

**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,  
доцент кафедри транспорту і зберігання нафти і газу  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

**Григорский Станислав Ярославович**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры транспорта и хранения нефти и газа  
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа*

**Grygorskyi Stanislav**

*PhD, Associate Professor of  
Department of Transport and Storage of Oil and Gas  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

**ВПЛИВ ПЕРЕМІЧОК НА РЕЖИМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ  
ДВОНІТКОВИХ НАФТОПРОВІДІВ**

**ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЫЧЕК НА РЕЖИМ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ДВУХНИТОЧНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ**

**INFLUENCE OF JUMPERS ON THE MODE  
OF OPERATION OF TWIN OIL PIPELINES**

**Анотація.** Розроблено метод і програмне забезпечення, які дають змогу визначити пропускну здатність, завантаження кожної нитки та питомі витрати електроенергії для двониткового нафтопроводу за наявності відкритих міжниткових перемичок. Встановлено, що відкриття міжниткових перемичок спричинює значні перетоки нафти, що впливає на завантаження та умови експлуатації двониткової нафтопровідної системи.

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

**Аннотация.** Разработан метод и программное обеспечение, позволяющие определить пропускную способность, загрузки каждой нитки и удельные расходы электроэнергии для двухниточного нефтепровода при наличии открытых перемычек. Установлено, что открытие перемычек вызывает значительные перетекания нефти, что влияет на загрузку и условия эксплуатации двухниточной нефтепроводной системы.

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

**Summary.** The method and software that allow determining the volume flow rate, loadings of each thread and energy efficiency for twin oil pipeline in the presence of open jumpers was developed. The opening of the jumpers causes significant oil overflows, which affects the loading and operating conditions of twin oil pipeline system was established.

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

**Т**рубопровідний транспорт є одним із найбільш надійних та економічних технологій переміщення значних обсягів нафти і нафтопродуктів. Сучасні нафтопровідні системи мають, зазвичай, складну геометричну структуру, включаючи наявність паралельних ниток, лупінгів, вставок, відводів, перемичок тощо.

Складна геометрична структура нафтотранспортних систем об’єктивно впливає на їх пропускну здатність та енергоефективність режимів експлуатації. Кожному варіанту схеми роботи лінійної частини складного нафтопроводу відповідають певні значення його пропускну здатності, режимних та енергетичних параметрів. Прогнозування зазначених величин для кожної схеми роботи лінійної частини нафтопроводу має важливе значення як при проектуванні, так і при експлуатації нафтотранспортної системи [1, 2].

У вітчизняній практиці широко використовуються двониткові нафтопроводу, які мають значну протяжність. Підвищення тиску нафти відбувається на нафтоперекачувальних станціях (НПС), які одночасно працюють на дві нитки.

На двониткових магістральних нафтогазопроводах нерідко між нитками передбачаються відносно короткі перемички з діаметром, що забезпечує незначний гідравлічний опір руху нафти.

Вплив відкритих перемичок на режим експлуатації двониткових газопроводів детально досліджений у роботах [3, 4]. Стосовно магістральних нафтопроводів складної геометричної структури це питання не знайшло широкого висвітлення в роботах вітчизняних та зарубіжних вчених.

**Мета роботи:** дослідження впливу перемичок на режим експлуатації протяжних двониткових нафтопроводів, НПС яких одночасно працюють на дві нитки.

Мета реалізується через виконання таких завдань:

- розроблення методу гідравлічного розрахунку двониткового нафтопроводу за наявності на ділянках між НПС перемичок з незначним гідравлічним опором;
- створення комп’ютерної програми гідравлічного розрахунку двониткового нафтопроводу за наявності на ділянках між НПС перемичок;
- встановлення закономірностей впливу відкритих перемичок на пропускну здатність та завантаженість ниток двониткових нафтопроводів.

При інженерних розрахунках кільканиткових нафтогазопроводів широко використовується поняття еквівалентного діаметра. Як зазначено у роботах

[2, 7], застосування такого спрощеного підходу до теплогідравлічного розрахунку кільканиткових трубопроводів не завжди правомірно, не забезпечує одержання достовірних результатів.

Насамперед, це стосується трубопровідних систем, що мають перемички між нитками. Гідравлічний розрахунок таких кільканиткових нафтогазопроводів слід виконувати без застосування поняття еквівалентного діаметра.

