

# ТРАНСПОРТ ТА ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ І ГАЗУ

УДК 622.691.4

## РЕЖИМ РОБОТИ НПС НАФТОПРОДУКТОПРОВОДУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПРОТИТУРБУЛЕНТНИХ ПРИСАДОК

*В.Я. Грудз, Р.С. Аль-Дандал*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342)*

*e-mail: m-oksa-na-t@ukr.net*

*Розглядається задача нестационарного течения нефтепродукта трубопроводом в процесі заміщення його з використанням протитурбулентних присадок з урахуванням режиму роботи нафтоперекачувальної станції на початку лінійної ділянки. Створено математичну модель процесу руху трубопроводом контакту двох рідинних середовищ з різними гідравлічними характеристиками. Реалізація даної моделі дає змогу прогнозувати характер руху рухомої границі та розподіл тисків і витрати нефтепродукту впродовж нестационарного процесу заміщення. Встановлено, що використання методу зміни стаціонарних станів призводить до несуттєвої похибки, яка задовольняє точності інженерних розрахунків прогнозування режимів роботи. Показано вплив ефективності протитурбулентних присадок на параметри роботи нафтопродуктопроводу.*

Ключові слова: протитурбулентна присадка, процес заміщення, режим роботи НПС.

*Рассматривается задача нестационарного течения нефтепродуктов по трубопроводу в процессе замещения его с использованием протитурбулентных присадок с учетом режима работы нефтеперекачивающей станции в начале линейного участка. Создана математическая модель процесса движения по трубопроводу контакта двух жидкостных сред с различными гидравлическими характеристиками. Реализация данной модели позволяет прогнозировать характер движения подвижной границы и распределение давлений и расхода нефтепродукта при нестационарном процессе замещения. Установлено, что использование метода смены стационарных состояний приводит к незначительной погрешности, удовлетворяющей точность инженерных расчетов прогнозирования режимов работы. Показано влияние эффективности протитурбулентных присадок на параметры работы нефтепродуктопровода.*

Ключевые слова: протитурбулентная присадка, процесс замещения, режим работы НПС.

*The problem of unsteady flow of oil products through the pipeline during its replacement with anti-turbulent additives based on the oil pumping station mode of operation at the beginning of the line section was studied. A mathematical model of the motion process of two liquid media with different hydraulic characteristics through the pipeline was developed; its implementation allows to predict the nature of the motion of the moving boundaries and the distribution of oil pressure and flow rate for a non-stationary process of displacement. It was found that the use of the change of stationary states in the implementation of tasks leads to the error satisfying the accuracy of prediction modes of engineering calculations. The effect of additives on the efficiency impact of anti-turbulent additives on oil-products pipeline operation parameters was determined.*

Keywords: anti-turbulent additive, displacement process, oil pumping station operation

Застосування високомолекулярних сполук для зниження гідравлічного опору нафтопродуктопроводу є ефективним стосовно економії енергоресурсів на трубопровідний транспорт. Практичне застосування ефекту Б.А.Томса [1], який вперше повідомив про можливість застосування високомолекулярних полімерів для зниження гідравлічного опору течії рідин в трубопроводах, поклало початок дослідженням

впливу полімерних добавок на водні розчини, серед яких слід відзначити праці вчених Hoyt JW, Fabula AG, Parker CF, Norbury JF, а також Чекалова І.А., Іоселевіча В.А., Ступина А.Б., Манжея В.М., Несина Г.В., Білоусова В.Д.

В роботі [2] запропоновано напівемпіричну теорію пристінних турбулентних течій рідини, що містить полімерні молекули. В [3] показано, що зниження опору в турбулентному ре-

жимі течії не залежить від товщини адсорбційного шару, як це передбачалося в [14]. Для малих концентрацій полімеру можна зробити припущення, що зниження турбулентного тертя відбувається «на рівні» окремих молекул полімеру.

Останнім часом запропоновано модель з флуктуаційним шаром, сутність якої полягає в тому, що при плинні рідини з присадкою в'язкопружні "краплі" полімеру, що мають розміри на 3-4 порядки більші за розміри молекули розчинника, зміщуються у напрямку стінки трубопроводу. Тут утворюється специфічний шар гідродинамічно активного полімеру, який, на відміну від адсорбційного шару, є складовою частиною рухомого об'єму рідини.

