

**Н. Г. ШЕВЧЕНКО, В. В. КАЛЮЖНИЙ, В. С. АНДРІЄВСЬКА**

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ РІДИНИ У ТРУБАХ КОЛТЮБІНГОВОЇ УСТАНОВКИ

На сьогоднішній день одним із сучасних напрямків є використання технологій колтюбінгу та вдосконалення складу промивних агентів (рідин). Розглянуто особливості технологічних ділянок колтюбінгу – спіральне укладання труб, співвідношення основних розмірів гнучких труб, барабана та прямого сектора. Наявність транспортера труб дає особливу відповідальність задля забезпечення переміщення колони гнучких труб у заданому діапазоні навантажень. Довжина труб сягає 5000 м. Радіальні розміри свердловини 150 мм. Перераховано етапи визначення основних параметрів насосної установки для подачі технологічної рідини до свердловини. При проведенні технологічних операцій насос повинен долати гідродинамічні втрати прямої та зворотної подачі рідини у свердловину. Необхідно враховувати можливість порушення співвідношення циліндричних труб. Для проведення технологічних операцій інтенсифікації видобутку нафти використовують багатокомпонентні технологічні рідини. Наявність хімічних та полімерних добавок у рідині істотно впливає на властивості водних та вуглеводневих систем, утворює гелі різної щільності, в'язкості та реології. Відомо, що навіть незначний вміст полімерних добавок у розчині (6–30 г/л) призводить до неньютонівської поведінки промивної рідини в трубах свердловини. У роботі використовуються експериментальні дані, отримані компанією ТОВ "Region" України. Для чисельного моделювання гідродинамічних характеристик технологічної рідини використовуються лінійні та нелінійні моделі в'язкої рідини. У всіх випадках розглядався перебіг, що встановився. У зв'язку з тим, що у роботі використовується академічна версія пакету ANSYS CFD з обмеженими можливостями за кількістю осередків, розрахункові області вибрано за спрощеними схемами. Розглянуто схеми: спіраль – напрямна – пряма труба, лише спіральна частина намотування труби на барабан, кільцевий простір між циліндричними трубами з можливим ексцентриситетом. Результати численних досліджень застосовуються для прогнозування гідравлічних коефіцієнтів опору в трубах та характеристик насосного обладнання для подачі технологічної рідини у свердловину. Також результати можна використовувати для перевірочних розрахунків міцності колони гнучких труб для небезпечних перерізів.

**Ключові слова:** гнучкі труби колтюбінгу, свердловина, реологія, нелінійна модель в'язкої рідини, гідравлічний коефіцієнт опору, втрати тиску, чисельне моделювання.

**N. SHEVCHENKO, V. KALIUZHNYI, V. ANDRIIEVSKA**

## NUMERICAL SIMULATION OF PROCESS FLUID FLOW IN THE PIPES OF A COILED TUBING INSTALLATION

Today, one of the modern trends is the use of coiled tubing technologies and improvement of the composition of washing agents (liquids). The features of coiled tubing technological sections are considered – spiral pipe laying, the ratio of the main dimensions of flexible pipes, drum and guide sector. The presence of a pipe conveyor gives special responsibility for ensuring the movement of a string of flexible pipes within a given load range. The length of the pipes reaches 5000 m. The radial dimensions of the well are 150 mm. The stages of determining the main parameters of a pumping unit for supplying process fluid to a well are listed. When carrying out technological operations, the pump must overcome the hydrodynamic losses of direct and reverse fluid supply into the well. It is necessary to take into account the possibility of misalignment of cylindrical pipes. To carry out technological operations to intensify oil production, multicomponent process fluids are used. The presence of chemical and polymer additives in liquids has a significant impact on the properties of aqueous and hydrocarbon systems and forms gels of varying density, viscosity and rheology. It is known that even a small content of polymer additives in the solution (6–30 g/l) leads to non-Newtonian behavior of the washing fluid in the well pipes. The work uses experimental data obtained by Region LLC of Ukraine. For numerical modeling of the hydrodynamic characteristics of a process fluid, linear and nonlinear models of a viscous fluid are used. In all cases, steady flow was considered. Due to the fact that the work uses the academic version of the ANSYS CFD package with limited capabilities in terms of the number of cells, the computational areas were selected using simplified schemes. The following schemes are considered: spiral – guide – straight pipe, only the spiral part of winding the pipe on a drum, an annular space between cylindrical pipes with possible eccentricity. The results of numerous studies are used to predict hydraulic resistance coefficients in pipes and the characteristics of pumping equipment for supplying process fluid to a well. The results can also be used for verification strength calculations of flexible pipe columns for hazardous sections.

