enterprises of the mining and metallurgical industry the restrictions on the region of possible modes of operation of the hydrotransport complex will be dominant.

Originality. Based on the analysis of methods for assessing the possible risks of the operation of the logistics transport systems of the enterprises of the mining and metallurgical industry, promising directions of increasing efficiency and ensuring reliability during periodic changes in the parameters of the trunk and material being transported are substantiated.

Practical value. It is concluded in the improvement of the methods for calculating the permissible lengths of logistic transport trunks, which satisfy the requirements

of the concentrating production in the traffic flow, with a periodic change in the parameters of the material being transported.

Key words: hydros mixture, high concentration, flow-pressure characteristics

**Рекомендована до друку
д. т. н. В. І. Самусею**

Надійшла 25.11.2018

УДК [622:531/533:65.011.8].001.3

Наука

Є. В. Семененко /д. т. н./, Є. С. Лапшин /д. т. н./, С. В. Дзюба /к. т. н./

Інститут геотехнічної механіки
ім. М. С. Полякова НАН України,
м. Дніпро, Україна

М. М. Лях /к. т. н./

Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу МОН України,
м. Івано-Франківськ, Україна
e-mail: sergejdzuba@gmail.com

Особливості технологічного розрахунку трубопроводів при транспортуванні високов'язких неньютонівських рідин

**Ye. V. Semenenko /Dr. Sci. (Tech.)/,
Ye. S. Lapshin /Dr. Sci. (Tech.)/,
S. V. Dziuba /Cand. Sci. (Tech.)/**

Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics
of National Academy of Sciences of Ukraine,
Dnipro, Ukraine

M. M. Liah /Cand. Sci. (Tech.)/

Ivano-Frankivsk National Technical University
of Oil and Gas Ministry of Science and Science
of Ukraine, Ivano-Frankivsk, Ukraine
e-mail: sergejdzuba@gmail.com

Technological pipelines calcucation features for high-vision oil products transportation

Мета. Обґрунтування наукових основ технологічного розрахунку магістральних трубопроводів, які перекачують неньютонівські рідини високої в'язкості, з урахуванням особливостей поведінки розв'язку повного рівняння Букінгама в різних інтервалах величин, які входять до нього.

Методика. Аналіз сучасних методів розрахунку раціональних параметрів режимів транспортування неньютонівських рідин високої в'язкості дозволив обґрунтувати специфіку реологічних характеристик цих рідин з урахуванням можливості управління їх реологічними властивостями за рахунок введення поверхнево активних реагентів або гетерогенного середовища меншої в'язкості.

Результати. Обґрунтовано науково-методичне забезпечення розрахунку раціональних параметрів режимів транспортування неньютонівських рідин високої в'язкості для магістральних трубопроводів з метою забезпечення підвищення ефективності їх функціонування. При цьому в залежностях, які запропоновано в роботі, враховано можливість оцінки зміни параметрів і режимів роботи магістральних трубопроводів при примусовому регулюванні реологічними параметрами середовища, що перекачується.

Наукова новизна. На основі аналізу сучасних методів технологічних розрахунків параметрів функціонування магістральних трубопроводів визначено гідродинамічну особливість напірної течії неньютонівських рідин високої в'язкості, яка полягає у тому, що залежність гідрравлічного ухилу від початкового дотичного напруження і витрати виражаються лінійною суперпозицією доданків, що містять дані величини, а коефіцієнти пропорційності не залежать від реологічних характеристик середовища, властивостей матеріалу, що транспортується, і діаметру трубопроводу.

Практична значущість. Полягає у вдосконаленні методів розрахунку раціональних параметрів при процесах транспортування пульп, гідросумішей і рідин високої в'язкості в магістральних трубопроводах. Ці методи дозволяють визначати значення діаметру трубопроводу, вибір показників насосів з урахуванням ефективною в'язкості, а також початкового дотичного напруження високов'язких неньютонівських рідин з метою зниження енергоємності транспортування, ресурсозбереження та підвищення екологічної безпеки промислових районів. (Іл. 5. Табл. 2. Бібліогр.: 16 назв.)

Ключові слова: неньютонівська рідина високої в'язкості, реологічні характеристики, магістральний трубопровід, технологічний розрахунок.