Роблячи припущення, що швидкість переходу макромолекул з об'єму в підфлуктуаційний шар (за постійних тиску і температури) пропорційна концентрації полімеру  $c$  в розчині і частці, не зайнятою полімером поверхні у підфлуктуаційному шарі, в [5] запропонована формула для розрахунку ефекту зниження гідравлічного опору:

$$\varphi = \frac{\lambda_0 - \lambda_f}{\lambda_0}, \quad (1)$$

де  $\lambda_0, \lambda_f$  – коефіцієнти гідравлічного опору під час руху чистого нафтопродукту і розчину протитурбулентної присадки (ПТП) відповідно.

Отже, застосування протитурбулентних присадок дає змогу знизити величину гідравлічних втрат енергії на транспортування продукту, тобто призвести до економії енерговитрат на транспортування малов'язких нафтопродуктів. Однак введення ПТП у потік призведе до розділення лінійної ділянки трубопроводу на дві частини: одна характеризуватиметься рухом чистого нафтопродукту, а інша – нафтопродукту з ПТП. Гідравлічні втрати в кожній з частин будуть різними. Оскільки довжина кожної з частин постійно змінюватиметься, характер процесу транспортування системи буде нестационарним до тих пір, поки суміш нафтопродукту з ПТП не заповнить увесь трубопровід. Отже, з технологічної точки зору, важливо прогнозувати режим роботи нафтоперекачувальних станцій (НПС) в процесі переміщення рухомої границі.

В [6] вирішувалась задача про нестационарний процес в нафтопродуктопроводі для умов перекачування нафтопродукту з ПТП при підтриманні сталого тиску на початку трубопроводу, яка реально може відображати транспортування рідини внутрішньопромисловими трубопроводами. Така постановка задачі не відповідає умовам транспортування нафтопродукту магістральним нафтопроводом. Метою даного дослідження є постановка і реалізація задачі режиму роботи нафтопроводу при використанні ПТП.

Для магістрального нафтопродуктопроводу тиск на початку лінійної ділянки пов'язаний з продуктивністю рівнянням характеристики

НПС, яке в загальному вигляді записується двочленною моделлю

$$H = a - bQ^2, \quad (2)$$

де  $H$  - напір НПС при продуктивності  $Q$ ;  $a, b$  - апроксимаційні коефіцієнти.

При реалізації задачі про характер нестационарного процесу, викликаного додаванням в продукт ПТП, вважалось, що зона переміщення продукту з домішкою значно менша від довжини трубопроводу, внаслідок чого її розміром можна знехтувати, вважаючи зону контакту одним перетином, що рухається трубопроводом.

Слід відзначити, що нестационарний характер руху рідини в нафтопродуктопроводі вимагає для опису складних математичних моделей. Тому з метою їх спрощення прийнято рішення розглядати гідродинамічні процеси в рівнинному трубопроводі без врахування інерційних втрат енергії. Ізотермічний характер руху чистого нафтопродукту і його суміші з ПТП описується математичною моделлю, що містить рівняння руху і рівняння нерозривності

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P_j}{\partial x} &= \frac{\lambda_j \rho W^2}{2d}, \\ -\frac{\partial P_j}{\partial t} &= c^2 \frac{\partial(\rho W)}{\partial x}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $P_j(x, t)$  - тиск як функція лінійної координати  $x$  і часу  $t$ ;

$\lambda_j$  - коефіцієнт гідравлічного опору нафтопроводу;

$\rho$  - густина газу;

$W$  - усереднена по перерізу швидкість нафти;

$c$  - швидкість звуку в потоці;

$j$  - індекс, що характеризує положення рухомої границі (значення  $j = 1$  відноситься до простору за рухомою границею,  $j = 2$  - до області простору, що рухається перед рухомою границею).

