

ВИКОРИСТАННЯ ПРОТИТУРБУЛЕНТНИХ ПРИСАДОК З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ НА ПЕРЕКАЧУВАННЯ НАФТИ

В.Я. Грудз, Р.С. Аль-Дандал

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 727138,
e-mail: srgg@mail.ru

Наведено результати досліджень та огляд літературних джерел з питання ефективності застосування протитурбулентних присадок (ПТП) з метою економії енерговитрат під час трубопровідного транспортування світлих нафтопродуктів. Подаються характеристики найбільш поширених ПТП імпортованого виробництва, а також поліакриламід (ПАА) та карбоксиметилцелюлози (КМЦ) - продуктів вітчизняного виробництва, які використовуються як протитурбулентні присадки. Запропоновано метод оцінки ефективності ПТП, що базується на зменшенні гідравлічних втрат і відключенні насосів на НПС. В умовах ринкової економіки розглядається метод побудови виробничої функції нафтопродуктопроводу і можливість оптимізації режимів перекачування за умови максимального прибутку транспортного підприємства. За графічними залежностями здійснено порівняння режимів роботи нафтопродуктопроводів за умов використання різних ПТП. Зазначається, що під час вибору типу ПТП з метою економії енерговитрат в кожному конкретному випадку слід враховувати вартість полімеру і його ефективність в зниженні гідравлічного опору нафтопродуктопроводу.

Ключові слова: проти турбулентна присадка, виробнича функція, оптимізація

Приводятся результаты исследований и обзор литературных источников по вопросу эффективности применения протитурбулентных присадок (ПТП) с целью экономии энергозатрат при трубопроводном транспорте светлых нефтепродуктов. Приведены характеристики наиболее распространенных ПТП импортного производства, а также полиакриламида (ПАА) и карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) - продуктов отечественного производства, которые используются в качестве протитурбулентных присадок. Предложен метод оценки и эффективности ПТП, основанный на уменьшении гидравлических потерь и отключении насосов на НПС. В условиях рыночной экономики рассматривается метод построения производственной функции нефтепродуктопровода и возможность оптимизации режимов перекачки при максимальной прибыли транспортного предприятия. Построенные графические зависимости позволяют дать сравнительную характеристику режимов работы нефтепродуктопроводов при условии использования различных ПТП. Отмечается, что при выборе типа ПТП с целью экономии энергозатрат в каждом конкретном случае следует учитывать стоимость полимера и его эффективность в снижении гидравлического сопротивления нефтепродуктопровода.

Ключевые слова: противотурбулентная присадка, производственная функция, оптимизация

The article presents the study results and literary sources review on the efficiency of usage of the turbulent viscosity reducing additives (TVRA) to decrease energy consumption when transporting light-oil products with the help of pipelines. The characteristics of the most widespread TVRA that are imported, as well as of the polyacrylamide (PAA) and carboxymethyl cellulose (CMC) that are produced domestically and used as turbulent viscosity reducing additives, are also provided. The method to evaluate the TVRA efficiency that is based on the decrease of the hydraulic losses and disconnection of pumps at OPS was suggested. The method for production function development of the oil product pipeline and optimization of the pumping modes under the conditions of maximum transport company profit is studied under the conditions of market-based economy. The developed graph dependencies allow to provide a comparative characteristics of the oil product pipeline operation modes when different TVRA are used. It is also stated that we should take into account polymer price and its efficiency in the decrease of the oil product pipeline hydraulic resistance in order to reduce energy consumption when choosing different TVRA.

Key words: turbulent viscosity reducing additive, production function, optimization