Вступ. Актуальність цієї роботи визначається необхідністю підвищення ефективності транспортування неньютонівських рідин високої в'язкості (НРВВ) магістральними трубопроводами на стадії проектних проробок і попередніх розрахунків. При цьому найбільш актуальною проблемою для вітчизняних магістральних трубопроводів є зниження енергоємності транспортування, а також ресурсозбереження та підвищення екологічної безпеки. Ці аспекти практично не розглядаються у відомих методиках технологічного розрахунку НРВВ, хоча достатньою мірою вивчені для рідин, які не виявляють пластичних властивостей [1–4]. Одним з можливих варіантів зниження енергоємності транспортування НРВВ вважається зниження їх в'язкості шляхом розбавлення звичайною рідиною або введенням поверхнево активних і гідродинамічно активних реагентів [4–8]. Основи технологічного розрахунку при використанні реагентів, що знижують в'язкість середовища, яке перекачується, є відомими для ньютоновських рідин, що транспортуються магістральними трубопроводами. При цьому основи такого розрахунку для трубопроводів, які транспортують НРВВ, невідомі. З одного боку, це визначається недостатнім інтересом до таких рідин, оскільки існують більш перспективні родовища, з іншого боку, специфікою реологічних характеристик НРВВ, у яких, крім ефективною в'язкості, існує початкове дотичне напруження (ПДН). Ці два критерії беруть до уваги при розрахунку діаметра трубопроводу, вибору показників насосів, вони також є змінними при введенні реагентів.

Наявність початкового дотичного напруження робить розрахункові залежності істотно нелінійними, що виключає отримання аналітичного розв'язку, а також накладає додаткові обмеження на режим течії у вигляді діаметру ядра потоку, що не деформується. Оскільки НРВВ мають властивості пластиків Бінгама – Шведова [7–12], то визначення витратно-напірної характеристики (ВНХ) трубопроводу передбачає розв'язання нелінійного рівняння Букінгама [6; 9; 13–16]:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta L} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{2\tau_0 L}{R \Delta P} + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_0 L}{R \Delta P} \right)^4 \right], \quad (1)$$

де Q – об'ємна витрата НРВВ;
 R – внутрішній радіус труби;
 ΔP – діючий перепад тиску;
 η – ефективна в'язкість НРВВ;
 L – довжина трубопроводу;
 τ_0 – початкове дотичне напруження НРВВ.

Формула (1) не дозволяє отримати аналітичне розв'язання ні в разі технологічного розрахунку, коли визначають діаметр трубопроводу і РНХ насосів, ні в разі, коли розраховують подачу установки і напір, що створюється. Для цього потрібне розв'язання нелінійного рівняння четвертого ступеня, однак велика кількість варіюваних величин ускладнює використання чисельних методів.

В умовах, що склалися, більшість авторів пропонують розглядати спрощене рівняння Букінгама, яке передбачає лінійну залежність між чинним перепадом тисків і об'ємною витратою НРВВ [11–13]:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta L} \left(a - b \frac{2\tau_0 L}{R \Delta P} \right), \quad (2)$$

де a, b – коефіцієнти, що визначаються за експериментальними даними для середовищ того чи іншого типу [13; 16].

На практиці визначення експериментальних коефіцієнтів a і b викликає значні труднощі, оскільки невідомі фактори, що впливають на їх величини. Таким чином, завдання дослідження поведінки розв'язання рівняння (1) в різних інтервалах величин, які входять до нього, і визначення адекватної її апроксимації для умов технологічного розрахунку магістральних трубопроводів є важливим і актуальним.

Метою дослідження є обґрунтування наукових основ технологічного розрахунку магістральних нафтопроводів, що перекачують НРВВ, з урахуванням особливостей поведінки розв'язання повного рівняння Букінгама в різних інтервалах величин, що входять до нього.

Як показують результати досліджень течій не-ньютонівських рідин високої в'язкості з відходів збагачення руд [15], вираз (1) з урахуванням можливих безрозмірних величин раціонально перетворити на таке алгебраїчне рівняння четвертого ступеня [8; 15]:

$$A^4 - 4(1 + 3\theta)A + 3 = 0, \quad A = \frac{2\tau_0 L}{R\Delta P}, \quad \theta = \frac{\eta Q}{\pi R^3 \tau_0}, \quad (3)$$

