

## ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК НАФТОПРОВОДУ У ПРОЦЕСІ ПЕРЕКАЧУВАННЯ НАФТИ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЄТЬСЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ В'ЯЗКОПЛАСТИЧНОЇ РІДИНИ

М.Д.Середюк, С.Р.Яновський

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

*Разработана методика гидравлического расчета нефтепровода при перекачке нефти, характеризующейся свойствами вязкопластичной жидкости. Методика предусматривает введение в расчетные формулы корректирующих коэффициентов, учитывающих увеличение гидравлического сопротивления нефтепровода из-за наличия в нефти вязкопластичных свойств*

*The method of hydraulic calculations of oil pipelines for oil with visco-plastic properties was developed. The method provides for using the design formula with corrective coefficients, which increase the hydraulic resistance of oil pipeline if the visco-plastic properties of oil are available.*

Деякі сорти нафти, що видобувається у західному регіоні України, відносяться до високов'язких швидкозастигаючих нафт, які характеризуються ускладненими реологічними властивостями. У першу чергу, це стосується нафт долинських родовищ. Експериментальні дослідження, виконані нами протягом останніх років [1,2], довели, що за температур навколишнього середовища долинська нафта проявляє явно виражені властивості в'язкопластичної рідини.

Для ефективної експлуатації нафтопроводів, що перекачують високов'язкі швидкозастигаючі нафти, необхідне достовірне прогнозування режимних параметрів роботи з урахуванням реологічних особливостей рідин та умов навколишнього середовища. Це вимагає удосконалення методології гидравлічних розрахунків нафтопроводів за перекачування рідин, що характеризуються в'язкопластичними властивостями.

У роботі [3] нами розглянуто особливості гидравлічного розрахунку нафтопроводу у разі перекачування в'язкопластичної рідини. У результаті досліджень запропонований метод розрахунку втрат тиску у нафтопроводі в процесі транспортування нафти з в'язкопластичними властивостями. Однак аналітичні вирази, наведені у роботі [3], мають обмежену сферу застосування, оскільки передбачають рух рідини тільки за ламінарного режиму та в зоні гидравлічно гладких труб турбулентного режиму.

Уточнена методика гидравлічного розрахунку нафтопроводу, що пропонується нижче, розвиває положення, викладені у роботі [3], і базується на використанні універсальної формули Колбрука для визначення коефіцієнта гидравлічного опору під час руху рідини в усіх зонах гидравлічного тертя турбулентного режиму.

Транспортабельні властивості ньютонівської рідини однозначно визначаються її кінематичною в'язкістю. Реологічні та транспортабельні властивості в'язкопластичної рідини, на відміну від ньютонівської, характеризуються коефіцієнтами реологічної моделі Шведова-

Бінгама, а саме: граничним динамічним напруженням зсуву  $\tau_o$  і пластичною в'язкістю  $\eta_{nl}$ .

Метою досліджень, результати яких наведені нижче, є розробка уточненої методики гидравлічного розрахунку нафтопроводу, яка передбачає введення у традиційні формули коригувальних коефіцієнтів, що дають змогу врахувати зростання гидравлічного опору нафтопроводу через наявність у транспортованій рідині в'язкопластичних властивостей. Математичні моделі для коригувальних коефіцієнтів будемо визначати шляхом спільного розв'язування рівнянь Дарсі-Вейсбаха і Букінгема [3].

Математичне моделювання гидродинаміки руху в'язкопластичної рідини проводимо для нафтопроводу довжиною  $L$  і внутрішнім діаметром  $D$ . Використовуючи експериментальні дослідження реологічних властивостей долинської нафти [1, 2], визначаємо діапазон можливих значень коефіцієнтів реологічної моделі Шведова-Бінгама  $\tau_o$  і  $\eta_{nl}$ . Враховуючи теорію подібності, коригувальні коефіцієнти збільшення гидравлічного опору нафтопроводу будемо представляти як функцію бінгамівського числа Рейнольдса  $Re$  і критерію Іллюшина  $I$

$$Re = \frac{4Q\rho}{\pi D \eta_{nl}}, \quad (1)$$

$$I = \frac{\pi D^3 \tau_o}{4Q \eta_{nl}}, \quad (2)$$

де:  $Q$  – об'ємна витрата нафти в нафтопроводі;  
 $\rho$  – густина нафти за умов перекачування.

