

Технічні науки

УДК 622.692.4

Середюк Марія Дмитрівна

*доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
транспорту і зберігання нафти і газу*

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Середюк Мария Дмитриевна

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
транспорта и хранения нефти и газа*

*Ивано-Франковский национальный технический
университет нефти и газа*

Serediuk Mariya

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of
Transport and Storage of Oil and Gas*

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Григорський Станіслав Ярославович

*кандидат технічних наук, асистент кафедри
транспорту і зберігання нафти і газу*

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Григорский Станислав Ярославович

*кандидат технических наук, ассистент кафедры
транспорта и хранения нефти и газа*

*Ивано-Франковский национальный технический
университет нефти и газа*

Grygorskyi Stanislav

*PhD, Assistant Lecturer of Department of
Transport and Storage of Oil and Gas*

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**ВИЗНАЧЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА
ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ДВОНИТКОВИХ
НАФТОПРОВІДНИХ СИСТЕМ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И
ЭНЕРГОЗАТРАТНОСТИ ДВУХНИТОЧНЫХ
НЕФТЕПРОВОДНЫХ СИСТЕМ
DETERMINATION OF VOLUME FLOW RATE AND ENERGY
EFFICIENCY OF TWIN OIL PIPELINE SYSTEMS**

***Анотація.** Досліджено правомірність застосування методики гідравлічного розрахунку двониткових нафтопроводів з використанням поняття еквівалентного діаметра для всіх зон тертя турбулентного режиму. На базі універсальної модифікованої формули Колбрука для коефіцієнта гідравлічного опору при турбулентному режимі розроблено методику визначення пропускної здатності та енергоефективності двониткового нафтопроводу без використання еквівалентного діаметра, яку апробовано при визначенні параметрів діючої нафтотранспортної системи.*

***Ключові слова:** магістральний нафтопровід, еквівалентний діаметр, питомі витрати електроенергії, енергоефективність, режим руху рідини.*

***Аннотация.** Исследована правомерность применения методики гидравлического расчета двухниточных нефтепроводов с использованием понятия эквивалентного диаметра для всех зон трения турбулентного режима. На базе универсальной модифицированной формулы Колбрука для коэффициента гидравлического сопротивления при турбулентном режиме разработана методика определения пропускной способности и энергоэффективности двухниточного нефтепровода без использования*

эквивалентного диаметра, которая апробирована при определении параметров действующей нефтетранспортной системы.

Ключевые слова: *магистральный нефтепровод, эквивалентный диаметр, удельные расходы электроэнергии, энергоэффективность, режим движения жидкости.*

Summary. *The expediency of the method of hydraulic calculation of twin oil pipelines with using the conception of equivalent diameter for all zones of friction of turbulent regime was investigated.*

On the basis of the universal modified Kolbrook formula for the friction factor in turbulent flow regime, a method for determining the volume flow rate and energy efficiency of twin oil pipeline without the use of an equivalent diameter was developed. This method was tested in determining the parameters of the existing oil transportation system.

Key words: *main oil pipeline, equivalent diameter, specific energy consumption, energy efficiency, liquid flow regime.*

Одним із важливих завдань як при проектуванні, так і при експлуатації магістральних нафтопроводів, є визначення їх пропускної здатності. Вирішення зазначеного завдання безпосередньо пов'язано з актуальною на сьогодні проблемою підвищення енергоефективності трубопровідного транспорту нафти і нафтопродуктів [1].

Складність вирішення завдання залежить, насамперед, від параметрів нафтопровідної системи, основними із яких є геометрична структура трубопроводу, особливості профілю траси, характеристики насосного обладнання нафтоперекачувальних станцій (НПС), реологічні характеристики транспортованої рідини тощо.

Тому нами уведено таке визначення пропускної здатності нафтопроводу (експлуатаційної ділянки): це максимальна кількість нафти, яку можна транспортувати за певної схеми роботи лінійної частини, за

певної схеми роботи насосних агрегатів на НПС, за певних технологічних обмежень тиску і витрати, за певних сезонних умов експлуатації та за певних фізичних і реологічних властивостей нафти. Для характеристики енергоефективності експлуатації нафтопроводу широко використовують показник питомих витрат електроенергії на транспортування нафти [2, 3].