Вважаючи густину рідини сталою, тобто незалежною від мізерної кількості домішки ПТП і тиску та температури перекачуваного продукту, систему (3) можна подати у вигляді

$$\begin{aligned} -\frac{\partial H_j}{\partial x} &= \frac{\lambda_j W^2}{2d}, \\ -\frac{\partial H_j}{\partial t} &= c^2 \frac{\partial W}{\partial x}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $H_j(x, t)$  - напір як функція лінійної координати  $x$  і часу  $t$ ;

Виключаючи з системи (4) швидкість середовища як функцію лінійної координати і часу, приведемо її до рівняння

$$-\frac{\partial H_j}{\partial t} = \aleph \frac{\partial^2 H_j}{\partial x^2}, \quad (5)$$

де  $\aleph = c^2 / 2a$

$2a = \lambda W / 2d$  - коефіцієнт лінеаризації системи.

Сформульована задача реалізується за таких умов

1. До введення ПТП у потік нафтопродукту рух середовища трубопроводом мав стаціонарний характер з початковим напором  $h_0$  і гідравлічним нахилом  $i$ .

2. Після введення ПТП у потік нафтопродукту і до завершення процесу заміщення напір на початку нафтопродуктопроводу  $H(0,t)$  зв'язаний з витратою  $Q$  рівнянням характеристики НПС.

3. На рухомій границі досягається рівність лінійних швидкостей і напорів до і після контакту.

4. Необхідно визначити характер руху контакту  $l(t)$  в часі, а також режим роботи НПС.

Для реалізації сформульованої задачі початкові умови для рівнянь (5) запишуться у вигляді

$$H_1(x,0) = h_0 - ix; H_2(x,0) = h_0. \quad (6)$$

Вважатимемо, що в зоні контакту напори та лінійні швидкості по обидві сторони рухомої границі рівні

$$H_1(l,t) = H_2(l,t); W_1(l,t) = W_2(l,t) = \frac{dl}{dt}. \quad (7)$$

Використовуючи перше рівняння системи (4), запишемо умови і на рухомій границі у вигляді

$$\frac{\partial H_1(l,t)}{\partial x} = \frac{\partial H_2(l,t)}{\partial x}. \quad (8)$$

Гранична умова на початку лінійної ділянки нафтопродуктопроводу побудована на основі рівняння характеристики НПС у формі (2) з використанням першого рівняння системи (4) і має вигляд

$$H_2(0,t) = a + b \frac{\pi^2 g d^5}{8\lambda} \frac{\partial H_2(0,t)}{\partial x}. \quad (9)$$

Розв'язком математичної моделі (5) методом Фур'є за початкових (6) і граничних умов (7)-(9) є вирази

$$H_1(x,t) = \frac{8\lambda(L-l)a}{\pi^2 g d^5} \left(1 - \frac{x}{L-l}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{2\left(h_0 + \frac{8\lambda(L-l)a}{\pi^2 g d^5} \frac{a}{b}\right) \sin \omega_n(L-l) + \frac{i + \frac{8\lambda}{\pi^2 g d^5}}{\omega_n}}{\omega_n(L-l)} \times \left[ (L-l) \sin \omega_n(L-l) - \frac{1}{\omega_n} (\cos \omega_n(L-l) - 1) \right] \cos \omega_n x + \frac{2\left(h_0 + \frac{8\lambda(L-l)a}{\pi^2 g d^5} \frac{a}{b}\right) (\cos \omega_n(L-l) - 1) + \frac{i + \frac{8\lambda}{\pi^2 g d^5}}{\omega_n}}{\omega_n(L-l)} \times \left[ (L-l) \cos \omega_n(L-l) - \frac{1}{\omega_n} \sin \omega_n(L-l) \right] \sin \omega_n x \right\} \times \exp(-\omega_n^2 \kappa t); \quad (10)$$

$$H_2(x,t) = \frac{8\lambda l}{\pi^2 g d^5} \frac{a}{b} \left(1 - \frac{x}{l}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{2\left(h_0 + \frac{8\lambda l}{\pi^2 g d^5} \frac{a}{b}\right) \sin \omega_n l + \frac{i + \frac{8\lambda}{\pi^2 g d^5}}{\omega_n}}{\omega_n l} \times \left[ l \sin \omega_n l - \frac{1}{\omega_n} (\cos \omega_n l - 1) \right] \cos \omega_n x + \frac{2\left(h_0 + \frac{8\lambda l}{\pi^2 g d^5} \frac{a}{b}\right) (\cos \omega_n l - 1) + \frac{i + \frac{8\lambda}{\pi^2 g d^5}}{\omega_n}}{\omega_n l} \times \left[ l \cos \omega_n l - \frac{1}{\omega_n} \sin \omega_n l \right] \sin \omega_n x \right\} \exp(-\omega_n^2 \kappa t).$$

