
Фізико-технічні проблеми транспорту та зберігання енергоносіїв

УДК 622.691.4

ВПЛИВ ТЕПЛА ТЕРТЯ ПОТОКУ НА ВТРАТИ НАПОРУ ПРИ ПЕРЕКАЧУВАННІ ВИСОКОВ'ЯЗКИХ НАФТ

Й. В. Якимів, Н. В. Люта, О. М. Бортняк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727139,
e-mail: tzn g @ n i n g . e d u . u a

Досліджено вплив тепла тертя потоку на зміну температурного режиму при перекачуванні високов'язких нафт магістральними трубопроводами. Суттєво впливає на падіння температури передача тепла від нагрітої нафти в оточуючий ґрунт. Втрати тепла залежать від величини повного коефіцієнта теплопередачі. За рахунок тепла тертя потоку сповільнюється падіння температури по довжині трубопроводу та, відповідно, зменшуються втрати напору на тертя в трубопроводі. Проаналізовано залежність впливу повного коефіцієнта теплопередачі із врахуванням тепла тертя потоку на втрати напору в трубопроводі при перекачуванні трубопроводами високов'язких і застигаючих нафт.

Ключові слова: тепло тертя потоку, коефіцієнт теплопередачі, магістральний трубопровід, високов'язка нафта, втрати напору на тертя.

Исследовано влияние тепла трения потока на изменение температурного режима при перекачке высоковязких нефтей по магистральным трубопроводам. Существенно влияет на падение температуры передача тепла от нагретой нефти в окружающий грунт. Потери тепла зависят от величины полного коэффициента теплопередачи. За счет тепла трения потока замедляется падение температуры по длине трубопровода, и соответственно, уменьшаются потери напора на трение в трубопроводе. Проанализирована зависимость влияния полного коэффициента теплопередачи с учетом тепла трения потока на потери напора в трубопроводе при перекачке по трубопроводам высоковязких и застывающих нефтей.

Ключевые слова: тепло трения потока, коэффициент теплопередачи, магистральный трубопровод, высоковязкая нефть, потери напора на трение.

The article studies the influence of the flow friction heat on the temperature mode change when pumping high-viscosity oils through main pipelines. Heat transfer from the heated oil to the surrounding soil significantly affects temperature decrease. Heat losses depend on the full heat transfer coefficient. The flow friction heat slows down temperature decrease in the pipeline and reduces the flow pressure head losses due to friction in the pipeline. The article also analyzes the dependence of the influence of the full heat transfer coefficient with the account of the flow friction heat on the flow pressure head losses in the pipeline when pumping high-viscosity and solidified oils.

Keywords: flow friction heat, full heat transfer coefficient, main pipeline, high-viscosity oil, loss of pressure head due to friction.

Вступ. Частка високов'язких нафт в загальному обсязі видобування складає близько 10%. Економічним способом доставки таких нафт від місць видобування до нафтопереробних заводів є трубопровідний транспорт. Основним методом доставки нафт є перекачування їх трубопроводами з підігрівом. Суть способу полягає у нагріванні нафти на початку трубо-

проводу до певної температури, внаслідок чого зменшується її в'язкість, і наступного закачування її в трубопровід. При переміщенні нагрітої нафти трубопроводом її температура поступово зменшується, за рахунок чого в'язкість нафти збільшується. Швидкість зменшення температури залежить від теплообміну з оточуючим середовищем. Визначальним параметром,

