

Н. Г. ШЕВЧЕНКО, О. Л. ШУДРИК, О. С. КОВАЛЬ, О. В. ДОРОШЕНКО

ВРАХУВАННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДОНАФТОВОЇ ЕМУЛЬСІЇ НА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА

Проведено аналіз ряду наукових досліджень по вивченню властивостей і реологічних характеристик водонафтових емульсій, узагальнені експериментальні данні для визначення залежності ефективної в'язкості в залежності від об'ємної частки води в емульсії. Встановлено, що найбільш критичним діапазоном обводнення нафти є 50-80 % коли в'язкість емульсії різко збільшується у декілька разів. Виконано дослідження стаціонарного руху в'язкої неньютонівської рідини в робочих каналах ЕВН5-80 шляхом чисельного моделювання в пакеті *OpenFOAM*. Для розрахунків вибрана модель неньютонівської рідини Гершеля-Балклі, яка найточніше описує поведінку водонафтової емульсії. Отримана і проаналізована візуалізація потоку в проточній частині міри насоса. Досліджено вплив реологічних властивостей водонафтових емульсій на характеристики відцентрового насоса.

Ключові слова: відцентровий насос, водонафтова емульсія, неньютонівська рідина, ефективна в'язкість, чисельне моделювання, інтегральні характеристик насосу.

Проведен анализ ряда научных исследований по изучению свойств и реологических характеристик водонефтяных эмульсий, обобщены экспериментальные данные для определения зависимостей эффективной вязкости ВНЭ от объемной доли воды в эмульсии. Установлено, что наиболее критичным диапазоном обводнения нефти является 50–80 %, когда вязкость эмульсии резко увеличивается в несколько раз. Выполнено исследование стационарного движения вязкой неньютоновской жидкости в рабочих каналах ЭЦН5-80 путем численного моделирования в пакете *OpenFOAM*. Для расчетов выбрана модель неньютоновской жидкости Гершеля-Балкли, которая наиболее точно описывает поведение водонефтяной эмульсии. Получена и проанализирована визуализация потока в проточной части ступени насоса. Исследовано влияние реологических свойств водонефтяных эмульсий на характеристики центробежного насоса.

Ключевые слова: центробежный насос, водонефтяная эмульсия, неньютоновская жидкость, эффективная вязкость, численное моделирование, интегральные характеристики насоса.

A number of scientific studies on the properties and rheological characteristics of water-oil emulsions have been analyzed, experimental data have been generalized to determine the dependencies of the effective viscosity of WOE from the volume fraction of water in the emulsion. It has been established that the most critical range of oil flooding is 50–80 %, when the viscosity of the emulsion sharply increases several times. A study is made of the steady motion of a viscous non-Newtonian fluid in the working channels of ESP5-80 by numerical simulation in the *OpenFOAM* package. For the calculations, a model of the non-Newtonian Herschel-Bulkley fluid is chosen, which most accurately describes the behavior of the water-oil emulsion. The visualization of the flow in the flow-through part of the pump's degree is obtained and analyzed. The influence of the rheological properties of water-oil emulsions on the characteristics of a centrifugal pump is studied.

Keywords: centrifugal pump, water-oil emulsion, non-newtonian fluid, effective viscosity, numeral design, pump integral characteristics

Вступ. Тривала експлуатація нафтових родовищ і застосування технологій підвищення нафтовіддачі шляхом заводнювання нафтоносних пластів призводять до істотного збільшення у складі нафтової продукції води пласта. По своєму хімічному складу нафта схильна до утворення емульсій, оскільки до її складу входять активні емульгатори-асфальтени і смоли. Тому збільшення об'ємної концентрації води в нафті сприяє утворенню водонафтових емульсій (ВНЕ) з підвищеною в'язкістю і зміні характеристик реологій водонафтової суміші. Найбільш критичним діапазоном обводнення нафти є 50-80 % когда в'язкість емульсії різко збільшується у декілька разів. Це пояснюється появою додаткової дотичної напруги на міжфазній поверхні. Наприклад, при досить великій в'язкості початкової нафти обводнення нафтової продукції може привести до критичного падіння продуктивності заглибного насоса, перевантаження його електродвигуна. Оскільки водонафтові емульсії за своїми реологічними властивостями є типовими представниками неньютонівських рідин, то необхідно оцінити вплив властивостей реологій ВНЕ на величину гідравлічних опорів в робочих органах електровідцентрових насосів (ЕВН), а також на їх робочі характеристики. Нині актуальним напрямом є рішення завдань гідродинаміки в складних технічних об'єктах з урахуванням реальних характеристик середовища

(неньютонівські рідини, гетерогенні суміші) за допомогою сучасних програмних продуктів. Останнім часом опублікована досить велика кількість робіт по чисельному моделюванню течії неньютонівських рідин в циліндричних трубах, кільцевих просторах. Це пов'язано з необхідністю врахування основних параметрів ВНЕ при транспортуванні їх по промислових трубопроводах. Основною концепцією цих робіт є вибір математичної моделі (ММ) неньютонівської рідини, дискретизація розрахункової області поблизу твердих стінок, моделей в'язкості для турбулентних і ламінарних течій, моделей турбулентності, тестування чисельного рішення.

