

Технічні науки

УДК 622.692.4

Середюк Марія Дмитрівна

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри газонафтопроводів та газонафтохранилищ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Середюк Мария Дмитриевна

доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры газонефтепроводов и газонефтехранилищ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Serediuk Mariya

Doctor of Technical Sciences, Professor of the

Department Oil and Gas Pipelines and Storage Facilities

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**ВПЛИВ ЗМІНИ ШВИДКОСТІ НА ЗМІШУВАННЯ РІЗНОСОРТНИХ
РІДИН У ПРОЦЕСІ ЇХ ПОСЛІДОВНОГО ПЕРЕКАЧУВАННЯ
ТРУБОПРОВОДОМ**

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ НА СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕ
РАЗНОСОРТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕКАЧКИ ПО ТРУБОПРОВОДУ**

**THE FLOW VELOCITY CHANGER INFLUENCE ON THE DIFFERENT
KINDS OF LIQUIDS MIXING DURING ITS THE PIPELINES IN SERIES
TRANSPORTATION**

Анотація. Розроблено метод і програмне забезпечення, які дають змогу врахувати вплив зміни швидкості на інтенсивність сумішоутворення у процесі послідовного перекачування різносортних нафт або нафтопродуктів у трубопроводі. Запропоновано розрахункові формули для

розподілу концентрацій рідин довжиною зони суміші, для об'єму суміші та її розкладання в кінцевому пункті трубопроводу.

Ключові слова: нафтопровід, послідовне перекачування, зміна швидкості, рівняння турбулентної дифузії, ефективний коефіцієнт змішування, об'єм суміші

Аннотація. Разработан метод и программное обеспечение, позволяющие учитывать влияние изменения скорости на интенсивность смесеобразования в процессе последовательной перекачки разнородных нефтей или нефтепродуктов по трубопроводу. Предложены расчетные формулы для распределения концентраций жидкостей по длине зоны смешения, для объема смеси и ее раскладки на конечном пункте трубопровода.

Ключевые слова: нефтепровод, последовательная перекачка, изменение скорости, уравнение турбулентной диффузии, эффективный коэффициент смешения, объем смеси.

Summary. The methodology and computer software are provided, which can to indicate the influence of flow velocity changes on the intensiveness of mixture creation during different sorts of oil and oil products transportation by pipelines in series. The applied formulas are proposed to estimate the concentration profiles of mixture components along the mixture zone length, volume of mixture and to characterize the process of it's separation at the end-point of the pipeline.

Key words: pipeline, transportation in series, velocity change, equation of turbulent diffusion, the effective coefficient of mixing, volume of mixture.

Вступ. Магістральні нафтопроводи України сьогодні працюють зі значним недовантаженням, що суттєво знижує енергоефективність їх експлуатації. Одним із шляхів збільшення завантаження нафтопроводів і

зменшення енерговитратності трубопровідного транспорту є впровадження прогресивної технології послідовного перекачування різносортних нафт. Зазначена технологія широко застосовується у світовій практиці як при трубопровідному транспорті різносортних нафтопродуктів, так і при транспортуванні нафт різних сортів.

В Україні послідовне перекачування світлих нафтопродуктів в кінці двадцятого століття здійснювалось системою магістральних нафтопродуктопроводів. За останні роки на магістральних нафтопроводах України проведено низку успішних послідовних перекачувань партій нафт з альтернативних джерел постачання.

При значних перевагах технології послідовного перекачування вона має недолік, а саме обов'язкове змішування різносортних рідин у зоні їх контакту у трубопроводі. Об'єм суміші різносортних рідин залежить від багатьох чинників, у тому числі від режимних параметрів експлуатації трубопроводу. Основним завданням при реалізації послідовного перекачування різносортних нафт або нафтопродуктів є досягнення мінімального об'єму суміші. Це визначає теоретичне та практичне значення дослідження закономірностей сумішоутворення різносортних рідин у трубопроводі за їх послідовного перекачування [1; 2].

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідженням впливу різних чинників на процес сумішоутворення різносортних рідин присвячено низку робіт. Так у роботах [3; 4] встановлено вплив зміни температури послідовно транспортованих нафт на процес утворення суміші. Роботи [5; 6] присвячено дослідженням ефективності застосування рідинних розділювачів з метою покращення якості суміші і полегшення її розкладання у кінці трубопроводу. У роботах [7; 8] розроблено методи визначення пропускної здатності нафтопроводів за неусталених режимів послідовного перекачування різносортних нафт.

