

Технічні науки

УДК 622.692.4

Середюк Марія Дмитрівна

доктор технічних наук,

професор кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Середюк Мария Дмитриевна

доктор технических наук,

профессор кафедры газонефтепроводов и газонефтехранилищ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Serediuk Mariia

Doctor of Technical Sciences, Professor of the

Department of Oil and Gas Pipelines and Storages Facilities

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**ГАЗОГІДРОДИНАМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСУ
ВИТІСНЕННЯ НАФТИ АЗОТОМ ПРИ КОНСЕРВУВАННІ
ДЛЯНКИ НАФТОПРОВОДУ
ГАЗОГІДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА
ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ АЗОТОМ ПРИ КОНСЕРВИРОВАНИИ
УЧАСТКА НЕФТЕПРОВОДА
GAS-HYDRODYNAMIC PROCESS CALCULATION REPLACEMENT
OF OIL WITH NITROGEN DURING CONSERVATION OIL PIPELINE
SECTIONS**

Анотація. Розроблено метод і програмне забезпечення, що дають можливість прогнозувати газогідродинамічні параметри витіснення нафти азотом при тимчасовому виведенні нафтопроводу із режиму транспортування в режим утримання в безпечному стані. Шляхом

математичного моделювання одержані закономірності зміни тиску на початку нафтопроводу і перед роздільником, витрати азоту, швидкості витіснення нафти від координати розміщення роздільника на трасі нафтопроводу.

Ключові слова: режим утримання у безпечному стані, газогідродинамічний розрахунок, нафта, консервант, азот, профіль траси.

Аннотація. Разработаны метод и программное обеспечение, позволяющие прогнозировать газогидродинамические параметры вытеснения нефти азотом при временном выводе нефтепровода из режима транспортировки в режим содержания в безопасном состоянии. Путем математического моделирования получены закономерности изменения давления в начале нефтепровода и перед разделителем, расхода азота и скорости вытеснения нефти от координаты размещения разделителя на трассе нефтепровода.

Ключевые слова: режим содержания в безопасном состоянии, газогидродинамический расчет, нефть, консервант, азот, профиль трассы.

Summary. A method and software have been developed that make it possible to predict the gas-hydrodynamic parameters of oil displacement by nitrogen during the temporary removal of the pipeline from the mode of transportation to the mode of holding in a safe state. By means of mathematical modeling the regularities of pressure change at the beginning of the oil pipeline and in front of the delimiter, nitrogen consumption, oil displacement rate from the coordinate of the delimiter location on the pipeline route are obtained.

Key words: gas-hydrodynamic calculation, oil, preservative, nitrogen, route profile

Вступ. Експлуатація системи магістральних нафтопроводів України характеризується неповним завантаженням, змінами обсягів транзиту нафти територією України, нерегулярними поставками нафти із альтернативних джерел на вітчизняні нафтопереробні підприємства. У таких умовах не виключено виникнення необхідності тимчасового переведення окремих ділянок магістральних нафтопроводів з режиму транспортування у режим утримання в безпечному стані. Реалізація зазначеної процедури регламентується низкою нормативно-правових актів. У [1] детально охарактеризовано методи протикорозійного захисту ділянок нафтопроводів, що тимчасово переведені у режим утримання в безпечному стані, узагальнено вимоги до рідких і газоподібних консервантів, розроблено алгоритми дій при зміні режиму експлуатації ділянок нафтопроводу та нафтоперекачувальних станцій. У той же час наявні документи не розкривають особливості гідродинамічних процесів, що супроводжують витіснення із порожнини нафтопроводу нафти і заміщення її рідким або газоподібним консервантом.

У роботі [2] нами запропоновано метод прогнозування режимних параметрів процесу витіснення нафти водою з врахуванням переміщення зони контакту трасою рельєфного нафтопроводу. Реалізація зазначеного методу дає змогу прогнозувати зміну швидкості руху механічних роздільників, які запускаються у зону контакту нафта-вода, визначати величину тиску на виході насосних установок, знаходити загальну тривалість процесу звільнення від нафти ділянки нафтопроводу.

Робота, що пропонується, містить результати досліджень щодо встановлення закономірностей газогідродинамічних режимів у випадку застосування як консерванту інертного газу - азоту при звільненні ділянки нафтопроводу від нафти.

Мета роботи – встановлення особливостей газогідродинамічного процесу при заміщенні нафти у нафтопроводі газоподібним консервантом – азотом.

Витіснення нафти із нафтопроводу газоподібним консервантом представляє собою нестационарний газогідродинамічний процес. Однак враховуючи невелику рекомендовану швидкість руху роздільника, що знаходиться у зоні контакту, зазначений процес з достатньою для практичних розрахунків точністю можна вважати квазістационарним [2,3].

При заміщенні нафти газоподібним консервантом зона їх контакту переміщується нафтопроводом, змінюючи його гідравлічний опір. Це спричинює зміну режимних параметрів ділянки нафтопроводу. Додатковим чинником, що суттєво впливає на параметри газогідродинамічного режиму витіснення нафти азотом, є характеристика траси нафтопроводу.

Методика, що пропонується, дає можливість встановити закономірності зміни витрати нафти та азоту, швидкості руху роздільника, тиску на початку нафтопроводу і в зоні контакту від місця розташування роздільника в порожнині трубопроводу.

Дослідження виконані методом математичного моделювання. Як модельний нафтопровід вибрано трубопровід довжиною $L = 100$ км з внутрішнім діаметром $D = 702$ мм. Фізичні властивості нафти, від якої звільняли нафтопровід, відповідали властивостям нафти, що транспортується нафтопроводами України: розрахункова густина $\rho_n = 878$ кг/м³, кінематична в'язкість $\nu_n = 41$ сСт. У вихідні дані уведений масив довжин від початку нафтопроводу до початків і кінців висхідних та низхідних ділянок траси нафтопроводу l_i і відповідні значення геодезичних позначок h_i , а також кількість ділянок n . Графічне зображення траси модельного нафтопроводу наведено на рисунку 1.

Фізичні властивості газоподібного консерванту азоту приймали такі: газова стала $R_a = 296,8$ Дж/(кг·К); коефіцієнт стисливості $z_a=1,0$; коефіцієнт динамічної в'язкості $\eta_a = 1,659 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Метод газогідродинамічного розрахунку витіснення із нафтопроводу нафти газоподібним консервантом – азотом складається із двох блоків, що пов'язані між собою умовами матеріального та енергетичного балансів.