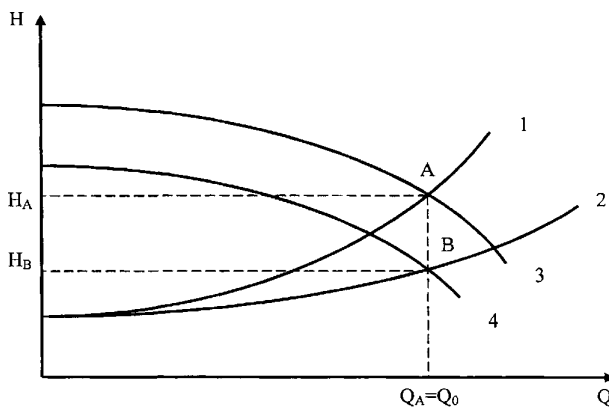
Вступ. Під час експлуатації магістральних нафтопроводів важливе значення має раціональне використання електроенергії, вартість якої складає основну статтю витрат на трубопровідне транспортування нафти. Практичне вирішення цього питання пов'язано з розробленням науково обґрунтованих норм витрат електроенергії на перекачування нафти для кожного нафтопроводу чи окремої експлуатаційної ділянки. Однак, не слід виключати з розгляду спеціальні методи перекачування нафти і нафтопродуктів, спрямовані на зменшення енерговитрат на транспортування, до яких слід віднести використання протитурбулентних присадок.

Стан проблеми. Встановлено [1, 2], що після уведення в потік продукту протитурбулентної присадки (ПТП) в потік зменшуються гідравлічний опір і питомі витрати потужності на його перекачування. Тут також вказано, що з пришвидшенням потоку рідини в трубопроводі ефективність дії ПТП підвищується. На сьогодні як протитурбулентні присадки найчастіше використовують ПТП марок CDR-102 і Liquid Power фірми «Коноко» (США), Flo-XL фірми «Бейкер трубопроводів Продукція», Necedd-547 фірми «Fortum Oil and-Gas Oy» (Фінляндія) і ВІОЛ (Росія). В [4] запропоновано використовувати як ПТП вітчизняні технічні добавки поліакриламід (ПАА) та карбоксиметилцелюлозу

(КМЦ). Очевидно, що ефективність використання протитурбулентних присадок з метою зниження енерговитрат на перекачування нафтопродуктів безпосередньо пов'язана з їх вартістю.

Ефективність зменшення енергоспоживання за рахунок застосування протитурбулентних присадок вирішується, як правило, при збереженні колишньої продуктивності перекачування [5].

Враховуючи жорстку умову, згідно з якою робоча точка системи обов'язково повинна лежати на перетині сумарної характеристики всіх працюючих насосів і нафтопроводу, нескладно дійти висновку, що зменшення енерговитрат на перекачування може бути досягнуто тільки завдяки вимкненню частини працюючих насосів за умови, що характеристика трубопроводу буде перетинатися з сумарною характеристикою насосів, що залишилися в роботі, на перпендикулярі, встановленому з продуктивності Q_0 (рисунок 1).



1,2 - характеристика трубопроводу відповідно до і після введення ПТП в нафту;

3, 4 - сумарна характеристика працюючих насосів при їх кількості відповідно N_0 та N_1 .

Рисунок 1 – Визначення концентрації ПТП для зменшення енерговитрат на перекачування

Мета дослідження. Оцінка ефективності застосування протитурбулентних присадок для зменшення енерговитрат на транспортування нафтопродуктів в умовах ривкових відносин.

Виклад основного матеріалу. Якщо вважати, що в початковому варіанті перекачування велось N_0 насосами, а після застосування ПТП їх кількість вдалося зменшити до N_1 , то очевидно, що енергоспоживання скоротиться в χ разів, рівне співвідношенню напірних характеристик

$$\chi = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} (a_i - b_i Q_0^2)}{\sum_{i=1}^{N_1} (a_i - b_i Q_0^2)} \quad (1)$$

де a_i, b_i – коефіцієнти напірної характеристики i -го насоса.

Розглянемо алгоритм визначення концентрації ПТП, що забезпечує збереження колишньої продуктивності перекачування при меншій кількості працюючих насосів.

Складемо рівняння балансу напорів для розглянутих випадків.

До введення ПТП в потік нафтопродукту рівняння балансу мало вигляд

$$N_e h_n + \sum_{i=1}^{N_0} (a_i - b_i Q_0^2) = i_0 Q_0^2 L + \Delta Z + N_e h_z, \quad (2)$$

де N_e – кількість експлуатаційних ділянок;

h_n, h_z – напори підпірних насосів та залишковий відповідно;

i_0 – гідравлічний нахил при одиничній витраті для випадку перекачування без застосування ПТП;

ΔZ – різниця геодезичних позначок кінця і початку траси.