В одержаних аналітичних виразах величина  $\omega_n$  є розв'язками трансцендентного рівняння

$$\omega_n = \frac{1}{2l-L} \left( \text{arctg} \frac{8\lambda}{\pi^2 g d^5} \frac{a}{b} \omega_n + \pi n \right). \quad (11)$$

Числовий аналіз залежностей (10) свідчить, що відкинувши усі члени ряду вище четвертого отримаємо похибку обчислень, що не перевищить 1%. Тому ітераційний процес знаходження коренів рівняння (11) слід завершувати після числового значення, яке відповідає  $n=4$ .

Однак, одержані аналітичні розв'язки не можуть бути безпосередньо використані для проведення обчислень режиму роботи НПС за умови додавання ПТП, а служать лише структурною моделлю алгоритму в зв'язку з тим, що рівняння (10) і (11) містять невідомий закон руху контактної границі  $l(t)$ . Це змушує використати ітераційну процедуру для реалізації математичної моделі.

У початковий момент часу при роботі газопроводу в стаціонарному режимі з напором НПС  $H_0$  і продуктивністю  $Q_0$  лінійна швидкість на початку нафтопроводу становить

$$W_0 = \frac{Q_0}{F} \quad (12)$$

де  $F$  - площа поперечного перерізу трубопроводу.

Для умов  $t=0$  можна розрахувати значення числа Рейнольдса і величину коефіцієнта гідравлічного опору.

Вважаємо, що швидкість руху контакту в початковий момент руху рівна лінійній швидкості нафтопродукту  $W_0$ . Тоді шлях, пройдений рухомою границею за проміжок часу  $\Delta t$ , становитиме

$$l(0) = W_0 \cdot \Delta t. \quad (13)$$

Визначена за (15) відстань, на яку перемістився рухомий контакт, дозволяє реалізувати за однією з стандартних методик рівняння (11), визначити коефіцієнт гідравлічного опору для

ділянки  $l(0)$  із залежності (1) і реалізувати отримані розв'язки (10) для проміжку часу  $\Delta t$ .

В подальшому для наступного часового інтервалу  $\Delta t$  визначається з першого рівняння системи (4), лінійна швидкість нафтопродукту

$$W = \frac{Q}{F} = \left[ -\frac{2d}{\lambda\rho} \frac{\partial H_j}{\partial x} \right]^{1/2}. \quad (14)$$

Використавши друге рівняння системи (10), знайдемо похідну  $\frac{\partial H_2}{\partial x}$  і за (14) уточнимо лінійну швидкість нафтопродукту, а за (13) - пройдений контактом шлях за проміжок часу  $\Delta t$ . Уточнення проводимо до співпадання з заданою точністю пройденого шляху  $l(t)$ . Після цього за (10) визначаємо напори в кожній точці нафтопроводу для моменту часу  $\Delta t$ , в тому числі на виході НПС при  $x=0$ . Для наступного проміжку часу початкове наближення лінійної швидкості газу беремо за уточнене її значення з попереднього проміжку часу.

Таким чином, визначаючи послідовно віддалі, що проходить контакт за рівні проміжки часу  $\Delta t$ , побудуємо його характер руху по нафтопродуктопроводу. Алгоритм закінчує роботу після досягнення умови  $l=L$ , тобто до моменту часу, коли контакт пройшов всю лінійну ділянку.

