

**Н. Г. ШЕВЧЕНКО, О. Л. ШУДРИК, К. М. ЛУЧАНІНОВ, В. С. АНДРІЄВСЬКА**

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ГНУЧКИХ ТРУБАХ КОЛТЮБІНГОВИХ УСТАНОВОК З ОБЛІКОМ РЕОЛОГІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ РІДИНИ**

Актуальним напрямом економічного розвитку країни є інтенсивне нарощування видобутку вуглеводнів на території України, запровадження нових сучасних технологій та підвищення ефективності роботи енергетичного обладнання. Одним із сучасних напрямів, що використовуються в нафтогазовій промисловості, є застосування спеціалізованого обладнання установок колтюбінгу. Також з розвитком технологій буріння свердловин та інтенсифікації видобутку нафти з'являються сучасні багатокомпонентні промивальні (технологічні) рідини. Потреба в полімерах заснована на їх здатності впливати на властивості водних і вуглеводневих систем і утворювати гелі різної щільності, в'язкості та реології. Полімерні системи набули широкого поширення за рахунок високих очисних, транспортуючих та утримуючих властивостей. Широко відомі полімерні системи технологічних розчинів на основі ксантанової камеді. Розглянуто узагальнену інформацію про реологічні показники рідин, що використовуються для інтенсифікації роботи нафтогазових свердловин. Основними реологічними показниками досліджуваної рідини є напруження зсуву та швидкість деформації середовища. Ці показники визначаються за допомогою ротаційного віскозиметра OFITE 900. Представлені результати експериментальних досліджень властивостей водного розчину з різними концентраціями ксантанової камеді від 0,6 до 8 г/л. Дослідження показали, що водний розчин з камеді створює неньютонівську поведінку рідини. Коефіцієнти реологічної моделі розчину були отримані шляхом апроксимації лабораторних даних. Для чисельного моделювання гідродинамічних характеристик полімерної системи використовуються нелінійна модель в'язкої рідини та модель із запровадженням ефективної в'язкості. Результати досліджень показників реології полімерної системи застосовуються для визначення режиму перебігу рідини, прогнозування гідрравлічних коефіцієнтів опору в трубах та енергетичних характеристик насосного обладнання для подачі технологічної рідини у свердловину. Представлені експериментальні та розрахункові залежності впливу полімерних добавок на опір руху рідин у гнучких трубах колтюбінгової установки. Проведено аналіз експериментальних та чисельних гідродинамічних досліджень. Для чисельного моделювання гідродинаміки неньютонівської поведінки рідини у трубах використовується відкрита інтегрована платформа OpenFOAM.

**Ключові слова:** біополімери, ксантова камедь, реологія, неньютонівська поведінка, в'язкість, гідрравлічний коефіцієнт опору, втрати тиску, експеримент, чисельне моделювання.

**N. SHEVCHENKO, O. SHUDRYK, K. LUCHANINOV, V. ANDRIIEVSKA**

## **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL RESEARCH IN THE FLEXIBLE PIPES OF COIL TUBING INSTALLATIONS TAKING INTO ACCOUNT THE RHEOLOGY OF THE TECHNOLOGICAL FLUID**

The current direction of the country's economic development is an intensive increase in hydrocarbon production on the territory of Ukraine, the introduction of new modern technologies and an increase in the efficiency of power equipment. One of the modern directions used in the oil and gas industry is the use of specialized equipment for coiled tubing units. Also, with the development of well drilling and oil production intensification technologies, modern multicomponent flushing (process) waters appear. The need for polymers is based on their ability to influence the properties of aqueous and hydrocarbon systems and form gels of different density, viscosity and rheology. Polymer systems are widely used due to their high cleaning, transporting and holding properties. Widely known polymer systems of technological solutions based on Xanthan Gum. Generalized information about the rheological parameters of fluids used to intensify the work of oil and gas wells is considered. The main rheological indicators of the studied liquid are the shear stress and the strain rate of the medium. These indicators are determined using an OFITE 900 rotational viscometer. The results of experimental studies of the properties of an aqueous solution with different concentrations of Xanthan gum from 0.6 to 8 g/l are presented. The study showed that an aqueous solution of gum creates a non-Newtonian behavior of the liquid. The coefficients of the rheological model of the solution were obtained by approximation of laboratory data. To simulate the hydrodynamic characteristics of a polymer system, a nonlinear viscous fluid model and a model with the introduction of effective viscosity are used. The results of studies of rheology indicators are used to determine the fluid flow regime, predict the hydraulic resistance coefficients in pipes and the energy characteristics of pumping equipment for supplying process fluid to the well. Experimental and calculated dependences of the influence of polymer additives on the resistance to the movement of liquids in coiled tubing of a coiled tubing unit are presented. The analysis of experimental and numerous hydrodynamic studies has been carried out. For numerical simulation of the hydrodynamics of non-Newtonian behavior of fluid in pipes, the open integrated platform OpenFOAM is used.