З метою одержання математичних моделей для коригувальних коефіцієнтів збільшення гидравлічного опору нафтопроводу використовуємо обчислювальний алгоритм, наведений у роботі [3]. Відмінність розрахунків полягає у методі визначення коефіцієнта гидравлічного опору.

Коефіцієнт гидравлічного опору в нафтопроводі у разі перекачування ньютонівської рідини за ламінарного режиму ( $Re < 1190$ ) об-

числюємо за формулою Стокса. Межею існування ламінарного режиму руху нафти в нафтопроводі приймаємо число Рейнольдса рівне  $Re = 1190$ , оскільки воно забезпечує стикування формул для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору за ламінарного і турбулентного режимів.

За турбулентного режиму руху нафти спочатку методом послідовних наближень знаходимо перше перехідне число Рейнольдса  $Re_n$ , яке розділяє зону гідравлічно гладких труб і зону змішаного тертя турбулентного режиму [4]

$$\frac{k_e}{D} = \frac{8,15}{Re_n \sqrt{0,0032 + 0,221 Re_n^{-0,237}}}, \quad (3)$$

де  $k_e$  – абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труби.

Використаємо поняття ефективної еквівалентної шорсткості внутрішньої поверхні труби згідно з [4]

$$k_{ee} = k_e \frac{Re - 4000}{Re_n - 4000}. \quad (4)$$

У разі виконання умови  $Re > Re_n$  приймаємо

$$k_{ee} = k_e. \quad (5)$$

Методом послідовних наближень обчислюємо коефіцієнт гідравлічного опору нафтопроводу за модифікованою формулою Колбрука [4]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k_{ee}}{3,7D} \right). \quad (6)$$

Визначаємо коефіцієнт гідравлічного опору нафтопроводу за загальноприйнятною формулою Блазіуса. Як остаточну величину коефіцієнта гідравлічного опору за турбулентного режиму руху ньютонівської рідини приймаємо більше із двох значень, розрахованих за формулами Колбрука і Блазіуса.

Коригувальний коефіцієнт, який враховує зростання гідравлічних втрат тиску в нафтопроводі в процесі перекачування в'язкопластичної рідини, знаходимо за формулою

$$K = \frac{\lambda_{en}}{\lambda_n}, \quad (7)$$

де:  $\lambda_{en}$  – коефіцієнт гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування в'язкопластичної рідини, визначений за формулою Букінгема;

$\lambda_n$  – коефіцієнт гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування ньютонівської рідини, визначений за методикою, наведеною вище.

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

Наведений вище обчислювальний алгоритм нами реалізований у комп'ютерній програмі *VPL*, яка дала змогу одержати математичні моделі для коригувального коефіцієнта  $K$  у широкому діапазоні чисел Рейнольдса і критерію Іллюшина. На відміну від роботи [3] діапазон зміни бінгамівського числа Рейнольдса у процесі досліджень значно розширений і становить від 200 до 50000. Це відповідає фактичним режимам експлуатації нафтопроводу Долина-Дрогобич, по якому перекачують за неізо-термічного режиму долинську нафту, яка характеризується в'язкопластичними властивостями.

На рисунках 1 і 2 зображені приклади одержаної нами залежності коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору нафтопроводу від критерію Іллюшина за значень бінгамівського числа Рейнольдса відповідно  $Re = 583$  і  $Re = 8738$ .

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

$$K = A \cdot I + B, \quad (8)$$

де  $A, B$  – коефіцієнти математичної моделі, значення яких залежить від величини бінгамівського числа Рейнольдса та пластичної в'язкості нафти.

Рисунки 3 і 4 ілюструють одержану нами залежність коефіцієнтів математичної моделі  $A$  і  $B$  від бінгамівського числа Рейнольдса за ламінарного режиму перекачування в'язкопластичної рідини.

