

## ЕФЕКТИВНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ДИФУЗІЇ В ПОСЛІДОВНОМУ ПЕРЕКАЧУВАННІ РІЗНОСОРТНИХ НАФТ: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ВЕРИФІКАЦІЯ

Н. В. Люта, Й. В. Якимів, М. Д. Середюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727139,  
e-mail: tznng@nuing.edu.ua

Одномірна модель поздовжньої турбулентної дифузії і похідні від неї формули для розподілу концентрацій, визначення об'єму суміші, її розливання у резервуари можуть бути використані як при послідовному перекачуванні світлих нафтопродуктів, так і при послідовному перекачуванні нафт різних сортів. При цьому у всі розрахункові формули слід підставляти ефективний коефіцієнт дифузії, який враховує специфічність умов взаємного змішування нафт з суттєвою різницею фізико-хімічних властивостей. Ефективний коефіцієнт дифузії, який характеризує інтенсивність сумішоутворення різносортних рідин, визначає всі параметри технології послідовного перекачування нафт різних сортів. В результаті математичного моделювання та багатоваріантних розрахунків отримано аналітичні моделі для визначення ефективного коефіцієнта дифузії для гідравлічно гладкого закону тертя. Дані моделі є зручними для практичних розрахунків параметрів послідовного перекачування нафт різних сортів у магістральних нафтопроводах, в тому числі зі складною геометричною структурою. Розроблено методики та програмне забезпечення, які можна рекомендувати для уточнення розрахунків величини ефективного коефіцієнта дифузії у зоні гідравлічно гладкого закону тертя. Адекватність розроблених аналітичних моделей ефективного коефіцієнта дифузії перевірена шляхом порівняння результатів теоретичних досліджень з результатами обробки експериментальних даних, одержаних при послідовному перекачуванні різносортних рідин на лабораторному стенді, що дає можливість моделювати процеси змішування рідин з різною в'язкістю при режимах послідовного перекачування, що мають місце на реальних нафтопроводах, оскільки при її проектуванні витримані критерії геометричної та гідродинамічної подібності. Результати дослідів математично оброблені за запропонованою в роботі методикою і програмним забезпеченням. Згідно з розрахунками гранична відносна похибка визначення дослідного значення ефективного коефіцієнта дифузії становить 9%. Порівняння експериментальних значень ефективного коефіцієнта дифузії з розрахунковими, одержаними за розробленими нами моделями вказує, що відносна різниця результатів не перевищує 19%, що є прийнятним для проведення інженерних розрахунків та свідчить про адекватність розрахункових формул і можливість їх застосування для розрахунку параметрів послідовного перекачування нафт різних сортів.

Ключові слова: магістральні нафтопроводи, сумішоутворення, дифузія, послідовне перекачування, різносортні нафти.

Одномерная модель продольной турбулентной диффузии и производные от нее формулы для распределения концентраций, определения объема смеси, ее разлива в резервуары могут быть использованы как при последовательной перекачке светлых нефтепродуктов, так и при последовательной перекачке нефтей различных сортов. При этом во все расчетные формулы следует подставлять эффективный коэффициент диффузии, который учитывает специфичность условий взаимного смешивания нефтей с существенной разницей физико-химических свойств. Эффективный коэффициент диффузии, характеризующий интенсивность смесеобразования разносортовых жидкостей, определяет все параметры технологии последовательной перекачки нефтей различных сортов. В результате математического моделирования и многовариантных расчетов получены аналитические модели для определения эффективного коэффициента диффузии для гидравлически гладкого закона трения. Данные модели удобны для практических расчетов параметров последовательной перекачки нефтей различных сортов в магистральных нефтепроводах, в том числе со сложной геометрической структурой. Разработаны методики и программное обеспечение, которые можно рекомендовать для уточнения расчетов величины эффективного коэффициента диффузии в зоне гидравлически гладкого закона трения. Адекватность разработанных аналитических моделей эффективного коэффициента диффузии проверена путем сравнения результатов теоретических исследований с результатами обработки экспериментальных данных, полученных при последовательной перекачке разносортовых жидкостей на лабораторном стенде, позволяющем качественно моделировать процессы смешивания жидкостей с разной вязкостью при режимах последовательной перекачки, имеющих место на реальных нефтепроводах, так как при ее проектировании выдержаны критерии геометрического и гидродинамического подобия. Результаты опытов математически обработаны с применением разработанных в работе методик и программного обеспечения. Согласно с расчетами предельная относительная погрешность определения экспериментального значения эффективного коэффициента диффузии составляет 9%. Сравнение экспериментальных значений эффективного коэффициента диффузии с расчетными, полученными с помощью разработанных нами моделей, показывает, что относительная разница результатов не превышает 19%, что является допустимым при проведении инженерных расчетов и свидетельствует об адекватности расчетных формул и возможности их применения для расчета параметров последовательной перекачки нефтей различных сортов.

