

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ СТУПЕНЯ ЗАПОВНЕННЯ САМОПЛИВНИХ ДІЛЯНОК ВІД ВИТРАТИ І РЕЖИМУ РУХУ НАФТИ В ТРУБОПРОВОДІ

М.Д. Середюк, С.Я. Григорський

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727139;  
e-mail: tznng@nimg.edu.ua

*Шляхом проведення теоретичних досліджень та математичного моделювання запропоновано аналітичні залежності ступеня заповнення перерізу самопливних ділянок від витрати та режиму руху нафти в магістральних нафтопроводах. Залежності охоплюють можливий діапазон чисел Рейнольдса в зоні гідравлічно гладких труб і зоні змішаного тертя турбулентного режиму. Методику апробовано шляхом розрахунку параметрів самопливних ділянок гірської ділянки нафтопроводу "Дружба". Встановлено, що з високим ступенем достовірності можна описати експоненціальною функцією центральний кут заповнення перерізу трубопроводу від витрати та режиму руху нафти на самопливних ділянках нафтопроводу.*

Ключові слова: нафтопровід, самопливна ділянка, ступінь заповнення перерізу труби, гідравлічний нахил, безнапірний потік рідини.

*Путем проведения теоретических исследований и математического моделирования предложены аналитические зависимости степени заполнения сечения самотечных участков от расхода и режима движения нефти в магистральных нефтепроводах. Зависимости охватывают возможный диапазон чисел Рейнольдса в зоне гидравлически гладких труб и зоне смешанного трения турбулентного режима. Выполнена апробация методики путем расчета параметров самотечных участков горного участка нефтепровода "Дружба". Установлено, что с высокой степенью достоверности можно описать экспоненциальной функцией центральный угол заполнения сечения трубопровода от затраты и режима движения нефти на самотечных участках нефтепровода.*

Ключевые слова: нефтепровод, самотечный участок, степень заполнения сечения трубы, гидравлический наклон, безнапорный поток жидкости.

*The analytical dependences of the gravity section profile filling degree onto flow and oil movement mode in trunk oil pipelines have been developed with the help of the theoretical studies and mathematical modeling. The dependencies cover the possible range of Reynolds numbers in the area of hydraulically smooth pipes and mixed friction of turbulent flow. The methods were tested by calculating the parameters of the mountain area gravity sections of the Druzhba pipeline. It has been established that with the high degree of certainty it is possible to describe the central angle of the pipeline section pack depending on the oil flow and operating condition on the gravity-flowing pipeline part by means of exponential function.*

Keywords: oil pipeline, gravity section, pipe profile filling degree, hydraulic inclination, free-flow stream of fluid.

**Вступ.** Експлуатація магістральних нафтопроводів і нафтопродуктопроводів з пересіченим профілем траси часто ускладнюється наявністю ділянок з безнапірним (самопливним) рухом нафти або нафтопродуктів. На цих ділянках транспортований продукт рухається неповним перерізом під дією сили тяжіння за тиску меншого від атмосферного.

Як зазначено у роботах [1,2], місце формування самопливних ділянок на трасі, їх довжина, ступінь заповнення перерізу труби транспортованим продуктом не є сталими величинами, а змінюються залежно від завантаження трубопроводу і режиму руху нафти або нафтопродукту.

Прогнозування режимних параметрів самопливних ділянок має важливе практичне значення для складання матеріального балансу нафти або нафтопродуктів у кожний момент часу експлуатації трубопроводу. На сьогодні як вітчизняними [1,2,3,4], так і зарубіжними вченими [5,6,7,8] розроблені переважно графічні методи визначення кількості, місця положення та довжини самопливних ділянок. Вони є незручними для практичного застосування, недо-

статньо точними і не можуть бути закладені у алгоритми комп'ютерних розрахунків режимів роботи трубопроводів.

У роботі [2] нами запропоновано методику, яка дає змогу для довільного профілю траси трубопроводу аналітичним шляхом визначити кількість і положення самопливних ділянок, знайти їх довжину та ступінь заповнення перерізу трубопроводу. Методика передбачає визначення методом ітерацій величини площі перерізу труби, заповненої рідиною, за якої витрата рідини на самопливній ділянці дорівнює заданій витраті на напірній ділянці. У рамках ітерації необхідним є виконання значної кількості проміжних обчислень: площі перерізу труби, гідравлічного радіуса, швидкості руху рідини на самопливній ділянці, числа Рейнольдса, коефіцієнта Шезі тощо.

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є розробка математичних моделей для розрахунку ступеня заповнення перерізу самопливних ділянок від витрати та режиму руху нафти в магістральних нафтопроводах.

У ході досліджень вирішувались такі завдання:

1) виявлення взаємозв'язку між ступенем заповнення самопливних ділянок нафтопроводу і величиною витрати та режиму руху нафти в трубопроводі;

2) розроблення аналітичних залежностей та програмного забезпечення для розрахунку ступеня заповнення перерізу самопливних ділянок від витрати та режиму руху нафти в магістральних нафтопроводах;

3) апробація розроблених математичних моделей на прикладі однієї з експлуатаційних ділянок вітчизняного нафтопроводу із самопливними ділянками.

**Об'єкт дослідження** – гідродинамічні процеси на напірних і безнапірних ділянках рельєфних магістральних нафтопроводів.