**Keywords:** biopolymers, Xanthan Gum, rheology, non-Newtonian behavior, viscosity, hydraulic drag coefficient, pressure loss, experiment, numerical simulation.

**Вступ.** Актуальним напрямком економічного розвитку країни є інтенсивне нарощування видобутку вуглеводнів на території України, введення нових сучасних технологій та підвищення ефективності роботи енергетичного обладнання [1]. Щоб максимізувати видобуток на вуглеводних родовищах, необхідно впроваджувати ефективні сучасні технології буріння та ремонтних робіт (промивка та ліквідація пробок, розбурювання цементних мостів, перфорація, ремонтно-ізоляційні роботи), підвищення нафтовіддачі пластів (проведення гідророзриву пласту, обробка привибійних зон свердловин та інші).

Одним із сучасніших напрямків, що використовується у нафтогазовій промисловості є

застосування спеціалізованого обладнання установок колтюбінгу (англ. *Coiled tubing*; колонна гнучких насосно-компресорних труб).

Також з розвитком технологій буріння свердловин та інтенсифікації видобутку нафти з'являються сучасні багатокомпонентні промивальні (технологічні) рідини [2, 3]. При підготовці таких рідин використовують обтяжувачі, глино порошок, крохмаль, біополімери та ін. У даний час широке застосування отримали біополімери – полісахариди (рослинного та мікробного походження). Їх перевагою є здатність у малих концентраціях суттєво змінювати реологічні властивості технологічної рідини. Розглянемо ксантанову камедь (англ. *Xanthan gum*),

яка широко використовується у водних розчинах при похилому бурінні та в різних технологіях інтенсифікації свердловин. Ксантан є мікробним полісахаридом, який добре розчиняється у воді і характеризується дуже високою в'язкістю при низьких концентраціях. Цей біополімер має спеціальний реологічний профіль. При сильних зсувних навантаженнях він дозволяє розчинам вільно текти, водночас камедь за низької швидкості течії перетворює розчин на пружний гель. Такі розчини прийнято називати розчинами із зворотною в'язкістю, при високих швидкостях перебігу розчину втрати тиску зводяться до мінімуму, у той же час при низьких швидкостях забезпечується висока здатність, що утримує. Рекомендована концентрація ксантанової камеді – від 0,6 до 8 г/л [4, 5].

Тому задача гідродинамічного дослідження в гнучких трубах колтубінгових установок з обліком реології технологічної рідини є **актуальною**. Дослідження властивостей технологічної рідини з біополімерами, визначення режиму перебігу суміші рідини в трубах та прогнозування гідравлічних коефіцієнтів опору дозволяють прогнозувати енергетичні характеристики насосного обладнання для подачі технологічної рідини у свердловину.

**Інформаційний огляд.** У класичній постановці для опису реологічних властивостей в'язкої нестисливої ньютонівської рідини використовується лінійний закон зв'язку тензора в'язкої напруги  $\tau$  з тензором швидкостей зсуву  $S_{ij}$ :

$$\tau = 2\mu S, \quad (1)$$

де  $\mu$  – динамічна (молекулярна) в'язкість ньютонівської рідини;  $S \equiv S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  – тензор швидкостей деформації;  $u_i, u_j$  – декартові компоненти векторної швидкості.

