

---

---

# Нові рішення у сучасній техніці та технологіях

---

---

УДК 622.24.08

DOI: 10.31471/1993-9868-2024-1(41)-86-95

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ГЕНЕРАТОРА ОСЬОВИХ КОЛИВАНЬ В БУРИЛЬНІЙ КОЛОНІ

О. О. Слабий<sup>1</sup>, Я. С. Гридзук<sup>1</sup>, В. Ф. Царук<sup>2</sup>, Т. І. Кондур<sup>1</sup>, І. Ю. Мохній<sup>1</sup>, А. Б. Михайлів<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: burewisnyk@gmail.com

<sup>2</sup>ТОВ "Денімекс Юкрейн"; 01135, м. Київ, вул. Казарменна, 4Д пр. 91А

В роботі описано розроблену методика для визначення оптимального місця розташування генератора осьових коливань у компоновці бурильної колони, що призначена для буріння заданого інтервалу похило-скерованої свердловини. Запропонована методика ґрунтується на аналізі результатів динамічного моделювання системи «бурильна колона в похило-скерованій свердловині» здійсненої у часовій області. Для проведення чисельних експериментів розроблено низку базових імітаційних моделей в мові моделювання Modelica, які дають змогу шляхом зміни вхідних параметрів створювати імітаційні моделі для значної кількості типових конструкцій бурильних колон, що знаходяться в свердловині довільного профілю. В розробленій імітаційній моделі бурильна колона описується за допомогою soft-string моделі, а з дисипативних сил, що діють на колону враховано сили в'язкого тертя колони об промивальну рідину та сили тертя колони об стінку свердловини, які описані нелінійною моделлю тертя Стрібека. Шляхом аналізу результатів імітаційного моделювання розроблено процедуру вибору тривалості часової області динамічного моделювання, а також визначено показники оцінки ефективності застосування генератора осьових коливань. За показник ефективності обрано середнє значення сумарної величини сил тертя на обраному проміжку часу, які діють в бурильній колоні при усталеному режимі її роботи. Для автоматизації проведення серії чисельних експериментів, обробки отриманих результатів та виведення рекомендацій, щодо місця оптимального місця розташування генератора осьових коливань у бурильній колоні створена програма в мові Python, яка забезпечує прийнятний час виконання обчислень шляхом паралельного проведення імітаційного моделювання у декількох потоках. Результатом виконання програми є графік залежностей середнього значення сумарної величини сил тертя для бурильної колони, що відрізняється точкою розташування генератора осьових коливань на різних етапах буріння заданого інтервалу похило-скерованої свердловини.

Ключові слова: похило-скероване буріння, сили опору рухові бурильної колони, генератор осьових коливань, тертя Стрібека.

*The paper describes the developed methodology for determining the optimal location of the axial vibration generator in the drill string layout intended for drilling a given interval of a directional well. The proposed methodology is based on the analysis of the results of dynamic modeling of the system "drill string in a directional well" carried out in the time domain. To carry out numerical experiments, a number of basic simulation models have been developed in the Modelica simulation language, which allow, by changing the input parameters, to create simulation models for a significant number of typical drillstring designs in a well of arbitrary profile. In the developed simulation model, the drillstring is described using a soft-string model, and the dissipative forces acting on the drillstring include the forces of viscous friction of the drillstring on the flushing fluid and the forces of friction of the*

*drillstring on the well wall, which are described by the nonlinear Stribeck friction model. By analyzing the results of simulation modeling, a procedure for selecting the duration of the time domain of dynamic modeling was developed, and indicators for evaluating the effectiveness of using an axial oscillation generator were determined. The average value of the total value of friction forces over the selected time interval acting in the drill string at the steady-state mode of its operation was chosen as the efficiency indicator. To automate a series of numerical experiments, process the results obtained, and derive recommendations on the optimal location of the axial vibration generator in the drill string, a Python program was created that provides acceptable computing time by performing simulation in several threads in parallel. The result of the program is a graph of dependencies of the average value of the total friction forces for a drill string that differs in the location of the axial vibration generator at different stages of drilling a given interval of a directional well.*

Keywords: inclined directional drilling, drag forces in the drillstring, axial oscillations tool, Stribek friction.

## Вступ

Застосування генераторів осьових коливань (ГОК) широко увійшло у практику буріння похило-скерованих свердловин. Вони дають змогу зменшити величину сил опору рухові бурильної колони та покращити передачу осьового зусилля до долота. Також в результаті їх роботи вдається подолати ефект переривчастого проковзування бурильної колони вздовж свердловини та забезпечити сталі динамічні характеристики роботи долота.

Концепція застосування ГОК ґрунтується на тому, що в результаті його роботи на певній ділянці бурильної колони виникають осьові коливання. Отже, на даній ділянці при контакті бурильної колони із стінками свердловини домінуючими будуть динамічні сили опору поздовжньому рухові бурильної колони, які є значно меншими за сили опору спокою. Таким чином вдається зменшити величину сил опору рухові бурильної колони та покращити передачу осьової сили до долота. Враховуючи те, що розподіл величини сил опору поздовжньому рухові бурильної колони є нерівномірним по довжині колони та залежить від компоновки бурильної колони, профілю свердловини, матеріалу стінок свердловини та інших факторів, для ефективного використання ГОК його слід розташовувати у бурильній колоні так, щоб він забезпечував якомога більше зменшення сил опору рухові бурильної колони та, відповідно, покращив передачу осьової сили до долота. Опису методики для розв'язання даної задачі посвячена дана робота.

## Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Вибір оптимальної компоновки бурильної колони, зокрема місця розташування ГОК у ній, для спорудження глибоких горизонтальних та похило-скерованої свердловини має важливе значення для досягнення заданих техніко-економічних показників буріння. Для вирішення даної задачі слід прогнозувати величину сил опору рухові бурильної колони, ефективність

передачі осьового зусилля на долото та характер їх впливу на процес спорудження свердловини. Однак задача визначення сил опору є доволі складною, залежить від багатьох факторів, зокрема проектного профілю свердловини, компоновки бурильної колони, режимних параметрів буріння та роботи ГОК, властивостей промивальної рідини, породи на вибої та матеріалу стінок свердловини. Зважаючи на це, створення загальних рекомендацій щодо вибору оптимальної компоновки бурильної колони є фактично неможливим, тож для кожного конкретного випадку слід окремо проводити необхідні дослідження.

Аналіз існуючих публікацій показує, що на сьогодні основним методом визначення сил опору рухові бурильної колони із встановленим ГОК є динамічне моделювання бурильної колони, для опису якої, як правило, використовується soft-string модель, в часовій області. Це зумовлено варіативністю компоновок бурильних колон та профілів свердловин, а також використанням нелінійних моделей тертя, для опису контактної взаємодії бурильної колони із стінкою свердловини. Так, Чжон (Zhong) та інші [1] на основі створеної математичної моделі бурильної колони із встановленим ГОК, що проводить спорудження J-подібної свердловини, провели серію чисельних експериментів для різних режимних параметрів буріння, розташування ГОК у бурильній колоні та параметрів і режимів роботи ГОК (частота та інтенсивність коливань, жорсткість пружного тіла). На основі отриманих результатів проведено оцінку впливу зміни тих чи інших параметрів на ефективність передачі осьової сили до долота. Встановлено, що для заданих умов буріння найбільш ефективною є частота коливань ГОК в діапазоні 15-20 Гц, амплітуда динамічної сили повинна становити >20 кН, а жорсткість пружного тіла в ГОК – не менше 20МН/м. В роботі [2] на основі створеної чисельної моделі роботи бурильної колони оцінено ефективність застосування ГОК при різних параметрах тертя між бурильною колоною і стінками свердловини, яка моделю-

валась моделлю Дала (Dahl). Проведена серія чисельних експериментів для спорудження J-подібної свердловини дала змогу оцінити зміну сил тертя при різній величині амплітуди динамічної сили, що генерується ГОК, а також параметрів моделі тертя.

Ши (Shi) та інші [3; 4] розробили програму для статичного та динамічного моделювання роботи бурильної колони, яка ґрунтується на soft-string моделі та розв'язується чисельним методом скінченних різниць. За результатом чисельних експериментів проаналізовано розподіл контактних сил по довжині бурильної колони, що проводить спорудження S-подібної свердловини, та зроблено оцінку ефективності застосування ГОК на зменшення сил тертя. Ван (Wang) та інші [5; 6] дослідили динамічні режими роботи бурильної колони при спорудженні J-подібної свердловини на основі створеної моделі, де бурильна колона представлена скінченним числом зосереджених мас, поєднаних пружними тілами. Чжан (Zhang) та інші [7] створили математичну модель для дослідження поздовжніх та крутильних коливань бурильної колони із встановленим ГОК, та на її основі розробили програму, яка чисельно розв'язує створену модель методом кінцевих різниць. В роботі проведено серію чисельних експериментів з моделювання процесу поглиблення J-подібної свердловини та за результатами експериментів оцінено зміну довжини ділянки бурильної колони, де виникають динамічні сили тертя, в залежності від розташування ГОК та режимних параметрів його роботи. В роботі [8] на основі розробленої чисельної моделі бурильної колони із встановленим ГОК оцінено вплив основних режимів роботи ГОК на ефективність зменшення сил опору рухові бурильної колони та величину передачі осьової сили до долота.

### **Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми**

Проведений аналіз публікацій показує, що на сьогодні створено низку математичних та чисельних моделей бурильної колони із встановленим ГОК, які дають змогу моделювати динамічні процеси, що виникають в бурильній колоні. Розроблені моделі відрізняються чисельною складністю, точністю та підходами до опису окремих факторів, зокрема тертя, та дають змогу прогнозувати величину сил опору та ефективність передачі осьової сили на долото за конкретних умов буріння. Хоча в роботах на основі опрацювання результатів чисельного моделювання зроблено оцінку впливу різних

факторів на ефективність застосування ГОК, однак ніде не описано чіткого підходу та методики для визначення оптимального місця розташування ГОК у бурильній колоні в процесі буріння заданого інтервалу свердловини, що є одним із найбільш доступних для зміни параметрів при спорудженні конкретної свердловини. Вирішенню даної задачі посвячена дана стаття.

### **Мета та завдання досліджень**

Метою дослідження є оцінити вплив місця розташування ГОК у бурильній колоні на зменшення сил опору її поздовжньому рухові та величину передачі осьової сили на долото. Задачею дослідження є розроблення методики визначення оптимального місця розташування ГОК у бурильній колоні для заданих умов та режимних параметрів буріння.

