

Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

УДК 621.438:622

DOI: 10.31471/2304-7399-2024-19(73)-175-187

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ НАФТИ МАГІСТРАЛЬНИМИ НАФТОПРОВОДАМИ

**В. Я. Грудз¹, Я. В. Грудз¹, В. Т. Болонний², Р. Ю. Малютін¹,
В. І. Садлівський¹**

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: snp@iung.edu.ua;

²Національний університет «Львівська політехніка»; 79013, м. Львів,
вул. С.Бандери, 12; e-mail: vasyt.t.bolonnyi@lpnu.ua

Проведені дослідження стосуються структури гідравлічних втрат енергії при транспортуванні нафти чи нафтопродуктів магістральними трубопроводами. Опіраючись на загальні закони руху рідкого неперервного середовища в трубах, загальні енергетичні втрати доцільно розділити на гідравлічні втрати на вязкісне тертя, гравітаційні енерговтрати, інерційні втрати енергії та коріолісові енерговтрати, пов'язані з нерівномірністю розподілу швидкостей рухомого середовища по перерізу потоку.

Загальновідома математична модель процесу руху неперервного середовища складається з рівняння імпульсу потоку рідини, рівняння нерозривності та рівняння енергії. Перше з перелічених рівнянь виражає принцип д'Аламбера до системи сил, що діють на потік рідини; друге представляє закон збереження маси в рідинному потоці, третє – закон дисипації енергії. Опіраючись на рівняння імпульсу, отримано залежності для оцінки величини кожного з видів енергетичних втрат в потоці рідини.

Для знаходження числового значення кожного виду енергетичних втрат використано інформацію про режими роботи системи магістральних газопроводів «Дружба» на західних ділянках траси за довготривалий період. В результаті структуризовано в процентному співвідношенні вказані види енергетичних втрат з мінімальним і максимальним значеннями.

Проведені дослідження дозволили встановити частку витрат енергії на забезпечення заданої пропускної здатності нафтопроводу в порівнянні з енергетичними дисипативними втратами при транспорті нафти. Показано, що енергозатрати на підтримання напружено-деформованого стану трубопроводу незначні і їх скоротити практично неможливо. Найбільш вагомими є дисипативні та інерційні втрати енергії, скорочення яких дозволить підвищити енергоефективність трубопровідного транспорту.

Ключові слова: *нафтопровід, енергетичні втрати, математична модель, структура, дисипація енергії, продуктивність.*

Вступ. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів вимагає колосальних затрат енергії, яка передається потокові перекачуваного продукту в насосних агрегатах і в подальшому витрачається на подолання сил опору рухові рідини трубопроводами, забезпечуючи задану продуктивність. Очевидно, що не вся енергія, підведена до потоку рідини, витрачається строго на забезпечення заданих обсягів перекачування її трубопроводами, оскільки, як і у будь-якій технічній системі, мають місце енергетичні втрати. Тому викликає зацікавлення питання про визначення кількості корисно використаної енергії і величину енергетичних втрат.

Аналіз літературних джерел. Ряд науковців присвятили роботи з дослідження енерговитрат в системах транспортування нафти і газу. Тут, в першу чергу, слід відмітити праці Б.П. Поршакова і його школи [1, 2] в галузі газотурбінних двигунів газоперекачувальних агрегатів. Загальні енерговитрати представлялися через ККД її елементів. Однак, для перекачувальної станції або для газонафтотранспортної системи в цілому поняття коефіцієнта корисної дії не використовувалося. Це затруднює оцінку корисного використання енергії на транспортування нафти і газу з одного боку і не дає змоги пошуку шляхів скорочення енерговтрат з іншого.

В працях Грудза В.Я. і його школи [3-7] введено поняття ККД газотранспортної системи, яке визначається відношенням корисно виконаної роботи агрегатами для забезпечення заданого обсягу перекачування продукту до загальної підведеної енергії. В цьому аспекті виникають ряд питань про енерговитрати в системі, їх класифікацію і відносну величину. Ці важливі питання використання енергії розглядаються в даній роботі.