**Предмет дослідження** – рельєфні магістральні нафтопроводи із самопливними ділянками.

**Методи дослідження** – математичне моделювання параметрів роботи магістральних нафтопроводів із самопливними ділянками з використанням комп'ютерних технологій.

Методика, що пропонується нижче, дає змогу визначити величину ступеня заповнення перерізу труби самопливної ділянки як функцію витрати і режиму руху рідини в трубопроводі.

У випадку перекачування нафти або нафтопродуктів за турбулентного режиму у зоні гідравлічного гладких труб гідравлічний нахил на напірних ділянках трубопроводу може бути знайдений за формулою Лейбензона

$$i_0 = \frac{2^{3-2m} A \cdot v^m Q^{2-m}}{\pi^{2-m} g \cdot D^{5-m}}, \quad (1)$$

де  $A, m$  – коефіцієнти режиму руху у формулі Блазіуса для коефіцієнта гідравлічного опору;

$g$  – прискорення сили тяжіння;

$v$  – розрахункова кінематична в'язкість транспортованої рідини;

$Q$  – об'ємна витрата транспортованої рідини;

$D$  – внутрішній діаметр трубопроводу.

Для самопливної ділянки трубопроводу одержимо залежність, аналогічну формулі Лейбензона. Вихідне рівняння має вигляд

$$i_c = \lambda_c \cdot \frac{1}{8R_c g} \cdot \frac{Q^2}{S_c^2}, \quad (2)$$

де  $\lambda_c$  – коефіцієнт гідравлічного опору на самопливній ділянці;

$R_c$  – гідравлічний радіус самопливної ділянки;

$S_c$  – площа перерізу труби, яка заповнена транспортованим продуктом на самопливній ділянці.

Після підстановки у формулу (2) аналітичних виразів для площі перерізу  $S_c$ , гідравлічного радіуса  $R_c$ , числа Рейнольдса і коефіцієнта гідравлічного опору  $\lambda_c$ , які наведено у роботі [3], та виконання математичних перетворень одержуємо таку формулу для гідравлічного нахилу на самопливній ділянці у випадку руху рідини в зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму

$$i_c = \frac{2^{5-3m} A \cdot v^m Q^{2-m}}{g \cdot D^{5-m}} \cdot \frac{\varphi^{m+1}}{(\varphi - \sin \varphi)^3}, \quad (3)$$

де  $\varphi$  – центральний кут, під яким заповнено рідиною частину перерізу труби на самопливній ділянці [2].

Із формули (3) випливає, що за відомої витрати транспортованої рідини величина гідравлічного нахилу на самопливній ділянці є складною функцією кута  $\varphi$ , значення якого повністю характеризує ступінь заповнення рідиною перерізу труби.

З енергетичної точки зору для самопливної ділянки трубопроводу значення гідравлічного нахилу дорівнює величині геометричного нахилу  $i_{геом}$

$$i_c = i_{геом}, \quad (4)$$

де

$$i_{геом} = \frac{z_1 - z_2}{l_c}, \quad (5)$$

де  $z_1, z_2$  – геодезична позначка початку і кінця самопливної ділянки трубопроводу відповідно;

$l_c$  – геометрична довжина самопливної ділянки.

Уведемо поняття коефіцієнта  $\gamma$ , що характеризує інтенсивність втрати енергії транспортованої рідини на самопливній ділянці

$$\gamma = \frac{i_{геом}}{i_0}. \quad (6)$$

Вираз (6) з урахуванням формул (1) і (3) набуває вигляду

$$\gamma = \frac{\alpha^{m+1}}{\left[ \alpha - \frac{\sin(2\pi\alpha)}{2\pi} \right]^3}, \quad (7)$$

де

$$\alpha = \frac{\varphi}{2\pi}. \quad (8)$$

У ході проведення гідравлічних розрахунків трубопроводів відомою величиною є геометричний нахил на кожній самопливній ділянці і значення витрати транспортованого продукту. Методом ітерацій необхідно визначити величину кута  $\varphi$  (відносного кута  $\alpha$ ), за якого значення гідравлічного нахилу на самопливній ділянці збігається з його геометричним нахилом.

Оскільки реалізація методу послідовних наближень вимагає використання спеціально розробленого програмного забезпечення і застосування комп'ютерних технологій, доціль-

ним є розроблення математичних моделей, які дають змогу за відомого значення коефіцієнта  $\gamma$  визначити ступінь заповнення самопливної ділянки транспортованим продуктом.

Для вирішення зазначеної задачі нами розроблено програмне забезпечення і виконано багатоваріантні розрахунки режимів роботи модельного трубопроводу із самопливною ділянкою для діапазону чисел Рейнольдса від 10000 до 200000 та діапазону геометричних нахилів до 300 м/км.

Результати математичного моделювання параметрів роботи самопливних ділянок оформлені у вигляді графічних залежностей (див. рисунки 1-4).

