ТРАНСПОРТ ТА ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ І ГАЗУ

УДК 622.692.4

ОСОБЛИВОСТІ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ НАФТОПРОВОДУ, ЩО ТРАНСПОРТУЄ НЕЛІНІЙНОВ'ЯЗКОПЛАСТИЧНУ РІДИНУ

С.Р.Яновський, М.Д.Середюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(03422) 42166,
e-mail: seredjuk@nung.edu.ua

Запропоновано метод гідравлічного розрахунку нафтопроводу, що транспортує нелінійнов'язкопластичну рідину. Метод передбачає введення у розрахункові формули коригувальних коефіцієнтів, що враховують збільшення гідравлічного опору нафтопроводу, пов'язаного з наявністю у нафті нелінійнов'язкопластичних властивостей.

Предложен метод гидравлического расчета нефтепровода, транспортирующего нелинейновязкопластичную жидкость. Метод предусматривает введение в расчетные формулы корректирующих коэффициентов, учитывающих увеличение гидравлического сопротивления нефтепровода, обусловленного наличием в нефти нелинейновязкопластичных свойств.

The method of hydraulic calculation oil pipeline, for nonlinear viscoplastic oil, has been designed. It proved for introduction into design equation special corrective coefficients, which are taking into account the increasing of hydraulic resistance of oil pipe through presence of nonlinear viscoplastic properties of oil.

Нафти Долинських родовищ відносяться до високов'язких швидкозастигаючих нафт, що характеризуються ускладненими реологічними властивостями. Транспортування їх трубопроводами вимагає попереднього аналізу реологічних властивостей у робочому діапазоні температур та градієнтів швидкості зсуву. Експериментальні дослідження, виконані нами протягом останніх років [1], довели, що за градієнтів швидкості зсуву, вищих 100-150 $с^{-1}$, та за температур навколишнього середовища долинська нафта проявляє властивості в'язкопластичної рідини. Реологічна поведінка долинської нафти у такому разі може бути описана моделлю Шведова-Бінгама. У роботі [2] нами розглянуті особливості гідравлічного розрахунку нафтопроводу у разі перекачування рідини, що характеризується в'язкопластичними властивостями.

У той же час аналіз результатів експериментальних досліджень долинської нафти [1] засвідчив, що за температур, нижчих від 30°С, і малих градієнтів швидкості зсуву спостерігається деяке відхилення властивостей долинської нафти від властивостей в'язкопластичної рідини. Малі градієнти швидкості зсуву можуть мати місце в трубопроводі за невеликих чисел Рейнольдса, а саме у ламінарному режимі або нерозвиненому турбулентному режимі руху нафти.

Для прикладу на рисунку 1 зображений графік залежності динамічного напруження зсуву від градієнта швидкості зсуву для проби долинської нафти, що перекачувалась у березні 2008 року. Температура підігріву нафти – 70°С, робоча температура нафти – 30°С. Рисунок 2 ілюструє залежність динамічного напруження зсуву від градієнта швидкості зсуву для проби долинської нафти, що перекачувалась у листопаді 2007 року. Температура підігріву нафти – 60°С, робоча температура нафти – 25°С.

Аналіз аналогічних графіків, одержаних за результатами експериментів для щомісячних проб нафти, що перекачувалась нафтопроводом Долина-Дрогобич протягом 2007-2008 років, для різних температур підігріву у робочому діапазоні температур дав підстави зробити такий висновок: долинська нафта за температур, нижчих 30°С, і градієнтах швидкості зсуву, менших за 100 $с^{-1}$, проявляє властивості нелінійнов'язкопластичної рідини. Рух таких рідин у трубопроводі може бути описаний реологічною моделлю Баклі-Гершеля

$$\tau = \tau_\partial + \varphi\left(\frac{dU}{dr}\right)^n , \qquad (1)$$

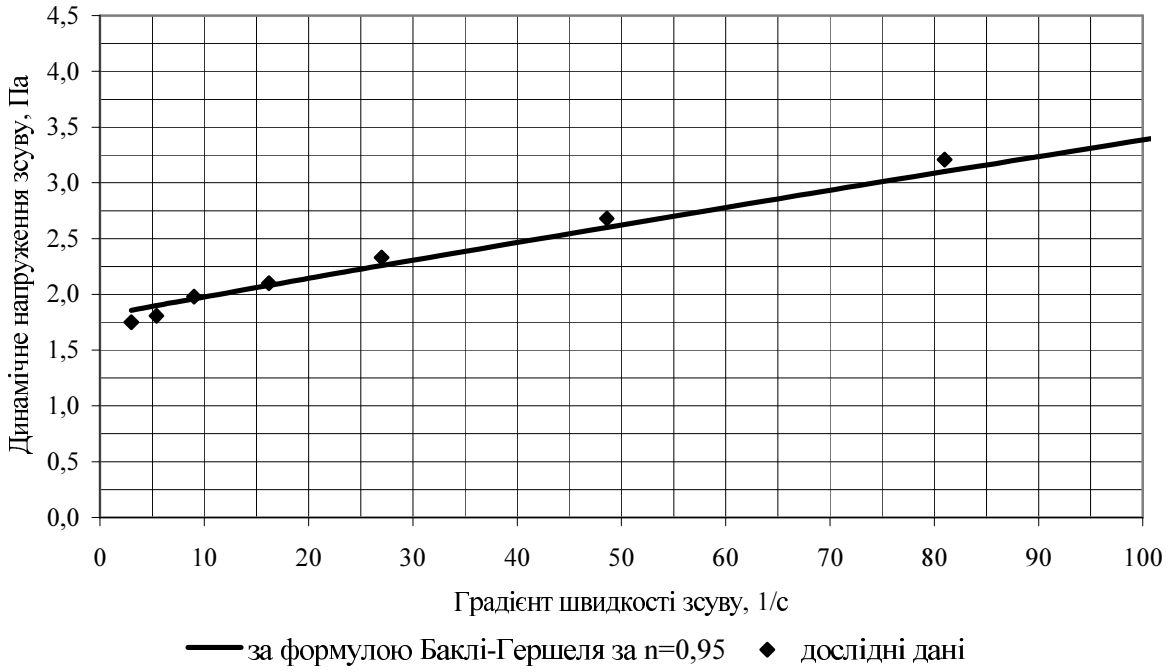

Рисунок 1 — Залежність динамічного напруження зсуву від градієнта швидкості зсуву для долинської нафти, що перекачувалась у березні 2008 р. (температура підігріву 70°С, робоча температура нафти 30°С)