дійсними коренями, якого є точки перетину параболи четвертого ступеня з піднятими вгору гілками і вершиною на початку координат і прямою лінією, яка перетинає осі ординат і абсцис у відповідних точках. Графіки цих функцій перетинаються тільки в першому квадраті координатної площини, при цьому можуть бути одна або дві точки перетину залежно від величини. На підставі цього можна зробити висновок, що рівняння (1) має два дійсних і два комплексних корені. З цих рішень єдиний не комплексний і додатний корінь, як показано фахівцями ІТМ НАН України [15], визначається за формулами:

$$A = \sqrt[3]{1 + 3\theta} \sqrt{\frac{z}{2}} \left[1 - \sqrt{\left(\frac{2}{z}\right)^2 - 1} \right],$$

$$z = \sqrt[3]{1 + \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + 3\theta)^4}}} + \sqrt[3]{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + 3\theta)^4}}}. \quad (4)$$

З використанням виразів (3) і (4) визначаємо залежність гідравлічного ухилу магістралі від витрати НРВВ:

$$i = \frac{1}{A} \frac{2\tau_0}{\rho_0 g R}, \quad (5)$$

де i – гідравлічний ухил;

ρ_0 – щільність рідини.

Як показують результати досліджень науковців ІТМ НАН України [15], залежність, яка входить до формули для гідравлічного ухилу множник обернено пропорційний величині A від безрозмірного комплексу θ для широкого інтервалу значень має лінійний характер і може бути подана в такому вигляді (рис. 1, 2, табл. 1):

$$\frac{1}{A} = \alpha + \frac{\beta}{2}\theta, \quad (6)$$

де α , β – коефіцієнти апроксимації.

Таким чином, раціонально запропонувати розбити діапазон зміни параметра θ на два інтервали, в кожному з яких вихідну залежність можна апроксимувати лінійною функцією (рис. 1, 2, табл. 1)

Відзначимо, що отримані значення коефіцієнтів α і β є універсальними, вони відображають властивості розв'язання рівняння (1) як матема-

Рис. 1. Залежність величини безрозмірного гідравлічного ухилу від безрозмірної витрати НРВВ

а) $0,006 < \theta < 25,0$

б) $0,0 < \theta < 0,006$

Рис. 2. Залежність величини безрозмірного гідравлічного ухилу від безрозмірної витрати НРВВ в різних інтервалах комплексу θ

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів апроксимації рівняння (6)

Інтервали змін величин	Значення коефіцієнтів апроксимації		Точність апроксимації (R^2)
	α	β	
$0,006 < \theta < 25,0$ $0,0 < A < 0,9$	1,2638	8,0136	1,0000
$0,0 < \theta < 0,006$ $0,9 < A < 1,0$	1,0178	39,976	0,9393

тичного об'єкта і не залежать від виду середовища, що перекачується, діаметру або матеріалу трубопроводу, оскільки отримані при апроксимації безрозмірної залежності, в якій властивості НРВВ та гідравлічні характеристики течії враховуються універсальними критеріями.

З використанням вищенаведених виразів можна легко отримати формулу для визначення гідравлічного ухилу, аналогічну розв'язкам спрощеного рівняння Букінгама, коефіцієнти якої не залежать від НРВВ, а визначаються режимом течії. При цьому співвідношення коефіцієнтів α і β визначає значення критерію θ , при якому доданки в розглянутій формулі будуть рівні між собою, при цьому внески в'язкості НРВВ і ПДН в гідравлічному ухилі будуть однаковими (табл. 2)

$$i = \begin{cases} 1,1 \frac{\alpha \tau_0}{\rho_0 g R}, & \theta < \frac{\alpha}{10\beta}; \\ \frac{\alpha \tau_0}{\rho_0 g R} + \frac{\beta \eta Q}{\rho_0 g \pi R^4}, & \frac{\alpha}{10\beta} < \theta < \frac{10\alpha}{\beta}; \\ 1,1 \frac{\beta \eta Q}{\rho_0 g \pi R^4}, & \theta > \frac{10\alpha}{\beta}. \end{cases} \quad (7)$$

Таблиця 2

Величини, які визначають інтервали впливу в'язкості НРВВ або ПДН на значення гідравлічного ухилу

Інтервали зміни величин	$\frac{\alpha}{10\beta}$	$\frac{10\alpha}{\beta}$
$0,006 < \theta < 25,0$ и $0,0 < A < 0,9$	0,016	1,577
$0,0 < \theta < 0,006$ и $0,9 < A < 1,0$	0,0026	0,258

Отримане аналітичне розв'язання повного рівняння Букінгама в універсальних безрозмірних величинах (7) враховує характеристики НРВВ, параметри течії і трубопроводу, а також дозволяє досліджувати особливості поведінки цього розв'язання в різних інтервалах величин, що входять до нього. При цьому обмеження на величину A фактично є умовами реалізації стрижневого режиму течії НРВВ, оскільки цей параметр є відносним радіусом ядра потоку, що не деформуються і

який не може бути більше радіуса трубопроводу [9-13; 15]:

$$A = \frac{R_0}{R}, \quad R_0 = \frac{2\tau_0 L}{\Delta P},$$

де R_0 – радіус ядра потоку, що не деформується.