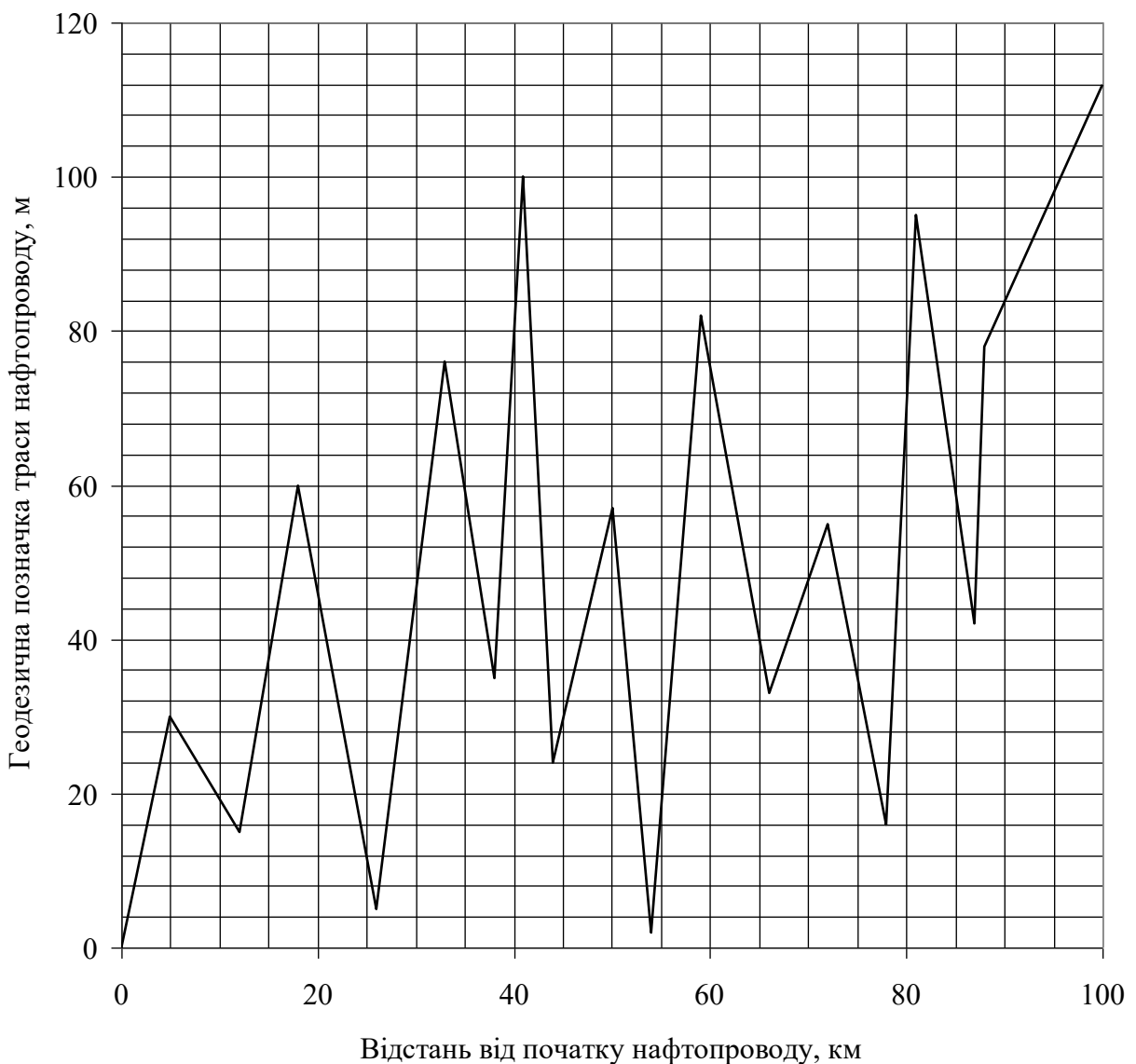


Рис. 1. Профіль траси модельного нафтопроводу

Блок гідродинамічного розрахунку частини нафтопроводу, що заповнена нафтою, передбачає визначення втрат тиску від тертя P_{ni} та загальних втрат тиску $P_{zag_{ni}}$ за відомої швидкості руху нафти при розміщенні роздільника на i -ій точці траси нафтопроводу.

$$P_{ni} = \lambda_{ni} \frac{(L - l_i)}{D} \frac{w_{ni}^2}{2} \rho_n, \quad (1)$$

$$\Delta h_{ni} = h_n - h_i, \quad (2)$$

$$P_{zag_{ni}} = 1,02 P_{ni} + \Delta h_{ni} \rho_n g + \Delta p_{роз} + P_k, \quad (3)$$

де λ_{ni} - коефіцієнт гідравлічного опору для частини нафтопроводу, що заповнена нафтою, функція числа Рейнольдса та шорсткості внутрішньої поверхні труби;

w_{ni} - швидкість руху нафти у нафтопроводі;

g - прискорення сили тяжіння;

$\Delta p_{роз}$ - втрати тиску на роздільнику;

P_k - технологічно необхідний тиск у кінці нафтопроводу.

Блок газодинамічного розрахунку частини нафтопроводу, що заповнена азотом, передбачає застосування таких залежностей:

для масової витрати азоту за відомих об'ємної витрати Q_{ai} , абсолютного тиску P_{ai} і температури T

$$M_{ai} = \frac{Q_{ai} P_{ai}}{z_a R_a T}, \quad (4)$$

для об'ємної витрати азоту за стандартних умов $T_{cm} = 293$ К і $P_{cm} = 101325$ Па

$$Q_{a_{cm_i}} = Q_{a_i} \frac{P_{a_i} T_{cm} z_{a_{cm}}}{P_{cm} T z_a}, \quad (5)$$

для числа Рейнольдса

$$Re_{a_i} = \frac{4M_{a_i}}{\pi D \eta_a}, \quad (6)$$

для коефіцієнта гідравлічного опору – формула Хофера, що є апроксимацією універсальної формули Колбрука-Уайта

$$\lambda_{a_i} = \frac{1}{\left\{ 2 \lg \left[\frac{4,518}{Re_{a_i}} \lg \left(\frac{Re_{a_i}}{7} \right) + \frac{k_e}{3,71D} \right] \right\}^2}, \quad (7)$$