Тоді продуктивність перекачування становить

$$Q_0 = \sqrt{\frac{N_e (h_n - h_z) + \sum_{i=1}^{N_0} a_i - \Delta Z}{i_0 L + \sum_{i=1}^{N_0} b_i}} \quad (3)$$

Після відключення частини працюючих насосів і введення ПТП у потік нафти на ділянці довжиною l_{pp} рівняння балансу напорів набуде вигляду

$$N_e h_n + \sum_{i=1}^{N_1} (a_i - b_i Q_0^2) =$$

$$= Q_0^2 [(i_0 L - l_{pp}) + i_\phi l] + \Delta Z + N_e h_z,$$

де i_ϕ – одиничний гідравлічний нахил за умови введення ПТП у потік.

Тепер вираз для визначення продуктивності нафтопроводу має вигляд

$$Q_0 = \sqrt{\frac{N_e (h_n - h_z) + \sum_{i=1}^{N_1} a_i - \Delta Z}{(i_0 L - l_{pp}) + i_\phi l + \sum_{i=1}^{N_1} b_i}} \quad (5)$$

Оскільки ліві частини отриманих виразів рівні, то рівні і праві його частини, тобто

$$\sqrt{\frac{N_e (h_n - h_z) + \sum_{i=1}^{N_0} a_i - \Delta Z}{i_0 L + \sum_{i=1}^{N_0} b_i}} = \sqrt{\frac{N_e (h_n - h_z) + \sum_{i=1}^{N_1} a_i - \Delta Z}{(i_0 L - l_{pp}) + i_\phi l_{pp} + \sum_{i=1}^{N_1} b_i}} \quad (6)$$

Звівши обидві половини (6) в квадрат і розв'язуючи отриману рівність відносно $i_\varphi / i_0 = \lambda_0 / \lambda_p$, отримаємо

$$\lambda_0 / \lambda_p = 1 - \frac{1}{l_{pp} / L} [1 + \beta_1 - \alpha(1 + \beta_0)], \quad (7)$$

де β_j – співвідношення крутизни сумарної характеристики основних насосів, що залишилися в роботі, і крутизни характеристики трубопроводу для випадку перекачування нафти без ПТП;

$$\beta_0 = \sum_1^{N_0} b_i / i_0 L; \beta_1 = \sum_1^{N_1} b_i / i_0 L,$$

α – параметр, рівний

$$\alpha = \frac{N_e(h_n - h_z) + \sum_1^{N_1} a_i - \Delta Z}{N_e(h_n - h_z) + \sum_1^{N_0} a_i - \Delta Z}.$$

Для оцінки необхідного зменшення величини λ_n з метою скорочення енерговитрат в φ раз введемо параметр ефективності ПТП

$$\varphi = \frac{\lambda_0 - \lambda_p}{\lambda_0} = \frac{1}{l_{pp} / L} [1 + \beta_1 - \alpha(1 + \beta_0)]. \quad (8)$$

З урахуванням припущення, що насоси на НПС є однотипними, отримаємо:

$$\beta_1 = \sum_1^{N_1} b_i / i_0 L = \sum_1^{N_1} b_i / i_0 L Q_0^2 \approx \beta_0 \frac{N_1}{N_0},$$

$$\alpha = \frac{N_e(h_n - h_z) + N_1 a - \Delta Z}{N_e(h_n - h_z) + N_0 a - \Delta Z} \approx \frac{N_1}{N_0}. \quad (9)$$

Економія споживаної на перекачування електроенергії складе

$$E = 1 - \frac{N_1}{N_0}. \quad (10)$$

Вираз для ефективності застосування ПТП набуде вигляду

$$\varphi = N \left(1 - \frac{N_1}{N_0}\right), \quad (11)$$

де N – число НПС.

За результатами розрахунків за формулами (8 – 11) встановлено наступне:

1) завдяки введенню протитурбулентної присадки в потік нафтопродукту можна відключити від одного до двох основних насосів;

2) кількість електроенергії, яку можна зекономити в результаті введення ПТП на одному з перегонів трубопроводу (за інших рівних умов) зростає в міру збільшення кількості відключених і зменшення сумарної кількості працюючих насосів.

3) незалежно від кількості працюючих НПС, завдяки введенню ПТП у потік, можна відключити не більше одного основного насоса на кожній;

4) для збільшення ефекту економії енерговитрат на перекачування нафтопродукту протитурбулентну присадку необхідно увести одночасно на всіх перегонах між НПС.