Інтенсивність сумішоутворення послідовно транспортованих рідин суттєво залежить від режиму їх руху в трубопроводі, що визначається значенням числа Рейнольдса. За сталого діаметра трубопроводу та в'язкості транспортованих рідин режим руху залежить від витрати, що пропорційна швидкості руху рідин. У процесі пересування зони контакту різносортних рідин по довжині трубопроводу швидкість руху є величиною змінною. Це впливає на розподіл концентрацій різносортних рідин по довжині зони суміші, а отже, і на об'єм суміші. Не дивлячись на значну кількість робіт щодо реалізації технології послідовного перекачування особливості сумішоутворення різносортних рідин зі змінною швидкістю руху в трубопроводі вимагають додаткового розгляду.

Метою досліджень є встановлення впливу зміни швидкості руху послідовно транспортованих рідин на закономірності їх сумішоутворення у трубопроводі.

Для досягнення мети необхідно розробити метод і програмне забезпечення для розрахунку з урахуванням динаміки зміни швидкості руху в трубопроводі таких параметрів:

- розподілу концентрацій різносортних рідин по довжині зони суміші;
- об'єму суміші різносортних рідин;
- об'єму домішок, що надходять у резервуари з товарними продуктами на кінцевому пункті трубопроводу.

Виклад основного матеріалу. Приймаємо, що на початку процесу послідовного перекачування вся порожнина трубопроводу заповнена однією із транспортованих рідин. Позначимо першу у контакті рідину – рідиною А. У певний момент часу розпочинається закачування у трубопровід другої рідини – рідини В. У зоні їх контакту утворюється суміш двох рідин, об'єм якої зростає при переміщенні від початку до кінця трубопроводу.

Процес змішування різносортних рідин при послідовному перекачуванні трубопроводом зазвичай описують рівнянням одновимірної турбулентної дифузії, яке відносно рухомої системи координат, що переміщається зі сталою швидкістю потоку w , має вигляд

$$\frac{\partial K_b}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 K_b}{\partial \bar{x}^2}, \quad (1)$$

де K_b - миттєва концентрація другої у контактній рідині;

t - час змішування, що відлічується від моменту зміни сортів рідин на початку трубопроводу;

\bar{x} - відстань від початку рухомої системи координат до перерізу, в якому необхідно знайти концентрацію рідин;

D_e - ефективний коефіцієнт змішування рідин.

Як засвідчують результати теоретичних досліджень [7-9], процес зміни послідовно транспортованих рідин у трубопроводі при їх послідовному перекачуванні супроводжується помітною зміною швидкості. Нами розроблені метод та комп'ютерна програма, які враховують зазначений фактор і дають змогу визначити пропускну здатність магістрального нафтопроводу та питомі витрати електроенергії при реалізації технології послідовного перекачування нафти різних сортів. Методика включає такі елементи:

- блок математичного моделювання фізичних властивостей і характеристик насосних агрегатів за сталої і змінної обертової частоти;
- блок розрахунку параметрів роботи насосних агрегатів і нафтоперекачувальних станцій (НПС);
- блок гідравлічного розрахунку лінійної частини нафтопроводу з урахуванням переміщення зони контакту двох сортів нафти;
- блок урахування технологічних обмежень тиску і витрати нафти та ув'язування режимів роботи НПС і лінійної частини нафтопроводу;

- блок визначення енергоефективності експлуатації нафтопроводу.

Блок гідравлічного розрахунку лінійної частини нафтопроводу з урахуванням переміщення зони контакту двох сортів нафти базується на застосуванні рівняння балансу тисків та модифікованої формули Колбрука для обчислення коефіцієнта гідравлічного опору [10].

Блок розрахунку режиму роботи нафтоперекачувальної станції (НПС) включає запропоновані нами математичні моделі для напірної характеристики та кривої коефіцієнта корисної дії (ККД) нафтових насосів за довільного значення обертової частоти ротора насоса [11; 12].

Для модельного нафтопроводу довжиною 100 км з внутрішнім діаметром 0,702 м досліджено гідродинамічні параметри послідовного перекачування двох сортів нафти з різними значеннями розрахункової густини і в'язкості.