**Keywords:** flexible coiled tubing, well, process fluid, rheology, nonlinear model of viscous fluid, hydraulic drag coefficient, pressure loss, numerical modeling.

**Вступ.** Підвищення ефективності проведення технологічних операцій при роботі у свердловинах є актуальними питаннями у нафтогазовій галузі. На сьогодні одним із сучасних напрямків є використання технологій колтюбінгу та удосконалення складу промивних агентів (рідин). Колтюбінг з англійської "Coiled tubing" – колона гнучких труб. Ідея застосування колони гнучких труб є пріоритетним підходом до вирішення проблем капітального ремонту, освоєння та буріння свердловин. Застосування спеціалізованого обладнання установок типу "Колтюбінг" дозволяє замість традиційної збірної конструкції колони труб спускати безперервні гнучкі труби без проведення операцій складання / розбирання. Основні положення розвитку

техніки та технології з використанням колони гнучких труб (КГТ) для буріння, інтенсифікації та освоєння свердловин, їх переваги та недоліки представлені в роботах [1–4]. Сучасний досвід та впровадження колтюбінгових технологій в Україні, надано у роботах [5–7].

На рис. 1 представлена схема розміщення основного обладнання колтюбінгової установки.

*Особливості колони гнучких труб.* Труби колтюбінгу випускаються різних типорозмірів. У табл. 1 надано типові розміри КГТ, барабана та прямого сектора.

В даний час більшість гнучких труб виготовляють із сталі звичайної маловуглецевої, низьколегової та нержавіючої. Міцність труб із

© Н. Г. Шевченко, В. В. Калюжний, В. С. Андрієвська, 2023

низьколегованих сталей вище маловуглецевих на 40 % (межа плинності 690–760 МПа) за збереження пластичних властивостей. Гнучкі труби можуть виготовлятися із змінним внутрішнім діаметром. Це дозволяє збільшити максимальну глибину спуску колтюбінгу і підвищує надійність при проведенні робіт на глибоких свердловинах. Труби, виготовлені за такою технологією, мають постійний зовнішній діаметр, але змінну товщину стінки – чим ближче до осердя барабана, тим товщі стінка і менше внутрішній діаметр. Таким чином, при збільшенні глибини і, як наслідок, навантажень, вага сприймається більш міцною секцією труби.

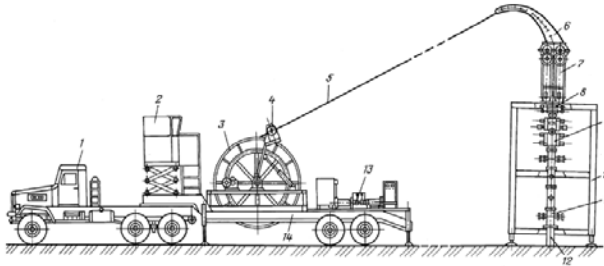


Рис. 1. Монтажна схема колтюбінгової установки на свердловині:

- 1 – автомобіль; 2 – кабіна оператора; 3 – барабан з КГТ; 4 – укладчик КГТ; 5 – колона гнучких труб; 6 – направляюча; 7 – транспортер; 8 – герметизатор гирла; 9 – превентор; 10 – опора; 11, 12 – обладнання гирла свердловини; 13 – насосна установка; 14 – рама агрегату.

Таблиця 1 – Типові співвідношення основних розмірів гнучких труб, барабана та напрямного сектора

Зовнішній діаметр КГТ, дюйм	Радіус сердечника барабана, см	Радіуси напрямку, см
0,750	61	122
1,000	51–76	122–137
1,250	63–91	122–183
1,500	76–102	122–183
1,750	89–122	183–244
2,000	102–122	183–244
2,375	122–137	229–305
2,875	137–147	229–305
3,500	165–178	229–305

*Особливості вузла для зберігання колони гнучких труб.* Колона гнучких труб або її частина, що не знаходиться в свердловині, розташовується на барабані. Барабан обертається на валу, встановленому підшипниках кочення. Для фіксації "мертвого" кінця гнучкої труби є затискачі. "Мертвий" кінець гнучкої труби з'єднується через зворотний клапан каналом, просвердленим у валу барабана. У виходу з отвору на торці валу розміщують вертлюг, що забезпечує подачу технологічної рідини від насосів у порожнину валу і далі колону гнучких труб. Всі барабани мають гідравлічний привід, хоча системи керування та типи двигунів залежать від виробника та моделі барабана. Гідравлічний тиск у приводній системі барабана можна змінювати, щоб регулювати величину вихідного крутного моменту двигуна. Це дозволяє

змінювати силу натягу труби на ділянці між транспортером (інжектором) та барабаном.