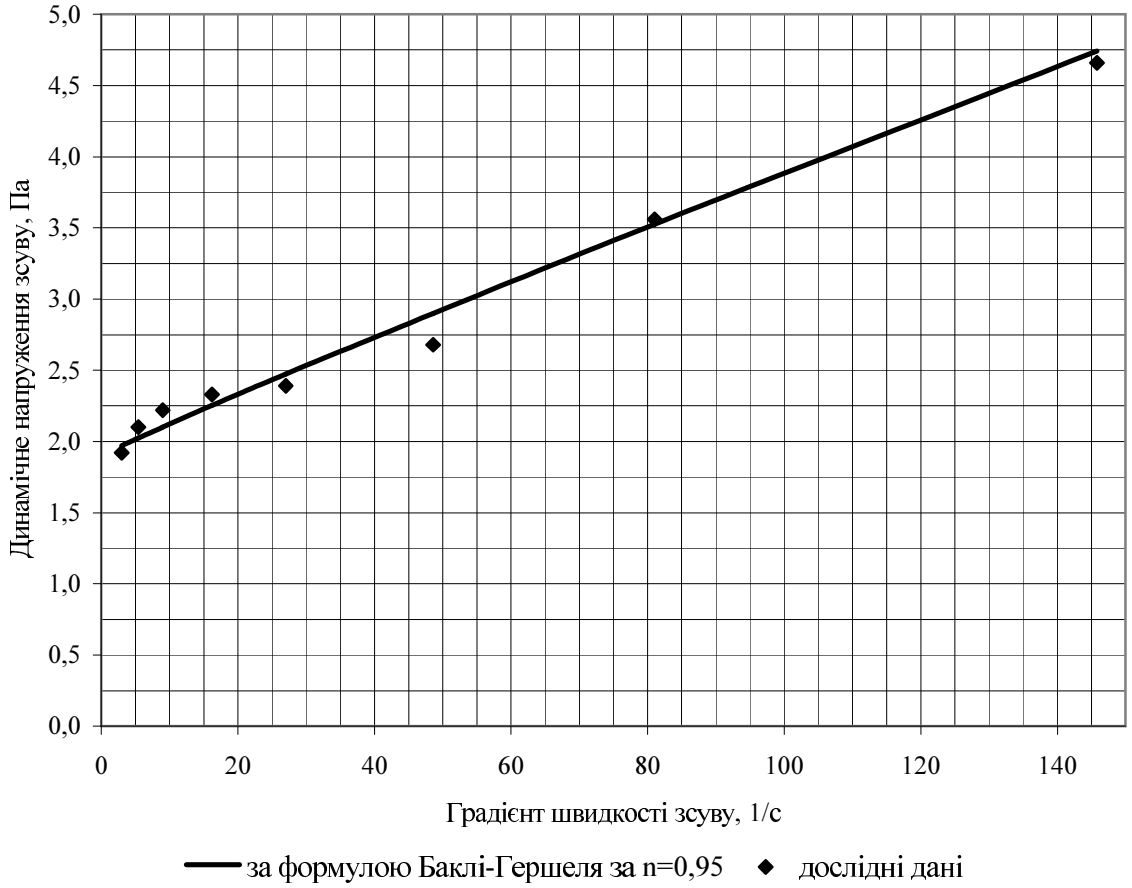

Рисунок 2 — Залежність динамічного напруження зсуву від градієнта швидкості зсуву для долинської нафти, що перекачувалась у листопаді 2008 р. (температура підігріву 60°С, робоча температура нафти 25°С)

де: τ_∂ – межа плинності середовища Бакл-Гершеля;

φ – коефіцієнт, що характеризує в'язкість рідини (характеристика консистентності рідини);

$\frac{dU}{dr}$ – градієнт швидкості зсуву;

n – індекс плинності рідини, що характеризує ступінь відхилення поведінки рідини від ньютонівської та в'язкопластичної.

Відповідно до результатів наших досліджень, за умов, зазначених вище, індекс плинності рідини для долинської нафти практично сталий і може бути прийнятий n=0,95. Шляхом математичної обробки дослідних даних визначені значення межі текучості долинської нафти для щомісячних проб за різних температур підігріву у робочому діапазоні температур. Наприклад, для графіків, зображених на рисунках 1 і 2, одержуємо відповідно

$$\tau = 1{,}8 + 0{,}02\left(\frac{dU}{dr}\right)^{0{,}95}, \qquad (2)$$

$$\tau = 1{,}9 + 0{,}025\left(\frac{dU}{dr}\right)^{0{,}95}. \qquad (3)$$

Для ефективної експлуатації нафтопроводу Долина-Дрогобич необхідно розробити методику врахування нелінійнов'язкопластичних властивостей долинської нафти на теплогідравлічні режими його роботи.

Методика гідравлічного розрахунку, що пропонується нижче, розвиває положення, викладені у роботі [2], стосовно особливостей нелінійнов'язкопластичних рідин і базується на використанні універсальної формули Колбрука для визначення коефіцієнта гідравлічного опору у разі руху ньютонівської рідини у всіх зонах тертя турбулентному режиму.