Вперше спроба оцінити структуру втрат енергії в потоці неперервного середовища приведена в працях Чарного І.А. [8] і стосувалася класифікації втрат енергії при русі газу в трубах. В подальшому Жидковою М.О. в [9, 10] зроблено спробу оцінити величину енерговтрат при нестационарному русі газу. Однак, найбільш повно структура втрат енергії в газовому потоці оцінена в [7].

Мета роботи. Дослідження структури енергетичних втрат при транспортуванні нафти магістральними нафтопроводами і порівняльний аналіз з трубопровідним транспортом газу.

Основна частина. Просторова модель процесу руху середовища в трубопроводі, представлена в [11], важко реалізується та для експериментальних досліджень малоперспективна внаслідок необхідності забезпечити подібність за значною кількістю критеріїв [12]. Тому ряд досліджень [10, 11, 12, 13] дозволили прийти до висновку про можливість та доцільність одномірного моделювання руху середовища в трубопроводі. При цьому рух у трубі розглядається з постійними по перерізу труби швидкістю, температурою, тиском і густиною середовища. Зміна цих параметрів може здійснюватися тільки в одному напрямку – вздовж осі трубопроводу. Зазвичай, приймають швидкість руху потоку такою, що дорівнює середньомасовій, а температуру визначають як середньокалориметричну в даному перерізі [13]:

Тоді математична модель одномірного руху газу в трубопроводі з урахуванням теплообміну може бути представлена у вигляді системи рівнянь [13]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \alpha W \frac{\partial(\rho W)}{\partial x} + \rho g \frac{dh}{dx} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \frac{\lambda \rho W^2}{2d} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho W)}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} &= 0, \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= -W \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{T \rho \frac{\partial c_p}{\partial T} + \rho c_p} \left(\rho \frac{\partial W}{\partial x} \left(c_p T + \rho T \frac{\partial c_p}{\partial \rho} \right) + \xi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial \xi}{\partial P} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\pi D \alpha_1}{c_c r_c F_c} (T_c - T) - \frac{g W}{c_p} \frac{dh}{dx} \frac{\partial T_c}{\partial t} \right) = \\ &= \frac{\xi_c}{\rho_c c_c} \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\pi D \alpha_2}{c_c \rho_c F_c} (T_{\text{нав}} - T_c) + \frac{\pi D \alpha_2}{c_c \rho_c F_c} (T - T_c). \end{aligned} \quad (1)$$

Тут прийнято: c_p, c_c – ізобарна теплоємність газу та теплоємного матеріалу труб; $T_{\text{нав}}, T_c$ – температура навколишнього середовища і стінки трубопроводу; α_1, α_2 – коефіцієнти тепловіддачі від газу до стінки і від стінки в навколишнє середовище; D, d – зовнішній і внутрішній діаметри труби; ξ, ξ_c – коефіцієнти теплопровідності газу і стінки труби; F, F_c – площа перерізу трубопроводу і стінки; h – геодезична позначка траси газопроводу.

Перше рівняння системи (1), що звичайно називають рівнянням руху, побудовано на основі принципу Д’Аламбера шляхом суперпозиції сил, що діють на елемент суцільного рухомого середовища, на осі трубопроводу.

Перший член рівняння – градієнт тиску – виражає дію сил тиску на потік середовища, що рухається. Другий член враховує вплив на по-

тік Коріолісової сили, викликаної нерівномірністю розподілу швидкостей по перерізу труби. Враховуючи одномірність потоку та припущення рівномірності розподілу параметрів по перерізу труби, цим членом нехтують [11]. Третій член рівняння характеризує вплив гравітаційних сил на потік нафти, що рухається по похилій ділянці. Четвертий член рівняння виражає вплив сил інерції на потік середовища. П'ятий член рівняння – це вплив сил тертя на потік неперервного середовища.

Без урахування впливу на потік середовища Коріолісової сили рівняння руху може бути представлено у виді:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g \frac{dh}{dx} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \frac{\lambda \rho W^2}{2d} = 0. \quad (2)$$

Рівняння руху в формі (2) складне в реалізації, тому дослідники [12, 13] із метою вирішення інженерних задач спрощують його шляхом відкидання деяких членів, що несуттєво впливають на процес. Однак досліджені структури різних видів гідравлічних утрат, що входять у (2) у вигляді окремих доданків, у літературі відсутні.