В умовах ринкових відносин єдиним критерієм ефективності застосування ПТП з метою економії енерговитрат на транспортування нафтопродукту слід вважати чистий прибуток нафтотранспортного підприємства, який визначається як різниця надходжень від реалізації нафтопродукту в кінцевій точці трубопроводу і сумарних витрат на транспортування.

Надходження визначаються за приписами ринкової економіки, або ситуаційно, і це диктує концептуально нову схему розв'язування проблеми нормування витрат енергетичних ресурсів на трубопровідний транспорт. Провідна ідея ринкової концепції витрат зводиться до побудови якісно нової інтегрованої системи критеріальних показників ефективності витрат технологічного і економічного походження, в якій домінують економічні фактори.

Для фіксованої довжини нафтопроводу при фіксованих шляхових відборах і надходженнях продукту вимірником продукції може слугувати обсяг транспортованого нафтопродукту за довільно визначений період, тобто продуктивність нафтопроводу. Продуктивність нафтопроводу є інтегральним показником. Отже, при з'ясуванні причин відхилення експлуатаційних режимів нафтопроводів від проектних чи планових, або технічно можливих необхідно використовувати поняття пропускну здатності, яке визначає максимальний обсяг транспортованого нафтопродукту при максимальному використанні потужностей нафтоперекачувальних станцій і фактичних розрахункових параметрах транспортування.

Залежність гідравлічних втрат напору від продуктивності виражає характеристика лінійної ділянки, яку доцільно подати у вигляді:

$$h = \lambda_0 \frac{L}{d} \frac{w^2}{2g} + \Delta Z = \frac{8\lambda_0 L Q^2}{\pi^2 g d^5} + \Delta Z = c Q^2 + \Delta Z. \quad (12)$$

При відомій і сталій густині нафтопродукту ρ втрати тиску можна знайти з рівняння характеристики

$$\Delta P = \frac{8\lambda_0 L \rho Q^2}{\pi^2 d^5} + \Delta Z \rho g = c^* Q^2 + \Delta Z \rho g. \quad (13)$$

Очевидно, що втрати напору (тиску) на лінійній ділянці нафтопроводу повинні бути компенсованими за рахунок енергетичних витрат на НПС. Величина енерговитрат на лінійній ділянці визначається товаротранспортною роботою. Для лінійної ділянки нафтопроводу еквівалентна товаротранспортна робота розраховується за формулою

$$A = (c^* \Delta P + \Delta Z \rho g). \quad (14)$$

При застосуванні ПТП для зменшення гідравлічних втрат напору (тиску) в нафтопроводі в рівнянні характеристики (13) і товаротранспортної роботи (14) зміниться числове значення коефіцієнта c^* , оскільки коефіцієнт гідравліч-