Для розробки методики, насамперед, необхідно одержати аналітичний вираз для швидкості руху нелінійнов'язкопластичної рідини. Для цього рівняння (1) розв'язуємо відносно градієнта швидкості зсуву

$$\frac{dU}{dr} = \left(\frac{\tau - \tau_\partial}{\varphi}\right)^{\frac{1}{n}}. \qquad (4)$$

Записуємо вирази для динамічного напруження зсуву на стінці труби τ_R і на довільній відстані r від осі труби τ

$$\tau_R = \frac{\Delta P R}{2L}, \qquad (5)$$

$$\tau = \tau_R \frac{r}{R}, \qquad (6)$$

де: ΔP – втрати тиску у процесі руху рідини;

R – радіус трубопроводу;

L – довжина трубопроводу.

Рівняння (4) з урахуванням (5) і (6) записуємо у вигляді

$$dU = \varphi^{-\frac{1}{n}}\left(\tau_R \frac{r}{R} - \tau_\partial\right)^{\frac{1}{n}} dr. \qquad (7)$$

У результаті інтегрування рівняння (7) одержуємо

$$U = \varphi^{-\frac{1}{n}} \frac{R}{\tau_R} \frac{n}{(n+1)} \times \left[(\tau_R - \tau_\partial)^{\frac{n+1}{n}} - (\tau_R \frac{r}{R} - \tau_\partial)^{\frac{n+1}{n}}\right]. \qquad (8)$$

Враховуємо, що якщо радіус r дорівнює радіусу ядра потоку нелінійнов'язкопластичної рідини $R_я$, то динамічне напруження зсуву τ дорівнює межі плинності середовища Бакл-Гершеля τ_∂. З урахуванням зазначеного формула (8) приймає такий частковий вигляд для швидкості ядра потоку:

$$U_я = \varphi^{-\frac{1}{n}} \frac{R}{\tau_R} \frac{n}{(n+1)} (\tau_R - \tau_\partial)^{\frac{n+1}{n}}. \qquad (9)$$

Загальний вираз для об'ємної витрати нелінійнов'язкопластичної рідини у трубопроводі має вигляд

$$Q = \pi R_я^2 U_я + \int_{R_я}^{R} 2\pi r U \, dr. \qquad (10)$$

Підставляємо вирази (6), (8) і (9) у рівняння (10). У результаті після інтегрування та математичних перетворень одержуємо

$$Q = \pi\varphi^{-\frac{1}{n}} \frac{R^3}{\tau_R} \frac{n}{(n+1)} (\tau_R - \tau_\partial)^{\frac{n+1}{n}} + 2\pi\varphi^{-\frac{1}{n}} \frac{R^3}{\tau_R^2} \frac{n}{(n+1)} \frac{n}{(2n+1)} \times \left[\frac{1}{\tau_R} \frac{n}{(3n+1)} (\tau_R - \tau_\partial)^{\frac{3n+1}{n}} - (\tau_R - \tau_\partial)^{\frac{2n+1}{n}}\right]. \qquad (11)$$

У процесі руху нелінійнов'язкопластичної рідини рівняння (11) неможливо розв'язати в явному вигляді відносно втрати тиску ΔP, що входить у параметр τ_R. Це ускладнює гідравлічні розрахунки нафтопроводів і вимагає розробки спеціальних методів апроксимації рівняння (11).

Використовуючи положення, викладені у роботі [2], розробимо методику гідравлічного розрахунку нафтопроводу, яка передбачає введення у традиційні формули коригувальних коефіцієнтів для врахування зростання гідравлічного опору нафтопроводу через наявність у транспортованій рідині нелінійнов'язкопластичних властивостей.

Математичне моделювання руху нелінійнов'язкопластичної рідини проводимо для нафтопроводу довжиною L і внутрішнім діаметром D. Використовуючи експериментальні дослідження реологічних властивостей долинської нафти, визначаємо діапазон можливих значень коефіцієнтів реологічної моделі Бакл-Гершеля φ і τ_∂. Враховуючи теорію подібно-

сті, аналогічно роботі [2] коригувальні коефіцієнти будемо представляти як функцію бінгамівського числа Рейнольдса *Re* і критерію Іллюшина *И*. У процесі досліджень індекс плинності для долинської нафти приймаємо рівним n=0,95.

Для одержання математичних моделей для коригувальних коефіцієнтів використовуємо обчислювальний алгоритм, наведений у роботі [2]. Відмінність розрахунків полягає у тому, що замість рівняння Букінгема для визначення об'ємної витрати рідини використовуємо рівняння (11).

Коригувальний коефіцієнт, який враховує зростання гідравлічних втрат тиску в трубопроводі у разі перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини, знаходимо за формулою

$$K = \frac{\lambda_{нвп}}{\lambda_н}, \qquad (12)$$

де: $\lambda_{нвп}$ – коефіцієнт гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини, визначений за формулою (11);

$\lambda_н$ – коефіцієнт гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування ньютонівської рідини, визначений за методикою, наведеною в [2].

Якщо значення коригувального коефіцієнта K менше за одиницю, то даний режим перекачування знаходиться за межею адекватності формули (11). У цьому випадку значення коефіцієнта K приймається рівним одиниці і нафтопровід розраховується за традиційною формулою Дарсі-Вейсбаха.