З метою визначення структури гідравлічних втрат під час руху реального середовища в нафтопроводі проведено аналіз технологічних режимів роботи системи нафтопроводів “Дружба”, на гірських ділянках експлуатації, зокрема на ділянках Куровичі – Жулино, Жулино – Сколе та Сколе – держкордон за період 2004 – 2011 рр. При цьому було розглянуто понад 3 тис. різних режимів експлуатації зазначеної системи нафтопроводів, які розділено на 20 груп, кожна з яких об’єднувалася за характером технологічного режиму. З використанням параметрів технологічних режимів експлуатації нафтопроводів для кожної групи режимів визначалися всі види гідравлічних втрат, що входять у структуру рівняння (2). Слід зазначити, що з чотирьох складових сил у (2) три (крім першої) визначаються зовсім незалежно від будь-яких даних щодо властивостей поля тиску. Але якщо з чотирьох складових три визначені, то четверта знаходиться однозначно. Отже, рівняння (2) визначає взаємозв’язок поля швидкостей і поля тиску. Кожна із складових рівняння (2) визначалася за усередненими в часі показниками.

Усереднене значення градієнта тиску визначалося з виразу:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{\text{сеп}} = \frac{P_{io} - P_{iL}}{L}, \quad P_{io} = \frac{1}{T} \int_0^T P(O, t) dt, \quad P_{iL} = \frac{1}{T} \int_0^T P(L, t) dt,$$

де T – проміжок часу, протягом якого здійснювалася реєстрація тисків.

Гравітаційні гідравлічні втрати визначалися з формули

$$\left(\rho g \frac{dh}{dx} \right)_{\text{сеп}} = \rho g i_{\text{сеп}},$$

де $\rho_{\text{сеп}}$ – густина нафти; $i_{\text{сеп}}$ – середній геометричний ухил газопроводу

$$i_{\text{сеп}} = fL^2;$$

f – площа, обмежена профілем траси трубопроводу та горизонтальною лінією, що проходить через його початок; L – довжина ділянки.

Усереднена величина інерційних гідравлічних втрат визначалася з залежності

$$\left(\frac{\partial(\rho W)}{\partial t}\right)_{\text{сер}} = \frac{1}{FT} \int_0^T |M_i - M_{i+1}| dt,$$

де M_i, M_{i+1} – масові витрати нафти на кінцях кожного проміжку дискретності за часом.

На основі виконаних розрахунків середня усереднена величина гідравлічних втрат на трасі визначалася як наступна різниця:

$$\left(\frac{\lambda \rho W^2}{2d}\right)_{\text{сер}} = \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{\text{сер}} - \left(\frac{dh}{dx}\right)_{\text{сер}} + \left(\frac{\partial(\rho W)}{\partial t}\right)_{\text{сер}}.$$

Частка кожного з видів гідравлічних втрат у загальній структурі визначилась стосовно середньої величини градієнта тиску.

Аналіз результатів розрахунків показує, що найбільшу питому вагу в загальній структурі гідравлічних втрат мають гідравлічні втрати на тертя. Середня величина цих втрат складає 82,74%. Дисперсія цього виду втрат навколо середнього складає 11,12%, а коефіцієнт варіації (10,8%) найменший у загальній структурі гідравлічних втрат.

Гідравлічні втрати, пов'язані з впливом сил гравітації в загальній структурі втрат, займають найменшу частку (в середньому 7,84%). У залежності від режиму експлуатації і характеру профілю траси питома величина цього виду втрат коливається в межах від 5,81 до 9,64%, при цьому дисперсія навколо середнього мінімальна (1,8%), а коефіцієнт варіації складає 12,5%. Очевидно, що ці втрати зумовлені як профілем траси трубопроводу, так і параметрами режиму.

Найнестабільнішими в загальній структурі втрат є гідравлічні інерційні втрати. В середньому їхня величина складає 21,75% у загальній структурі втрат. У залежності від режиму роботи системи питома величина інерційних втрат коливається в межах від 2,19% до 41,29% із дисперсією навколо середнього 19,54% і найбільшим коефіцієнтом варіації 64,7%. Це свідчить про непередбачуваність величини інерційних втрат.

