

Фізико-технічні проблеми транспорту та зберігання енергоносіїв

УДК 622.692.4

ОСОБЛИВОСТІ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ НАФТОПРОВОДУ ПРИ ПЕРЕКАЧУВАННІ В'ЯЗКОПЛАСТИЧНОЇ РІДИНИ

Л.Д.Пилипів, М.Д.Середюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166;
e-mail: tzn g@n un g. e d u. u a

Проведены лабораторные исследования реологических свойств высоковязкой долинской нефти. Предложена методика и разработано программное обеспечение гидравлического расчета нефтепровода при перекачке вязкопластической жидкости

Laboratory researches rheological properties of high-viscous dolyna's oil were implemented. Methods and programme of hydraulic calculation of visco-plastic oil pipeline were offered.

У західному регіоні України видобувають високов'язкі швидкозастигаючі нафти, які характеризуються ускладненими реологічними властивостями. Для транспортування високов'язких нафт нафтопроводами необхідно застосовувати спеціальні технології, які забезпечують покращання реологічних характеристик, а отже і транспортабельних властивостей нафт. З урахуванням реологічних особливостей нафт Прикарпаття можна рекомендувати такі технології транспортування нафтопроводами: перекачування нафти з попереднім підігрівом, перекачування нафти у суміші з розріджувачами (малов'язкими нафтами) і перекачування нафти з додаванням депресатора. Незалежно від застосованої технології транспортування, як засвідчили наші дослідження, транспортована нафта у певному діапазоні робочих температур характеризується властивостями в'язкопластичної рідини.

Надійна експлуатація нафтопроводів, що перекачують високов'язкі швидкозастигаючі нафти, можлива лише за умови адекватного прогнозування режимних параметрів роботи з врахуванням реологічних особливостей рідин і умов навколишнього середовища. Це вимагає розробки методології технологічних розрахунків нафтопроводів при перекачуванні рідин, що

характеризуються в'язкопластичними властивостями.

Втрати тиску при русі ньютонівської рідини в трубопроводі визначаються за формулою Дарсі-Вейсбаха

$$\Delta P = \frac{8}{\pi^2} \lambda \frac{L}{D^5} Q^2 \rho, \quad (1)$$

де: λ – коефіцієнт гідравлічного опору, який у загальному випадку є функцією числа Рейнольдса і відносної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу;

L – довжина ділянки нафтопроводу;

D – внутрішній діаметр нафтопроводу;

Q – витрата рідини в нафтопроводі;

ρ – густина рідини за умов перекачування.

Рух в'язкопластичної рідини в трубопроводі описується рівнянням Букінгема, яке можна звести до вигляду

$$Q = \frac{\pi D^4 \Delta P}{128 L \eta_{nl}} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{4\tau_o L}{D \Delta P} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{4\tau_o L}{D \Delta P} \right)^4 \right], \quad (2)$$

де: η_{nl} – пластична в'язкість транспортованої рідини;

τ_o – граничне динамічне напруження зсуву рідини.

Пластична в'язкість і граничне динамічне напруження зсуву – це коефіцієнти реологічної моделі Шведова-Бінгама, які можуть бути визначені при експериментальних дослідженнях реологічних властивостей транспортованої рідини.

Рівняння (2) не може бути безпосередньо розв'язане відносно втрат тиску, що утруднює його практичне застосування при технологічних розрахунках нафтопроводів, які транспортують нафти з в'язкопластичними властивостями.

Метою досліджень, що наведені нижче, є розробка методики гідравлічного розрахунку нафтопроводу, яка базується на застосуванні традиційної формули Дарсі-Вейсбаха і передбачає введення коригувальних коефіцієнтів, які дають змогу врахувати зростання гідравлічного опору нафтопроводу через наявність у транспортованій рідині в'язкопластичних властивостей. Вигляд математичних моделей для коригувальних коефіцієнтів будемо визначати шляхом спільного розв'язування рівнянь (1) і (2).

Враховуючи теорію подібності, коригувальні коефіцієнти будемо представляти як функцію бінгамівського числа Рейнольдса і критерію Іллюшина.