Математичне опрацювання графічних залежностей методом найменших квадратів дало змогу одержати такі формули:

- якщо  $\gamma \geq 8$

$$\alpha = \exp(1,539 \cdot 10^{-3} \ln^2 \gamma - 0,1624 \ln \gamma - 0,5414), \quad (9)$$

- якщо  $1 \leq \gamma < 8$

$$\alpha = \exp(0,0551 \ln^2 \gamma - 0,3511 \ln \gamma - 0,3544), \quad (10)$$

- якщо  $0,87 \leq \gamma < 1$

$$\alpha = 0,8277 - \sqrt{0,1013\gamma - 0,088}, \quad (11)$$

або

$$\alpha = 0,8120 + \sqrt{0,2549\gamma - 0,2203}. \quad (12)$$

Розрахунки засвідчили, що максимальне відхилення результатів за спрощеними формулами (9)-(12) від результатів, одержаних за загальноприйнятими гідродинамічними залежностями, не перевищує 2 %, що знаходиться в межах точності інженерних обчислень.

Запропонована методика прогнозування параметрів роботи самопливних ділянок передбачає таку послідовність обчислень. За відомої витрати нафти за формулою (1) знаходять гідравлічний нахил на напірних ділянках трубопроводу  $i_0$ . Для кожної самопливної ділянки визначають за формулою (2) геометричний нахил  $i_{геом}$ . За формулою (3) обчислюють коефіцієнт  $\gamma$ , що характеризує інтенсивність втрат тиску рідини на самопливній ділянці.

Залежно від величини коефіцієнта  $\gamma$  вибирають одну із формул (9)-(12) і визначають величину відносного кута заповнення  $\alpha$ .

Центральний кут заповнення перерізу самопливної ділянки (рад) рідиною знаходять за формулою

$$\varphi = 2\pi\alpha. \quad (13)$$

Ступінь заповнення перерізу самопливної ділянки нафтою знаходять так

$$\sigma = \frac{\varphi - \sin \varphi}{2\pi}. \quad (14)$$

Швидкість руху нафти на безнапірній ділянці

$$w = \frac{4Q}{\pi D^2 \sigma}. \quad (15)$$

Число Рейнольдса для самопливної ділянки

$$Re_c = \frac{wD}{\nu} \cdot \left(1 - \frac{\sin \varphi}{\varphi}\right). \quad (16)$$

Об'єм нафти, що знаходиться на самопливній ділянці

$$V_c = \frac{\pi D^2}{4} \sigma \cdot l_c. \quad (17)$$

За значних витрат і малих значень кінематичної в'язкості транспортованої рідини її перекачування в трубопроводі може відбуватись у зоні змішаного тертя турбулентного режиму. Гідравлічний нахил для напірних ділянок трубопроводу за цих умов визначають за формулою

$$i_0 = \frac{8\lambda Q^2}{\pi^2 g D^5}, \quad (18)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору для напірних ділянок трубопроводу, функція числа Рейнольдса  $Re_0$  і шорсткості внутрішньої поверхні труб  $k_{ee}$  [3].

У випадку руху рідини в зоні змішаного тертя турбулентного режиму вихідне рівняння для самопливної ділянки (2) з урахуванням аналітичних виразів, наведених у роботі [3], можна подати у вигляді

$$i_c = \frac{32\lambda_c Q^2}{g D^5} \cdot \frac{\varphi}{(\varphi - \sin \varphi)^3}, \quad (19)$$

де  $\lambda_c$  – коефіцієнт гідравлічного опору для самопливних ділянок трубопроводу, функція числа Рейнольдса  $Re_0$ , шорсткості внутрішньої поверхні труб  $k_{ee}$  та відносного кута заповнення  $\alpha$ .

Для обчислення коефіцієнта гідравлічного опору застосуємо універсальну модифіковану формулу Колбрука:

- для напірних ділянок трубопроводу

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{2,51}{Re_0 \sqrt{\lambda}} + \frac{k_{ee}}{3,7D} \right), \quad (20)$$

- для безнапірних ділянок нафтопроводу

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_c}} = -2 \lg \left( \frac{2,51\alpha}{Re_0 \sqrt{\lambda_c}} + \frac{k_{ee}}{3,7D} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\sin(2\pi\alpha)}{2\pi}} \right). \quad (21)$$

Коефіцієнт  $\gamma$ , що характеризує інтенсивність втрати енергії транспортованої рідини на самопливній ділянці, для зони змішаного тертя турбулентного режиму набуває вигляду

$$\gamma = \frac{\lambda_c}{\lambda} \cdot \frac{\alpha}{\left[ \alpha - \frac{\sin(2\pi\alpha)}{2\pi} \right]^3}. \quad (22)$$

Для одержання математичних моделей, що дають змогу за відомого значення коефіцієнта  $\gamma$ , визначити ступінь заповнення самопливної ділянки транспортованим продуктом за розробленим програмним забезпеченням нами виконані багатоваріантні розрахунки режимів роботи