для масової витрати за відомих початкового і кінцевого абсолютних тисків газу з урахуванням впливу профілю траси

$$M_{a_i} = \frac{\pi D^{2,5}}{4} \sqrt{\frac{p_{ноч_i}^2 - p_{кін_i}^2 [1 + a(h_i - h_0)]}{\lambda_{a_i} z_a R_a T l_i \left[1 + \frac{a}{2l_i} \sum [(h_i - h_0) + (h_{i-1} - h_0)] (l_i - l_{i-1}) \right]}}, \quad (8)$$

де

$$a = \frac{R_{нов}}{14,64 z_a R_a T}, \quad (9)$$

k_e - абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труби;

$R_{нов}$ - газова стала повітря.

У зоні контакту нафти і азоту знаходиться механічний роздільник. Із рівняння матеріального та енергетичного балансу випливає, що швидкість рідини і газу у зоні контакту однакові

$$w_{a_i} = w_{н_i}, \quad (10)$$

$$Q_{a_i} = Q_{н_i}, \quad (11)$$

та абсолютний кінцевий тиск для частини труби, заповненої газом дорівнює абсолютному початковому тиску для ділянки, що заповнена нафтою

$$P_{кінa_i} = P_{почн_i} \cdot \quad (12)$$

Наведені вище формули закладені в обчислювальний алгоритм і комп'ютерну програму, яка дає можливість визначати параметри газогідродинамічного режиму витіснення нафти із нафтопроводу азотом у довільний момент розташування роздільника на трасі нафтопроводу.

Обчислювальний алгоритм та комп'ютерна програма уможлиблює виконання газогідродинамічних розрахунків за різних режимів витіснення нафти з нафтопроводу азотом. За одним із варіантів підтримується стала швидкість руху нафти, а також роздільника у зоні контакту нафти і консерванту. Обчислювальний алгоритм передбачає виконання таких операцій. Задавали рекомендоване значення швидкості руху нафти $w_n = w_1$. Визначати загальні втрати тиску у початковий момент процесу витіснення, за якого весь трубопровід заповнений нафтою. Переходили від надлишкового до абсолютного початкового тиску. Зазначена величина абсолютного тиску повинна бути створена азотом на початку трубопроводу для здійснення початкової фази процесу витіснення нафти азотом.

Для довільної точки траси, використовуючи блок гідравлічного розрахунку, визначали загальні втрати тиску при перекачуванні нафти на довжині $(L - l_i)$ трубопроводу, знаходили абсолютний тиск у зоні контакту, який приймали рівним кінцевому тиску для газової частини трубопроводу. Потім, застосовуючи газодинамічний блок, обчислювати масову витрату азоту і величину початкового тиску у нафтопроводі з урахуванням особливостей профілю траси.

На рис. 2 наведено закономірності зміни початкового тиску азоту залежно від положення роздільника на трасі нафтопроводу для забезпечення витіснення нафти зі швидкістю 0,5 м/с. Рис. 3 ілюструє зміну різниці тисків азоту на початку трубопроводу і в зоні контакту від положення роздільника на трасі нафтопроводу для забезпечення зазначеної швидкістю руху роздільника.

На рис. 4 наведено залежність масової витрати азоту від положення роздільника на трасі нафтопроводу для забезпечення витіснення нафти зі швидкістю 0,5 м/с.