Ключевые слова: магистральные нефтепроводи, смесеобразования, диффузия, последовательная перекачка, разносортовые нефти.

*A one-dimensional model of a longitudinal turbulent diffusion and its derivative formulas for distribution of concentrations, calculation of mixture volumes, and distribution of mixtures into tanks can be used for delivery of light oil product by batches, as well for delivery of various kinds of oil by batches. Furthermore, it is important to place the effective diffusion coefficient that takes into account the specific conditions of mixing of different kinds of oil into the calculation formulas. The effective diffusion coefficient that characterizes the intensity of mixing of liquids with different physical properties determines all the parameters of the technology of delivery of various kinds of oil by batches. As the result of mathematical modelling and numerous calculations, the analytical models for calculating the effective diffusion coefficient for smooth friction flow regime have been obtained. The models are simple and convenient for practical calculations of the parameters of the technology for delivery of various kinds of oil by batches in main oil pipelines, including pipelines with complicated geometric structure. Methods and software for precise calculations of the effective diffusion coefficient for smooth friction flow regime have been developed. The adequacy of the developed analytical models of effective diffusion coefficient has been tested with the help of comparison of the theoretical studies results with the experimental data processing results that were obtained when delivering various kinds of oil by batches on a laboratory bench. This provides a possibility to model processes of mixing of different density liquids using the regime of delivery by batches that takes place at real oil pipelines because all the criteria of geometric and hydrodynamic similarity have been maintained during the engineering process. The results of the studies have been mathematically processed using the obtained methods and software. The limiting relative error of the effective diffusion coefficient of the calculations is equal to 9% in accordance with the calculations. The comparison of experimental values of the effective diffusion coefficient with the calculated values, obtained with the help of the developed models, shows that the relative difference of the results is under 19%, which satisfies the required precision of practical calculations and shows that the obtained equations are valid and can be used for practical calculations.*

Keywords: main oil pipelines, mixture formation, diffusion, various kinds of oil, delivery by batches.

### Актуальність теми

Важливою умовою ефективного функціонування нафтокоридорів є необхідність транспортування у певному напрямі нафт різних сортів, обумовлена диверсифікацією джерел їх надходження та різними адресами кінцевих пунктів, інтегрованих єдиною міжнародною мережею. З вирішенням зазначеного питання безпосередньо пов'язана проблема збереження якості транспортованого продукту. Проблема збереження якості транспортованої нафти на сьогодні набуває надзвичайно важливого значення. На порядку денному стоїть питання створення банку якості для трубопровідних систем країн СНД, в тому числі для України. Мета банку якості - компенсація компаніям збитків, спричинених погіршенням якості нафти в процесі її перекачування трубопроводами. Зазначені банки якості нафти уже функціонують в США, на трубопровідних системах Північного моря, на латиноамериканських нафтопроводах.

Реалізація прогресивної технології послідовного перекачування нафт різних сортів дасть можливість підвищити ефективність використання окремих трубопроводів та їх мереж, зменшить собівартість транспортування нафти з відповідним потенціалом нарощування валютних надходжень від обслуговування міжнародних поставок, дозволить ефективно вирішити питання збереження якості кожного сорту нафти.

**Мета і задачі досліджень** – дослідити закономірності сумішоутворення різносортних нафт за умов їх послідовного перекачування трубопроводом, одержати аналітичні залежності ефективного коефіцієнта дифузії та довести їх адекватність шляхом співставлення результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

**Об'єкт дослідження** – магістральні нафтопроводи, якими здійснюється перекачування нафт, з суттєвою різницею фізичних властивостей та показників якості.

**Предмет дослідження** – дифузійні процеси в нафтопроводах за умов послідовного перекачування різносортних нафт у зоні гідравлічно гладкого закону тертя.

**Методи дослідження:** методи математичного аналізу, математичного моделювання та інтерпретації, а також загальновідомі методи обробки результатів експериментальних досліджень.