Проведений аналіз гідравлічних втрат показує, що на стабільність роботи нафтопроводу мають вирішальний вплив інерційні втрати, які є наслідком нестаціонарності експлуатаційних режимів нафтопроводу. Тому проведено кореляційний аналіз залежності інерційних втрат енергій від міри нестаціонарності режиму, яка характеризувалася критерієм нестаціонарності [11]

$$N_i = \frac{\delta Q d}{\lambda w \tau},$$

де: δQ – відносна зміна витрати нафти в нестационарному процесі за час τ ; d – внутрішній діаметр нафтопроводу; λ – коефіцієнт гідравлічного опору; w – усереднена в часі нестационарного процесу середня швидкість нафти в нафтопроводі.

Для кожної з 20 груп, що об'єднують технологічні режими системи нафтопроводів «Дружба» визначалося значення критерію нестационарності і всі види гідравлічних втрат енергії. В результаті побудовано графічні залежності, які наведено на рис. 1.

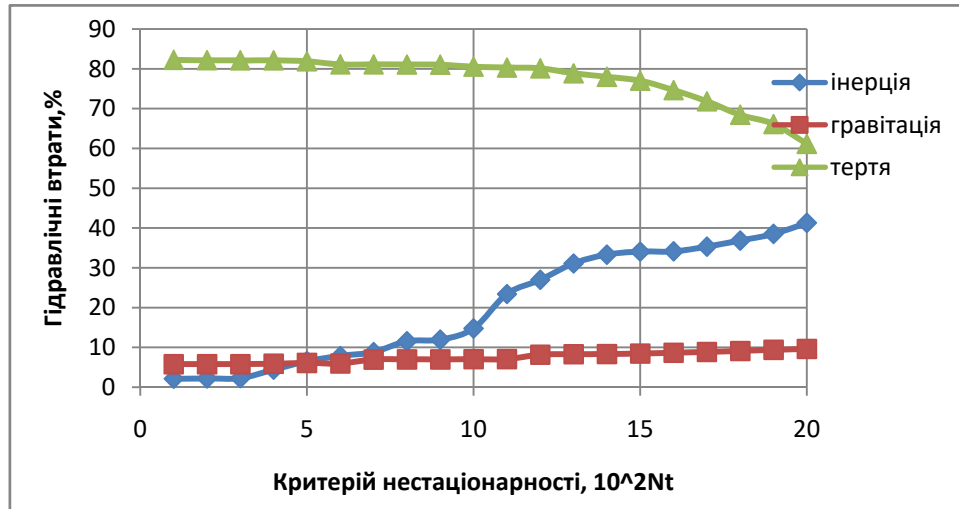
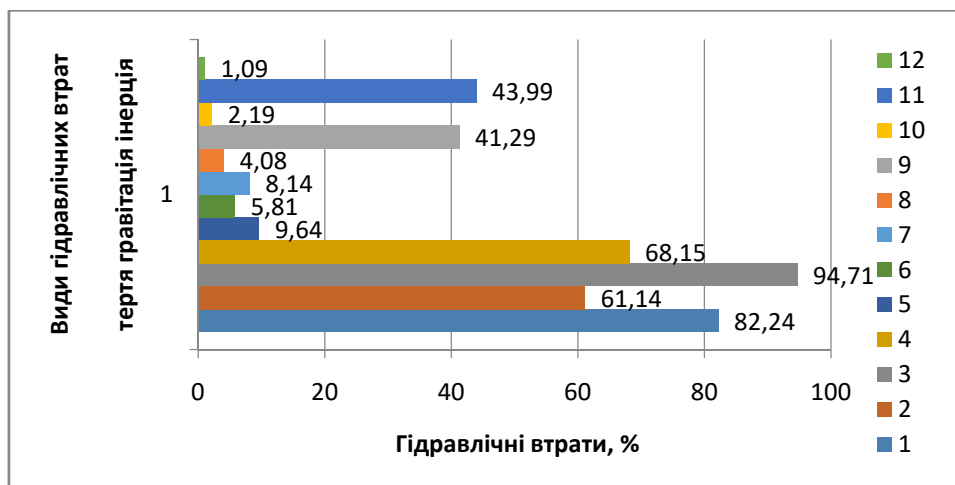


Рис. 1. Залежність гідравлічних втрат від критерію нестационарності технологічного процесу

Проведений аналіз не передбачає поділ витрат енергії на корисні (тобто такі, що забезпечують виконання виробничої функції нафтопроводу – досягнення заданої пропускної здатності) та енергетичні втрати при транспортуванні і їх структуру. Тому на основі даних про режими роботи системи нафтопроводів «Дружба» проведено дослідження з метою встановлення балансу енерговитрат при транспортуванні нафти.