Як зазначено у роботах [5, 6], на базі універсальної модифікованої формули Колбрука для коефіцієнта гідравлічного опору при турбулентному режимі нами розроблено метод і програмне забезпечення, що дають можливість визначити пропускну здатність та питомі витрати електроенергії для двониткових нафтопроводів із довільної кількістю НПС. Ця розробка слугувала основою розроблення аналогічного методу розрахунку стосовно двониткових нафтопровідних систем, що мають міжниткові перемички на ділянках між НПС.

Запропонована методика має такі блоки:

- блок математичного моделювання властивостей нафти та характеристик насосного обладнання НПС;
- блок розрахунку режимних та енергетичних параметрів роботи НПС за певної комбінації працюючих насосних агрегатів;
- блок гідравлічного розрахунку лінійної частини кожної нитки для різних варіантів відкритих і закритих міжниткових перемичок;
- блок ув’язки режиму роботи НПС і прилеглих ділянок нафтопроводу;
- блок визначення питомих витрат електроенергії на транспортування нафти нафтопроводом.

Для найбільш складного випадку, за якого на кожному перегоні між НПС є відкрита міжниткова перемичка, обчислювальний алгоритм для кожної ділянки між НПС передбачав виконання таких операцій. Указували положення кожної перемички на профілі траси нафтопроводу. Фіксували значення витрати нафти в двонитковій системі  $Q_c$ . Задавали мінімальну витрату у першій нитці до перемички

$$Q_{1\partial n} = Q_{\min} \cdot \quad (1)$$

Використовуючи формули, наведені нами у [7], обчислювали загальні втрати тиску на ділянці першої нитки до перемички  $P_{заз1\partial n}$  за витрати нафти  $Q_1$

$$P_{заз1\partial n} = 1,02 \cdot \lambda_{1\partial n} \cdot \frac{l_{1\partial n}}{D_1} \cdot \frac{w_{1\partial n}^2}{2} \cdot \rho + \Delta z_{1\partial n} \cdot \rho \cdot g, \quad (2)$$

де  $\lambda_{1\partial n}$  — коефіцієнт гідравлічного опору для першої нитки нафтопроводу до перемички;

$l_{1\partial n}$  — довжина першої нитки нафтопроводу до перемички;

$D_1$  — внутрішній діаметр першої нитки нафтопроводу;

$w_{1\partial n}$  — швидкість руху нафти у першій нитці нафтопроводу до перемички;

$\rho$  — розрахункова густина нафти;

$\Delta z_{1\partial n}$  — різниця геодезичних позначок перемички і початку першої нитки нафтопроводу;

$g$  — прискорення сили тяжіння.

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

$$Q_2 = Q_c - Q_1. \quad (3)$$

Обчислювали загальні втрати тиску на ділянці першої нитки до перемички  $P_{заз_{2\partial n}}$  за витрати нафти  $Q_2$

$$P_{заз_{2\partial n}} = 1,02 \cdot \lambda_{2\partial n} \cdot \frac{l_{2\partial n}}{D_2} \cdot \frac{w_{2\partial n}^2}{2} \cdot \rho + \Delta z_{2\partial n} \cdot \rho \cdot g. \quad (4)$$

У формулі (4) індекс «2» засвідчує, що параметр відповідає другій нитці нафтопроводу.

Якщо загальні втрати тиску у другій нитці до перемички перевищували загальні втрати тиску у першій нитці до перемички на величину, більшу за точність обчислень тиску  $\varepsilon$

$$P_{заз_{2\partial n}} - P_{заз_{1\partial n}} > \varepsilon, \quad (5)$$

то збільшували витрату нафти у першій нитці з певним кроком  $\Delta Q$

$$Q_{1\partial n} = Q_{1\partial n} + \Delta Q. \quad (6)$$

Після закінчення ітерацій за витратою  $Q_{1\partial n}$  знаходили витрати нафти у кожній нитці до перемички  $Q_{1\partial n}$  і  $Q_{2\partial n}$  та значення тиску у нафтопроводі після перемички