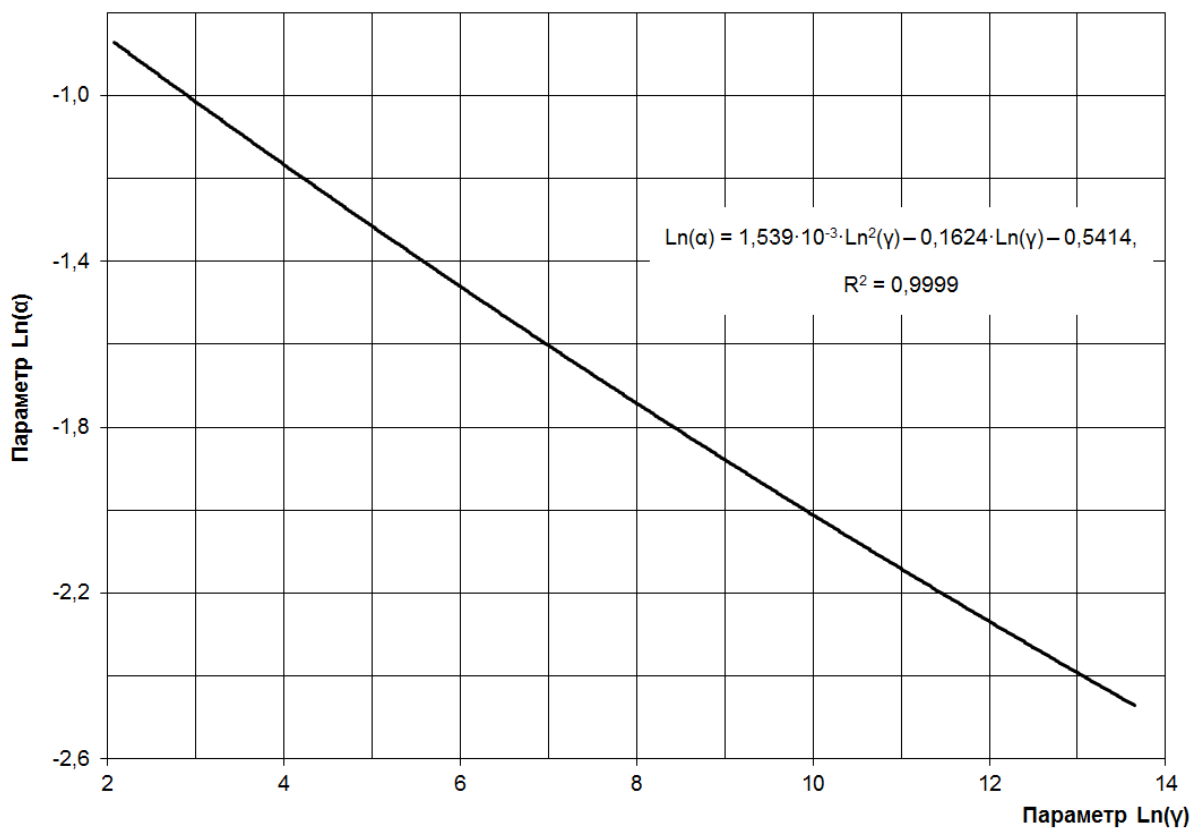


Рисунок 1 – Залежність величини відносного кута заповнення перерізу від коефіцієнта інтенсивності втрати енергії транспортованої рідини на самопливній ділянці ( $\gamma \geq 8$ )