За результатами багатоваріантних розрахунків для різних положень зони контакту двох сортів нафти на трасі нафтопроводу одержано графічні залежності пропускної здатності та питомих витрат електроенергії на реалізацію послідовного перекачування двох сортів нафти. Розрахунки засвідчили що переміщення зони контакту двох сортів нафти порожниною нафтопроводу спричинює помітну зміну пропускної здатності, яка може досягати 15-20 %. Залежність пропускної здатності нафтопроводу від положення зони контакту різносортих нафт зазвичай близька до лінійної.

Таким чином, методом математичного моделювання доведено, що за умов послідовного перекачування різносортих нафт магістральними нафтопроводами України залежність між витратою нафти та лінійною координатою розміщення зони контакту нафт адекватно описується так:

$$Q = Q_0 + bx_0, \quad (2)$$

де Q_0, b - коефіцієнти математичної моделі, значення яких залежать від геометричних характеристик трубопроводу, особливостей траси,

характеристик насосного обладнання, властивостей послідовно транспортованих рідин тощо;

x_o – відстань від початку трубопроводу до середини зони суміші різносортних рідин.

Коефіцієнт Q_o у формулі (2) відповідає пропускній здатності нафтопроводу за умови перекачування рідини А.

Помітна зміна робочої витрати, а отже і швидкості руху в трубопроводі у процесі переміщення зони контакту різносортних рідин спричинює зміну інтенсивності утворення суміші.

Для випадку змінної у часі швидкості руху послідовно транспортованих трубопроводом рідин $w(t)$ рівняння одномірної турбулентної дифузії набуває вигляду [1-2; 9]

$$\frac{\partial K_b}{\partial t} + w(t) \frac{\partial K_b}{\partial x} = D_e(t) \frac{\partial^2 K_b}{\partial x^2}, \quad (3)$$

де x - відстань від початку трубопроводу до перерізу, в якому необхідно знайти концентрацію послідовно транспортованих рідин.

Із рівняння нерозривності потоку рідини можна записати:

$$w(t) = \frac{dx_o}{dt} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (4)$$

де d - внутрішній діаметр трубопроводу.

Формула (4) з урахуванням виразу (2) набуває вигляду

$$\frac{dx_o}{dt} = \frac{4}{\pi d^2} (Q_o + bx_o). \quad (5)$$

Розв'язуємо диференціальне рівняння (5), у результаті одержуємо аналітичну залежність між часом переміщення зони контакту двох різносортних рідин та відстанню від початку трубопроводу до середини зони суміші

$$t = \frac{\pi d^2}{4b} \ln \left(1 + \frac{b}{Q_o} x_o \right). \quad (6)$$

Виразимо відстань від початку трубопроводу до середини зони суміші послідовно транспортованих нафт як функцію часу їх змішування у трубопроводі

$$x_o = \frac{Q_o}{b} \left[1 - \left(1 - \frac{8bt}{\pi d^2} \right)^{1/2} \right]. \quad (7)$$

Використовуючи рівняння (4) з урахуванням виразу (7), одержуємо закономірність зміни швидкості руху послідовно транспортованих рідин як функцію часу переміщення середини зони суміші двох різносортних рідин

$$w(t) = \frac{4Q_o}{\pi d^2} \left(1 - \frac{8bt}{\pi d^2} \right)^{-1/2} \quad (8)$$

Вводимо позначення

$$\alpha^2 = \frac{D_e(t)}{w(t)}, \quad (9)$$

$$\tau = \int_0^t w(t) dt. \quad (10)$$

З урахуванням (9) і (10) рівняння турбулентної дифузії набуває вигляду

$$\frac{\partial K_b}{\partial \tau} + \frac{\partial K_b}{\partial x} = \alpha^2(\tau) \frac{\partial^2 K_b}{\partial x^2}. \quad (11)$$

Шляхом уведення нових змінних

$$y = x - \tau, \quad (12)$$

$$\varphi = \int_0^\tau \alpha^2(\tau) d\tau, \quad (13)$$

зводимо диференціальне рівняння (11) до такого вигляду

$$\frac{\partial K_b}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 K_b}{\partial y^2}. \quad (14)$$

Розв'язок рівняння (14) має вигляд [1; 2]

$$K_b = \frac{1}{2}[1 - \Phi(z)], \quad (15)$$

де $\Phi(z)$ - інтеграл ймовірностей;

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\gamma^2} d\gamma, \quad (16)$$

z - аргумент інтегралу ймовірностей,

$$z = \frac{x - \tau}{2\sqrt{\varphi}}. \quad (17)$$

Для ефективного коефіцієнта змішування застосуємо запропоновану нами у роботі [3] узагальнену математичну модель, в яку вводимо швидкість руху замість робочої витрати

$$D_e = A(wd)^{1-n} v_{cp}^n, \quad (18)$$

де v_{cp} - кінематична в'язкість суміші послідовно транспортованих рідин у співвідношенні 1:1 за об'ємом;

A, n - коефіцієнти математичної моделі.