Обчислювальний алгоритм реалізований нами у комп'ютерній програмі NVPL, яка дала змогу одержати математичні моделі для коригувального коефіцієнта K у широкому діапазоні чисел Рейнольдса і критерію Іллюшина. Діапазон зміни бінгамівського числа Рейнольдса і критерію Іллюшина при дослідженнях відповідає фактичним режимам експлуатації нафтопроводу Долина-Дрогобич у разі перекачування при неізотермічному режимі долинської нафти, яка за низьких градієнтів швидкості зсуву характеризується нелінійнов'язкопластичними властивостями.

На рисунках 3 і 4 зображено приклади одержаної нами залежності коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору нафтопроводу від критерію Іллюшина за турбулентного режиму (число Рейнольдса *Re* = 5825) і ламінарного режиму (*Re* = 510).

Обробка результатів багатоваріантних гідравлічних розрахунків режимів роботи модельного нафтопроводу за програмою NVPL засвідчила, що математична модель коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору нафтопроводу як за ламінарного, так і за турбулентного режимів руху нелінійнов'язкопластичної рідини може бути представлена у вигляді

$$K = A \cdot И + B, \qquad (13)$$

де A, B – коефіцієнти математичної моделі, значення яких залежить від величини бінгамівського числа Рейнольдса та коефіцієнта консистентності нафти.

Рисунки 5 і 6 ілюструють одержану нами залежність коефіцієнтів математичної моделі A і B від числа Рейнольдса і коефіцієнта консистентності за ламінарного режиму перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини.

Математичне моделювання графіків, наведених на рисунках 5 і 6 , дало можливість запропонувати такі залежності для коефіцієнтів моделі A і B за ламінарного режиму:

$$A = a_1 \ln \mathrm{Re} + a_2, \qquad (14)$$

$$B = b_1 \cdot \mathrm{Re}^{-b_2}, \qquad (15)$$

де a_1, a_2, b_1, b_2 – коефіцієнти, значення яких залежать від величини коефіцієнта консистентності нафти;

$$a_1 = 4{,}30 \cdot 10^{-2}\varphi + 1{,}64 \cdot 10^{-3}, \qquad (16)$$

$$a_2 = -0{,}117\varphi + 0{,}115, \qquad (17)$$

$$b_1 = 0{,}497 \cdot \varphi^{-1{,}3}, \qquad (18)$$

$$b_2 = -1{,}5245 \cdot \varphi + 0{,}474. \qquad (19)$$

Рисунки 7 і 8 ілюструють одержану нами залежність коефіцієнтів математичної моделі A і B від числа Рейнольдса і коефіцієнта консистентності за турбулентного режиму перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини.

Шляхом математичного моделювання графіків, наведених на рисунках 7 і 8, одержані такі залежності для коефіцієнтів моделі A і B за турбулентного режиму:

$$A = 27{,}487 \cdot Re^{-0{,}7516}, \qquad (20)$$

$$B = c_1 \cdot Re^{-c2}, \qquad (21)$$

$$c_1 = 3{,}14 \cdot \varphi^{-1{,}7965}, \qquad (22)$$

$$c_2 = -2509 \cdot \varphi^3 + 390 \cdot \varphi^2 - 21{,}155 \cdot \varphi + 1{,}285. \qquad (23)$$

Для прикладу визначимо коригувальний коефіцієнт збільшення гідравлічного опору нафтопроводу при перекачуванні нафти, що характеризується нелінійнов'язкопластичними властивостями, за таких умов:

внутрішній діаметр D=0,255 мм;

довжина нафтопроводу L =59000 м;

густина нафти за умов перекачування ρ=840 кг/м^3;

коефіцієнт консистентності нафти φ=0,04 Па·с;

межа плинності середовища Баклі-Гершеля τ_0 = 5 Па;

витрата нафти у трубопроводі Q=200 м^3/год =0,0556 м^3/с;

абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труб k_e = 0,2 мм.

Знаходимо бінгамівське число Рейнольдса і критерій Іллюшина [2]

$$Re = 5825, \quad И = 29.$$

За методикою, наведеною в [2], обчислюємо коефіцієнт гідравлічного опору у разі перекачування ньютонівської нафти за турбулентного режиму