Математичне моделювання графіків, зображених на рисунках 3 і 4, дало можливість запропонувати такі залежності для коефіцієнтів моделі  $A$  і  $B$  за ламінарного режиму ( $Re < 1190$ ):

$$A = a_1 \ln Re + a_2, \quad (9)$$

$$B = b_1 \cdot Re^{-b_2}, \quad (10)$$

де  $a_1, a_2, b_1, b_2$  – коефіцієнти, значення яких залежать від величини пластичної в'язкості нафти;

$$a_1 = 2,75 \cdot 10^{-2} \eta_{nl} + 5 \cdot 10^{-5}; \quad (11)$$

$$a_2 = -0,109 \eta_{nl} + 0,1248; \quad (12)$$

$$b_1 = 2,528 \cdot \eta_{nl}^{-1,1618}; \quad (13)$$

$$b_2 = -0,9295 \cdot \eta_{nl} + 0,5011. \quad (14)$$

Рисунки 5 і 6 ілюструють одержану нами залежність коефіцієнтів математичної моделі  $A$  і  $B$  від бінгамівського числа Рейнольдса за турбулентного режиму перекачування в'язкопластичної рідини.

Математичне моделювання графіків, зображених на рисунках 5 і 6, дало можливість одержати такі залежності для коефіцієнтів моделі  $A$  і  $B$  за турбулентного режиму ( $Re > 1190$ ):

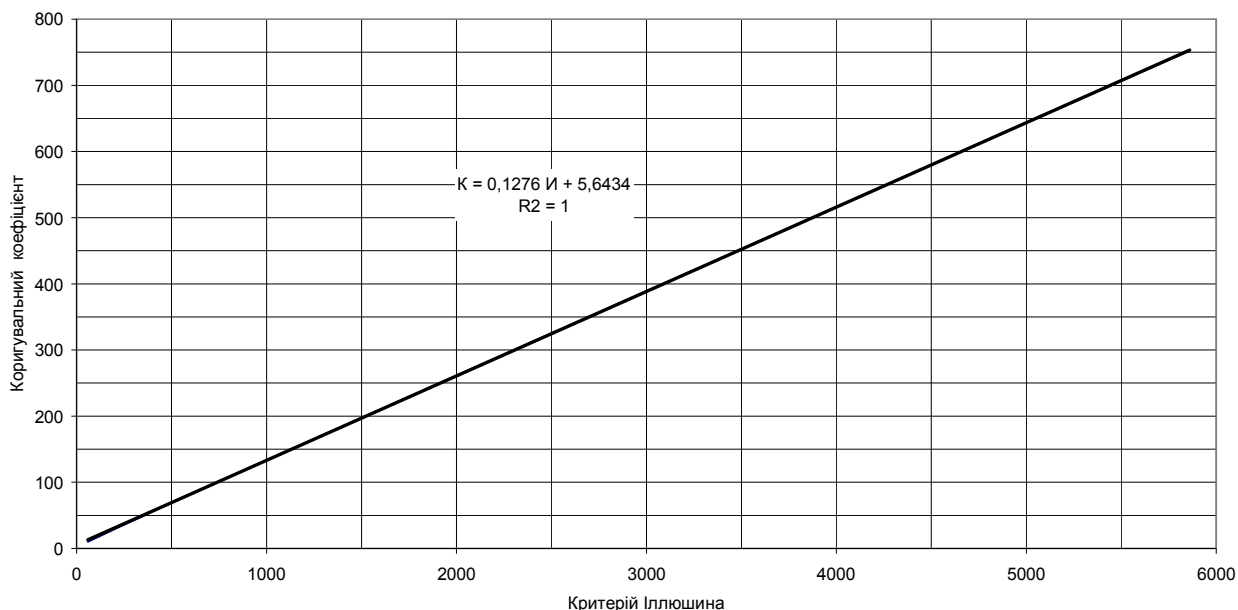


Рисунок 1 — Залежність коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору від критерію Іллюшина за ламінарного режиму ( $Re=583$ , пластична в'язкість нафти  $0,04$  Па·с)