*Призначення та особливості транспортеру.*

Одним із найбільш відповідальних вузлів агрегату є транспортер. Він повинен забезпечувати переміщення колони гнучких труб у заданому діапазоні навантажень без пошкоджень зовнішньої поверхні труби та її геометрії.

При виконанні технологічних операцій у свердловину через колону гнучких труб подається технологічна рідина. Основні геометричні параметри КГТ – це діаметр труб та її довжина до 5000 м. Основними параметрами насосної установки є тиск технологічної рідини  $p_{\max}$ , що перекачується, та її подача  $Q_{\max}$ . Для подачі технологічної або промивальної рідини у свердловину використовуються насосні агрегати з максимальною подачею 30 л/с та тиском до 70 МПа. При проведенні технологічних операцій насос, що подає рідину, повинен долати гідродинамічні втрати у КГТ та між трубному просторі при промивки свердловини з можливістю ексцентриситету. А також перепад тиску на вибійному двигуні або гідромоніторної насадки.

Основні етапи визначення основних параметрів насосної установки для подачі технологічної рідини:

1. Обирають технологічну рідину, з використанням якої здійснюватимуть роботи. З розвитком технологій буріння свердловин або інтенсифікації видобутку нафти з'являються сучасні багатоконпонентні промивальні рідини або суспензії. Наприклад, полімерні системи. Їх перевагою є здатність у малих концентраціях суттєво впливати на властивості водних та вуглеводневих систем, утворювати гелі різної щільності, в'язкості та реології [2, 3].

2. Визначають необхідну подачу технологічної рідини для проведення технологічних операцій у свердловині.

3. Визначають схему свердловини, відповідно до якої виконують розрахунок гідродинамічних втрат при прокачуванні технологічної рідини по каналах у свердловині.

4. Визначають тиск, необхідний для ведення даного технологічного процесу.

5. Виконують перевірочний розрахунок міцності колони гнучких труб для верхнього небезпечного перерізу транспортеру.

У разі, якщо матеріал труби не задовольняє умові міцності, слід зменшити робочий тиск до прийнятного рівня. Зниження тиску може бути забезпечене або за рахунок зменшення подачі технологічної рідини, або використання колони гнучких труб більшого діаметру. Останній варіант загрожує виникненням організаційних проблем, оскільки вимагає переналадження агрегату – установки барабана з великим діаметром гнучких труб та зміни робочого діаметра труб інжектора.

Для новоприйнятого варіанта діаметрів труб, тисків та подач технологічної рідини повинні бути повторно проведені всі розрахунки.

Для забезпечення обраного режиму проведення

технологічної операції за допомогою колтбінгу в нафтогазовій свердловині необхідно враховувати взаємний вплив таких параметрів, як подача насоса, втрати тиску в області, що досліджується, фізичні властивості і склад робочого агента. Тому математичне моделювання протікання технологічної рідини в елементах КГТ та свердловині з урахуванням її реологічних та фізичних параметрів є актуальним завданням.

**Інформаційний огляд.** Робота [8] охоплює широкий спектр довідкового матеріалу як за реологічними властивостями неньютонівських рідин, методами їх вимірювання, так і методами гідродинамічного моделювання для широкого кола інженерних завдань. У роботах [9–11] представлені результати досліджень реології рідин, що використовуються у технологіях буріння свердловин та інтенсифікації видобутку нафти. Розглядається узагальнена ньютонівська модель, у якій запроваджується поняття ефективної в'язкості. Узагальнена модель для в'язко-пластичної неньютонівської рідини має вигляд:

$$\tau = \mu_{ef}(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}. \quad (1)$$

Ефективна молекулярна в'язкість залежить від швидкості деформації середовища  $\dot{\gamma} = \sqrt{2S \cdot S}$ , де  $S \equiv S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  – тензор швидкостей деформації;  $u_i, u_j$  – декартові компоненти векторної швидкості.