що впливає на зміну температури, є повний коефіцієнт теплопередачі. Зниження температури дещо сповільнюється за рахунок тертя, що виникає при русі між шарами рідини та тертя рідини до стінки трубопроводу. Від в'язкості рідини залежать втрати напору на тертя при переміщенні. Питання теплової взаємодії трубопроводу, яким перекачується нафта з підігрівом, з оточуючим середовищем та гідравлічних втрат висвітлені в роботах [1, 2, 3, 4]. За рахунок тепла тертя потоку зменшуються теплові та гідравлічні втрати, що недостатньо висвітлено в роботах. Тому виникає потреба у додатковому дослідженні впливу величини повного коефіцієнта теплопередачі на температурний та гідравлічний режим трубопроводів при врахуванні тепла тертя потоку.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Теоретичними і практичними аспектами перекачування високов'язких нафт з підігрівом займалися такі видатні вчені, як В.Г. Шухов, Л.С. Абрамзон, В.И. Чернікін, В.С. Яблонський, П.И. Тугунов, В.Л. Нельсон, В.Ф. Новосьолов, В.А. Юфін, В.М. Агапкін, Р.А. Алієв, С.М. Колі, А.А. Аронс, Ф. Джил, Ф. Карг та інші. В Україні питаннями неізотермічного перекачування нафт займалися К.Д. Фролов, М.Д. Середюк, В.Я. Грудз, Л.Д. Пилипів. Аналіз раніше проведених досліджень призводить до висновку про наявність прямої залежності ефективності транспортування високов'язкої нафти «гарячими» нафтопроводами від вірно обраного режиму роботи. В першу чергу це стосується температури попереднього підігріву нафти та прогнозування падіння температури нафти по довжині лінійної частини трубопроводу.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є дослідження впливу величини повного коефіцієнта теплопередачі на температурний та гідравлічний режим трубопроводів, якими перекачується нафта з підігрівом.

Об'єкт дослідження – магістральні трубопроводи для перекачування високов'язких нафт.

Предмет дослідження – залежність втрат напору на тертя в трубопроводі від величини повного коефіцієнта теплопередачі із врахуванням тепла тертя потоку рідини.

Методи дослідження – математичне моделювання теплових і гідравлічних втрат в трубопроводах для перекачування високов'язких нафт із врахуванням тепла тертя потоку.

За способом перекачування з підігрівом працює близько п'ятдесяти нафтопроводів у світі, зокрема в Канаді, Африці та Південній Америці [5]. Тому дослідження теплового і гідравлічного режимів таких нафтопроводів є важливими.

Основний матеріал. При перекачуванні реальної рідини трубопроводом частина механічної енергії переходить в теплову енергію. Тому рівняння теплового балансу для ділянки трубопроводу довжиною dx із врахуванням тепла тертя потоку має вигляд [1, 2, 3, 4]

$$K\pi D(t-t_o)dx = -\rho Qc dt + \rho Qg dx, \quad (1)$$

де $K\pi D(t-t_o)dx$ - тепло, яке передається у оточуюче середовище;

$\rho Qc dt$ - тепло, яке віддає нафта;

$\rho Qg dx$ - тепло тертя потоку;

K - повний коефіцієнт теплопередачі;

D - внутрішній діаметр трубопроводу;

$\pi D dx$ - поверхня, через яку проходить теплопередача;

t - температура нафти на віддалі x від початку трубопроводу;

t_o - температура оточуючого середовища на глибині укладання трубопроводу;

ρ - густина нафти;

Q - об'ємна витрата;

c - масова питома теплоємність нафти;

g - прискорення вільного падіння;

i - гідравлічний нахил;

idx - втрати напору на тертя на ділянці довжиною dx .

Згрупувавши члени в (1) і ввівши позначення, отримаємо

$$\Theta = \frac{\rho Q g}{K \pi D} i = \frac{\rho Q g}{K \pi D} \Delta_r \beta \frac{Q^{2-m} v^m}{D^{5-m}} = \varphi v^m, \quad (2)$$

де Δ_r - поправка на неізотермічність по радіусу труби;

β і m - показники режиму руху рідини у формулі Лейбензона;

v - кінематична в'язкість нафти;

$$\varphi = \frac{\rho Q^{3-m} g}{K \pi D^{6-m}} \Delta_r \beta,$$

перепишемо вираз (1) із врахуванням (2) у вигляді

$$K\pi D(t-t_o - \Theta)dx = -\rho Qc dt. \quad (3)$$

У виразі (3) величина Θ враховує тепло тертя потоку і має одиницю вимірювання температури.

Для зони гідравлічно гладких труб ($m = 0,25$), в якій найчастіше рухаються високов'язкі нафти при перекачуванні з підігрівом, при незначній зміні в'язкості, тобто для трубопроводів невеликої протяжності величину Θ приймають при середньому значенні температури і вважають постійною величиною $\Theta = \Theta_{cp} = \text{const}$. За такої умови після відокремлення змінних у виразі (3) і інтегрування одержано вираз

$$\frac{K\pi D}{\rho Q c} L = \ln \frac{t_n - t_o - \Theta}{t_k - t_o - \Theta}, \quad (4)$$

де L - довжина трубопроводу;

t_n - температура нафти на початку трубопроводу (температура підігріву);

t_k - температура нафти в кінці трубопроводу.