Реалізація другого розв'язку з системи (10) за умови  $x=0$ , тобто отримання залежності  $H_2(0,t)$ , дає змогу визначити зміну напору НПС в часі заміщення на лінійній ділянці чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП. Зміну продуктивності НПС в часі можна знайти шляхом процедури за залежністю (14), або з характеристики НПС у вигляді (2). Визначення гідравлічної потужності насосів пропонується здійснювати за загальновідомою методикою. Таким чином, дослідження нестационарних процесів у нафтопродуктопроводі, викликаних заміщенням на лінійній ділянці чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП, дозволяють прогнозувати режим роботи НПС з метою прийняття рішень про можливе регулювання.

Для виконання вказаного алгоритму складено програму, за якою проведено розрахунки для умов рівнинного нафтопродуктопроводу. Результати розрахунків у вигляді графіків подано на рисунках 1 і 2.

Для реалізації поставленої задачі може бути використаний метод зміни стаціонарних станів, який заздалегідь передбачає деяку похибку в результатах, проте є суттєво простішим. Його суть полягає в тому, що, як і в попередньому випадку, весь період заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП розбивається на дискретні проміжки часу  $\Delta t$ . Рух рідини впродовж кожного з проміжків  $\Delta t$  вважається стаціонарним, а наприкінці кожного з проміжків часу здійснюється стрибкоподібна зміна параметрів процесу. Якщо до початку заміщення нафтопродукту в трубопроводі його сумішшю з ПТП нафтопровід працював в ста-

ціонарному режимі з продуктивністю  $Q_0$  і напором  $H_0$ , то лінійну швидкість нафтопродукту на початку заміщення і пройдений границею розділу шлях за проміжок  $\Delta t$  можуть бути знайдені за (12) і (13).. В подальшому гідравлічні втрати напору в трубопроводі знаходяться з рівняння

$$H = \frac{8\lambda Q_0^2}{\pi^2 g d} [l + \varphi(L-l)]. \quad (15)$$

Тоді подача насоса (НПС) на кінець проміжку часу  $\Delta t$  може бути знайдена з рівняння характеристики у формі (2)

$$Q = \sqrt{\frac{a-H}{b}}. \quad (16)$$

В подальшому потужність і ККД знаходяться з реальної характеристики насоса в аналітичній чи графічній формі.

Метод зміни стаціонарних станів дозволяє побудувати характер руху границі контакту і зміну параметрів роботи НПС в часі заміщення чистого нафтопродукту в трубопроводі його сумішшю з ПТП. Результати у вигляді графіків подано на рисунках 1 і 2, де вони суміщені з аналогічними результатами, отриманими за нестационарною моделлю.

Результати розрахунків свідчать, що за стаціонарною методикою розрахунку можливе прогнозування характеру переміщення контактної границі у вигляді, близькому до лінійної функції, в той час як за нестационарною моделлю закон руху - параболічний. Відхилення між відносними координатами переміщення зони контакту досягає максимуму приблизно в середині процесу заміщення і складає 5 – 9%, причому з зростанням швидкості руху нафтопродукту воно зменшується. Похибка у визначенні параметрів процесу зростає з наближенням до кінця процесу заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП і досягає максимуму в кінцевий момент часу за подачею 1,5 – 2%, а за напором 1 – 1,5%. Таким чином, аналіз результатів розрахунків, отриманих за різними математичними моделями, доводить можливість використання для практичного прогнозування стаціонарної моделі.

На рисунку 3 зображено графіки переміщення контактної границі в процесі заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП, побудовані за стаціонарною методикою.

Аналіз результатів розрахунку свідчить, що за рахунок зниження гідравлічного опору нафтопроводу при використанні проти турбулентних присадок зростає продуктивність нафтопроводу, в зв'язку з чим скорочуються затрати часу на заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП залежно від концентрації. Різні концентрації ПТП призводять до різної ефективності, яка оцінюється співвідношенням (10). Так, при ефективності ПТП 15% час заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП порівняно з ефективністю 5% скорочується на 4,6%, а при досягненні ефективності 25% – на 8,7%. Більш суттєво на час