**Аналіз сучасних накопичених і вітчизняних досліджень і публікацій.** Метод послідовного перекачування як спеціальна технологія трубопровідного транспорту нафти і нафтопродуктів характеризується комплексом специфічних технологічних параметрів. Більшість із них безпосередньо пов'язані з основною особливістю даної технології перекачування – утворенням суміші у зоні контакту різносортних рідин. До параметрів послідовного перекачування, які безпосередньо визначаються інтенсивністю сумішоутворення різносортних рідин, належать об'єм суміші за різних граничних концентрацій, об'єм сторонніх рідин, які як домішки надходять у резервуари з товарними продуктами у процесі розкладання суміші в кінці трубопроводу, кількість циклів послідовного перекачування, мінімальні об'єми партій транспортованих продуктів, необхідний об'єм резервуарної ємності на головній насосній станції та в кінці трубопроводу.

Теоретичними і практичними аспектами послідовного перекачування світлих нафтопродуктів займалися засновники московської наукової школи В.С. Яблонський, В.І. Чернікін, В.О. Юфін, М.В. Лур'є, В.І. Марон, представники уфимської наукової школи М.В. Нечваль, А.Ш. Асатурян, В.Ф. Новосолов, П.І. Тугунов. В Україні питаннями послідовного перекачування нафтопродуктів займалися К.Д. Фролов, І.Х. Хізгілов, М.Д. Середюк, С.С. Шнерх, Й.В. Якимів. Помітний вклад у теорію сумішоутворення рідин при послідовному перекачуванні внесли вчені далекого зарубіжжя Д. Тейлор,

Ф. Фоулер, Г Броун, Ф. С'єнітцер, Р. Аріс, Х. Балей, В. Хогарті, Л. Тіхасек. Особливо значна роль робіт Тейлора, які мали вирішальний вплив на всі подальші дослідження з даної тематики.

**Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Не дивлячись на велику кількість досліджень, проблематика, пов'язана з реалізацією послідовного перекачування різносортих рідин на реальних трубопроводах, до сьогодення часу не вичерпана і залишає широке поле для наукової діяльності. Це стосується як технології послідовного перекачування малов'язких нафтопродуктів, так і ще в більшій мірі технології послідовного перекачування нафт різних сортів. Необхідним є аналіз та узагальнення наукових досліджень з даної тематики, вибір тих теоретичних концепцій, які встоялися і знайшли надійне підтвердження у практиці експлуатації магістральних нафтопродуктопроводів, визначення можливості застосування низки математичних моделей, що характеризують закономірності сумішоутворення світлих нафтопродуктів, для розрахунку параметрів послідовного перекачування нафт з суттєвою різницею фізико-хімічних властивостей.

Протягом більш як п'ятдесяти років, паралельно з широким впровадженням послідовного перекачування нафтопродуктів на магістральних трубопроводах, проводились теоретичні та експериментальні дослідження закономірностей перемішування різносортих рідин при їх послідовному переміщенні у трубопроводі, аналізувались різноманітні фактори, які впливають на якісні та кількісні характеристики сумішоутворення, розроблялись методи і технічні засоби для контролю за процесом послідовного перекачування, для зменшення об'ємів пересортування і збереження якості транспортованих нафтопродуктів.

Аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень закономірностей масопереносу при послідовному перекачуванні різносортих рідин в умовах магістральних нафтопроводів показав, що рівняння поздовжньої турбулентної дифузії може описати з достатньою для практичних потреб точністю процеси сумішоутворення як різносортих світлих нафтопродуктів, так і нафт різних сортів. Необхідною умовою при цьому є підстановка у рівняння адекватного значення ефективного коефіцієнта дифузії  $D_e$ , визначеного з врахуванням фізичних властивостей нафти, геометричних характеристик магістральних нафтопроводів і характеристик турбулентного потоку.

Слід зазначити, що ефективний коефіцієнт дифузії є найбільш важливим параметром послідовного перекачування різносортих рідин, він не тільки характеризує інтенсивність сумішоутворення рідин, але і визначає практично всі технологічні параметри даної технології трубопровідного транспорту.