Із виразу (4) можна визначити температуру в кінці трубопроводу з врахуванням тепла тертя потоку

$$t_k = t_o + \Theta + (t_n - t_o - \Theta)e^{-Шу}, \quad (5)$$

де $Шу$ - параметр Шухова,

$$Шу = \frac{K\pi D}{\rho Q c} L. \quad (6)$$

Відповідно температура в будь-якому перерізі на віддалі x від пункту підігріву буде дорівнювати

$$t = t_o + \Theta + (t_n - t_o - \Theta)e^{-\frac{K\pi D x}{\rho Q c}}. \quad (7)$$

Температура нафти в кінці трубопроводу без врахування тепла тертя потоку дорівнює

$$t'_k = t_o + (t_n - t_o)e^{-Шу}. \quad (8)$$

Кінцева температура нафти t_k при врахуванні тепла тертя потоку завжди більша за температуру t'_k , що одержана за формулою (8).

Використовуючи формулу (4), можна визначити відстань між пунктами підігріву

$$l_{nn} = \frac{\rho Q c}{K\pi D} \ln \frac{t_n - t_o - \Theta}{t_k - t_o - \Theta}. \quad (9)$$

Необхідна кількість пунктів підігріву на трубопроводі дорівнює

$$n_{nn} = \frac{L}{l_{nn}}. \quad (10)$$

З температурним режимом трубопроводу безпосередньо пов'язані гідравлічні втрати в трубопроводі.

Зміна температури особливо сильно впливає на в'язкість транспортованої рідини. В'язкість змінюється як вздовж трубопроводу, так і в радіальному напрямку. Тому при перекачуванні нафти з підігрівом втрати напору на тертя визначають із врахуванням зміни температури нафти як по довжині, так і по радіусу труби.

При визначенні втрат напору вважають, що:

1) нафта в області температур, при яких здійснюється перекачування, є ньютонівською рідиною;

2) режим роботи трубопроводу стаціонарний, тобто в будь-якому перерізі трубопроводу температура не змінюється в часі.

Втрати напору на тертя на елементарній ділянці трубопроводу довжиною dx згідно з формулою Л. С. Лейбензона дорівнюють

$$dh = \Delta_r \beta \frac{Q^{2-m} v^m}{D^{5-m}} dx, \quad (11)$$

Проінтегрувавши вираз (11), одержимо

$$h = \Delta_r \beta \frac{Q^{2-m} L}{D^{5-m}} \int_0^L v^m dx. \quad (12)$$

Якщо помножити і ділити вираз (12) на довжину трубопроводу L , отримаємо

$$h = \Delta_r \beta \frac{Q^{2-m}}{D^{5-m}} L \frac{1}{L} \int_0^L v^m dx, \quad (13)$$

то аналітичний вираз (12) набуває вигляду

$$h = \Delta_r \beta \frac{Q^{2-m} v_{cp}^m}{D^{5-m}} L, \quad (14)$$

де v_{cp}^m - середньоінтегральна в'язкість нафти,

$$v_{cp}^m = \frac{1}{L} \int_0^L v^m dx. \quad (15)$$

Для визначення v_{cp}^m можна використовувати різні емпіричні в'язкісно-температурні залежності.

Аналітичний вираз для визначення v_{cp}^m одержав В. І. Чернікін при використанні в'язкісно-температурної залежності Рейнольдса-Філонова

$$v = v_o e^{-u(t-t_o)}, \quad (16)$$

де v_o - кінематична в'язкість нафти за температури оточуючого середовища t_o (як окремий випадок).

Вираз для визначення v_{cp}^m в цьому випадку має вигляд

$$v_{cp}^m = \frac{v_o^m}{Шу} \{Ei[-mu(t_n - t_o)] - Ei[-mu(t_k - t_o)]\}, \quad (17)$$

де $Ei[-mu(t - t_o)] = \int \frac{e^{-mu(t-t_o)}}{t-t_o} dt$ - інтегральна показникова функція,

$$Ei[-mu(t_n - t_o)] - Ei[-mu(t_k - t_o)] = \int_{t_k}^{t_n} \frac{e^{-mu(t-t_o)}}{t-t_o} dt. \quad (18)$$

Інтеграл у виразі (18) не береться в елементарних функціях, він може бути обчислений наближено відомими математичними методами. Значення інтегральних показникових функцій наводяться в таблицях довідникової літератури.