Інформаційний огляд. Вплив реологічних властивостей в'язкої рідини на роботу ЕВН. Вплив реологічних властивостей в'язкої рідини на роботу ЕВН. Для оцінки працездатності відцентрових насосів на водонафтових емульсіях необхідно коротко зупинитися на найважливіших властивостях ВНЕ. До основних параметрів, що характеризують емульсії, відносяться: співвідношення фаз, в'язкість, швидкість зсуву, дисперсність, стійкість. Ці параметри взаємопов'язані. У роботах [1–6] представлений аналіз результатів досліджень з вивчення особливостей формування міжфазних поверхонь емульсій, підвищення їх в'язкості при різному вмісті води і дисперсності, а також вплив води на реологічні властивості ВНЕ. У типовому випадку двофазної

системи перша з речовин (дисперсна фаза) дрібно розподілена в другому (дисперсійне середовище). При відносно малій об'ємній концентрації частинок дисперсної фази ефективна в'язкість такої дисперсної системи в порівнянні зростає, зберігаючи властивості ньютонівської рідини. При збільшенні об'ємної концентрації частинок дисперсної фази розміри крапель в емульсії збільшуються. Взаємодії між частинками дисперсної фази посилюються. Вони здатні деформуватися і під дією зсувних напружень певним чином орієнтуються в потоці. З'являються додаткові напруги зсуву на міжфазних поверхнях, внаслідок чого ефективна в'язкість рідини значно збільшується. Прийнято вважати, що при збільшенні вмісту води відбувається зміна типу (інверсія) промислових емульсій. При цьому «точка інверсії» ототожнюють з моментом досягнення максимуму в'язкості, після якого спостерігається в'язкість емульсії починає поступово знижуватися – рис. 1. Аналіз реологічних властивостей ВНЕ нафтових

промислів, представлених в роботах [1, 3, 4, 6], показав, що в діапазоні об'ємного водовмісту $0,3 < B < 0,8$ порушується лінійна залежність дотичних напружень τ від швидкості зсуву $\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial z}$ – модель водонафтової емульсії відноситься до неньютоновських рідини. На рис. 2 показано реологічні криві ВНЕ [4]. Аналіз промислових реологічних характеристик, котрі наведені на рис. 2 та табл. 1, показує, що ВНЕ з водовмістом $B = 0,5 \div 0,75$ відноситься до неньютонівської рідини типу Гершеля-Балклі [7, 8]:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

де τ_0 – межа текучості при швидкості зсуву $\dot{\gamma}$, що дорівнює 0; K – міра консистенції рідини, Па·с; n – показник, що характеризує степінь відхилення неньютонівської рідини від ньютонівської.

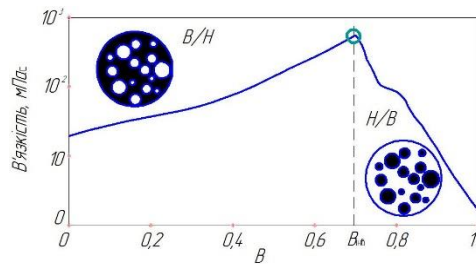


Рис. 1 – Залежність ефективної в'язкості рідини від водовмісту B . Інверсія промислових ВНЕ [3]

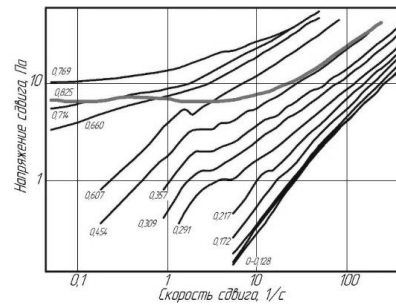


Рис. 2 – Реологічні криві ВНЕ. Промислові дані [4].

Таблиця 1 – Узагальнення параметрів промислових даних

B	1	20	30	45	60	70	77	83	95
K	10^{-3}	0,02	0,25	1,8	5	9	10	0,6	10^{-6}
n	1	1	0,75	0,53	0,5	0,48	0,45	0,7	1
τ_0	0	0	0	0	0	3	10	7	0

Експериментальні дослідження водонафтової емульсії в насосах типу ЕВН були представлені в роботах [1, 3, 6]. У цих роботах відзначається, що вплив ВНЕ на характеристики насоса істотно впливають на насоси низької та середньої швидкохідності в діапазоні водосодержання $0,3 < B < 0,8$, де значення ефективної в'язкості рідини зростає в кілька разів.

В роботі Каплана Л. С. [3] наводяться результати обробки проведених досліджень впливу обводнення продукції на коефіцієнт відносної подачі насоса ЕВН – рис. 3. З рис. 3 видно, що коефіцієнти відносної подачі ($Q/Q_{\text{онт}}$) залежать від вмісту води в суміші і мають мінімум для всіх насосів при обводненості B в районі 60-70%. Продуктивність ЕВН висока при вмісті води до 20% і понад 80%. Крім цього було встановлено, що вплив високов'язкої емульсії на насоси з більшою подачею виражене менше.

В роботі Гумерова К. О [1] пропонується за значенням швидкості зсуву визначати ефективну в'язкість емульсії для конкретної подачі насоса і діаметра НКТ. Результати визначення ефективної в'язкості від об'ємної витрати насоса представлені на рис. 4. Встановлено, що в залежності від норми відбору, при інших рівних умовах, швидкість течії змінюється, отже змінюється напруга зсуву в потоці, тобто:

- при малих нормах відбору (малих напругах зсуву) ефективна в'язкість ВНЕ максимальна,
- зі збільшенням норми відбору (збільшенні напруги зсуву) ефективна в'язкість зменшується і досягає деякого мінімального значення, яке не змінюється при збільшенні норми відбору через досягнення в системі граничної орієнтації частинок в потоці.