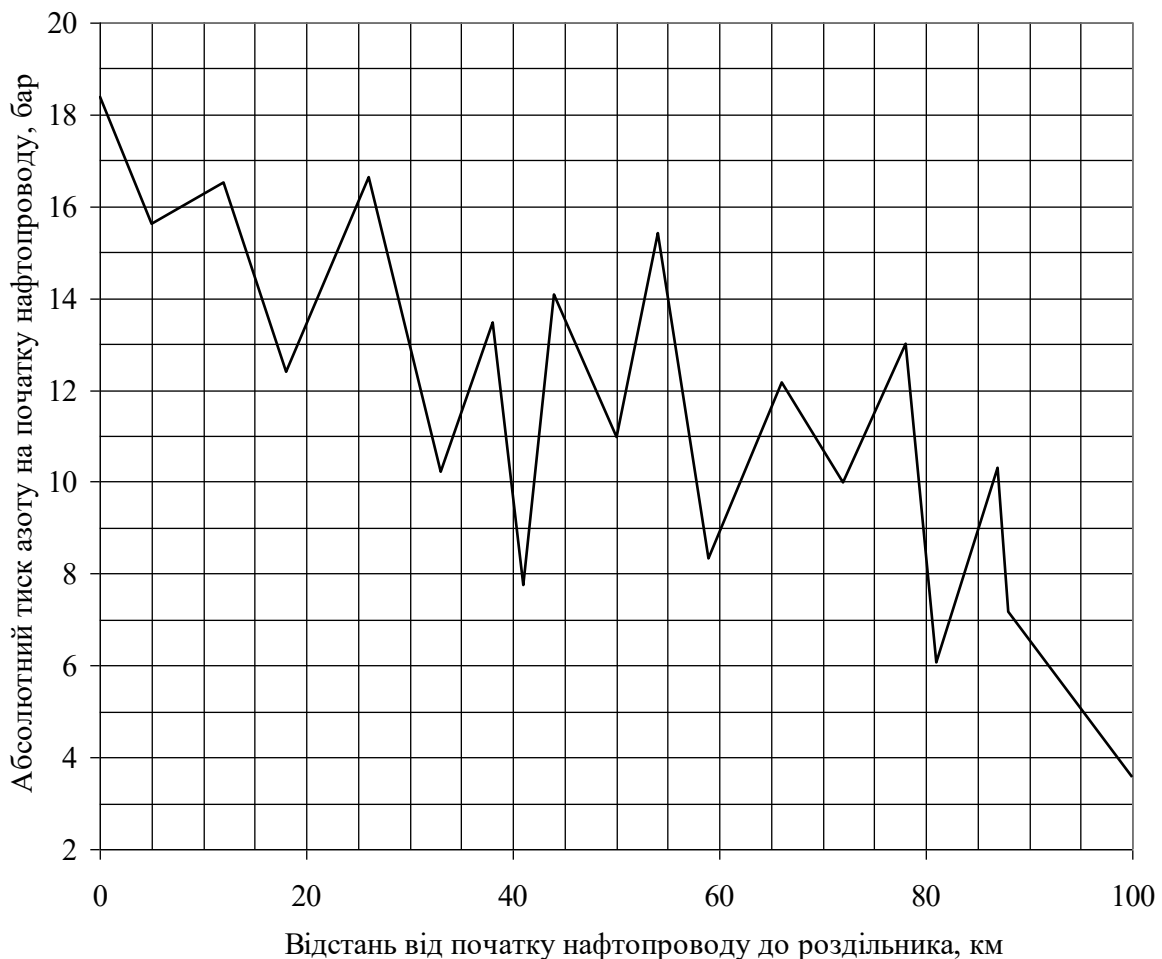


Рис. 2. Тиск азоту, який треба створити на початку нафтопроводу залежно від положення роздільника на трасі нафтопроводу для забезпечення витіснення нафти зі швидкістю 0,5 м/с

Як свідчить рис. 2, при загальній тенденції зниження величини необхідного значення тиску азоту на початку нафтопроводу для трубопроводу з пересіченим профілем траси спостерігається складний закон зміни зазначеного параметра, характер якого відповідає зміні геодезичних позначок точок траси.

Щоб розпочати процес витіснення нафти необхідно створити на початку нафтопроводу абсолютний тиск азоту 18,4 бар.

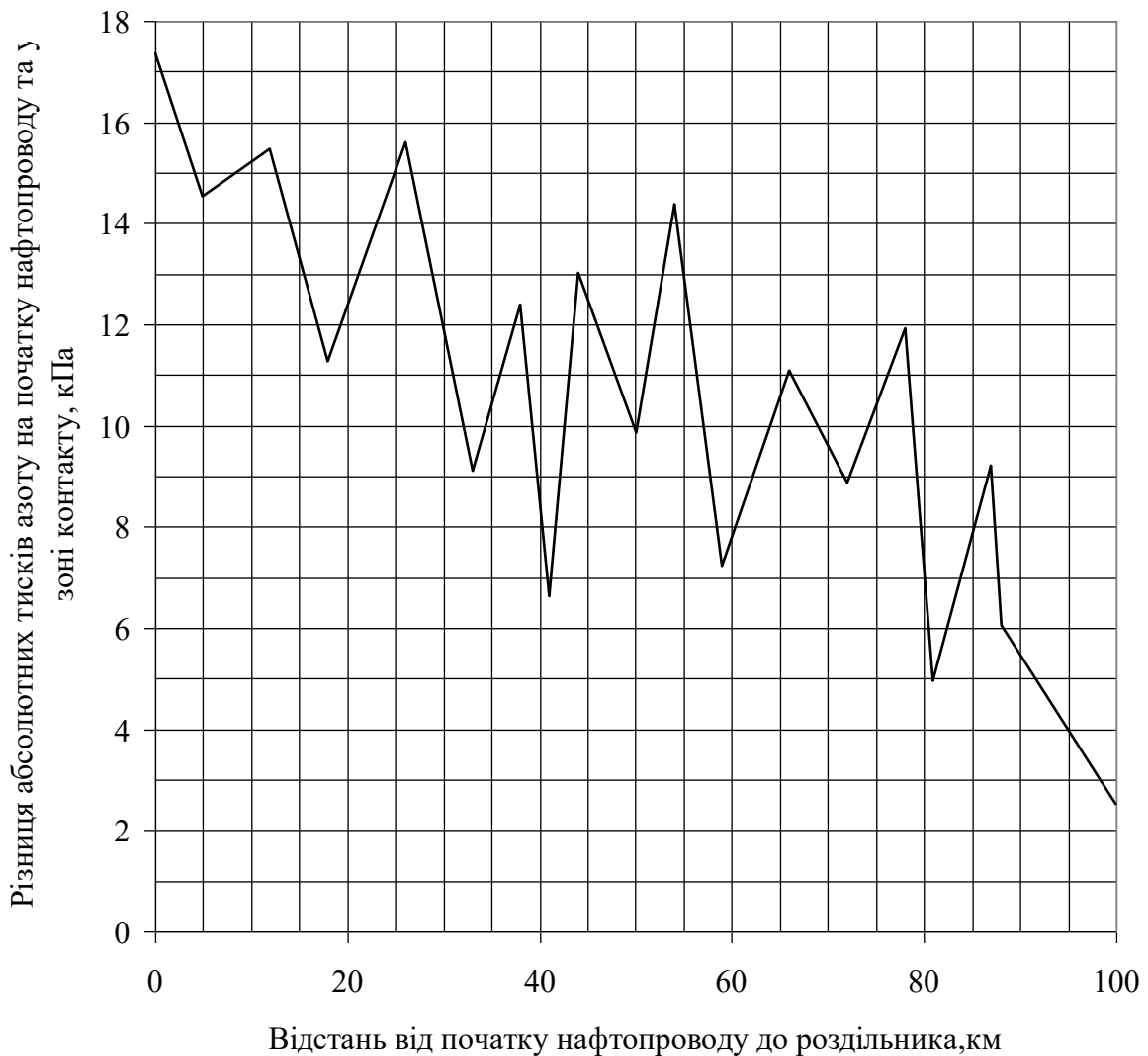


Рис. 3. Різниця тисків азоту на початку трубопроводу та у зоні контакту залежно від положення роздільника на трасі нафтопроводу для забезпечення витіснення нафти зі швидкістю 0,5 м/с

Як свідчить рис. 3, при витісненні нафти із нафтопроводу азотом зі сталою швидкістю руху нафти 0,5 м/с різниця початкового тиску і тиску перед роздільником суттєво залежить від місця розміщення зони контакту на трасі і змінюється у діапазоні від 17,4 кПа до 2,5 кПа.

Розрахунки засвідчили, що за наведеної вище технології витіснення нафти азотом із модельного нафтопроводу загальна тривалість процесу становить 55,6 год.