Перекачування різносортих нафт відбувається зазвичай у зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму. У цьому випадку маємо такі значення коефіцієнтів:

- у випадку застосування формули А. Ш. Асатурыяна $A = 17,4$; $n = 1/3$;
- у випадку застосування формули М. В. Нечваля $A = 18,7$; $n = 0,339$.

Малов'язкі нафтопродукти транспортуються трубопроводами зазвичай у зоні змішаного тертя турбулентного режиму. У цьому випадку будемо мати такі значення коефіцієнтів математичної моделі (18)

$$A = 28,7 \cdot \left(10^{0,127 \lg \frac{k_e}{d}} - 0,627 \right)^{0,378}; \quad n = 0,292,$$

де k_e - абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труби.

Із формули (10) випливає, що аналітичний вираз для змінної τ у рівнянні турбулентної дифузії співпадає з виразом для відстані від початку трубопроводу до середини зони суміші різносортних рідин x_o . У результаті підстановки формули (7) у вираз (8) після математичних перетворень одержуємо швидкість руху рідин як функцію змінної τ

$$w(\tau) = \frac{4Q_o}{\pi d^2} \left(1 - \frac{b}{Q_o} \tau\right)^{-1}. \quad (19)$$

З урахуванням (18) і (19) вираз для визначення змінної φ в рівнянні турбулентної дифузії (14) набуває вигляду

$$\varphi = A v_{cp}^n d^{1-n} \left(\frac{\pi d^2}{4Q_o}\right)^n \int_0^\tau \left(1 - \frac{b}{Q_o} \tau\right)^n d\tau. \quad (20)$$

Після інтегрування виразу (20), одержуємо

$$\varphi = \frac{A v_{cp}^n d^{1-n}}{(n+1)} \left(\frac{\pi d^2}{4Q_o}\right)^n \frac{Q_o}{b} \left[1 - \left(1 - \frac{b}{Q_o} \tau\right)^{n+1}\right]. \quad (21)$$

Для випадку послідовного перекачування різносортних нафт в зоні гідравлічно гладких труб формула (21) матиме вигляд

$$\varphi = 13,05 v_{cp}^{1/3} d^{2/3} \left(\frac{\pi d^2}{4Q_o}\right)^{1/3} \frac{Q_o}{b} \left[1 - \left(1 - \frac{b}{Q_o} \tau\right)^{4/3}\right]. \quad (22)$$

Закономірності розподілу концентрацій послідовно транспортованих рідин в трубопроводі дають змогу одержати формулу для об'єму суміші.

Позначимо відстань від рухомої системи координат до довільного перерізу зони суміші різносортних рідин $\bar{x} = x - \tau$. Тоді довжина суміші рідин з урахуванням знаку при \bar{x}_2 за певних граничних концентрацій дорівнює

$$l_{сум} = \bar{x}_1 - \bar{x}_2. \quad (23)$$

Враховуючи вираз (19), одержуємо формулу для визначення об'єму суміші різносортних рідин за змінної швидкості їх руху у трубопроводі

$$V_{\text{сум}} = \frac{\pi d^2}{2} (z_1 - z_2) \sqrt{\varphi}, \quad (24)$$

де z_1, z_2 - аргументи інтеграла ймовірностей, що відповідають граничним концентраціям на початку і в кінці суміші рідин.

Для вирішення питання розкладання суміші послідовного транспортованих рідин у кінці трубопроводу необхідно знати, який об'єм домішок (рідин іншого сорту) міститься у суміші і надійде у резервуари з товарними продуктами.

Об'єм рідини В, що надійде у вигляді домішки у резервуари з рідиною А, у випадку розділення суміші на дві частини в перерізі трубопроводу з концентрацією рідини В K_b знайдемо шляхом інтегрування такого виразу:

$$V_b = \int_{k_b}^0 K_b dV_{\text{сум}}. \quad (25)$$

З урахуванням виразів (15) і (23), після інтегрування одержуємо

$$V_b = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\varphi} \cdot \theta(z), \quad (26)$$

$$\text{де } \theta(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} - z[1 - \Phi(z)].$$

Запропонований метод урахування впливу зміни швидкості руху послідовно транспортованих рідин на інтенсивність їх сумішоутворення реалізований у комп'ютерній програмі. Програма дає змогу будувати криву розподілу концентрацій з урахуванням всіх впливових чинників для довільного положення зони контакту різносортних рідин в трубопроводі. Розраховуються об'єм суміші різносортних рідин, а також об'єми домішок, які надходять у резервуари з товарними продуктами на кінцевому пункті трубопроводу.

