

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ТА СТУПЕНЯ ЗАПОВНЕННЯ САМОПЛИВНИХ ДІЛЯНОК МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

С.Я. Григорський, М.Д. Середюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,
e-mail: tzng@nung.edu.ua

Розроблено методику для прогнозування кількості самопливних ділянок і місця розташування їх на трасі довільного профілю, а також для визначення довжини, ступеня заповнення перерізу труби та об'єму рідини на кожній самопливній ділянці трубопроводу. Розрахунки базуються на методі послідовних наближень з використанням рівнянь усталеного напірного та безнапірного руху рідини в трубопроводі.

Створено комп'ютерну програму, яка дає можливість для довільного профілю траси нафтопроводу визначити кількість, положення та параметри самопливних ділянок.

Методика і програмне забезпечення апробовані у ході виконання гідравлічних розрахунків нафтопроводу з пересіченим профілем траси. Доведено, що кількість самопливних ділянок, їх розташування на трасі, довжина, ступінь заповнення перерізу труби нафтою суттєво залежать від завантаженості нафтопроводу, тобто від витрати у ньому нафти. Визначено максимальну витрату рідини, за якої самопливні ділянки на трасі трубопроводу відсутні.

Побудовано графічні залежності ступеня заповнення, центрального кута перерізу, довжини та об'єму нафти на самопливних ділянках залежно від витрати. Визначено годинну витрату нафти, за якої на самопливних ділянках перебуває максимальний об'єм нафти.

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

Разработана методика, позволяющая прогнозировать количество самотечных участков и место расположения их на трассе произвольного профиля, а также определять длину, степень заполнения сечения трубы и объем жидкости на каждом самотечном участке трубопровода. Расчеты базируются на методе последовательных приближений, с использованием уравнений установившегося напорного и безнапорного движения жидкости в трубопроводе.

Создана компьютерная программа, которая дает возможность для произвольного профиля трассы нефтепровода определять количество, положение и параметры самотечных участков.

Методика и программное обеспечение апробированы при гидравлическом расчете нефтепровода с пересеченным профилем трассы. Доказано, что количество самотечных участков, их расположение на трассе, длина, степень заполнения сечения трубы нефтью существенно зависят от загрузки нефтепровода, то есть от расхода в нем нефти. Определен максимальный расход жидкости, при котором самотечные участки на трассе трубопровода отсутствуют.

Построены графические зависимости степени заполнения, центрального угла продольного сечения, длины и объема нефти на самотечных участках в зависимости от расхода жидкости. Определен часовой расход нефти, при котором на самотечных участках находится максимальный объем нефти.

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

There has been developed the technique which enables to predict a certain number of gravity sections and their placement on the pipeline for spontaneous profile route and to determine the length, level of infilling a tube cross-section and fluid volume at each gravity section. The calculations are made by progressive approximation using equations of the fixed pressure and free flow of the fluid inside the pipeline.

The software has been created which allows to determine a quantity, condition and characteristics of the gravity sections.

The technique and software have been used in the process of making hydraulic calculations for an oil pipeline which has a rugged relief of the route. It has been stated that the number of gravity sections, their disposition on the route, the length, level of the tube cross-section infilling with oil greatly depend on the work-load of the oil pipeline, i.e. on the consumption of oil in the pipeline. The maximum fluid consumption has been estimated when there are no gravity sections at the pipeline route.

The graphical dependences of degree of infilling, central corner of a cut, length and volume of oil at the gravity sections due to its consumption have been shown. The hourly oil consumption has been determined when there is a maximum volume of oil at the gravity sections.

Keywords: gravity section, degree of infilling of a duct cut, hydraulic bevel, free flow of fluid, analytical method.

У ході експлуатації магістральних нафтопроводів та нафтопродуктопроводів з пересіченим профілем траси нерідко реалізуються режими перекачування з так званою перевальною точкою. Від перевальної точки до кінця ділянки трубопроводу нафта або нафтопродукт можуть

бути транспортовані за заданої витрати без додаткових витрат енергії за рахунок нахилу траси, тобто різниці геодезичних позначок перевальної і кінцевої її точок.

У випадку виникнення перевальної точки за нею за ходом руху транспортованого про-

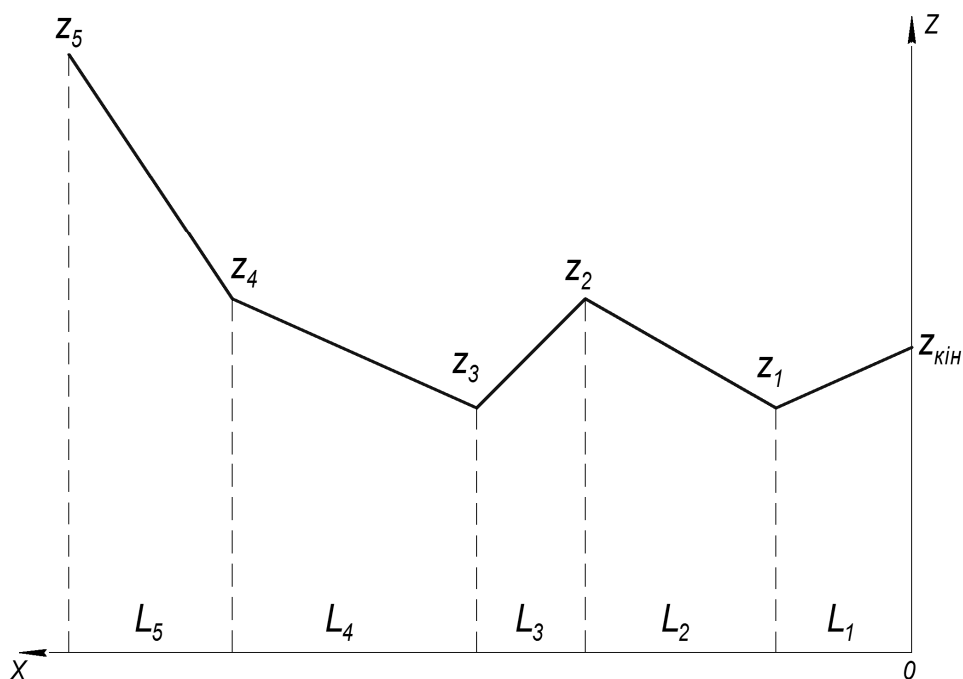


Рисунок 1 – Довільний профіль траси нафтопроводу

дукту відповідно до особливостей профілю траси і режиму роботи трубопроводу формуються самопливні ділянки. На самопливних ділянках транспортований продукт рухається неповним перерізом під дією сили тяжіння. Тиск в парогазовій порожнині залишається практично сталим і рівним пружності насиченої пари транспортованого продукту за температури перекачування. Різниця напорів між початком і кінцем самопливної ділянки дорівнює різниці геодезичних позначок цих перетинів.

Стационарні самопливні ділянки можуть існувати тільки на низхідних ділянках трубопроводу. Початок самопливної ділянки завжди збігається з однією із вершин профілю траси трубопроводу.

Лінія гідравлічного нахилу на самопливній ділянці проходить паралельно профілю траси на віддалі, що залежить від пружності насиченої пари і густини нафти або нафтопродукту.

Витрата рідини на самопливній ділянці за стаціонарного режиму дорівнює витраті на заповнених ділянках трубопроводу. Швидкість руху рідини на самопливній ділянці більша за швидкість на напірних ділянках.

Експлуатація самопливних ділянок трубопроводів має ряд особливостей. Ось чому для оперативного контролю процесу перекачування нафти або нафтопродуктів необхідно знати положення самопливних ділянок, їх довжину, а, основне, ступінь заповнення рідиною. Останнє є дуже важливим для складання матеріального балансу нафти або нафтопродуктів у кожний момент часу експлуатації трубопроводу.