$$P_{nn} = P_n - P_{заз_{\partial n}}, \quad (7)$$

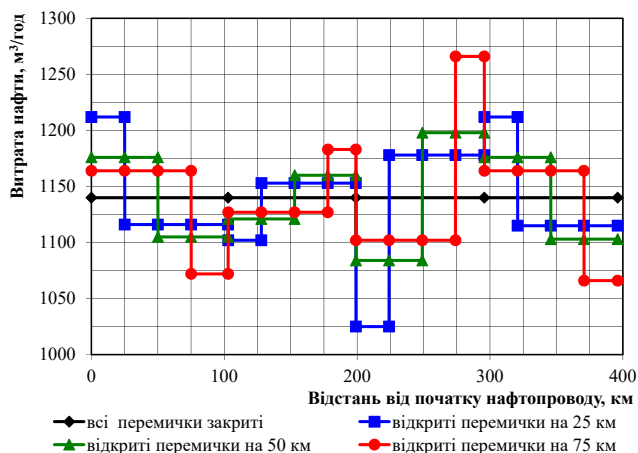


Рис. 1. Зміна витрати нафти по довжині першої нитки нафтопроводу (відкриті перемички на кожному перегоні між НПС)

$$P_{заз_{\partial n}} = P_{заз_{1\partial n}} = P_{заз_{2\partial n}}. \quad (8)$$

Далі аналогічно за фіксованої витрати нафти  $Q_c$  виконували гідравлічний розрахунок другої частини двониткової ділянки нафтопроводу. У результаті знаходили витрати нафти у кожній нитці до перемички  $Q_{1nn}$  і  $Q_{2nn}$  та значення тиску у нафтопроводі на вході у наступну НПС

$$P_e = P_{nn} - P_{заз_{nn}}, \quad (9)$$

$$P_{заз_{nn}} = P_{заз_{1nn}} = P_{заз_{2nn}}. \quad (10)$$

Усі інші блоки обчислювального алгоритму розрахунку двониткового нафтопроводу за наявності відкритих міжниткових перемичок аналогічні алгоритму визначення пропускної здатності та енергоефективності одноститкового нафтопроводу. Вони детально охарактеризовані у роботах [5–7].

Для апробації запропонованих методу і комп'ютерної програми вибрано двониткову експлуатаційну ділянку нафтопроводу з такими параметрами: кількість НПС — чотири, загальна довжина 396 км, внутрішні діаметри першої нитки  $D_1 = 0,514$  м, другої нитки  $D_2 = 0,702$  м. Довжини ділянок між НПС приблизно однакові і становлять величину близьку до 100 км. Нафтоперекачувальні станції оснащені насосами марки НМ 3600–230 з різними роторами.

Спочатку визначена пропускна здатність двониткової нафтопровідної системи за закритих міжниткових перемичок. Потім дослідження виконано для випадку, за якого на кожній ділянці нафтопроводу між НПС є відкрита міжниткова перемичка, яка розміщена на 25 км, 50 км і 75 км. Для кожного випадку визначена витрата двониткової системи і витрати нафти у нитках до і після перемички. Результати багатоваріантних розрахунків стосовно першої і другої ниток нафтопроводу показано на рисунках 1 і 2 відповідно.

Аналіз розрахунків засвідчив, що відкриття міжниткових перемичок, які не мають помітного гідравлічного опору, не впливає на пропускну здатність

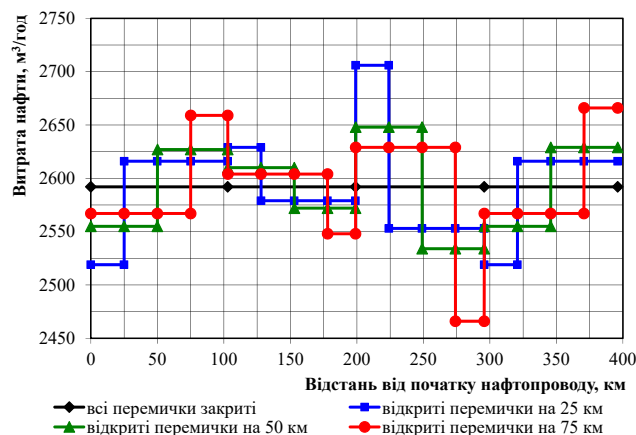


Рис. 2. Зміна витрати нафти по довжині другої нитки нафтопроводу (відкриті перемички на кожному перегоні між НПС)

двониткової нафтопровідної системи. У той же час, наявність відкритих перемичок спричинює значні перетоки нафти між нитками як через перемички, так і після трубопровідних комунікацій НПС.