З огляду на, те що при технологічному розрахунку за заданою витратою середовища, що перекачується, необхідно вибрати діаметр трубопроводу, то одночасний розгляд умови $R_0 < R$ з виразом для РВХ трубопроводу, гідравлічний ухил якого визначаються за виразом (7), дозволяє отримати обмеження на радіус трубопроводу, дотримання яких забезпечує стрижневий режим течії НРВВ:

$$y^4 - \sigma y^3 + 1 > 0, \quad (8)$$

$$y = \sqrt[4]{\frac{\rho_0 g \pi i_Z}{k_Z \beta \eta \tilde{Q}}} R, \quad \sigma = \left(\frac{2}{\alpha k_Z} - 1 \right) \left(\frac{\alpha \tau_0 k_Z}{\rho_0 g \pi i_Z} \right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{\alpha \tau_0 \pi}{\beta \eta \tilde{Q}} \right)^{\frac{1}{4}},$$

$$i_Z = \frac{\Delta Z}{L},$$

де i_Z – геодезичний ухил магістралі;

$\tilde{Q}$ – необхідна об'ємна витрата НРВВ;

ΔZ – різниця геодезичних висот магістралі;

k_Z – коефіцієнт, який враховує місцеві гідравлічні опори;

ρ – відносна щільність НРВВ.

Неважко показати, що нерівність (8) справедлива для будь-якого радіусу трубопроводу, якщо $\sigma \leq 1,76$. В цьому випадку, прирівнюючи між собою вираз для ВНХ трубопроводу і насосного агрегату, який заплановано, попередній вибір якого здійснюється за величиною $\tilde{Q}$,

$$H = \left(\frac{\tilde{Q}}{\mu} + \frac{\tau_0}{\lambda} \right) k_Z L + \rho \Delta Z, \quad h = n\chi(\gamma - \phi \tilde{Q}),$$

$$\lambda = \frac{\rho_0 g R}{\alpha}, \quad \mu = \frac{\rho_0 g \pi R^4}{\beta \eta},$$

після нескладних перетворень отримаємо рівняння для розрахунку необхідного радіусу трубопроводу:

$$z^4 - \omega z^3 - 1 = 0, \quad (9)$$

$$z = \sqrt[4]{\frac{\rho_0 g \pi \Gamma}{\beta \eta \tilde{Q}}} R, \quad \omega = \sqrt[4]{\frac{\pi \alpha \tau_0}{\beta \eta \tilde{Q} (\rho_0 g \Gamma)^3}},$$

$$\Gamma = n\tilde{\gamma} - n\tilde{\phi}\tilde{Q} - \frac{\rho}{k_Z} i_Z, \quad \tilde{\phi} = \frac{\phi \chi}{k_Z L}, \quad \tilde{\gamma} = \frac{\gamma \chi}{k_Z L}.$$

Неважко показати, що рівняння (9) має єдиний додатний корінь (рис. 3), який лінійно залежить від параметра ω , що дозволяє запропонувати для розрахунку радіусу трубопроводу такий вираз:

$$R = 0,9991 \sqrt[4]{\frac{\pi \alpha \tau_0}{\rho_0 g \pi \Gamma}} + 0,0446 \sqrt[4]{\frac{\beta \eta \tilde{Q}}{\rho_0 g \pi \Gamma}}. \quad (10)$$

Рис. 3. Залежність додатного кореня нерівності (9) від величини ω

В іншому випадку, якщо $\sigma > 1,76$, у поліномі, що стоїть в лівій частині нерівності (8), існує два дійсних додатних корені (рис. 4, 5), в проміжку між якими ця нерівність не виконується:

$$y < 0,1069 \ln\left(\frac{754,321}{\sigma}\right), \quad y > 0,9983\sigma - 0,0553,$$