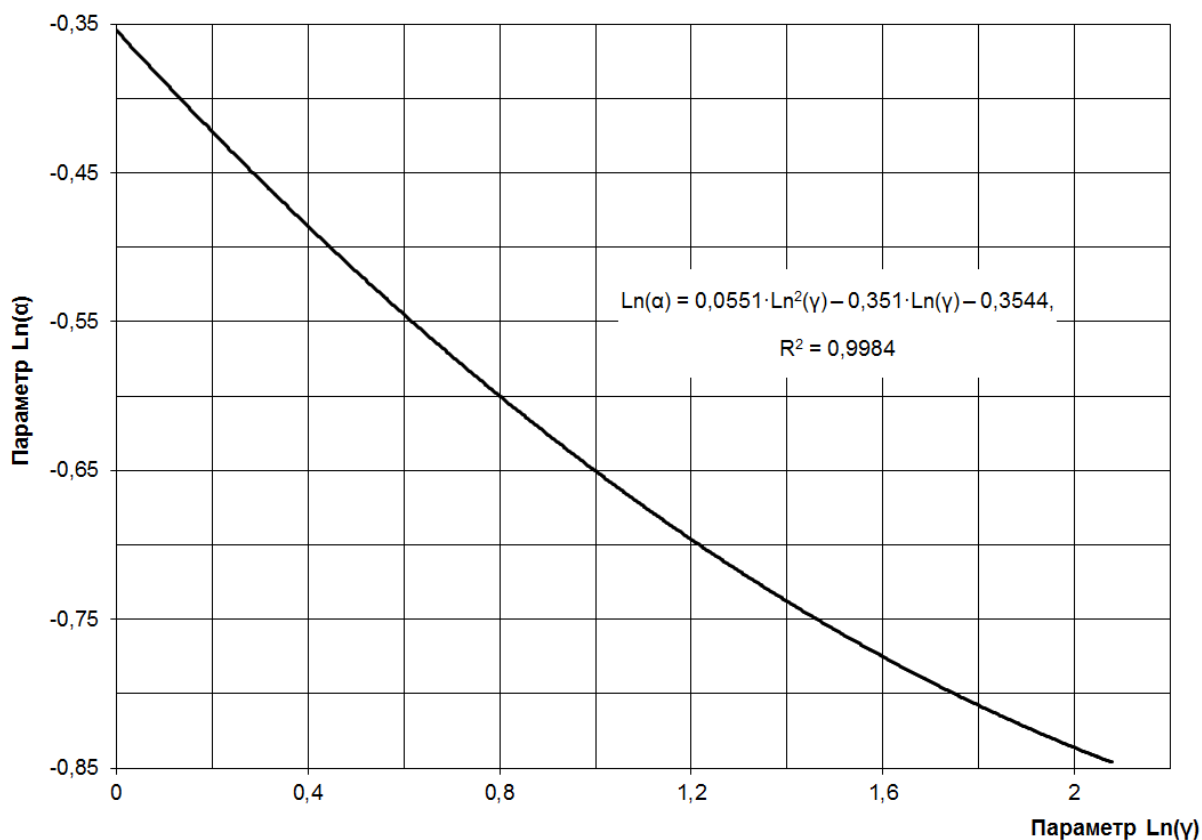


Рисунок 2 – Залежність величини відносного кута заповнення перерізу від коефіцієнта інтенсивності втрати енергії транспортованої рідини на самопливній ділянці ( $1 \leq \gamma < 8$ )

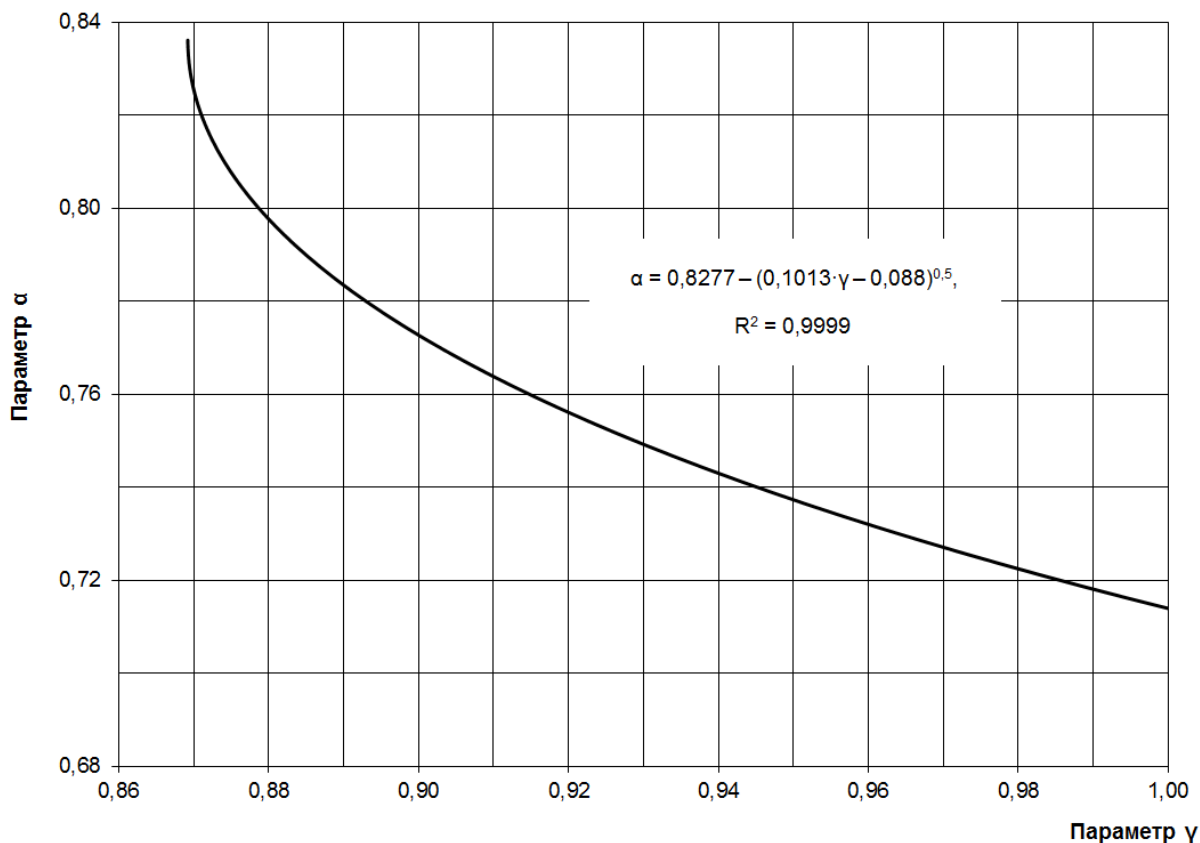


Рисунок 3 – Залежність величини відносного кута заповнення перерізу від коефіцієнта інтенсивності втрати енергії транспортованої рідини на самопливній ділянці ( $0,87 \leq \gamma < 1$ )

