



Рисунок 2 – Залежність часу підймання елеватора від усталеної швидкості руху при:  
1 –  $K_F = 2.5$ ; 2 –  $K_F = 1.25$ ; 3 –  $K_F = 1.042$  ( $K_F = F_p/Q$ )



Рисунок 3 – Залежність оптимального значення усталеної швидкості підймання від ваги колони труб

УДК 622.692.4

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕСТАЦІОНАРНОСТІ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ НАФТОПРОВОДУ ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ ПЕРЕКАЧУВАННІ РІЗНОСОРТНИХ НАФТ

Н.В.Люта, М.Д.Сердюк (ІФНТУНГ, Івано-Франківськ)

Розглянуті основні аспекти впливу нестационарності, зумовленої рядом попередньо детермінованих чинників, на пропускну здатність нафтопроводу в процесі послідовного перекачування різносортних нафт. Продемонстровано, що розрахунки режимів експлуатації нафтопроводів при послідовному перекачуванні різносортних нафт з достатньою точністю можуть виконуватись з використанням квазістационарної моделі трубопроводу, в той час як нестационарна модель рекомендована для розрахунків режимів, що виникають в процесі включення-відключення насосних агрегатів.

Експлуатація нафтотранспортних магістралей України характеризується низькою ефективністю та економічністю, що пояснюється неповним їх завантаженням та нерегулярністю режимів роботи. Одним із ефективних методів збільшення завантаження і створення сприятливих умов для збереження якості транспортованого середовища є використання прогресивної технології послідовного перекачування нафт різних сортів. Реалізація вказаної технології потребує відповідного наукового, методичного та програмного забезпечення.

Сам по собі процес послідовного перекачування рідин з різними фізичними властивостями є неусталеним, тобто характеризується

The basic aspects of influence of unsteadiness on capacity of pipeline during the process of consecutive transportation of oils with different properties are considered. Unsteady computer model which properly account for the variation of the pipeline capacity as a function of the position of the interface between different oils is developed and compared with quasisteady one. Recommendations on using of these models are given in this work.

параметрами, що залежать від часу. При роботі нафтопроводу з неповним завантаженням часто має місце додаткова нестационарність, що викликана об'єктивною необхідністю зміни кількості працюючих насосів, перекачувальних станцій, зупинками роботи тощо. Тому питання оцінки впливу нестационарності на процес послідовного перекачування різносортних рідин має як теоретичне, так і практичне значення.

Система одномірних рівнянь руху малостисливих рідин (нафта, нафтопродукти) в трубопроводі може бути записана так [1]:

рівняння нерозривності (закон збереження маси рідини в будь-якому перерізі трубопроводу)

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho c^2 \cdot \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

рівняння руху

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = -\rho g \cdot \sin \alpha - \varphi(w), \quad (2)$$

де:  $t, x$  – час і лінійна координата відповідно;  
 $\rho$  – розрахункова густина рідини;  
 $g$  – прискорення сили тяжіння;  
 $\alpha$  – кут нахилу профілю трубопроводу до горизонту;  
 $\varphi(w)$  – сила тертя рідини об стінки труби;

$$\varphi(w) = \lambda(Re, \varepsilon) \cdot \frac{\rho w^2}{2d}; \quad (3)$$

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору;  
 $Re$  – число Рейнольдса;  
 $\varepsilon$  – відносна шорсткість внутрішньої поверхні труби;  
 $w$  – усереднена по перерізу труби швидкість руху рідини;  
 $P$  – тиск рідини;  
 $c$  – швидкість поширення збурень, згідно з роботами Н.Е. Жуковського,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{k} + \frac{\rho d}{\delta E}}}; \quad (4)$$

$k$  – модуль пружності рідини;  
 $E$  – модуль Юнга матеріалу, з якого виготовлений трубопровід;  
 $\sigma$  – товщина стінки трубопроводу.  
 Вводимо поняття зведеного тиску газу в газопроводі за умовою

$$P = P + \rho g z, \quad (5)$$

де  $z$  – геодезична позначка довільної точки трубопроводу.