На сьогодні як вітчизняними, так і зарубіжними вченими [1, 2] пропонуються графічні методи визначення кількості, місця розташування та довжини самопливних ділянок. Такі методи незручні, недостатньо точні і не можуть бути закладені у сучасні алгоритми комп'ютер-

них розрахунків режимів роботи трубопроводів. Для розрахунку ступеня заповнення перерізу самопливної ділянки здебільшого пропонуються емпіричні залежності, адекватність і сфера практичного застосування яких недостатньо обґрунтовані. Також не вказано, яку точність забезпечують ці залежності.

Нижче пропонується методика, що базується на класичних гідродинамічних підходах і дає змогу для довільного профілю траси трубопроводу (рисунок 1) аналітичним шляхом визначити кількість і положення самопливних ділянок, знайти їх довжину та ступінь заповнення перерізу трубопроводу. За допомогою даної методики можна провести дослідження кількості самопливних ділянок, їх довжини, ступеня заповнення перерізу труби від режиму руху нафти в трубопроводі.

Вихідні дані для розрахунку такі:

- розрахункова густина транспортованого продукту;
- розрахункова кінематична в'язкість транспортованого продукту;
- пружність насичених парів транспортованого продукту за температури перекачування;
- годинна витрата транспортованого продукту;
- внутрішній діаметр трубопроводу;
- абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труби;
- кількість висхідних та низхідних ділянок трубопроводу;
- масив довжин висхідних та низхідних ділянок трубопроводу згідно із профілем траси;
- масив геодезичних позначок початку і кінця висхідних та низхідних ділянок трубопроводу.

У методиці та обчислювальному алгоритмі позначимо індексом i номер і параметри дові-

льної ділянки трубопроводу. Відлік ділянок виконуємо з кінця трубопроводу.

Для позначення номера і параметрів самопливних ділянок трубопроводу використаємо індекс j . Відлік самопливних ділянок також виконується з кінця трубопроводу.

Знаходимо різницю геодезичних позначок початку і кінця кожної ділянки трубопроводу

$$\Delta z_i = z_1 - z_{i-1} \quad (1)$$

де z_i – геодезична позначка початку i -ої ділянки трубопроводу;

Для першої з кінця ділянки маємо

$$z_{i-1} = z_{кин} \quad (2)$$

де $z_{кин}$ – геодезична позначка кінця трубопроводу.

Визначаємо геометричний нахил кожної ділянки трубопроводу

$$I_{geom_i} = \frac{\Delta z_i}{L_i} \quad (3)$$

де L_i – довжина i -ої ділянки трубопроводу.

Виконуємо гідравлічний розрахунок напірної частини трубопроводу. Знаходимо секундну витрату Q та швидкість руху рідини w . Обчислюємо число Рейнольдса Re для напірних ділянок. Коефіцієнт гідравлічного опору нафтопроводу знаходимо за методикою, що запропонована нами у роботі [3]. Ця методика передбачає застосування модифікованої формули Колбрука за чисел Рейнольдса, що перевищують границю адекватності використання загальноприйнятої формули Блазіуса.

Визначаємо гідравлічний нахил на напірних ділянках трубопроводу за формулою

$$I = \lambda \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

де D – внутрішній діаметр трубопроводу;
 g – прискорення сили тяжіння.

Знаходимо віддаль від кінця трубопроводу до початку кожної висхідної чи низхідної ділянки трубопроводу

$$L_{нк_i} = \sum_{j=1}^i L_j \quad (5)$$

Досліджуємо профіль траси на наявність самопливних ділянок. Для цього вводиться лінійна координата x , яка відраховується від кінця трубопроводу. Спочатку задаються значенням

$$x = \Delta x \quad (6)$$

де Δx – крок зміни довжини трубопроводу.

Якщо для будь-якої ділянки виконується умова

$$\Delta z_i < 0 \quad (7)$$

то ця ділянка висхідна, тому на ній не може розпочинатись самопливний рух рідини. У такому випадку лінійна координата змінюється стрибкоподібно і приймаємо

$$x = L_{нк_i} \quad (8)$$

Далі лінійна координата змінюється відповідно до вибраного кроку

$$x = x + \Delta x \quad (9)$$

У процесі ітерацій для кожного кроку визначаються і порівнюються між собою величини гідравлічного напору рідини H і геодезичної позначки точки траси Z .

Рисунок 2 ілюструє методику визначення місцезнаходження першої і подальших самопливних ділянок на трасі трубопроводу. До моменту знаходження першої самопливної ділянки гідравлічний напір знаходимо за формулою

$$H = z_{кин} + h_{кин} + I \cdot x \quad (10)$$

де $h_{кин}$ – технологічно необхідний напір рідини у кінці трубопроводу.

Після знаходження положення першої самопливної ділянки гідравлічний напір з урахуванням тиску в парогазовій порожнині трубопроводу обчислюємо за формулою

$$H = z_{сн_j} + I \cdot (x - x_{сн_j}) + h_y \quad (11)$$

де $z_{сн_j}$ – геодезична позначка початку j -ої (з кінця трубопроводу) самопливної ділянки;

$x_{сн_j}$ – відстань від кінця трубопроводу до початку j -ої самопливної ділянки;

h_y – напір рідини у порожнині самопливної ділянки,

$$h_y = \frac{P_y}{\rho \cdot g} \quad (12)$$

P_y – пружність насиченої пари транспортованої рідини за температури перекачування;
 ρ – густина транспортованої рідини за температури перекачування.

Якщо лінійна координата знаходиться у межах протяжності i -ої ділянки висхідної чи низхідної ділянки, тобто виконується умова

$$l_{нк_{i-1}} < x < l_{нк_i} \quad (13)$$

то зведена геодезична позначка біжучої точки траси з урахуванням тиску в парогазовій порожнині трубопроводу визначається за формулою

$$Z_{зв} = z_{i-1} + \frac{z_i - z_{i-1}}{l_i} \cdot (x - l_{нк_{i-1}}) + h_y \quad (14)$$

Якщо різниця між гідравлічним напором і зведеною геодезичною позначкою точки траси перевищує задану точність розрахунків щодо напорів ε_1

$$|H - Z_{зв}| > \varepsilon_1 \quad (15)$$

то лінійна координата збільшується за умовою (9).

Якщо гідравлічний напір і геодезична позначка точки траси практично співпадають, то це свідчить про те, що кінець самопливної ділянки знайдено.

Параметри j -ої (з кінця трубопроводу) самопливної ділянки знаходимо так:

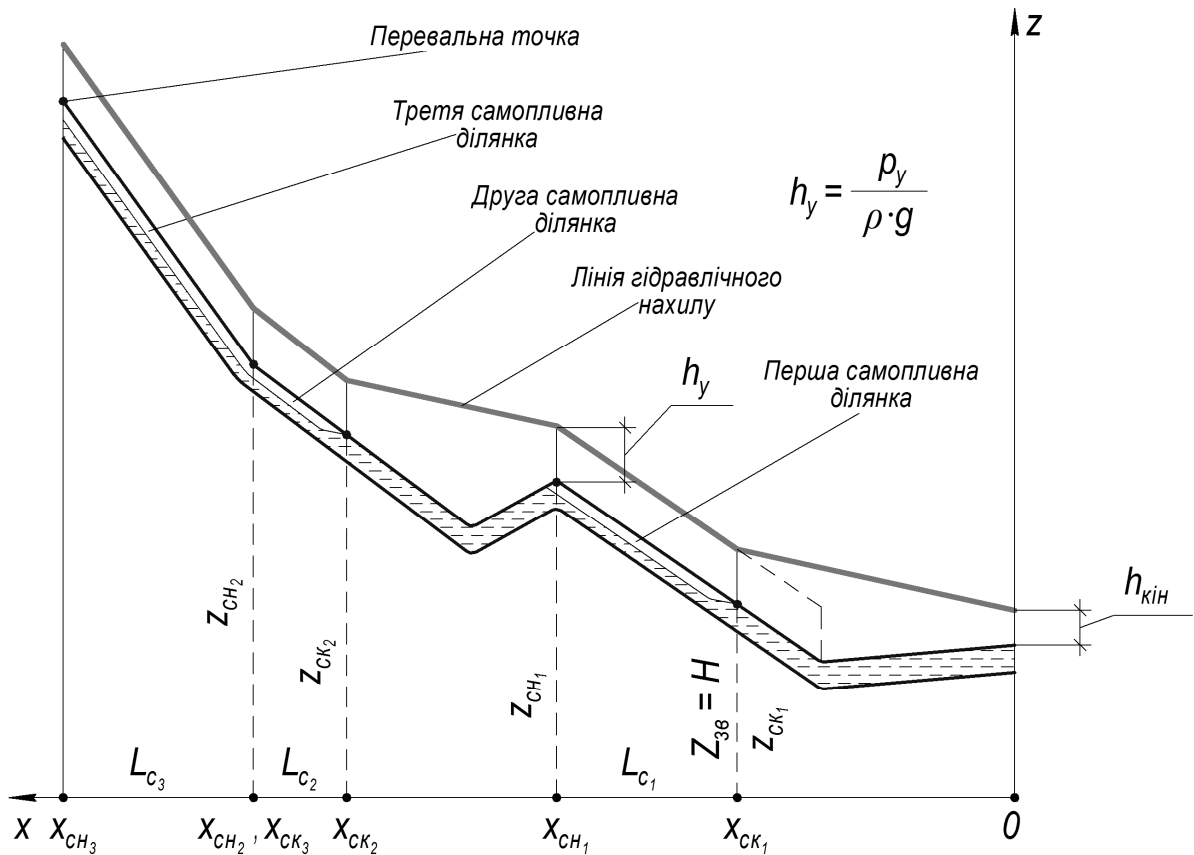


Рисунок 2 – Визначення положення самопливних ділянок на трасі нафтопроводу

– геодезична позначка початку ділянки

$$z_{CH_j} = z_i, \quad (16)$$

– геодезична позначка кінця ділянки

$$z_{CK_j} = Z_{38} - h_y, \quad (17)$$

– різниця геодезичних позначок початку і кінця ділянки

$$\Delta z_{C_j} = z_{CH_j} - z_{CK_j}, \quad (18)$$

– відстань від кінця трубопроводу до початку ділянки

$$x_{CH_j} = L_{нк_i}, \quad (19)$$

– відстань від кінця трубопроводу до кінця ділянки

$$x_{CK_j} = x, \quad (20)$$

– довжина самопливної ділянки

$$L_{C_j} = L_{нк_i} - x. \quad (21)$$

Після знаходження параметрів j -ої самопливної ділянки стрибкоподібно змінюємо лінійну координату за умовою (19).

Далі розрахунок проводиться аналогічно до тих пір, поки лінійна координата не стає рівною загальній довжині трубопроводу.

В результаті за заданої витрати рідини в трубопроводі одержуємо кількість самопливних ділянок, місце розташування їх на трасі та довжину (рисунок 2).

Наступним етапом розрахунків є визначення параметрів безнапірного руху і ступеня заповнення рідиною кожної самопливної ділян-

ки. Розрахунок виконується методом послідовних наближень. Розрахункову схему руху рідини на самопливній ділянці зображено на рисунку 3.

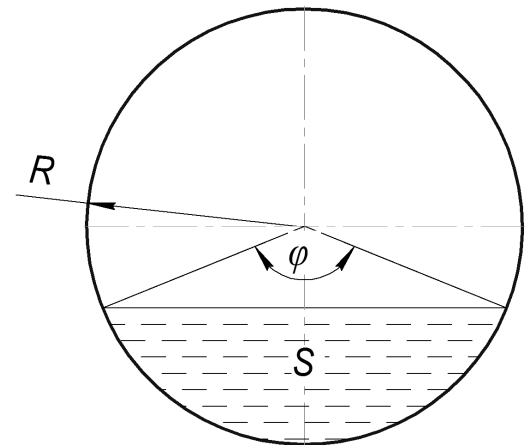


Рисунок 3 – Розрахункова схема руху рідини на самопливній ділянці трубопроводу

Задаємося величиною центрального кута φ за яким видно заповнену рідиною частину перерізу труби (рисунок 3)

$$\varphi_j = \varphi_n = 360^\circ = 2 \cdot \pi. \quad (22)$$

Знаходимо площу перерізу труби, заповнену рідиною

$$S_j = \frac{D^2}{8} \cdot (\varphi_j - \sin \varphi_j). \quad (23)$$

Обчислюємо величину гідравлічного радіуса за формулою

$$R_{zj} = \frac{D}{4} \cdot \left(1 - \frac{\sin \varphi_j}{\varphi_j} \right). \quad (24)$$

Визначаємо швидкість руху рідини і число Рейнольдса для умов кожної самопливної ділянки

$$w_{c_j} = \frac{Q}{S_j}, \quad (25)$$

$$Re_{c_j} = \frac{4 \cdot w_{c_j} \cdot R_{zj}}{\nu}, \quad (26)$$

де ν – розрахункова кінематична в'язкість транспортованої рідини.

Знаходимо коефіцієнт гідравлічного опору λ_{c_j} для умов самопливної ділянки. У розрахункові формули замість параметра Re підставляємо критерій Re_{c_j} , а замість діаметра D – гідравлічний радіус R_{z_j} , помножений на чотири.

Обчислюємо коефіцієнт Шезі за формулою

$$C_{шj} = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda_{c_j}}}. \quad (27)$$

Визначаємо розрахункову витрату рідини на самопливній ділянці за прийнятого кута φ

$$Q_{c_j} = S_{c_j} \cdot C_{шj} \cdot \sqrt{R_{zj} \cdot \frac{z_{снj} - z_{скj}}{L_{c_j}}}. \quad (28)$$

Якщо розрахункова витрата рідини на самопливній ділянці перевищує задану витрату рідини в трубопроводі більше, ніж необхідна точність розрахунку витрати ε_2 , то зменшуємо центральний кут за умовою

$$\varphi_j = \varphi_j - \Delta\varphi, \quad (29)$$

де $\Delta\varphi$ – крок зміни центрального кута.

Далі розрахунки повторюються, розпочинаючи з формули (23). У результаті виконання ітерацій за певного значення кута φ_j витрати транспортованої рідини на напірних і самопливних ділянках трубопроводу практично співпадуть. Цій ітерації відповідає знайдена площа перерізу труби, заповнена рідиною S_{c_j} на j -ій самопливній ділянці.

Знаходимо об'єм рідини на кожній самопливній ділянці за формулою

$$V_{c_j} = S_{c_j} \cdot L_{c_j}. \quad (30)$$

Сумарний об'єм транспортованої рідини на самопливних ділянках дорівнює

$$V_{сумc} = \sum_{j=1}^k V_{c_j}, \quad (31)$$

де k – кількість самопливних ділянок на трасі за заданого режиму роботи трубопроводу.

Знаходимо сумарну довжину самопливних ділянок за заданого режиму роботи трубопроводу

$$L_{сумc} = \sum_{j=1}^k L_{c_j}. \quad (32)$$

Довжина ділянок з напірним рухом рідини дорівнює

$$L_{сумн} = L - L_{сумc}, \quad (33)$$

де L – довжина трубопроводу.

Визначаємо об'єм рідини на напірній частині трубопроводу

$$V_{сумн} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L_{сумн}. \quad (34)$$

Загальний об'єм рідини в трубопроводі за заданого режиму перекачування нафти або нафтопродуктів становить

$$V_{mp} = V_{сумн} + V_{сумc}. \quad (35)$$

Описаний вище алгоритм реалізований нами у програмі Samopluv, яка дає змогу для будь-якого комплексу вихідних даних визначати кількість самопливних ділянок, їх довжину, координати (відносно профілю траси), ступінь заповнення, швидкість руху та об'єм рідини, що знаходиться у кожній із самопливних ділянок. Крім того, програма Samopluv дає змогу знаходити продуктивності трубопроводу, за яких відбувається зміна кількості самопливних ділянок та продуктивність, за якої на трасі трубопроводу будуть відсутні самопливні ділянки.