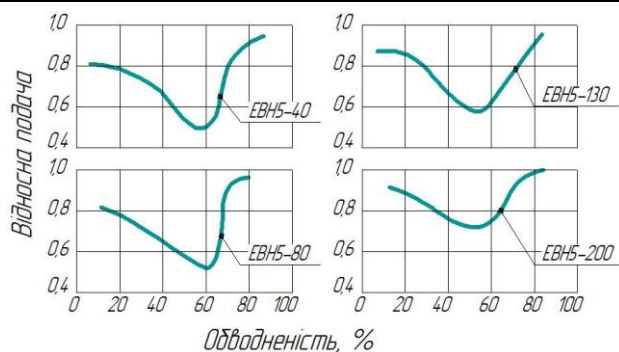


Рис. 3 – Зміна відносної подачі ЕВН в залежності від обводненості [3]

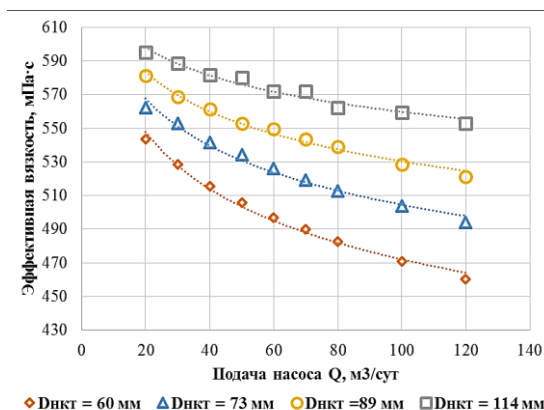


Рис. 4 – Залежність ефективної в'язкості ВНЕ від подачі насоса при $B=60\%$ [1]

Загальні відомості математичного моделювання неньютоновської в'язкої рідини. У великій кількості завдань класичної механіки в'язких нестисливих рідин використовується лінійний закон зв'язку тензора в'язких напружень τ з тензором швидкостей зсуву $\dot{\gamma} = S_{ij}$ (швидкостей деформації):

$$\tau = 2\mu S \quad (2)$$

Складові тензора швидкостей деформації мають вигляд:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (3)$$

Однак, багато рідини, що беруть участь в технологічних процесах, при своїй течії проявляють нелінійність в'язкості, а також інші властивості, такі як пластичність, пружність. Існує багато різних методів вивчення неньютоновських рідин.

Один із найефективніших підходів – теоретико-реологічний, коли для деякого класу рідин, що володіють подібними властивостями, записується узагальнена реологічна модель і на її основі пояснюється поведінка рідин цього класу [7–10]. Реологія середовища задається трьома коефіцієнтами: показник ступеня середовища n ($n < 1$), показник консистенції k_v і границя текучості в'язкопластичної рідини τ_0 , згідно формулі (1). У розрахунки гідродинамічних процесів неньютоновських рідин

вводять поняття ефективної в'язкості η . Для нафтових родовищ характерно, що ВНЕ може бути як в'язкою ньютонівською рідиною, так і неньютонівською в'язкопластичною рідиною, поведінка якої описується однією з трьох найбільш поширених реологічних моделей: степенева рідина, Бінгамівська рідина і рідина Гершеля-Балклі [1, 4, 8]. Залежності ефективної в'язкості для цих трьох моделей реології робочого середовища мають вигляд:

$$\eta(\dot{\gamma}) = k_v \dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{— модель степеневої рідини};$$

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{k_v \dot{\gamma} + \tau_0}{\dot{\gamma}} \quad \text{— модель Бінгамівської рідини};$$

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{k_v \dot{\gamma}^n + \tau_0}{\dot{\gamma}} \quad \text{— модель рідини Гершеля-Балклі}.$$

Дослідження показали [7, 10], що модель Бінгамівської рідини не в повній мірі описує реологічні властивості ВНЕ при низьких швидкостях зсуву, перш за все тому, що не передбачає існування характерної для ВНЕ границі текучості. Для врахування напруги, необхідного для ініціації руху рідини (границі текучості) рекомендується використовувати модифікований [11] степеневий закон або модель Гершеля-Балклі.

У роботах [9, 11] представлені результати чисельних досліджень турбулентних течій неньютоновських моделей рідини в круглій циліндричній трубці, в кільцевих зазорах з ексцентриситетом, в прямокутних кавернах.

Завдяки можливостям сучасної програмної продукції *OpenFOAM* встановлювати опції для різних моделей ньютонівської і неньютонівської рідини, в даній роботі пропонується провести дослідні розрахунки гідродинаміки неньютонівської рідини в каналах проточної частини ступені насоса ЕВН.

Постановка задачі. Провести дослідження стаціонарного руху в'язкої неньютонівської рідини в робочих каналах насоса ЕВН5-80 шляхом чисельного моделювання в пакеті *OpenFOAM* [12]. Оцінити вплив моделі неньютонівської рідини на гідродинаміку в ступені ЕВН, провести порівняльний аналіз основних характеристик ЕВН, отриманих класичними формулами перерахунку і за допомогою чисельного моделювання неньютонівської водонафтової емульсії (при обводненні нафти 50-70%). Узагальнити експериментальні дані для визначення залежності ефективної в'язкості ВНЕ $\mu_{\text{еф}}$ від об'ємної частки води в емульсії – B та точці інверсії – $B_{\text{інв}}$.

Математична модель гідродинаміки в'язкої неньютонівської рідини. Основне допущення ММ – реологія робочого середовища описується узагальненою ньютонівською моделлю, в якій середовище розглядається як нелінійна в'язка рідина з введенням ефективної в'язкості, що залежить від швидкості деформації середовища.

Для узагальненої ньютонівської моделі тензор в'язких напружень τ визначається наступним чином:

$$\tau = 2\mu_{\text{еф}} S, \quad (4)$$

де $\mu_{\text{эф}}$ – ефективна в'язкість; S – тензор швидкостей деформації.

Апроксимуючий гладкий вираз для ефективної в'язкості на випадок течії рідини Гершеля-Балклі вводить як [9]:

$$\mu_{\text{эф}} = \frac{\left[k_v \dot{\gamma}^n + \tau_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{m\dot{\gamma}}{\dot{\Gamma}}\right) \right) \right]}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

де m – експонентний множник (приймають від 500 до 1000), $\dot{\Gamma}$ – характерна швидкість зсуву.