Тоді рівняння (2) набуває такого вигляду:

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = -\varphi(w). \quad (6)$$

Відомо, що напір, створений відцентровим насосом, практично не залежить від густини транспортованої рідини. Однак тиск, що створений насосом, при незмінній подачі залежить від густини рідини

$$P_{nc} = \rho g A - \rho g B w^2, \quad (7)$$

де  $A, B$  – коефіцієнти математичної моделі напірної характеристики насосів.

Визначимо, як змінюється зведений тиск  $P(x, t)$  і швидкість  $w(x, t)$  рідини при неусталеному процесі послідовного перекачування двох різносортих рідин. До початку послідовного перекачування трубопровід з довільним профілем траси довжиною  $L$  і внутрішнім діаметром  $d$  заповнений першою рідиною. У трубопроводі має місце усталений режим ру-

ху рідини. На трубопровід працює нафтоперекачувальна станція, яка оснащена відцентровими насосами.

В певний момент часу, який ми будемо вважати початковим для послідовного перекачування, насоси НПС заповнюються другою рідиною. Це призводить до стрибкоподібної зміни тиску на початку трубопроводу

$$\Delta P = gA(\rho_2 - \rho_1) - gB(\rho_2 - \rho_1)w^2. \quad (8)$$

Стрибкоподібна зміна початкового тиску, а також подальше закачування в трубопровід рідини з іншою в'язкістю і густиною спричиняють неусталений режим руху, що може бути описаний системою рівнянь (1) і (6).

Початкові умови мають вигляд

$$\text{при } t=0 \quad w(x, 0) = w_0 = \text{const}, \quad (9)$$

$$P(x, 0) = P_{nc} - \varphi(w_0)x. \quad (10)$$

Граничні умови такі:

$$x=0 \quad P(0, t) = A_p - B_p w^2(0, t), \quad (11)$$

$$x=L \quad P(L, t) = P_k. \quad (12)$$

Для розв'язування системи рівнянь (1) і (6) чисельним способом використовуємо метод характеристик [1].

В результаті математичних перетворень одержуємо, що вздовж прямих  $\frac{dx}{dt} = c$  і

$$\frac{dx}{dt} = -c \text{ на площині } (x, t), \text{ які називають "ха-$$

рактеристиками диференціальних рівнянь", рівняння (1) і (6) еквівалентні системі двох звичайних диференціальних рівнянь

$$\frac{d(P + \rho c w)}{dt} = -c \varphi(w), \quad (13)$$

$$\frac{d(P - \rho c w)}{dt} = c \varphi(w). \quad (14)$$

Розіб'ємо область  $\{0 \leq x < L; t > 0\}$  площини змінних  $(x, t)$  прямокутною сіткою з кроками

$$\Delta x = L/n, \quad (15)$$

$$\Delta t = \Delta x/c, \quad (16)$$

де  $n$  – кількість точок розбивання довжини трубопроводу  $L$ .

Вважаємо, що значення невідомих функцій  $P$  і  $w$  відомі у вузлах  $(j-1, i)$  попереднього моменту часу  $t_{j-1}$  ( $i=0, 1, \dots, n$ ). Покажемо, як обчислити значення цих функцій у вузлах наступного моменту часу  $t_j$ .

Для всіх внутрішніх точок, що не лежать на межі області інтегрування, розрахункові формули мають вигляд

$$P_{j,i} = \frac{1}{2}(P_{j-1,i-1} + P_{j-1,i+1}) + \frac{1}{2}\rho c(w_{j-1,i-1} - w_{j-1,i+1}) + \frac{1}{2}\Delta x[\varphi(w_{j-1,i+1}) - \varphi(w_{j-1,i-1})], \quad (17)$$

$$w_{j,i} = \frac{1}{2}(P_{j-1,i-1} - P_{j-1,i+1})\frac{1}{\rho c} + \frac{1}{2}(w_{j-1,i-1} + w_{j-1,i+1}) - \frac{1}{2}\Delta x[\varphi(w_{j-1,i+1}) + \varphi(w_{j-1,i-1})]\frac{1}{\rho c}, \quad (18)$$

Розглянемо, як визначаються значення невідомих функцій в граничних точках ( $x=0$  і  $x=L$ ).