Наведемо приклад гідравлічного розрахунку нафтопроводу з урахуванням самопливних ділянок за програмою Samopluv. Профіль траси нафтопроводу зображений на рисунку 4. Вихідні дані для розрахунку зведено в таблиці 1 та 2 відповідно.

Результати розрахунку, які містять координати, довжини, ступінь заповнення, швидкість руху та об'єм нафти, який знаходиться на кожній із самопливних ділянок для різних значень об'ємної витрати, наведено в таблиці 3. Для даних значень витрати кількість самопливних ділянок зменшується з чотирьох до однієї.

Для заданого профілю траси нафтопроводу та фізичних властивостей нафти за програмою отримано, що максимальна кількість самопливних ділянок – чотири. Інтервали продуктивності трубопроводу, за яких відбувається зміна кількості самопливних ділянок, такі:

для $Q \leq 1452 \text{ м}^3/\text{год}$ – чотири самопливні ділянки;

для $1452 < Q \leq 1569 \text{ м}^3/\text{год}$ – три самопливні ділянки;

для $1569 < Q \leq 1750 \text{ м}^3/\text{год}$ – дві самопливні ділянки;

для $1750 < Q \leq 1817 \text{ м}^3/\text{год}$ – одна самопливна ділянка.

Очевидно, що за об'ємної витрати нафти в трубопроводі $Q > 1817 \text{ м}^3/\text{год}$ самопливні ділянки відсутні, а максимальна продуктивність

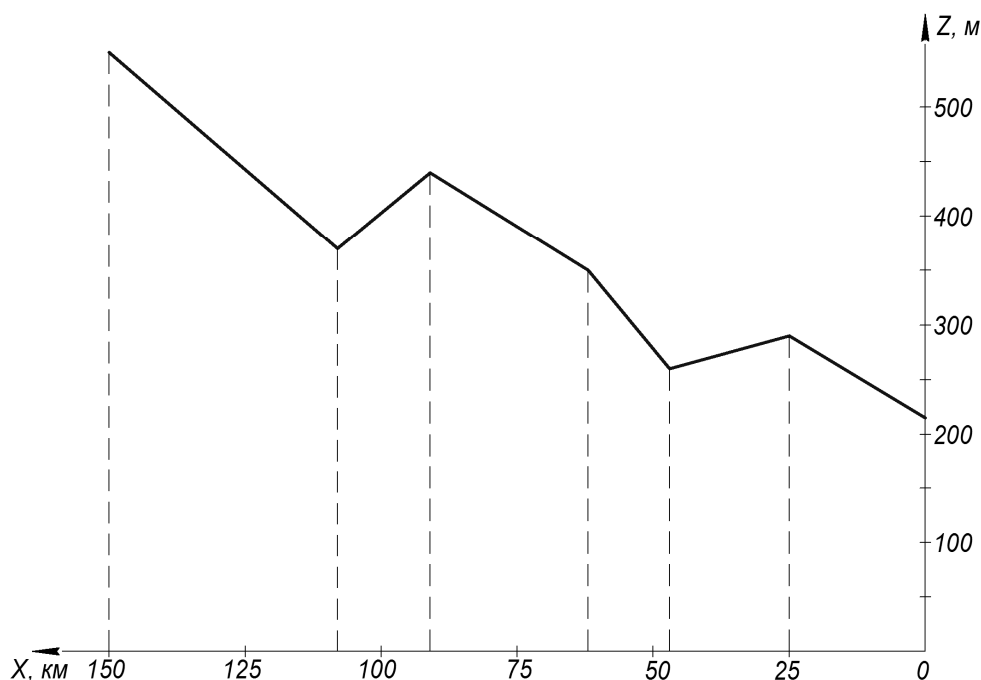


Рисунок 4 – Профіль траси нафтопроводу

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку самопливних ділянок нафтопроводу

Параметр	Значення параметра
Розрахункова густина нафти ρ , кг/м ³	870,0
Розрахункова кінематична в'язкість нафти $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	12,0
Абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труб k_e , мм	0,2
Технологічно необхідний напір у кінці нафтопроводу $h_{кін}$, м	20
Тиск насичених парів нафти за розрахункової температури P_y , МПа	0,05
Кількість ділянок нафтопроводу n	6
Геодезична позначка кінця трубопроводу $z_{кін}$, м	215

Таблиця 2 – Масив ділянок траси нафтопроводу

Номер ділянки	Внутрішній діаметр ділянки, м	Довжина ділянки, км	Геодезична позначка початку ділянки, м
1	0,7	42	550
2	0,7	17	370
3	0,7	29	440
4	0,7	15	350
5	0,7	22	260
6	0,7	25	290

обмежується допустимим тиском нафти на виході з нафтоперекачувальної станції.

За отриманими результатами будемо на профілі траси нафтопроводу лінію гідравлічного нахилу, нумеруємо ділянки нафтопроводу (розпочинаючи з кінцевого пункту), зображуємо самопливні ділянки та вказуємо їх довжину для різних значень об'ємної витрати нафти (рисунки 5-8).

Програма Samopluv, дає можливість методом математичного моделювання дослідити залежність параметрів самопливних ділянок від продуктивності трубопроводу. За програмою виконуємо багатоваріантні розрахунки режимів роботи нафтопроводу, для діапазону витрат нафти від 10 до 1817 м³/год.

Таблиця 3 – Результати розрахунку самопливних ділянок нафтопроводу

Номер самопливної ділянки	Ділянка нафтопроводу, на якій знаходиться самопливна ділянка	Координата самопливної ділянки, км		Довжина самопливної ділянки, км	Ступінь заповнення перерізу трубопроводу, %	Швидкість руху нафти на самопливній ділянці, м/с	Об'єм нафти на самопливній ділянці, тис.м ³
		початку	кінця				
$Q = 1200 \text{ м}^3/\text{год}$							
1	1	25	7,65	17,35	56,68	1,274	3,78
2	3	62	58,42	3,58	42,69	1,686	0,59
3	4	91	62,00	29,00	55,88	1,293	6,24
4	6	150	136,60	13,40	48,91	1,475	2,52
$L_{\text{суу}_c} =$				63,33	$V_{\text{суу}_c} =$		13,13
$Q = 1520 \text{ м}^3/\text{год}$							
1	1	25	11,41	13,59	68,26	1,321	3,57
2	4	91	65,84	25,16	67,26	1,34	6,51
3	6	150	147,58	2,42	58,64	1,538	0,55
$L_{\text{суу}_c} =$				41,16	$V_{\text{суу}_c} =$		10,63
$Q = 1660 \text{ м}^3/\text{год}$							
1	1	25	15,14	9,86	73,37	1,263	2,78
2	4	91	77,85	13,15	72,27	1,268	3,66
$L_{\text{суу}_c} =$				23,01	$V_{\text{суу}_c} =$		6,44
$Q = 1780 \text{ м}^3/\text{год}$							
1	4	25	21,62	3,38	77,85	1,331	1,01