### **Висвітлення основного матеріалу дослідження**

#### **Основні вимоги та вибір технічних рішень реалізації**

На основі проведеного аналізу досліджуваного об'єкту та публікацій за даною тематикою сформовано наступні вимоги до розробки методики визначення оптимального місця розташування ГОК у бурильній колоні:

- обґрунтування оптимального місця розташування ГОК повинно базуватись на аналізі результатів динамічного моделювання бурильної колони в часовій області;
- динамічна модель повинна з достатньою точністю описувати дисипативні сили, які діють на ділянці бурильної колони, де спостерігаються коливання, викликані ГОК;
- модель повинна легко конфігуруватись та налаштовуватись під конкретний досліджуваний об'єкт;
- виконання необхідних обчислень повинно бути автоматизованим та виконуватись за прийнятний час.

Враховуючи вище описані вимоги, обрано наступні технічні рішення для реалізації розробленої методики. Динамічна модель бурильної колони у похило-скерованій свердловині створюється засобами мови моделювання Modelica [9]. Дана мова дає можливість, окрім прямого опису моделі досліджуваної системи у вигляді системи звичайних диференціально-алгебраїчних рівнянь, створювати моделі складних систем із набору моделей окремих підсистем шляхом їх мережевого блокового поєднання за заданими правилами (мережі Кірхгофа)

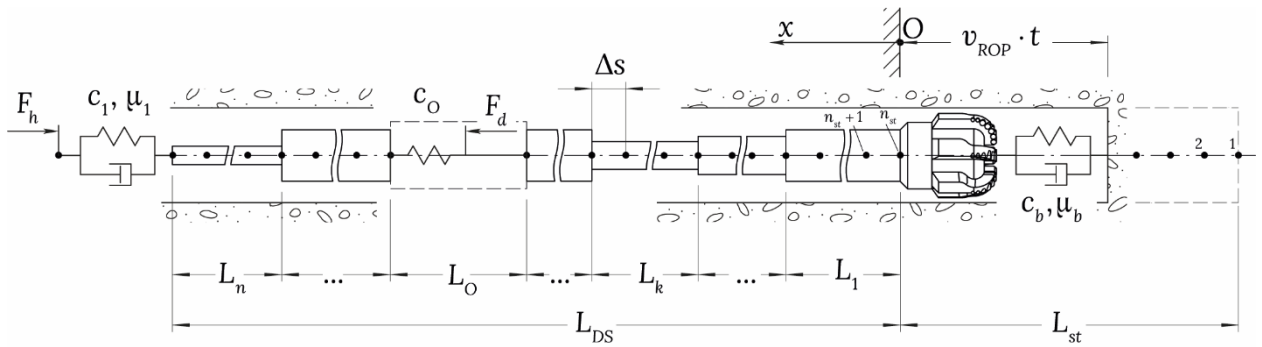


Рисунок 1 – Механічна модель досліджуваного об'єкту

[10] та є нейтральною до галузей застосування. Завдяки такій структурі мови вдається досягнути затребуваної гнучкості для конфігурації та налаштування вихідної моделі під конкретні умови досліджень. Мова Modelica є вільною, і на сьогодні існує значна кількість комерційних та вільних програмних продуктів для її застосування [11]. Автоматизація проведення чисельних експериментів, обробка результатів моделювання та виведення рекомендацій здійснювати програмно, шляхом написання програми в мові Python. Вибір даної мови обґрунтований тим, що для неї існують бібліотеки API для більшості середовищ моделювання мови Modelica та бібліотеки читання файлів результатів моделювання.

### Імітаційна модель

Модель бурильної колони, що проводить спорудження похило-скерованої свердловини заданого профілю, отримується шляхом задання параметрів та конфігурування однієї із базових попередньо створених імітаційних моделей в мові Modelica. Детально процес створення однієї із таких моделей, а також опис бібліотеки імітаційних моделей окремих елементів бурильної колони, що використовувалися при створенні базових моделей описано в роботі [12]. В даному розділі розглянуто лиш ключові особливості обраного підходу на прикладі однієї із базових моделей.

Механічна модель базової імітаційної моделі, яка використовується для моделювання колон, що складаються із скінченного числа секцій бурильних труб, одного ГОК та долота, наведена на рис. 1. Бурильна колону представляємо у вигляді об'єкта, що складається із двох частин, що поєднані через ГОК. Кожна частина бурильної колони є складеним пустотілим стрижнем круглого перерізу із розподіленими параметрами по довжині, що не володіє жорсткістю на згин (soft-string модель) та складається із скінченного числа секцій. ГОК моделюємо у вигляді пружного тіла жорсткістю  $c_O$  до одно-

го кінця якого прикладається динамічна сила  $F_d$  із заданою частотою та амплітудою коливань. Для зменшення затрат часу на імітаційне моделювання в моделі розглядаємо лиш низ бурильної колони загальною довжиною  $L_{DS}$ , а відкинута верхня частина замінюється еквівалентним пружно-в'язким тілом з коефіцієнтом жорсткості  $c_1$  та демпфування  $\mu_1$  та прикладеною статичною осьювою силою  $F_h$ . Величина  $L_{DS}$  обирається так, щоб коливання генеровані ГОК повністю згасали на ділянці низу бурильної колони, що розглядається. В кожній частині бурильної колони визначаються секція довжиною  $L_k$  та  $L_m$ , відповідно, величина яких змінюватиметься програмно для змінення місця розташування ГОК.