Одним із основних чинників, що визначає транспортні можливості нафтопроводу, є схема роботи його лінійної частини. Для нафтопроводу зі складною геометричною структурою, зазначена схема може передбачати використання різної кількості паралельних ниток для кільканиткової трубопровідної системи, підключення лімінгів, відводів тощо.

У світовій практиці трубопровідного транспорту нафти та нафтопродуктів нерідко використовуються кільканиткові трубопровідні системи. Основна транзитна нафтотранспортна система України також має двониткову структуру. Це визначає актуальність досліджень щодо удосконалення методів визначення пропускної здатності та енерговитратності двониткових нафтопроводів, яким присвячена дана робота.

З метою спрощення обчислень, гідравлічний розрахунок кільканиткового нафтопроводу прийняти виконувати з використанням поняття еквівалентного діаметра. Еквівалентний внутрішній діаметр кільканиткового нафтопроводу – це такий умовний діаметр, для якого втрати тиску від тертя співпадають з втратами тиску від тертя у паралельних нитках за умови, що об'ємна витрата нафти в еквівалентному нафтопроводі дорівнює сумі витрат нафти в паралельних нитках.

Математичний вираз для еквівалентного діаметра D_e двониткового нафтопроводу має вигляд [4, 5]

$$D_e = \left(D_1^{2-m} + D_2^{2-m} \right)^{\frac{2-m}{5-m}}, \quad (1)$$

де D_1, D_2 – внутрішній діаметр першої та другою ниток відповідно;

m – показник режиму руху рідини в формулі Лейбензона.

Застосування формули (1) для проектних та експлуатаційних розрахунків трубопровідних систем, які транспортують нафту і нафтопродукти, не завжди забезпечує одержання точних результатів. Це пояснюється таким. При виведенні формули (1) приймалося, що довжини обох ниток трубопроводів однакові. У реальних трубопровідних системах довжини ниток можуть дещо відрізнятися за довжиною. Формула (1) одержана для горизонтального трубопроводу. У реальних нафтопроводах гідравлічний опір ділянки між НПС визначається не тільки втратами тиску від тертя, але і втратами енергії на подолання різниці геодезичних позначок кінця і початку ділянки. Характер траси паралельних ниток може мати свої особливості. Ці чинники не враховано формулою (1).

Ще більшу проблему створює використання у формулі (1) коефіцієнта режиму руху транспортованої рідини m . Цей показник входить в узагальнену математичну модель Лейбензона для коефіцієнта гідравлічного опору

$$\lambda = \frac{A}{\text{Re}^m}, \quad (2)$$

де A, m – коефіцієнти математичної моделі Лейбензона;

Re – число Рейнольдса, що характеризує режим руху рідини.

Якщо дві паралельні нитки нафтопроводу працюють у зоні гідравлічно гладких труб турбулентному режимі і для визначення коефіцієнта гідравлічного опору використовується емпірична формула Блазіуса, наведена нижче, то значення зазначеного коефіцієнта у формулі (1) буде рівним $m = 0,25$

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (3)$$

Однак, згідно з роботами вітчизняних і закордонних вчених [4, 5], формула Блазіуса дає достовірні результати у зоні гідравлічно гладких труб тільки у діапазоні чисел Рейнольдса від 2300 до 100000 (навіть, до 70000 згідно з [2]). У той же час, перехід від зони гідравлічно гладких труб до зони змішаного тертя турбулентного режиму для умов руху нафти в

магістральних нафтопроводів відбувається за значно більших значень чисел Рейнольдса. Тому в зоні гідравлічно гладких труб за межею адекватності формули Блазіуса для визначення коефіцієнта гідравлічного опору необхідно застосовувати інші математичні моделі. Найбільшого застосування в даних умовах набула логарифмічна формула Конакова [4]

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot \lg Re - 1,5)^2}. \quad (4)$$

Формула Конакова має іншу форму, ніж формула Блазіуса, і не містить коефіцієнта режиму m . Магістральні нафтопроводи нерідко працюють за чисел Рейнольдса понад 100000. Виникає питання – як обрахувати еквівалентний діаметр за формулою (1) у таких випадках.

Процес трубопровідного транспортування нафти, що характеризується малою в'язкістю, а також світлих нафтопродуктів характеризується розвиненим турбулентним режимом в зоні змішаного тертя. Зміна зон тертя відбувається за певного значення числа Рейнольдса, яке називають першим перехідним числом Рейнольдса Re_{II} .