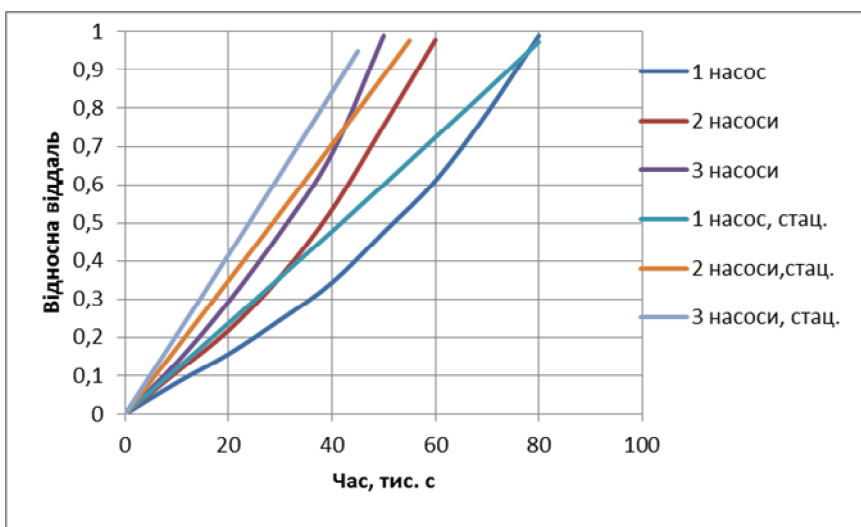


Рисунок 1 – Розрахунковий характер руху контактної границі при ефективності ПТП 15% і різних схемах послідовно включених насосів на НПС за стаціонарною і нестационарною моделями

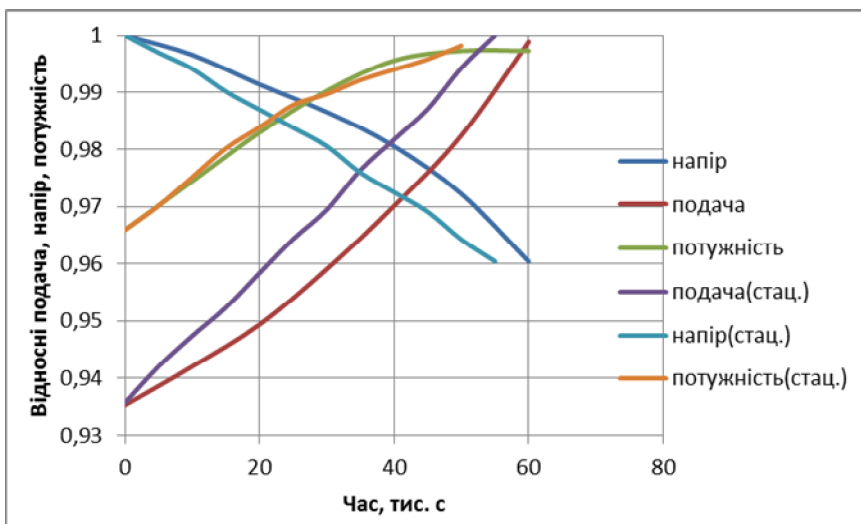


Рисунок 2 – Характер зміни параметрів режиму роботи НПС в процесі заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП за стаціонарною і нестационарною моделями