Однак часто зустрічаються рідини, у яких при перебігу проявляються властивості нелінійності в'язкості, пластичність, пружність. Такі рідини класифікуються як ньютонівські. Одним із ефективних підходів до вивчення властивостей рідини одного класу є узагальнена реологічна модель.

У роботі використовується узагальнена ньютонівська модель, у якій запроваджується поняття ефективної в'язкості. Узагальнена модель для в'язко-пластичної ньютонівської рідини має вигляд:

$$\tau = \mu_{eff}(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}. \quad (2)$$

Ефективна молекулярна в'язкість залежить від швидкості деформації середовища  $\dot{\gamma} = \sqrt{2S \cdot S}$ .

Найбільш поширеними в нафтогазовій промисловості є моделі рідини зі статичним реологічним законом, рідини Бінгмана й рідини Гершеля-Балклі [4–8]. Залежності ефективної в'язкості  $\mu_{eff}(\dot{\gamma})$  для цих трьох моделей мають вигляд:

$$\mu_{eff}(\dot{\gamma}) = k_v \dot{\gamma}^{n-1} - \text{модель статична}; \quad (3)$$

$$\mu_{eff}(\dot{\gamma}) = \frac{k_v \dot{\gamma} + \tau_0}{\dot{\gamma}} - \text{модель Бінгмана}; \quad (4)$$

$$\mu_{eff}(\dot{\gamma}) = \frac{k_v \dot{\gamma}^n + \tau_0}{\dot{\gamma}} - \text{модель Гершеля-Балклі}; \quad (5)$$

де  $k_v$  – міра консистенції середовища;  $n$  – показник ньютонівського середовища;  $\tau_0$  – гранична напруга зсуву (межа плинності).

У роботі [9] представлені результати лабораторних та промислових досліджень біополімерної системи для проведення похилих та горизонтальних стволів глибоких нафтогазових свердловин. Реологія розчинів описана статичною (Power-law) та бінгамівською (Bingham) моделями.

Результати чисельних досліджень течій ньютонівських моделей в'язкої рідини в циліндричній трубці, кільцевих проміжках, каналах гідромашин представлені в роботах [7, 10].

**Аналіз експериментальних досліджень.** Основними реологічними показниками досліджуваної рідини є напруга зсуву  $\tau$  та швидкість деформації середовища  $\dot{\gamma}$ . Ці два показники визначаються за допомогою ротаційного віскозиметра – рис. 1. Методику обробки результатів виміру описано в роботі [11].



Рис. 1. Ротаційний віскозиметр OFITE 900

Прийнято, що швидкість деформації середовища (швидкість зсуву)  $\dot{\gamma}$  ідентична частоті обертання ротора віскозиметра. Величина напруги зсуву  $\tau$ , Па (*Shear stress*, Pa) визначається для восьми значень частоти обертання ротора віскозиметра,  $\text{хв}^{-1}$  (англ. *Viscometer rotor speed VRS, min<sup>-1</sup>*) і десяти значень концентрації камеді, г/л (англ. *Concentration of xanthan gum CXG, g/l*).

Результати експерименту – реологічні залежності напруги зсуву від частоти обертання ротора віскозиметра представлені на рис. 2.

**Обробка лабораторних досліджень реології водного розчину. Визначення ефективної в'язкості.** Аналіз характеру реологічних кривих на рис. 2 вказує, що досліджувані рідини описуються статичним законом –  $\tau(\dot{\gamma}) = k_v \dot{\gamma}^n$ .

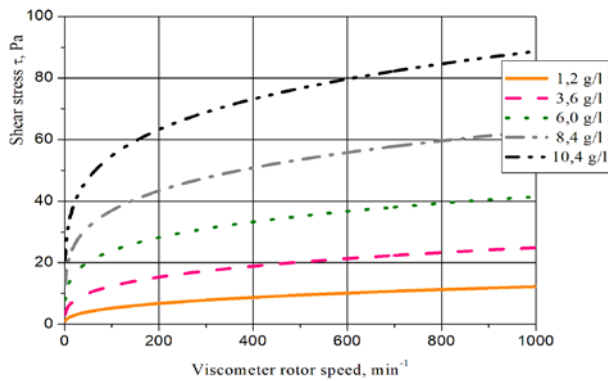


Рис. 2. Реологічні характеристики досліджуваної технологічної рідини для п'яти значень концентрації камеді: CXG 1,2–10,4 г/л

Коефіцієнти реологічної статечної моделі розчину  $k_v$  та  $n$  були отримані шляхом апроксимації лабораторних даних. Результати наведено на рис. 3.