Профіль свердловини описується у вигляді масиву значень зенітного кута  $\alpha$  з дискретним кроком  $\Delta s$  по її довжині, починаючи від проектного кінця свердловини. Оскільки модель повинна передбачати можливість моделювання на різних етапах спорудження свердловини, приймаємо, що фактичний вибій знаходиться на відстані  $L_{st}$  від проектного. Для моделювання ефектів проковзування бурильної колони свердловиною вважаємо, що вибій переміщається із швидкістю рівною механічній швидкості буріння  $v_{ROP}$ . Таке абстрактне представлення досліджуваного об'єкту в базовій моделі дає змогу описати значну кількість реальних конструкцій бурильних колон, що проводять спорудження свердловин довільного профілю.

Для кращого розуміння створеної імітаційної моделі запишемо математичну модель поздовжніх коливань секції бурильної колони, як одного із ключових елементів моделі:

$$E_j A_j \frac{d^2 u(x,t)}{dx^2} - \rho_j A_j \frac{d^2 u(x,t)}{dt^2} + \xi \left( v_f - \frac{du(x,t)}{dt} \right) - F_f(x,t) - (\rho_j - \rho_f) A_j g \cos(\alpha(x)) = 0, \quad (1)$$

де  $\rho_f$  – густина промивальної рідини,  
 $g$  – пришвидшення вільного падіння,  
 $u(x,t)$  – функція що описує поздовжні переміщення перерізу бурильної колони з координатою  $x$ , починаючи від точки фактичного вибою в часі  $t$ ,  
 $\xi$  – приведений коефіцієнт демпфування бурильної колони у промивальній рідині,  
 $v_f$  – швидкість промивальної рідини у свердловині, що обчислюється за формулою:

$$v_f = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}(d_w^2 - D_i^2)}, \quad (2)$$

де  $Q$  – об’ємна витрата промивальної рідини,  
 $d_w$  – діаметр свердловини,  
 $D_i$  – зовнішній діаметр секції бурильної колони.

Сили тертя  $F_f(s,t)$ , що виникають внаслідок взаємодії бурильної колони із стінкою свердловини, описуємо за допомогою моделі тертя Стрібека:

$$F_f(x,t) = (\rho_j - \rho_f) A_j g \sin(\alpha(x)) \mu(x,t) \times \text{sgn}\left(\frac{du(x,t)}{dt}\right); \quad (3)$$

$$\mu(x,t) = \left[ \mu_d + (\mu_s - \mu_d) \exp\left(-\left(\frac{1}{v_{st}} \cdot \frac{du(x,t)}{dt}\right)^{k_{st}}\right) \right],$$

де  $\mu_s$  і  $\mu_d$  – статичний і динамічний коефіцієнти тертя бурильної колони до стінки свердловини,

$v_{st}$  – значення відносної швидкості між тілами, при якому зникає ефект Стрібека,

$k_{st}$  – коефіцієнт, що характеризує характер згасання ефекту Стрібека.

### Порядок оцінки ефективності ГОК

Щоб забезпечити прийнятний час проведення обчислень, слід обирати такі початкові умови та критерії оцінки ефективності ГОК, за яких затребуваний проміжок часу  $t_s$  імітаційного моделювання буде мінімальним. Отримані результати моделювання показують, що в них можна виділити два режими роботи бурильної колони: початковий перехідний та усталений. Проаналізувавши результати моделювання, що наведені в роботі [12], для зменшення тривалості перехідного режиму початковий напружено-деформований стан бурильної колони розраховуємо з умови, що уся колона в момент часу  $t=0$  рухається вниз із швидкістю, що рівна

механічній швидкості буріння. Такий підхід дає змогу врахувати вплив статичних сил тертя на напружено-деформований стан бурильної колони, та відповідно зменшити перехідний період в порівнянні із випадком, коли початковий напружено-деформований стан колони визначається із умови її статичної рівноваги.

Проаналізувавши досліджуваний об’єкт, можна визначити два основних критерії, за якими можна оцінювати ефективність роботи ГОК: середнє сумарне значення сил опору рухові бурильної колони та коефіцієнт передачі осьового зусилля до долота. Вибір критерію, що застосовуватиметься в методиці, здійснимо, виходячи із можливості його визначення за мінімальне значення часу симуляції  $t_s$ . Для цього проведемо оцінку результатів серії чисельних експериментів процесу спорудження похило-скерованої свердловини, профіль якої зображений на рис. 2. Конструкція бурильної колони, що використовувалась при моделюванні, описана в таблиці 1, а основні параметри досліджуваної системи – в таблиці 2. Імітаційне моделювання проводилось на проміжку часу  $t_s = 100$  с, що передбачає вихід бурильної колони на усталений режим роботи.

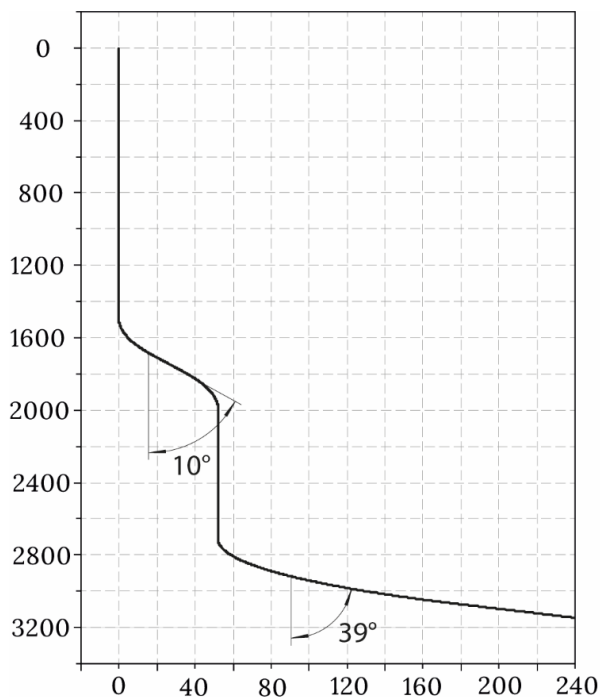


Рисунок 2 – Профіль свердловини

Здійснимо оцінку можливості визначення критеріїв ефективності ГОК для усталеного режиму роботи бурильної колони з умови мінімуму  $t_s$ . Для цього розглянемо результати імітаційного моделювання, а саме, графік зміни величини сумарної сили тертя на ділянці бу-