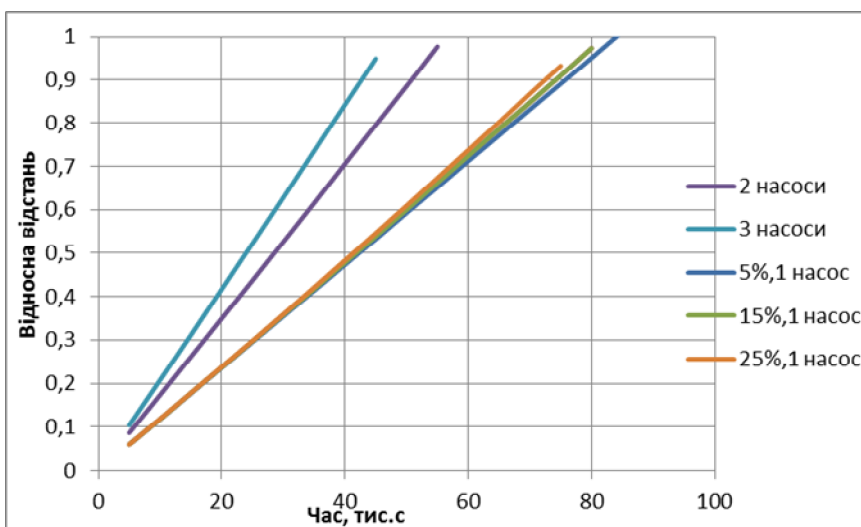
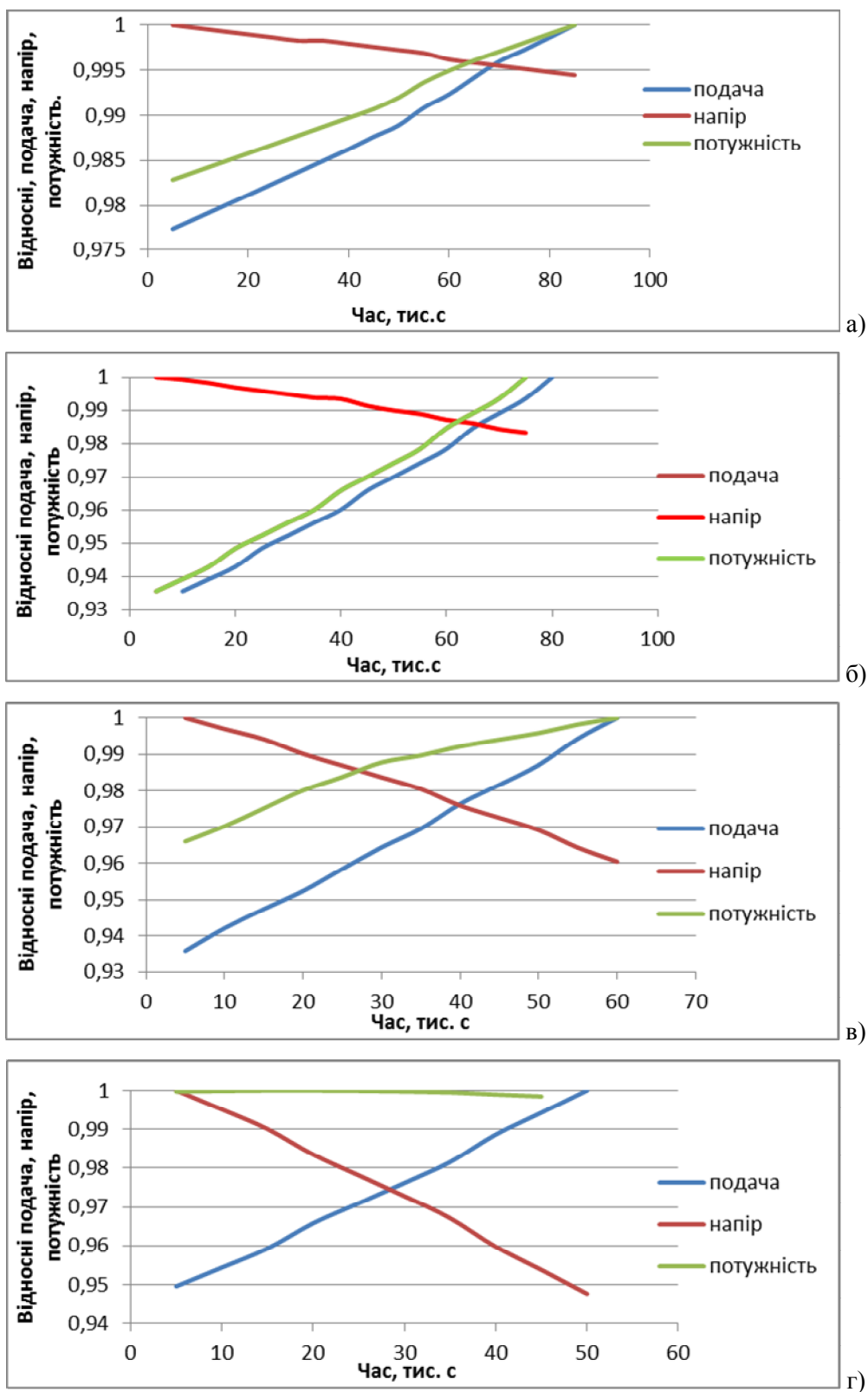