Найбільш поширеними в нафтогазовій промисловості є наступні моделі рідини: зі статичним реологічним законом (Power Law), Бінгмана (Bingham) та Гершеля-Балклі (Herschel-Bulkley). Залежності ефективної в'язкості  $\mu_{ef}(\dot{\gamma})$  для цих трьох моделей мають вигляд:

$$\mu_{ef}(\dot{\gamma}) = k_v \dot{\gamma}^{n-1} - \text{модель статична}; \quad (2)$$

$$\mu_{ef}(\dot{\gamma}) = \frac{k_v \dot{\gamma} + \tau_0}{\dot{\gamma}} - \text{модель Бінгмана}; \quad (3)$$

$$\mu_{ef}(\dot{\gamma}) = \frac{k_v \dot{\gamma}^n + \tau_0}{\dot{\gamma}} - \text{модель Гершеля-Балклі}. \quad (4)$$

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

У роботі [11] надано результати експериментальних досліджень властивостей водного розчину з різними концентраціями ксантанової камеді від 1,2 г/л до 12 г/л. Дослідження показало, що водний розчин з рослинним поліномом створює не ньютонівську поведінку рідини. Коефіцієнти реологічної статичної моделі розчину  $k_v$  та  $n$  були отримані шляхом апроксимації лабораторних даних. Результати наведено на рис. 2.

При значеннях коефіцієнтів реології  $n = 1$  та

$k_v = 1$  МПа·с концентрація камеді дорівнює нулю, тобто досліджувана рідина – вода.

Результати чисельних досліджень течій неньютонівських моделей в'язкої рідини в циліндричній трубі, кільцевих проміжках, каналах гідромашин представлені в роботах [12–14].

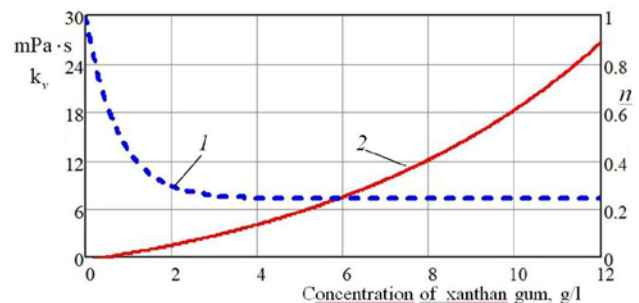


Рис. 2. Залежності реологічних показників за статичної моделлю (2) від концентрації біополімеру у воді:

1 –  $n$ ; 2 –  $k_v$  [11]

У роботах [7, 15–17] наведено приклади чисельного моделювання гідродинамічних процесів у гнучких трубах колтбінгу.

**Особливості вибору математичної моделі та розрахункової області.** Експериментально було доведено, що режим течії технологічної рідини у колоні гнучких труб колтбінгу залежить від концентрації полімерних добавок у розчині та витрати рідини  $Q$ . Тому для чисельного визначення втрат тиску  $\Delta p$  у КГТ треба обирати математичну модель для ламінарного або для турбулентного режиму.

Для визначення режиму течії для неньютонівських рідин вводять поняття узагальненого числа Рейнольдса  $Re^*$ . Так, для рідин зі статичним реологічним законом (2), використовують Reynolds number [8] за формулою:

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

Математична модель гідродинамічних процесів течії в'язкої рідини є набором рівнянь Нав'є-Стокса в тензорі напружень, рівняння нерозривності, реологічних рівнянь середовища та граничних умов.

**Граничні умови.** У вхідному перерізі об'єму рідини, що заповнює внутрішній простір гнучкої труби, задавався ваговий дебіт. На виході з розрахункової області ставився статичний тиск, що дорівнює атмосферному тиску.

Чисельні дослідження проводилися для двох режимів роботи насоса –  $Q = 100$  та  $200$  л/хв. Також розглянуто два значення концентрації камеді у розчині  $CXG$ : 2,4 г/л та 6 г/л [11]. Завдяки можливостям сучасної програмної продукції ANSYS CFX можна встановлювати опції для різних моделей ньютонівської та неньютонівської рідини – реологічні закони рідини та основні їх показники [18].

У зв'язку з тим, що в роботі використовується студентська версія пакету ANSYS Student [19] з

обмеженими можливостями за кількістю осередків розрахункової області обрано за схемами:

1) **Схема № 1** – прямолінійна циліндрична труба КГТ довжиною  $L_{розр} = 1$  м та внутрішнім діаметром  $d = 38$  мм.

2) **Схема № 2** – умовний барабан з одним витком та прямою секцією труби – рис. 3.

3) **Схема № 3** – два витка спіралі – моделювання намотки КГТ на барабані – рис. 5.

4) **Схема № 4** – простір між трубами колтюбінгу та насосно компресорними трубами (НКТ) у свердловині:  $D_{НКТ} = 100$  мм;  $D_{КГТ} = 44$  мм;  $L = 1$  м.

Основні розміри барабана та прямої обрані згідно табл. 1. Приймаємо внутрішній діаметр труби  $d$  постійним.