Загальні енерговитрати на трубопровідний транспорт нафти розділено на корисне використання енергії та енергетичні втрати. До корисного використання енергії слід віднести енергозатрати, спрямовані на забезпечення заданої продуктивності нафтопроводу в умовах стаціонарного руху газу. Таке твердження базується на основному призначенні нафтопроводу. До енергетичних втрат при транспортуванні слід віднести всі інші види енергозатрат.

В роботах [7, 11, 14] наведено результати досліджень з встановлення структури енергетичних втрат в потоці газового середовища. Цікавим видається порівняння структури енергетичних втрат в газопроводах і нафтопроводах, для цього результати досліджень приведені у вигляді діаграми на рис. 2.



1,2,3,4 – гідравлічні втрати на тертя (1,2 в нафтопроводах тах та min; 3,4 в газопроводах тах та min); 5,6,7,8 – гравітаційні втрати (5,6 в нафтопроводах тах та min; 7,8 в газопроводах тах та min); 9,10,11,12 – інерційні втрати (9,10 в нафтопроводах тах та min; 11,12 в газопроводах тах та min).

Рис. 2. Діаграма видів гідравлічних втрат в нафтогазопроводах

Найбільш непередбачуваними як для газопроводів, так і для нафтопроводів є інерційні втрати енергії, про що свідчить широкий діапазон їх зміни (2,19 – 41,29% для нафтопроводів і 1,09 – 43,99% для газопроводів). Вказаний вид гідравлічних втрат викликаний нестаціонарними процесами при транспортуванні продукту. В газопроводах нестаціонарність спостерігається практично неперервно, тривалість таких процесів значна. В нафтопроводах нестаціонарні процеси характеризуються значно коротшою тривалістю, оскільки швидкість розповсюдження збурень в потоці рідини значно перевищує швидкість розповсюдження збурень в газовому потоці, тобто прискорення нафтового потоку в нестаціонарному процесі значно перевищує прискорення потоку газу. Крім того, густина рідини значно більша за густину газу при робочих умовах, тому сили інерції, що виникають в нестаціонарному процесі потоку нафти значно перевищують сили інерції в газовому потоці. Однак, значно менша тривалість нестаціонарного процесу в нафтопроводі в порівнянні з газопроводом призводить до практично однакових енергетичних втрат в нафтопроводах і газопроводах.

Гравітаційні втрати енергії пов'язані з рухом продукту по нахилених ділянках траси трубопроводу, причому для нафтопроводів вони залежать від перепаду геодезичних позначок початку і кінця траси, а для газопроводів має вплив характер профілю. Величина гравітаційних втрат пропорційна густині перекачуваного продукту, тому в нафтопроводах вони більші, ніж в газопроводах.

Гідравлічні втрати на тертя пропорційні витраті продукту по трубопроводу, тому робота сил тертя вважається корисно виконаною роботою для забезпечення заданої продуктивності нафто- чи газопроводу, тобто для використання трубопроводу за прямим призначенням.

Слід зауважити, що енергія потоку нафти складається з потенціальної, кінетичної та теплової. При русі нафти відбуваються перетворення енергії з одного виду в інший та виникають дисипаційні процеси. З точки зору гідродинаміки при русі нафти в трубах мають місце гідравлічні втрати енергії, суть яких зводиться до перетворення потенціальної енергії в кінетичну і далі у теплову, яка через стінки трубопроводу розсіюється в довкілля.

Зміна механічної енергії газу в потоці нафти може бути виражена залежністю

$$dE = d(pQ), \quad (3)$$

де E – механічна енергія потоку при тиску p і витраті Q .