**Основний матеріал.** У процесі послідовного перекачування світлих нафтопродуктів

діапазон зміни кінематичної в'язкості досить вузький і практично вкладається у проміжок від 1 до 10 сСт. Послідовно транспортовані нафти можуть мати значно ширший діапазон значень кінематичної в'язкості від кількох сантистокс до стока. Послідовне перекачування різносортих нафт може реалізуватись у магістральних нафтопроводах, діаметр яких в умовах України змінюється від DN=300 мм до DN=1200 мм. Витрата нафти у магістральних нафтопроводах також може мінятися у широкому діапазоні залежно від ступеня їх завантаження. Таким чином, з точки зору гідродинаміки, процеси сумішоутворення при послідовному перекачуванні нафт мають ряд особливостей, порівняно з процесами перемішування світлих нафтопродуктів. Залежно від співвідношення геометричних характеристик нафтопроводу, ступеня його завантаження і фізичних властивостей нафт послідовне перекачування нафти може відбуватися у широкому діапазоні критерію Рейнольдса – від  $Re = 10000$ , що відповідає зоні гідравлічно гладких труб до  $Re = 200000 - 300000$ , що відповідає зоні змішаного тертя турбулентного режиму. Тому необхідно розробити математичні моделі для ефективного коефіцієнта дифузії, які спроможні врахувати особливості сумішоутворення різносортих нафт у тій чи іншій зоні тертя турбулентного режиму.

Вихідним рівнянням для одержання математичних моделей для ефективного коефіцієнта дифузії використовуємо формальний вираз, запропонований В.І. Мароном [1]

$$D_e = \varepsilon_o + \frac{2}{R^2} \int_0^R dr \left[ \int_r^R (U - U_o) r' dr' \right]^2, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_o$  - осереднене по площі поперечного перерізу труби значення коефіцієнта турбулентної дифузії;

$R$  - радіус трубопроводу;

$U$  - осереднена швидкість на віддалі  $r$  від осі труби;

$\varepsilon$  - коефіцієнт турбулентної дифузії.

Формула (1) вказує на основні фактори, від яких залежить величина ефективного коефіцієнта дифузії – це профіль поздовжньої швидкості  $U$  і коефіцієнт перенесення речовини по перерізу труби  $\varepsilon$ . Слід зазначити, що вираз (1) має формальний характер і не може бути безпосередньо використаний для обчислення ефективного коефіцієнта дифузії.

Як зазначено вище, для одержання розрахункових моделей у базовий вираз (1) необхідно підставити відповідні математичні моделі для профілю швидкості і для коефіцієнта турбулентної дифузії.

Послідовне перекачування нафт середньої та підвищеної в'язкості часто відбувається у зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму.

Одержимо математичну модель ефективного коефіцієнта змішування для зазначених умов. Як вихідні рівняння використаємо формули для профілю швидкостей  $U$  і коефіцієнта

тертя  $\lambda$  у гладких трубах, які були запропоновані А.Д. Альтшулем [2, 3]

$$\frac{U}{U_*} = 5,33 \lg \operatorname{Re} \frac{y}{R} - 2, \quad (2)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,82 \lg \frac{\operatorname{Re}}{100} + 2, \quad (3)$$

де  $U_*$  – динамічна швидкість турбулентності;

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = U_o \sqrt{\frac{\lambda}{8}}, \quad (4)$$

$Re$  – значення числа Рейнольдса у трубопроводі;

$y$  – віддаль від стінки труби до шару рідини, що має швидкість  $U$ ;

$\tau_o$  – дотичні напруження на внутрішній стінці труби;

$\rho$  – густина транспортованого середовища.

Формула (2) після математичних перетворень може бути записана у вигляді

$$\frac{U}{U_*} = 5,33 \lg \operatorname{Re} \frac{R-r}{R} - 2, \quad (5)$$

а після переходу до натуральних логарифмів

$$U = U_* \left[ 2,315 \ln \frac{\operatorname{Re}(R-r)}{R} - 2 \right], \quad (6)$$

де  $r$  – віддаль від осі труби до шару рідини, що рухається зі швидкістю  $U$ .

Використовуючи рівняння (6), знаходимо градієнт швидкості у турбулентному потоці рідини, яка рухається у зоні гідравлічно гладких труб

$$\frac{dU}{dr} = -2,315 \frac{U_*}{R-r}. \quad (7)$$

Внутрішній інтеграл у формулі (1) для ефективного коефіцієнта дифузії позначимо через  $I_1$

$$I_1 = \int_r^R (U - U_o) r dr. \quad (8)$$

Формула (8) з врахуванням математичної моделі (6) для розподілу швидкостей рідини по перерізу труби набуває такого вигляду

$$I_1 = \int_r^R \left\{ U_* \left[ 2,315 \ln \frac{\operatorname{Re}(R-r)}{R} - 2 \right] - U_o \right\} r dr. \quad (9)$$