**Результати гідродинамічних досліджень у КГТ.** Чисельні дослідження проводилися для двох значень витрати промивної рідини  $Q = 100$  л/хв та  $200$  л/хв та для трьох значень концентрації камеди СХГ у воді –  $0$  г/л;  $6$  г/л та  $8,4$  г/л. Візуалізацію чисельних результатів надано на рис. 3–6.

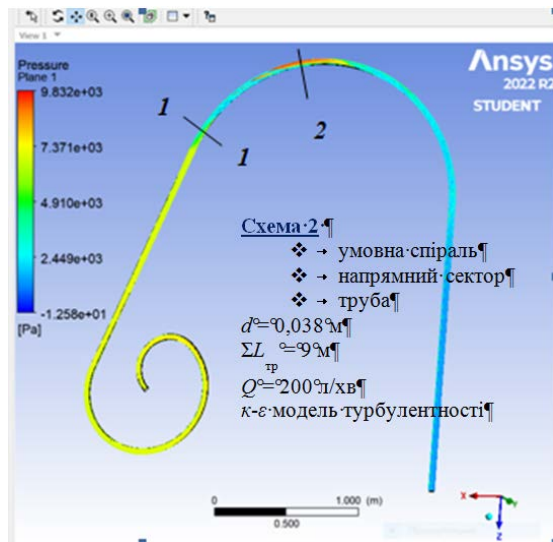


Рис. 3. Розподіл тиску у розрахунковій моделі КГТ за схемою № 2

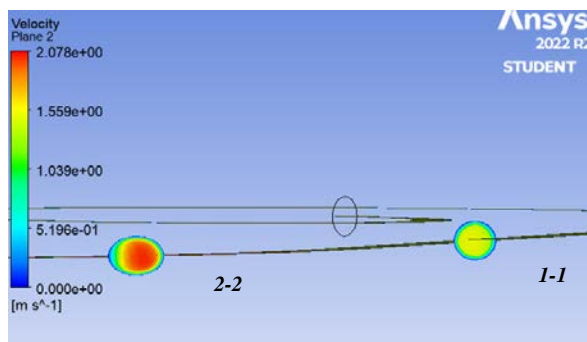


Рис. 4. Епюри швидкості у перерізі прямого сектору КГТ – схема № 2 ( $Q = 100$  л/хв,  $CXG = 6$  г/л)

У зв'язку з тим, що при транспортуванні гнучкі труби намотані на барабан, а в процесі роботи поступово (зі швидкістю до  $2-3$  м/с) подаються через транспортер у свердловину, доцільним буде оцінити втрати тиску намотаної частини колони гнучких труб.

На рис. 5 показані результати чисельного моделювання за схемою № 3 – два витка КГТ, що намотані на барабан.

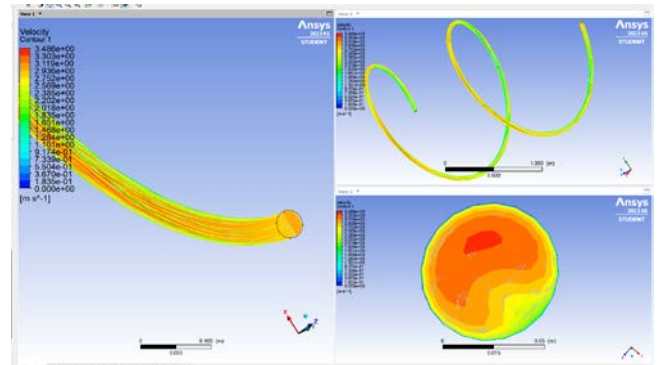


Рис. 5. Візуалізація результатів за схемою № 3

На рис. 6 надано залежності втрат тиску за розрахунковими схемами від концентрації полімеру у воді за програмою *Ansys CFX*. Для порівняння результатів розрахунку за трьома схемами проведено перерахунок на еквівалентну довжину труб  $9$  м. Спостерігається значна різниця в силі тертя між випрямленими та намотаними на барабан КГТ.