Розглядаючи корисне використання енергії, відзначимо, що при цьому рух нафти повинен проходити в стаціонарному режимі ($Q=const$ і $dQ=0$). Тому

$$dE = dpQ. \quad (4)$$

Диференціал тиску в умовах одномірного стаціонарного руху середовища

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx. \quad (5)$$

Використаємо диференціальне рівняння руху неперервного середовища в формі

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \rho g \frac{dh}{dx} + \lambda \frac{\rho W^2}{2d} = 0. \quad (6)$$

Корисними енерговитратами при транспортуванні нафти слід вважати витрати енергії на роботу сил рідинного тертя для забезпечення заданої продуктивності нафтопроводу. Тому для стаціонарного руху нафти в рівнинному трубопроводі з (6) отримаємо

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \lambda \frac{\rho W^2}{2d} = 0. \quad (7)$$

Тепер на основі (4), (5) та (7) отримаємо вираз для корисних енергозатрат

$$E_{\text{кор}} = \int_0^L Q \frac{\partial p}{\partial x} dx = \int_0^L \lambda Q \frac{\rho W^2}{2d} dx = \frac{8\lambda LM^3}{\pi^2 \rho^2 d^5}, \quad (8)$$

де F , L – площа поперечного перерізу і довжина ділянки нафтопроводу; M – масова витрата нафти.

До енергетичних втрат при транспортуванні нафти з точки зору фізичних уявлень про процес слід віднести втрати механічної енергії,

пов'язані з роботою сил тертя і перетворенням у теплову енергію з наступним розсіюванням в довкілля, енергетичні втрати, пов'язані з дією сил інерції в потоці, та затрати енергії на підтримання напруженого стану трубопроводу.

Для визначення першого виду енерговтрат використаємо рівняння енергії газового потоку системи (1). Останні два члени рівняння характеризують теплообмін між газом та навколишнім середовищем, причому останній член характеризує тепловіддачу від нафти до стінки трубопроводу, а передостанній – від стінки в довкілля.

Зауважимо, що рівняння енергії характеризує неізотермічний нестационарний процес у найбільш загальному вигляді. Надзвичайна складність рівняння не дозволяє отримати точний розв'язок для обчислення величини дисипації енергії газового потоку. Однак, наближена оцінка втрат внутрішньої енергії газу у вигляді теплопередачі від нафти в довкілля можлива шляхом об'єднання двох останніх членів та використання поняття повного коефіцієнта теплопередачі від нафти до навколишнього середовища на основі закону теплопередачі Ньютона. Тому дисипативні втрати енергії можна наближено оцінити залежністю

$$E_{дис} = \pi kDL(T_{cp} - T_{дов}), \quad (9)$$

де D, L – зовнішній діаметр і довжина нафтопроводу; $T_{cp}, T_{дов}$ – середня температура нафти в нафтопроводі та температура довкілля; k – повний коефіцієнт теплопередачі від нафти в довкілля [14]

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\xi_c} + \frac{1}{\alpha_2}.$$

З іншого боку, виходячи з рівняння балансу тепла, зміна теплової енергії потоку нафти на ділянці нафтопроводу визначається різницею початкової T_H та кінцевої T_K температур

$$\Delta E_{ен} = Mc_p(T_H - T_K). \quad (10)$$

Використовуючи (8), (10) можна визначити з певним наближенням дисипативні втрати енергії при транспортуванні нафти.

При транспортуванні нафти магістральним трубопроводом внаслідок високого тиску в порожнині труб метал стінки постійно знаходиться в напруженому стані, на що витрачається певна частина енергії потоку. Напружений стан трубопроводу можна вважати плоским [14, 15], що характеризується кільцевими σ_K та повздовжніми σ_N напруженнями, які визначаються величиною внутрішнього тиску

$$\sigma_K = \frac{pd}{2\delta}; \quad \sigma_N = 0,25 \frac{pd}{\delta}. \quad (11)$$

Питома потенціальна енергія формозміни в умовах напружено-деформованого стану стінок трубопроводу в загальному вигляді трьох-вимірної моделі може бути визначена з залежності

$$u_{\phi} = \frac{1+\mu}{3E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\varpi_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)], \quad (12)$$

де μ – коефіцієнт Пуасона; E – модуль Юнга.

