключников А. Н., Попов В. С., Пелипас Н. Д. "Расчет методом характеристик нестационарных внутрибаллистических параметров выхода РДТТ на рабочий режим," *Физика горения и взрыва*, №6 (50), с.61-74, 2014.