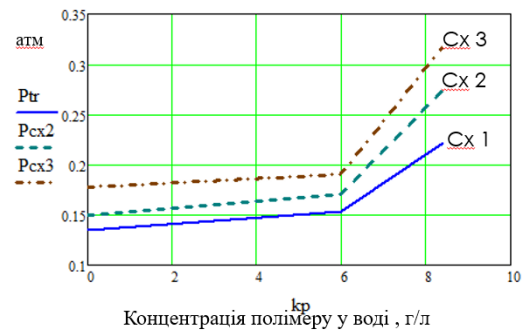


Рис. 6. Залежності втрат тиску за розрахунковими схемами від концентрація полімеру у воді

Перебіг в'язкої рідини у кільцевому просторі між співвісними циліндричними трубами «НКТ-КГТ» також становить практичну цінність. Для перевірки чисельних розрахунків проведено тестова задача для ламінарної течії ньютонівської рідини  $Re = 1475$ . Обрані розрахункові ділянки начального та стабілізованого потоків між співвісних кільцевих труб. Геометричні розміри прийняті за схемою № 4.

Проведено чисельні гідродинамічні розрахунки у між трубному просторі для 4-х значень динамічної в'язкості рідини, сПз:  $0,889$ ;  $5$ ;  $12$ ;  $20$ . Розглянуто можливість порушення співвісності циліндричних труб НКТ і КГТ. Досліджено чотири значень відносного ексцентриситету  $\bar{e}$ :  $\bar{e} = 0$ ;  $0,35$ ;  $0,535$ ;  $0,714$ ,

$$\text{де } \bar{e} = \frac{2 \cdot e}{D_g}, \quad D_g = D - d \text{ – гідравлічний діаметр}$$

кільцевого простору.

На рис. 7, 8 надано розподіл швидкості у між трубному просторі «НКТ-КГТ», що розташовані з ексцентриситетом  $\bar{e} = 0,35$ .

На рис. 9 наведено чисельні результати втрат

тиску у кільцевому просторі на ділянці зі стабілізованим профілем швидкості для чотирьох варіантів зміни співвідношення циліндричних труб «НКТ-КГТ» при 4-х режимах течії у між трубному просторі.

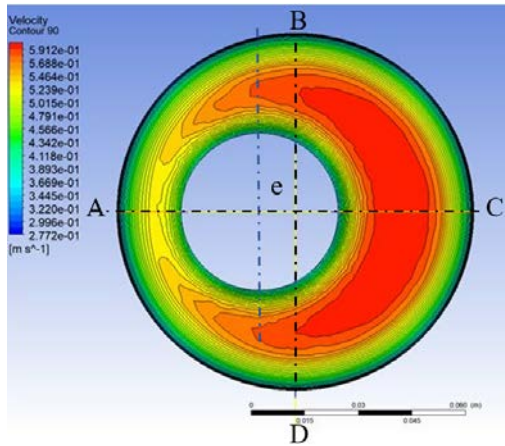


Рис. 7. Візуалізація розподілу швидкості у кільцевому просторі КГТ-НКТ-КГТ при ексцентрично розташованих трубах

**Висновки.** Результати досліджень дозволяють прогнозувати величину коефіцієнта опору та втрати тиску при прокачуванні технологічних рідини через гнучку трубу колтюбінгу. Результати досліджень

застосовуються для прогнозування енергетичних характеристик насосного обладнання при подачі технологічної рідини у свердловину. Також результати можна використовувати для перевірочних розрахунків міцності колони гнучких труб.

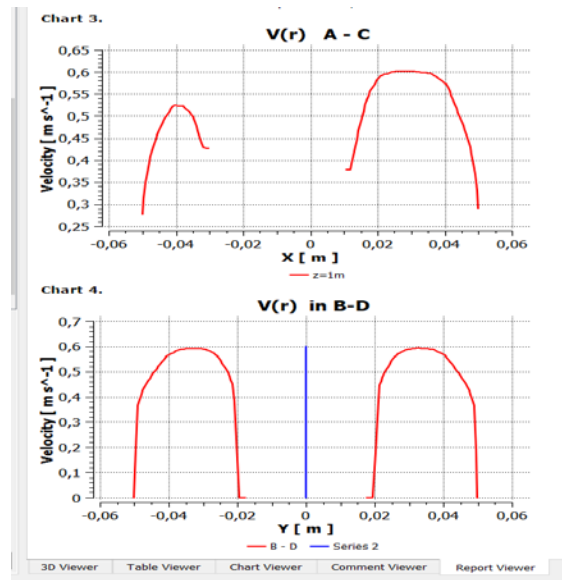


Рис. 8. Розподіл швидкості у між трубному просторі «НКТ-КГТ» з ексцентриситетом  $\bar{e} = 0,35$