Рисунок 3 – Прогнозування характеру руху контактної границі за стаціонарною методикою



а) – ефективність ПТП 5%, 1 насос; б) – ефективність ПТП 15%, 1 насос;  
 в) – ефективність ПТП 15%, 2 насоси; г) – ефективність ПТП 15%, 3 насоси.

**Рисунок 4 – Характер зміни параметрів режиму роботи НПС в процесі заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП за різних умов**

заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП впливає зміна технологічної схеми роботи насосів. При ефективності використання ПТП 15% підключення послідовно в роботу двох насосів скорочує час заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП на 22,3%, а підключення послідовно трьох насосів – на 41,4%.

На рисунку 4 наведено графіки зміни параметрів роботи НПС в період заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП за різних мір ефективності ПТП і різних схемах перекачування. Аналіз результатів показує, що при ефективності присадки 5% подача НПС в межах 2,5%, напір знижується на 1,5%, а потужність зростає в середньому на 2%. При ефективності присадки 15% подача зростає на 3%, напір знижується на 1,9%, а потужність зростає в середньому на 2,2%. Збільшення числа послідовно працюючих насосів до двох при ефективності ПТП 15% призводить до зростання подачі на 6,1%, зменшення напору на 4% і зростання потужності 3,3%. При послідовно ввімкнених трьох насосах і ефективності ПТП 15% збільшення подачі досягає 7,4% при зменшенні напору на 5,1%. Потужність як функція часу перекачування має максимум, який відповідає приблизно половині часу періоду заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП. Використовуючи результати наведених досліджень можна планувати оптимізацію режимів роботи нафтопродуктопроводу з застосуванням ПТП.

Таким чином, використання протитурбулентних присадок викликає зниження гідравлічного опору нафтопроводу при перекачуванні світлих нафтопродуктів, за рахунок чого зменшуються втрати напору і відповідно до характеристики НПС зростає продуктивність, що при заданому обсязі перекачування призводить до зменшення часу перекачування і призводить, відповідно, до економії енерговитрат на транспортування нафтопродукту. Запропонована методика дозволяє прогнозувати режим роботи нафтопродуктопроводу і оцінити економічний ефект від використання ПТП в трубопровідному транспорті нафтопродуктів.

### *Література*

- 1 Toms B.A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers / B.A. Toms // Proc. I.Intern.Congr. Rheol. North Holland. - 1948. - v. 2. - p.135-141.
- 2 Иоселевич В.А. Микро- и макродинамика полимерных растворов / В.А. Иоселевич. - М.: Наука, 1987. - Т. 2. - С. 146-163.
- 3 Григорян С.С. К вопросу о механизме эффекта Томса / С.С. Григорян, Б.Б. Дамаскин, В.А. Иоселевич // АН СССР. - 1979. - Т. 248. - № 5. - с. 1074-1076.
- 4 Elperin I.T. Decreasing the hydrodynamic resistance of pipelines / I.T.Elperin, B.M.Smolskii, L.I.Leventa // Intern. Chem. Eng. - 1967. - v. 7. - p.276.
- 5 Гамобрамов А.И. Особенности применения противотурбулентных присадок на нефтепроводах / А.И. Гамобрамов, Е.Л. Левченко, И.И. Ерошкина и др. // Тезисы докладов на 4-й научно-технической конференции «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России». – М., 2001. – С. 64-66.
- 6 Люта Н.В. Математична модель гідродинамічного режиму роботи нафтопроводу при послідовному перекачуванні нафт різних сортів / Н.В. Люта // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 1998. – Вип. 35. – Том 3. – С. 22-28.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
12.11.15*

*Рекомендована до друку  
професором **Тимківим Д.Ф.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук **Говдяком Р.М.**  
(ТзОВ «Машекспорт», м. Київ)*