З метою апробації методики виконані розрахунки параметрів послідовного перекачування двох сортів нафти з такими розрахунковими властивостями:

- для першого сорту: густина $\rho_1 = 870 \text{ кг/м}^3$, кінематична в'язкість $\nu_1 = 50 \text{ сСт}$;
- для другого сорту: густина $\rho_2 = 850 \text{ кг/м}^3$, кінематична в'язкість $\nu_2 = 10 \text{ сСт}$.

Як модельний нафтопровід вибрана ділянка діючого магістрального нафтопроводу довжиною 100 км з внутрішнім діаметром 0,702 м. Нафтоперекачувальна станція оснащена магістральними насосами марки НМ 3600-230.

За результатами багатоваріантних розрахунків одержано, що пропускна здатність модельного нафтопроводу Q ($\text{м}^3/\text{с}$) так залежить від лінійної координати зони контакту нафт x (м):

$$Q = 0,552 + 1,18 \cdot 10^{-6} \cdot x_o. \quad (27)$$

За комп'ютерною програмою проведено розрахунки концентрації другої у циклі нафти для чотирьох положень зони контакту на трасі нафтопроводу та різних значень відстаней від початку рухомої системи координат.

За результатами обчислень побудовано графіки розподілу концентрацій нафти B K_b по довжині зони суміші (рисунок 1).

Визначено об'єм суміші різносортних нафт для граничних концентрацій $K_{b1} - K_{b2} = 1-99 \%$ для різних положень зони контакту на трасі нафтопроводу (рисунок 2).

Обчислено об'єм нафти B , що надійде у резервуари з нафтою A як домішка для різних варіантів розподілу суміші на дві частини у кінці нафтопроводу (рис. 3).

Для порівняння виконано розрахунки параметрів сумішоутворення за зазначених вище умов без урахування зміни швидкості руху послідовно транспортованих рідин. У результаті одержано, що урахування зміни швидкості дає змогу на 5-10 % уточнити як об'єм суміші, так і об'єми рідин,

які як домішка надходять у резервуари з товарними продуктами на кінцевому пункті трубопроводу.