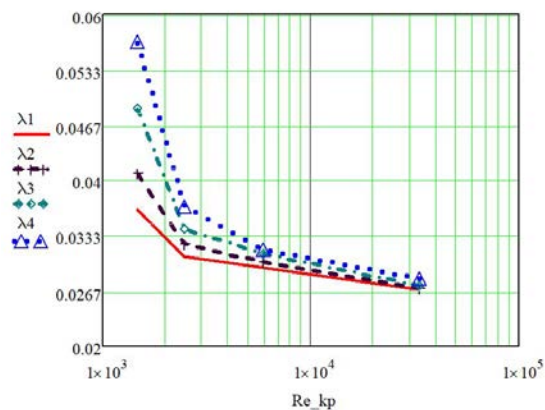
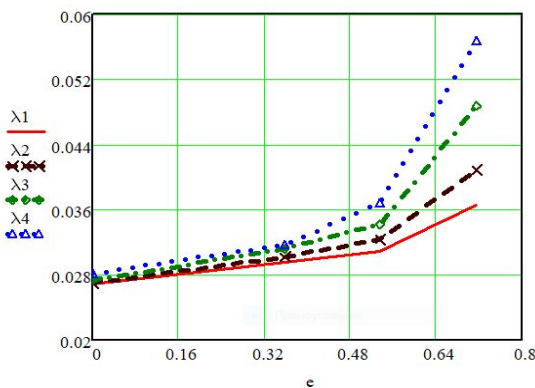


Рис. 9. Залежності коефіцієнту опору  $\lambda$  у між трубному просторі «НКТ-КГТ» від ексцентриситету  $\bar{e} = 0; 0,35; 0,535; 0,714$  та режиму течії  $Re_{kp}$

**Список літератури**

1. Поліник М. М., Ясюк В. М., Яремійчук Р. С. *Колтюбінг у нафтогазовидобуванні*. Львів: Центр Європи, 2014. 336 с.
2. Катеринчук П. О., Римчук Д. В., Цибулько С. В., Шудрик О. Л. *Основи, інтенсифікація та ремонт свердловин*. Харків: Пром-Арт, 2018. 608 с.
3. *Drilling Manual. Coiled Tubing Complete Guide*. URL: <https://www.drillingmanual.com/coiled-tubing-complete-guide/> (дата звернення: 30.07.2023).
4. *ГНКТ в Україні: курс на усложнение работ*. URL: <https://oil-gas.com.ua> (дата звернення: 28.12.2022).
5. *Колтюбінгові установки. Компанія ООО «Регион»*. URL: <https://region.if.ua/?q=uk/node/198> (дата звернення: 30.07.2023).
6. «Колтюбінгова ера» – як в Україні впроваджують сучасні технології в газовидобувній галузі. URL: <https://poltava.to/project/5545/> (дата звернення: 30.07.2023).
7. Витязь О. Ю *Розвиток наукових основ оцінки роботоздатності колон бурлих та гнучких труб: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.12*. Івано-Франківськ, 2021. 371 с. URL: <http://clar.nung.edu.ua/handle/123456789/8735> (дата звернення: 30.07.2023).
8. Chhabra R. P., Richardson J. F. *Non-Newtonian flow and applied rheology. Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2008. 518 p.
9. 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. 000165.
10. Leusheva E., Brovkina N., Morenov V. Investigation of Non-Linear Rheological Characteristics of Barite-Free Drilling Fluids. *Fluids*. 2021. Vol. 6. P. 327. URL: <https://doi.org/10.3390/fluids6090327> (дата звернення: 30.07.2023).
11. Rymchuk D., Shevchenko N., Tulska A., Ponomarenko V., Shudryk O. Research and development of a mathematical model of a polymer-based viscous non newtonian fluid for oil and gas wells drilling. *Petroleum and Coal*. 2022. Vol. 64, issue 4. P. 796–803.
12. Gavrilov A. A., Rudyak V. Ya. Reynolds-averaged modeling of turbulent flows of power-law fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 227. P. 45–55.
13. 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: 30.07.2023).
14. 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.
  15. Zhou Y., Shan S. N. Fluid Flow in Coiled Tubing: A Literature Review and Experimental Investigation. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2004. Vol. 43, issue 6. P. 52–61.
  16. Zhang Q., Zhang M. L., Zhou Z. H., Liao R. Q., Feng J., Liu X. Numerical simulation for ball passing capacity in coiled tubing. *International Journal of Heat and Technology*. 2015. Vol. 33, no. 4. P. 161–166. doi: 10.18280/ijht.330420
  17. Cao Y., Pan Y., Mi H., Wang J., Niu Z., Dou Y. Analysis of the running capacity of coiled tubing in three-dimensional curved borehole. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 804, issue 2. P. 022014. doi: 10.1088/1755-1315/804/2/022014
  18. ANSYS CFX Tutorials 2021. URL: <https://studylib.net/doc/25536336/ansys-cfx-tutorials-2021-r1> (дата звернення: 30.07.2023).
  19. Ansys Student – Free Software Download. URL: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student> (дата звернення: 03.03.2023).