Відомі різні підходи щодо визначення величини Re_{II} . Норми технологічного проектування магістральних нафтопроводів [6] пропонують таблицю значень першого перехідного числа Рейнольдса Re_{II} для кожного стандартного діаметра нафтопроводу. Слід зазначити, що наведені значення перехідних чисел Рейнольда, одержані за конкретного значення абсолютної еквівалентної шорсткості внутрішньої поверхні труби, що становить $k_e = 0,125$ мм для труб з малим діаметром (до 377 мм включно) і $k_e = 0,1$ мм для більших діаметрів труб. Тому дана методика розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору не може бути використана при проведенні гідравлічних розрахунків діючих нафтопроводів, шорсткість внутрішньої поверхні яких суттєво різниться від зазначених значень.

Наведемо ще кілька формул для визначення першого перехідного числа Рейнольдса [4,5]

$$\text{Re}_{\Pi_1} = 59,5 \cdot \left(\frac{D}{2 \cdot k_e} \right)^{\frac{8}{7}}, \quad (5)$$

$$\text{Re}_{\Pi_1} = \frac{10 \cdot D}{k_e}. \quad (6)$$

Результати розрахунку за формулами (5) і (6) для внутрішнього діаметра $D = 0,702$ м і абсолютної еквівалентної шорсткості поверхні труби $k_e = 0,2$ мм становлять $\text{Re}_{\Pi_1} = 303556$ та $\text{Re}_{\Pi_1} = 35100$ відповідно, відрізняючись майже у 10 разів. За нормами технологічного проектування маємо для цих же умов $\text{Re}_{\Pi_1} = 100000$.

Як зазначено у [2], труднощів, пов'язаних з визначенням достовірних границь переходу від однієї зони турбулентного руху до іншої, з виникненням стрибкоподібних змін значень коефіцієнта гідравлічного опору при переході від однієї формули моделі до іншої, з зацикленням розрахунків при реалізації методу послідовних наближень у комп'ютерній програмі можна уникнути, використовуючи універсальні моделі для визначення коефіцієнта гідравлічного опору в турбулентному потоці. Найбільш доцільним є використання в обчислювальних алгоритмах формули Колбрука, яка за допомогою інтерполяційної перехідної функції, враховує вплив на гідравлічний опір одночасно в'язкості та шорсткості труби і тому придатна для всіх зон турбулентного руху. Формула Колбрука у більшості країн світу використовується як основна формула для гідравлічного розрахунку трубопроводів різного призначення [2].

У роботі [2] нами запропоновано такий метод визначення коефіцієнта гідравлічного опору. Спочатку коефіцієнт гідравлічного опору обчислюють за формулою Блазіуса. Методом послідовних наближень для кожної ділянки нафтопроводу знаходять перше перехідне число Рейнольдса Re_{Π_1} , що відповідає ідеалізованій зернистій шорсткості внутрішньої поверхні труби

$$\frac{k_e}{D} = \frac{8,15}{\text{Re}_{\Pi_1} \cdot \sqrt{0,0032 + 0,221 \cdot \text{Re}_{\Pi_1}^{-0,237}}}, \quad (7)$$

якщо виконується умова

$$\text{Re} < \text{Re}_{\Pi_1}, \quad (8)$$

то визначають ефективну еквівалентну шорсткість труби за формулою

$$k_{ee} = k_e \cdot \frac{\text{Re} - 4000}{\text{Re}_{\Pi_1} - 4000}. \quad (9)$$

Якщо виконується умова

$$\text{Re} > \text{Re}_{\Pi_1}, \quad (10)$$

то приймають, що ефективна еквівалентна шорсткість труби дорівнює

$$k_{ee} = k_e. \quad (11)$$

Методом послідовних наближень знаходять значення коефіцієнта гідравлічного опору за модифікованою формулою Колбрука

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \lg \left[\frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k_{ee}}{3,7 \cdot D} \right]. \quad (12)$$

Як кінцевий результат вибирають більше із двох розрахованих значень коефіцієнта гідравлічного опору в нафтопроводі.