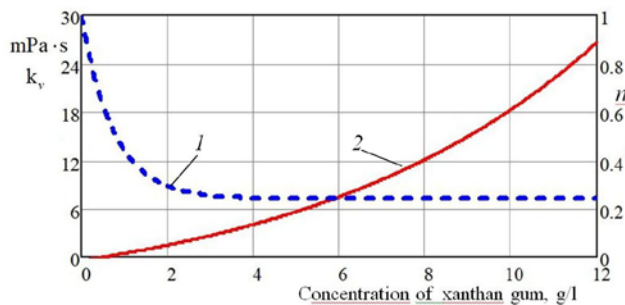


Рис. 3. Залежності реологічних показників статечної моделі рідини від концентрації ксантанової камеді у воді: 1 –  $n$ ; 2 –  $k_v$

При значеннях коефіцієнтів реології  $n = 1$  та  $k_v = 1$  МПа·с концентрація камеді дорівнює нулю, тобто досліджувана рідина – вода.

Використовуючи формулу (3), можна визначити значення ефективної в'язкості рідини. Залежності ефективної в'язкості від швидкості зсуву для п'яти значень концентрації ксантанової камеді у водному розчині представлені на рис. 4.

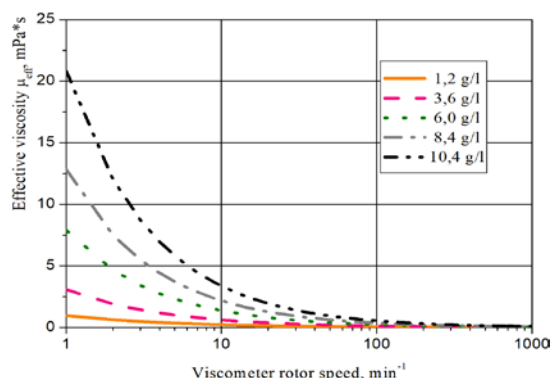


Рис. 4. Залежність ефективної в'язкості від частоти обертання ротора віскозиметра при різних концентраціях ксантанової камеді у водному розчині

Дослідження полімерних добавок у технологічних рідинах показало, що розчини, отримані на основі добавок біополімерів, створюють

структуру неньютонівської рідини. Дані розчини є псевдопластичними рідинами.

Результати досліджень реології використовуються для визначення режиму перебігу рідини в трубах та прогнозування гідравлічних коефіцієнтів опору, енергетичних характеристик насосного обладнання для подачі технологічної рідини.

**Експериментальні дослідження подачі промивного розчину через гнучку колтубінгову трубу.** У роботі проведено експериментальні дослідження з перекачування розчину ксантанової камеді у воді через гнучку трубу колтубінгової установки. Дослідження проведено на 11 режимах роботи насосного агрегату ( $Q$  – витрата рідини по трубі в л/хв). Також у результаті проведення експерименту змінювалося концентрація біополімеру ксантанової камеді – від 1,2 г/л до 12 г/л. У результаті випробувань визначався необхідний тиск закачування рідини. Тиск на виході труби колтубінгу дорівнює атмосферному. Тому прийнято, що тиск накачування дорівнює гідравлічним втратам за довжиною. Технологічна рідина прокачувалася через трубу діаметром  $D = 38,1$  мм із товщиною стінки 3,2 мм та довжиною  $L = 5620$  м.

У табл. 3 наведено результати випробувань: залежності втрат тиску від концентрацій ксантанової камеді та подачі насосного агрегат.

**Обробка та аналіз експериментальних даних.** За законами гідравліки втрати тиску  $\Delta P$  в циліндричній трубі для в'язкої рідини визначають співвідношенням:

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

де  $\lambda$  – гідравлічний коефіцієнт опору;  $D$  – гідравлічний діаметр труби;  $L$  – довжина труби;  $V$  – середня швидкість руху рідини в трубі;  $\rho$  – густина рідини.