Для плоского напруженого стану матимемо

$$u_{\phi} = \frac{1+\mu}{3E} [\sigma_K^2 + \sigma_N^2 - \varpi_K \sigma_N].$$

Повна витрата енергії на підтримання напружено-деформованого стану трубопроводу

$$U = \int_V u_{\phi} dV u_{\phi}, \quad (13)$$

де V – загальний об'єм металу стінок трубопроводу товщиною δ , $V = \pi D \delta L$.

Користуючись (12) і (13), можна визначити витрату енергії, що витрачається на підтримання напружено-деформованого стану трубопроводу.

Слід також зауважити, що в загальному випадку можуть мати місце втрати енергії, пов'язані з дією сил інерції в потоці ΔE_{IH} (для умов нестационарного руху середовища). Питомі інерційні втрати енергії наближено можна оцінити на основі рівняння руху в вигляді (4)

$$\left(\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} \right)_{cp} = \frac{1}{FT} \int_0^T |M_{t=0} - M_{t=T}| dt, \quad (14)$$

де T – тривалість нестационарного процесу.

Отже енергетичний баланс для потоку нафти в трубопроводі можна подати сумою

$$E = E_{кор} + \Delta E_{ен} + U + \Delta E_{IH}.$$

Якщо виключити з цього балансу інерційні втрати, характерні для нестационарних процесів в газопроводі, то можна чисельно оцінити в процентному співвідношенні максимально можливу частку корисних затрат енергії при транспортуванні нафти.

Розрахунки проведено для гіпотетичного нафтопроводу довжиною 100 км і діаметром 720x10 мм. В розрахунках було прийнято початковий тиск 6,4 МПа, кінцевий 0,5 МПа, початкову температуру 300К, температуру ґрунту 280К, транспортована нафта з розрахунковою масовою витратою 625,7 кг/с має вязкісно-температурну характеристику $\nu = 12,7 \exp(-0,0326T)$. За таких умов розрахункові витрати корисної енергії склали 3,149 МВт, дисипативні втрати енергії 7,026 МВт, витрати енергії на підтримування напружено-деформованого стану трубо-

роводу 0,228 МВт. Загальні витрати енергії, як сума вказаних, становлять 8,989 МВт. Таким чином, максимальне значення корисних витрат енергії в даному випадку складає 30,27%, дисипативні втрати складають 67,54%, а затрати на підтримання напружено-деформованого стану трубопроводу – 2,19%. За даними [14] аналогічні значення відносних витрат енергії при транспортуванні газу газопроводами складають відповідно 27,76%, 69,63% і 2,61%. Як показують розрахунки, відносні значення видів енергетичних втрат рівноцінні для газо- і нафтопроводів.

Висновок. Проведені дослідження показали, що частка витрат енергії на забезпечення заданої пропускної здатності газопроводу суттєво менша в порівнянні з енергетичними втратами при транспорті нафти і газу. Енергозатрати на підтримання напружено-деформованого стану трубопроводу незначні, і їх скоротити практично неможливо. Найбільш вагомими є дисипативні та інерційні втрати енергії, скорочення яких дозволить підвищити енергоефективність трубопроводного транспорту нафти і газу.

Література

1. Поршаков Б.П. Газотурбинные установки для магистральных газопроводов / Б.П. Поршаков, В.И. Халатин – М.: Недра, 1974. – 221 с.
2. Основные положения диагностического метода термогазодинамических параметров для газотурбинных ГПА / Б.П. Поршаков, А.В. Матвеев, В.М. Коршунов и др. // Трубопроводный транспорт нефти и газа. Тр. МИНХ и ГП им. И.М. Губкина. – М., 1973. С. 146–154.
3. Грудз В.Я. Обслуговування і ремонт газопроводів / В.Я. Грудз, Д.Ф.Тимків, В.Б. Михалків та ін. // Івано-Франківськ, Лілея-НВ, 2009 – 710с.
4. Грудз В.Я. Пускові динамічні параметри газу на дільниці магістрального газопроводу / В.Я. Грудз, Т.Ф.Тутко // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: транспорт і зберігання нафти і газу. – 2001. № 38 – С. 45–61.
5. Енергетична безпека держави: високоефективні технології видобування, постачання і використання природного газу / Є.І. Крижанівський, М.І. Гончарук, В.Я. Грудз та ін. Київ, Інтерпрес ЛТД, 2006 – 283 с.
6. Грудз Я.В. Вплив нестаціонарності газового потоку на енерговитрати при транспортуванні / Я.В. Грудз // Матеріали між народ.наук.-техн. конф. «Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу». Івано-Франківськ, 15-18 травня 2012. С. 66-67.
7. Грудз Я.В. Енергоефективність газотранспортних систем / Я.В. Грудз – Івано-Франківськ. – Лілея НВ, – 2012. – 186 с.
8. Чарный И.А. Неустановившиеся движения реальной жидкости в трубах / И.А. Чарный – М.: Недра, 1975. – 224 с.