Наведений вище метод пройшов широкомасштабну апробацію на низці діючих вітчизняних магістральних нафтопроводах і був затверджений у стандарті підприємства [7]. Апробація методу розрахунку виконана стосовно однопіткових нафтопровідних систем.

Для доведення правомірності використання формули (1) зі сталим значенням коефіцієнта режиму руху $m = 0,25$ для двопіткових нафтопровідних систем у повному діапазоні чисел Рейнольдса нами створено комп'ютерну програму гідродинамічного розрахунку двопіткової ділянки нафтопроводу, яка реалізує два методи визначення пропускної здатності. Перший метод базується на застосуванні формули (1) і розраховує технологічні параметри еквівалентного нафтопроводу. Другий передбачає визначення пропускної здатності кожної нитки нафтопроводу з використанням формул (3) та (7)-(12) без уведення поняття

еквівалентного діаметра. З метою створення можливості порівняння результатів розрахунків за двома методами забезпечувалось виконання умов матеріального та енергетичного балансу.

Обчислювальний алгоритм передбачав виконання таких операцій. Приймали внутрішні діаметри кожної із двох ниток модельного нафтопроводу. Задавали втрати тиску в двонитковій нафтопровідній системі.

Спочатку реалізували перший метод розрахунку. За формулою (1) обчислювали еквівалентний діаметр. Використовуючи загальновідомі гідродинамічні залежності та формули (3) та (7-12), методом ітерацій за витратою знаходили пропускну здатність двониткового нафтопроводу для заданого перепаду тиску.

Потім реалізували другий метод розрахунку. Фіксували значення витрати нафти в двонитковій системі Q_c , знайдене за першим методом. Задавали мінімальну витрату у першій нитці

$$Q_1 = Q_{\min}. \quad (13)$$

Використовуючи загальновідомі гідродинамічні залежності та формули (3) та (7-12) обчислювали втрати тиску від тертя P_{τ_1} для витрати нафти Q_1 .

Із рівняння матеріального балансу знаходили витрату нафти у другій нитці трубопровідної системи для даної ітерації

$$Q_2 = Q_c - Q_1. \quad (14)$$

Обчислювали втрати тиску від тертя у другій нитці нафтопроводу P_{τ_2} для витрати нафти Q_1 .

Якщо втрати тиску від тертя у другій нитці перевищували втрати тиску від тертя у першій нитці на величину, більшу за точність обчислень тиску ε

$$P_{\tau_2} - P_{\tau_1} > \varepsilon, \quad (15)$$

то збільшували витрату нафти у першій нитці з певним кроком ΔQ

$$Q_1 = Q_1 + \Delta Q. \quad (16)$$

Після закінчення ітерацій за витратою Q_1 порівнювали між собою заданий перепад тиску P_3 із практично однаковими втратами тиску від тертя у кожній нитці $P_\tau = P_{\tau_1} = P_{\tau_2}$.

Якщо виконувалася умова

$$P_\tau < (P_3 + \varepsilon), \quad (17)$$

то збільшували витрату нафти у двонитковій системі

$$Q_c = Q_c + \Delta Q, \quad (18)$$

і повторювали ітерації за витратою у першій нитці нафтопроводу Q_1 .

Якщо виконувалася умова

$$P_\tau > (P_3 + \varepsilon), \quad (19)$$

то зменшували витрату нафти у двонитковій системі

$$Q_c = Q_c - \Delta Q, \quad (20)$$

і повторювали ітерації за витратою у першій нитці нафтопроводу Q_1 .

Виконання умови

$$|P_\tau - P_3| < \varepsilon, \quad (21)$$

визначало знаходження пропускної здатності двониткової нафтотранспортної системи за заданого перепаду тиску без уведення поняття еквівалентного діаметра.

За розробленим методом та комп'ютерною програмою виконано багатоваріантні гідравлічні розрахунки двониткового модельного нафтопроводу з такими параметрами: довжина обох ниток нафтопроводу $L = 100$ км, внутрішній діаметр першої нитки $D_1 = 0,514$ м, другої нитки $D_2 = 0,702$ м, втрати тиску у нафтопроводі змінювали у діапазоні від 6 МПа до 0,2 МПа. Для кожного значення заданого перепаду тиску знаходили пропускну здатність двониткового нафтопроводу з використанням поняття еквівалентного діаметра Q_{c_1} та шляхом гідравлічного розрахунку кожної нитки Q_{c_2} .

