

УДК 622.692.4

DOI: 10.31471/2304-7399-2018-2(46)-151-160

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДІВ ЗА ПЕРІОДИЧНИХ СКИДАНЬ ЧАСТИНИ НАФТОВОГО ПОТОКУ

**Й. В. Якимів, О. М. Бортняк**

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

*Сучасні нафтотранспортні системи характеризуються складною гідравлічною структурою та геометричною конфігурацією і досить часто передбачають необхідність шляхового постійного чи періодичного підкачування або скидання частини нафтового потоку. Реалізація такої технології транспортування неодмінно призводить до зміни режимів експлуатації нафтопроводів і відповідно до необхідності регулювання роботи нафтоперекачувальних станцій. Отже, визначення закономірностей впливу процесів скидання частини нафти на енергетичні параметри роботи нафтотранспортних систем є надзвичайно важливим завданням.*

*З цією метою проведені дослідження впливу величини періодичних скидань частини нафти на енергоефективність роботи магістральних нафтопроводів. Проаналізовано вплив величини скидань на витрати потужності на перекачування нафти в системі магістрального нафтопроводу. Виявлено, що із збільшенням величини скидань зменшуються питомі витрати електроенергії на перекачування нафти.*

*На основі проведених досліджень розроблені рекомендації щодо вибору надійних, безпечних та оптимальних, з точки зору витрат електроенергії на перекачування, режимів експлуатації другої черги системи магістральних нафтопроводів «Дружба» на ділянці Мозир – Броди – Тухольський перевал із скиданням частини нафти на ЛВДС «Броди».*

**Ключові слова:** *періодичні скидання, магістральний нафтопровід, пропускна здатність, енергоефективність.*

**Актуальність теми.** На магістральних нафтопроводах великої протяжності можуть мати місце пункти періодичного скидання частини нафти. Скидання нафти здійснюються на проміжних нафтоперекачувальних станціях. Потреба в періодичному скиданні частини нафти виникає через необхідність подальшого транспортування її на нафтопереробні заводи, що знаходяться поблизу траси нафтопроводу, або на наливні пункти в залізничний чи водний транспорт. Під час скидання пору-

шується нормальний режим перекачування нафти. Це впливає на продуктивність трубопроводу на ділянці до пункту скидання, змінюється витрата після пункту скидання і витрати потужності на перекачування нафти в трубопровідній системі в цілому. Від зміни витрати на виході одних нафтоперекачувальних станцій тиски зростають, на інших зменшуються. Відповідно змінюються і підпори на вході проміжних нафтоперекачувальних станцій.

Вплив періодичних скидань на режими роботи магістральних нафтопроводів розглядається в [1-4]. У цих роботах досліджується вплив величини скидання на продуктивність трубопроводу на ділянках до і після пункту скидання, але не розглядається питання енерговитратності та енергоефективності режиму перекачування нафти. Питання витрат електроенергії на перекачування нафти для трубопроводів без періодичних скидань частини нафти розглядається в [5]. Важливо при розрахунках враховувати обмеження тиску на виході станцій із умови міцності трубопроводу та забезпечення безкавітаційної роботи насосів на проміжних нафтоперекачувальних станціях.

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є дослідження впливу величини періодичних скидань частини нафти на витрати потужності при перекачуванні нафти та виявлення енергоефективних режимів роботи трубопроводів.

**Об'єкт дослідження** – магістральні трубопроводи для перекачування нафти.

**Предмет дослідження** – вплив величини періодичного скидання частини нафти на енерговитратність і енергоефективність роботи нафтопроводу.

**Методи дослідження:** математичне моделювання режимів роботи нафтотранспортних систем за наявності періодичних скидань частини нафти.

В умовах експлуатації нафтопроводів, на яких здійснюються періодичні скидання частини нафти, окремі ділянки такого нафтопроводу працюють за різних гідравлічних режимів.

Основними показниками, якими характеризується режим роботи магістрального нафтопроводу, є його продуктивність, напори на виході станцій і підпори на їх вході, енергетичні витрати на перекачування нафти.

Розглянемо магістральний нафтопровід, на якому експлуатується  $n$  нафтоперекачувальних станцій, на ділянці до пункту скидання працює  $s$  станцій.