і на вираз (10) накладаються такі обмеження:

$$0,9991 \sqrt[4]{\frac{\pi \alpha \tau_0}{\rho_0 g \pi \Gamma}} + 0,0446 \sqrt[4]{\frac{\beta \eta \tilde{Q}}{\rho_0 g \pi \Gamma}} < 0,1069 \ln\left(\frac{754,321}{\sigma}\right) \sqrt[4]{\frac{k_Z \beta \eta \tilde{Q}}{\rho_0 g \rho_i z \pi}},$$

$$0,9991 \sqrt[4]{\frac{\pi \alpha \tau_0}{\rho_0 g \pi \Gamma}} + 0,0446 \sqrt[4]{\frac{\beta \eta \tilde{Q}}{\rho_0 g \pi \Gamma}} > (0,9983\sigma - 0,0553) \sqrt[4]{\frac{k_Z \beta \eta \tilde{Q}}{\rho_0 g \rho_i z \pi}}.$$

Вираз (10), з урахуванням двох останніх нерівностей, дозволяє вибрати діаметр трубопроводу залежно від кількості використовуваних насосів або ж підібрати кількість необхідних насосних агрегатів для вже існуючого трубопроводу.

Наступним етапом технологічного розрахунку є оцінка режиму течії і визначення місць розташування насосних станцій. За відомих параметрів трубопроводу і ВНХ насосів продуктивність магістрального трубопроводу визначається за формулою [15]:

$$Q = MG(1 - \Theta), \quad M = \frac{\mu}{1 + n\tilde{\phi}\mu}, \quad G = n\tilde{\gamma} - \frac{\rho}{k_Z} i_Z, \quad \Theta = \frac{\tau_0}{\lambda G}. \quad (11)$$

Підставивши першу формулу з (11) у вирази для визначення втрат напору і напору насоса на першій ділянці магістрального нафтопроводу і провівши деякі перетворення, отримаємо залежності:

$$H(l) = n\tilde{\phi}\tilde{\gamma} \frac{b+a}{1+a} k_Z l + \rho \left(\frac{\Delta Z(l)}{\Delta Z} - \frac{a}{1+a} \frac{l}{L} \right) \Delta Z, \quad h = \frac{g+a}{1+a} \chi \gamma, \quad (12)$$

$$a = \frac{\beta \eta}{n\tilde{\phi}\rho_0 g \pi R^4}, \quad b = \frac{\alpha \tau_0}{n\tilde{\phi}\rho_0 g R}, \quad g = \rho \frac{\Delta Z}{n\chi \gamma} \left[1 + \frac{k_Z L}{\Delta Z} \frac{\tau_0}{\rho \lambda} \right],$$

які забезпечують вибір місця розташування насосної станції, що йде наступною після першої:

Рис. 4. Залежність меншого кореня нерівності (8) від величини σ Рис. 5. Залежність більшого кореня нерівності (8) від величини σ

$$\delta \frac{g+a}{1+a} \chi \gamma - n\tilde{\phi}\tilde{\gamma} \frac{b+a}{1+a} k_Z l - \rho \left(\frac{\Delta Z(l)}{\Delta Z} - \frac{a}{1+a} \frac{l}{L} \right) \Delta Z \geq H_S, \quad (13)$$

де l – довжина трубопроводу між першою і другою насосними станціями;

$\Delta Z(l)$ – різниця геодезичних висот магістралі на ділянці між першою і другою насосними станціями;

δ – коефіцієнт, який враховує підпір на насосі першої станції;

H_S – найменше допустиме значення напору патрубку насоса другої станції, який у всмоктує неньютонівську рідину [1-3; 5; 8].

Характер залежності нерівності (13) від довжини трубопроводу між насосними станціями визначається геодезичним профілем траси. У загальному випадку, якщо припустити можливість його апроксимації поліномом другого ступеня, щодо безрозмірної довжини трубопроводу:

$$\frac{\Delta Z(l)}{\Delta Z} = a_0 + a_1 \frac{l}{L} - a_2 \left(\frac{l}{L} \right)^2,$$

то нерівність (13) зводиться до квадратного рівняння з двома додатними корінням, і розв'язання нерівності зводиться до обмеження відносної довжини трубопроводу між насосними станціями меншим з цих коренів:

$$\begin{aligned} \frac{l}{L} &\leq p - \sqrt{p^2 - q}, \\ p &= \frac{n\tilde{\phi}\chi\gamma}{2\rho\Delta Z a_2} \frac{b+a}{1+a} + \frac{a_1}{2a_2} - \frac{1}{2a_2} \frac{a}{1+a}, \\ q &= \frac{g+a}{1+a} \frac{\delta\chi\gamma}{\rho\Delta Z a_2} - \frac{a_0}{a_2} - \frac{H_S}{\rho\Delta Z a_2}, \end{aligned}$$

де a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти апроксимації.