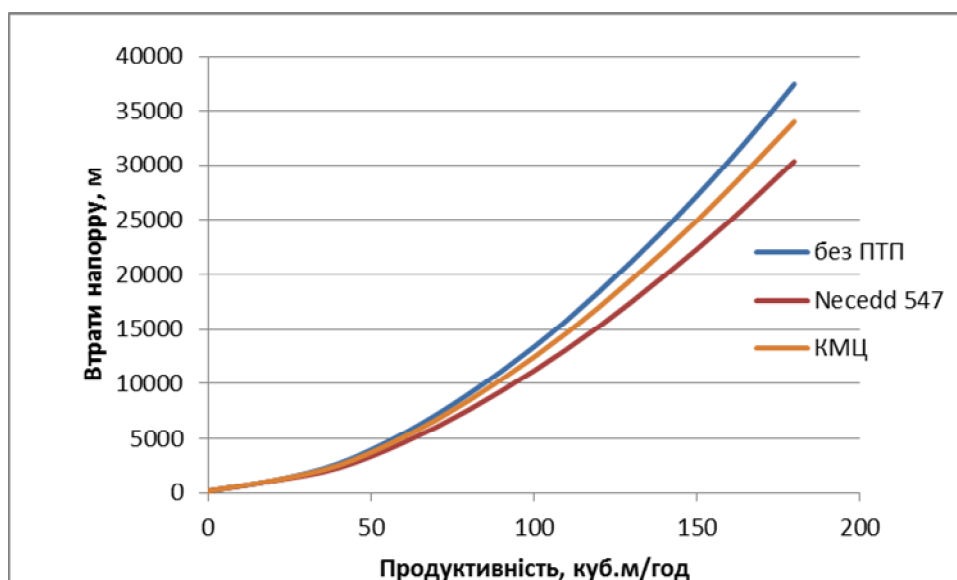


Рисунок 2 – Характеристики ділянки ЛПДС 5С-1К системи нафтопродуктопроводів «ПрикарпатЗахідТранс»

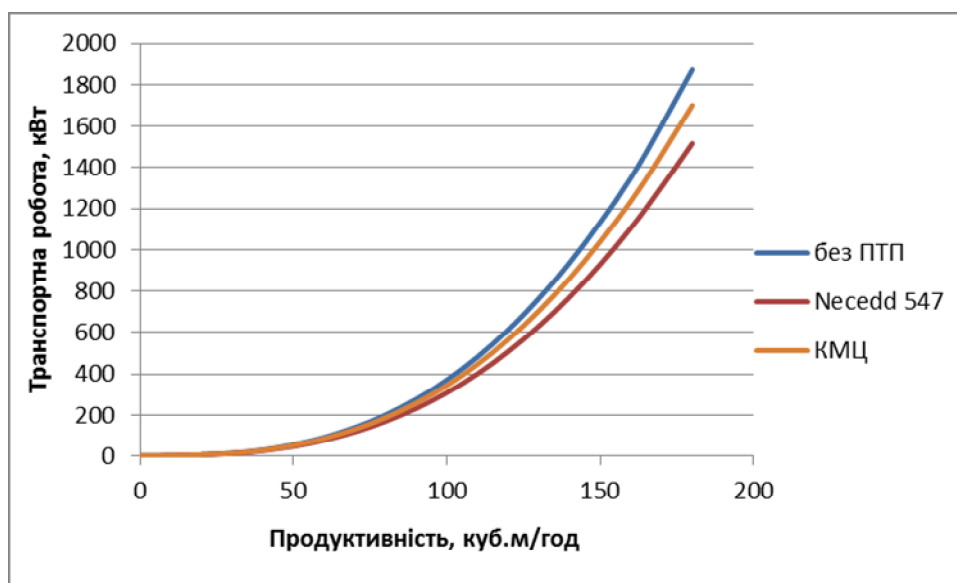


Рисунок 3 – Виробничі функції ділянки ЛПДС 5С-1К системи нафтопродуктопроводів «ПрикарпатЗахідТранс»

ного опору нафтопроводу λ_0 слід замінити на λ_n

$$\lambda_n = \lambda_0(1 - \varphi). \quad (15)$$

В (15) значення ефективності ПТП φ слід вибирати для оптимальної концентрації конкретної протитурбулентної присадки з конкретним нафтопродуктом, оскільки в інших випадках втрачається резон застосування ПТП.

Таким чином, залежності (13) і (14) дають змогу побудувати характеристику нафтопроводу і виробничу функцію лінійної ділянки (залежність товаротransпортної роботи від продуктивності) для перекачування чистого нафтопродукту і його суміші з ПТП. Такі залежності подано на рисунках 2 і 3 для ділянки ЛПДС 5С-1К системи нафтопродуктопроводів «Прикарпат-ЗахідТранс». З множини існуючих ПТП вибра-

но Necedd 547, як найбільш ефективну в суміші з дизельним паливом [4], та КМЦ, ефективність якої в суміші з дизельним паливом найнижча.