$$\lambda_н = 0{,}03622.$$

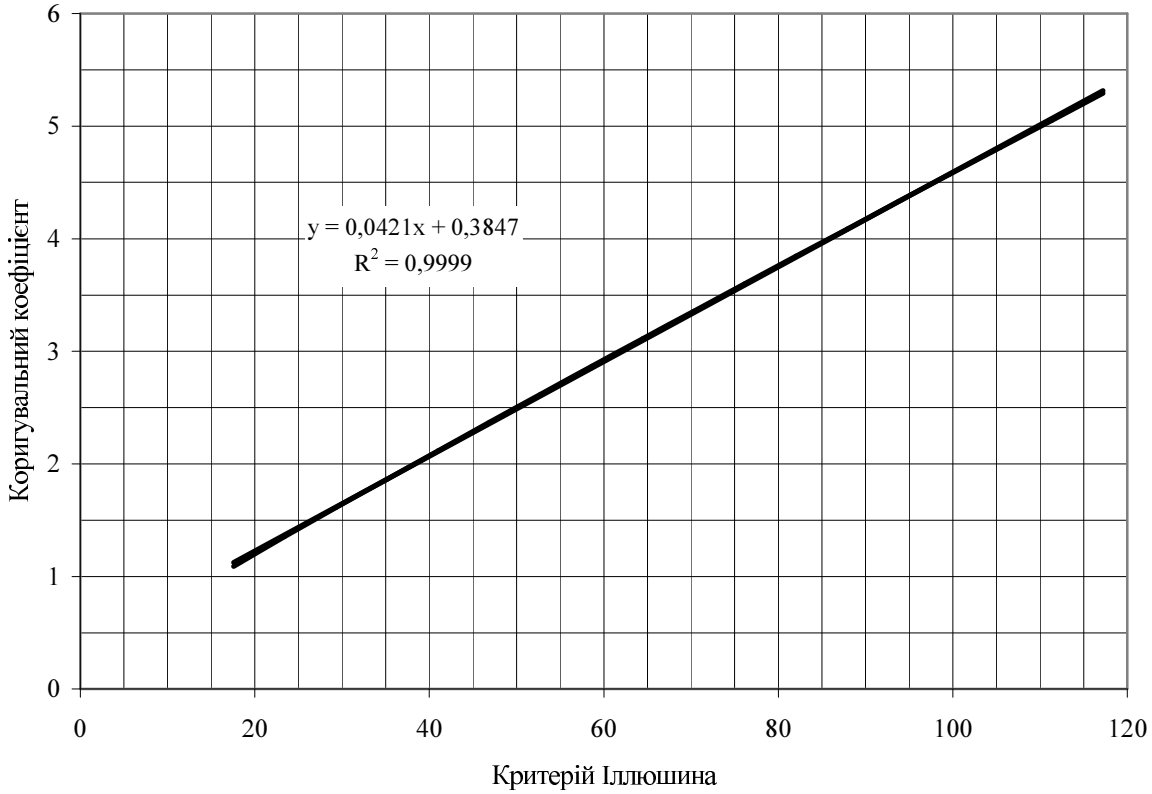

Рисунок 3 — Залежність коригувального коефіцієнта зростання гідравлічного опору нафтопроводу від критерія Іллюшина (число Рейнольдса 5825, коефіцієнт консистентності 0,04 Па·с)

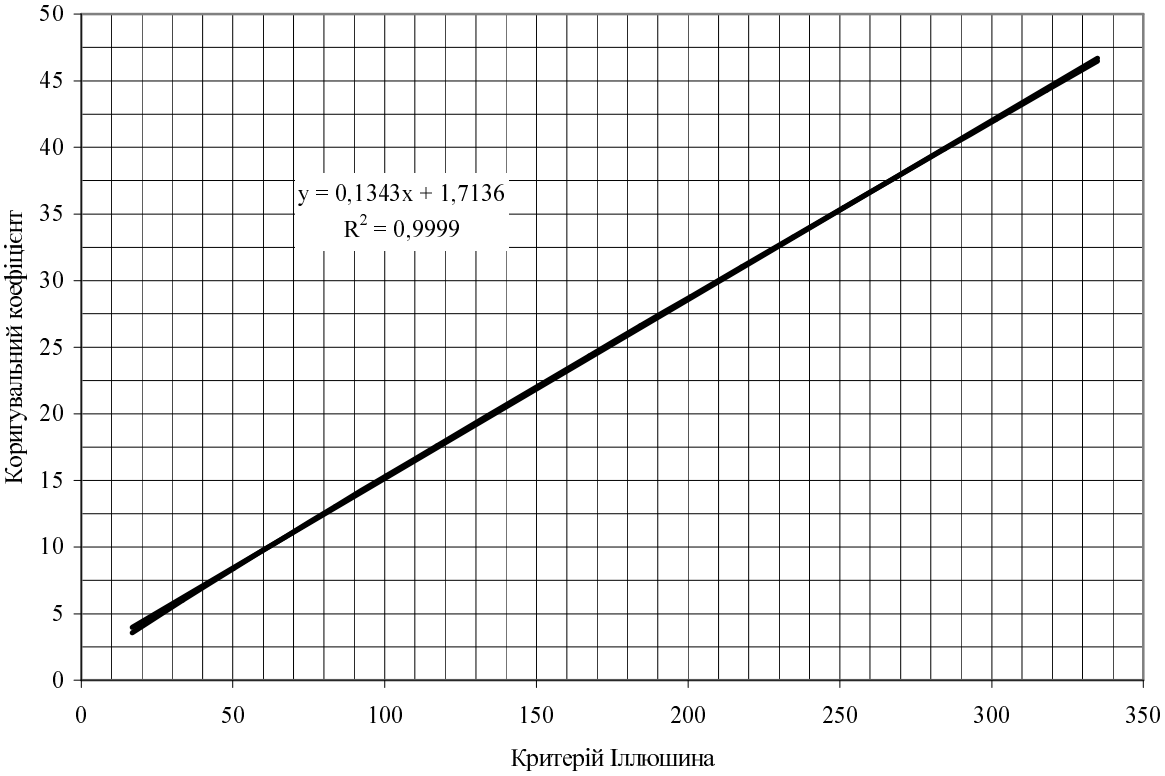

Рисунок 4 — Залежність коригувального коефіцієнта зростання гідравлічного опору нафтопроводу від критерія Іллюшина (число Рейнольдса 510, коефіцієнт консистентності 0,08 Па·с)