Повторюючи описану процедуру, визначають положення інших насосних станцій.

Розрахункове розташування насосних станцій не завжди може задовольняти проектувальників, крім того, при використанні реагентів або змішуванні декількох неньютонівських рідин тиск на вході чергового насоса може знизитися нижче допустимого значення, яке потрібно передбачити при проектуванні або перевірити перед рекомендацією такого методу управління.

Розглянуті залежності (12) дозволяють уявити втрати напору і натиск насоса у вигляді суми двох доданків: які не залежить від реологічних характеристик НРВВ, що перекачуються, і змінюється при впливі на ефективну в'язкість і початкове дотичне напруження:

$$\begin{aligned} H(l) &= \bar{H}(l) + \tilde{H}(l), \quad h = \bar{h} - \tilde{h}, \\ \bar{H}(l) &= n\tilde{\phi}\chi\gamma \frac{l}{L} + \rho \left(\frac{\Delta Z(l)}{\Delta Z} - \frac{l}{L} \right) \Delta Z, \\ \tilde{H}(l) &= n\tilde{\phi}\chi\gamma \frac{b-1}{a+1} \frac{l}{L} + \frac{\rho}{a+1} \frac{\Delta Z}{L}, \\ \bar{h} &= \chi\gamma, \quad \tilde{h} = \chi\gamma \frac{1-g}{1+a}. \end{aligned}$$

Таке подання ВНХ трубопроводу і насосів дозволяє після нескладних перетворень нерівності (13) і формул (11) дослідити вплив зміни реоло-

гічних характеристик НРВВ на продуктивність магістрального трубопроводу і необхідні місця розміщення насосних станцій.

Якщо припустити, що реологічні характеристики НРВВ змінюються пропорційно своїм початковим значенням:

$$\eta' = x\eta, \quad \tau'_0 = k\tau_0,$$

то нескладно показати, що відповідні змінні складові в ВНХ магістралі і насоса, а також вираз для витрати НРВВ, можна записати в такому вигляді:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1-\Theta k}{1+ax} \frac{G}{n\tilde{\phi}}, \quad \tilde{H}(l) = n\tilde{\phi}\chi\gamma \frac{bk-1}{ax+1} \frac{l}{L} + \frac{\rho}{ax+1} \frac{\Delta Z}{L}, \\ \tilde{h} &= G' \frac{1-\Theta'k}{1+xa}, \quad G' = \chi\gamma - \frac{\rho\Delta Z}{n}, \quad \Theta' = \frac{k_Z L \tau_0}{nG'\lambda}. \end{aligned}$$

Отримані результати дозволяють науково обґрунтовано визначати величину гідравлічного ухилу залежно від витрат НРВВ, ПДН і в'язкості, а також діаметру трубопроводу і адекватно проводити технологічний розрахунок магістральних трубопроводів при використанні реагентів або інших способів регулювання шляхом зміни реологічних характеристик.

Висновки. Таким чином, отримані формули дозволяють визначити гідродинамічну особливість напірної течії НРВВ, яка полягає у тому, що залежність гідравлічного ухилу від ПДН і витрати виражаються лінійною суперпозицією доданків, що містять дані величини, а коефіцієнти пропорційності не залежать від реологічних характеристик середовища, властивостей матеріалу, що транспортується, і діаметру трубопроводу. Залежно від величини відносного радіуса ядра потоку ці коефіцієнти можна приймати постійними величинами в інтервалах менше і більше 0,9.

Вперше для магістральних трубопроводів поставлено і вирішено завдання технологічного розрахунку при транспортуванні неньютонівських рідин високої в'язкості, що передбачає управління їх реологічними властивостями за рахунок введення поверхнево активних реагентів або гетерогенного середовища меншої в'язкості.

Бібліографічний список / References

1. Быков, Л. И. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов: учеб. пособие / Л. И. Быков, Ф. М. Мустафин, С. К. Рафиков, А. М. Начаваль, А. Е. Лаврентьев. – Санкт-Петербург: Недра, 2006. – 824 с.

Byikov L. I., Mustafin F. M., Rafikov S. K., Nachaval A. M., Lavrentev A. E. (2006). *Tipovyye rascheti pri sooruzhenii i remonte gazonefteprovodov*. Sankt-Peterburg: Nedra, 824 p.

2. Трубопроводный транспорт нефти и газа: учеб. для ВУЗов / Р. А. Алиев, В. Д. Белоусов,

А. Г. Немудров, В. А. Юфин, Е. И. Яковлев. – М.: Недра, 1988. – 368 с.