Для початку трубопроводу можна записати таке рівняння:

$$(P_{j,0} - \rho c w_{j,0}) - (P_{j-1,1} - \rho c w_{j-1,1}) = \varphi(w_{j-1,1}) \cdot \Delta x. \quad (19)$$

Ліва гранична умова має вигляд

$$P_{j,0} = A_p - B_p w_{j,0}^2. \quad (20)$$

Спільне розв'язування рівнянь (19) і (20) дає змогу визначити значення тиску і швидкості руху рідини на початку трубопроводу ( $x=0$ ) для будь-якого моменту часу  $t_j$ .

Для кінця трубопроводу можна записати таке рівняння:

$$(P_{j,n} + \rho c w_{j,n}) - (P_{j-1,n-1} + \rho c w_{j-1,n-1}) = -\varphi(w_{j-1,n-1}) \cdot \Delta x \quad (21)$$

Права гранична умова має вигляд

$$P_{j,n} = P_{0,n} = const. \quad (22)$$

Спільне розв'язування рівнянь (21) і (22) дає можливість визначити значення тиску і швидкості руху рідини в кінці трубопроводу ( $x=L$ ) для будь-якого моменту часу  $t_j$ .

Таким чином, формули (17) – (22) дають повний розв'язок системи рівнянь (1) і (6), тобто дають змогу визначити значення тиску  $P_{j,i}$  і швидкості  $w_{j,i}$  у всіх вузлах сітки в момент часу  $t_j$  через значення цих функцій у попередній момент часу  $t_{j-1} = t_j - \Delta t$ . Значення функцій в початковий момент визначаються за формулами (9) і (10).

Силу тертя рідини об стінки труби для  $i$ -того елемента довжини трубопроводу в момент часу  $t_j$  знаходимо таким чином. Обчислюємо число Рейнольдса за формулою

$$Re = \frac{w_{j,i} d}{\nu}. \quad (23)$$

Використовуючи запропоновану нами методику [ 2 ], вибираємо відповідну математичну модель для коефіцієнта гідравлічного опору  $\lambda_{ij}$ .

Обчислюємо значення сили тертя рідини за формулою

$$\varphi(w_{j,i}) = \lambda_{j,i} \frac{w_{j,i}^2}{2d} \rho. \quad (24)$$

В розрахункові формули (17)–(24) входять фізичні властивості рідин. При розрахунках процесу заміщення однієї рідини іншою будемо дотримуватись такого принципу:

для елементів довжини трубопроводу  $\Delta x$ , що заповнені першою у контакті рідиною, у розрахункові формули закладаємо фізичні властивості першої рідини

$$\rho = \rho_1; \quad \nu = \nu_1; \quad c = c_1; \quad (25)$$

для елементів довжини трубопроводу, що заповнені другою в контакті рідиною, у розрахункові формули підставляємо фізичні властивості другої рідини

$$\rho = \rho_2; \quad \nu = \nu_2; \quad c = c_2; \quad (26)$$

для елемента трубопроводу довжиною  $\Delta x$ , що знаходиться в зоні контакту різносортих рідин, розрахункові формули мають вигляд

$$P_{j,i} = \left\{ \frac{P_{j-1,i-1}}{c_2 \rho_2} + \frac{P_{j-1,i+1}}{c_1 \rho_1} + w_{j-1,i-1} - w_{j-1,i+1} + \Delta x \left[ \frac{\varphi(w_{j-1,i+1})}{c_1 \rho_1} - \frac{\varphi(w_{j-1,i-1})}{c_2 \rho_2} \right] \right\} \frac{1}{\left( \frac{1}{c_1 \rho_1} + \frac{1}{c_2 \rho_2} \right)} \quad (27)$$

$$w_{j,i} = \left\{ (P_{j-1,i-1} + c_2 \rho_2 w_{j-1,i-1}) - (P_{j-1,i+1} - c_1 \rho_1 w_{j-1,i+1}) - \Delta x [\varphi(w_{j-1,i-1}) + \varphi(w_{j-1,i+1})] \right\} \frac{1}{(c_1 \rho_1 + c_2 \rho_2)}. \quad (28)$$