Початковими даними для розрахунку режимів роботи нафтопроводу і виявлення їх енергоефективності є математичні моделі напірних характеристик підпірних і основних магістральних насосів та математичні моделі характеристик ККД насосів, які можуть включатись в роботу на станціях, геометрична характеристика трубопровідної системи,

властивості транспортованої нафти (густина  $\rho$  і в'язкість  $\nu$ ), які залежать від температури перекачування, продуктивність трубопроводу до пункту скидання частини нафти  $Q$  та величина скидання  $Q_c$ .

Для виявлення енерговитратності та енергоефективності перекачування нафти магістральними нафтопроводами, на яких здійснюються періодичні скидання частини нафти, виконують такі розрахунки.

Обчислюють параметри роботи підпірного насоса:

- тиск, що створює підпірний насос, МПа

$$P_n = \rho g h_n \cdot 10^{-6}; \quad (1)$$

- ККД підпірного насоса

$$\eta_n = A_n + B_n Q + C_n Q^2, \quad (2)$$

де  $A_n$ ,  $B_n$ ,  $C_n$  – коефіцієнти математичної моделі характеристики ККД підпірного насоса;

- потужність, яку споживає підпірний насос, кВт

$$N_n = \frac{\rho g Q h_n}{1000 \eta_n \eta_{en}}. \quad (3)$$

де  $\eta_{en}$  – ККД електродвигуна, що є приводом підпірного насоса.

Розраховують напори, створювані основними насосами на станціях, за виразами:

- до пункту скидання

$$h_{ji} = a_{ji} - b_{ji} Q^2; \quad (4)$$

- після пункту скидання

$$h_{ji} = a_{ji} - b_{ji} (Q - Q_c)^2, \quad (5)$$

де  $a_n$ ,  $b_n$ ,  $a_{ji}$ ,  $b_{ji}$  – коефіцієнти математичних моделей напірної характеристики підпірного насоса та  $j$ -ого основного магістрального насоса на  $i$ -ій станції;

$j$  – номер основного насоса на станції.

Визначають ККД основних магістральних насосів за розрахункової продуктивності на ділянках:

- до пункту скидання

$$\eta_{ji} = A_{ji} + B_{ji} Q + C_{ji} Q^2; \quad (6)$$

- після пункту скидання

$$\eta_{ji} = A_{ji} + B_{ji} (Q - Q_c) + C_{ji} (Q - Q_c)^2, \quad (7)$$

де  $A_{ji}$ ,  $B_{ji}$ ,  $C_{ji}$  – коефіцієнти математичних моделей характеристики ККД  $j$ -ого основного магістрального насоса на  $i$ -ій станції.

Уточнюють кількості насосів, які повинні працювати на станціях.

Якщо підпір на вході в  $i$ -ту станцію більший від суми загальних втрат напору на наступному перегоні і мінімально допустимого підпо-ру на вході в наступну станцію, тобто

$$h_{n(i-1)} > h_i + h_{\min_i}, \quad (8)$$

то відпадає потреба у включенні в роботу насосів на станції, що знахо-диться на початку перегону. В такому випадку напір, що створює стан-ція,

$$H_{cm_i} = h_{n(i-1)} \quad (9)$$

і потужність, яку споживають насоси на цій станції, дорівнює нулю

$$N_{cm_i} = 0.$$

Якщо  $h_{n(i-1)} < h_i + h_{\min_i}$  на станції повинні включатись в роботу основні насоси і напір, створюваний станцією, визначається за форму-лою

$$H_{cm_i} = h_{n(i-1)} + h_{1_i} + h_{2_i} + h_{3_i} + h_{4_i}. \quad (10)$$

В роботу на станції можуть одночасно включатись не більше трьох насосів.

Розраховують ККД кожної насосної станції залежно від кількості насосів, які повинні включатись в роботу, за формулою

$$\eta_i = \frac{\sum_{j=1}^n h_{ji}}{\sum_{j=1}^n \frac{h_{ji}}{\eta_{ji}}}. \quad (11)$$

Обчислюють потужність, яку споживають насоси на кожній станції, кВт:

- до пункту скидання,

$$N_{cm_i} = \frac{\rho g Q (H_{cm_i} - h_{n(i-1)})}{1000 \eta_i \eta_e}, \quad (12)$$

- після пункту скидання

$$N_{cm_i} = \frac{\rho g (Q - Q_c) (H_{cm_i} - h_{n(i-1)})}{1000 \eta_i \eta_e}, \quad (13)$$

де  $\eta_e$  – ККД електродвигуна, що є приводом основного насоса.