Радіус ядра потоку в'язкопластичної рідини знаходиться за формулою

$$R_y = \frac{2\tau_o L}{\Delta P}. \quad (3)$$

Відносний радіус ядра потоку в'язкопластичної рідини виражаємо так:

$$\chi = \frac{R_y}{R} = \frac{4\tau_o L}{D\Delta P}. \quad (4)$$

Із врахуванням виразів (3) і (4) рівняння Букінгема набуває вигляду

$$Q = \frac{\pi D^4 \Delta P}{128L\eta_{nl}} \left(1 - \frac{4}{3}\chi + \frac{1}{3}\chi^4 \right). \quad (5)$$

Для одержання математичних моделей для коригувальних коефіцієнтів використовуємо такий обчислювальний алгоритм.

Математичне моделювання руху в'язкопластичної рідини проводимо для нафтопроводу довжиною L і внутрішнім діаметром D .

Визначаємо діапазон можливих значень коефіцієнтів реологічної моделі Шведова-Бінгама η_{nl} і τ_o .

Задаємося витратою в'язкопластичної рідини у нафтопроводі Q . За формулою (4) обчислюємо відносний радіус ядра потоку в'язкопластичної рідини χ .

Методом послідовних наближень із рівняння (5) знаходимо втрати тиску ΔP при перекачуванні по трубопроводу в'язкопластичної рідини з витратою Q .

Вводимо поняття еквівалентного коефіцієнта гідравлічного опору λ_e , який враховує особливості руху в'язкопластичної рідини. Із рівняння (1) маємо

$$\lambda_e = \frac{\pi^2 D^5 \Delta P}{8LQ^2 \rho}. \quad (6)$$

У формулу (6) підставляємо знайдені раніше втрати тиску ΔP при русі в трубопроводі в'язкопластичної рідини з витратою Q .

Еквівалентний коефіцієнт гідравлічного опору представляємо як добуток коефіцієнта гідравлічного опору ньютонівської рідини λ_n на коригувальний коефіцієнт, який враховує зростання гідравлічних втрат при перекачуванні в'язкопластичної рідини K

$$\lambda_e = \lambda_n K. \quad (7)$$

Коефіцієнт гідравлічного опору у нафтопроводі при перекачуванні ньютонівської рідини визначаємо так:

при ламінарному режимі руху – за формулою Стокса

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \quad (8)$$

при турбулентному режимі руху в області гідравлічно гладких труб – за формулою Блазіуса

$$\lambda_n = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (9)$$

де Re – бінгамівське число Рейнольдса

$$Re = \frac{4Q\rho}{\pi D \eta_{nl}}. \quad (10)$$

Обчислюємо значення критерію Іллюшина за формулою

$$I = \frac{\pi D^3 \tau_o}{4Q \eta_{nl}}. \quad (11)$$

Коригувальний коефіцієнт, який враховує зростання гідравлічних втрат при перекачуванні в'язкопластичної рідини, знаходимо за формулою

$$K = \frac{\lambda_e}{\lambda_n}. \quad (12)$$

До уваги приймаються ті значення коригувального коефіцієнта, які більші за одиницю. Якщо значення коригувального коефіцієнта менше за одиницю, то даний режим перекачування знаходиться за межею адекватності формули Букінгема. У цьому випадку значення коефіцієнта приймається рівним одиниці, і нафтопровід розраховується за традиційною формулою Дарсі-Вейсбаха.

Наведений вище обчислювальний алгоритм нами реалізований у комп'ютерній програмі PLAS, яка дала змогу дослідити динаміку зміни гідравлічного опору нафтопроводу і коригувальних коефіцієнтів у широкому діапазоні чисел Рейнольдса і критерію Іллюшина. Діапазон зміни бінгамівського числа Рейнольдса при дослідженнях приймався рівним від 500 до 15000.