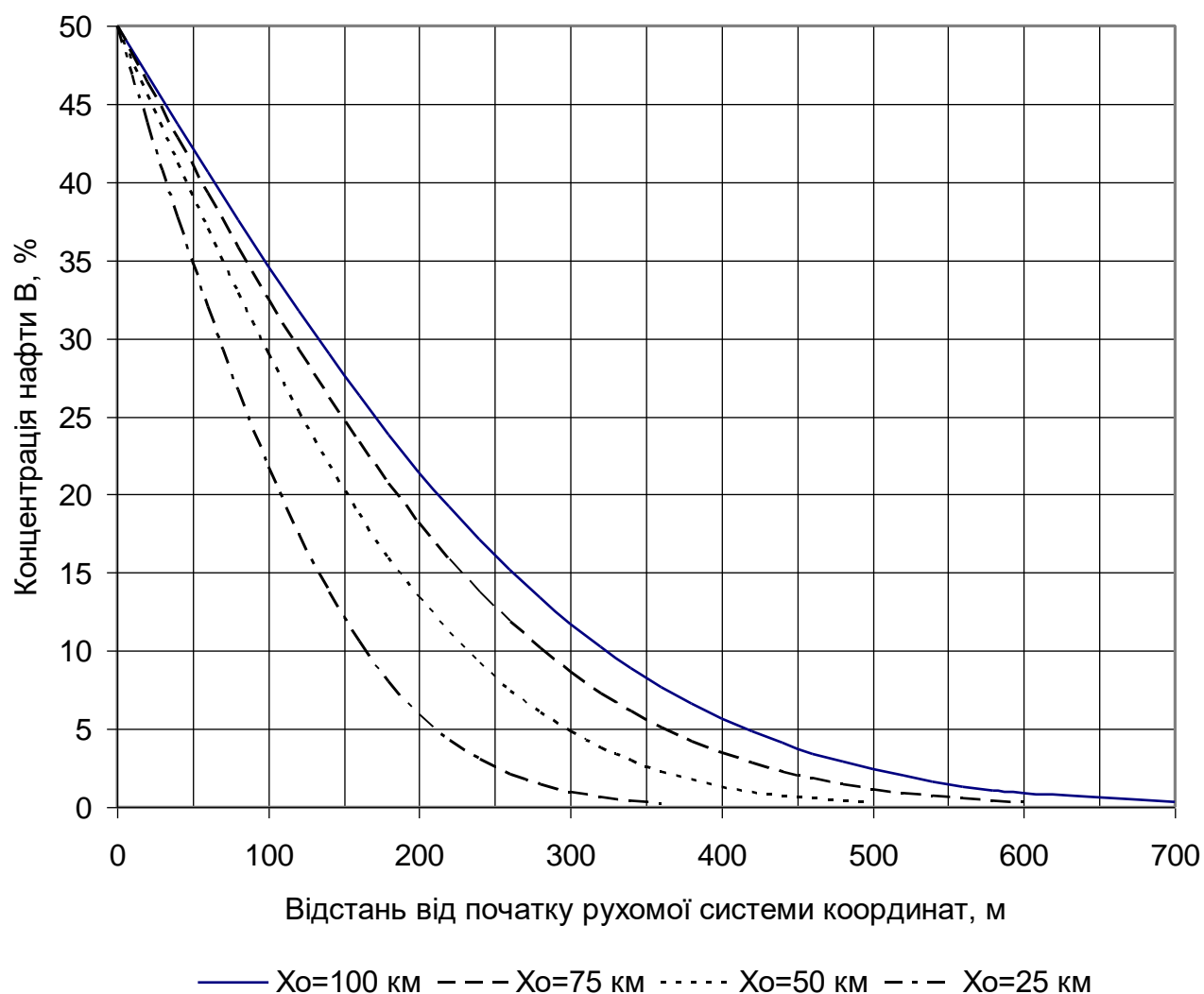


Рис. 1. Зміна концентрації нафти сорту В по довжині зони змішування для різних положень початку рухомої системи координат