Для ступені ЕВН значення характерної швидкості зсуву $\dot{\Gamma}$ обчислюється за формулою:

$$\dot{\Gamma} = \frac{\sqrt{V_{m2}^2 + U_2^2}}{D_r} \quad \text{або} \quad \dot{\Gamma} = \frac{8U_2}{D_2}, \quad (7)$$

де D_r – гідравлічний діаметр межлопатевого каналу; D_2 – вихідний діаметр робочого колеса; V_{m2} , U_2 – меридіональна та окружна швидкості на виході з робочого колеса.

Основні рівняння ММ стаціонарного руху узагальненої ньютонівської рідини не відрізняються від класичної моделі ньютонівської рідини. Для опису розвинених турбулентних течій використовується підхід осереднення по Рейнольдсу вихідних рівнянь гідродинаміки. Для неньютонівської рідини осереднення рівняння нерозривності та імпульсу дає рівняння Рейнольдса з урахуванням пульсацій в'язкості [9]:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot U &= 0, \\ \rho U \cdot \nabla U &= -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu S) + F + \\ &+ \nabla \cdot \left(-\rho \langle u'u' \rangle \right) + \nabla \cdot \left(\langle 2\mu' S' \rangle \right). \end{aligned} \quad (8)$$

де ρ – густина рідини; U – вектор швидкості; p – тиск; F – виражає дію відцентрових і коріолісових сил.

Замикання системи рівняння (8) описано в роботі [9] і засноване на двопараметричній k - ε моделі турбулентності, узагальненої на випадок неньютонівського середовища з ефективною в'язкістю:

$$\begin{aligned} \rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \rho \varepsilon - 2 \langle \mu' S'_{ij} \rangle S_{ij}, \\ \rho U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - \\ &- C_2 \rho P_k + \left\langle u'_k \frac{\partial \hat{\mu}}{\partial x_k} (2S'_{ij} S'_{ij}) \right\rangle, \end{aligned} \quad (9)$$

де $P_k = \tau' \cdot \nabla U$ – генерація турбулентності.

У турбулентних течіях молекулярна в'язкість неньютонівського середовища залежить від флюктуючої швидкості зсуву (основна відмінність від ньютонівських рідин). При описі турбулентної течії необхідно оперувати з осередненою величиною

ефективної молекулярної в'язкості, яка є функцією турбулентних характеристик потоку.

Верифікація математичної моделі неньютонівської рідини в циліндричній трубі.

Проведено рішення тестового завдання течії неньютоновської рідини в циліндричній трубі ($L=2000$ мм, $D=25,4$ мм) за допомогою пакету *OpenFOAM*. Прийнята модель неньютонівської рідини – модель Гершеля-Балклі за формулою 1, де τ_0 – межа текучості при швидкості зсуву, що дорівнює 0; k – міра консистенції рідини, $K=2,596$ Па·с; n – показник, що характеризує степінь відхилення неньютонівської рідини від ньютонівської, $n = 0,415$.

На рис. 5 представлені епюри швидкості для ньютонівської і неньютоновської рідини.

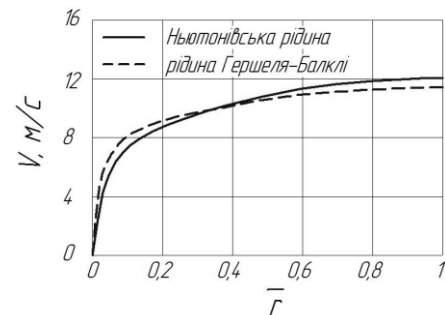


Рис. 5 – Епюра швидкості для двох моделей рідини в циліндричній трубі

Згідно [7, 8] втрати тиску по довжині труби для неньютонівської рідини визначаються за виразом:

$$\Delta P = 4c_f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\rho V^2}{2},$$

де c_f – коефіцієнт опору тертя.

Для неньютонівської рідини застосовують узагальнене число Рейнольдса Re^* [7, 8]:

$$Re^* = \frac{D^n V^{2-n}}{\frac{k}{8} \left(\frac{6n+2}{n} \right)^n \cdot \rho}.$$

Розрахунки коефіцієнта опору тертя c_f проведені в прямій циліндричній трубі для трьох режимів. Результати розрахунку в пакеті *OpenFOAM* і експериментальні дані [7, 8] представлені на рис. 6.

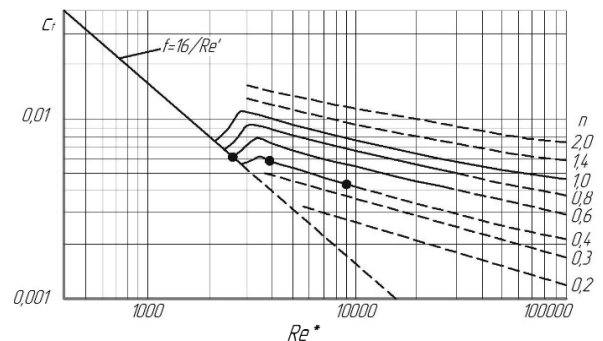


Рис. 6 – Зіставлення чисельних і експериментальних значень коефіцієнта опору в трубі

Результати розрахунку математичної моделі неньютонівської рідини для ступені насоса типу ЕВН. Були проведені розрахунки тривимірної течії в'язкої неньютонівської рідини (модель Гершеля-Балклі) в ступені насоса ЕВНД5-80. На рис. 7