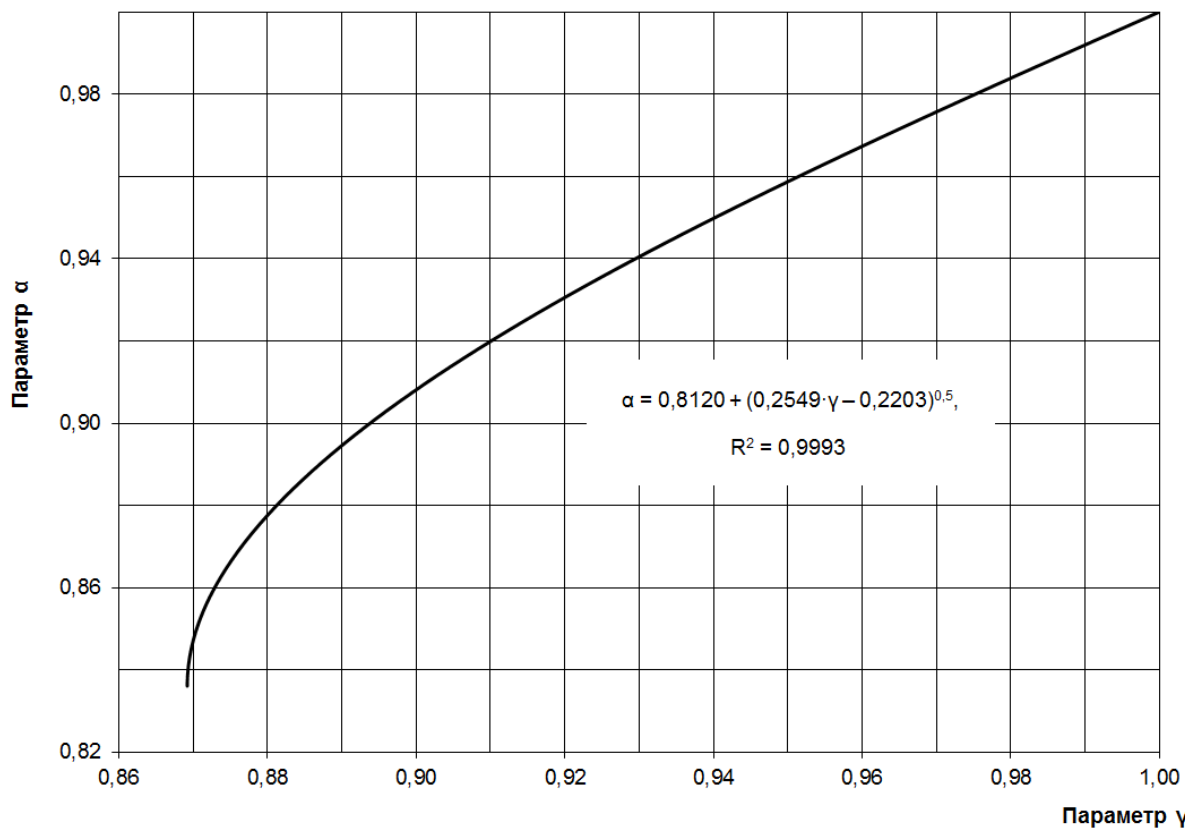


Рисунок 4 – Залежність величини відносного кута заповнення перерізу від коефіцієнта інтенсивності втрати енергії транспортованої рідини на самопливній ділянці ( $0,87 \leq \gamma < 1$ )

модельного трубопроводу із самопливною ділянкою для діапазону чисел Рейнольдса від 100000 до 300000 та діапазону геометричних нахилів до 300 м/км. Значення абсолютної еквівалентної шорсткості труб прийнято  $k_e = 0,2$  мм.

Математичне опрацювання графічних залежностей методом найменших квадратів дало змогу одержати такі формули:

$$\alpha = \exp(A \ln^2 \gamma + B \ln \gamma + C); \quad (23)$$

- якщо  $\gamma \geq 8$

$$A = 2,42 \cdot 10^{-15} \cdot Re_0^2 - 1,55 \cdot 10^{-9} \cdot Re_0 + 1,772 \cdot 10^{-3}; \quad (24)$$

$$B = -5,28 \cdot 10^{-14} \cdot Re_0^2 + 3,35 \cdot 10^{-8} \cdot Re_0 - 0,1576; \quad (25)$$

за виконання умови  $100000 \leq Re_0 < 233000$

$$C = -3,17 \cdot 10^{-13} \cdot Re_0^2 + 7,92 \cdot 10^{-8} \cdot Re_0 - 0,5368; \quad (26)$$

за виконання умови  $233000 \leq Re_0 \leq 300000$

$$C = 2,19 \cdot 10^{-8} \cdot Re_0 - 0,5406; \quad (27)$$

- якщо  $1 \leq \gamma < 8$

за виконання умови  $100000 \leq Re_0 < 128000$

$$A = 1,92 \cdot 10^{-12} \cdot Re_0^2 - 5,22 \cdot 10^{-7} \cdot Re_0 + 0,0914; \quad (28)$$

$$B = -5,97 \cdot 10^{-12} \cdot Re_0^2 + 1,48 \cdot 10^{-6} \cdot Re_0 - 0,440; \quad (29)$$

за виконання умови  $128000 \leq Re_0 < 172000$

$$A = -1,14 \cdot 10^{-16} \cdot Re_0^3 + 5,12 \cdot 10^{-11} \cdot Re_0^2 - 7,53 \cdot 10^{-6} \cdot Re_0 + 0,4194; \quad (30)$$

$$B = 2,38 \cdot 10^{-16} \cdot Re_0^3 - 1,06 \cdot 10^{-10} \cdot Re_0^2 + 1,52 \cdot 10^{-5} \cdot Re_0 - 1,068; \quad (31)$$