Якщо напір на виході станції більший від максимально допусти-мої величини, тобто  $H_{cm_i} > H_{\max_i}$ , то визначають величину дросельо-ваного напору на цій станції із умови міцності труб

$$h_{op_i} = H_{cm_i} - H_{\max_i}. \quad (14)$$

Обчислюють непродуктивні витрати потужності на кожній станції, зв'язані з дроселюванням потоку рідини із умови міцності труб, кВт:

- до пункту скидання

$$N_{\partial p_i} = \frac{\rho g Q h_{\partial p_i}}{1000 \eta_i \eta_e}; \quad (15)$$

- після пункту скидання

$$N_{\partial p_i} = \frac{\rho g (Q - Q_c) h_{\partial p_i}}{1000 \eta_i \eta_e}. \quad (16)$$

За напору на виході станцій  $H_{cm_i} > H_{max_i}$ , напір після регулятора тиску приймають рівним допустимому напору

$$H_{cm_i} = H_{max_i}. \quad (17)$$

Визначають величину тиску після регулятора на кожній станції, МПа

$$P_{cm_i} = \rho g H_{cm_i} \cdot 10^{-6}. \quad (18)$$

Обчислюють величину фактичного напору в кінці кожного перегону (підпір на вході в наступну станцію)

$$h_{n_i} = H_{cm_i} - h_i. \quad (19)$$

Розраховують фактичний тиск на вході в кожну станцію (тиск підпору), МПа

$$P_{n\phi_i} = \rho g h_{n_i} \cdot 10^{-6}. \quad (20)$$

Визначають величину напору, який повинен дроселюватись на останньому перегоні, щоб тиск на вході в кінцевий пункт відповідав розрахунковому залишковому напору

$$h_{\partial p_m} = H_{cm_n} - h_n - h_{min_n}, \quad (21)$$

де  $H_{cm_n}$  – напір на виході останньої проміжної НПС;

$h_n$  – загальні втрати напору на останньому перегоні;

$h_{min_n}$  – мінімально допустимий напір в кінці трубопроводу.

Обчислюють непродуктивні витрати потужності, зв'язані з дроселюванням потоку на останньому перегоні, кВт

$$N_{\partial p_m} = \frac{\rho g (Q - Q_c) h_{\partial p_m}}{1000 \eta_n \eta_e}, \quad (22)$$

де  $\eta_n$  – ККД останньої станції на трубопроводі.

Розраховують затрати потужності на перекачування нафти в системі трубопроводу

$$N_1 = N_n + \sum_{i=1}^n N_{cm_i}, \quad (23)$$

де  $n$  – кількість перегонів між станціями.

Визначають непродуктивні затрати потужності, зв'язані з дросельованням потоку в системі трубопроводу

$$N_{\partial p} = N_{\partial p_m} + \sum_{i=1}^n N_{\partial p_i} . \quad (24)$$

Обчислюють тиск, що відповідає дросельованому напору із умов технології перекачування на останньому перегоні, МПа

$$P_{\partial p_n} = \rho g h_{\partial p_m} \cdot 10^{-6} . \quad (25)$$

Розраховують тиск, з яким надходить нафта на кінцевий пункт трубопроводу

$$P_{kn} = P_{n\phi_n} - P_{\partial p_n} , \quad (26)$$

де  $P_{n\phi_n}$  – розрахунковий фактичний тиск в кінці останньому перегону між станціями.

Знаходять питомі затрати потужності на перекачування нафти

$$\Delta N = \frac{N_1}{\rho \cdot 10^{-3} Q_{200} L} , \quad (27)$$

де  $L$  – загальна довжина трубопроводу, км.

Нафтоперекачувальні станції нафтопроводів часто оснащені різнотипними насосами, напірні та енергетичні характеристики яких суттєво відрізняються. Вибір та реалізація найбільш ефективних з мінімальними енергетичними затратами режимів роботи нафтопроводів, на яких організоване періодичне скидання частини нафти, у кожному конкретному випадку, потребує визначення відповідних режимних параметрів роботи кожної нафтоперекачувальної станції, які працюють на трубопроводі. З метою проведення аналізу залежності витрати рідини в магістральному нафтопроводі та величини підпору на вході в станції від величини витрати скидання розроблене програмне забезпечення, яке дає змогу оцінити транспортні можливості нафтопроводу, спрогнозувати обсяги постачання та запропонувати найбільш енергоефективну технологію перекачування нафти.