Таблиця 1 – Параметри компоновки бурильної колони

| №  | Діаметр зовнішній, мм | Діаметр внутрішній, мм | Довжина секції, м |
|--|-----------------------|------------------------|-------------------|
| Секції бурильної колони, що розташовані нижче генератора осьових коливань  |                       |                        |                   |
| 1  | 165,1                 | 76,2                   | 22                |
| 2  | 114,3                 | 51                     | 25(змінювалась)   |
| 3  | 127                   | 76,2                   | 41                |
| Генератор осьових коливань   |                       |                        |                   |
| 4  | 165,1                 | -                      | 15                |
| Секції бурильної колони, що розташовані вище генератора осьових коливань   |                       |                        |                   |
| 5  | 127                   | 76,5                   | 89                |
| 6  | 114,3                 | 95                     | 475(змінювалась)  |
| Секції бурильної колони, що моделюються еквівалентним пружно-в'язким тілом |                       |                        |                   |
| 7  | 114,3                 | 95                     | 2533              |

Таблиця 2 – Параметри досліджуваної системи

| №  | Параметр  | Позначення | Величина |
|----|---|------------|----------|
| 1  | Густина матеріалу бурильної колони, кг/м <sup>3</sup>   | $\rho_d$   | 7850     |
| 2  | Модуль Юнга матеріалу труб, МПа                         | $E$        | 210      |
| 3  | Діаметр свердловини, мм                                 | $d_w$      | 215,9    |
| 4  | Густина промивальної рідини, кг/м <sup>3</sup>          | $\rho_m$   | 1200     |
| 5  | Об'ємна витрата промивальної рідини, л/с                | $Q$        | 30       |
| 6  | Жорсткість породи на вибої, МН/м                        | $c_b$      | 50       |
| 7  | Коефіцієнт демпфування породи на вибої, кН*с/м          | $\mu_b$    | 5        |
| 8  | Початкове осьове навантаження на долоті, кН             | $WOB$      | 20       |
| 9  | Механічна швидкість буріння, м/с                        | $v_{ROP}$  | 0,005    |
| 10 | Статичний коефіцієнт тертя, 1                           | $\mu_s$    | 0,21     |
| 11 | Динамічний коефіцієнт тертя, 1                          | $\mu_d$    | 0,15     |
| 12 | Швидкість Стрібека, м/с                                 | $v_{st}$   | 0,019    |
| 13 | Коефіцієнт, що характеризує згасання ефекту Стрібека, 1 | $k_{st}$   | 2        |
| 14 | Частота роботи ГОК, Гц                                  | $f_O$      | 16       |
| 15 | Амплітуда динамічної сили, що створюється ГОК, кН       | $A_O$      | 10       |
| 16 | Жорсткість блоку пружин ГОК, МН/м                       | $c_O$      | 6        |
| 17 | Крок дискретизації, м                                   | $\Delta s$ | 1        |

рильної колони довжиною  $L_{DS}$ , а також зміну осьової сили на долоті з часом, що зображені на рис. 3. Із графіків бачимо, що усталений режим роботи починає встановлюватись на проміжку часу, починаючи із 15 с. Приймаючи інтервал визначення середнього значення сумарної величини сил опору та осьової сили на долоті за 10 с, оцінимо відмінність отриманих значень для різних моделей на інтервалі 15-25 с та 90-100 с. Так, середнє значення сумарної величини сил опору на ділянці часу 15-25 с відрізняється відзначення на ділянці часу 90-100 с для моделі з розташування ГОК на відстані 88 м на 2,2%,

138 м на 1,9% та 188 м –0,5%. Для осьової сили на долоті ці значення становлять: 1,3%, 2,8% та 4,5% відповідно. Як бачимо із отриманих результатів, зі збільшенням відстані точки розташування ГОК відносно долота в бурильній колоні, тривалість перехідного процесу в ній при оцінці за критерієм ефективності передачі осьової сили на долото зростає, а це вимагає збільшення інтервалу часової області симуляції моделі  $t_s$ . Оскільки за критерієм середньої величини сумарного значення сил опору такий ефект не спостерігаються, оцінку ефективності застосування ГОК проведитимемо за ним.