Aliev R. A., Belousov V. D., Nemudrov A. G., Yufin V. A., Yakovlev E. I. (1988). *Truboprovodnyiy transport nefti i gaza*. Moscow: Nedra, 368 p.

3. Семененко Е. В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титанцирконовых россыпей / Евгений Владимирович Семененко. – Киев: Наукова думка, 2011. – 232 с.

Semenenko Ye. V. (2011). *Nauchnyie osnovyiy tehnologiy gidromehanizatsii otkryitoy razrabotki titan-tsirkonovyyih rossyipey* [The scientific basis of the technologies of hydromechanization of open development of titanium-zirconium placers], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine, 232 p.

4. Semenenko E., Nykyforova N., Tatarko L. The method of hydraulic gradient and critical velocity calculation for hydrotransportation of particles with substantially different densities / E. Semenenko, N. Nykyforova, L. Tatarko // 15th International Freight Pipeline Society Symposium, June, 24–27, 2014. – Prague, 2014. – Pp. 248–256.

5. Новоселов В. Ф. Трубопроводный транспорт нефти и газа. Перекачка вязких и застывающих нефтей. Специальные методы перекачки: учеб. пособие / В. Ф. Новоселов, А. А. Коршак. – Уфа: Изд. Уфимского нефт. Ин-та, 1988. – 108 с.

Novoselov V. F., Korshak A. A. (1988). *Truboprovodnyiy transport nefti i gaza. Perekachka vyazkih i zastyvayushchih neftey. Spetsialnyie metodyi perekachki*: Uchebnoe posobie. Ufa: Izd. Ufimskogo neft. In-ta, 108 p.

6. Карасик В. М. Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов / В. М. Карасик, И. А. Асауленко, Ю. К. Витошкин. – К.: Наук. думка, 1976. – 156 с.

Karasik V. M., Asaulenko I. A., Vitoshkin Yu. K. (1976). *Intensifikatsiya gidrotransporta produktov i othodov obogascheniya gorno-obogatitelnyih kombinatov*. K.: Naukova dumka, 156 p.

7. Дмитриев Г. П. Напорные гидротранспортные системы / Г. П. Дмитриев, Л. И. Махарадзе, Т. Ш. Гочиташвили. – М.: Недра, 1991. – 304 с.

Dmitriev G. P., Maharadze L. I., Gochitashvili T. Sh. (1991). *Napornyye gidrotransportnyie sistemyi*. Moscow: Nedra, 304 p.

8. Круть О. А. Водовугільне паливо / О. А. Круть. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.

Krut O. A. (2002). *Vodovugilne palivo*. Kiev: Naukova Dumka, 172 p.

9. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости / У. Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 155 с.

Uilkinson U. L. (1964). *Nenyutonovskie zhidkosti*. Moscow: Mir, 155 p.

10. Яхно О. М. Гідравліка не ньютонівських рідин: навч. посіб. / О. М. Яхно, І. В. Желяк. – К.: Вища школа, 1995. – 199 с.

Yahno O. M. *Gidravlika ne nyutonivskih ridin* (1995). Kiev: Vischa shkola, 199 p.

11. Buckingham A. C. Interactions in multidimensional two fluid computations in turbulent flow / A. C. Buckingham, W. J. Siekhaus // AIAA Pap. – 1981. – № 346. – P. 15.

12. Яхно О. М. Основы реологии полимеров / О. М. Яхно, В. Ф. Дубовицкий. – К.: Вища школа, 1976. – 188 с.

Yahno O. M., Dubovitskiy V. F. (1976). *Osnovyiy reologii polimerov*. Kiev: Vischa shkola, 188 p.

13. Смолдырев А. Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А. Е. Смолдырев, Ю. К. Сафонов. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

Smoldyirev A. E., Safonov Yu. K. (1989). *Truboprovodnyiy transport kontsentrirrovannyih gidrosmesey*. Moscow: Mashinostroenie, 256 p.

14. Світлий Ю. Г. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів / Ю. Г. Світлий, О. А. Круть. – Донецьк.: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.

Svitliy Yu. G., Krut O. A. (2010). *Gidravlichniy transport tverdiy materialiv*. Donetsk: Shidniy vidavnichiy dim, 268 p.