Так, наприклад, при роботі з відкритими міжнитковими перемичками на 25 км кожного із чотирьох перегонів між НПС витрата нафти у першій нитці зменшиться від 1212 м<sup>3</sup>/год до 1116 м<sup>3</sup>/год після першої перемички, далі зменшиться від 1116 м<sup>3</sup>/год до 1102 м<sup>3</sup>/год після НПС2, зросте до 1153 м<sup>3</sup>/год після другої перемички, зменшиться до 1025 м<sup>3</sup>/год після НПС3, знову зросте до 1178 м<sup>3</sup>/год після третьої перемички, зросте до 1212 м<sup>3</sup>/год після НПС4 і зменшиться до 1115 м<sup>3</sup>/год після четвертої перемички.

За наявності відкритих перемичок у першій половині перегонів між НПС максимальні перетоки із першої нитки у другу мають місце після першої і третьої перемичок, а також після НПС3, а максимальні зворотні перетоки із другої нитки у першу мають місце після третьої перемички.

Наявність відкритих перемичок на 50 км ділянки між НПС, тобто, приблизно посередині перегону, спричинює дещо менші перетоки нафти між нитками.

При роботі з відкритими перемичками на 75 км кожного із чотирьох перегонів між НПС, максимальні перетоки із першої нитки у другу мають місце після першої і четвертої перемичок, а також після НПС4, а максимальні зворотні перетоки із другої нитки у першу спостерігаються після третьої перемички.

Визначимо, на скільки зміниться витрата нафти у кожному елементі двониткової нафтопровідної системи після відкриття міжниткових перемичок. За базу порівняння беремо витрату нафти у нитках, визначену при закритих перемичках. Спочатку для кожного місця розташування перемичок знаходимо абсолютну різницю витрат нафти, а потім відносну різницю. Одержані результати для першої і другої ниток нафтопроводу наведено на рисунках 3 і 4.

Із рисунка 3 випливає, що для першої нитки нафтопроводу максимальна різниця витрат нафти

$\delta Q_1 = -10,1 \%$  відповідає випадку розташування відкритих перемичок на 25 км перегону між НПС, і  $\delta Q_1 = 11,1 \%$  відповідає випадку розташування відкритих перемичок на 75 км перегону між НПС.

Із рисунка 4 випливає, що для другої нитки нафтопроводу максимальна різниця витрат нафти  $\delta Q_2 = 4,4 \%$  відповідає випадку розташування відкритих перемичок на 25 км перегону між НПС, і  $\delta Q_2 = -4,9 \%$  відповідає випадку розташування відкритих перемичок на 75 км перегону між НПС.

Аналогічні дослідження виконано для випадку, за якого відкритими є перемички на першій і третій ділянках нафтопроводу між НПС. Перемички розміщуємо на 25 км, 50 км і 75 км. Для кожного випадку визначена витрата двониткової системи і витрати нафти у нитках до і після перемички. Аналіз розрахунків підтвердив факт, що відкриття міжниткових перемичок, які не мають помітного гідравлічного опору, не впливає на пропускну здатність двониткової нафтопровідної системи. У той же час, наявність відкритих перемичок спричинює значні перетоки нафти як на відкритих перемичках, так і в трубопровідних комунікаціях НПС.

Наприклад, у випадку розташування відкритих міжниткових перемичок на 25 км першого і третього перегонів витрата нафти у першій нитці після першої перемички зменшиться з 1212 м<sup>3</sup>/год до 1116 м<sup>3</sup>/год, після НПС2 зросте до 1140 м<sup>3</sup>/год, після НПС3 зменшиться до 1025 м<sup>3</sup>/год, після третьої перемички збільшиться до 1178 м<sup>3</sup>/год, а після НПС4 повернеться до значення 1140 м<sup>3</sup>/год.

Для випадку розташування відкритих міжниткових перемичок на 50 км першого і третього перегонів витрата нафти у першій нитці після першої перемички зменшиться з 1176 м<sup>3</sup>/год до 1105 м<sup>3</sup>/год, після НПС2 зросте до 1140 м<sup>3</sup>/год, після НПС3 зменшиться до 1084 м<sup>3</sup>/год, після третьої перемички збільшиться до 1198 м<sup>3</sup>/год, а після НПС4 повернеться до значення 1140 м<sup>3</sup>/год.

