

УДК 622.691.4

ВПЛИВ ТОЧКИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ВІДВОДУ НА ГІДРАВЛІЧНИЙ РЕЖИМ РОЗГАЛУЖЕНОГО НАФТОПРОВОДУ**Й. В. Якимів**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380 (342) 72-71-39; e-mail: tzngkaf@rambler.ru*

Досліджено вплив точки підключення відводу на витрату рідини у відводі та на ділянках основної магістралі. Задача розв'язана з використанням рівнянь балансу напорів, які описують подачу рідини в кінець трубопроводу та в кінець відводу від основної магістралі. Розроблено алгоритм і програмне забезпечення гідравлічного розрахунку розгалуженого трубопроводу, який дозволяє визначати витрати у відводі та на ділянках основної магістралі.

Ключові слова: *витрата, відвід, розгалужений трубопровід, нафтоперекачувальна станція, коефіцієнт гідравлічного опору.*

Магістральні нафтопроводи і особливо магістральні нафтопродуктопроводи часто мають структуру «простого дерева», тобто складаються із основної магістралі і відводів від них. Особливістю експлуатації розгалужених трубопровідних систем є велика кількість різних режимів їх роботи, яка залежить від кількості відводів, які одночасно включаються в роботу. Досвід експлуатації розгалужених нафтопроводів показує, що одночасно в роботу включають в роботу один або два відводи за умови обов'язкової поставки рідин в кінцевий пункт трубопроводу. Будь-який режим роботи розгалуженого трубопроводу характеризується витратами рідини на ділянках основної магістралі і у відводах та витратами потужності на перекачування нафти. Ці питання вивчаються на основі гідравлічного розрахунку трубопровідних систем. Питання гідравлічного розрахунку розгалужених нафтопродуктопроводів висвітлені в роботах [1, 2, 3, 4]. Величина витрати у відводі залежить від точки відключення відводу до основної магістралі. Цим визначаються можливі втрати енергії на ділянці «точка підключення відводу – кінець відводу».

Гідравлічний розрахунок розгалуженого нафтопроводу якісно відрізняється від розрахунку простого трубопроводу, що не має відводів. У розгалуженому трубопроводі можна реалізувати не один, а декілька залежно від структури системи, можливих варіантів одночасно включених і відключених відводів. Кожний варіант роботи вимагає окремого гідравлічного розрахунку складного трубопроводу.

Метою гідравлічного розрахунку розгалужених трубопроводів є визначення витрати рідини на ділянках основної магістралі і у відводах, а також тиску в характерних точках траси магістральних трубопроводів. Витрата рідини у відводі залежить від його діаметра, довжини і тиску в точці підключення до основної магістралі. За фіксованого розміщення споживача витрата рідини у відводі однакового діаметра буде залежати від довжини відводу, тобто точки підключення відводу до магістралі і відповідного значення тиску.

Цікавими є дослідження, як впливає довжина відводу, а відповідно і величина тиску в точці підключення відводу, на витрату рідини у відводі та витрату на ділянках основної магістралі. Такі дослідження виконані для трубопроводу з одним відводом.

Вихідними рівняннями для розрахунків є рівняння балансу напорів, записані для основної магістралі і напрямку, що включає частину основної магістралі і відвід [1, 2]:

$$A - BQ_1^2 = \lambda_1 \kappa_1 Q_1^2 l_1 + \lambda_2 \kappa_2 Q_2^2 l_2 + \Delta z, \quad (1)$$

$$A - BQ_1^2 = \lambda_1 \kappa_1 Q_1^2 l_1 + \lambda_o \kappa_o q^2 l_o + \Delta z_o, \quad (2)$$

де A, B – коефіцієнти математичної моделі напірної характеристики перекачувальної станції;

Q_1, Q_2 – витрата рідини на першій і другій ділянках основної магістралі;

q – витрата у відводі;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_o$ – коефіцієнт гідравлічного опору для ділянок основної магістралі та відводу;

$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_o$ – сталі комплекси величин для ділянок основної магістралі та відводу, які входять у формулу Дарсі-Вейсбаха:

$$\kappa_1 = 1,02 \frac{8}{\pi^2 g D_1^5}, \quad (3)$$

$$\kappa_2 = 1,02 \frac{8}{\pi^2 g D_2^5}, \quad (4)$$

$$\kappa_o = 1,02 \frac{8}{\pi^2 g D_o^5}; \quad (5)$$

l_1, l_2, l_o – довжина ділянок основної магістралі та відводу;

Δz – різниця геодезичних позначок кінця і початку основної магістралі,

Δz_o – різниця геодезичних позначок кінця відводу і початку трубопроводу із врахуванням залишкового напору в кінці відводу.