за виконання умови  $172000 \leq Re_0 \leq 300000$

$$A = 5,09 \cdot 10^{-13} \cdot Re_0^2 - 2,74 \cdot 10^{-7} \cdot Re_0 + 0,0928; \quad (32)$$

$$B = -1,46 \cdot 10^{-12} \cdot Re_0^2 + 7,92 \cdot 10^{-7} \cdot Re_0 - 0,4531; \quad (33)$$

за виконання умови  $100000 \leq Re_0 < 167000$

$$C = 1,64 \cdot 10^{-7} \cdot Re_0 - 0,3545; \quad (34)$$

за виконання умови  $167000 \leq Re_0 < 233000$

$$C = -1,82 \cdot 10^{-7} \cdot Re_0 - 0,2972; \quad (35)$$

за виконання умови  $233000 \leq Re_0 \leq 300000$

$$C = 1,62 \cdot 10^{-8} \cdot Re_0 - 0,3437. \quad (36)$$

Розрахунки засвідчили, що максимальне відхилення результатів за спрощеною формулою (23) від результатів, одержаних за загальноприйнятими гідродинамічними залежностями, не перевищує 2 %, що знаходиться в межах точності інженерних обчислень.

Методика прогнозування гідродинамічних параметрів самопливних ділянок у випадку перекачування нафти або нафтопродуктів у зоні змішаного тертя аналогічна наведеній вище методиці для зони гідравлічно гладких труб. Відмінність полягає у тому, що для визначення

відносного кута заповнення самопливної ділянки рідиною  $\alpha$  замість формул (9)–(12) застосовуються формули (18)–(36).

Виконана апробація запропонованої методики шляхом розрахунку параметрів самопливних ділянок другої черги нафтопроводу на ділянці Броди-Держжордон. Одержані результати для зони гідравлічно гладких труб і зони змішаного тертя наведено у таблицях 1 і 2 відповідно.

Аналіз таблиць 1 і 2 засвідчує, що запропонована методика дає змогу прогнозувати параметри роботи самопливних ділянок магістральних нафтопроводів і нафтопродуктопроводів з точністю, достатньою для інженерних розрахунків.

## Висновки

1. За результатами проведених теоретичних досліджень отримано аналітичні залежності ступеня заповнення перерізу безнапірних ділянок від витрати та режиму руху нафти в магістральних нафтопроводах. Максимальне відхилення результатів за отриманими формулами від результатів, одержаних за загальноприйнятими гідродинамічними залежностями, не перевищує 2 %.

2. Розроблені аналітичні залежності дають змогу розраховувати параметри роботи самопливних ділянок для зони гідравлічно гладких труб та зони змішаного тертя турбулентного режиму руху.

3. З високим ступенем достовірності можна описати експоненціальною функцією центральний кут заповнення перерізу трубопроводу від витрати та режиму руху нафти на самопливних ділянках нафтопроводу.

Наступним етапом досліджень буде дослідження впливу нестационарності потоку нафти на гідродинамічні параметри самопливних ділянок магістральних нафтопроводів.

## Література

1 Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М.В. Лурье. – М: Нефть и газ, 2003. – 325 с.

2 Григорський С.Я. Визначення положення та ступеня заповнення самопливних ділянок магістральних трубопроводів / С.Я. Григорський, М.Д. Середюк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – № 4 (45). – С. 198-209.

3 Середюк М.Д. Обґрунтування вибору математичних моделей для коефіцієнта гідравлічного опору в нафтопроводах / М.Д. Середюк, Н.В. Люта // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 3 (8). – С.103-108.

4 Мамедов А.И. Численный метод расчета движения жидкости в магистральном трубопроводе / А.И. Мамедов // Известия вузов. “Нефть и газ”. – 1984. – № 4. – С.59-62.

**Таблиця 1 – Результати розрахунку параметрів роботи самопливних ділянок на ділянці Броди – Держкордон (зона гідравлічно гладких труб турбулентного режиму)**

| Номер ділянки   | Геодезична позначка самопливної ділянки, м |         | Довжина самопливної ділянки, км | Фактичне значення параметрів роботи самопливних ділянок (традиційна методика) |              |                        | Значення параметрів роботи самопливних ділянок, розраховане за математичними моделями |              |                        | Похибка, %      |                |              |
|---|--|---------|---------------------------------|---|--------------|------------------------|---|--------------|------------------------|-----------------|----------------|--------------|
|   | початкова                                  | кінцева |                                 | $\varphi$ , град  | $\sigma$ , % | $V_s$ , м <sup>3</sup> | $\varphi$ , град  | $\sigma$ , % | $V_s$ , м <sup>3</sup> | $\delta\varphi$ | $\delta\sigma$ | $\delta V_s$ |
| Схема роботи насосних агрегатів 1п,2, $i_0 = 0,697 \cdot 10^{-3}$   |  |         |                                 |   |              |                        |   |              |                        |                 |                |              |
| 1   | 1014                                       | 857     | 2,50                            | 103,7   | 13,4         | 129,2                  | 104,0   | 13,5         | 130,2                  | 0,31            | 0,39           | 0,75         |
| 2   | 853  | 707     | 1,33                            | 95,8  | 10,8         | 55,4                   | 95,9  | 10,8         | 55,6                   | 0,06            | -0,05          | 0,30         |
| 3   | 691  | 600     | 0,63                            | 92,1  | 9,7          | 23,7                   | 92,1  | 9,7          | 23,6                   | -0,03           | -0,30          | -0,50        |
| 4   | 598  | 475     | 1,81                            | 102,5   | 12,9         | 90,5                   | 102,8   | 13,0         | 91,3                   | 0,28            | 1,01           | 0,86         |
| 5   | 450  | 165     | 3,81                            | 101,1   | 12,4         | 184,0                  | 101,4   | 12,6         | 185,2                  | 0,27            | 1,27           | 0,64         |
| Схема роботи насосних агрегатів 1п,1,2, $i_0 = 3,909 \cdot 10^{-3}$ |  |         |                                 |   |              |                        |   |              |                        |                 |                |              |
| 1   | 1014                                       | 874     | 2,22                            | 136,9   | 27,2         | 233,0                  | 135,0   | 26,3         | 225,6                  | -1,37           | -3,47          | -3,17        |
| 2   | 853  | 786     | 0,61                            | 125,6   | 21,9         | 51,9                   | 124,0   | 21,2         | 50,1                   | -1,31           | -3,07          | -3,43        |
| 3   | 691  | 611     | 0,56                            | 120,5   | 19,8         | 42,8                   | 119,0   | 19,2         | 41,5                   | -1,21           | -3,27          | -3,01        |
| 4   | 450  | 304     | 1,96                            | 133,2   | 25,4         | 192,1                  | 131,5   | 24,6         | 186,7                  | -1,28           | -3,12          | -2,82        |