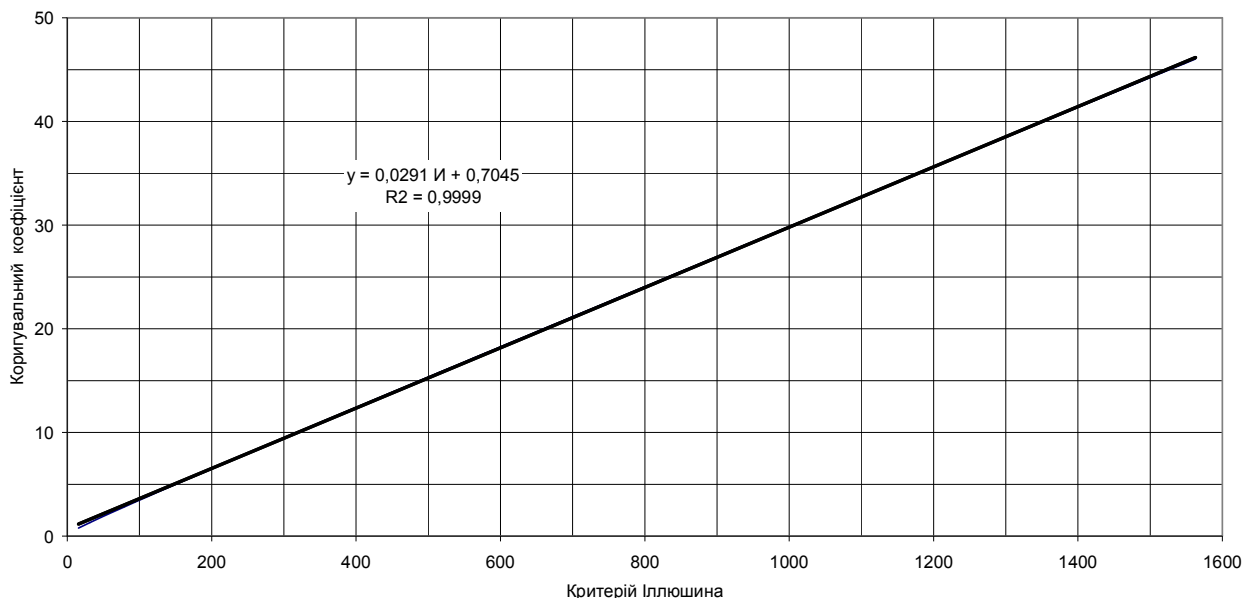


Рисунок 2 — Залежність коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору від критерію Іллюшина за турбулентного режиму ( $Re=8738$ , пластична в'язкість нафти  $0,02$  Па·с)

$$A = 22,682 \cdot Re^{-0,7347}; \quad (15)$$

$$B = c_1 \cdot Re^{-c_2}; \quad (16)$$

$$c_1 = 45,309 \cdot \eta_{nl}^{-1,5705}; \quad (17)$$

$$c_2 = -4912 \cdot \eta_{nl}^3 + 4911 \cdot \eta_{nl}^2 - 17,178 \cdot \eta_{nl} + 1,3117. \quad (18)$$

Наведемо приклад застосування запропонованих залежностей. Необхідно визначити коефіцієнт гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування нафти, що характеризується в'язкопластичними властивостями, за таких умов:

внутрішній діаметр  $D = 0,255$  м;  
довжина нафтопроводу  $L = 59000$  м;

густина нафти за умов перекачування  
 $\rho = 840$  кг/м<sup>3</sup>;

пластична в'язкість  $\eta_{nl} = 0,04$  Па·с;

граничне динамічне напруження зсуву  
 $\tau_o = 20$  Па;