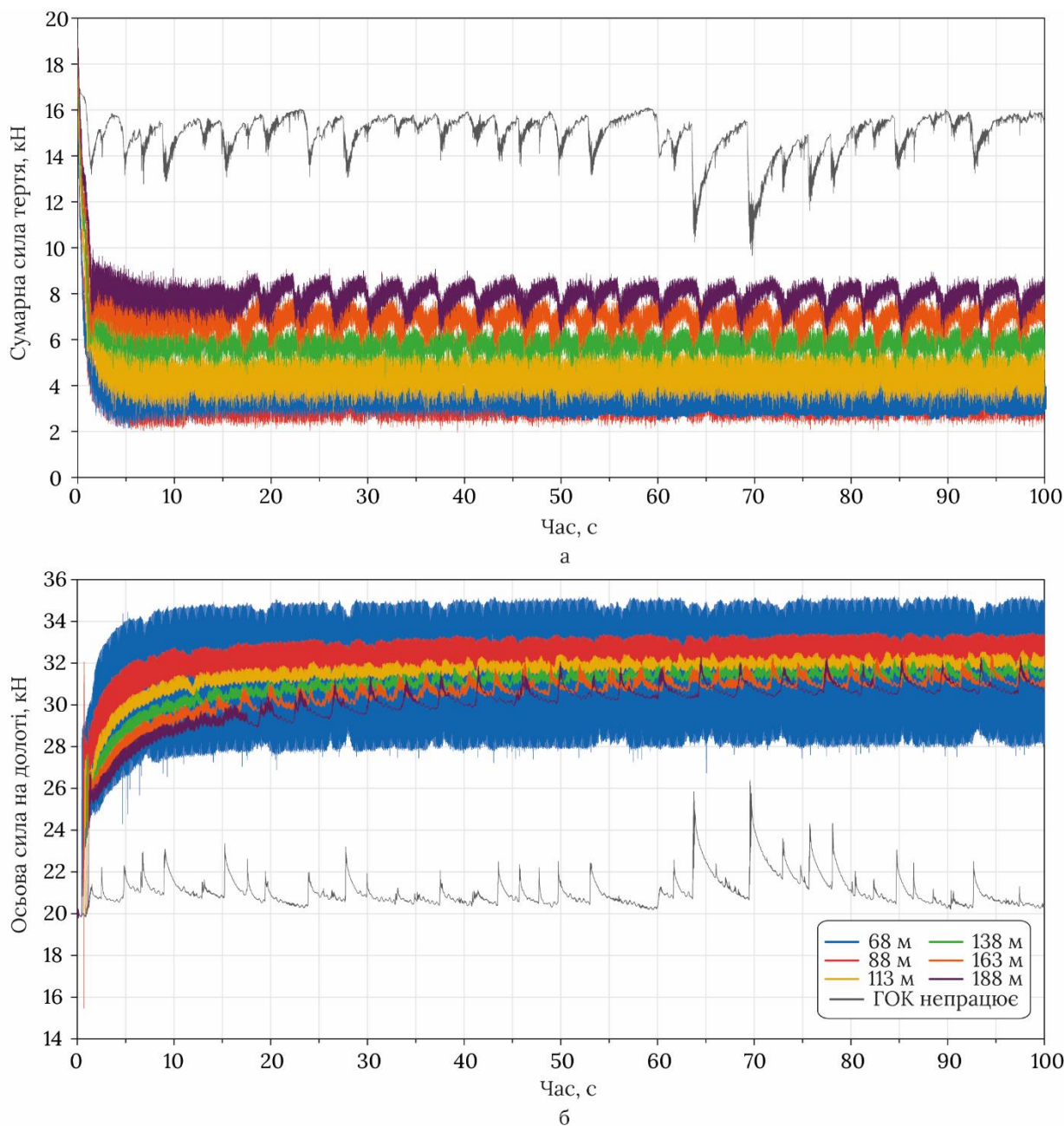


Рисунок 3 – Зміна сумарної сили тертя(а) та осьової сили на долоті (б) в часі за результатами імітаційного моделювання

**Автоматизація обчислень та алгоритм виконання методики**

Для автоматизації проведення чисельних експериментів, аналізу їх результатів та виведення рекомендації щодо оптимальної точки розташування ГОК у буринній колоні створено програму у мові Python, блок схема якої наведена на рис. 4. Створена програма забезпечує автоматизацію проведення серії чисельних експериментів шляхом виклику відповідних функцій API середовища моделювання мови Modelica. Стек завдань на імітаційне моделювання формується на основі задання вихідної імітаційної моделі, часового діапазону симуля-

ції  $t_s$  та набору масивів дискретних значень програмно змінних параметрів, а саме, довжини секції буринної колони  $L_k$ , за допомогою якої змінюється точка розташування ГОК відносно долота та значень довжини  $L_{st}$ , яка визначає розташування фактичного вибою свердловини відносно проєктного. Так забезпечується оцінювання зміни ефективності ГОК на різних етапах буріння заданого інтервалу свердловини. Виходячи із поставленої мети: забезпечити прийнятний час виконання обчислень та особливість розв'язку імітаційних моделей, створених в мові Modelica, який виконуються послі-