Сила тертя рідини об стінки труби розраховується за параметрами п'ятдесятивідсоткової суміші

$$\nu_{см} = \frac{3\nu_1 + \nu_2}{4}, \quad (29)$$

де  $\nu_2 > \nu_1$ ;

$$\rho_{см} = 0,5(\rho_1 + \rho_2). \quad (30)$$

Даний алгоритм реалізований нами в оригінальній програмі, яка дає змогу для кожного моменту часу витіснення однієї рідини іншою одержати значення швидкості, витрати і зведеного тиску як функцію відстані від початку трубопроводу. Програма передбачає також розрахунок усередненої по довжині і в часі швидкості та об'ємної витрати рідини

за час витіснення першої рідини другою. Усереднену витрату нафти необхідно знати для вирішення важливих практичних задач, пов'язаних з визначенням балансу нафти при її трубопровідному транспортуванні.

Результати багатоваріантних розрахунків на ПЕОМ для модельного нафтопроводу

за квазістаціонарною та нестаціонарною моделлю оформлені в таблицях 1-3.

Аналіз результатів багатоваріантних гідравлічних розрахунків, що виконані за допомогою ПЕОМ для модельного нафтопроводу при послідовному перекачуванні різносортих нафт, дав змогу зробити висновки:

**Таблиця 1 – Результати дослідження впливу нестаціонарності на усереднену витрату за період витіснення менш в'язкої рідини більш в'язкою**

Характеристика профілю трубопроводу	Різниця геодезичних позначок кінця і початку трубопроводу $\Delta z$ , м	Усереднена швидкість руху, м/с, визначена		
		з врахуванням нестаціонарності	без врахування нестаціонарності	відносна різниця результатів, %
Рівнинний	0	1,567451	1,573547	-0,39
Монотонно зростаючий	100	1,437634	1,443656	-0,42
Монотонно зростаючий	200	1,297143	1,30286	-0,44
Монотонно зростаючий	300	1,145385	1,147715	-0,20
Монотонно спадаючий	-100	1,689039	1,694748	-0,34
Монотонно спадаючий	-200	1,803034	1,808805	-0,32
Монотонно спадаючий	-300	1,908442	1,916870	-0,44
Пересічений	100	1,431308	1,446010	-1,03

**Таблиця 2 – Результати дослідження впливу нестаціонарності на усереднену витрату за період витіснення більш в'язкої рідини менш в'язкою**

Характеристика профілю трубопроводу	Різниця геодезичних позначок кінця і початку трубопроводу $\Delta z$ , м	Усереднена швидкість руху, м/с, визначена		
		з врахуванням нестаціонарності	без врахування нестаціонарності	відносна різниця результатів, %
Рівнинний	0	1,512776	1,519311	-0,43
Монотонно зростаючий	100	1,376994	1,383333	-0,46
Монотонно зростаючий	200	1,227605	1,23481	-0,59
Монотонно зростаючий	300	1,063113	1,069356	-0,59
Монотонно спадаючий	-100	1,639744	1,645545	-0,36
Монотонно спадаючий	-200	1,758828	1,763859	-0,29
Монотонно спадаючий	-300	1,871975	1,875611	-0,19
Пересічений	100	1,374264	1,380711	-0,47

**Таблиця 3 – Результати дослідження впливу нестаціонарності на усереднену витрату за період витіснення менш в'язкої рідини більш в'язкою після відключення насоса**

Характеристика профілю трубопроводу	Різниця геодезичних позначок кінця і початку трубопроводу $\Delta z$ , м	Усереднена швидкість руху, м/с, визначена		
		з врахуванням нестаціонарності	без врахування нестаціонарності	відносна різниця результатів, %
Рівнинний	0	1,144334	1,151935	-0,66
Монотонно зростаючий	100	0,952660	0,962622	-1,04
Монотонно зростаючий	200	0,721228	0,735008	-1,91
Монотонно зростаючий	300	0,410479	0,425895	-3,76
Монотонно спадаючий	-100	1,310298	1,318304	-0,61
Монотонно спадаючий	-200	1,46117	1,468625	-0,51
Монотонно спадаючий	-300	1,598150	1,606885	-0,55
Пересічений	100	0,956167	0,966123	-1,04