Із врахуванням (17) формула (14) набуває вигляду

$$h = \Delta_r \beta \frac{Q^{2-m}}{D^{5-m}} L \frac{v_o^m}{Шу} \times \quad (19)$$

$$\times \{Ei[-mu(t_n - t_o)] - Ei[-mu(t_k - t_o)]\}.$$

Після деяких математичних перетворень вираз для визначення втрат напору на тертя представляється в такому вигляді:

$$h = \Delta_r \beta \frac{Q^{2-m} v_n^m}{D^{5-m}} L \frac{e^{mu(t_n-t_o)}}{Шу} \times \{Ei[-mu(t_n-t_o)] - Ei[-mu(t_k-t_o)]\},$$

або

$$h = h_{i3} \Delta_r \Delta_l, \quad (20)$$

де h_{i3} - втрати напору на тертя при ізотермічній течії рідини з температурою $t = t_n$

$$h_{i3} = \beta \frac{Q^{2-m} v_n^m}{D^{5-m}} L; \quad (21)$$

Δ_l - поправка на неізотермічність потоку в осьовому напрямі

$$\Delta_l = \frac{e^{mu(t_n-t_o)}}{Шу} \times \{Ei[-mu(t_n-t_o)] - Ei[-mu(t_k-t_o)]\}. \quad (22)$$

Формула для визначення втрат напору на тертя без врахування тепла тертя потоку має вигляд

$$h_o = \Delta_r \beta \frac{Q^{2-m} v_n^m}{D^{5-m}} L \frac{e^{mu(t_n-t_o)}}{Шу} \times \{Ei[-mu(t_n-t_o)] - Ei[-mu(t'_k-t_o)]\},$$

а поправка на неізотермічність потоку в осьовому напрямку в цьому випадку

$$\Delta'_l = \frac{e^{mu(t_n-t_o)}}{Шу} \times \{Ei[-mu(t_n-t_o)] - Ei[-mu(t'_k-t_o)]\}. \quad (24)$$

Ступінь збільшення кінцевої температури потоку нафти за рахунок тепла тертя потоку дорівнює

$$T = \frac{t_k}{t'_k}, \quad (25)$$

а ступінь зменшення втрат напору на тертя при врахуванні тепла тертя потоку

$$H = \frac{h}{h_o}. \quad (26)$$

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

Дослідження з виявлення впливу повного коефіцієнта теплопередачі на тепловий та гідравлічний режим трубопроводу для перекачування високов'язких та застигаючих нафт проведені для трубопроводу діаметром 630 x 9 мм при перекачуванні нафти, кінематична в'язкість якої $\nu_{30} = 0,83 \text{ Ст}$, $\nu_{60} = 0,33 \text{ Ст}$, густина нафти $\rho_{20} = 870 \text{ кг/м}^3$, масова питома теплоємність нафти $c = 2100 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$, продуктивність трубопроводу $37150 \text{ м}^3/\text{д}$. Температура ґрунту на глибині укладання трубопроводу прийнята $2 \text{ }^\circ\text{C}$, температура підігріву нафти на початку трубопроводу $62 \text{ }^\circ\text{C}$.

При розрахунках виявлено, що перекачування нафти відбувається при турбулентному режимі в зоні гідравлічно гладких труб, тому показники режиму руху прийняті: $m = 0,25$, $\beta = 0,0246 \text{ с}^2/\text{м}$. Поправку на неізотермічність потоку в радіальному напрямку вважаємо постійною і рівною $\Delta_r = 1,05$.

Дослідження виконані для нафтопроводів довжиною 50, 80 і 100 км. Зміни повного коефіцієнта теплопередачі проводились в діапазоні від 0,5 до 4,0 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ з кроком $0,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

Середня температура потоку, за якої обчислювалась в'язкість, що ввійшла у вираз для визначення коефіцієнта, що враховує тепло тертя потоку, розраховувалась за формулою

$$t_{cp} = t_o + \frac{t_n - t_k}{\ln \frac{t_n - t_o}{t_k - t_o}}, \quad (27)$$

Результати розрахунків впливу повного коефіцієнта теплопередачі без врахування тепла тертя потоку та із його врахуванням на тепловий і гідравлічний режим нафтопроводу наведені в таблиці 1.