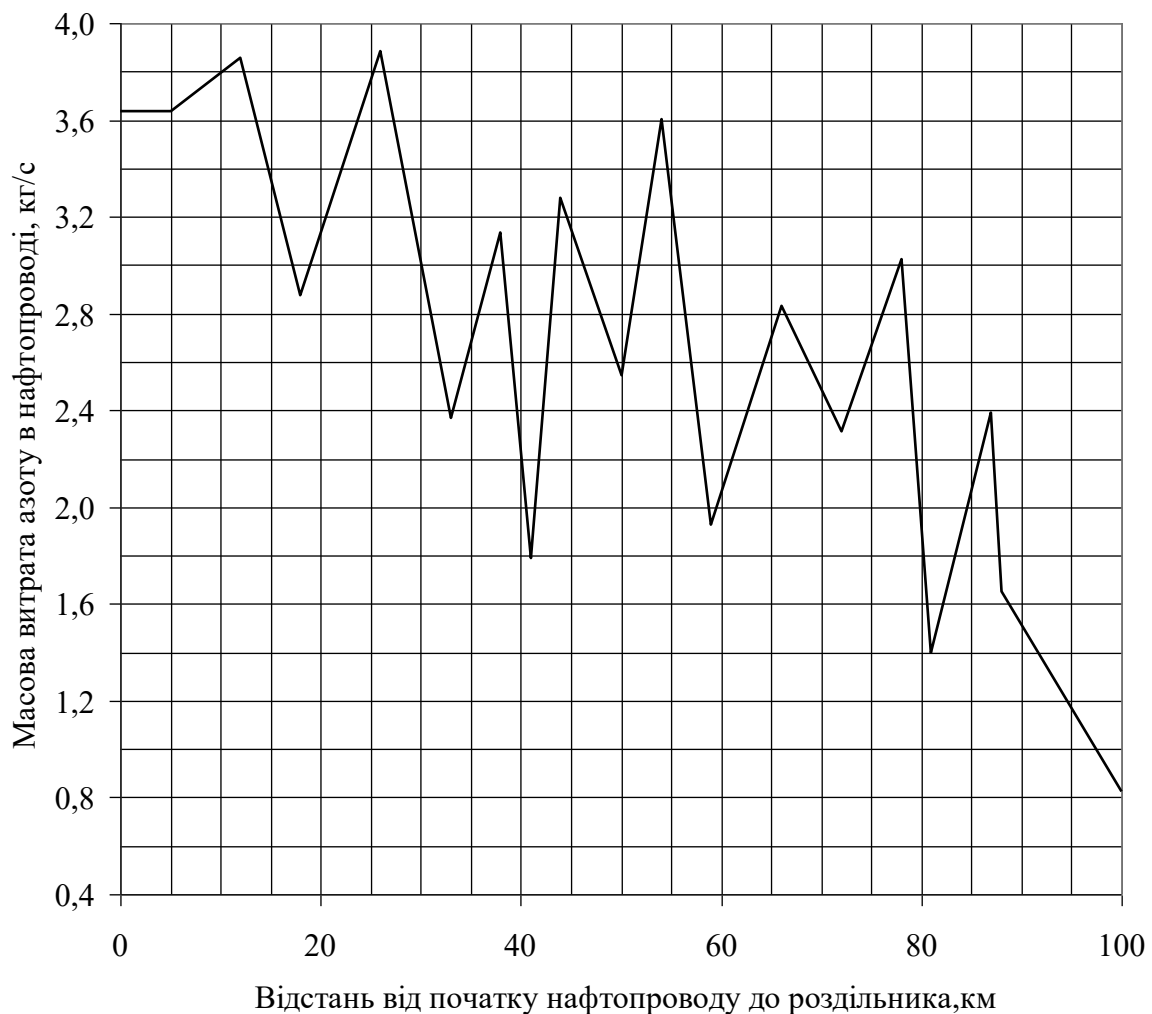


Рис. 4. Масова витрата азоту залежно від положення роздільника на трасі нафтопроводу для забезпечення витіснення нафти зі швидкістю 0,5 м/с

Як свідчить рис. 4, при витісненні нафти із нафтопроводу азотом зі сталою швидкістю руху нафти 0,5 м/с необхідним стане суттєве

регулювання масової витрати азоту у трубопроводі залежно від місця розміщення зони контакту та роздільника на трасі. Діапазон зміни зазначеного параметра становить від 3,9 кг/с до 0,8 кг/с. При цьому об'ємна витрата азоту у зоні контакту є величиною сталою і становить $0,2 \text{ м}^3/\text{с} = 697 \text{ м}^3/\text{Год}$.

Витіснення нафти азотом із порожнини нафтопроводу може відбуватись також за сталого початкового тиску та змінної швидкості руху нафти та роздільника. За даної технології алгоритм газогідродинамічного розрахунку передбачає визначення абсолютного початкового тиску азоту, який відповідає моменту заповнення всієї порожнини трубопроводу нафтою $p_{\text{поч}_a}$. У подальших розрахунках тиск на початку нафтопроводу $p_{\text{поч}_a}$ вважається сталою величиною.

Реалізують метод послідовних наближень за тиском азоту перед роздільником. Як перше наближення приймають

$$\text{для } i = 1 \quad p_{\text{кін}_{a1}} = p_{\text{поч}_a} - \Delta p_{\text{min}}, \quad (13)$$

$$\text{для } i > 1 \quad p_{\text{кін}_{ai}} = p_{\text{кін}_{ai-1}}. \quad (14)$$

Так як коефіцієнт гідравлічного опору залежить від невідомої масової витрати азоту у трубопроводі, то як перше наближення приймають $\lambda_{a_i} = 0,01$. Використовуючи газодинамічний блок, визначають масову витрату азоту, число Рейнольдса, уточнене значення коефіцієнта гідравлічного опору. Якщо розраховане значення зазначеного коефіцієнта відрізняється від наперед заданого більше, ніж на задану точність, то ітерації повторюють до досягнення необхідної точності обчислень.

У результаті одержують об'ємну витрату і швидкість руху азоту перед роздільником за прийнятого значення абсолютного тиску $p_{\text{кін}_{ai}}$.

Враховуючи умову рівності швидкостей азоту і нафти у зоні контакту, визначають загальні втрати тиску на ділянці нафтопроводу, що заповнена нафтою $P_{заг_{нi}}$.