У разі розташування відкритих міжниткових перемичок на 75 км першого і третього перегонів

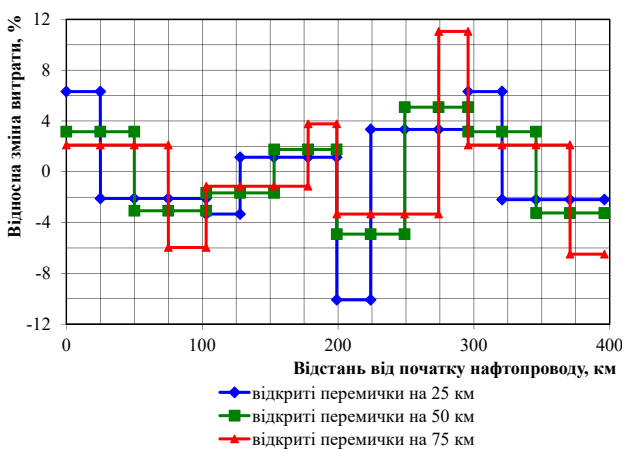


Рис. 3. Відносна зміна витрати нафти по довжині першої нитки нафтопроводу (відкриті перемички на кожному перегоні між НПС)

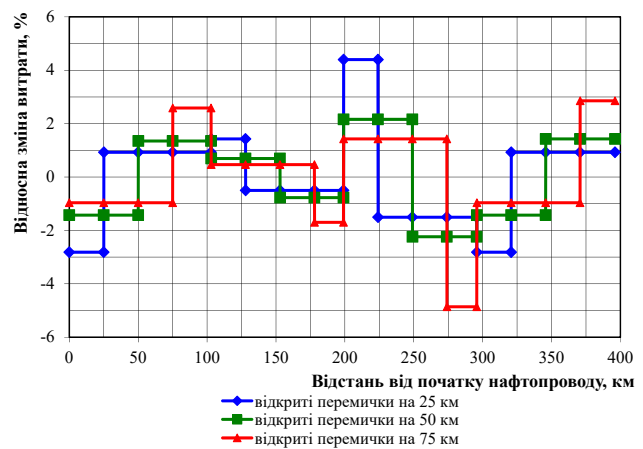


Рис. 4. Відносна зміна витрати нафти по довжині другої нитки нафтопроводу (відкриті перемички на кожному перегоні між НПС)

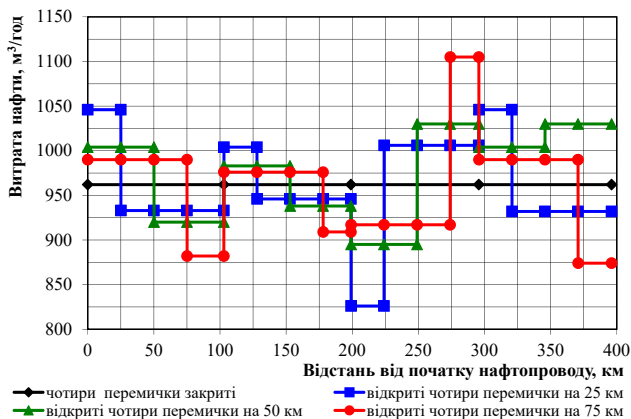


Рис. 5. Зміна витрати нафти по довжині першої нитки нафтопроводу для пересіченого профілю траси (відкриті перемички на кожному перегоні між НПС)

витрата нафти у першій нитці після першої перемички зменшиться з 1164 м³/год до 1072 м³/год, після НПС2 зросте до 1140 м³/год, після НПС3 зменшиться до 1102 м³/год, після третьої перемички збільшиться до 1266 м³/год, а після НПС4 повернеться до значення 1140 м³/год.

Для кожного місця розташування перемичок знаходимо абсолютну різницю витрат нафти, а потім відносну різницю, взявши за базу порівняння витрату нафти у нитках при закритих перемичках. Із проведених розрахунків випливає, що для першої нитки нафтопроводу максимальна різниця витрат нафти  $\delta Q_1 = -10,1\%$  відповідає випадку розташування відкритих перемичок на 25 км перегону між НПС, і  $\delta Q_1 = 11,1\%$  відповідає випадку розташування відкритих перемичок на 75 км перегону між НПС.

Для другої нитки нафтопроводу максимальна різниця витрат нафти  $\delta Q_1 = 4,4\%$  відповідає випадку розташування відкритих перемичок на 25 км перегону між НПС, і  $\delta Q_1 = -4,9\%$  відповідає випадку розташування відкритих перемичок на 75 км перегону між НПС.