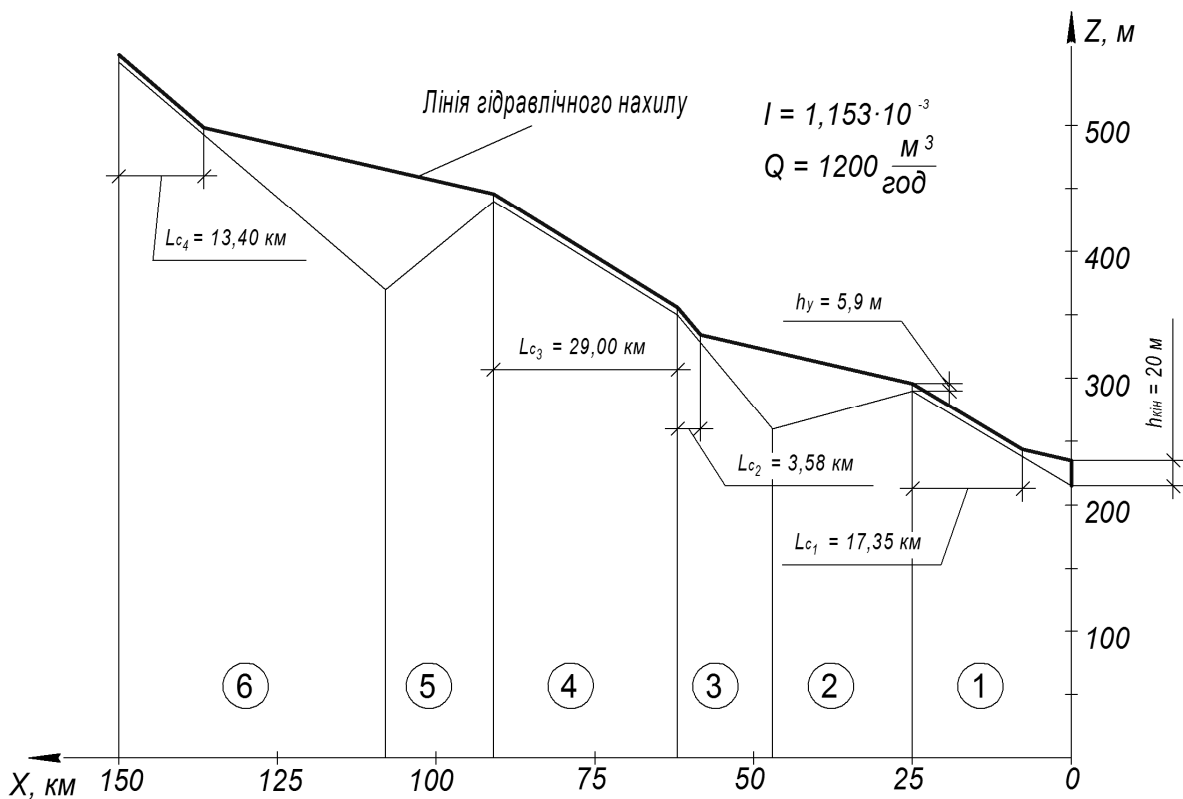


Рисунок 5 – Результати розрахунку самопливних ділянок нафтопроводу ($Q = 1200 \text{ м}^3/\text{год}$)

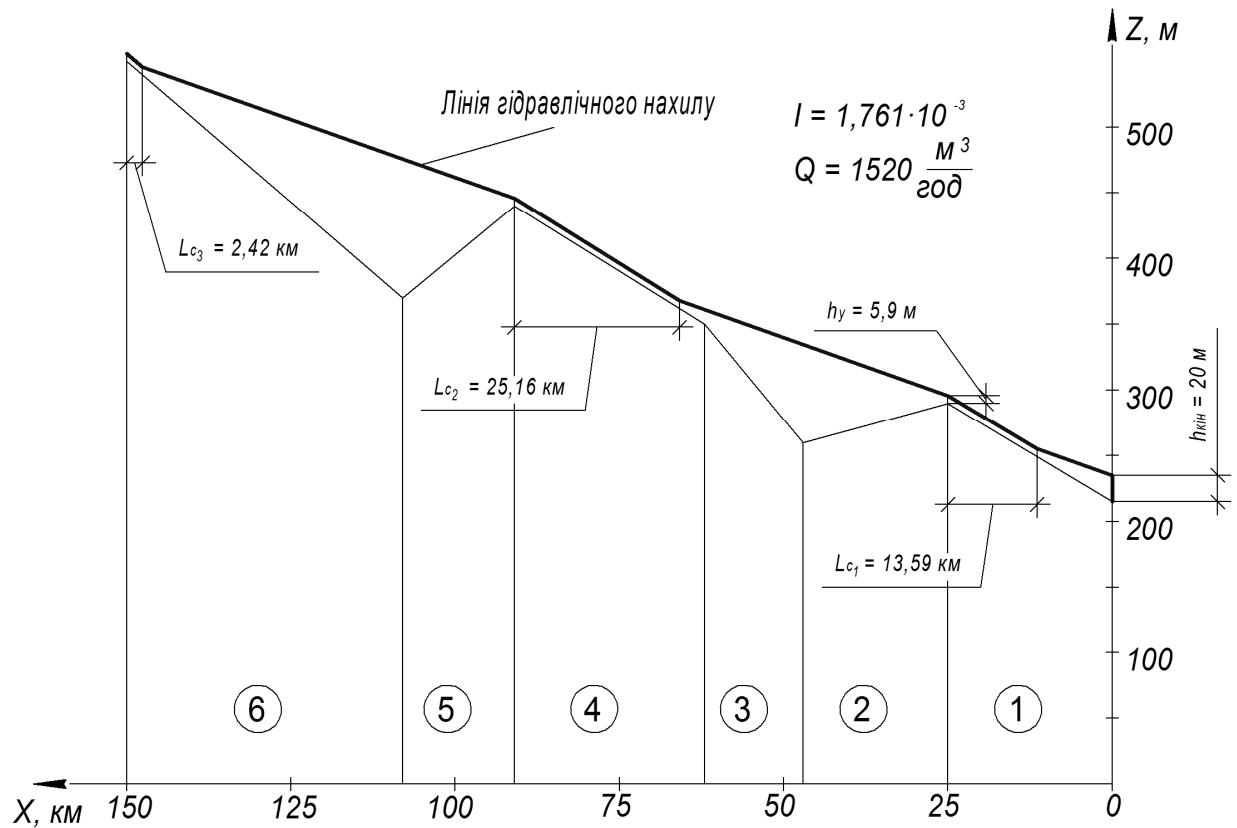


Рисунок 6 – Результати розрахунку самопливних ділянок нафтопроводу ($Q = 1520 \text{ м}^3/\text{год}$)