Аналіз одержаних результатів дає підстави стверджувати наступне: залежність гідравлічних втрат в лінійних ділянках енергії тиску газу ΔP від обсягів транспортованого продукту Q є нелінійною. Специфічність нелінійної характеристики $\Delta P = f(Q)$ проявляється в тому, що вона є увігнутою. Саме ця її особливість дає можливість віднайти (шляхом порівняння результатів розрахунків надходжень за кількістю транспортованого продукту Q та енергетичних витрат $\Delta P = f(Q)$) оптимальний за показником енергоефективності режим роботи лінійної ділянки нафтопроводу з врахуванням застосування ПТП. Для оптимального режиму роботи лінійної ділянки надходження будуть більші,

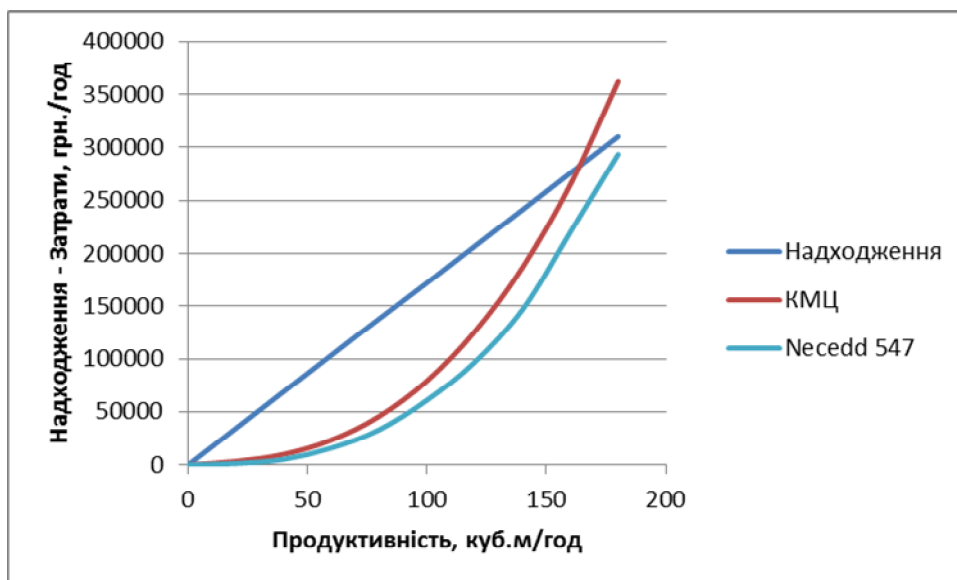


Рисунок 4 – Залежність надходжень і затрат на транспортування дизельного палива у випадку застосування ПТП.

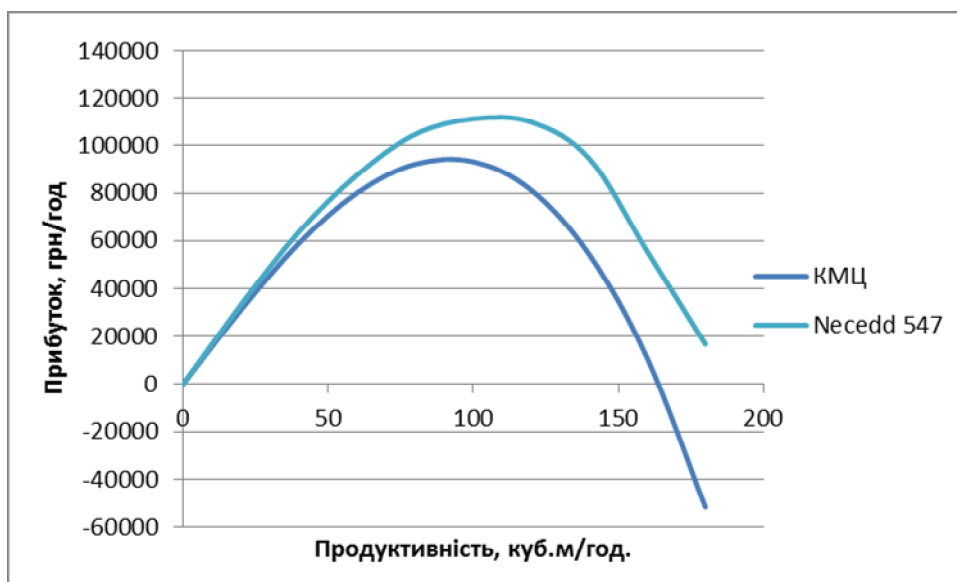


Рисунок 5 – Ефективність застосування різних типів ПТП на ділянці ЛПДС 5С-1К системи нафтопродуктопроводів «ПрикарпатЗахідТранс»

ніж витрати енергоресурсів з урахуванням витрат на ПТП, які також залежать від продуктивності.

