

УДК 622.692.4

ВИКОРИСТАННЯ СПРОЩЕНИХ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ НАФТОПРОВІДІВ

М. П. Возняк, Л. В. Возняк, Г. М. Кривенко

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380 (3422) 4-00-98; e-mail: gidro@nung.edu.ua*

Проведено аналіз основних формул для визначення коефіцієнта гідравлічного опору. Наведено спрощений метод параметричного діагностування стану внутрішньої поверхні трубопроводу шляхом визначення його ефективного діаметра. Розглянуто спрощений гідравлічний розрахунок визначення пропускної здатності нафтопроводу.

Ключові слова: *нафтопровід, ефективний діаметр, коефіцієнт гідравлічного опору, тиск, витрата, діагностування.*

Сучасний технічний стан нафтопровідної системи України забезпечує безперервне транспортування нафти споживачам. Магістральні нафтопроводи мають довготривалий термін експлуатації. Значна частина їх експлуатується понад тридцять років. У той же час система нафтозабезпечення складається з нафтопроводів, що відрізняються за терміном експлуатації, для яких використовувалися різні нормативи проектування. Нормативні документи, які використовувалися при проектуванні трубопроводів, не завжди відповідають сучасним підвищеним вимогам безпеки для населення та навколишнього середовища, надійній роботі трубопроводів у процесі експлуатації. Тому і сьогодні є актуальним питання підвищення ефективності та безпечності експлуатації нафтопроводів.

Також у практиці експлуатації трубопроводів часто виявляються розбіжності між проектними та фактичними параметрами їх роботи. Наприклад, нафтопровід Долина-Дрогобич, запроектований на тиск 1,9–2 МПа (за проектної температури підігріву нафти 60 °С) забезпечує задану в проекті продуктивність за тієї ж температури підігріву лише за тиску порядку 3,5–4,0 МПа.

Виходячи з вищенаведеного, виникає потреба у більш детальному вивченні питань, пов'язаних з перекачуванням нафти трубопроводами.

Для цього потрібно мати промислові вимірювання або диспетчерські дані найбільш інформативних параметрів, а саме: продуктивності, перепаду тиску, середнього значення температури перекачування, в'язкості за заданої температури [1].

За результатами вимірювань можна визначити основні параметри, що характеризують роботу нафтопроводу: гідравлічні нахили, ефективні

діаметри трубопроводу, товщину відкладів парафіну на ділянках між пунктами вимірювання тощо.

Слід зауважити, що основи сучасних методів гідравлічного розрахунку прийшли до нас із-за кордону. Це саме одержана більш як півтори століття назад, але і сьогодні актуальна ключова формула Дарсі-Вейсбаха для визначення втрат напору на тертя та розрахункові залежності Стокса, Блазіуса, Кольбука для коефіцієнта гідравлічного опору, що входить до цієї формули. Ці формули підтверджені численними дослідженнями і практикуються у всьому світі. Формула Кольбука широко використовується у світовій практиці для гідравлічного розрахунку трубопроводів при турбулентному режимі, але коефіцієнт гідравлічного опору заданий в ній у неявному вигляді [3]:

$$\lambda = \left\{ -2,0 \log \left[\frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right] \right\}^{-2}, \quad (1)$$

де ε – еквівалентна шорсткість; d – внутрішній діаметр.

Крім формули Кольбука на сьогодні найпоширенішим методом для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору у всьому діапазоні чисел Рейнольдса є діаграма Муді, яка може використовуватися для будь-яких рідин. Ця діаграма побудована з використанням формул Кольбука або її похідних у явному та неявному вигляді [5].

У світовій практиці для визначення коефіцієнта гідравлічного опору також знайшла використання формула, одержана Хейлендом (аналогічна формулі Ісаєва), яка за точністю не поступається формулі Кольбука і є її апроксимацією

$$\lambda = \left\{ -1,8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{3,7d} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{\text{Re}} \right] \right\}^{-2}. \quad (2)$$

Похибка при визначенні коефіцієнта гідравлічного опору за формулою (2) не перевищує 2% [4].

Використавши результати промислових вимірювань на одному із нафтопроводів, визначимо значення коефіцієнта гідравлічного опору та порівняємо його з теоретичним, обчисленим за формулами Блазіуса, Кольбука та Хейленда, оскільки процес перекачування нафти на досліджуваному нафтопроводі відбувається у турбулентному режимі, зона гідравлічно гладких труб. В залежності від зони турбулентного режиму у формулах (1) і (2) ураховується вплив на коефіцієнт гідравлічного опору числа Рейнольдса, шорсткості чи обох параметрів одночасно.

За даними промислових вимірювань (продуктивності, перепаду тиску, в'язкості) коефіцієнт гідравлічного опору склав 0,0193 [1]. Коефіцієнт гідравлічного опору, визначений за формулою Хейленда, дорівнює 0,0197, за формулою Блазіуса – 0,0198, за формулою Кольбука – 0,0192.