За результатами обчислень побудовано залежність різниці значень пропускної здатності двониткового модельного нафтопроводу $Q_{c_2} - Q_{c_1}$ від числа Рейнольдса, розрахованого за еквівалентним діаметром Re_e (див. рисунок 1). Рисунок 2 характеризує одержану за результатами розрахунків модельного нафтопроводу залежність відносного завантаження двох ниток нафтопроводу Q_1/Q_2 від числа Рейнольдса Re_e .

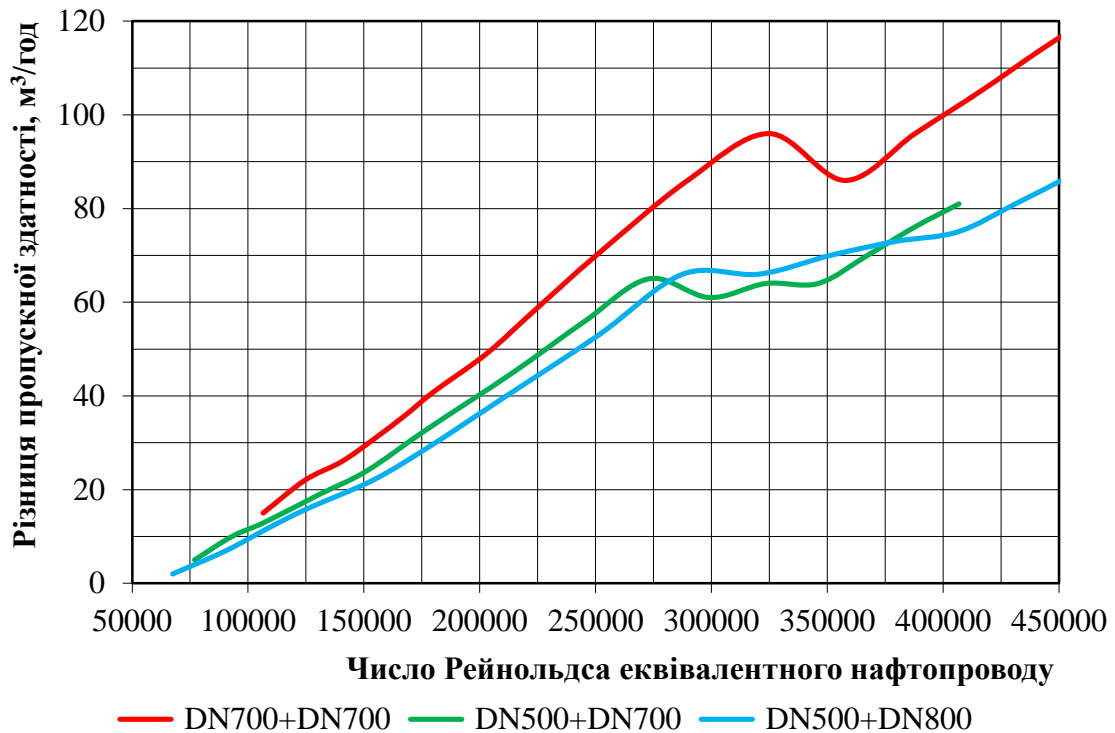


Рис. 1. Залежність різниці пропускної здатності двониткового нафтопроводу, обчисленої за двома методами, від числа Рейнольдса еквівалентного нафтопроводу