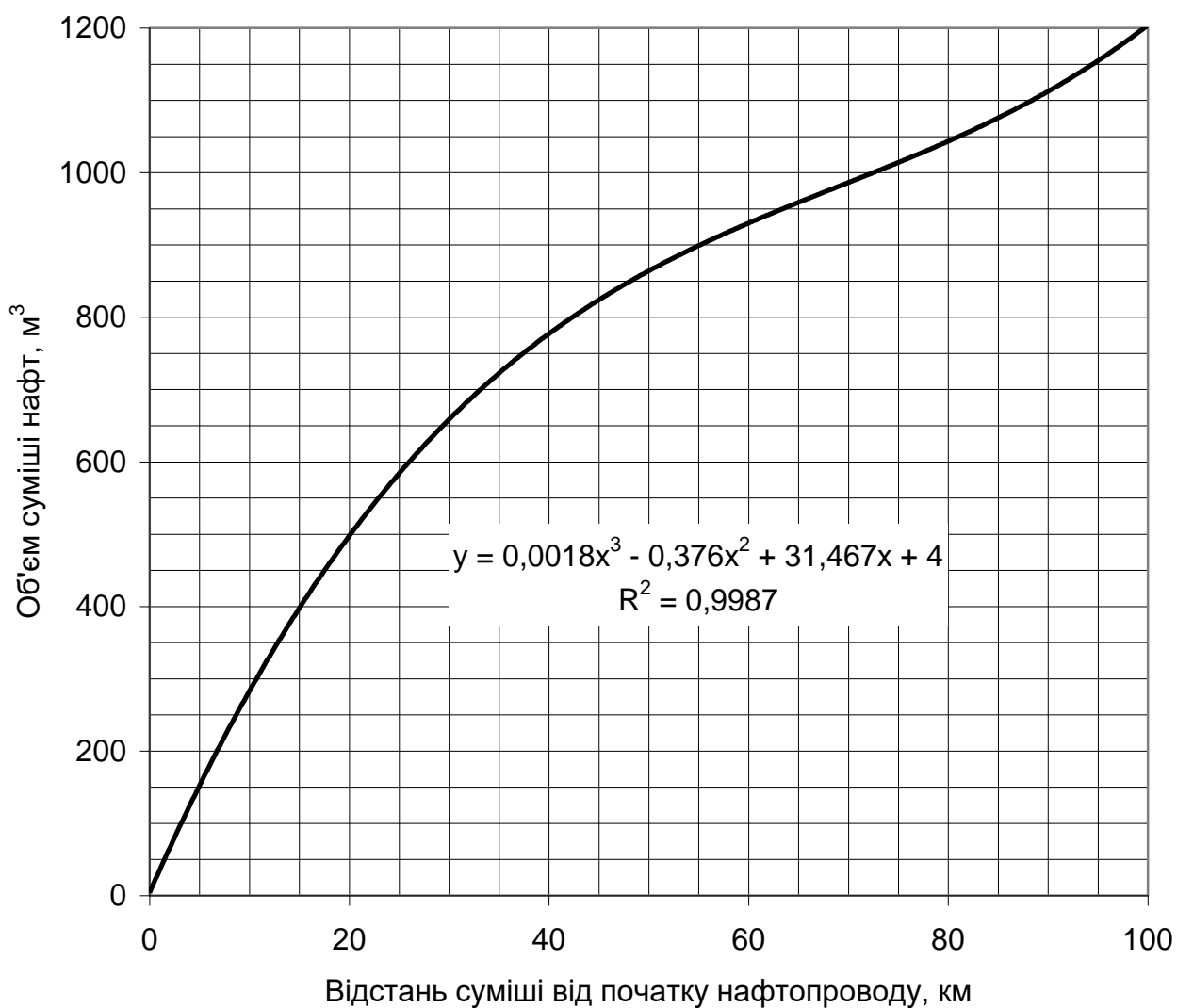


Рис. 2. Залежність об'єму суміші послідовно транспортованих нафт від розташування середини зони змішування у нафтопроводі