Для визначення коефіцієнта турбулентної дифузії використаємо формулу, що реалізує гіпотезу Бусинеска [4]

$$D_t = -U_*^2 \frac{r}{R} \left( \frac{dU}{dr} \right)^{-1}. \quad (10)$$

Формула (10) з врахуванням математично-го виразу (7) приймає вигляд

$$D_t = -U_*^2 \frac{r}{R} \left( -\frac{R-r}{2,315 U_*} \right), D_t = U_* \frac{r(R-r)}{2,315 R}. \quad (11)$$

Результати досліджень свідчать, що коефіцієнт молекулярної дифузії  $D_m$  на кілька порядків менший від коефіцієнта турбулентної

дифузії  $D_t$ . Тому з достатньою для практичних розрахунків точністю можна приймати [4]

$$\varepsilon = D_t, \quad (12)$$

$$\varepsilon = U_* \frac{r(R-r)}{2,315 R}. \quad (13)$$

Осереднене по перерізу труби значення коефіцієнта турбулентного перенесення можна записати у вигляді

$$\varepsilon_o = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \varepsilon 2\pi r dr, \quad (14)$$

$$\varepsilon_o = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R U_* \frac{r}{R} \frac{(R-r)}{2,315} 2\pi r dr =$$

$$= \frac{2U_*}{2,315 R^3} \left[ \int_0^R r^2 dr - \int_0^R r^3 dr \right]. \quad (15)$$

У результаті інтегрування виразу (15) одержуємо

$$\varepsilon_o = \frac{U_*}{2,315 R^3} \frac{R^4}{6},$$

$$\varepsilon_o = 0,072 U_* R. \quad (16)$$

Позначимо зовнішній інтеграл у формулі (1) через  $I_2$

$$I_2 = \int_0^R \int_r^R (U - U_o) r dr \frac{dr}{r\varepsilon} = \int_0^R I_1^2 \frac{dr}{r\varepsilon}. \quad (17)$$

Формула (17) після підстановки виразу (13) приймає вигляд

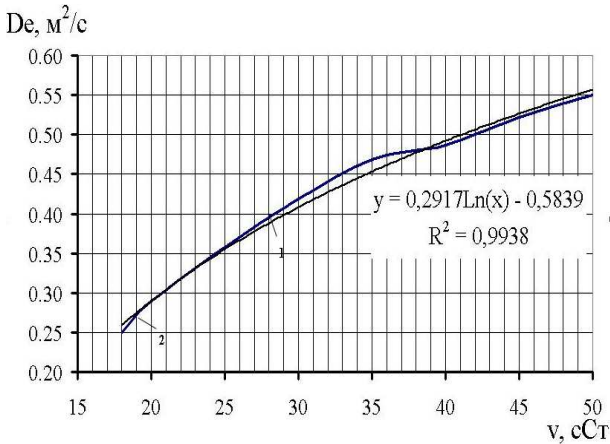
$$I_2 = 2,315 \frac{R}{U_*} \int_0^R I_1^2 \frac{dr}{r^2 (R-r)}. \quad (18)$$

Вираз (1) для ефективного коефіцієнта дифузії з врахуванням прийнятих моделей і позначень можна записати у загальній формі [2]

$$D_e = \varepsilon_o + \frac{2}{R^2} I_2. \quad (19)$$

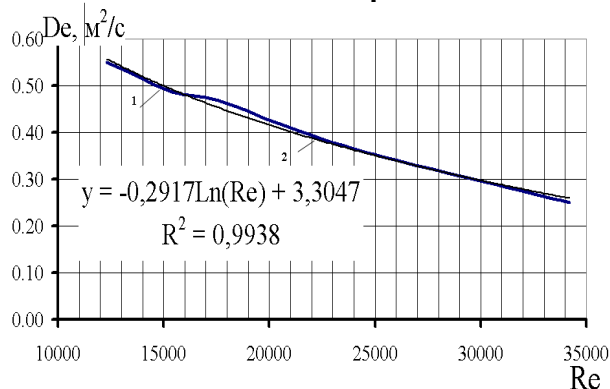
Наведений вище алгоритм дає можливість визначати значення ефективного коефіцієнта дифузії за відомих геометричних характеристик нафтопроводу, режимних параметрів перекачування та розрахункової в'язкості транспортованих нафт. Визначені інтеграли обчислюються чисельним інтегруванням за методом Сімпсона. При цьому враховується, що інтеграл  $I_2$  є невластним інтегралом, який має особливість на верхній і нижній границях. Використовуючи правило інтегрування невластних інтегралів, границі інтегрування  $0$  і  $R$  замінюємо на  $\delta$  і  $R - \delta$  відповідно. Величину  $\delta$  приймаємо такою, щоб нехтування нею при інтегруванні фізично не могло вплинути на значення ефективного коефіцієнта дифузії. Враховуючи особливості структури турбулентного потоку, доцільно приймати величину модифікованої границі інтегрування за умовою  $\delta \leq k_e$ , де  $k_e$  – абсолютна еквівалентна шорсткість поверхні трубопроводу ( $k_e = 0,1-0,2$  мм).