#### References (transliterated)

1. Polinyk M. M., Yasyuk V. M., Yaremychuk R. S. *Koltyubinh u naftohazovydobuvanni* [Coiled tubing in oil and gas production]. Lviv, Tsentr Yevropy Publ., 2014. 336 p.
2. Katerynchuk P. O., Rymchuk D. V., Tsybul'ko S. V., Shudryk O. L. *Osvoyennya, intensyfikatsiya ta remont sverdlovyh* [Development, intensification and repair of wells]. Kharkiv, Prom-Art Publ., 2018. 608 p.
3. *Drilling Manual. Coiled Tubing Complete Guide*. Available at: <https://www.drillingmanual.com/coiled-tubing-complete-guide/> (accessed 30.07.2023).
4. *GNKT v Ukraine: kurs na uslozhenie robot* [Coiled Tubing in Ukraine: a course for increasing complexity of operations]. Available at: <https://oil-gas.com.ua> (accessed 28.12.2022).
5. *Koltyubinhovi ustanovky. Kompaniya OOO "Rehion"* [Coiled tubing machinery. Company LLC "Region"]. Available at: <https://region.if.ua/?q=uk/node/198> (accessed 30.07.2023).
6. *"Koltyubinhova era" – yak v Ukraini vprovadzhuyut' suchasni tekhnolohiyi v hazovydobuvnyi haluzi* ["Coiled tubing era" – how modern technologies are being implemented in the gas production industry in Ukraine]. Available at: <https://poltava.to/project/5545/> (accessed 30.07.2023).
7. Vutyaz' O. Yu. *Rozvytok naukovykh osnov otsinky robozdatnosti kolon burylnykh ta hnuchkykh trub: dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.05.12* [Development of scientific bases for assessing the efficiency of drill and flexible pipe strings]. Ivano-Frankivsk, 2021. 371 p. Available at: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/8735> (accessed 30.07.2023).
8. Chhabra R. P., Richardson J. F. *Non-Newtonian flow and applied rheology. Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2008. 518 p.
9. 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. 000165.
10. Leusheva E., Brovkina N., Morenov V. Investigation of Non-Linear Rheological Characteristics of Barite-Free Drilling Fluids. *Fluids*. 2021, vol. 6, p. 327. Available at: <https://doi.org/10.3390/fluids6090327> (accessed 30.07.2023).
11. Rymchuk D., Shevchenko N., Tulska A., Ponomarenko V., Shudryk O. Research and development of a mathematical model of a polymer-based viscous non newtonian fluid for oil and gas wells drilling. *Petroleum and Coal*. 2022, vol. 64, issue 4, pp. 796–803.
12. Gavrilov A. A., Rudyak V. Ya. Reynolds-averaged modeling of turbulent flows of power-law fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2016, vol. 227, pp. 45–55.
13. 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 30.07.2023).
14. Shevchenko N. H., Shudryk O. L., Koval' O. S., Doroshenko O. V. *Vrakhuvannya 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.
15. Zhou Y., Shan S. N. Fluid Flow in Coiled Tubing: A Literature Review and Experimental Investigation. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2004, vol. 43, issue 6, pp. 52–61.
16. Zhang Q., Zhang M. L., Zhou Z. H., Liao R. Q., Feng J., Liu X. Numerical simulation for ball passing capacity in coiled tubing. *International Journal of Heat and Technology*. 2015, vol. 33, no. 4, pp. 161–166. doi: 10.18280/ijht.330420
17. Cao Y., Pan Y., Mi H., Wang J., Niu Z., Dou Y. Analysis of the running capacity of coiled tubing in three-dimensional curved borehole. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 804, issue 2, pp. 022014. doi: 10.1088/1755-1315/804/2/022014
18. ANSYS CFX Tutorials 2021. Available at: <https://studylib.net/doc/25536336/ansys-cfx-tutorials-2021-r1> (accessed 30.07.2023).
19. Ansys Student – Free Software Download. Available at: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student> (accessed 03.03.2023).

Надійшла (received) 15.08.2023

#### 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

**Калюжний Владислав Володимирович (Kaliuzhnyi Vladyslav)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістрант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1987-3437>; e-mail: vladyslav.kaliuzhnyi@mit.khpi.edu.ua

**Андрієвська Вікторія Сергіївна (Andrievska 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: vikaandrievska065@gmail.com