Якщо величина тиску зоні контакту менша за загальні втрати тиску $P_{заг_{нi}}$, то збільшують, а в протилежному випадку зменшують значення абсолютного тиску азоту у зоні контакту $P_{кін_{аi}}$.

При досягненні необхідної точності обчислень одержують параметри режиму витіснення нафти азотом із нафтопроводу при сталому початковому тиску і змінній швидкості при розміщенні роздільника на i -ій точці траси. На рисунку 5 наведено закономірності зміни швидкості руху роздільника при витісненні нафти азотом за сталого тиску на початку нафтопроводу без регулювання та для випадку часткового регулювання.

Як свідчить рис. 5, у випадку підтримання сталого тиску азоту на початку нафтопроводу спостерігається тенденція зростання швидкості руху нафти і роздільника. Розпочинаючи з 81 км траси вона перевищує 2 м/с, а у кінці витіснення нафти досягає 35 м/с. Таке зростання швидкості є неприпустимим. Практика експлуатації магістральних нафтопроводів обмежує швидкості руху нафти і поточних пристроїв у діапазоні від 0,5 до 2 м/с. На рисунку 5 показано динаміку зміни швидкості нафти у нафтопроводу без регулювання та при обмеженні її до величини 2 м/с включно.

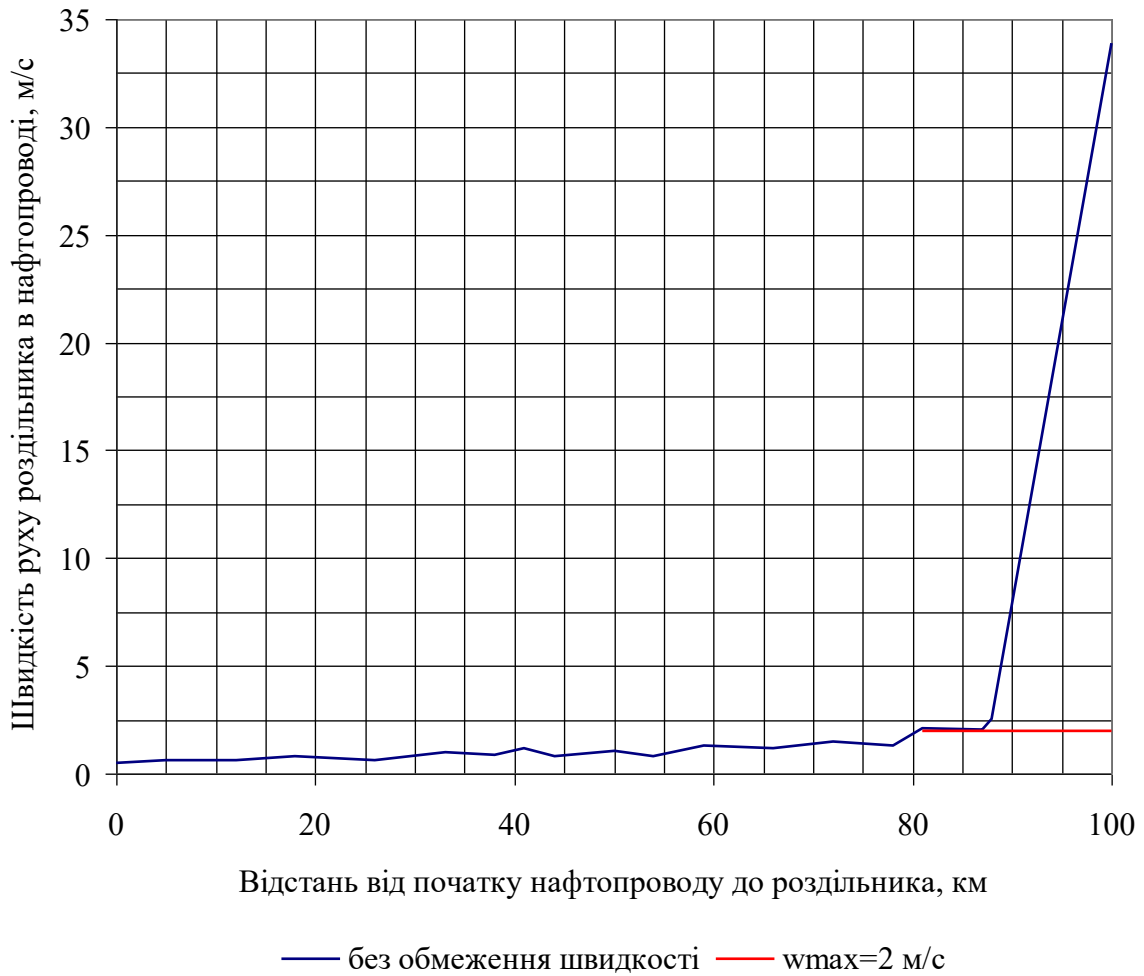


Рис. 5. Швидкість руху роздільника при витісненні нафти азотом за сталого тиску на початку нафтопроводу та у випадку його часткового регулювання

Рис. 6 ілюструє закономірності зміни масової витрати азоту при витісненні нафти за сталого тиску на початку нафтопроводу та у випадку його часткового регулювання.