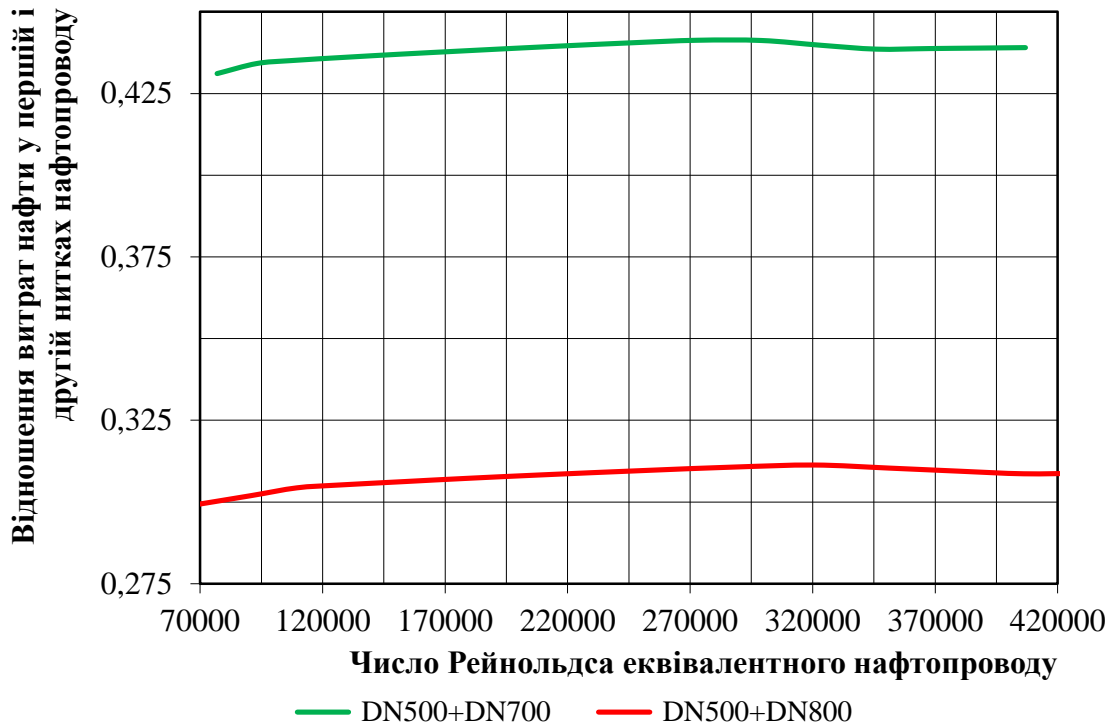


Рис. 2. Залежність відносного завантаження двох ниток від числа Рейнольдса еквівалентного нафтопроводу

Аналогічні дослідження проведено для двониткового нафтопроводу з діаметрами DN 500 і DN 800 та діаметрами DN 700 і DN 700. Одержані результати наведено на рисунках 1 і 2.

Як впливає із рисунку 1, що використання спрощеної методики розрахунку двониткового нафтопроводу за еквівалентним діаметром занижує величину його пропускної здатності. Різниця пропускної здатності, визначена за двома методами, залежить від співвідношення діаметрів системи та числа Рейнольдса еквівалентного нафтопроводу. Для кожного співвідношення діаметрів при збільшенні еквівалентного діаметра має місце спочатку зростання різниці пропускної здатності, досягання максимального значення, потім незначне зменшення, і далі знову збільшення.

Результати досліджень, одержані для модельного нафтопроводу, не можна безпосередньо переносити на реальні нафтопровідні системи. Як зазначалось вище, втрати енергії на кожній ділянці нафтопроводу залежать не тільки від втрат енергії від тертя, але і від втрат енергії на подолання

різниці геодезичних позначок траси. Це об'єктивно вносить корективи в оцінювання похибки при застосуванні методу еквівалентного діаметра для реальних двониткових нафтопровідних систем.

Нами розроблено методику визначення пропускної здатності та енергоефективності експлуатації магістрального нафтопроводу. Обчислювальний алгоритм містить такі елементи:

- блок математичного моделювання та визначення напірних та енергетичних характеристик насосних агрегатів і НПС;
- блок гідравлічного розрахунку лінійної частини нафтопроводу розрахунку з урахуванням особливостей профілю траси;
- блок урахування технологічних обмежень та ув'язування режимів роботи НПС і лінійної частини нафтопроводу.
- блок розрахунку енергоефективності нафтопроводу за певної технології його експлуатації.

Методика дає можливість визначити пропускну здатність та питомі витрати електроенергії на транспортування нафти як для одониткового, так і двониткового нафтопроводу з довільною кількістю НПС, які одночасно працюють на дві нитки. Гідравлічний розрахунок лінійної частини двониткового нафтопроводу передбачає реалізацію методу, викладеного вище.

Виконано апробацію розробленої методики шляхом визначення пропускної здатності та енерговитратності двониткової ділянки діючого нафтопроводу. Внутрішні діаметри обох ниток становлять 0,702 м. Результати розрахунків для семи різних комбінацій працюючих насосів на НПС наведено на рисунку 3 і 4.