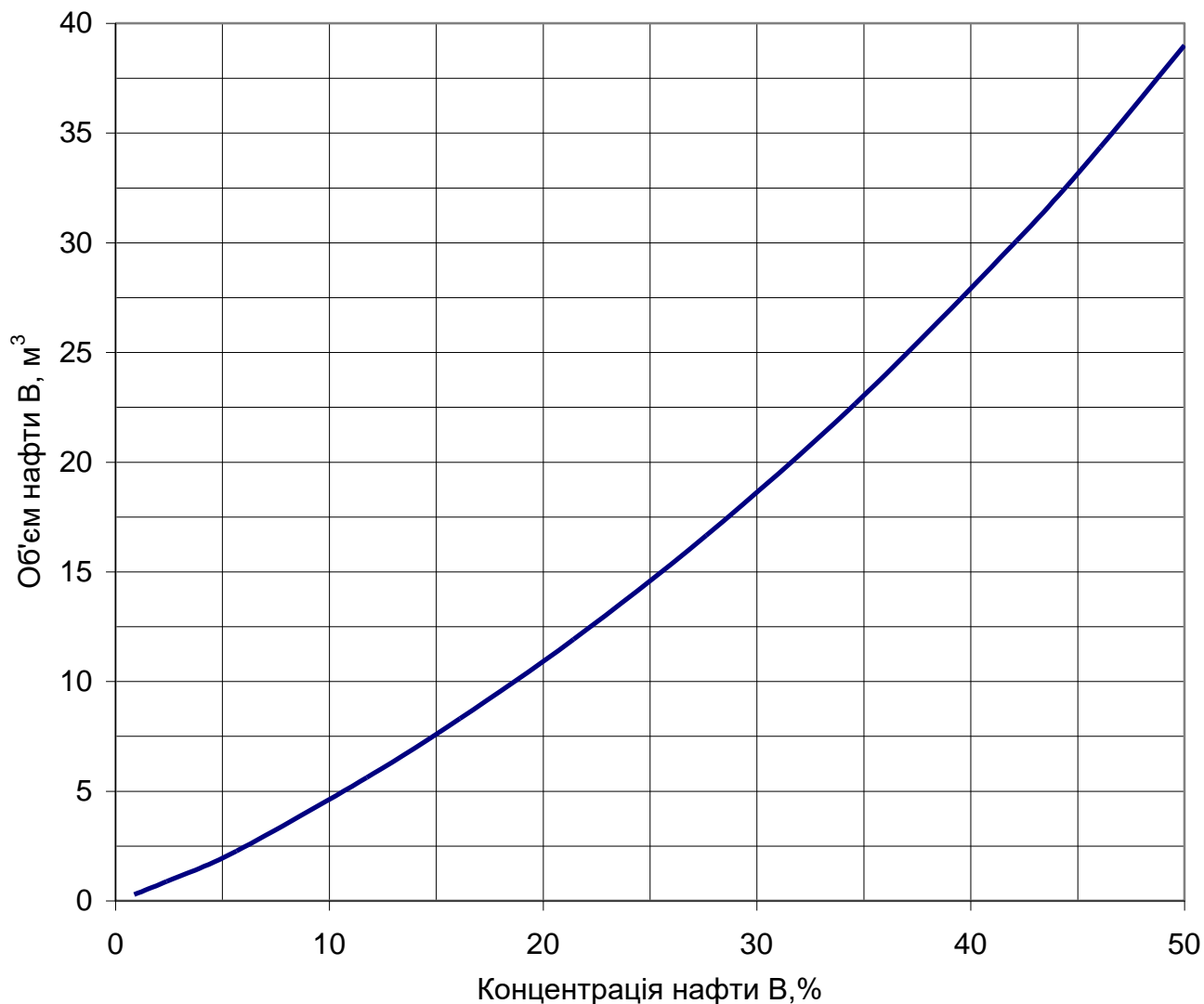


Рис. 3. Залежність об'єму нафти сорту B, який як домішка надходить у резервуари з нафтою A, від концентрації розділення суміші на дві частини в кінцевому пункті нафтопроводу

Висновки

1. Переміщення зони контакту різносортних нафт або нафтопродуктів у процесі їх послідовного перекачування спричинює помітну зміну пропускної здатності трубопроводу. Залежність пропускної здатності нафтопроводу від положення зони контакту різносортних нафт близька до лінійної. Це впливає на розподіл концентрацій різносортних рідин по довжині зони суміші, а отже, і на об'єм суміші.

2. Шляхом розв'язування рівняння турбулентної дифузії запропонований метод урахування впливу зміни швидкості послідовно транспортованих рідин у трубопроводі на інтенсивність їх сумішоутворення, який реалізований у комп'ютерній програмі.

3. З метою апробації розробки виконано розрахунки параметрів послідовного перекачування двох сортів нафти магістральним нафтопроводом. У результаті одержано, що урахування зміни швидкості дає змогу на 5-10 % уточнити кількісні показники об'єму суміші та об'ємів домішок у резервуарах з товарними продуктами на кінцевому пункті трубопроводу.

Література

1. Середюк М. Д., Якимів Й. В., Лісафін В.П. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів: [підручник для ВНЗ]. – Івано-Франківськ. 2002. – 517 с.
2. Коршак А. А., Нечваль А. М. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа: [учебник для вузов]. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис. 2005. – 515 с.
3. Фролов К. Д. , Федорак М. Д. Объем смеси при последовательной перекачке подогретых вязких жидкостей / Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. –1971. – № 1. – С 11–14.
4. Фролов К. Д., Середюк М. Д. Прием смеси в резервуары при последовательной перекачке разносортных нефтей и нефтепродуктов / Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. –1973. – № 7. – С 12–15.
5. Фролов К. Д., Середюк М.Д. Прием смеси в резервуары при последовательной перекачке с буферным нефтепродуктом / Нефтяное хозяйство. –1974. – № 12. – С 59–62.

6. Фролов К. Д., Середюк М.Д. Последовательная перекачка нефтепродуктов с разделительными пробками из их смеси / Нефтяное хозяйство. –1974. – № 9. – С 49–52.
7. Люта Н. В., Середюк М. Д. Дослідження впливу нестационарності на пропускну здатність нафтопроводу при послідовному перекачуванні різносортих нафт / Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – №1. – С.53-58.
8. 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.
9. Гольянов А. И., Нечваль М. В. Смещение жидкостей в трубопроводе при изменении скорости перекачки / Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. –1972. – № 7. – С. 5–7.
10. Середюк М. Д. Івоняк А. С. Методика розрахунку режимних та енергетичних параметрів роботи магістральних нафтопроводів / Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2002. – № 1(2). – С. 50-54.
11. Григорський С. Я., Середюк М. Д. Математичне моделювання характеристик нафтових насосів за зміни обертової частоти / Міжнародний науковий журнал. – 2017. – Т.1, № 1 (23). – С. 99-104.
12. Середюк М. Д, Григорський С. Я. Енергоефективність застосування насосів з регульованим приводом за неповного завантаження нафтопроводу / Міжнародний науковий журнал. – 2017. – Т.1, № 2 (24). – С. 165-172.