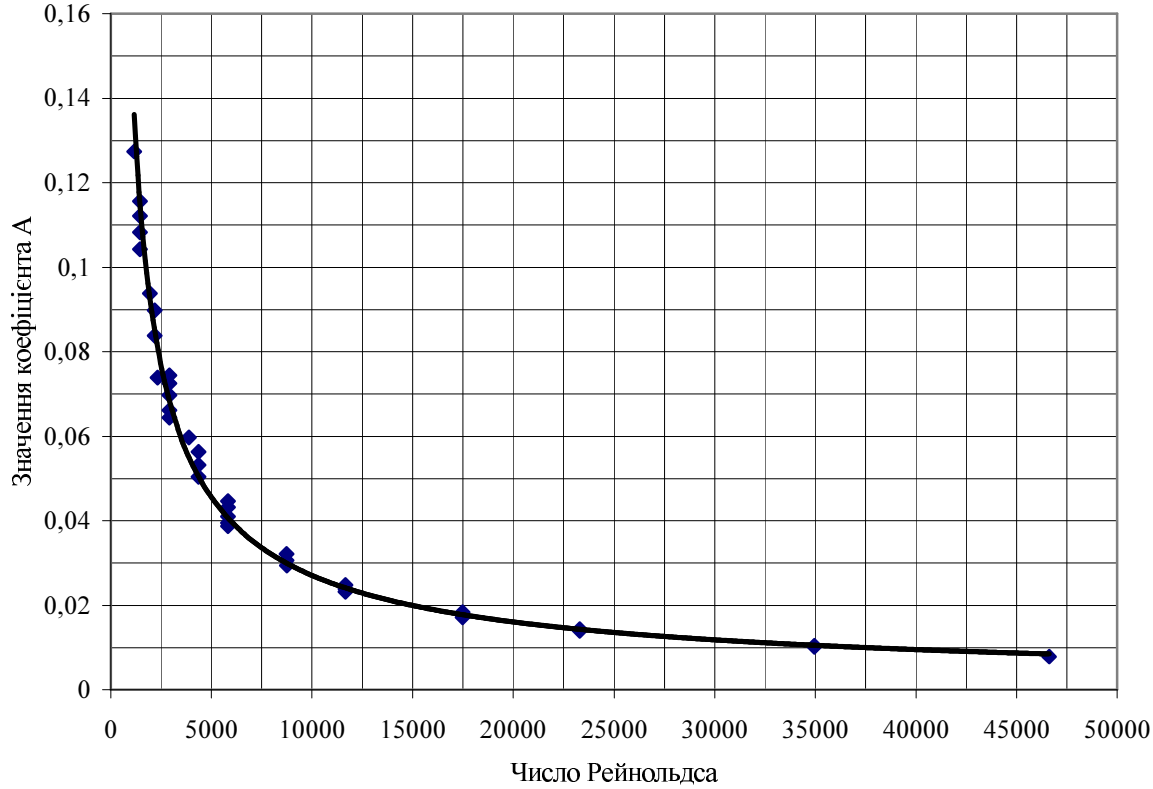

Рисунок 5 — Залежність коефіцієнта А від числа Рейнольдса у математичній моделі для коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору у разі перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини у турбулентному режимі

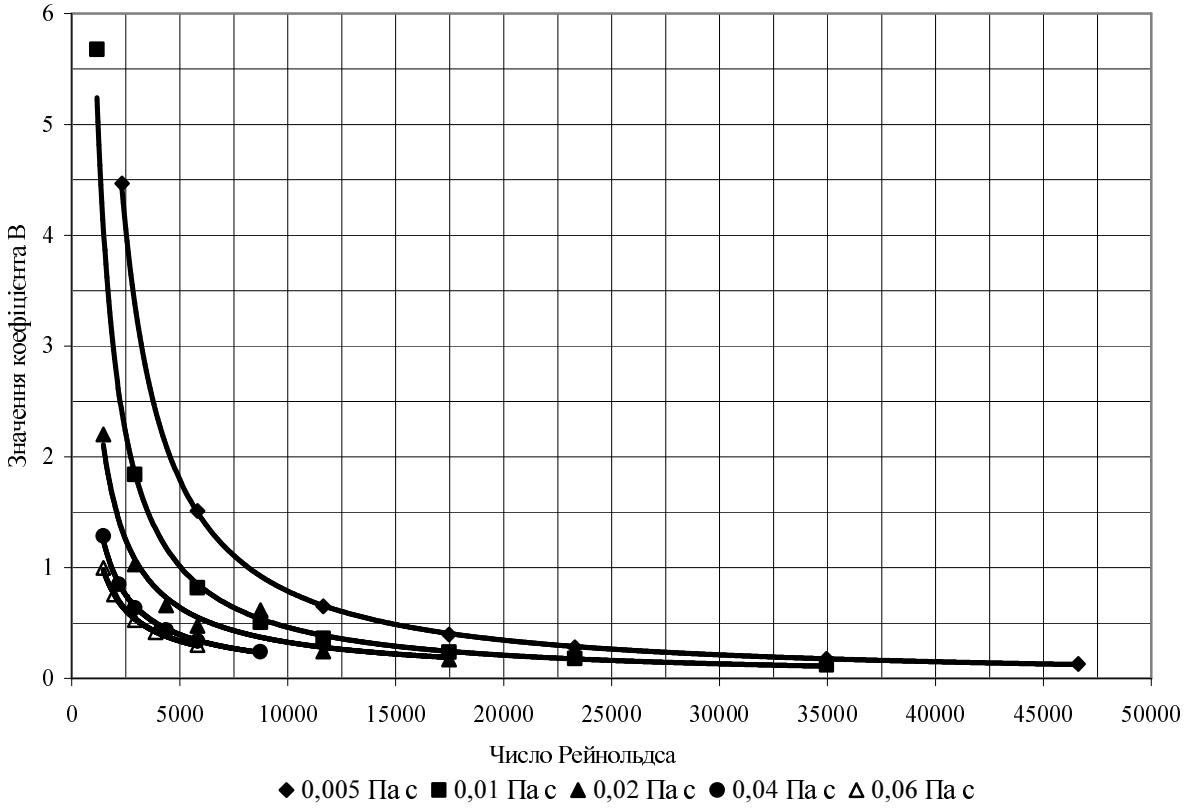

Рисунок 6 — Залежність коефіцієнта В від числа Рейнольдса і коефіцієнта консистентності у математичній моделі для коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору у разі перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини у турбулентному режимі