При відомих постійних величинах труби (довжини  $L$  і діаметра  $D$ ) швидкість руху рідини  $V$  є змінною величиною та залежить від режиму роботи насосного агрегату, тобто  $V = f(Q)$ . Втрати тиску задані з експерименту й залежать від режиму роботи насоса й типу рідини, що перекачується –  $\Delta P = f(Q, k_v, n)$ .

За результатами експериментальних досліджень обчислимо коефіцієнт гідравлічних втрат  $\lambda$  за формулою:

$$\lambda(Q, k_v, n) = \frac{2D \cdot \Delta P(Q, k_v, n)}{L \rho \cdot V(Q)^2}.$$

Зазвичай у гідравліці коефіцієнт опору представляють функції від числа Рейнольдса. Для неньютонівських рідин вводять поняття узагальненого числа Рейнольдса  $\lambda = f(\text{Re}^*)$ .

Для рідини зі статечним реологічним законом зазвичай використовують вираз Metznel-Reed Reynolds number [6, 8]:

Таблиця 1 – Втрати тиску в гнучкій трубі при різних режимах прокачування рідини з різною концентрацією ксантанової камеді, атм

Режим роботи Q, л/хв	Концентрація ксантанової камеді, г/л									
	1,2	2,4	3,6	4,8	6	7,2	8,4	9,6	10,8	12
50	29,4	40,1	63	90,5	114,4	147,7	174,3	205,4	250,1	300
80	33,1	40,9	75,4	106,7	132,4	169,8	200,4	231,8	281,8	336,3
100	39,2	45,7	61,6	116,2	142,8	182,6	215,3	246,8	299,8	356,6
120	46,7	52,1	68,4	92,6	152,6	194,4	229,1	260,7	316,3	375,3
150	60,4	64,3	79,9	104,5	122,9	154,7	248,4	280	339,2	401
180	77,1	79,4	93,3	118,2	135,5	167,6	196,3	217,7	360,5	424,9
200	89,9	91	103,3	128,3	145	177,2	206,5	226,2	273,4	440,1
230	111,6	110,9	119,9	145,1	160,7	193,1	223,2	240,5	288,2	337,1
250	127,8	125,9	132,8	157,3	172,3	204,8	235,2	251,1	299,1	347,7
280	154,7	150,7	155,4	177,4	191,3	223,9	255,1	268,6	317,1	365,2
300	174,4	169	171,9	191,9	205	237,7	269,4	281,3	330,1	377,9

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

де  $k_v$  – міра консистенції середовища;  $n$  – показник неньютонівського середовища.

Результати перерахунку експериментальних даних визначення залежності  $\lambda = f(Re^*)$  представлені на рис. 5.

Аналіз експериментальних залежностей коефіцієнта опору труби колтюринга для неньютонівської рідини показує, що режим течії зі збільшенням концентрації біополімеру в воді наближається до ламінарного, а коефіцієнт втрат тиску (при  $Re = const$ ) – зменшується.

**Моделювання тривимірної течії в'язкої неньютонівської статичної рідини в гнучкій трубі колтюрингу.** Для математичного моделювання турбулентного перебігу нестискаємої в'язкої рідини використовується система рівнянь нерозривності й Нав'є-Стокса, усереднених по Рейнольдсу з урахуванням пульсацій в'язкості:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i' u_j') = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \end{cases} \quad (6)$$

де  $i, j = 1 \dots 3$  – підсумовування за однаковими індексами;

$x_1, x_2, x_3$  – осі координат;

$u_1, u_2, u_3$  – усереднені за часом значення швидкостей;

$u_1', u_2', u_3'$  – пульсаційні складові швидкостей;

$f_i$  – виражає дію масових сил.

Для замикання системи рівнянь (6) використовують двопараметричну модель Менгера SST [12].