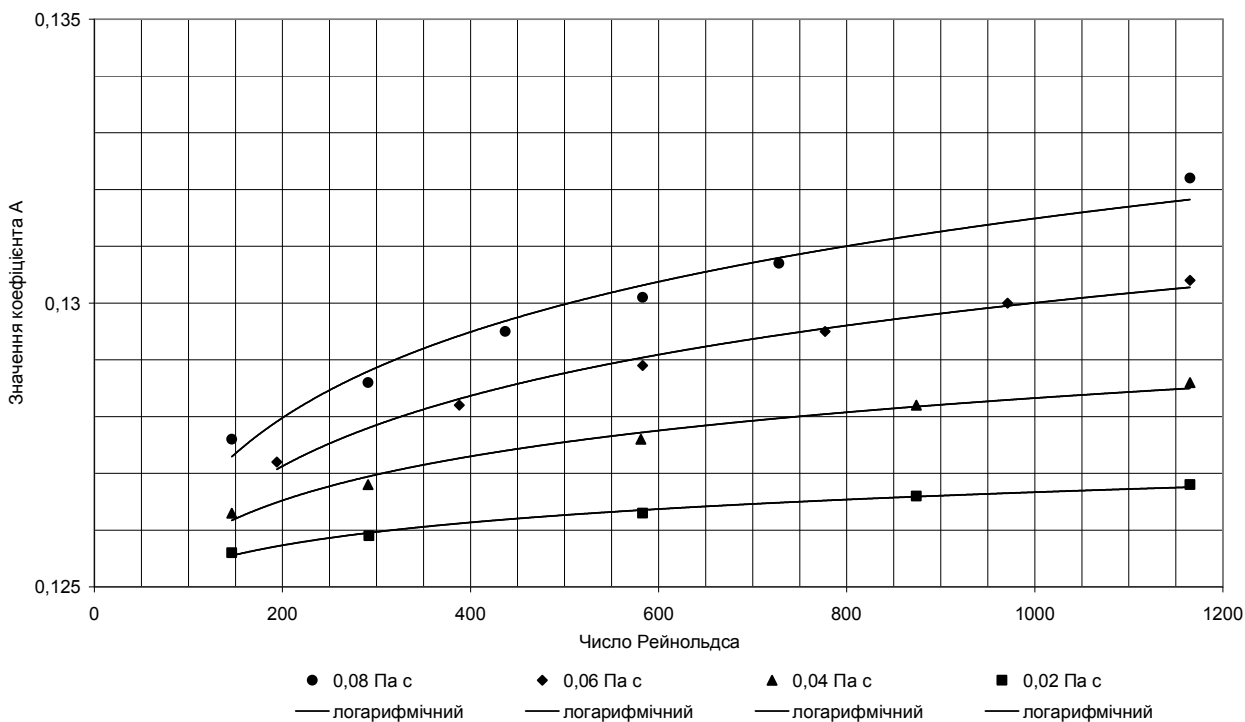
витрата нафти у трубопроводі

$$Q = 200 \text{ м}^3/\text{год} = 0,0556 \text{ м}^3/\text{с};$$

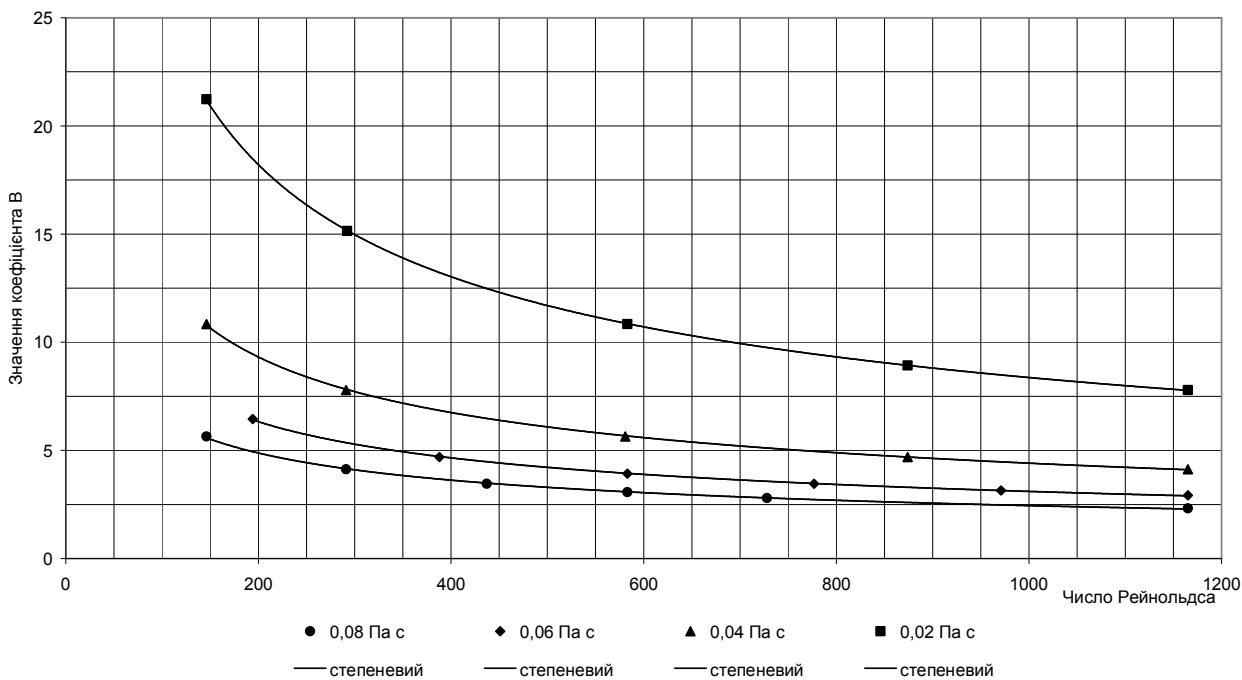
абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труб  $k_e = 0,2$  мм.