Математична обробка результатів багатоваріантних гідравлічних розрахунків режимів роботи модельного нафтопроводу за програ-

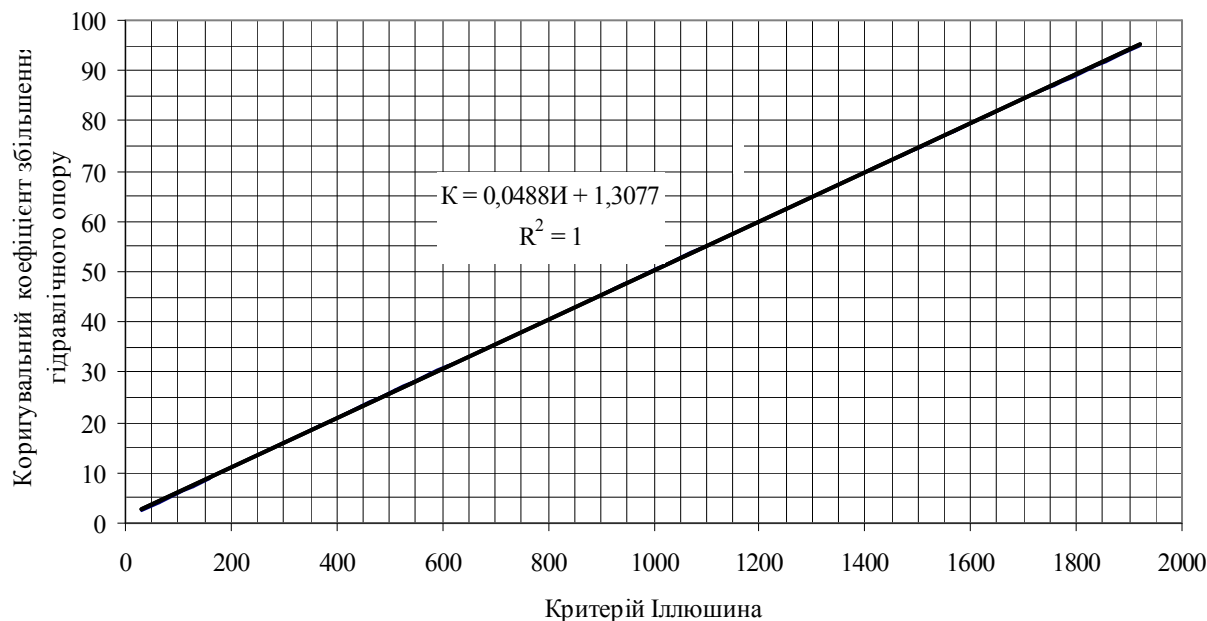


Рисунок 1 - Залежність коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору від критерію Іллюшина при значенні числа Рейнольдса $Re=4356$

мою PLAS засвідчила, що математична модель коригувального коефіцієнта гідравлічного опору може бути представлена у вигляді

$$K = A(Re) \cdot I + B(Re), \quad (13)$$

де $A(Re), B(Re)$ – коефіцієнти математичної моделі, значення яких залежить від величини бінгамівського числа Рейнольдса.

На рисунку 1 наведена одержана нами залежність коригувального коефіцієнта збільшення гідравлічного опору від критерію Іллюшина при значенні бінгамівського числа Рейнольдса $Re = 4365$.

Рисунки 2-3 ілюструють одержану нами залежність коефіцієнтів математичної моделі A і B від бінгамівського числа Рейнольдса.

Математичне моделювання графіків, наведених на рисунках 2-3, та аналогічних залежностей за умови $Re < 2300$ дало можливість одержати такі залежності:

для коефіцієнта моделі A при $Re < 2300$

$$A = 0,07970 + 1,0035 \cdot 10^{-4} Re - 4,5631 \cdot 10^{-8} Re^2; \quad (14)$$

для коефіцієнта моделі A при $Re > 2300$

$$A = 24,027 \cdot Re^{-0,7398}; \quad (15)$$

для коефіцієнта моделі B при $Re < 2300$

$$B = 3,0491 + 2,9369 \cdot 10^{-3} Re - 1,4598 \cdot 10^{-6} Re^2; \quad (16)$$

для коефіцієнта моделі B при $Re > 2300$

$$B = 4861,5 Re^{-0,9797}. \quad (17)$$

Таким чином, шляхом математичного моделювання нами одержані аналітичні залежності, які дають змогу при заданій витраті, не ви-

користовуючи метод ітерацій, визначити втрати тиску при перекачуванні нафтопроводом рідини, що характеризується в'язкопластичними властивостями.