Для підтвердження коректності обчислення

коефіцієнтів статичної реологічної моделі неньютонівської рідини в роботі проведено чисельне моделювання тривимірної в'язкої течії у вільному математичному пакеті CFD – *OpenFOAM* [13]. Завдяки можливостям сучасної програмної продукції *OpenFOAM* можна встановлювати опції для різних моделей ньютонівської та неньютонівської рідини – реологічні закони рідини та основні їх показники [14]. Розрахунковою областю прийнято об'єм рідини, що заповнює внутрішній простір гнучкої труби довжиною 1 м і діаметром 38 мм.

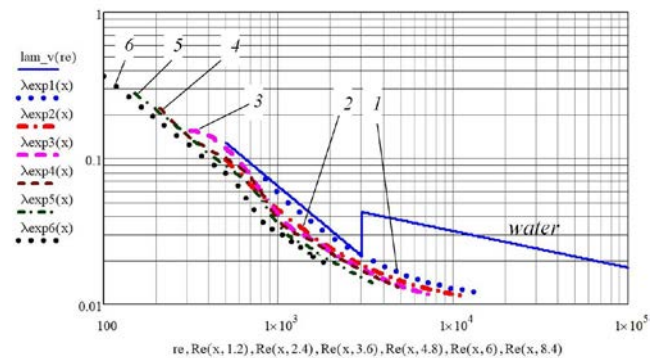


Рис. 5 Експериментальні залежності коефіцієнта опору  $\lambda = f(Re^*)$  при зміні концентрації ксантанової камеді у воді: 1 – 1,2 г/л; 2 – 2,4 г/л; 3 – 3,6 г/л; 4 – 4,8 г/л; 5 – 6 г/л; 6 – 8,4 г/л

Як гранична умова у вхідному перерізі задавався вектор швидкості в м/с. Розрахунок проводився для робочого діапазону роботи насоса  $Q$ : 50–300 л/хв. На виході з розрахункової області ставився статичний тиск рівний  $P/\rho = 101,325 \text{ м}^2/\text{с}^2$ .

Порівняння експериментальних та розрахункових втрат тиску по довжині труби представлено на рис. 6.

Чисельні результати перераховані на умови експлуатації гнучкої труби колтюрингу.

Аналіз результатів показав хороший збіг розрахункових та експериментальних втрат тиску по довжині труби для водних розчинів з концентрацією ксантанової камеді до 6 г/л (похибка до 8%). При збільшенні концентрації полімеру у воді більше 6 г/л спостерігається якісний збіг, але похибка вимірів збільшується.



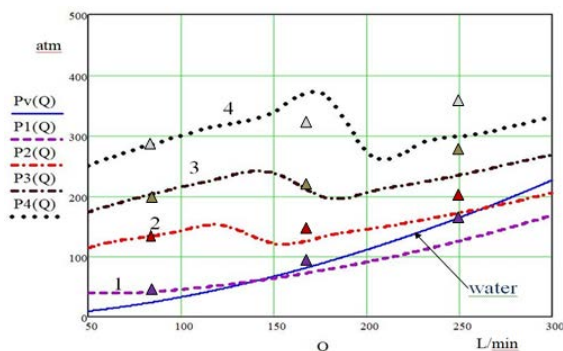


Рис. 6 Порівняння експериментальних та розрахункових втрат тиску по довжині труби. Концентрації ксантанової камеді у воді:

1 – 2,4 г/л; 2 – 6 г/л; 3 – 8,4 г/л; 4 – 12 г/л;

Δ – точки чисельних розрахунків за програмою *OpenFOAM*

**Висновки.** Дослідження полімерних добавок у технологічних рідинах показало, що розчини, отримані на основі добавок біополімерів, створюють структуру неньютонівської рідини. Досліджено в'язку неньютонівську статичну рідину на основі ксантанової камеді та її структуру при перебігу в гнучкій трубі колтубінгу.

Основні рівняння математичної моделі стаціонарного руху узагальненої ньютонівської рідини не відрізняються від класичної моделі ньютонівської рідини. У турбулентних течіях молекулярна в'язкість неньютонівського середовища залежить від флуктуючої швидкості зсуву. Тому при описі турбулентного перебігу необхідно оперувати середньою величиною ефективною молекулярною в'язкості.