Вибираючи енергоефективні режими перекачування, можна суттєво зменшити собівартість транспортування нафти. Дослідники пропонують різні методи визначення енергоефективних режимів перекачування нафти магістральними трубопроводами з урахуванням останніх досягнень комп'ютерних технологій. При перекачуванні нафти магістральними нафтопроводами споживання електроенергії є однією із основних складових, що впливають на собівартість перекачування нафти. Тому витрату електроенергії можна вважати як основний критерій енергоефективності і економічності роботи нафтопроводу. Найкращі режими роботи нафтопроводів відповідають мінімальним питомим витратам енергії на перекачування нафти.

Апробація проведених досліджень проведена для другої черги ділянки Мозир – Броди – Тухольський перевал магістрального нафтопроводу «Дружба» із скиданням частини нафти на ЛВДС «Броди».

Діаметр трубопроводу на цій ділянці 720 x 9 мм, загальна довжина 602,4 км. На ділянці нафтопроводу працює вісім нафтоперекачувальних станцій, на вході п'ятої станції, яка знаходиться на 394,4 км, можливе скидання частини нафти для подальшого транспортування залізничним транспортом. За графічними характеристиками одержані математичні моделі напірних характеристик та характеристик ККД кожного насоса, встановленого на станціях зазначеної ділянки нафтопроводу. Розрахунки виконані для декількох комбінацій включення насосів на станціях. Трубопроводом перекачується нафта, густини якої  $\rho_{20} = 867,5 \text{ кг/м}^3$ , кінематична в'язкість  $\nu_0 = 49,16 \text{ сСт}$ ;  $\nu_{20} = 16,27 \text{ сСт}$ , температура перекачування нафти  $t = 6,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . В таблиці 1 наведені значення максимально допустимих тисків на виході станцій  $P_{дон_i}$ , мінімально допустимих тисків на вході в проміжні станцій і в кінці ділянки нафтопроводу  $P_{ні}$ , довжини  $l_i$  і різниці геодезичних позначок кінця і початку кожного із перегонів між станціями  $\Delta z_i$ .

Таблиця 1. Допустимі тиски, довжини і різниці геодезичних позначок кінця і початку перегонів між станціями

Перегін між станціями	$P_{дон_i}, \text{ МПа}$	$P_{ні}, \text{ МПа}$	$l_i, \text{ км}$	$\Delta z_i, \text{ м}$
Мозир – Плещівка	4,71	0,29	102,4	4,6
Плещівка – Чижівка	4,71	0,29	95,9	39,1
Чижівка – Новини	4,71	0,29	96,4	30,4
Новини – Броди	4,71	0,29	99,7	-0,9
Броди – Куровичі	4,90	0,43	63,0	47,4
Куровичі – Жулин	4,90	0,34	85,0	41,3
Жулин – Карпати	4,80	0,34	47,0	323,3
Карпати – Тухольський перевал	4,80	0,10	13,0	389,2

Кількість різних режимів роботи нафтопроводу залежно від продуктивності скидання і схеми включення насосів на станціях може бути великою. Тому для розрахунків використані комп'ютерні технології. Проведені розрахунки для схем включення в роботу на всіх станціях технологічних насосів № 1, технологічних насосів № 2, технологічних

насосів № 4 і № 2. При розрахунках виявлені витрати потужності на перекачування нафти за різних схем включення насосів в системі нафтопроводів та різних продуктивностях скидання. Результати розрахунків витрат потужності зведені в таблицю 2.

Таблиця 2. Витрати потужності на перекачування нафти системою нафтопроводів

Витрата скидання, $m^3/год.$	Витрата потужності на перекачування нафти при режимі включення насосів, $kWt$		
	П,1-1-1-1-1-1-1-1-1	П,2-2-2-2-2-2-2-2-2	П,4-4-4-4-4-4-4-4-2
50	12327,9	12374,5	14061,1
100	12327,6	12338,5	14029,1
150	12326,0	12285,4	13994,7
200	12323,8	12196,3	13918,4
250	12321,0	12105,3	13818,3
300	12316,9	12012,1	13715,8
350	12312,3	11916,6	13610,7
400	12306,4	11818,7	13502,8
450	12260,9	11718,0	13391,8

Енергоефективність того чи іншого режиму перекачування нафти системою трубопроводів виявляється за мінімумом питомих витрат електроенергії на перекачування нафти. Питомі витрати електроенергії на перекачування нафти зведені в таблицю 3.