Рівняння балансу напорів доповнюється рівнянням балансу витрат

$$Q_2 = Q_1 - q. \quad (6)$$

При розв'язуванні системи рівнянь (1)-(2) із врахуванням (3) застосовується метод послідовних наближень оскільки коефіцієнти гідравлічного опору λ_1 , λ_2 , λ_0 є складними функціями, залежними від невідомих величин витрат нафти Q_1 , Q_2 і q . Причому вид функціональної залежності залежить від режиму течії нафти у трубопроводі.

Гідравлічний розрахунок магістральних нафтопроводів з відводами виконується в такій послідовності:

- 1) Визначається температурна поправка транспортованої нафти

$$\zeta_t = 1,825 - 0,001315\rho_{20}, \quad (7)$$

де ρ_{20} – густина нафти за температури 20°C , кг/м^3 .

- 2) Знаходиться густина нафти за температури перекачування

$$\rho = \rho_{20} - \zeta_t(t - 20), \quad (8)$$

де t – температура, з якою перекачується нафта (температура ґрунту на глибині укладання трубопроводу).

- 3) Обчислюється коефіцієнт крутизни віскограми

$$u = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{v_1}{v_2}, \quad (9)$$

де v_1 , v_2 – відомі значення кінематичної в'язкості нафти за температур t_1 і t_2 .

- 4) Визначається в'язкість нафти за температури перекачування за формулою Рейнольдса-Філонова

$$v = v_1 e^{-u(t-t_1)}. \quad (10)$$

- 5) Розраховується максимально допустимий напір на виході станції

$$H_{\text{дон}} = \frac{P_{\text{дон}}}{\rho g}, \quad (11)$$

де $P_{\text{дон}}$ – допустимий тиск у трубопроводі.

- 6) Обчислюється допустимий напір у кінці трубопроводу

$$h_{\text{кдон}} = \frac{P_{\text{к}}}{\rho g}, \quad (12)$$

де $P_{\text{к}}$ – допустимий тиск у кінці трубопроводу.

- 7) За формулами (3)-(5) розраховуються сталі комплекси величин для ділянок основної магістралі і відводу.

- 8) Для всіх ділянок трубопровідної системи знаходиться перше перехідне число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{n1} = 59,5 \left(\frac{D_1}{2k_e} \right)^{8/7}, \quad (13)$$

$$\text{Re}_{n2} = 59,5 \left(\frac{D_2}{2k_e} \right)^{8/7}, \quad (14)$$

$$\text{Re}_{no} = 59,5 \left(\frac{D_o}{2k_e} \right)^{8/7}, \quad (15)$$

де D_1 , D_2 , D_o – внутрішні діаметри ділянок основної магістралі та відводу;

k_e – абсолютна еквівалентна шорсткість труб.

9) Обчислюються максимально допустимі втрати напору у відводі, попередньо розрахувавши максимально можливу витрату рідини у відводі,

$$q_{\max} = \frac{\pi D_o^2}{4} W_{\max}, \quad (16)$$

$$H_{\max} = k_o \kappa_o q_{\max}^{1,75} l_o, \quad (17)$$

де W_{\max} – максимальна швидкість руху нафти у відводі;

k_o – сталий комплекс величин у формулі Блазіуса для відводу,

$$k_o = 0,3164 \left(\frac{\pi D_o v}{4} \right)^{0,25}. \quad (18)$$

10) Знаходиться мінімально допустима витрата нафти у відводі

$$q_{\min} = \frac{\pi D_o^2}{4} W_{\min}. \quad (19)$$

де W_{\min} – мінімальна швидкість руху нафти у відводі.

11) Задаються першим наближенням витрати нафти на початковій ділянці основної магістралі Q_1 .

12) Визначаються коефіцієнти математичної моделі напірної характеристики перекачувальної станції залежно від кількості працюючих насосів

$$A = a_n + a_1 + a_2 + a_3 + a_4, \quad (20)$$

$$B = b_n + b_1 + b_2 + b_3 + b_4, \quad (21)$$

де a_n , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , b_n , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 – коефіцієнти математичних моделей напірної характеристики підпірного та основних працюючих насосів на станції.