**Таблиця 2 – Результати розрахунку параметрів роботи самопливних ділянок на ділянці Броди – Держкордон (зона змішаного тертя турбулентного режиму)**

| Номер ділянки   | Геодезична позначка самопливної ділянки, м |         | Довжина самопливної ділянки, км | Фактичне значення параметрів роботи самопливних ділянок (традиційна методика) |              |                        | Значення параметрів роботи самопливних ділянок, розраховане за математичними моделями |              |                        | Похибка, %      |                |              |
|---|--|---------|---------------------------------|---|--------------|------------------------|---|--------------|------------------------|-----------------|----------------|--------------|
|   | початкова                                  | кінцева |                                 | $\varphi$ , град  | $\sigma$ , % | $V_s$ , м <sup>3</sup> | $\varphi$ , град  | $\sigma$ , % | $V_s$ , м <sup>3</sup> | $\delta\varphi$ | $\delta\sigma$ | $\delta V_s$ |
| Схема роботи насосних агрегатів 1п,2, $i_0 = 0,697 \cdot 10^{-3}$   |  |         |                                 |   |              |                        |   |              |                        |                 |                |              |
| 1   | 1014                                       | 857     | 2,50                            | 103,7   | 13,4         | 129,2                  | 104,6   | 13,6         | 132,0                  | 0,82            | 1,77           | 2,13         |
| 2   | 853  | 707     | 1,33                            | 95,8  | 10,8         | 55,4                   | 96,5  | 11,0         | 56,6                   | 0,73            | 1,77           | 2,13         |
| 3   | 691  | 600     | 0,63                            | 92,1  | 9,7          | 23,7                   | 92,8  | 9,9          | 24,1                   | 0,73            | 1,79           | 1,59         |
| 4   | 598  | 475     | 1,81                            | 102,5   | 12,9         | 90,5                   | 103,3   | 13,2         | 92,6                   | 0,81            | 2,45           | 2,31         |
| 5   | 450  | 165     | 3,81                            | 101,1   | 12,4         | 184,0                  | 101,9   | 12,7         | 188,0                  | 0,83            | 2,79           | 2,15         |
| Схема роботи насосних агрегатів 1п,1,2, $i_0 = 3,909 \cdot 10^{-3}$ |  |         |                                 |   |              |                        |   |              |                        |                 |                |              |
| 1   | 1014                                       | 874     | 2,22                            | 136,9   | 27,2         | 233,0                  | 136,7   | 27,0         | 232,3                  | -0,17           | -0,60          | -0,29        |
| 2   | 853  | 786     | 0,61                            | 125,6   | 21,9         | 51,9                   | 126,0   | 22,1         | 52,3                   | 0,33            | 1,06           | 0,68         |
| 3   | 691  | 611     | 0,56                            | 120,5   | 19,8         | 42,8                   | 121,3   | 20,1         | 43,5                   | 0,65            | 1,46           | 1,74         |
| 4   | 450  | 304     | 1,96                            | 133,2   | 25,4         | 192,1                  | 133,3   | 25,4         | 192,9                  | 0,06            | 0,13           | 0,44         |

5 Zagarola M.V. Mean flow scalling of turbulent pipe flow / Zagarola M.V. // Journal of Princeton University – 1996. – №51(2) – P. 17-34.

6 Haaland S.E. Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe-flow / Haaland S.E. – Singapore: ASCE, 2008. – 62 p.

7 Cheng N.S. Formulas for friction factor in transitional regions / Cheng N.S. // Journal of Hydraulic Engineering. – 2008. – №134(9). – P. 157-162.

8 Donald W. A tutorial on pipe flow equations / W. Donald, J. Schroeder. – Pennsylvania, 2001. – P. 21-43.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
04.11.14

Рекомендована до друку  
професором **Грудзом В.Я.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Зайцевим Вал.В.**  
(Національний університет кораблебудування,  
імені адмірала Макарова, м. Миколаїв)