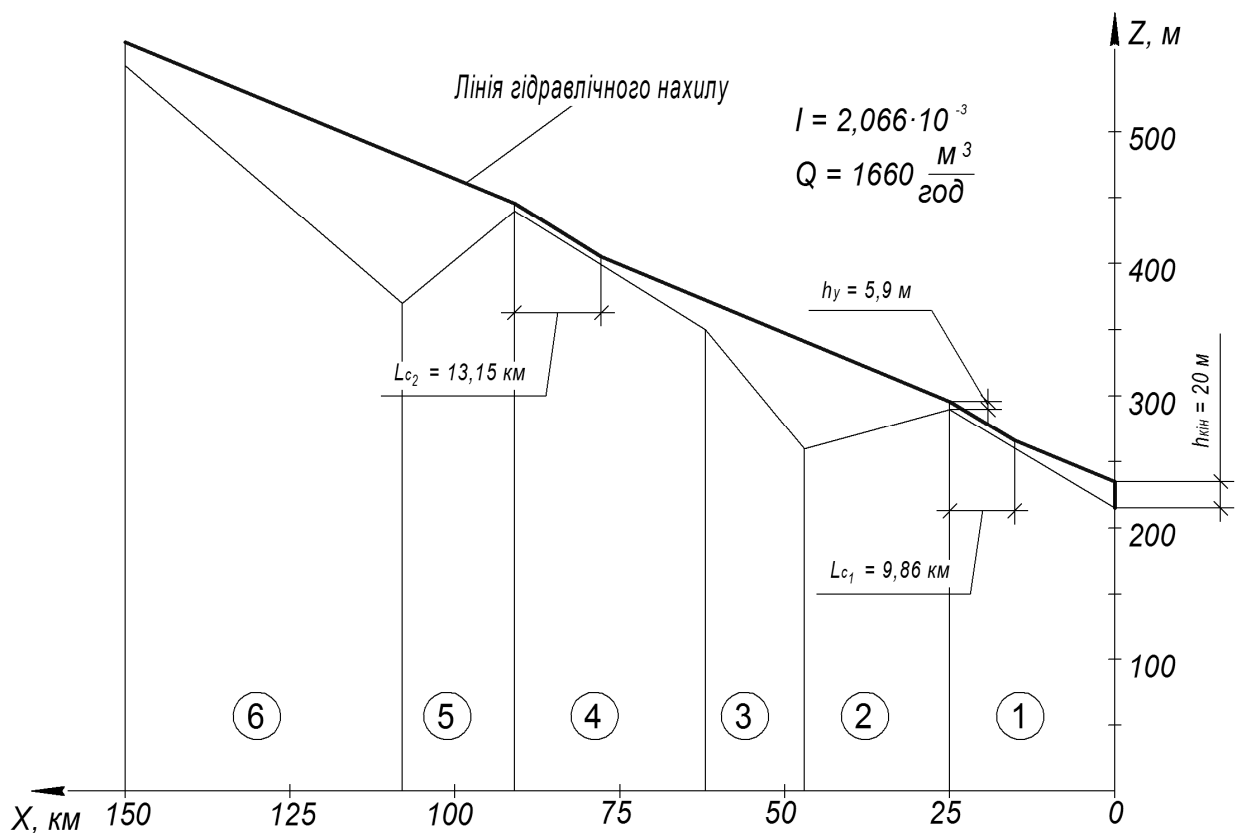


Рисунок 7 – Результати розрахунку самопливних ділянок нафтопроводу ($Q = 1660 \text{ м}^3/\text{год}$)

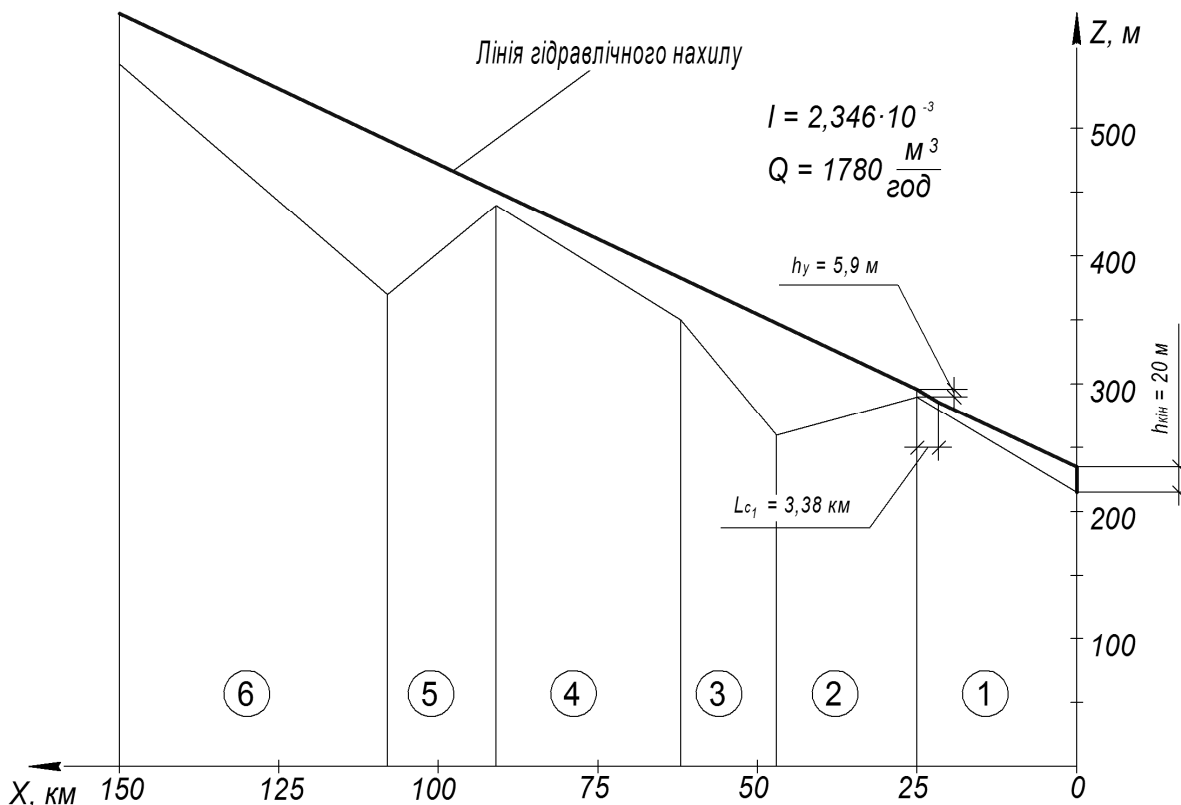


Рисунок 8 – Результати розрахунку самопливних ділянок нафтопроводу ($Q = 1780 \text{ м}^3/\text{год}$)

За одержаними результатами будемо графічні залежності ступеня заповнення, довжини та центрального кута перерізу кожної із самопливних ділянок від витрати нафти в трубопроводі (рисунки 9-11). Також будемо графічну залежність сумарного об'єму нафти на самопливних ділянках від продуктивності трубопроводу (рисунок 12).

З графіків, які зображені на рисунках 9 і 11, видно, що за значень витрати в трубопроводі більших $500 \text{ м}^3/\text{год}$ залежності ступеня заповнення перерізу трубопроводу та центрального кута від об'ємної витрати є лінійними. Для значень витрати менших $1452 \text{ м}^3/\text{год}$ (див. рис. 10) самопливна ділянка має довжину четвертої ділянки профілю траси нафтопроводу, яка становить 29 км. Максимальний сумарний об'єм нафти на самопливних ділянках становить $13,13 \text{ тис. м}^3$ (див. рисунок 12) для значення продуктивності $1220 \text{ м}^3/\text{год}$, що становить 28,0% від загального об'єму нафти в трубопроводі за даної витрати.

Також зазначимо, що ступінь заповнення перерізу нафтопроводу більший там, де ділянка проходить більш полого (див. рисунок 10), тобто чим менший геометричний нахил ділянки, тим більший ступінь заповнення перерізу трубопроводу. Відповідно чим більший геометричний нахил ділянки тим менша швидкість руху нафти на ній і навпаки.

Використовуючи Microsoft Excel виконуємо математичне моделювання отриманих графічних залежностей. Для опису обираємо таку

математичну модель, яка забезпечує високий ступінь достовірності (із коефіцієнтом детермінації k_d близьким до одиниці).

Математичні моделі ступеня заповнення перерізу, довжини, центрального кута заповнення перерізу самопливних ділянок залежно від безрозмірного числа Рейнольдса мають вигляд:

- для першої самопливної ділянки
 $\sigma = 2,524 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Re}^{0,7127}$, $k_d = 0,9992$;
 $L_c = -5,528 \cdot 10^{-9} \cdot \text{Re}^2 + 2,399 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Re} + 18,47$,
 $k_d = 0,9135$, $\varphi = 7,524 \cdot \text{Re}^{0,2998}$, $k_d = 0,9836$;
- для другої самопливної ділянки
 $\sigma = 2,136 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Re}^{0,7006}$, $k_d = 0,9997$;
 $L_c = -2,744 \cdot 10^{-9} \cdot \text{Re}^2 + 1,169 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Re} + 9,891$,
 $k_d = 0,9990$, $\varphi = 8,887 \cdot \text{Re}^{0,2691}$, $k_d = 0,9956$;
- для третьої самопливної ділянки
 $\sigma = 2,570 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Re}^{0,7092}$, $k_d = 0,9994$;
 $L_c = -1,154 \cdot 10^{-7} \cdot \text{Re}^2 + 1,333 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Re} - 355,0$,
 $k_d = 0,9993$, $\varphi = 7,997 \cdot \text{Re}^{0,2924}$, $k_d = 0,9876$;
- для четвертої самопливної ділянки
 $\sigma = 2,377 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Re}^{0,7036}$, $k_d = 0,9996$;
 $L_c = -6,854 \cdot 10^{-9} \cdot \text{Re}^2 + 1,033 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Re} + 24,98$,
 $k_d = 0,9948$, $\varphi = 8,645 \cdot \text{Re}^{0,2780}$, $k_d = 0,9933$.