З застосуванням даної методики проведено дослідження залежності величини ефективного коефіцієнта дифузії від значення розрахункової в'язкості нафти і числа Рейнольдса. Діапазон в'язкості вибираємо такий, який може мати місце при послідовному перекачуванні нафт різних сортів у зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму. Результати багатоваріантних розрахунків представляємо у графічно-матричному вигляді на рисунках 1 і 2.



1 – крива, отримана за результатами розрахунку за програмою;  
2 – результат апроксимації

**Рисунок 1 – Залежність ефективного коефіцієнта дифузії від розрахункової в'язкості нафти**



1 – крива, отримана за результатами розрахунку за програмою;  
2 – результат апроксимації

**Рисунок 2 – Залежність ефективного коефіцієнта дифузії від числа Рейнольдса**

Як видно з рисунків 1 і 2, залежність ефективного коефіцієнта дифузії від розрахункової в'язкості та числа Рейнольдса за умов послідовного перекачування нафт різних сортів у зоні гідравлічно гладких труб можна представити у вигляді таких формул

$$D_e = 0,2917 \ln \nu - 0,5839, \quad (20)$$

$$D_e = -0,2917 \ln Re + 3,3047. \quad (21)$$

З метою виконання технологічних розрахунків магістральних нафтопроводів, в тому числі зі складною геометричною структурою, при послідовному перекачуванні нафт різних

сортів, за аналогією з послідовним перекачуванням світлих нафтопродуктів, доцільно запропонувати універсальну математичну модель для ефективного коефіцієнта дифузії у такому вигляді

$$D_e = A \left( \frac{4Q}{\pi \cdot d} \right)^{1-\chi} \nu^\chi, \quad (22)$$

де  $A, \chi$  – коефіцієнти математичної моделі, які можна визначити на основі результатів розрахунків за програмою DEGG (таблиця 1).

Використавши дані таблиці 1, знаходимо середні значення коефіцієнтів математичної моделі (22), у результаті одержуємо розрахункову модель для визначення ефективного коефіцієнта дифузії при послідовному перекачуванні нафт різних сортів у зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму

$$D_e = 1092 \left( \frac{4Q}{\pi \cdot d} \right)^{0,25} \nu^{0,75}. \quad (23)$$

Порівняємо між собою результати, одержані за програмою DEGG і за формулою (23). Результати порівняння зводимо у таблицю 2.

Таким чином, використання формули (23) для розрахунку ефективного коефіцієнта дифузії у діапазоні розрахункової в'язкості нафт від 18 сСт до 50 сСт дає відносну похибку результатів, що не перевищує 7 %, що свідчить про можливість використання даної моделі для практичних розрахунків параметрів послідовного перекачування нафт різних сортів у магістральних нафтопроводах. За необхідності виконання уточнених розрахунків ефективного коефіцієнта дифузії при послідовному перекачуванні нафт у зоні гідравлічно гладких труб перевагу слід віддавати використанню розробленої нами програми DEGG.

З метою перевірки адекватності запропонованих аналітичних моделей ефективного коефіцієнта дифузії при послідовному перекачуванні різносортих нафт, скористаємося результатами експериментальних досліджень закономірностей змішування рідин з різною в'язкістю, які були проведені на кафедрі транспорту і зберігання нафти і газу Івано-Франківського інституту нафти і газу [5].

Метою експериментальних досліджень було вивчення впливу різниці в'язкостей рідин, що перекачуються послідовно, на процес їх змішування. Для проведення експериментів вибиралися рідини, в'язкість яких близька до в'язкості нафт, що послідовно перекачуються промисловими нафтопроводами. В якості таких рідин використовувалась вода і водний розчин карбоксиметилцелюлози. Карбоксиметилцелюлоза (КМЦ) – це високомолекулярна речовина, натрієва сіль простого ефіра целюлози і глікової кислоти. Залежно від кількості КМЦ, що розчиняється в воді, можна отримати рідини різної в'язкості. Цю властивість було використано під час приготування робочої рідини для проведення експериментів.