13) Обчислюється напір, що створює нафтоперекачувальна станція,

$$H_{nc} = A - BQ_1^2. \quad (22)$$

Порівнюється напір станції H_{nc} з максимально допустимим напором з умови міцності трубопроводу $H_{дон}$. Якщо виконується умова $H_{nc} > H_{дон}$, то приймається, що напір на початку трубопроводу дорівнює максимально допустимому напору $H_{nc} = H_{дон}$.

14) Знаходиться число Рейнольдса для першої ділянки основної магістралі

$$\text{Re}_1 = \frac{4Q_1}{\pi D_1 v}. \quad (23)$$

Залежно від співвідношення числа Рейнольдса Re_1 і першого перехідного числа Рейнольдса Re_{n1} вибирається формула для визначення коефіцієнта гідравлічного опору. Якщо виконується умова $\text{Re}_1 \leq \text{Re}_{n1}$, то рух рідини відбувається в зоні гідравлічно гладких труб, тому для визначення коефіцієнта гідравлічного опору використовується формулу Блазіуса

$$\lambda_1 = \frac{0,3164}{\text{Re}_1^{0,25}}. \quad (24)$$

При $\text{Re}_1 > \text{Re}_{n1}$ перекачування рідини здійснюється в зоні змішаного тертя. В цій зоні для визначення коефіцієнта гідравлічного опору можна застосовувати формулу Альтшуля, яка після математичних перетворень записується у такому вигляді

$$\lambda_1 = \frac{1}{0,6111 \ln^2 \left(\frac{7}{\text{Re}_1} + \frac{k_e}{10D_1} \right)}. \quad (25)$$

15) Обчислюється напір, який можна використати для компенсації втрат напору у відводі,

$$H_1 = H_{cm} - \lambda_1 \kappa_1 Q_1^2 l_1 - z_o - h_{\kappa_o} + z_1, \quad (26)$$

де z_o – геодезична позначка кінця відводу;

h_{κ_o} – залишковий напір, з яким нафта повинна надходити у кінець відводу;

z_1 – геодезична позначка початку трубопроводу.

16) Порівнюється фактичний напір H_1 з максимально допустимим напором H_{\max} . Якщо $H_1 > H_{\max}$, то знаходять напір, який треба дроселювати на початку відводу,

$$H_{op} = H_1 - H_{\max} \quad (27)$$

і приймають, що

$$H_1 = H_{\max}. \quad (28)$$

При $H_1 \leq H_{\max}$ дросельований напір на початку відводу $H_{op} = 0$.

17) Визначається наближене значення витрати нафти у відводі, приймаючи режим руху рідини в трубопроводі у зоні Блазіуса,

$$q = \left(\frac{H_1}{k_o \kappa_o l_o} \right)^{\frac{1}{1,75}}. \quad (29)$$

18) Уточнюється витрата нафти у відводі. Для цього визначають число Рейнольдса за формулою

$$\text{Re}_o = \frac{4q}{\pi D_o v}, \quad (30)$$

порівнюють його з першим перехідним числом Рейнольдса Re_{no} і залежно від співвідношення між ними вибирають формулу (24) або (25) для визначення коефіцієнта гідравлічного опору у відводі λ_o . Після цього знаходиться уточнене значення витрати у відводі

$$q_p = \sqrt{\frac{H_1}{\lambda_o \kappa_o l_o}}. \quad (31)$$

19) Порівнюється уточнене значення q_p з наближеною величиною q . Якщо різниця між ними за абсолютною величиною більша заданої точності розрахунків ε_b , то приймається

$$q = q_p \quad (32)$$

і розрахунки повторюються, починаючи з формули (30).

20) Аналогічно виконуються розрахунки другої ділянки основної магістралі.

21) Знаходиться перевищення залишкового напору в кінці трубопроводу над мінімально допустимою величиною

$$h_\kappa = H_1 - \lambda_2 \kappa_2 (Q_1 - q)^2 l_2 + \Delta z_o + z_1 - z_3 - h_{\kappa_{дон}}, \quad (33)$$

де z_3 – геодезична позначка точки підключення відводу.

Якщо $h_\kappa > 0$ і перевищує необхідне значення кінцевого напору $h_{\kappa_{дон}}$ більше, ніж на задану точність розрахунку ε_κ , то приймається

$$Q_1 = Q_1 + \Delta Q \quad (34)$$

і розрахунки повторюються, починаючи з формули (22).

Якщо ж $h_\kappa \leq 0$, то приймають

$$Q_1 = Q_1 - \Delta Q \quad (35)$$

і розрахунки повторюються, починаючи з тієї ж формули.