Для дослідження впливу особливостей профілю траси на завантаження ниток двониткового нафтопроводу за наявності на трасі відкритих перемичок нами змінено різницю геодезичних позначок кінця і початку перегону між НПС2 і НПС3 і прийнято значення 250 м, що характерно для гірських умов. Усі інші початкові дані для розрахунків залишено без змін.

За комп'ютерною програмою скориговано пропускну здатність двониткової нафтопровідної системи за закритих перемичок, потім дослідження повторено для випадку наявності на кожній ділянці нафтопроводу між НПС відкритої міжниткової перемички, розміщеної на 25 км, 50 км і 75 км.

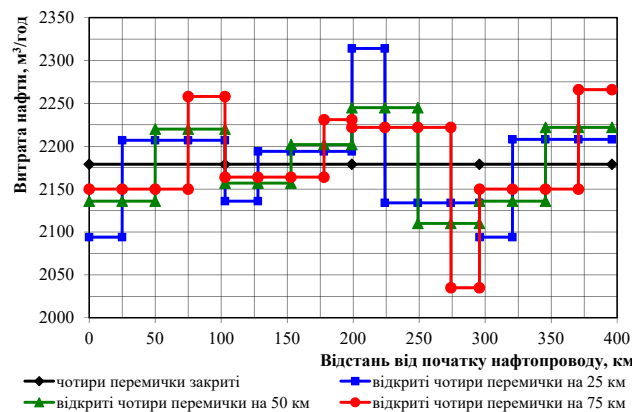


Рис. 6. Зміна витрати нафти по довжині другої нитки нафтопроводу для пересіченого профілю траси (відкриті перемички на кожному перегоні між НПС)

Одержані результати щодо зміни витрати нафти у першій та другій нитках нафтопроводу з пересіченим профілем траси характеризують графіки, зображені на рисунках 5 і 6. Аналіз одержаних залежностей підтверджує вище зроблені висновки щодо впливу відкриття перемичок на режим роботи двониткового нафтопроводу. Додатково встановлено, що особливості профілю траси помітно змінюють завантаження кожної нитки. Так у випадку, що розглядається, відносна зміна завантаження першої нитки варіюється у діапазоні  $\pm 15\%$ , другої нитки  $\pm 6\%$ .

**Висновки**

1. Запропонований метод і програмне забезпечення дають змогу визначити пропускну здатність, завантаження кожної нитки та питомі витрати електроенергії для двониткового нафтопроводу за наявності міжниткових перемичок.

2. Встановлено, що відкриття міжниткових перемичок, які не мають помітного гідравлічного опору, не впливає на пропускну здатність двониткової нафтопровідної системи. У той же час, наявність відкритих перемичок спричинює значні перетоки нафти до 300 м³/год між нитками як через перемички, так і після трубопровідних комунікацій НПС.

3. Для умов рівнинного двониткового нафтопроводу з діаметрами  $DN 500$  і  $DN 700$  відносна, стосовно варіанту роботи без відкритих перемичок, максимальна зміна витрати нафти у першій нитці становить  $\pm 10\%$ , у другій нитці  $\pm 5\%$ . Для умов нафтопроводу з пересіченим профілем траси максимальна зміна витрати нафти у першій нитці досягає  $\pm 15\%$ , у другій нитці  $\pm 7\%$ .

**Література**

1. Середюк М. Д., Яновський С. Р. 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. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів / М. Д. Середюк, Й. В. Якимів, В. П. Лісафін: [підручник для ВНЗ]. — Івано-Франківськ. 2002. — 517 с.
3. Середюк М. Д. Визначення пропускної здатності кільканиткового газопроводу при роботі з відкритими перемичками на ділянках / М. Д. Середюк, А. І. Ксенич, М. І. Фик // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. — 2006. № 1(13). — С. 75–82.
4. Середюк М. Д. Визначення пропускної здатності кільканиткового газопроводу при роботі з відкритими перемичками на вході і виході КС / М. Д. Середюк, А. І. Ксенич, М. І. Фик // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. — 2006. № 2(14). — С. 110–118.
5. 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.
6. 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.
7. Середюк М. Д. Визначення пропускної здатності та енерговитратності двониткових нафтопровідних систем / М. Д. Середюк, С. Я. Григорський // Міжнародний науковий журнал. — 2018. — Т. 1, № 3 (43). — С. 81–87.