Таблиця 3. Питомі витрати електроенергії на перекачування нафти

Витрата скидання, $m^3/год.$	Питомі витрати електроенергії на перекачування нафти при режимі включення насосів, $kWt год/(1000 т·км)$		
	П,1-1-1-1-1-1-1-1-1	П,2-2-2-2-2-2-2-2-2	П,4-4-4-4-4-4-4-4-2
0	15,200	15,260	16,238
50	14,987	15,083	16,029
100	14,785	14,913	15,825
150	14,616	14,749	15,626
200	14,510	14,590	15,486
250	14,401	14,435	15,375
300	14,291	14,285	15,261,
350	14,177	14,140	15,144
400	14,060	14,000	15,024
450	13,941	13,944	14,900



Аналіз розрахунків, наведених в таблиці 3 показує, що за будь-якої схеми включення насосів на станціях питомі витрати електроенергії на перекачування нафти із збільшенням величини скидання зменшуються. Найвигіднішим із розглянутих режимів перекачування за мінімумом питомих витрат електроенергії є режим, коли на всіх станціях включаються в роботу перші технологічні насоси.

**Наукова новизна** результатів досліджень полягає у виявленні впливу величини скидання частини нафти на витрати потужності на перекачування нафти при заданому розміщенні нафтоперекачувальних станцій на трубопроводі.

**Практична цінність отриманих результатів.** Запропонований алгоритм розрахунків може бути використаний підприємствами, що займаються перекачуванням нафти магістральними нафтопродуктопроводами, на яких можливі періодичні скидання частини нафти, для вибору енергоефективних режимів перекачування.

### *Література*

1. Нечваль А.М. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов / А.М. Нечваль. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2001. – 168 с.
2. Коршак А.А. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов / А.А. Коршак, А.М. Нечваль; под ред. А.А. Коршака. СПб.: Недра, 2008. – 488 с.
3. Якимів Й.В. Проектування та експлуатація нафтопроводів / Й. В. Якимів, О. М. Бортняк. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. – 171 с.
4. Якимів Й.В. Режими роботи магістральних нафтопроводів з періодичними скиданнями і підкачуваннями / Й.В. Якимів, О.М. Бортняк // Міжнародний науковий журнал “Інтернаука”, – К.: № 3(25), том 1. – 2017. – С. 188 – 190.
5. Якимів Й.В. Мінімальні витрати електроенергії як критерій оптимізації режимів роботи магістральних нафтопроводів / Й.В. Якимів, В.М. Кацаба // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2012. – № 1(17). – С. 271 – 277.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 14.12.2018 р.*

*Рекомендовано до друку д.т.н., професором Грудзом В.Я.,  
д.т.н., професором Тараєвським О.С.*

## **ENERGY EFFICIENCY OF OPERATING MODES OF MAIN OIL PIPELINES WITH PERIODICAL PARTIAL OIL DUMPING**

**Y. Yakymiv, O. Bortnyak**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;  
76019, Ivano-Frankivsk, Karpatska str., 15; e-mail: gnps@nung.edu.ua*

*Modern oil transportation systems are characterized by a complex hydraulic structure and geometric configuration, and often require the need for a permanent or periodic pumping or dumping part of the oil flow. The*

*implementation of such transportation technology necessarily leads to changes in the operating conditions of oil pipelines and in accordance with the need to regulate the operation of oil pumping stations. Consequently, determining the patterns of the impact of the process of dumping the part of the oil on the energy parameters of the operation of oil transportation systems is an extremely important task.*

*The influence of periodic dumping the part of oil on the energy efficiency of the operation of main oil pipelines was studied. The impact of volume of discharges on the consumption of power on pumping oil in the system of the main oil pipeline was analyzed. It has been found that with the increase the volume of discharges, the specific consumption of electricity for oil pumping decreases.*

*Based on the carried research, the recommendations on the selection of reliable, safe and optimal pumping modes in terms of cost of electricity for the operation of oil pipelines "Druzhba" in the direction of Mozyr - Brody - Tukholsky pass with periodical partial oil dumping on LPDS "Brody".*

**Key words:** *periodic dumping, main oil pipeline, flow capacity, energy efficiency.*