Зміна ступеня збільшення кінцевої температури за врахування тепла тертя потоку при зміні повного коефіцієнта теплопередачі представлена на рисунку 1, зміна ступеня зменшення втрат напору на тертя за тих же умов зображена на рисунку 2. Дослідження показали, що суттєвіше впливає величина повного коефіцієнта теплопередачі на параметри роботи трубопроводів більшої протяжності.

Наукова новизна. У результаті досліджень виявлено вплив повного коефіцієнта теплопередачі від нагрітої нафти в оточуючий ґрунт на температурний режим і втрати напору на тертя при врахуванні тепла тертя потоку.

Практична цінність отриманих результатів. Запропонований алгоритм розрахунків може бути використаний проектними організаціями при розрахунку втрат напору на тертя при проектуванні трубопроводів для перекачування високов'язких і застигаючих нафт. При врахуванні тепла тертя потоку виявляються меншими втрати напору на тертя. Тому під час експлуатації можуть бути вибрані енергоефективні способи регулювання режиму роботи такого нафтопроводу.

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.

Таблиця 1 – Залежність температури та втрат напору на тертя від повного коефіцієнта теплопередачі

Повний коефіцієнт теплопередачі $K, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	Кінцева температура, °С		Втрати напору на тертя, м		Ступінь збільшення кінцевої температури T	Ступінь зниження втрат напору на тертя H
	без врахування тепла тертя потоку	із врахуванням впливу тепла тертя потоку	без врахування тепла тертя потоку	із врахуванням впливу тепла тертя потоку		
Довжина трубопроводу 50 км						
0,5	58,89	59,42	287,0	244,1	1,009	0,822
1,0	55,94	56,99	304,1	246,7	1,019	0,811
1,5	53,14	54,71	311,1	249,1	1,029	0,801
2,0	50,49	52,56	318,1	251,2	1,041	0,790
2,5	47,98	50,54	325,0	253,2	1,053	0,779
3,0	45,60	48,64	331,9	255,0	1,076	0,768
3,5	43,34	46,84	338,7	256,5	1,081	0,757
4,0	41,19	45,15	345,4	257,9	1,096	0,747
Довжина трубопроводу 80 км						
0,5	57,10	57,95	482,0	393,1	1,015	0,816
1,0	52,60	54,27	500,0	399,2	1,032	0,798
1,5	48,47	50,94	517,9	404,9	1,051	0,781
2,0	44,68	47,91	535,4	409,0	1,072	0,764
2,5	41,19	45,15	552,6	412,6	1,096	0,747
3,0	37,99	42,65	569,4	415,5	1,123	0,730
3,5	35,05	40,37	585,9	417,6	1,152	0,713
4,0	32,36	38,30	601,8	418,9	1,184	0,696
Довжина трубопроводу 100 км						
0,5	55,94	56,99	608,2	493,4	1,019	0,811
1,0	50,49	52,56	636,2	502,5	1,041	0,790
1,5	45,60	48,64	663,8	509,9	1,067	0,768
2,0	41,19	45,15	690,8	515,8	1,096	0,747
2,5	37,23	42,06	717,0	520,1	1,130	0,725
3,0	33,68	39,31	742,4	522,9	1,167	0,704
3,5	30,48	36,85	764,8	524,7	1,209	0,686
4,0	27,60	34,67	787,8	524,9	1,256	0,666