Гранична відносна похибка під час визначення дослідного значення ефективного коефіцієнта дифузії становила  $\pm 9,2 \%$ .

Таблиця 1 – Результати розрахунку ефективного коефіцієнта дифузії у зоні гідравлічно гладких труб

Розрахункова в'язкість $\nu$ , сСт	Число Рейнольдса $Re$	Коефіцієнт гідравлічного опору $\lambda$	Динамічна швидкість турбулентності $U_*$ , м <sup>2</sup> /с	Ефективний коефіцієнт дифузії $D_e$ , м <sup>2</sup> /с
50	12312	0,02968	0,07309	0,550
45	13680	0,02885	0,07206	0,522
40	15390	0,02796	0,07094	0,487
35	17588	0,02699	0,06971	0,468
30	20520	0,02594	0,06834	0,419
25	24624	0,02478	0,06679	0,357
20	30780	0,02346	0,06498	0,289
18	34200	0,02287	0,06417	0,250

Таблиця 2 – Порівняння результатів розрахунку ефективного коефіцієнта дифузії для зони гідравлічно гладких труб, одержаних за програмою DEGG і за формулою (23)

Розрахункова в'язкість $\nu$ , сСт	Число Рейнольдса $Re$	Ефективний коефіцієнт дифузії за програмою DEGG, м <sup>2</sup> /с	Ефективний коефіцієнт дифузії за формулою (23), м <sup>2</sup> /с	Відносна різниця результатів, %
50	12312	0,550	0,575	+4,6
45	13680	0,522	0,532	+1,9
40	15390	0,487	0,487	0
35	17588	0,468	0,440	-5,9
30	20520	0,419	0,392	-6,4
25	24624	0,357	0,342	-4,2
20	30780	0,289	0,289	0
18	34200	0,250	0,267	+6,8

Для того, щоб визначити характер режиму руху рідини у трубопроводі експериментальної установки діаметром 56,5 мм, визначимо перше перехідне число Рейнольдса, скориставшись загальновідомими формулами [1]

$$Re_1 = 59,5 \left( \frac{d}{2k_e} \right)^{\frac{8}{7}},$$

$$Re_1 = 59,5 \left( \frac{56,5}{2 \cdot 0,1} \right)^{\frac{8}{7}} = 37643,$$

$$\frac{k_e}{d} = \frac{8,15}{Re_1 \sqrt{0,0032 + 0,221 Re_1^{-0,237}}},$$

$$Re_1 = 30860.$$

Виходячи з результатів експериментальних досліджень, можна зробити висновок, що під час проведення експериментів перекачування рідин відбувалось в переважній кількості випадків за турбулентного режиму в зоні гідравлічно гладких труб. Тому, виконаємо розрахунки величини ефективного коефіцієнта дифузії за програмою DEGG, в якій реалізована методика визначення величини ефективного коефіцієнта дифузії для зони гідравлічно гладких труб турбулентного режиму, запропонована вище. Вихідними даними для розрахунків є внутрішній

діаметр трубопроводу лабораторної установки, розрахункова в'язкість та швидкість перекачування, що є експериментальними даними [5].

Рейнтерпретація результатів експериментальних досліджень, з використанням розроблених в даній роботі методик і програмного забезпечення, демонструє задовільне збігання отриманих нами розрахункових значень ефективного коефіцієнта дифузії з експериментальними з відносною похибкою в межах до 20% (табл. 3). Крім того, розглянувши дані таблиці 3, можна помітити, що при дуже близьких значеннях числа Рейнольдса 19228 і 19404 експериментально визначені величини ефективного коефіцієнта дифузії досить сильно відрізняються і відповідно становлять 0,06101 м<sup>2</sup>/с і 0,07602 м<sup>2</sup>/с, в той час як величини  $De$ , розраховані аналітично для тих самих значень числа Рейнольдса, дорівнюють відповідно 0,05898 м<sup>2</sup>/с і 0,06085 м<sup>2</sup>/с. Проведений аналіз свідчить про задовільну адекватність запропонованих нами математичних моделей для ефективного коефіцієнта дифузії і можливості їх використання у розрахунках технологічних параметрів послідовного перекачування різносортих нафт на магістральних нафтопроводах.