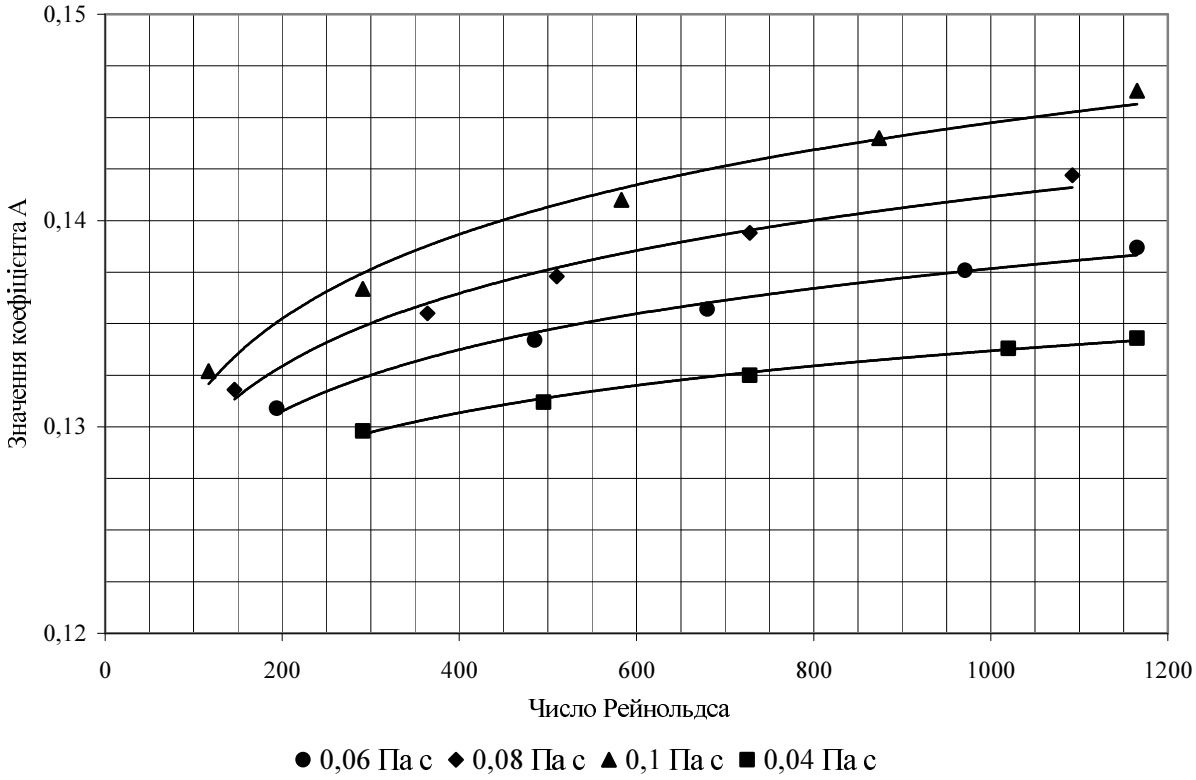

Рисунок 7 — Залежність коефіцієнта А від числа Рейнольдса і коефіцієнта консистентності у математичній моделі для коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору у разі перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини у ламінарному режимі

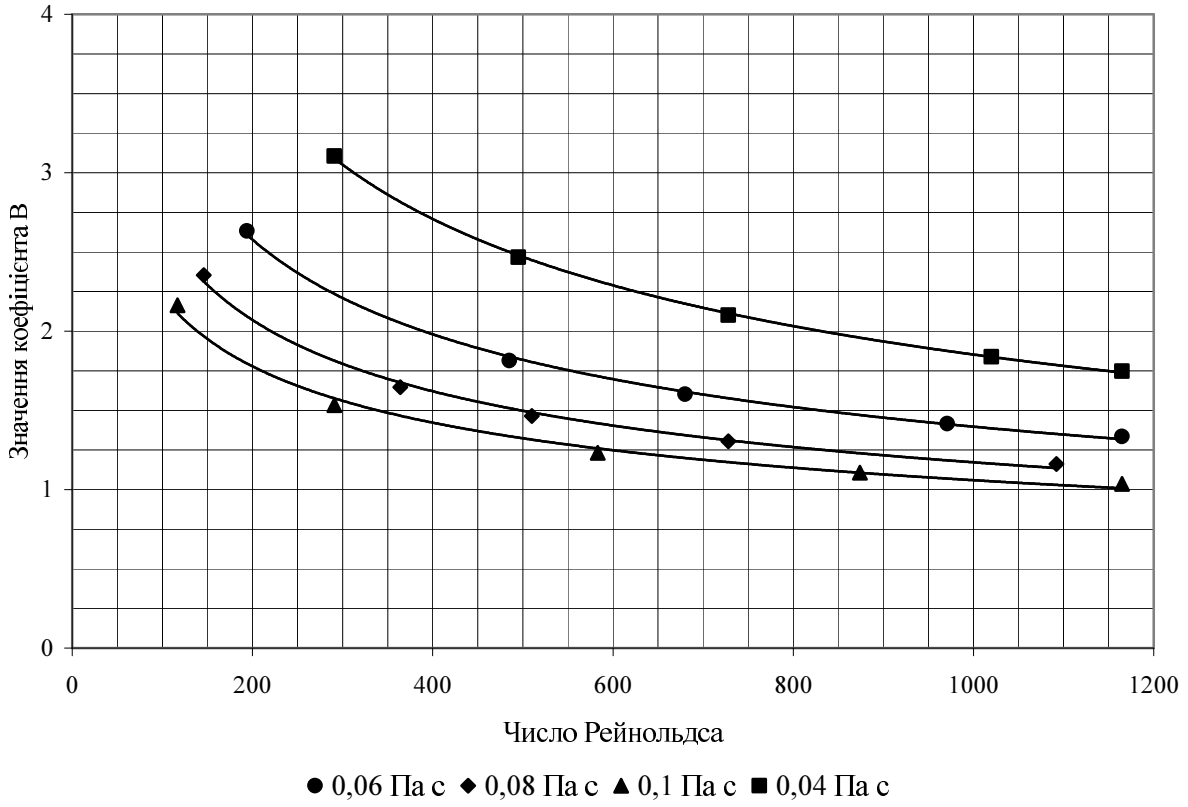

Рисунок 8 — Залежність коефіцієнта В від числа Рейнольдса і коефіцієнта консистентності у математичній моделі для коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору у разі перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини у ламінарному режимі