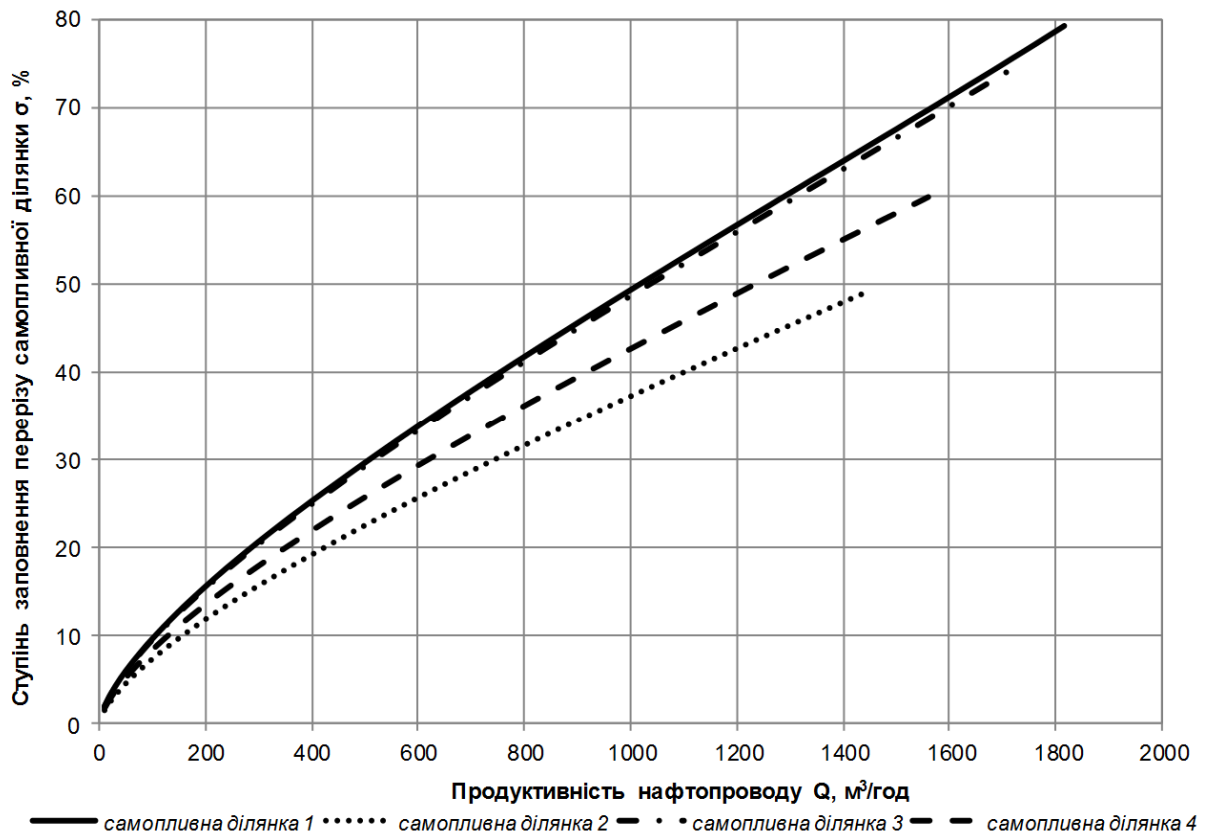


Рисунок 9 – Залежність ступеня заповнення самопливних ділянок від продуктивності трубопроводу

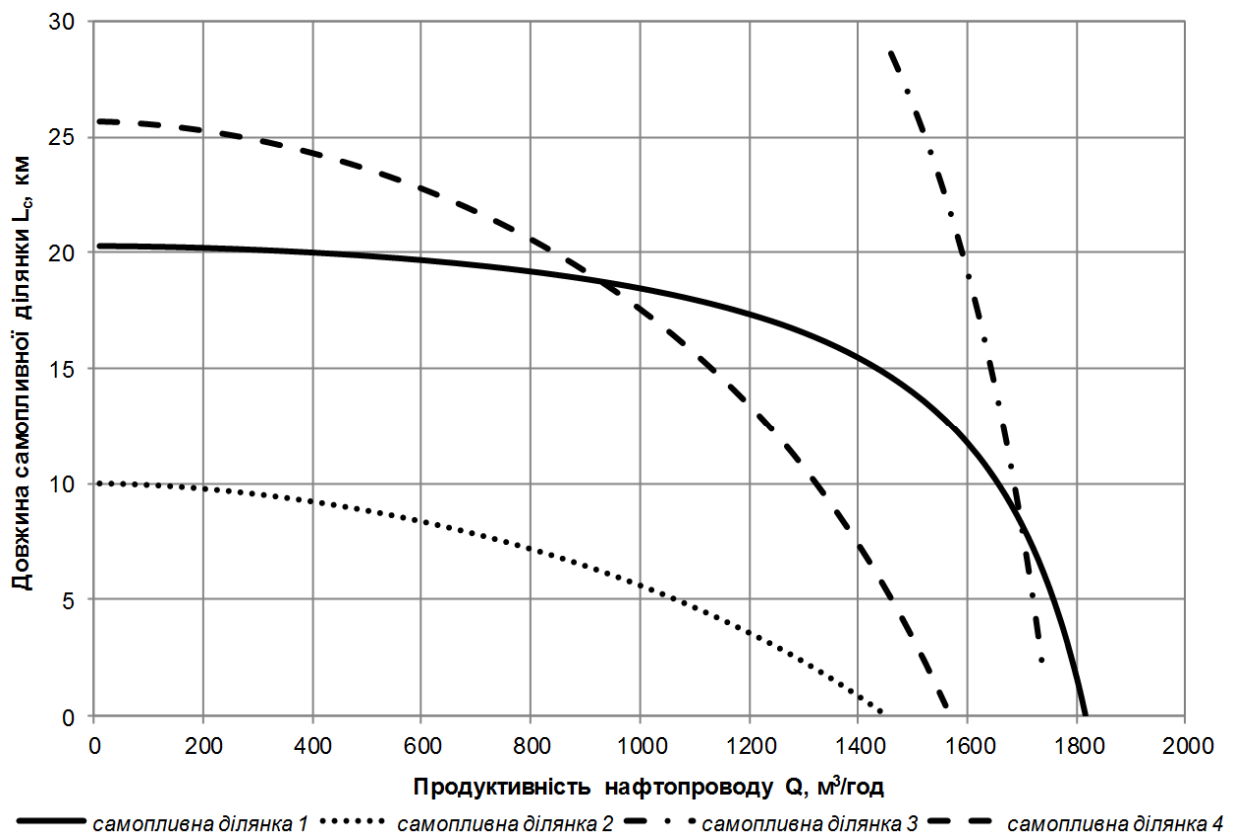


Рисунок 10 – Залежність довжини самопливних ділянок від продуктивності трубопроводу