За формулою (1) визначаємо бінгамівське число Рейнольдса

$$Re = \frac{4 \cdot 0,0556 \cdot 840}{\pi \cdot 0,255 \cdot 0,04} = 5830.$$



**Рисунок 3 — Залежність коефіцієнта А від числа Рейнольдса в математичній моделі для коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування в'язкопластичної рідини за ламінарного режиму**



**Рисунок 4 — Залежність коефіцієнта В від числа Рейнольдса в математичній моделі для коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування в'язкопластичної рідини за ламінарного режиму**

За формулою (2) знаходимо значення критерію Іллюшина

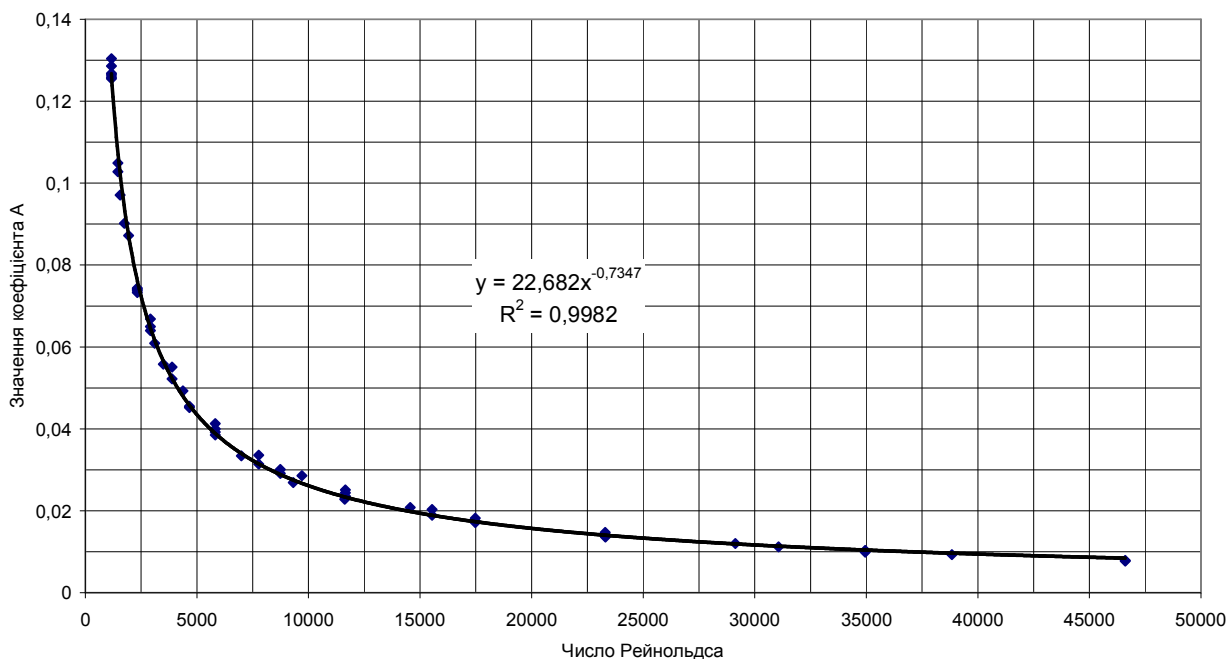
$$I = \frac{\pi \cdot 0,255^3 \cdot 20}{4 \cdot 0,0556 \cdot 0,04} = 117.$$