Наведемо приклад застосування запропонованих залежностей. Необхідно визначити втрати тиску у нафтопроводі при перекачуванні нафти, що характеризується в'язкопластичними властивостями, за таких умов:

внутрішній діаметр $D=0,514$ мм;

довжина нафтопроводу $L = 78000$ м;

густина нафти за умов перекачування $\rho = 844$ кг/м³;

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

граничне динамічне напруження зсуву $\tau_o = 8$ Па;

витрата нафти у трубопроводі $Q = 500$ м³/год $= 0,139$ м³/с.

За формулою (10) визначимо бінгамівське число Рейнольдса

$$Re = \frac{4 \cdot 0,139 \cdot 844}{\pi \cdot 0,514 \cdot 0,04} = 7265.$$

За формулою (11) знаходимо значення критерію Іллюшина

$$I = \frac{\pi \cdot 0,514^3 \cdot 8}{4 \cdot 0,139 \cdot 0,04} = 153,5.$$

За формулою (9) обчислюємо коефіцієнт гідравлічного опору при перекачуванні ньютонівської нафти

$$\lambda_n = \frac{0,3164}{7265^{0,25}} = 0,03427.$$

За формулою (15) знаходимо значення коефіцієнта A

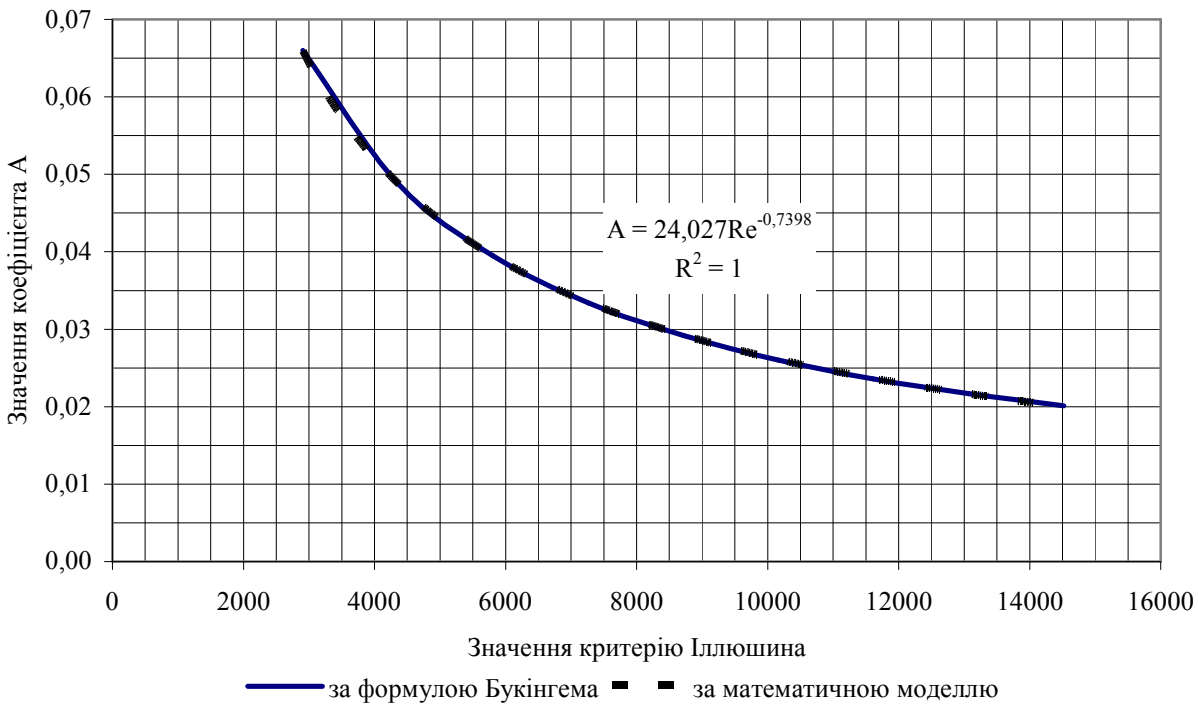


Рисунок 2 - Залежність коефіцієнта моделі A від бінгамівського числа Рейнольдса Re при Re>2300