представлена візуалізація розподілу відносної швидкості для ньютонівської і неньютонівської моделей. Візуалізація потоку в РК (рис. 7, б) показує зменшення відривних зон в межлопатевоу каналі

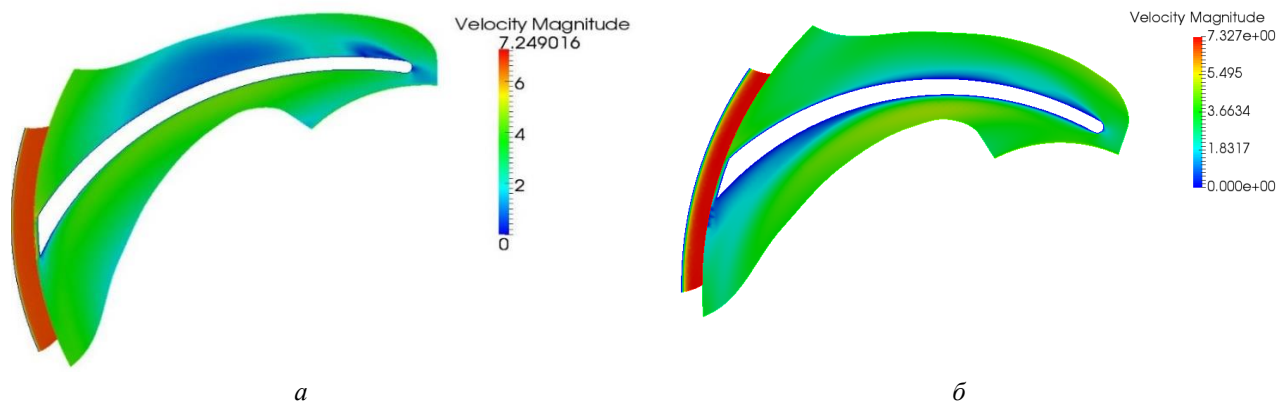


Рис. 7 – Розподіл відносної швидкості в каналі РК для ньютонівської (а) та неньютонівської (б) рідини

На рис. 8 і рис. 9 представлені розрахункові характеристики ступені ЕВН для моделі неньютонівської рідини з ефективною в'язкістю 20 і 50 мПа·с і їх порівняння з експериментальними даними [13]. Аналіз результатів показує незначну зміну напору для в'язкості 20 мПа·с у всьому діапазоні подач. При збільшенні в'язкості до 50 мПа·с спостерігається зменшення напору на 10-15 % щодо значень напірної характеристики для ньютонівської рідини. Значення ККД ступені збільшується при течії неньютонівської рідини: на 5-7 % при в'язкості 20 мПа·с і на 3-4 % при в'язкості 50 мПа·с у всьому діапазоні подач насоса, що підтверджується візуалізацією потоку (рис. 7, б), що можна пояснити зменшенням зон вихороутворення.

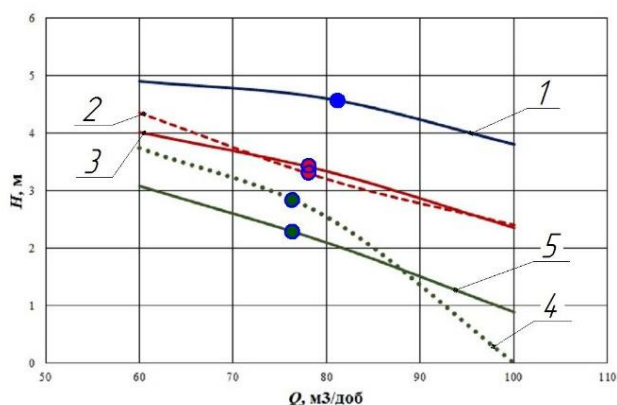


Рис. 8 – Напірні характеристики для ВНЕ і ньютонівської рідини:

- 1 – ньютонівська рідина $\mu_{\text{еф}} = 1$ мПа·с; 2 – ньютонівська рідина $\mu_{\text{еф}} = 20$ мПа·с; 3 – неньютонівська рідина $\mu_{\text{еф}} = 20$ мПа·с; 4 – ньютонівська рідина $\mu_{\text{еф}} = 50$ мПа·с; 5 – неньютонівська рідина $\mu_{\text{еф}} = 50$ мПа·с

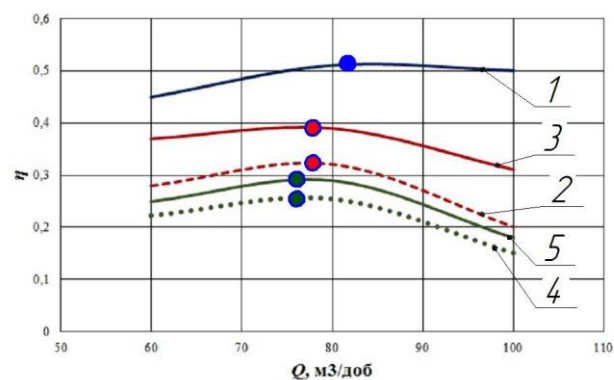


Рис. 9 – Енергетичні характеристики для ВНЕ і ньютонівської рідини:

- 1 – ньютонівська рідина $\mu_{\text{еф}} = 1$ мПа·с; 2 – ньютонівська рідина $\mu_{\text{еф}} = 20$ мПа·с; 3 – неньютонівська рідина $\mu_{\text{еф}} = 20$ мПа·с; 4 – ньютонівська рідина $\mu_{\text{еф}} = 50$ мПа·с; 5 – неньютонівська рідина $\mu_{\text{еф}} = 50$ мПа·с

Узагальнені результати прогнозування характеристик ступеня ЕВН. Для визначення характеристик насоса при його роботі на реальній рідині необхідно отримати коефіцієнти перерахунку його характеристик.