Моделювання тривимірної в'язкої течії неньютонівської в'язкої рідини показує адекватну подібність експериментальних і розрахункових даних, що свідчить про правильний вибір математичної моделі, моделі турбулентності та коректності визначення коефіцієнтів статичної моделі рідини.

Результати досліджень дозволяють прогнозувати величину коефіцієнта опору та втрати тиску при прокачуванні в'язкої неньютонівської рідини через гнучку трубу колтубінгу.

Для підвищення точності розрахункових робіт необхідно проводити попередні лабораторні дослідження реологічних параметрів рідини, що досліджується (бурові розчини, водо-нафтові суміші, розчини з полімерами).

#### Список літератури

1. *Енергетична стратегія України на період до 2035 року*. URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245239564&cat\\_id=245239555](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564&cat_id=245239555) (дата звернення: 09.12.2022).
2. Berdugo-Clavijo C., Scheffer G., Sen A., Gieg L. M. Biodegradation of Polymers Used in Oil and Gas Operations: Towards Enzyme Biotechnology Development and Field Application. *Polymers*. 2022. Vol. 14, issue 9. P. 1871. doi: 10.3390/polym14091871
3. Bicerano J. *Applications of Polymers and Composites in the Oil and Natural Gas Exploration and Production Industry*. URL: <https://polymerexpert.biz/industries/184-oil-gas-exploration-production> (дата звернення: 10.12.2022).
4. Оринчак М. І., Оринчак М. М., Бейзык О. С. Буровий розчин для якісного вторинного розкриття продуктивних горизонтів.

1. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2012. No. 1 (42). P. 25–32. URI: <https://rrngr.nung.edu.ua/index.php/rrngr/article/view/79> (дата звернення: 09.12.2022).
2. Zhong L., Oostrom M., Truex M. J. Rheological behavior of xanthan gum solution related to shear thinning fluid delivery for subsurface remediation. *Journal of Hazardous Materials*. 2013. Vol. 244–245. P. 160–170. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.11.028
3. Khan S., Yusuf M., Sardar N. Studies on rheological behavior of Xanthan Gum solutions in presence of additives. *Petroleum & Petrochemical Engineering Journal*. 2018. Vol. 2, issue 5. P. 1–7.
4. Gavrilov A. A., Rudyak V. Ya. Reynolds-averaged modeling of turbulent flows of power-law fluid. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 227. P. 45–55. doi: 10.1016/j.jnnfm.2015.11.006
5. Mohammadi A. *Analysis of non-Newtonian behavior of crude oil: experimental study annumerical modeling using computational fluid dynamics (CFD) technique*. URL: <https://researchspace.ukzn.ac.za/handle/10413/18907> (дата звернення: 09.12.2022).
6. Петров И., Давыдова И. Исследования безглинистой промывочной системы FLO-PRO для бурения горизонтального ствола скважин. *Нефтегазовое дело*. 2011. Т. 9, № 3. С. 21–28.
7. Шевченко Н. Г., Шудрик О. Л., Коваль О. С., Дорошенко О. В. Врахування реологічних властивостей водонафтової емульсії на робочі характеристики відцентрового насоса. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2018. No. 17 (1293). P. 58–65.
8. Leusheva E.; Brovkina N., Morenov V. Investigation of Non-Linear Rheological Characteristics of Barite-Free Drilling Fluids. *Fluids*. 2021. Vol. 6, issue 9. P. 327. doi: org/10.3390/fluids6090327
9. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*. 1994. No. 8. P. 1598–1605.
10. *OpenFOAM. Open source CFD. Documentation*. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/v2206/doc/index.html> (дата звернення: 26.07.2022).
11. Shudryk A. Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2016. No. 20 (1192). P. 90–93.