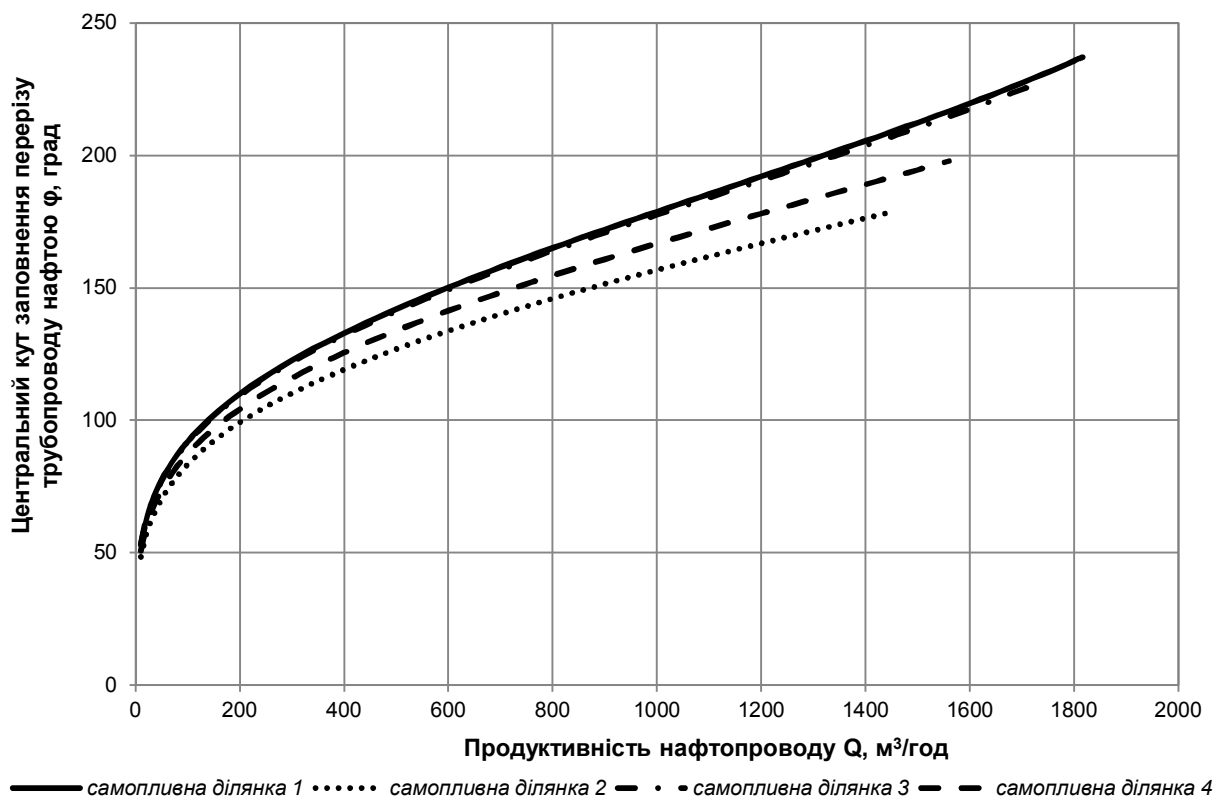


Рисунок 11 – Залежність центрального кута заповнення перерізу самопливних ділянок від продуктивності трубопроводу

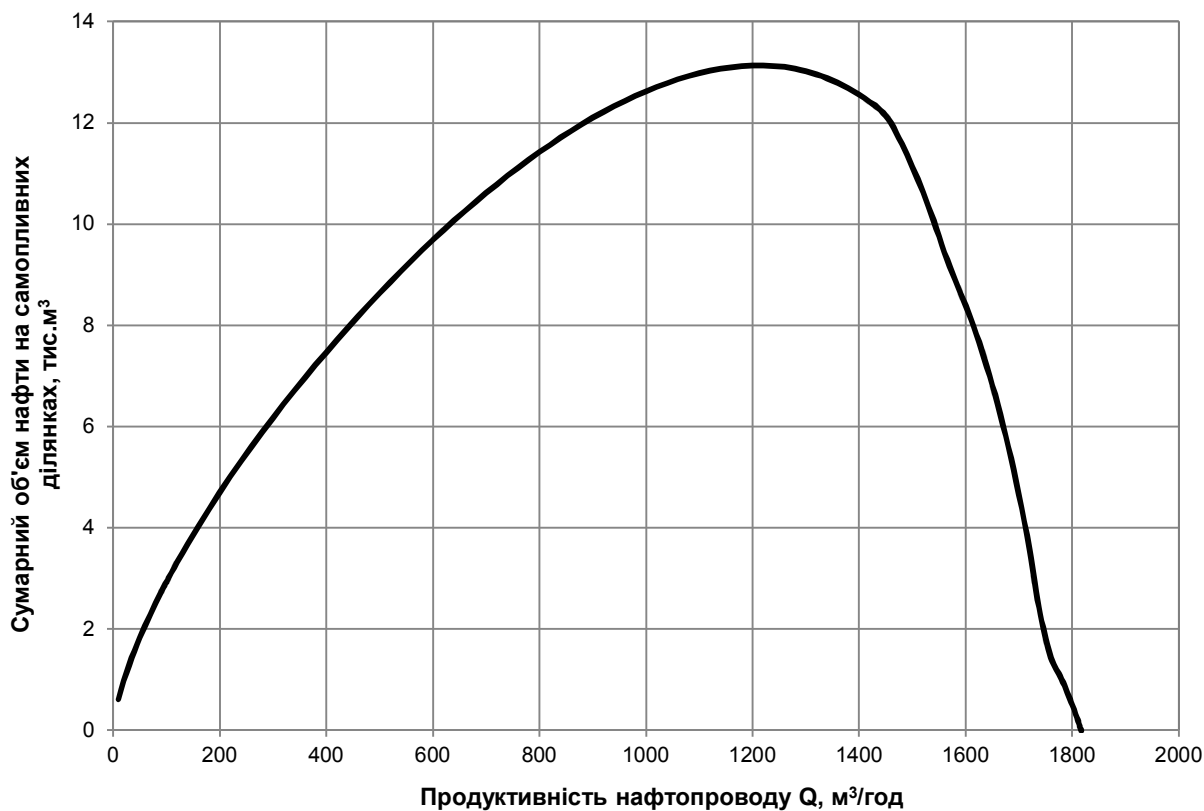


Рисунок 12 – Залежність сумарного об'єму нафти на самопливних ділянках від продуктивності трубопроводу

Математична модель сумарного об'єму нафти на самопливних ділянках залежно від числа Рейнольдса на напірній частині нафтопроводу має вигляд

$$V_{\text{сум}} = -3,060 \cdot 10^{-18} \cdot \text{Re}^4 + 3,489 \cdot 10^{-13} \cdot \text{Re}^3 - 1,701 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Re}^2 + 6,151 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Re} + 0,5502, \\ k_{\phi} = 0,9968.$$

Робимо висновок, що з високим ступенем достовірності (коефіцієнт детермінації $k_{\phi} > 0,9$) можна описати поліноміальними функціями ступінь та центральний кут заповнення перерізу трубопроводу нафтою на самопливних ділянках нафтопроводу. Поліномом другого степеня добре описується довжина самопливної ділянки залежно від числа Рейнольдса, а сумарний об'єм нафти на самопливних ділянках адекватно описується поліномом четвертого степеня.

Наступним етапом досліджень є розробка математичної моделі нафтопроводу, яка повинна врахувати характеристики насосних агрегатів нафтоперекачувальної станції і гідравлічні характеристики лінійної частини, що має пересічений профіль траси. Реалізація зазначеної моделі дасть можливість прогнозувати пропускну здатність і режимні параметри експлуатації нафтопроводу з урахуванням особливостей руху нафти на самопливних ділянках.

Література

- 1 Середюк М.Д. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів: [підруч. для студ. вищ. навч. закл.] / [Середюк М.Д., Якимів Й.В., Лісафін В.П.] – Івано-Франківськ: Кременчук, 2001. – 517 с.
- 2 Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М.В. Лурье. – М.: Нефть и газ, 2003. – 325 с.
- 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.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
20.11.12
Рекомендована до друку професором
Грудзом В.Я.*