Коефіцієнти перерахунку K_Q , K_H , K_η залежать від числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{\sqrt[3]{Q_v^2 \cdot n}}{\mu_{\text{еф}}} \rho_{\text{см}} \quad (10)$$

Аналіз чисельних досліджень течії ВНЕ з діапазоном в'язкості $\mu = 5 \div 100$ мПа·с в ступенях насосів швидкохідності $n_s = 80 \div 125$ дозволяє визначити функціональні залежності коефіцієнтів перерахунку подачі, напору та ККД:

$$K_H = 1 - a_0 \left(\frac{Q/Q_{\text{опт}}}{Re} \right)^{a_1}; \quad (11)$$

$$K_Q = \begin{cases} b_0 + b_1 \cdot \ln(Re) + b_2 \cdot (\ln(Re))^2 & \text{при } Re \leq 10^5 \\ 1 & \text{при } Re > 10^5 \end{cases}; \quad (12)$$

$$K_\eta = \begin{cases} c_0 + c_1 \ln(Re) + c_2 (\ln(Re))^2 & \text{при } Re \leq 10^5 \\ 1 & \text{при } Re > 10^5 \end{cases}. \quad (13)$$

Коефіцієнти для визначення перерахункових залежностей в формулах (11)-(13) представлені в табл. 2 та на рис. 10.

Таблиця 2 – Коефіцієнти для визначення перерахункових залежностей K_Q, K_H, K_η

a_0	a_1	b_0	b_1	b_2	c_0	c_1	c_2
5,6	0,42	-0,257	0,252	-0,013	-0,898	0,276	$-9,71 \cdot 10^3$

Тому для визначення параметрів напору, подачі та ККД:

$$H_{\text{внв}}(Q, v) = H_B(Q) \cdot K_H \left(\frac{Q/Q_{\text{опт}}}{Re(Q_{\text{опт}}, v)} \right), \quad (14)$$

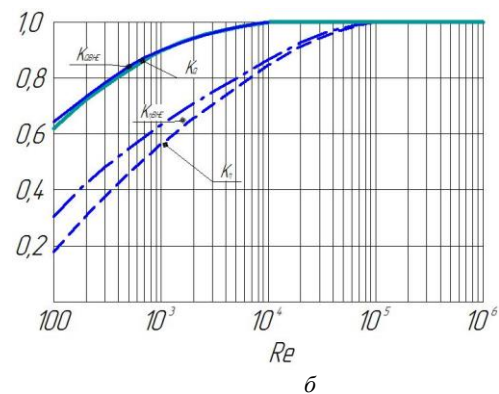
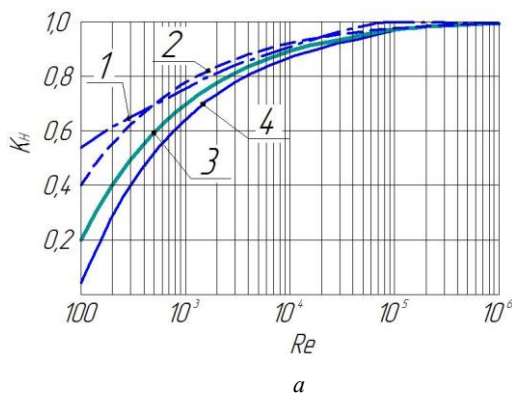


Рис. 10 – Залежності перерахункових коефіцієнтів для напірної (а) та витратної й енергетичної (б) характеристик від функції числа Re з урахуванням режиму відкачування: 1 – ВНЕ (при $Q = Q_{\text{опт}}$); 2 – при $Q = 0,5Q_{\text{опт}}$; 3 – при $Q = Q_{\text{опт}}$; 4 – при $Q = 1,5Q_{\text{опт}}$

$$Q_{\text{внв}}(Q, v) = Q_B(Q) \cdot K_Q(Re(Q_{\text{опт}}, v)), \quad (15)$$

$$\eta_{\text{внв}}(Q, v) = \eta_B(Q) \cdot K_\eta(Re(Q_{\text{опт}}, v)). \quad (16)$$

Для визначення ефективної в'язкості, що входить у формулу визначення числа Рейнольдса (10) при прогнозуванні напірної та енергетичної характеристик ЕВН, у роботі запропонована узагальнена формула розрахунку ефективної в'язкості $\mu_{\text{еф}} = f(B, B_{\text{інв}})$ від змісту води у нафтової продукції B та враховує зміну точки інверсії $B_{\text{інв}}$ (рис. 1).

Узагальнена формула ефективної в'язкості, що залежить від величини характерної швидкості зсуву $\dot{\Gamma}$, в'язкості пластової води μ_v , пластової рідини μ_n , водовмісту B і значення точки інверсії $B_{\text{інв}}$, має вигляд:

$$\mu_{\text{еф}} = \begin{cases} \mu_v \cdot 10^{K_B \cdot (1-B)} & \text{коли } B > B_{\text{інв}} \\ m^1 & \text{коли } (B \leq B_{\text{інв}}) \text{ та } (B < 0,75) \\ m^{1,7} & \text{коли } (B \leq B_{\text{інв}}) \text{ та } (B \geq 0,75) \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{де } K_B = \begin{cases} e^{4,2 \cdot B_{\text{інв}}^{2,8}} + 1,6 & \text{при } B_{\text{інв}} > 0,3 \\ e^{2,2 \cdot B_{\text{інв}}^{3,8}} + 0,5 & \text{при } B_{\text{інв}} \leq 0,3 \end{cases},$$

$$m = C^{\frac{1}{B_{\text{інв}}}} \cdot \mu_n \left(\frac{1+2,9B}{1-B} \right), \quad C = \begin{cases} A, & \text{при } A > 1 \\ 1, & \text{при } A \leq 1 \end{cases},$$

$$A = \frac{(1+20 \cdot B^2)}{\dot{\Gamma}^{0,3B}}.$$

Для ступені заглибного відцентрового насоса значення характерної швидкості зсуву $\dot{\Gamma}$ обчислюється за формулою (7).