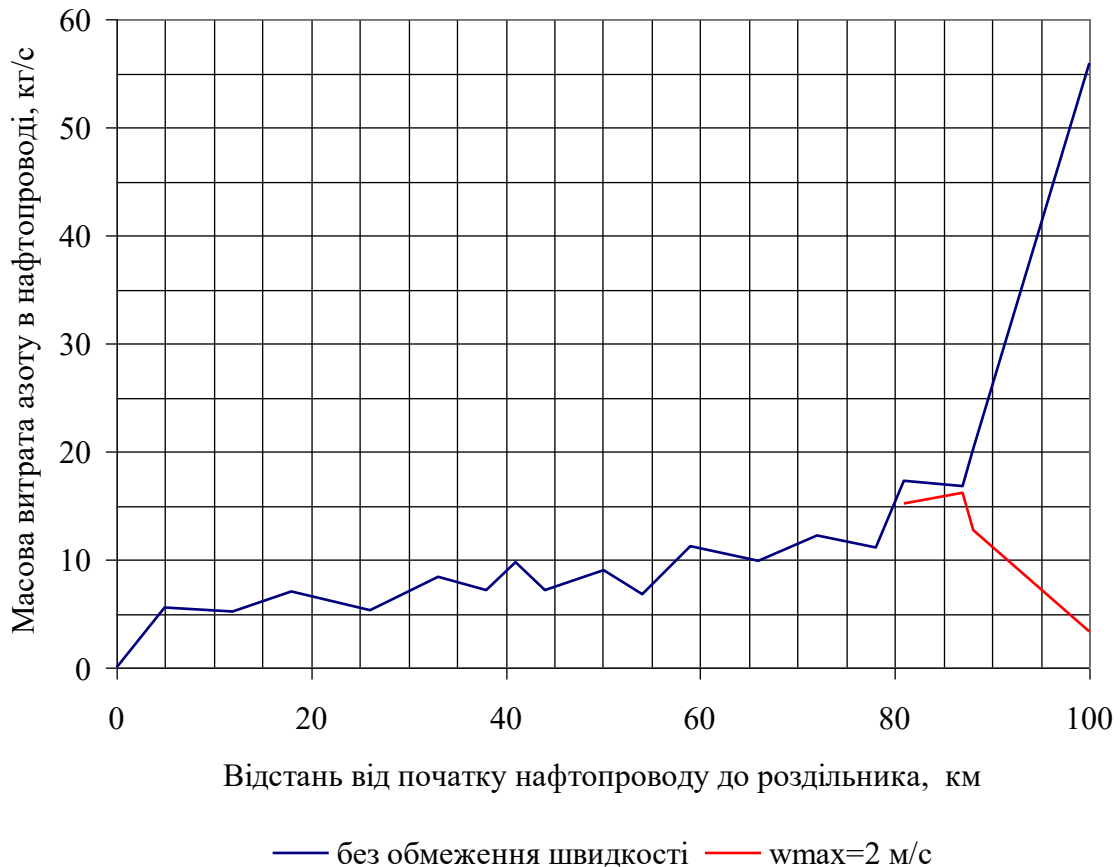


Рис. 6. Масова витрата азоту при витісненні нафти азотом за сталого тиску на початку нафтопроводу та у випадку його часткового регулювання з метою обмеження швидкості руху роздільника

Із рис. 6 випливає, що якщо не регулювати швидкість витіснення нафти азотом із нафтопроводу, то на завершальному етапі процесу прийдеться суттєво збільшити витрату азоту.

На рис. 7 зображено різниця початкового тиску та тиску у зоні контакту при витісненні нафти азотом за сталого тиску на початку нафтопроводу та у випадку його часткового регулювання.

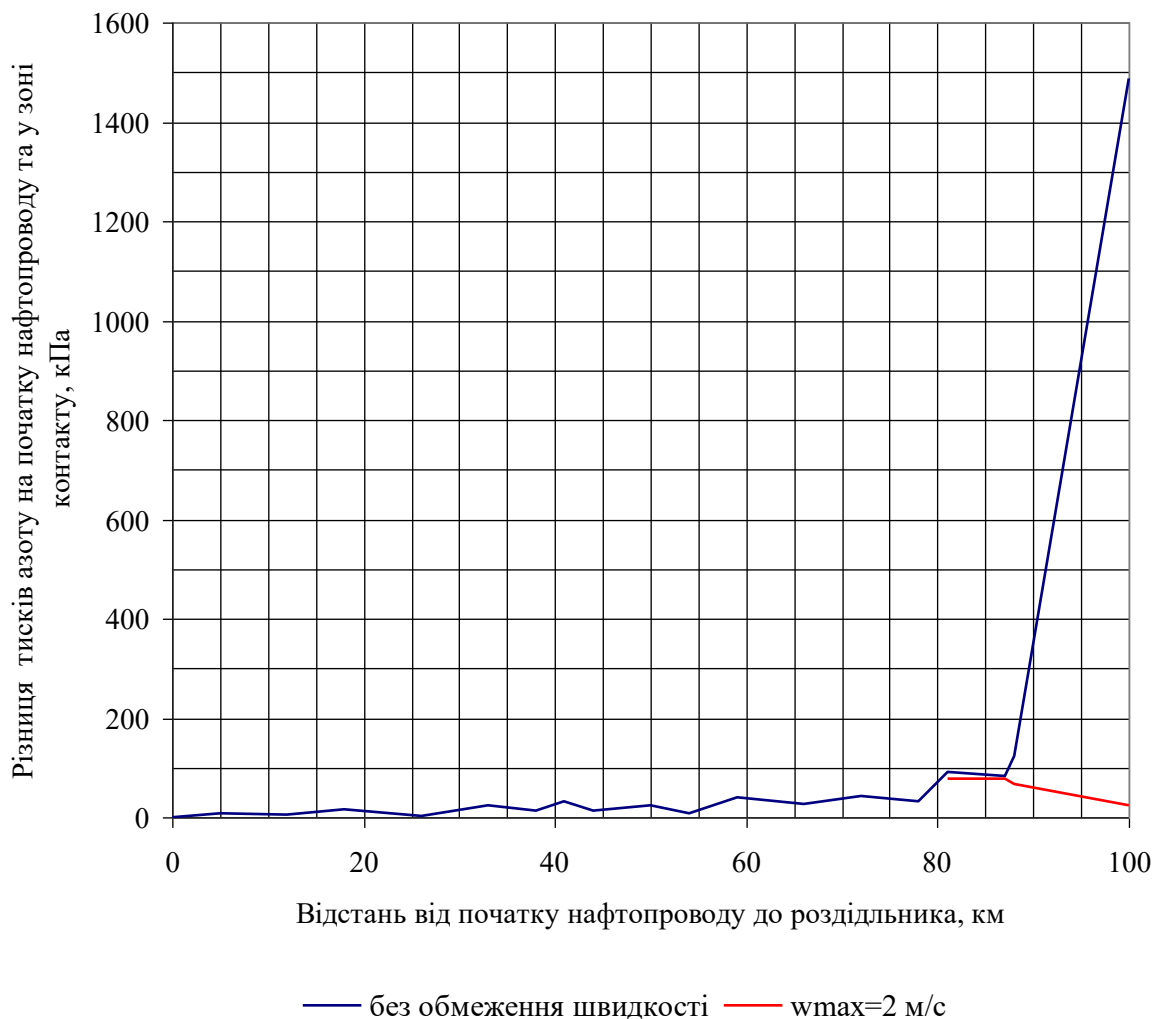


Рис. 7. Різниця початкового тиску та тиску у зоні контакту при витісненні нафти азотом за сталого тиску на початку нафтопроводу та у випадку його часткового регулювання

Рис. 8 ілюструє залежність між відстанню від початку нафтопроводу до роздільника і часом від початку процесу витіснення нафти за технології, що досліджується.