Рисунки 3 і 4 засвідчують, що для діючого нафтопроводу пропускну здатність залежить від схеми роботи лінійної частини і схеми роботи насосних агрегатів на НПС. Використання більш точного методу розрахунку двониткового нафтопроводу дає змогу більш точно визначити його пропускну здатність і уникнути похибки 20-60 м³/год залежно від комбінації працюючих насосів на НПС.

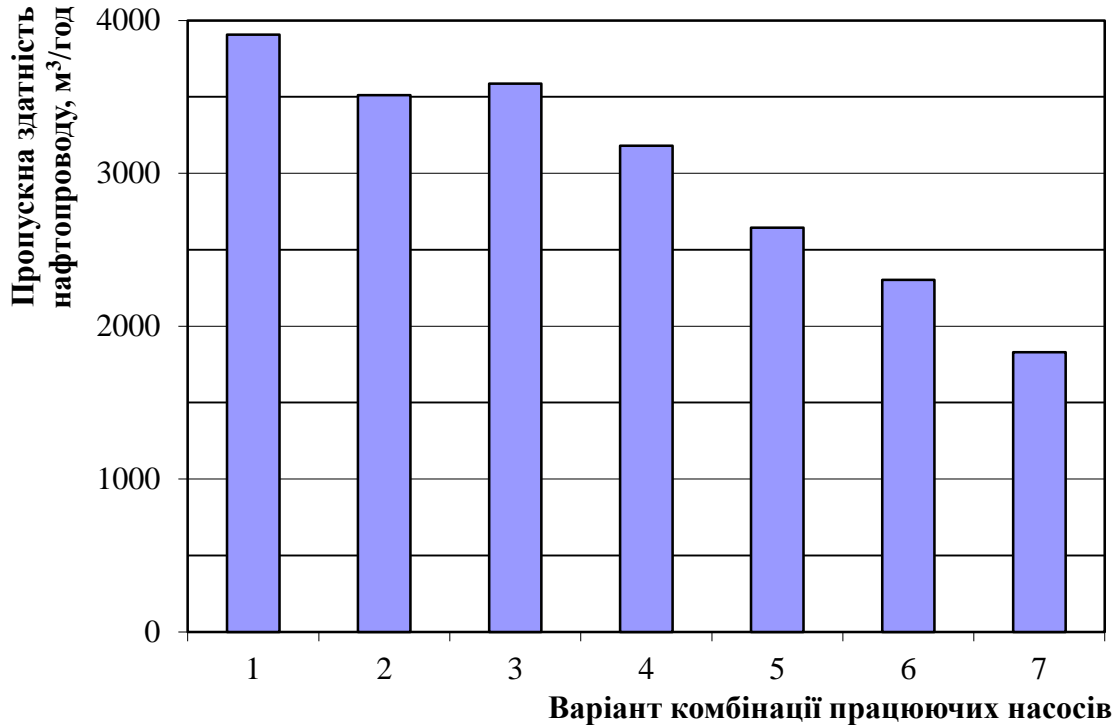


Рис. 3. Результати визначення пропускної здатності двониткового нафтопроводу за розробленою методикою