За методикою, наведеною вище, обчислюємо коефіцієнт гідравлічного опору у разі пере-

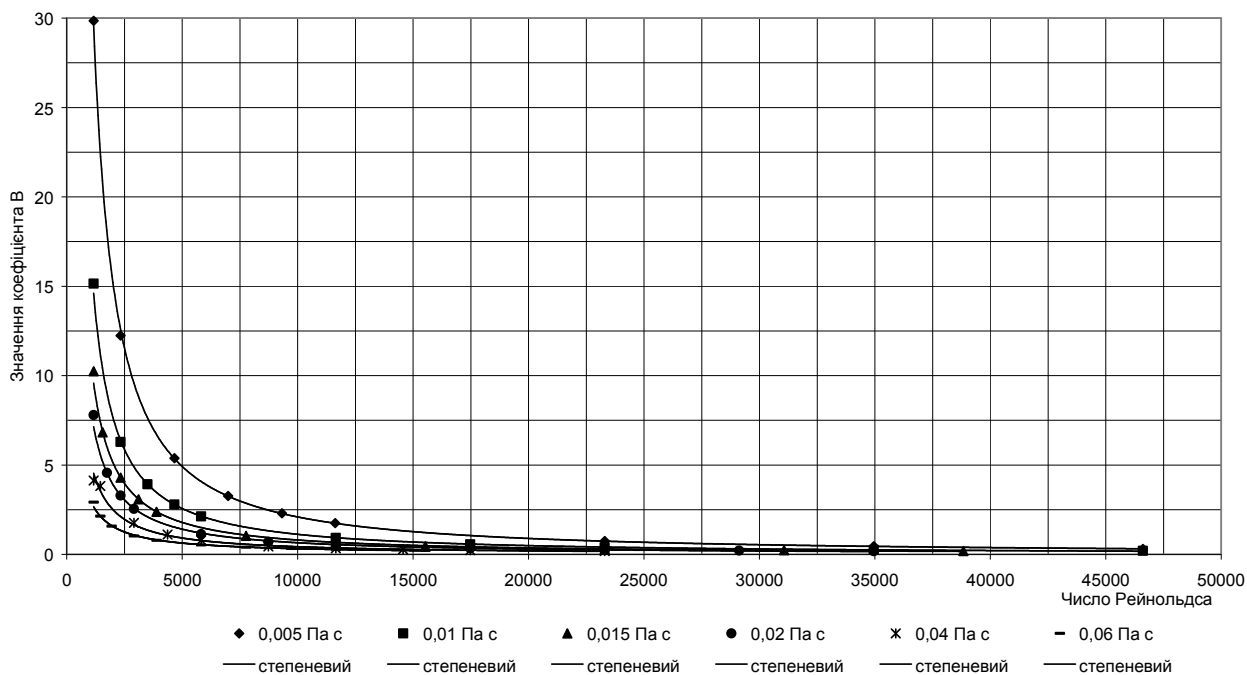
качування ньютонівської нафти за турбулентного режиму

$$\lambda_n = 0,03621.$$

Оскільки перекачування нафти відбувається при турбулентному режимі, то для визначення коефіцієнтів математичної моделі використовуємо формули (15)-(18)



**Рисунок 5** — Залежність коефіцієнта А від числа Рейнольдса в математичній моделі для коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування в'язкопластичної рідини за турбулентного режиму



**Рисунок 6** — Залежність коефіцієнта В від числа Рейнольдса в математичній моделі для коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування в'язкопластичної рідини за турбулентного режиму

$$A = 22,682 \cdot 5830^{-0,7347} = 0,03882 ;$$

$$c_1 = 45,309 \cdot 0,04^{-1,5705} = 7106 ;$$

$$c_2 = -4912 \cdot 0,04^3 + 491,1 \cdot 0,04^2 - 17,178 \cdot 0,04 + 1,3117 = 1,096 ;$$

$$B = 7106 \cdot 5830^{-1,096} = 0,5302 .$$

За формулою (8) обчислюємо коригувальний коефіцієнт збільшення гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування в'язкопластичної нафти за турбулентного режиму

$$K = 0,03882 \cdot 117 + 0,5302 = 5,07 .$$

Визначаємо значення коефіцієнта гідравлічного опору у процесі руху в'язкопластичної рідини за турбулентного режиму

$$\lambda_{en} = 0,03621 \cdot 5,07 = 0,1836 .$$

Виконаємо аналогічні розрахунки у разі перекачування в'язкопластичної рідини за ламінарного режиму за таких умов:

пластична в'язкість  $\eta_{nl} = 0,08$  Па·с;

граничне динамічне напруження зсуву

$$\tau_o = 30 \text{ Па};$$

витрата нафти у трубопроводі

$$Q = 50 \text{ м}^3/\text{год} = 0,0139 \text{ м}^3/\text{с}.$$

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

За формулами (1) і (2) визначаємо бінгамівське число Рейнольдса та значення критерію Іллюшина

$$Re = 728; I = 352.$$

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

$$\lambda_n = \frac{64}{728} = 0,0879.$$

За формулами (11)-(14) знаходимо значення коефіцієнтів математичної моделі, що залежать від пластичної в'язкості нафти,

$$a_1 = 2,75 \cdot 10^{-2} \cdot 0,08 + 5 \cdot 10^{-5} = 0,00225;$$

$$a_2 = -0,109 \cdot 0,08 + 0,1248 = 0,1161;$$

$$b_1 = 2,528 \cdot 0,08^{-1,1618} = 47,552;$$

$$b_2 = -0,9295 \cdot 0,08 + 0,5011 = 0,4267.$$

За формулами (9) і (10) визначаємо величину коефіцієнтів  $A$  і  $B$

$$A = 0,00225 \ln 728 + 0,1161 = 0,1309;$$

$$B = 47,552 \cdot 728^{-0,4267} = 2,857.$$

За формулою (8) обчислюємо коригувальний коефіцієнт збільшення гідравлічного опору нафтопроводу у разі перекачування в'язкопластичної нафти за ламінарного режиму

$$K = 0,1309 \cdot 352 + 2,857 = 48,93.$$

Визначаємо значення коефіцієнта гідравлічного опору нафтопроводу в процесі руху в'язкопластичної рідини за ламінарного режиму

$$\lambda_{en} = 0,0879 \cdot 48,93 = 4,301.$$

Таким чином, шляхом математичного моделювання нами одержані аналітичні вирази, які дають змогу при заданій витраті нафти та відомих реологічних властивостях в'язкопластичної рідини, не використовуючи метод ітерацій, визначати втрати тиску від тертя і тим самим достовірно прогнозувати режим роботи нафтопроводу.

### Література

1 Болонний В.Т., Середюк М.Д. Дослідження реологічних властивостей нафти долинського родовища // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – № 4(10). – С. 34-40.

2 Пилипів Л.Д., Середюк М.Д. Експериментальні дослідження реологічних характеристик долинської нафти з додаванням депресатора // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – № 3 (20). – С. 50-54.

3 Пилипів Л.Д., Середюк М.Д. Особливості гідравлічного розрахунку нафтопроводу при перекачуванні в'язкопластичної рідини // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 1(2). – С. 27-31.

4 Середюк М.Д., Люта Н.В. Обґрунтування вибору математичних моделей для коефіцієнта гідравлічного опору в нафтопроводах // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 2. – С. 35-37.

## 15-а Міжнародна конференція з автоматичного управління

# АВТОМАТИКА-2008 AUTOMATICS-2008

м. Одеса

(23–26 вересня 2008 р.)

### Оргкомітет конференції

Одеська національна морська академія,  
65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8

fa@ma.odessa.ua

leovish@rambler.ru

тел. (048) 728 25 95

### Тематика конференції:

- Математичні проблеми управління, оптимізації і теорії ігор
- Управління та ідентифікація в умовах невизначеності
- Автоматичне управління в технічних системах
- Управління аерокосмічними, морськими та іншими рухомими об'єктами
- Управління в соціальних та економічних системах
- Прогресивні інформаційні технології та інтелектуальне управління
- Підготовка кадрів в галузі управління та автоматизації
- Автоматизація навчання і тренажерна підготовка