Відхилення за формулою Блазіуса складає 3,5%, за формулою Хейленда 2,1%, за формулою Кольбука 0,5%.

Для визначення коефіцієнта гідравлічного опору бажано використовувати ефективний діаметр нафтопроводу. Особливо важливо знати

ефективний діаметр неізотермічних нафтопроводів із значним терміном експлуатації. Під час перекачування нафти в неізотермічному режимі спостерігається значне відкладання парафіну, на стінки трубопроводів, що призводить до зменшення “живого перерізу” і, отже, до зниження пропускної здатності нафтопроводу та збільшення енергозатрат.

Відкладання парафіну на стінки нафтопроводів по довжині та в часі відбувається нерівномірно. А оскільки для боротьби з відкладами в умовах магістральних нафтопроводів найширше використання одержали механічні очисні пристрої, то для вибору оптимальної періодичності їх пропуску на різноманітних ділянках нафтопроводу необхідно знати розподіл відкладів по довжині. Визначивши за даними промислових вимірювань значення ефективного діаметра на різних ділянках нафтопроводу, знайдемо розподіл відкладів парафіну по довжині трубопроводу.

Оскільки проведення промислових вимірювань є трудомісткою процедурою, потрібно використовувати диспетчерські дані для оперативного діагностування стану лінійної частини трубопроводу, а саме: визначення ефективного діаметра. Це можливо лише за допомогою спрощених гідравлічних розрахунків, які широко використовуються у світовій практиці.

Наведемо спрощений метод гідравлічного розрахунку для визначення ефективного діаметра за наступних величин: об’ємної витрати, тисків на початку та в кінці трубопроводу, в’язкості нафти за температури перекачування.

Для досягнення мети виразимо безрозмірний параметр [5]

$$\beta = \sqrt{\lambda Re^5} \quad (3)$$

через найбільш інформативні параметри перекачування нафти [1].

Для цього визначимо втрати тиску на тертя по довжині трубопроводу, використавши формулу Дарсі-Вейсбаха, виразивши в ній швидкість руху нафти через витрату. Помножимо чисельник та знаменник даного

виразу на Re^5 . Враховуючи, що число Рейнольдса $Re = \frac{4Q}{\pi d v}$, динамічна

в’язкість $\mu = \nu\rho$, отримаємо:

$$\Delta p = \rho g h_f = \frac{8\rho\lambda L Q^2}{\pi^2 d^5} = \lambda Re^5 \frac{\pi^3 L \nu^4 \mu}{128 Q^3}, \quad (4)$$

де ρ – густина рідини;

λ – коефіцієнт гідравлічного опору;

L – довжина трубопроводу;

Q – об’ємна витрата;

d – внутрішній діаметр;

Re – число Рейнольда;

ν – кінематичний коефіцієнт в’язкості;

μ – динамічний коефіцієнт в’язкості.

Із формули (3) із урахуванням (4) одержано значення безрозмірного параметра β , який залежить від перепаду тиску, витрати та в'язкості нафти, але не від діаметра [5]:

$$\beta = \sqrt{\frac{128\Delta p Q^3}{\pi^3 l v^4 \mu}}. \quad (5)$$

Формула Кольбрука з урахуванням формули (5) приведена до вигляду [5]:

$$\text{Re}^{0,25} = -2,0\beta \log\left(\frac{\varepsilon \pi v}{3,74Q} \text{Re} + \frac{2,51}{\beta} \text{Re}^{1,5}\right). \quad (6)$$

Число Рейнольда за формулою (6) можна визначити лише методом ітерації.

Оскільки перекачування нафти трубопроводом відбувається здебільшого в турбулентному режимі, зона гідравлічно гладких труб, то в даному випадку залежність (6) для визначення числа Рейнольда спрощується до такого вигляду [5]:

$$\text{Re} = 1,43\beta^{0,416}. \quad (7)$$

Із формул Рейнольда $\text{Re} = \frac{4Q}{\pi d_e v}$, і (7) можна визначити ефективний

діаметр трубопроводу d_e .

Дані розрахунків за результатами промислових вимірювань (базова методика) та за запропованою наведені в таблиці 1 [2].

Таблиця 1. Розрахунок ефективного діаметра та товщини парафінових відкладів

Значення ефективного діаметра, мм		Розрахункова товщина відкладів, мм		Відхилення, %
за базовою методикою	за запропованою методикою	за базовою методикою	за запропованою методикою	
232	229	12,5	14	1,3
230	223	13,5	17	3,0
216	216	20,5	20,5	0
245,2	240	5,9	8,5	2,1

Оскільки відхилення не перевищує 3 %, то запропонований метод дає достовірні результати і прийнятний для використання, що значно спрощує розрахунки ефективного діаметра, а це важливо у промислових умовах експлуатації нафтопроводів.