22) Після кінцевого уточнення значень витрат нафти знаходиться напір у точці підключення відводу

$$H_{o1} = H_{nc} - \lambda_1 \kappa_1 Q_1^2 l_1 + z_1 - z_2. \quad (36)$$

23) Обчислюється ККД насосів головної НС, який залежить від витрати нафти через насоси перекачувальної станції,

$$\eta_i = \eta_{\max_i} \left[2 \frac{Q_i}{Q_{ni}} - \left(\frac{Q_i}{Q_{ni}} \right)^2 \right]. \quad (37)$$

де η_{\max_i} – максимальне значення ККД, що відповідає номінальній подачі i -го насоса Q_{ni} (підпірного і працюючих основних насосів).

24) Визначається напір, що створює підпірний та основні працюючі магістральні насоси,

$$h_n = a_n - b_n Q_1^2, \quad (38)$$

$$h_i = a_i - b_i Q_1^2. \quad (39)$$

25) Розраховується ККД нафтоперекачувальної станції

$$\eta = \frac{h_n + \sum_{i=1}^r h_i}{\frac{h_n}{\eta_n} + \sum_{i=1}^r \frac{h_i}{\eta_i}}. \quad (40)$$

26) Знаходиться потужність, що витрачається на перекачування нафти

$$N_{nc} = \frac{\rho g Q_1 H_{nc}}{\eta \eta_e}, \quad (41)$$

де η_e – ККД привода насосів.

Алгоритм дозволяє виконувати розрахунок як при включеному відводі, так і у випадку його відключення.

При реалізації методу послідовних наближень передбачається контроль за виконанням таких умов у точці підключення відводу:

$$H_1 > 0, \quad (42)$$

$$Q_{m1} > 0, \quad (43)$$

де Q_{m1} – транзитна витрата у точці підключення відводу.

За невиконання умови (42) зменшується, а у випадку невиконання умови (43) збільшується витрата нафти на початковій ділянці основної магістралі.

Такий алгоритм розрахунку можна реалізувати тільки з використанням комп'ютерних технологій.

Дослідження з виявлення впливу точки підключення відводу на гідравлічний режим розгалуженого нафтопроводу проведені для трубопроводної системи з довжиною основної магістралі 200 км, діаметром 720x9 мм, з діаметром відводу 530x8 мм. Трубопроводом перекачується нафта густиною $\rho_{20} = 864,5 \text{ кг/м}^3$, в'язкістю $\nu_0 = 40,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\nu_{20} = 12,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ температура, за якої перекачується нафта, $1,3^\circ\text{C}$. Перекачування нафти здійснюється нафтоперекачувальною станцією, математична модель напірної характеристики якої $H_{cm} = 628 - 204Q^2$ ($[Q] = \text{м}^2/\text{с}$), допустимий тиск у розгалуженій системі трубопроводів $P_{дон} = 4,9 \text{ МПа}$, геодезична позначка початку нафтопроводу 232 м, точки підключення відводу 324 м, кінця основної магістралі 325 м, кінця відводу 316 м.

Найкоротша віддаль від точки підключення відводу до магістралі 20 км. Розглянуті випадки, коли найкоротша віддаль від магістралі до кінця відводу знаходиться на відстані 40, 60, 80, 100, 120, 140 і 160 км

від початку трубопроводу з однаковою геодезичною позначкою точки підключення відводу і кінця відводу.

Результати розрахунків з виявлення впливу точки підключення відводу на гідравлічний режим розгалуженої трубопроводної системи показали, що при найкоротших віддальх точки підключення відводів до 60 км витрата рідини у відводі складає 1120,5 м³/год, визначається максимально допустимою швидкістю рідини у відводі і не залежить від тиску у точці підключення відводу. Результати розрахунків за інших мінімальних віддалей від магістралі до кінця відводу зведені в табл. 1.

Таблиця 1. Вплив точки підключення відводу на гідравлічний режим нафтопроводу з відводом