1) нестаціонарність, що викликана переміщенням зони контакту двох різносортних рідин по довжині горизонтального трубопроводу, практично не впливає на усереднену витрату рідини за час заміщення однієї рідини в трубопроводі іншою; відносна різниця результатів, одержаних за двома методиками розрахунку, не перевищує 0,5%;

2) нестаціонарність, що викликана переміщенням зони контакту двох різносортних рідин по довжині трубопроводу з монотонно зростаючим чи спадаючим профілем траси, незначно впливає на усереднену витрату рідини за час заміщення однієї рідини іншою, відносна різниця результатів, одержаних за двома методиками розрахунку, не перевищує 1,0%;

3) нестаціонарність, що викликана переміщенням зони контакту двох різносортних рідин по довжині трубопроводу з пересіченим профілем траси, мало впливає на усереднену витрату рідини за час заміщення однієї рідини іншою, відносна різниця результатів, одержаних за двома методиками розрахунку, не перевищує 2%;

4) нестаціонарність, що викликана переміщенням зони контакту двох різносортних рідин по довжині трубопроводу з пересіченим профілем траси, мало впливає на усереднену витрату рідини за час заміщення однієї рідини іншою, відносна різниця результатів, одержаних за двома методиками розрахунку, не перевищує 2%;

5) послідовність закачування в трубопровод двох різносортних рідин з суттєвою відмінністю фізико-хімічних властивостей практично не впливає на різницю результатів гідравлічного розрахунку нафтопроводу за неусталеною і квазістаціонарною моделлю;

6) накладання додаткової нестаціонарності, що спричинена раптовою зупинкою магістрального насоса, на нестаціонарність, що вказана в пунктах 1-3, підсилює вплив неусталеності на усереднену витрату рідини за час заміщення однієї рідини іншою; відносна

різниця результатів, одержаних за двома методиками розрахунку, становить 1-4%;

7) найбільша різниця результатів за двома методиками розрахунку спостерігалася для випадку відключення магістрального насоса на НПС, що працює на модельний трубопровід з монотонно зростаючим профілем траси і максимально можливою для умов України різницею геодезичних позначок ( $\Delta z=300$  м);

8) враховуючи, що точність загальноприйнятих математичних моделей для визначення коефіцієнта гідравлічного опору не перевищує 1-2%, гідравлічні розрахунки магістральних нафтопроводів при послідовному перекачуванні різносортних нафт з достатньою точністю можна виконувати за квазістаціонарною моделлю, що розроблена нами в роботі [3];

9) для аналізу штатних і нештатних виробничих ситуацій, що виникають при включенні або відключенні насосних агрегатів, доцільно використовувати нестаціонарну модель нафтопроводу, на якій базуються розроблені нами методика і програмне забезпечення, описані в даній роботі.

### Література

1. Лурье М.В. Вычислительный практикум по трубопроводному транспорту нефти, нефтепродуктов и газа. – М.: Нефть и газ, 1997. – 67 с.
2. Середюк М.Д., Люта Н.В. Обгрунтування вибору математичних моделей для коефіцієнта гідравлічного опору в нафтопроводах // Нафт. і газ. пром-сть. – 2000. – № 2. – С. 35-37.
3. Люта Н.В. Математична модель гідродинамічного режиму роботи нафтопроводу при послідовному перекачуванні нафт різних сортів // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 1998. – Вип. 35. – Том 3. – С. 22-28.

## Pollutec – 2001

4-7 грудня 2001 року, Париж, Франція

Pollutec – одна з найбільших виставок щодо управління відходами у Європі. Проводиться 1 раз на два роки. У 1999 р. на площі 24300 кв. м було представлено більш як 1500 компаній з 30 країн.

### Основні напрямки виставки:

**Відходи:** збір і транспортування, обробка звичайних і спеціальних промислових відходів, подальше використання.

**Рециклінг:** обладнання і послуги.

**Вода:** обробка промислових вод, дощової води, стічних вод, водоочистка, фільтрація, насоси, гідравліка, поверхнева обробка, віддалене управління і електронний нагляд.

**Повітря:** очистка газів, забруднення повітря, контроль запахів, захист дихальних шляхів.

**Звук:** зменшення рівня шуму, захист від шуму.

**Очистка ґрунту.**