#### References (transliterated)

1. *Enerhetychna stratehiya Ukrainy na period do 2035 roku* [Energy strategy of Ukraine for the period up to 2035]. Available at: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245239564&cat\\_id=245239555](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564&cat_id=245239555) (accessed 09.12.2022).
2. Berdugo-Clavijo C., Scheffer G., Sen A., Gieg L. M. Biodegradation of Polymers Used in Oil and Gas Operations: Towards Enzyme Biotechnology Development and Field Application. *Polymers*. 2022, vol. 14, issue 9, p. 1871. doi: 10.3390/polym14091871
3. Bicerano J. *Applications of Polymers and Composites in the Oil and Natural Gas Exploration and Production Industry*. Available at: <https://polymerexpert.biz/industries/184-oil-gas-exploration-production> (accessed 10.12.2022).
4. Orynychak M. I., Orynychak M. M., Beyzyk O. S. Burovyy rozchyn dlya yakisnoho vtorynnoho rozkrytya produktyvnykh horizontiv [Drilling solution to qualitatively secondary open the productive horizons]. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2012, no. 1 (42), pp. 25–32. Available at: <https://rrngr.nung.edu.ua/index.php/rrngr/article/view/79> (accessed 09.12.2022).
5. Zhong L., Oostrom M., Truex M. J. Rheological behavior of xanthan gum solution related to shear thinning fluid delivery for subsurface remediation. *Journal of Hazardous Materials*. 2013, vol. 244–245, pp. 160–170. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.11.028
6. Khan S., Yusuf M., Sardar N. Studies on rheological behavior of Xanthan Gum solutions in presence of additives. *Petroleum & Petrochemical Engineering Journal*. 2018, vol. 2, issue 5, pp. 1–7.
7. Gavrilov A. A., Rudyak V. Ya. Reynolds-averaged modeling of turbulent flows of power-law fluid. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2016, vol. 227, pp. 45–55. doi: 10.1016/j.jnnfm.2015.11.006
8. Mohammadi A. *Analysis of non-Newtonian behavior of crude oil: experimental study annumerical modeling using computational fluid dynamics (CFD) technique*. Available at:

- <https://researchspace.ukzn.ac.za/handle/10413/18907> (accessed 09.12.2022).
9. Petrov I., Davydova I. Issledovaniya bezglinistoy promyvochnoy sistemy FLO-PRO dlya bureniya gorizontalnogo stvola skvazhin [Research into the FLO-PRO clay-free flushing system for drilling horizontal boreholes]. *Neftegazovoe delo*. 2011, vol. 9, no. 3, pp. 21–28.
  10. Shevchenko N. H., Shudryk O. L., Koval' O. S., Doroshenko O. V. Vrachuvannya reolohichnykh vlastyivostey vodonaftovoyi emul'siyi na robochi kharakterystyky vidtsentrovoho nasosa [Accounting rheology water-oil emulsion to performance of centrifugal pumps]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 17 (1293), pp. 58–65.
  11. Leusheva E.; Brovkina N., Morenov V. Investigation of Non-Linear Rheological Characteristics of Barite-Free Drilling Fluids. *Fluids*. 2021, vol. 6, issue 9, p. 327. doi: [org/10.3390/fluids6090327](https://doi.org/10.3390/fluids6090327)
  12. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*. 1994, no. 8, pp. 1598–1605.
  13. *OpenFOAM. Open source CFD. Documentation*. Available at: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/v2206/doc/index.html> (accessed 26.07.2022).
  14. Shudryk A. Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 20 (1192), pp. 90–93.
11. Leusheva E.; Brovkina N., Morenov V. Investigation of Non-Linear

Надійшла (received) 09.11.2022

#### *Відомості про авторів / About the Authors*

**Шевченко Наталія Григорівна (Shevchenko Nataliya)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-7428>; e-mail: [shevng@ukr.net](mailto:shevng@ukr.net)

**Шудрик Олександр Леонідович (Shudryk Oleksandr)** – кандидат технічних наук, ТОВ «Реґіон», провідний технолог проектно-технологічного відділу; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0991-2498>; e-mail: [o.shudryk@region.if.ua](mailto:o.shudryk@region.if.ua)

**Лучанінов Костянтин Миколайович (Luchaninov Kostiantyn)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; e-mail: [luchaninov.18@gmail.com](mailto:luchaninov.18@gmail.com)

**Андрієвська Вікторія Сергіївна (Andriievskaya Viktoriia)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9620-9401>; e-mail: [vikaandriievskaya065@gmail.com](mailto:vikaandriievskaya065@gmail.com)