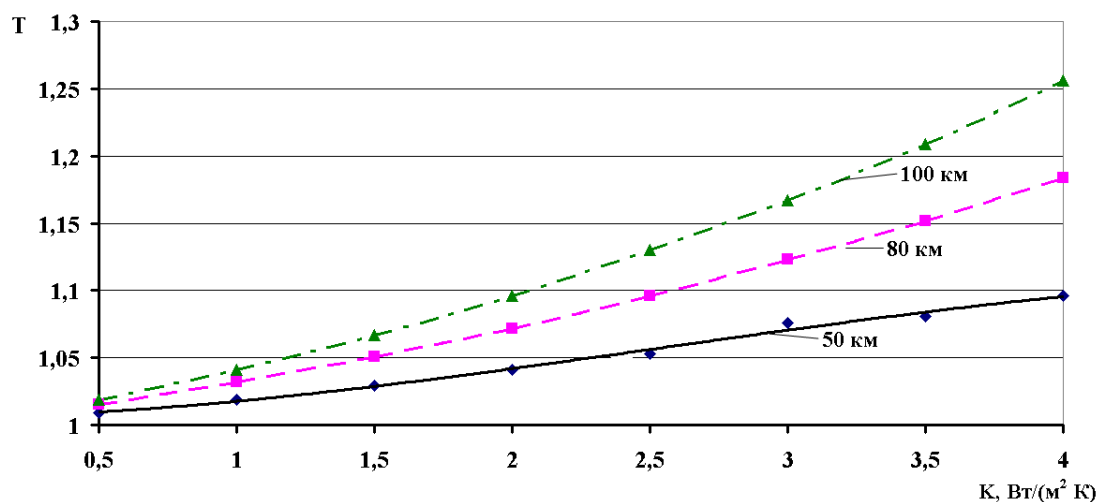


Рисунок 1 – Зміна ступеня збільшення кінцевої температури за врахування тепла тертя потоку при зміні повного коефіцієнта теплопередачі

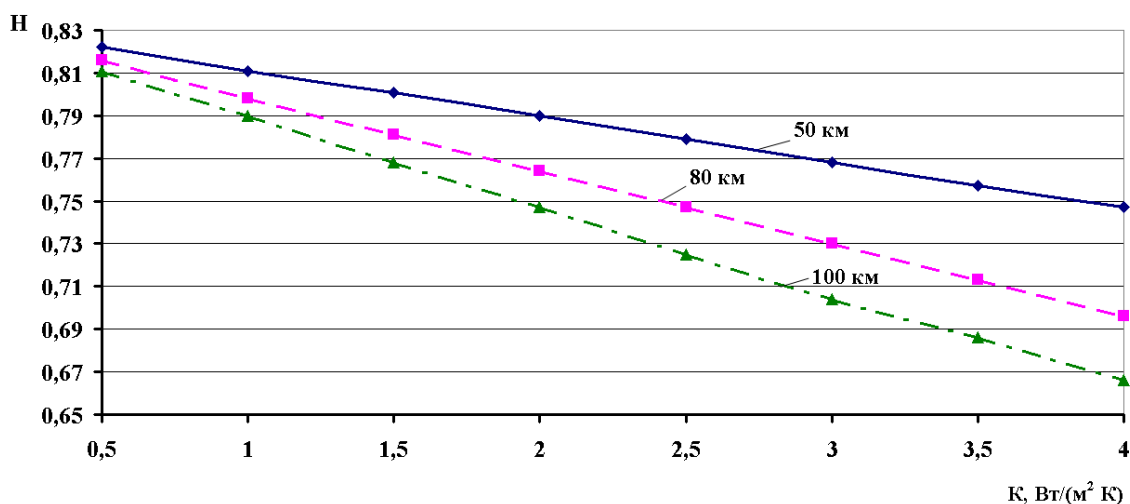


Рисунок 2 – Зміна ступеня зменшення втрат напора на тертя за врахування тепла тертя потоку при зміні повного коефіцієнта теплопередачі

2 Якимів Й. В. Типові технологічні розрахунки трубопровідного транспорту нафти і нафтопродуктів: [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.] / Й. В. Якимів. – Івано-Франківськ: Факел, 2006. – 366 с.

3 Болонний В. Т. Розрахунок повного коефіцієнта теплопередачі від нафти в навколишнє середовище для неізотермічного нафтопроводу / В. Т. Болонний // Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ. – 2004. – № 1(10). – С. 78-83.

4 Середюк М.Д. Дослідження особливостей гідравлічної характеристики неізотермічного нафтопроводу / М. Д. Середюк, В. Т. Болонний // Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ. – 2003. – № 1(6). – С. 96-100.

5 Saniere A. Pipeline Transportation of Heavy Oils, a Strategic, Economic and Technological Challenge / A. Saniere, I. Hénaut, J.F. Argillier // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 59 (2004), No. 5, pp. 455-466.

Стаття надійшла до редакційної колегії
30.05.16

Рекомендована до друку
професором **Грудзом В.Я.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук **Костівим В.В.**
(УМГ «Прикарпаттрансгаз»,
м. Івано-Франківськ)