В'язкість води при даній температурі визначаємо за формулою [14]:

$$\mu_v = \frac{0,0014 + 38 \cdot 10^{-7} (\rho_{v0} - 1000)}{10^{0,0065 \cdot (T-273)}} \quad (18)$$

На рис. 11 представлена узагальнена залежність $\mu_{\text{еф}} = f(B, B_{\text{інв}})$, розрахована за формулою 17 (криві 1, 2, 3, 4) і експериментальні дані (криві 2, 5)

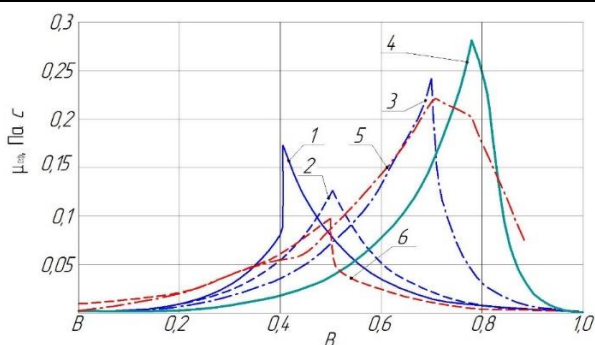


Рис. 11 – Залежність ефективної в'язкості від водовмісту і точки інверсії: розрахункові: 1 – $B_{\text{інв}}=0,4$; 2 – $B_{\text{інв}}=0,5$; 3 – $B_{\text{інв}}=0,7$; 4 – $B_{\text{інв}}=0,8$; експериментальні: 5 – $B_{\text{інв}}=0,7$; 6 – $B_{\text{інв}}=0,5$ [14]

Висновки. Досліджено вплив реологічних властивостей неньютонівських рідин на характеристики відцентрового насоса. Наведено математичну модель турбулентної тривимірної течії неньютонівської рідини. Для розрахунків обрано модель неньютонівської рідини Гершеля-Балклі, що найбільш точно описує поведінку рідин даного типу. Вдосконалено залежності для перерахунку характеристик насоса при його роботі на реальній рідині.

Список литературы

1. Гумеров К. О. Исследование физических свойств водонефтяных дисперсных систем в процессе их движения через погружные центробежные насосы / К. О. Гумеров, Ю. В. Зейгман, О. А. Гумеров // Нефтегазовое дело. – Уфа : УГНТУ, 2013. – Т. 11, № 4. – С. 73–76.
2. Дуношкін І. І. Расчеты физико-химических свойств пластовой и промысловой нефти и воды: Учебное пособие для вузов / И. И. Дуношкін, И. Т. Мищенко, Е. И. Елисеєва. – М. : РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2004. – 448 с.
3. Каплан Л. С. Особенности эксплуатации обводненных скважин погружными центробежными насосами / Л. С. Каплан. – М. : ВНИИОЭНГ, 1980. – 36 с.
4. Лосев А. П. Установление структурных и реологических характеристик промысловых водонефтяных эмульсий : автореф. дис. канд. техн. наук : 25.00.17 / А. П. Лосев. – М. : Лосев А. П. Установление структурных и реологических характеристик промысловых, 2011. – 24 с.
5. Мищенко И. Т. Скважинная добыча нефти. / И. Т. Мищенко – М. : Нефть и газ, 2007. – 826 с.
6. Уразаков К. Р. Насосная добыча высоковязкой нефти из наклонных и обводненных скважин / К. Р. Уразаков, Е. И. Богомольный, Ж. С. Сейтпагамбетов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 303 с.
7. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости / У. Л. Уилкинсон – М. : МИР, 1964. – 216 с.
8. Яхно О. М. Гидромеханика в инженерной практике / О. М. Яхно, А. А. Каминер. – К. : Техніка, 1987. – 175 с.
9. Гаврилов А. А. Вычислительные алгоритмы и комплекс программ для численного моделирования течений неньютоновских жидкостей в кольцевом канале : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.13.18 / А. А. Гаврилов. – Новосибирск : ФГБУНИТ, 2014. – 19 с.

10. Фронштетер Г. Б. Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах / Г. Б. Фронштетер, С. Ю. Данилевич, Н. В. Родионова. – К. : Наукова думка, 1990. – 215 с.
11. Рябинин М. В. Методика определения потерь на трение в гидравлически гладкой круглой трубе для псевдопластических жидкостей / М. В. Рябинин, К. А. Труханов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1.
12. Shudryk A. L. Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid / A. L. Shudryk // Bulletin of NTU "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydraulic units. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No 20 (1192). – P. 90–93.
13. Антоненко С. С. Зміна напірної та енергетичної характеристик високообертового динамічного насоса під впливом в'язкості середовища, що перекачується: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.05.17 / С. С. Антоненко. Суми : СумДУ, 2004. – 20 с.
14. Ляпков П. Д. Подбор установки погружного центробежного насоса к скважине. Учебное пособие / П. Д. Ляпков – М. : МИНГ, 1987. – 71 с.