Оскільки перекачування нафти відбувається за турбулентного режиму, то для визначення коефіцієнтів математичної моделі використовуємо формули (20)-(23)

$$A = 27{,}487 \cdot 5825^{-0{,}7516} = 4{,}066 \cdot 10^{-2};$$

$$c_1 = 3{,}14 \cdot 0{,}04^{-1{,}7965} = 1019;$$

$$c_2 = -2509 \cdot 0{,}04^3 + 390 \cdot 0{,}04^2 -$$

$$- 21{,}155 \cdot 0{,}04 + 1{,}285 = 0{,}902;$$

$$B = 1019 \cdot 5825^{-0{,}902} = 0{,}41.$$

За формулою (13) обчислюємо коригувальний коефіцієнт збільшення гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування нелінійно-в'язкопластичної нафти у турбулентному режимі

$$K = 0{,}04066 \cdot 29 + 0{,}41 = 1{,}59.$$

Методом ітерацій із рівняння (11) знаходимо втрати тиску в модельному нафтопроводі у разі перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини у турбулентному режимі

$$\Delta P = 6{,}71 \text{ бар.}$$

Використовуючи формулу Дарсі-Вейсбаха, визначаємо ефективний коефіцієнт гідравлічного опору у разі перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини у турбулентному режимі

$$\lambda_{нвп} = 0{,}05834.$$

За формулою (12) знаходимо значення коригувального коефіцієнта

$$K = \frac{0{,}05834}{0{,}03622} = 1{,}61.$$

Таким чином, значення коригувального коефіцієнта, одержане за розробленими математичними моделями, відрізняється від точного результату, обчисленого за формулою (11), на 1%, що свідчить про адекватність моделей.

Виконаємо аналогічні розрахунки у разі перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини у ламінарному режимі та таких умов:

коефіцієнт консистентності нафти

φ=0,08 Па·с;

межа текучості середовища Баклі-Гершеля

τ_0 = 4 Па;

витрата нафти у трубопроводі

Q =35 м^3/год =0,0097 м^3/с.

Всі інші дані такі ж, як у попередньому прикладі розрахунку.

Визначаємо число Рейнольдса та значення критерію Іллюшина

$$Re = 510; \; И = 67.$$

За формулою Стокса обчислюємо коефіцієнт гідравлічного опру нафтопроводу у разі перекачування ньютонівської рідини у ламінарному режимі

$$\lambda_н = \frac{64}{510} = 0{,}12555.$$

За формулами (16)-(19) знаходимо значення коефіцієнтів математичної моделі, що залежать від коефіцієнта консистентності нафти

$$a_1 = 4{,}30 \cdot 10^{-2} 0{,}08 + 1{,}64 \cdot 10^{-3} = 0{,}0051,$$

$$a_2 = -0{,}117 \cdot 0{,}08 + 0{,}115 = 0{,}106,$$

$$b_1 = 0{,}497 \cdot 0{,}08^{-1{,}3} = 13{,}253,$$

$$b_2 = -1{,}5245 \cdot 0{,}08 + 0{,}474 = 0{,}352.$$

За формулами (14) і (15) визначаємо величину коефіцієнтів A і B у ламінарному режимі

$$A = 0{,}0051 ln 510 + 0{,}106 = 0{,}138;$$

$$B = 13{,}253 \cdot 510^{-0{,}352} = 1{,}474.$$

За формулою (13) обчислюємо коригувальний коефіцієнт збільшення гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування нелінійно-в'язкопластичної нафти і ламінарному режимі

$$K = 0{,}138 \cdot 67 + 1{,}474 = 10{,}72.$$

Методом ітерацій із рівняння (11) знаходимо втрати тиску у разі перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини у ламінарному режимі

$$\Delta P = 4{,}74 \text{ бар.}$$

Використовуючи формулу Дарсі-Вейсбаха, визначаємо ефективний коефіцієнт гідравлічного опору у разі перекачування нелінійнов'язкопластичної рідини у ламінарному режимі

$$\lambda_{нвп} = 1{,}34669.$$

За формулою (12) знаходимо значення коригувального коефіцієнта

$$K = \frac{1{,}34669}{0{,}12555} = 10{,}73.$$

Таким чином, значення коригувального коефіцієнта, одержане за розробленими математичними моделями, практично співпало з точним результатом, що свідчить про адекватність моделей.

Таким чином, запропоновані нами аналітичні вирази дають змогу за заданої витрати та відомих реологічних властивостях нелінійно-в'язкопластичної рідини, не використовуючи метод ітерацій, достовірно визначати втрати тиску від тертя та ефективно прогнозувати режим роботи нафтопроводу.

Література

1 Яновський С.Р. Дослідження впливу температури підігрівання долинської нафти на її реологічні властивості / С.Р. Яновський, М.Д.Середюк, Л. Д. Пилипів // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2008. – № 1(17). – С.82-91.

2 Середюк М.Д. Гідравлічний розрахунок нафтопроводу при перекачуванні нафти, що характеризується властивостями в'язкопластичної рідини / М.Д. Середюк, С.Р. Яновський // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 2(27). – С. 56-61.

Стаття поступила в редакційну колегію 26.03.09
Рекомендована до друку професором ***В. Я. Грудзом***