**Наукова новизна.** Встановлено вплив структури турбулентного потоку на інтенсивність масообмінних процесів в нафтопроводі і

Таблиця 3 – Порівняння значень ефективного коефіцієнта дифузії, отриманих за програмою DEGG та експериментальним методом

Розрахункова в'язкість, сСт	Швидкість, м/с	Число Рейнольдса	Ефективний коефіцієнт дифузії $De$ за програмою DEGG	Ефективний коефіцієнт дифузії $De$ за дослідями Й.В.Якиміва	Відносна різниця результатів, %
1,614	0,622	21774	0,03551	0,03153	-12,6
2,174	0,622	16165	0,04541	0,04849	6,4
2,418	0,794	18553	0,04752	0,05060	6,1
3,176	0,648	11528	0,07306	0,06193	-17,9
3,286	0,861	14804	0,07085	0,06714	-5,5
3,056	1,04	19228	0,05898	0,06101	3,3
3,028	1,119	20880	0,05581	0,05708	2,2
4,397	1,026	13184	0,09813	0,09998	1,9
3,497	1,137	18370	0,06906	0,06944	0,5

одержані аналітичні залежності для ефективного коефіцієнта дифузії з врахуванням специфіки послідовного перекачування нафт різних сортів у зоні гідравлічно гладкого закону тертя.

**Практична цінність отриманих результатів.** Запропоновані у даній роботі залежності та програмне забезпечення для визначення ефективного коефіцієнта дифузії у зоні гідравлічно гладкого закону тертя доцільно рекомендувати для впровадження у розрахунки специфічних параметрів послідовного перекачування різносортих нафт, що залежать від інтенсивності сумішоутворення, а також для використання у навчальному процесі при вивченні відповідних дисциплін.

**Висновки.** Одномірна модель поздовжньої турбулентної дифузії і похідні від неї формули для розподілу концентрацій, визначення об'єму суміші, її розкладання у резервуари можуть бути використані як при послідовному перекачуванні світлих нафтопродуктів, так і при послідовному перекачуванні нафт різних сортів. При цьому у всі розрахункові формули слід підставляти ефективний коефіцієнт дифузії, який враховує специфічність умов взаємного змішування нафт з суттєвою різницею фізико-хімічних властивостей. В результаті багатоваріантних розрахунків отримані аналітичні залежності для визначення ефективного коефіцієнта дифузії для гідравлічно гладкого закону тертя. Дана модель є зручною для практичних розрахунків параметрів послідовного перекачування нафт різних сортів у магістральних нафтопроводах, в тому числі зі складною геометричною структурою. Порівняння результатів розрахунків ефективного коефіцієнта дифузії за запропонованою в даній роботі аналітичною залежністю з експериментальними даними свідчить про адекватність розрахункової формули і можливість її застосування для розрахунку параметрів послідовного перекачування нафт різних сортів.

Можливим напрямком подальших досліджень слід вважати удосконалення запропоно-

ваних моделей та застосування методів і процедур, викладених у даній роботі, для отримання математичних моделей ефективного коефіцієнта дифузії для зони змішаного закону тертя турбулентного режиму.

#### Література

1. Марон В. И. Об эффективном коэффициенте смешения при последовательной перекачке в неизотермических условиях / В.И. Марон, В.А. Юфин // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1974. – № 9.
2. Середюк М.Д. Розробка математичних моделей для ефективного коефіцієнта змішування у зоні гідравлічно гладких труб / М.Д.Середюк, Н.В. Люта // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 1998. – Вип. 35. – Том 1. – С. 183–188.
3. Середюк М.Д. Теоретичні моделі для визначення ефективного коефіцієнта змішування при послідовному перекачуванні різносортих нафт у зоні змішаного тертя / М.Д.Середюк, Н.В. Люта // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 1998. – Вип. 35. – Том 3. – С. 17–21.
4. Лурье М. В. Оптимизация последовательной перекачки нефтепродуктов / М.В. Лурье, В. И. Марон, Л.А. Мацкин – М.: Недра, 1979. – 250 с.
5. Якимив И.В. Оптимизация последовательной перекачки нефтепродуктов с жидкостными разделителями: дис. канд. техн. наук / Якимив Иосип Васильевич. – Ивано-Франковск, 1983 – 183 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
01.06.15

Рекомендована до друку  
професором Грудзом В.Я.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук Банахевичем Ю.В.  
(відділ МГ і ГРС ПАТ «Укртрансгаз»,  
м. Київ)