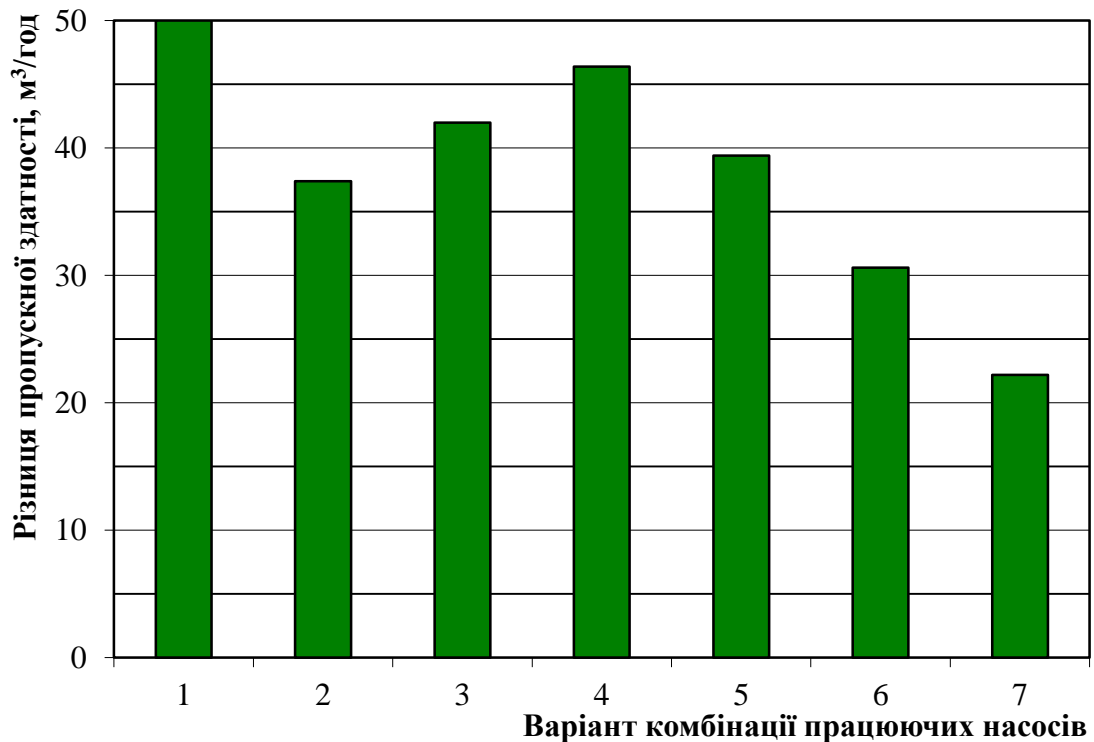


Рис. 4. Уточнення пропускної здатності двониткового нафтопроводу при використанні запропонованого методу розрахунку

Висновки

1. Застосування спрощеної методики розрахунку двониткового нафтопроводу за еквівалентним діаметром знижує величину його пропускної здатності. Похибка обчислень при цьому залежить від співвідношення внутрішніх діаметрів ниток та режиму руху нафти у них. Останній визначається ступенем завантаженості нафтопровідної системи.
2. Розроблено методику визначення пропускної здатності та енергоефективності двониткового нафтопроводу з довільною кількістю нафтоперекачувальних станцій, яка передбачає гідравлічний розрахунок кожної нитки з використанням універсальної модифікованої формули Колбрука.
3. Розробку апробовано при визначенні параметрів діючої нафтотранспортної системи. Встановлено, що для діючого нафтопроводу його пропускна здатність залежить від схеми роботи лінійної частини і схеми роботи насосних агрегатів на НПС. Використання запропонованого методу розрахунку конкретного двониткового нафтопроводу дає змогу більш точно визначити його пропускну здатність і уникнути похибки 20-60 м³/год залежно від комбінації працюючих насосів на НПС.

Література

1. Середюк М. Д. Яновський Вибір енергоефективних режимів експлуатації нафтотранспортних систем України за їх неповного завантаження / М. Д. Середюк, С. Р. Яновський // Нафтогазова галузь України. – 2017. – № 3. – С. 29-33.
2. Середюк М.Д. Методика розрахунку режимних та енергетичних параметрів роботи магістральних нафтопроводів / М. Д. Середюк, А. С. Івоняк // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2002. – № 1(2). – С. 50-54.

3. Середюк М. Д. Методика нормування витрат електроенергії на транспортування нафти магістральними нафтопроводами / М. Д. Середюк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2002. – № 2(3). – С. 57-60.
4. Середюк М.Д. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів / М. Д. Середюк, Й. В. Якимів, В. П. Лісафін: [підручник для ВНЗ]. – Івано-Франківськ. 2002. – 517 с.
5. Коршак А. А. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа / А. А. Коршак, А. М. Нечваль: [учебник для вузов]. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис. 2005. – 515 с.
6. Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов: ВНТП 2-86. – [Введены 1987-07-01]. – М.: Миннефтепром, 1987. – 109 с.
7. СТП 320.001.148429.003-2002. Методика нормування питомих витрат електроенергії на транспортування нафти магістральними нафтопроводами ДАТ «ПДММН» /М. Д. Середюк, В. П. Лісафін, Й. В. Якимів та ін. Введ. 01.01.2002. – К.: Укртранснафта. 2001. – 51 с.