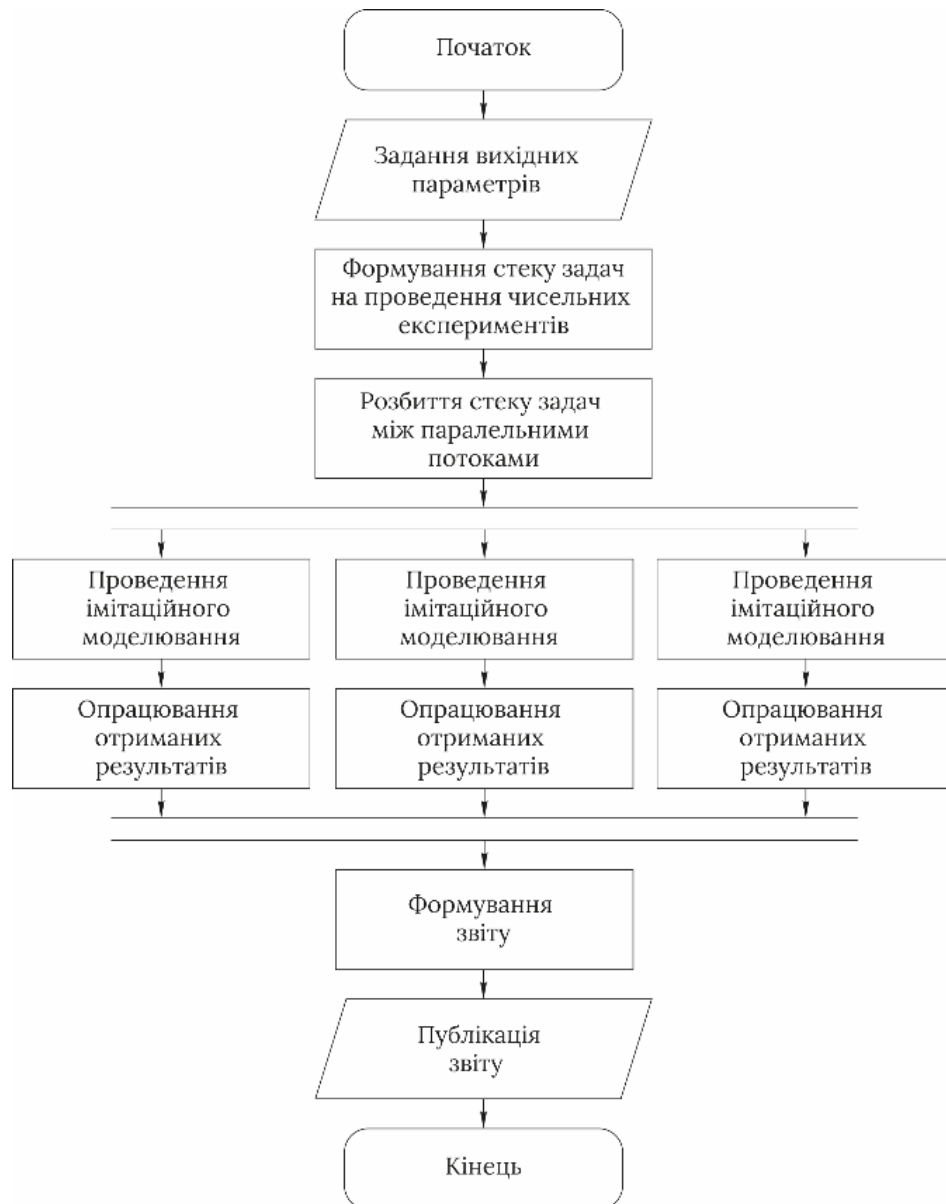


Рисунок 4 – Блок-схема програми

довно, створена програма передбачає проведення чисельних експериментів та обробку їх результатів паралельно в декількох потоках. Для цього здійснюється розбиття стеку завдань на проектування між окремими потоками. За рахунок цього зменшується час необхідний для проведення усього пакету чисельних експериментів. Після завершення виконання усіх потоків на основі отриманих даних формується кінцевий звіт.

Враховуючи вищеописані підходи до створення імітаційної моделі досліджуваного об'єкту, визначення інтервалу часу динамічного моделювання та роботи програми автоматизації, проведення та аналізу чисельних експериментів, порядок виконання дій згідно створеної методики для визначення оптимального місця розташування ГОК є наступним:

- провести аналіз досліджуваного об'єкту, встановити усі параметри для його опису;
- виходячи із конструкції бурильної колони, обрати базову імітаційну модель;
- здійснити необхідні зміни в базовій імітаційній моделі та ввести в неї параметри досліджуваного об'єкту і як результат одержати імітаційну модель для проведення чисельних експериментів;
- за результатами тестового імітаційного моделювання визначити необхідний проміжок часу  $t_s$  для динамічного моделювання, а також тривалість усталеного режиму роботи  $t_e$ , на якому визначатиметься критерій ефективності ГОК;