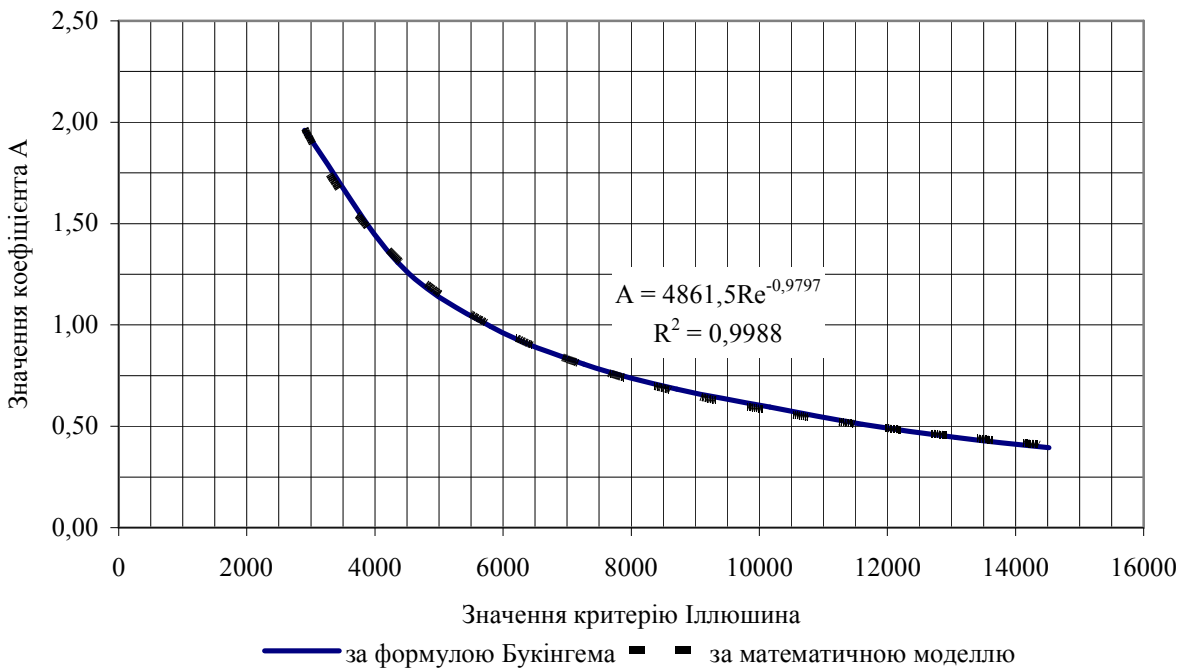


Рисунок 3 - Залежність коефіцієнта моделі B від бінгамівського числа Рейнольдса Re при Re>2300

$A = 24,027 \cdot 7265^{-0,7398} = 0,03343$.
 За формулою (17) визначаємо значення коефіцієнта B
 $B = 4861,5 \cdot 7265^{-0,9797} = 0,8015$.
 За формулою (13) знаходимо значення коригувального коефіцієнта K
 $K = 0,03343 \cdot 153,5 + 0,8015 = 5,93$.

Визначаємо еквівалентне значення коефіцієнта гідравлічного опору при русі в'язкопластичної рідини за формулою (7)
 $\lambda_e = 0,03427 \cdot 5,93 = 0,2032$.
 За формулою (1) обчислюємо втрати тиску при перекачуванні в'язкопластичної рідини з витратою $Q = 500 \text{ м}^3/\text{год}$

$$\Delta P = \frac{8}{\pi^2} 0,2032 \frac{78000 \cdot 0,139^2 \cdot 844}{0,514^5} 10^{-6} = 5,84 \text{ МПа.}$$