Віддаль від НПС до точки підключення відводу, км	Довжина відводу, км	Напір у точці підключення відводу, м	Витрата, м ³ /год.			Витрати потужності на перекачування нафти, кВт
			до точки підключення відводу	після точки підключення відводу	у відводі	
Віддаль від НПС до точки підключення найкоротшого відводу 80 км						
60	28,3	169,4	2170,0	1050,9	1119,1	3625,6
65	25,0	150,1	2143,4	1022,9	1120,5	3605,9
70	22,4	134,2	2116,0	995,5	1120,5	3585,9
75	20,6	123,7	2089,0	968,5	1120,5	3566,3
80	20,0	119,6	2061,6	943,7	1117,9	3546,7
Віддаль від НПС до точки підключення найкоротшого відводу 100 км						
89	22,8	114,7	1975,6	963,2	1012,4	3486,3
90	22,4	112,6	1971,2	957,9	1013,3	3483,3
91,5	21,7	109,5	1964,4	950,4	1014,0	3478,6
95	20,6	103,1	1947,1	937,4	1009,7	3466,8
100	20,0	96,3	1915,4	927,4	988,0	3445,2
Віддаль від НПС до точки підключення найкоротшого відводу 120 км						
105	25,0	99,1	1854,2	970,1	884,1	3404,2
110	22,4	89,5	1834,1	945,1	888,9	3390,9
110,9	22,0	88,0	1830,1	941,2	889,9	3388,3
111	21,9	87,9	1829,4	939,9	889,4	3387,8
115	20,6	81,6	1810,7	927,4	883,3	3375,6
120	20,0	75,9	1782,9	920,7	862,2	3357,5
Віддаль від НПС до точки підключення найкоротшого відводу 140 км						
120	28,3	86,5	1753,4	991,0	762,4	3338,5
128	23,3	72,7	1726,8	956,1	770,7	3321,5
129	22,8	71,3	1722,8	951,2	771,6	3319,0
132	21,5	67,0	1711,7	942,3	769,3	3311,9
140	20,0	58,2	1676,8	935,6	741,2	3289,9
Віддаль від НПС до точки підключення найкоротшого відводу 160 км						
140	28,3	66,1	1657,3	1003,9	653,4	3277,7
141	27,6	64,5	1654,4	1000,6	653,8	3275,9
143	26,2	61,5	1648,7	994,4	654,3	3272,3
150	22,4	52,0	1626,7	974,9	651,8	3258,7
160	20,0	41,6	1591,4	980,1	611,3	3237,0

Аналіз розрахунків свідчить, що існують максимальні значення витрати рідини у відводі при різних віддальх від початку трубопроводу до точки підключення найкоротшого відводу. Це пояснюється величиною тиску в точці підключення відводу, а відповідно, перепадом тиску на ділянці «точка підключення відводу – кінець відводу».

Наукова новизна результатів досліджень полягає у виявленні точки підключення відводу до основної магістралі розгалуженої трубопроводної системи, за якої буде забезпечуватись найбільша витрата нафти у відводі, що вплине на гідравлічний режим розгалуженого трубопроводу.

Запропонований алгоритм розрахунків може бути використаний проектними організаціями при виборі пункту підключення відводу в розгалуженій трубопроводній системі, коли буде забезпечуватись найбільша витрата рідини у відводі. Ці дослідження можуть бути використані при проектуванні розгалужених нафтопроводів і нафтопродуктопроводів для визначення можливої подачі нафти чи нафтопродуктів шляховим споживачам.

Література

1. Середюк М.Д. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / М.Д. Середюк, Й.В. Якимів, В.П. Лісафін. – Івано-Франківськ–Кременчук, 2001. – 517 с.
2. Якимів Й.В. Типові технологічні розрахунки трубопроводного транспорту нафти і нафтопродуктів: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Й.В. Якимів. – Івано-Франківськ: Факел, 2006. – 366 с.
3. Середюк М.Д. Оптимізація параметрів роботи розгалужених нафтопродуктопроводів: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М.Д. Середюк, Й.В. Якимів, М.В. Лур'є. – К.: НМК ВО, 1992. – 136 с.
4. Трубопроводный транспорт нефти и газа : учеб. для студ. высш. учеб. завед. / Р.А. Алиев, В.Д. Белоусов, А.Г. Немудров и др. – М.: Недра, 1988. – 368 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 22.04.2015 р.

*Рекомендовано до друку д.т.н., професором Грудзом В.Я.,
к.т.н. Басарабом Р.М.*

THE EFFECT OF BRANCH CONNECTION POINT ON HYDRAULIC MODE OF BRANCHED OIL PIPELINE

J. Yakymiv

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, Karpatska str., 15;
ph. +380 (342) 72-71-39; e-mail: tzngkaf@rambler.ru*

The influence of the branch connection point on the fluid flow rate in the branch and in mainline segments was investigated. The problem is solved using the head balance equations which describe fluid supply to the pipeline end and to the end of mainline diversion. The algorithm and software for hydraulic calculation of branched pipeline were developed, which allow determining the flow rate in the branch and in the segments of the mainline.

Key words: *flow rate, withdrawal, branched pipeline, oil pumping station, hydraulic resistance coefficient.*