References (transliterated)

1. Gumerov, K. O., Yu. V. Zeygman, and O. A. Gumerov "Issledovanie fizicheskikh svoystv vodoneftnykh dispersnykh sistem v protsesse ih dvizheniya cherez pogruzhnyie tsentrobeznyie nasosyi." *Neftegazovoe delo* 11.4 (2013): 73–76. Print.
2. Dunyushkin, I. I., I. T. Mischenko, and E. I. Eliseeva *Rascheti fiziko-himicheskikh svoystv plastovoy i promyslovoy nefi i vody: Uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow: RGU nefi i gaza im. I. M. Gubkina, 2004. Print.
3. Kaplan, L. S. *Osobennosti ekspluatatsii obvodnennykh skvazhin pogruzhnyimi tsentrobeznyimi nasosami*. Moscow: VNIIOENG, 1980. Print.
4. Losev, A. P. *Ustanovlenie strukturnykh i reologicheskikh harakteristik promyslovyykh vodoneftnykh emulsii*. Avtoref. dys. kand. tehn. nauk. Moscow, 2011. Print.
5. Mischenko, I. T. *Skvazhinnaya dobycha nefi*. Moscow : Neft i gaz, 2007. Print.
6. Urazakov, K. R., E. I. Bogomolnyiy, and Zh. S. Seyttagambetov. *Nasosnaya dobycha visokovyazkoy nefi iz naklonnykh i obvodnennykh skvazhin*. Moscow: ООО «Nedra-Biznestsentr», 2003. Print.
7. Uilkinson, U. L. *Nenyutonovskie zhidkosti*. Moscow: MIR, 1964. Print.
8. Yahno, O. M. and A. A. Kaminer *Gidromekhanika v inzhenernoy praktike*. Kyiv: Tehnika, 1987. Print.
9. Gavrilov, A. A. *Vychislitelnyie algoritmy i kompleks programm dlya chislennogo modelirovaniya techeniy nenyutonovskikh zhidkostey v koltsevom kanale*. Avtoref. dys. kand. tehn. nauk. Novosibirsk : FGBUNIT, 2014. Print.
10. Fronghteter, G. B., S. Yu. Danilevich, and N. V. Rodionova *Techenie i teploobmen nenyutonovskikh zhidkostey v trubah*. Kyiv: Naukova dumka, 1990. Print.
11. Ryabinin, M. V., and K. A. Truhanov "Metodika opredeleniya poter na trenie v gidravlicheski gladoy krugloy trube dlya psevdoplasticheskikh zhidkostey." *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* 1 (2015): Print.
12. Shudryk, A. L. "Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid." *Bulletin of NTU "KhPI"*. Ser.: *Hydraulic machines and hydraulic units*. No. 20 (1192). Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. 90–93. Print.
13. Antonenko, S. S. *Zmina napirnoyi ta energetichnoyi harakteristik visokoobertovogo dinamichnogo nasosa pid vplyvom v'язkosti seredovischa, scho perekachuetsya*. Avtoref. dys. kand. tehn. nauk. Sumi : SumDU, 2004. Print.
14. Lyapkov, P. D. *Podbor ustanovki pogruzhnogo tsentrobezhnogo nasosa k skvazhine*. Uchebnoe posobie. Moscow: MING, 1987. Print.

Надійшла (received) 25.04.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Врахування реологічних властивостей водонафтової емульсії на робочі характеристики відцентрового насоса / Н. Г. Шевченко, О. Л. Шудрик, О. С. Коваль, О. В. Дорошенко // Вісник НТУ

«ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 17 (1293). – С. 58–65. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2411-3441 (print), ISSN 2523-4471 (online)

Учет реологических свойств водонефтяной эмульсии на производительность центробежных насосов / Н. Г. Шевченко, А. Л. Шудрик, Е. С. Коваль, А. В. Дорошенко / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 17 (1293). – С. 58–65. – Бібліогр.№: 14 назв. – ISSN 2411-3441 (print), ISSN 2523-4471 (online).

Accounting rheology water-oil emulsion to performance of centrifugal pumps / N. G. Shevchenko, O. L. Shudryk, O. S. Koval, O. V. Doroshenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units. – Kharkov : NTU "KhPI", 2018. – NO. 17 (1293). – P. 58–65. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2411-3441 (print), ISSN 2523-4471 (online).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шевченко Наталія Григорівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини»; тел.: (095) 425-18-33; e-mail: shevng@ukr.net.

Шевченко Наталья Григорьевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Гидравлические машины»; тел.: (095) 425-18-33; e-mail: shevng@ukr.net.

Shevchenko Nataliya Grygorivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Hydraulic machines"; tel.: (095) 425-18-33; e-mail: shevng@ukr.net.

Шудрик Олександр Леонідович – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри «Гідравлічні машини»; тел.: (099) 37–07–660; e-mail: shudral88@gmail.com.

Шудрик Александр Леонидович – аспирант, «Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры «Гидравлические машины»; тел.: (099) 37–07–660; e-mail: shudral88@gmail.com.

Shudryk Oleksandr Leonidovych – postgraduate, National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute", assistant at the Department "Hydraulic machines"; tel.: (099) 37–07–660; e-mail: shudral88@gmail.com.

Коваль Олена Сергіївна – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», інженер кафедри «Гідравлічні машини»; тел.: (066) 843-15-69; e-mail: elenakoval86@ukr.net.

Коваль Елена Сергеевна – аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», инженер кафедры «Гидравлические машины»; тел.: (066) 843-15-69; e-mail: elenakoval86@ukr.net.

Koval Olena Serhiyivna – postgraduate, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", engineer of the Department "Hydraulic machines"; tel: (066) 843-15-69; e-mail: elenakoval86@ukr.net.

Дорошенко Олександр Владиславович – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (098) 223-05-11; e-mail: doroshenkoav478@gmail.com.

Дорошенко Александр Владиславович – студент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (098) 223-05-11; e-mail: doroshenkoav478@gmail.com.

Doroshenko Aleksandr Vladislavovich – student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel: (098) 223-05-11; e-mail: doroshenkoav478@gmail.com.