Якщо відома ринкова вартість (ціна) C_n нафтопродукту в кінцевій точці нафтопроводу, то надходження від його реалізації пов'язані з обсягом перекачування лінійною залежністю

$$N = C_n Q. \quad (16)$$

Загальні витрати на транспортування нафтопродукту з урахуванням витрат на придбання протитурбулентної присадки становлять

$$W = AC_e QkC_{gng} + S_0, \quad (17)$$

де A – товаротранспортна робота;
 C_e, C_{gng} – вартість електроенергії і ПТП;
 k – концентрація ПТП в $\text{кг}/\text{м}^3$;
 S_0 – інші витрати, що не залежать від продуктивності нафтопроводу.

За залежностями (16) і (17) побудовано графіки ефективності застосування ПТП (рисунки 4 і 5).

Очевидно, що при фіксованому значенні витрати Q різниця надходжень N і затрат на транспортування нафтопродукту W складає розмір чистого прибутку транспортного підприємства π , тобто

$$\pi = N - W. \quad (18)$$

З рисунку 4 видно, що залежність $\pi(Q)$ має нульове значення на початку координат і стає від'ємною в області великих значень продуктивності. Отже, для кожної кривої, яка відповідає різним типам ПТП, існує максимум, який відповідає оптимальній продуктивності нафтопроводу за критерієм максимального чистого прибутку транспортного підприємства.

На рисунку 5 приведено криві, побудовані на основі залежності (18) для максимально і мінімально ефективних проти турбулентних присадок [4].

Висновки. Аналіз результатів проведених досліджень показує, що оптимальне значення продуктивності нафтопроводу при транспортуванні нафтопродукту (наприклад, дизельного палива) залежить від ефективності конкретної ПТП в суміші з даним нафтопродуктом і її вартості. Так, при застосуванні протитурбулентної присадки Necedd 547 в суміші з дизельним паливом оптимальна продуктивність складає 111,7 м³/год. При застосуванні в якості протитурбулентної присадки КМЦ оптимальна продуктивність зменшується до 98,9 м³/год, (тобто на 11,4%), При цьому прибуток підприємства зменшується на 16,3%. Зауважимо, що при продуктивності нафтопроводу понад 155 м³/год застосування в якості протитурбулентної присадки КМЦ не дає економічного ефекту, оскільки витрати на транспортування перевищують надходження від реалізації нафтопродукту. Тому експлуатація нафтопроводу в таких умовах є збитковою.

Загалом, зменшення гідравлічної ефективності від застосування конкретного типу протитурбулентної присадки в суміші з даним нафтопродуктом призводить до відхилення оптимального значення продуктивності нафтопроводу в бік зменшення і зниження прибутку нафтогазотранспортного підприємства те ж стосується зростання ціни ПТП.

Література

1 Коршак А.А. Условия эффективного применения противотурбулентной присадки при решении задачи увеличения производительности нефтепровода / А.А. Коршак, М.Н.А. Хуссейн // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2008. – № 1. – С. 41-45.

2 Ерошкина И.И. Влияние малых полимерных добавок на частоту пристенных турбулентных выбросов при течении жидкостей в трубопроводе / И.И. Ерошкина, В.И. Марон, А.Д. Прохоров // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2000. – Вып. 4. – С. 29-30.

3 Порайко И.Н. Снижение давления в промышленном нефтепроводе с помощью полиакриламида / И.Н. Порайко, А.И. Арутюнов // Нефтепромышленное дело. – 1978. – № 6. – С. 46-48.

4 Коновалов К.Б. Разработка технологии и оценка эффективности производства антитурбулентной присадки суспензионного типа / К.Б. Коновалов, Г.В. Несын, Н.М. Полякова, В.С. Станкевич // Вестник науки Сибири. – 2011. – № 1(1). – С.132-139.

5 Кацюевич Е.В. Противотурбулентные полимерные добавки в трубопроводном транспорте нефтепродуктов / Б.В. Кацюевич, Ю.П. Белоусов, Н.М. Гостев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1988. – № 6. – С. 9-12.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
09.11.15*

*Рекомендована до друку
професором **Тарком Я.Б.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук **Банахевичем Ю.В.**
(Департамент транспортування газу
ПАТ «Укртрансгаз», м. Київ)*