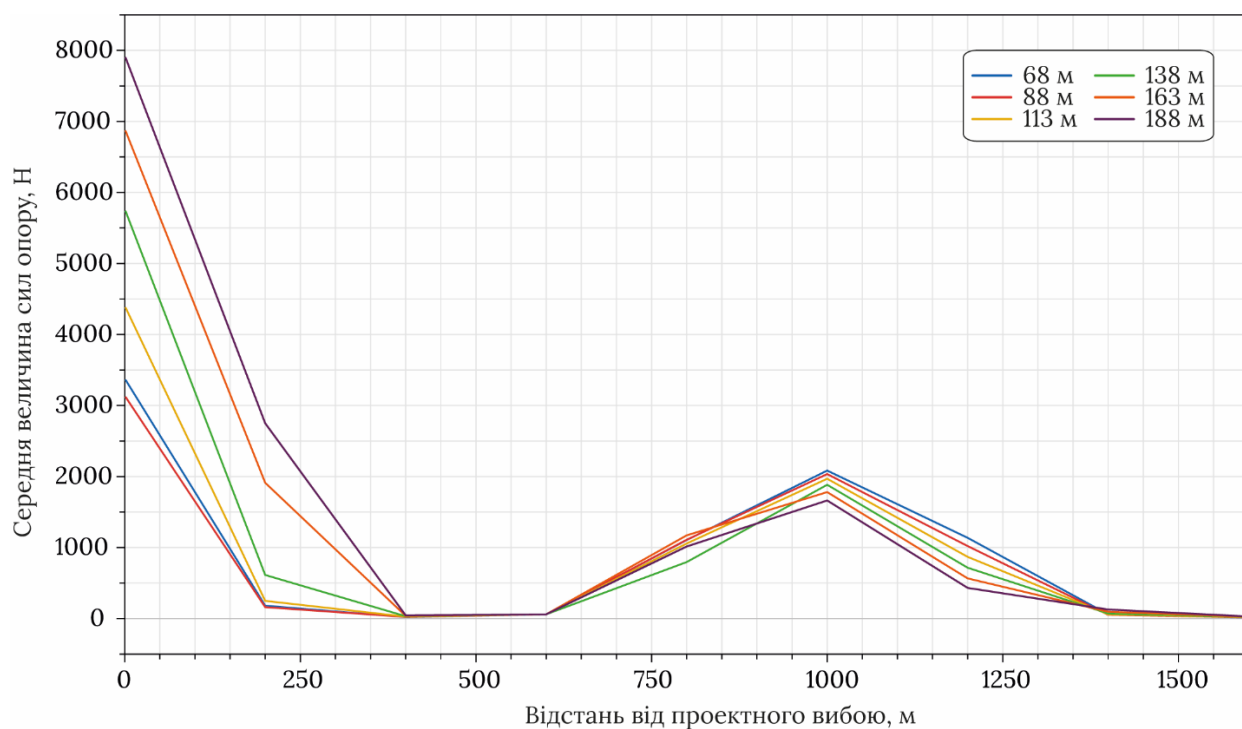


Рисунок 5 – Результат виконання програми

– обрати дискретні значення довжин секцій бурильної колони для задання різних точок розташування ГОК відносно долота, а також дискретні значення розташування фактичного вибою відносно проектного;

– задати обрані дані у програму для автоматизації процесу проведення та обробки чисельних експериментів та отримати звіт.

Графічне представлення отриманих обчислень виконаних для конструкції бурильної колони, що наведена в попередньому розділі при бурінні інтервалу свердловини 1600-3200 м, наведено на рис. 5.

### Висновки

У даній роботі описано розроблену методику визначення оптимального місця розташування ГОК у бурильній колоні при спорудженні похило-скерованих свердловин. При розробленні методики створено бібліотеку моделювання та набір базових імітаційних моделей для опису типових конструкцій бурильних колон в мові моделювання Modelica та розроблено програму в мові Python для автоматизації процесу проведення чисельних експериментів, обробки їх результатів та виведення рекомендацій.

### Література / References

1. Zhong Z., Li Y., Zhao Y., Ju P. A Method of Evaluating the Effectiveness of a Hydraulic Oscillator in Horizontal Wells. *Sound & Vibration*. 2023. Vol. 57. No. 1. P. 15–27. DOI: [10.32604/sv.2023.041954](https://doi.org/10.32604/sv.2023.041954).
2. Wang X., Chen P., Ma T., Liu Y. Modeling and experimental investigations on the drag reduction performance of an axial oscillation tool. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017. Vol. 39. P. 118–132. DOI: [10.1016/j.jngse.2017.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.01.018).
3. Shi X.-L., Huang W.-J., Gao D.-L. Mechanical behavior of drillstring with drag reduction oscillators and its effects on sliding drilling limits. *Petroleum Science*. 2021. Vol. 18. Iss. 6. P. 1689–1697. DOI: [10.1016/j.petsci.2021.09.007](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.09.007).
4. Shi X., Huang W., Gao D., Zhu N. Optimal design of drag reduction oscillators by considering drillstring fatigue and hydraulic loss in sliding drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 208. Art. ID. 109572. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.109572](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109572).
5. Wang X., Yao X., Hu G., Chen P. Drag reduction performance of an axial oscillating tool with different kinds of waveform using a multiscale friction model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 177. P. 135–153. DOI: [10.1016/j.petrol.2019.01.103](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.103).

6. Wang X., Ni H., Wang R., Zhang L., Wang P. Drag-Reduction and Resonance Problems of a Jointed Drillstring in the Presence of an Axial Excitation Tool. *Journal of Energy Resources Technology*. 2019. Vol. 141. Iss. 3. Art. ID 032904. DOI: [10.1115/1.4041155](https://doi.org/10.1115/1.4041155).

7. Zhang H., Ashok P., van Oort E., Shor R. Investigation of pipe rocking and agitator effectiveness on friction reduction during slide drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 204. Art. ID 108720. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.108720](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108720).

8. Jing J., Liu W., Zhou Y. A feasible study for the working mechanism and parameter optimization of the agitator. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 11. Iss. 5. Art. ID 168781401984699. DOI: [10.1177/1687814019846995](https://doi.org/10.1177/1687814019846995).

9. Modelica Association. Modelica – A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling. Language Specification. Version 3.6. 2023. URL: <https://specification.modelica.org/maint/3.6/MLS.pdf>. (acc. date :11 March 2024).

10. Janschek K., Richmond K. Mechatronic systems design. Heidelberg: Springer, 2012. 805 p. ISBN: 978-3-642-17530-5.

11. Modelica Association. Modelica Tools. URL: <https://modelica.org/tools/>. (acc. date :03 Jan 2024).

12. Slabyi O. O., Hrydzhuk Ya. S., Kondur T. I., Mokhnii I. Yu. Imitatsiina model burylnoi kolony z ustanovlenym heneratorom osovykh kolyvan. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2023. No 3(88). P. 49–60. DOI: [10.31471/1993-9973-2023-3\(88\)-49-60](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2023-3(88)-49-60) [in Ukrainian]