9. Жидкова М.А. Переходные процессы в магистральных газопроводах / М.О. Жидкова – Киев.: Наукова думка, 1979. – 255 с.
10. Жидкова М.А. Трубопроводный транспорт газа / М.О. Жидкова – Киев.: Наукова думка, 1973. – 142 с.
11. Трубопровідний транспорт газу / М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін. // Київ, Арена ЕКО, 2002, – 600 с
12. Руднік А.А. Методика узагальненого оцінювання та підвищення ефективності функціонування систем трубопровідного транспорту газу / А.А. Руднік // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 6 – с. 36 – 38.
13. Режимы газотранспортных систем / Є.І. Яковлєв, О.С. Казак, В.Б. Михалків та ін. – Львів: Світ, 1992. – 170 с.
14. Середюк М.Д. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів / М.Д. Середюк, Й.В. Якимів, В.П. Лісафін. Івано-Франківськ, Факел. 2001 – 517 с.
15. Zheng W., Sutherby R., Revie R.W., Tyson W.R. and Shen G. Stress corrosion cracking of linepipe steels in nearneutral pH environment: a review of effects of stress // Environmentally assisted cracking: predictive methods for risk assessment and evaluation of materials, equipment and structures, ASTM STP 1401, R.D. Kane, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000.

Стаття надійшла до редакційної колегії 29.08.2024 р.

RESEARCH OF ENERGY CONSUMPTION IN THE TRANSPORTATION OF OIL THROUGH MAIN OIL PIPELINES

**V. Ya. Grudz¹, Ya. V. Grudz¹, V. T. Bolonnyi², R. Yu. Malyutin¹,
V. I. Sadlivskiy¹**

¹*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
15, Carpathian st., Ivano-Frankivsk, 76019;
e-mail: snp@nung.edu.ua;*

²*Lviv Polytechnic National University; 12 Bandery St., Lviv, 79013;
e-mail: vasyt.bolonnyi@lpnu.ua*

The conducted studies relate to the structure of hydraulic energy losses during the transportation of oil or oil products through main pipelines. Based on the general laws of movement of a liquid continuous medium in pipes, it is advisable to divide the total energy losses into hydraulic losses due to viscous friction, gravitational energy losses, inertial energy losses, and Coriolis energy losses associated with the uneven distribution of the speeds of the moving medium along the cross section of the flow.

The well-known mathematical model of the process of movement of a continuous medium consists of the momentum equation of the fluid flow, the

continuity equation, and the energy equation. The first of the listed equations expresses d'Alembert's principle to the system of forces acting on the fluid flow; the second represents the law of conservation of mass in a liquid flow, the third – the law of energy dissipation. Relying on the momentum equation, dependencies were obtained for estimating the value of each type of energy loss in the fluid flow.

To find the numerical value of each type of energy loss, information on the modes of operation of the main gas pipeline system "Druzhba" on the western sections of the route over a long period was used. As a result, the indicated types of energy losses with minimum and maximum values are structured in a percentage ratio.

The conducted research made it possible to establish the share of energy costs for ensuring the specified throughput capacity of the oil pipeline in comparison with energy dissipative losses during oil transportation. It is shown that energy costs for maintaining the stress-deformed state of the pipeline are insignificant, and it is practically impossible to reduce them. The most significant are dissipative and inertial energy losses, the reduction of which will increase the energy efficiency of pipeline transport.

Keywords: *oil pipeline, energy losses, mathematical model, structure, energy dissipation, productivity.*