Якщо гідравлічний розрахунок нафтопроводу при перекачуванні в'язкопластичної нафти проводити методом ітерацій, використовуючи формули (4) і (5), то розраховані втрати тиску становитимуть $\Delta P_b = 5,76$ МПа. Таким чином, при застосуванні запропонованої методики похибка результатів становить 1,4%, тобто не перевищує точності математичних моделей, що широко використовуються в інженерній практиці при технологічних розрахунках нафтопроводів.

$$\bar{g}\rho - \text{grad}\bar{P} + \mu\nabla^2\bar{W} - \rho\left(\frac{\partial\bar{W}}{\partial t} + \bar{W}\text{grad}\bar{W}\right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}\bar{W} = 0,$$

Література

1. Середюк М.Д., Якимів Й.В., Лісафін В.П. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів: Підручник. – Івано-Франківськ, 2001. – 517 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 904 с.

УДК 622.691.4.043.3

АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ У ГАЗОВОМУ ПОТОЦІ

В.Я.Грудз, Д.Ф.Тимків

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157;
e-mail: public@nuing.edu.ua

На основе анализа параметров моделирования фактических режимов работы магистральных газопроводов количественно установлена структура гидравлических потерь энергии. Предложен критерий нестационарности для выбора вида математической модели при прогнозировании параметров режима.

On the basis of analysis of parameters of design of actual office hours of main gas pipelines the structure of hydraulic losses of energy is set in number. The criterion of unstationarity for the choice of type of mathematical model at prognostication of parameters of the mode is offered.

В процесі математичного моделювання газодинамічних процесів у газопроводах задачі з гідродинаміки і теплообміну зазвичай розглядаються окремо. За допомогою рівнянь гідродинаміки вирішуються задачі з визначення полів швидкостей, тиску, густини газу. Задачі з теплообміну розглядаються без обліку зміни тиску та витрати газу в просторі й часі, вважаючи термодинамічні процеси стаціонарними. Це пояснюється тим, що стала часу перехідного процесу на декілька порядків більша за аналогічну константу гідродинамічного процесу.

Проте результати досліджень свідчать, що зміна швидкості потоку газу по довжині ділянки впливає на інтенсивність теплообміну з навколишнім середовищем. У свою чергу, зміна температурних напруг у навколишньому середовищі призводить не тільки до нового розподілу швидкостей у трубі, але й до повної зміни режиму руху газу. Тому задача з моделювання руху газу в газопроводі повинна включати газодинамічні та термодинамічні рівняння, об'єднані в єдину систему.

Загалом нестационарний термогазодинамічний процес руху газу в трубопроводі може бути описаний системою диференціальних рівнянь, наведених у векторній формі [1],

$$\bar{W}\frac{\partial\bar{T}}{\partial t} + \text{grad}\bar{T} = -\frac{1}{\rho}\text{div}\bar{q} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial\bar{T}}{\partial t} + \frac{1}{\rho}(\Phi + \bar{q}), \quad (2)$$

де: ρ – густина газу як функція просторових координат і часу; \bar{P} – вектор тиску; \bar{W} – вектор швидкостей із проєкціями на просторові координати u, v, w ; \bar{T} – вектор температурного поля; \bar{g} – тепловий потік у навколишнє середовище; Φ – дисипативна функція Рейля.

Для замикання системи рівнянь використовують рівняння газового стану, що у загальному випадку може бути представлено функцією $f(p, T) = 0$.

З метою опису теплообміну в стінці газопроводу необхідно доповнити систему рівнянням теплопровідності

$$\rho_c c_c \frac{\partial\bar{T}_c}{\partial t} = \text{div}(\xi_c \text{grad}\bar{T}_c + \bar{q}_c), \quad (3)$$

де: c_c, ρ_c – теплоємність і густина матеріалу труб; ξ_c – коефіцієнт теплопровідності сталі;

$\frac{\partial\bar{T}_c}{\partial t}$ – вектор температурного поля в стінці

труби; \bar{q}_c – тепловий потік крізь стінку.

Просторова модель термогазодинамічного процесу в газопроводі важко реалізується і для експериментальних досліджень малоперспек-