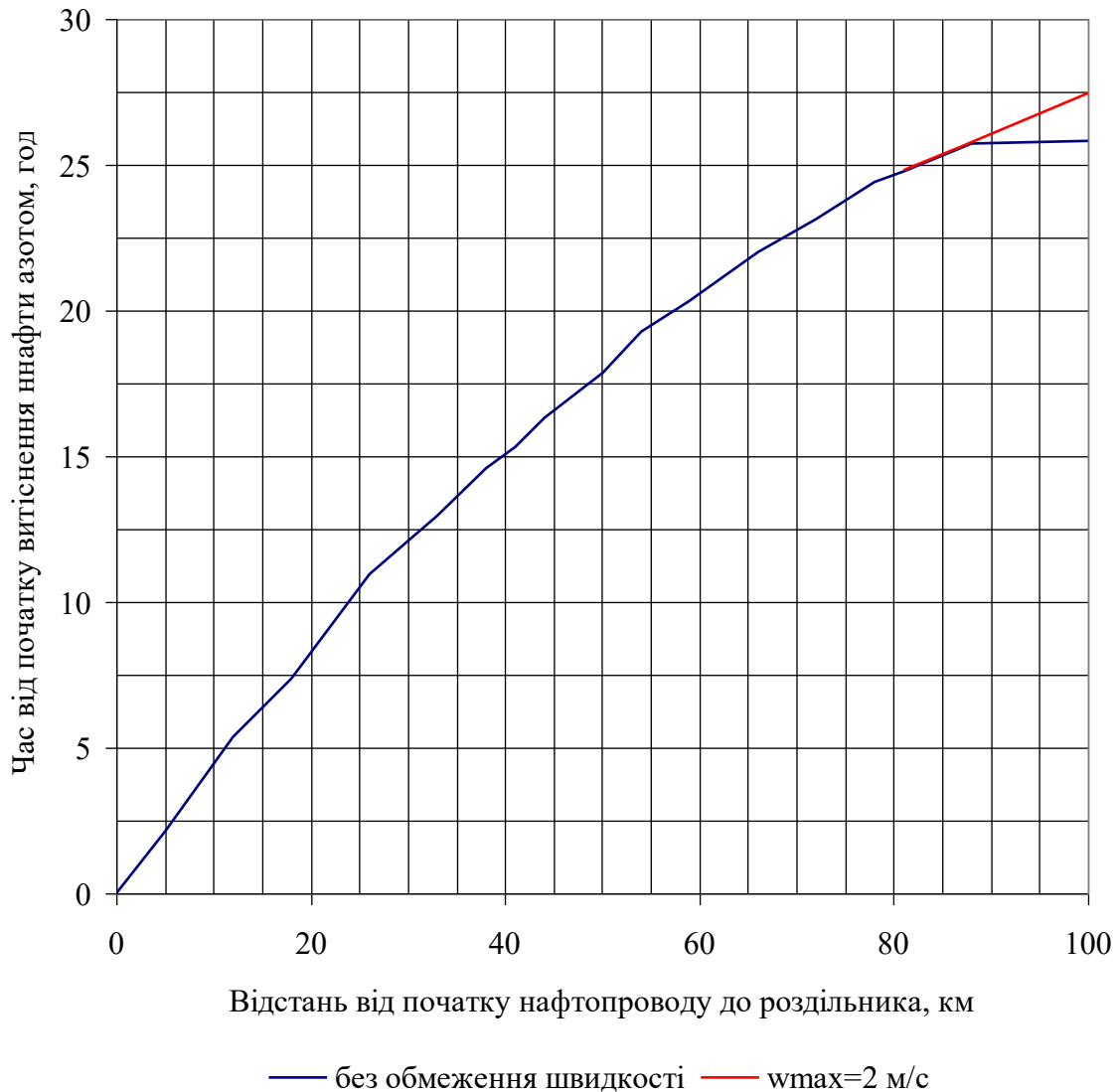


Рис. 8. Залежність між відстанню від початку нафтопроводу до роздільника і часом від початку процесу витіснення нафти

Як свідчить рис. 8, загальна тривалість процесу витіснення нафти азотом становить 26 год без обмеження швидкості і 27,5 год, якщо швидкість руху роздільника на завершальному етапі процесу не буде перевищувати 2 м/с.

Вибір конкретної технології заміщення нафти у нафтопроводі азотом залежить від наявного типу компресорних установок, газодинамічних їх характеристик, наявності пристроїв для регулювання витрати і тиску азоту.

Висновки.

1. Одним із ефективних варіантів консервування ділянок нафтопроводу при тимчасовому переведенні із режиму транспортування в режим утримання в безпечному стані є застосування, як консерванту, інертного газу – азоту.

2. При заміщенні нафти азотом реалізується нестационарний газогідродинамічний процес, який при проведенні практичних розрахунків можна вважати квазістационарним.

3. Запропонована методика газогідродинамічного розрахунку нафтопроводу при заміщенні нафти азотом дає можливість прогнозувати швидкість витіснення нафти, необхідний тиск азоту на початку нафтопроводу та в зоні контакту, витрату азоту для кожного моменту процесу з урахуванням особливостей профілю траси трубопроводу.

Література

1. СОУ МПЕ 60.3-00013741-003-2008. Порядок виведення з експлуатації, консервування та підтримання режиму консервування відключених ділянок нафтопроводів.
2. Середюк М. Д., Івоняк А. С. Гідравлічні розрахунки процесу витіснення нафти з першої нитки нафтопроводу Лисичанськ - Тихорецьк. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 2003. № 3(8). С. 103-108.
3. Serediuk M. D. Peculiarities of the operation of the oil pipeline in the process of its cleaning from paraffin deposition. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2021. Volume 106, Issue 2. P. 77-85.