Значний інтерес викликає спрощений гідравлічний розрахунок визначення пропускної здатності, який широко використовується у зарубіжній практиці (Сполучені Штати Америки, Канада).

Нижче наведемо методику розрахунку та проведемо розрахунки, використовуючи дані промислових вимірювань.

Для цього використаємо безрозмірний параметр

$$\xi = \frac{1}{2} \lambda \text{Re}^2, \quad (8)$$

який був запропонований Роузом [5].

Виразивши безрозмірний параметр через відомі величини (втрати тиску, діаметр трубопроводу, довжину трубопроводу та в'язкість нафти) визначимо втрати тиску на тертя по довжині трубопроводу. Помноживши чисельник та знаменник даного виразу на Re^2 і врахувавши, що число Рейнольдса $\text{Re} = \frac{4Q}{\pi d v}$, а динамічна в'язкість $\mu = \nu \rho$, отримаємо залежність для визначення втрат тиску без урахування витрати

$$\Delta p = \rho g h_l = \rho g \frac{8 \lambda L Q^2}{\pi^2 d^5 g} = \frac{1}{2} \lambda \text{Re}^2 \frac{L \nu \mu}{d^3} = \xi \frac{L \nu \mu}{d^3}. \quad (9)$$

Після підстановки (9) у (8) отримаємо

$$\xi = \frac{\Delta p d^3}{L \nu^2 \rho}. \quad (10)$$

Виразивши у формулі Кольбука коефіцієнт гідравлічного опору через безрозмірний параметр, одержимо залежність для визначення числа Рейнольда при турбулентному режимі

$$\text{Re} = -\sqrt{8\xi} \log\left(\frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{2,51}{\sqrt{2\xi}}\right). \quad (11)$$

Ця залежність справедлива при $\text{Re} \geq 4000$.

При ламінарному режимі ($\text{Re} \leq 2000$)

$$\text{Re} = \frac{\xi}{32}. \quad (12)$$

Шукане значення витрати знаходимо із залежності

$$Q = \frac{\pi}{4} \nu d \text{Re}, \quad (13)$$

при цьому числа Рейнольда визначається за формулою (11).

Знайдемо витрату нафти за формулою (13) із врахуванням ефективного діаметра (табл. 1) та даними промислових вимірювань [1]. Значення витрати за запропонованою методикою дорівнює $Q=0,0601 \text{ м}^3/\text{с}$. Фактичне значення витрати за даними вимірювань складає $0,0585 \text{ м}^3/\text{с}$. Відхилення складає 2,7 %.

Використання запропонованих методик розрахунків значно спрощує основні задачі гідравлічного розрахунку трубопроводів, а саме: визначення необхідної витрати, визначення необхідного діаметра, які при турбулентному режимі розв'язуються громіздкими методами: графоаналітичним або ітерацій.

Отже, наведені вище залежності можуть застосовуватися для параметричного діагностування нафтопроводів. Методика розрахунків проста у використанні і дає достовірні результати, що підкреслює її адекватність.

Література

1. Возняк М.П. Аналіз інформативності різних ознак відносно ефективного діаметра нафтопроводу / М.П.Возняк, Г.М.Кривенко // Збірник наукових праць. Матеріали 6 Міжнародної наук.-практ. конф. «Нафта і газ України-2000». – Івано-Франківськ: Факел, 2000. – С. 111-116.

2. Карпаш О.М. Технічна діагностика систем нафтогазопостачання: навч. посіб. / О.М. Карпаш, М.П. Возняк, В.М. Василюк. – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 341 с.: іл.

3. Коршак А.А. К гидравлическому расчету нефте- и нефтепродуктопроводов за рубежом / А.А. Коршак // Материалы 6 Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2008» – Уфа, 2008. – С. 66-67.

4. Haaland S.E. Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow / S.E. Haaland // Fluids Eng., March 1983. – P. 89-90.

5. Frank M. White. Fluid Mechanics / Frank M. White – New York, 1994. – 736 p.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 21.10.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Середюк М.Д.*

THE USING OF SIMPLIFIED HYDRAULIC CALCULATIONS FOR PARAMETRIC DIAGNOSTICS OF OIL PIPELINES

M. P. Vozniak, L. V. Vozniak, G. M. Kryvenko

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;

76019, Ivano-Frankivsk, st. Carpatska, 15;

ph. +380 (3422) 4-00-98; e-mail: gidro@nung.edu.ua

The analysis of basic formulas for determining the friction factor is resulted. The simplified method of parametric diagnostics of inside surface pipeline by means of determining its effective diameter is given. A simplified hydraulic calculation for determining capacity of the oil pipeline is considered.

Key words: *oil pipeline, effective diameter, friction factor, pressure, flow rate, diagnostics.*