15. Semenenko E. Grounds of parameters of high concentrated pulps storage technologies / E. Semenenko, S. Kirichko // Theoretical and practical solutions of mineral resources mining; Pivnyak, Bondarenko & Kovalevska (eds.), 2015 Taylor & Francis Group, London. – P. 373–377.

16. Александров В. И. Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации / В. И. Александров. – Санкт-Петербург: СПбГИ (ТУ), 2000. – 117 с.

Aleksandrov V. I. (2000). *Metodyi snizheniya energozatrat pri gidravlicheskom transportirovanii smesey vyisokoy kontsentratsii*. Sankt-Peterburg: SPGGI (TU), 117 p.

Цель. Обоснование научных основ технологического расчета магистральных трубопроводов, перекачивающих неньютоновские жидкости высокой вязкости, с учетом особенностей поведения решения полного уравнения Букингама в различных интервалах величин, входящих в него.

Методика. Анализ современных методов расчета рациональных параметров режимов транспортировки неньютоновских жидкостей высокой вязкости позволил обосновать специфику реологических характеристик этих жидкостей с учетом возможности управления их реологическими свойствами за счет введения поверхностно активных реагентов или гетерогенной среды меньшей вязкости.

Результаты. Обоснованно научно-методическое обеспечение расчета рациональных параметров режимов транспортировки неньютоновских жидкостей высокой вязкости для магистральных трубопроводов с целью обеспечения повышения

эффективности их функционирования. При этом в зависимостях, предложенных в работе, учтена возможность оценки изменения параметров и режимов работы магистральных трубопроводов при принудительном регулировании реологическими параметрами перекачиваемой среды.

Научная новизна. На основе анализа современных методов технологических расчетов параметров функционирования магистральных трубопроводов определена гидродинамическая особенность напорного течения неньютоновских жидкостей высокой вязкости, которая заключается в том, что зависимость гидравлического уклона от начального касательного напряжения и расходы выражается линейной суперпозицией слагаемых, содержащих данные величины, а коэффициенты пропорциональности не зависят от реологических характеристик среды, свойств транспортируемого и диаметра трубопровода.

Практическая значимость. Заключается в усовершенствовании методов расчета рациональных параметров при процессах транспортировки пульп, гидросмесей и жидкостей высокой вязкости в магистральных трубопроводах. Эти методы позволяют определять значение диаметра трубопровода, выбор показателей насосов с учетом эффективной вязкости, а также начального касательного напряжения высоковязких неньютоновских жидкостей с целью снижения энергоемкости транспортировки, ресурсосбережения и повышения экологической безопасности промышленных районов.

Ключевые слова: неньютоновская жидкость высокой вязкости, реологические характеристики, магистральный трубопровод, технологический расчет.

Purpose. Scientific basis substantiation for the technological calculation of main pipelines. Which are pumping high viscosity non-Newtonian liquids, taking into account the peculiarities behavior of the full Buckingham equation solution in various intervals of the values included in it.

Methodology. The modern methods analysis for calculating rational parameters of the high viscosity non-Newtonian fluid viscosity transportation modes which made

it possible to substantiate the specificity of the rheological characteristics of these liquids, taking into account the possibility of controlling their rheological properties by introducing surface-active reagents or a heterogeneous medium of lower viscosity.

Findings. The scientific and methodological support for the calculation of the rational parameters of high viscosity non-Newtonian liquids transportation modes for main pipelines is substantiated, in order to ensure an increase in the efficiency of their operation. At the same time, the dependencies proposed in the work take into account the possibility of evaluating changes in the main pipelines operation parameters and modes with forced regulation by the rheological parameters of the pumped medium.

Originality. Based on the modern methods of technological calculations of the main pipelines operation parameters analysis, the hydrodynamic feature of the high viscosity non-Newtonian fluids is determined, which is that the dependence of the hydraulic slope on the initial tangential stress and costs are expressed by a linear superposition of the terms containing these values, and the proportional coefficients are independent from the rheological characteristics of the environment, the properties of the transported and the pipeline diameter.

Practical value. It consists in improved methods for calculating rational parameters for the transportation of slurries, slurries and high viscosity liquids in main pipelines. These methods allow to determine the pipeline diameter value, the choice of pumps indicators, taking into account the effective viscosity, as well as the initial tangential stress of high viscosity non-Newtonian fluid in order to reduce the energy intensity of transportation, save resources and improve the environmental safety of industrial areas.

Key words: high viscosity non-Newtonian fluid, rheological characteristics, main pipeline, technological calculation.

Рекомендована до друку
д. т. н. І. А. Ковалевською

Надійшла 11.02.2019