

Д. В. РИМЧУК, К. С. РЕЗВА, О. Л. ШУДРИК, Н. Ф. МІНЧУКОВА, Д. Ю. ХРУЩОВ

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ВТРАТ В СВЕРДЛОВИНАХ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ ПРОЦЕСІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ

Розглянуто питання моделювання процесів інтенсифікації нафтогазових свердловин із використанням програмного комплексу. Інтенсифікація є ключовим етапом підвищення ефективності видобутку вуглеводнів, а точні гідравлічні розрахунки відіграють важливу роль у забезпеченні безпечності та оптимізації технологічних операцій. Представлено алгоритм виконання розрахунків гідравлічних втрат із детальним описом особливостей процесу, зокрема застосування гнучких насосно-компресорних труб. Розрахункова модель дозволяє проводити гідравлічні розрахунки в реальному часі та виконувати динамічні симуляції з урахуванням різних реологічних моделей (Newtonian, Power Law, Бінгама, Гершеля-Булклі). Проведено аналіз гідравлічних втрат при закачуванні рідини в трубний простір ГНКТ Ø44,5 мм та виході в затрубний простір між НКТ Ø73 мм і ГНКТ Ø44,5 мм. Розрахунки виконано для різних технологічних рідин (прісної та пластової води) та при зміні товщини стінок труб. Результати показали, що зменшення товщини стінки гнучких насосно-компресорних труб до 3,18 мм забезпечує мінімальні гідравлічні втрати, тоді як використання пластової води збільшує їх на 5–6 % порівняно з прісною через більшу густину. Встановлено, що неоднорідність геометрії труби (різнопрохідна конструкція) призводить до додаткових втрат порівняно з трубами постійного перерізу. Отримані дані підтверджують доцільність оптимізації конструкції труб та вибору робочої рідини для зниження енергетичних витрат і підвищення ефективності процесів інтенсифікації свердловин.

Ключові слова: інтенсифікація, гідравлічні втрати, гнучкі насосно-компресорні труби, технологічна рідина, програмне моделювання, реологічна модель.

D. RYMCHUK, K. REZVAYA, O. SHUDRYK, N. MINCHUKOVA, D. KHRUSHCHOV

MODELING HYDRAULIC LOSSES IN WELLS DURING THE DESIGN OF INTENSIFICATION PROCESSES

The work is devoted to the modeling of well stimulation processes using a specialized software package. Well stimulation is a critical stage in improving hydrocarbon production efficiency, where accurate hydraulic calculations play a key role in ensuring operational safety and optimizing technological processes. The study presents an algorithm for calculating hydraulic losses with a detailed description of process features, particularly the application of coiled tubing system. The computational model enables real-time hydraulic calculations and dynamic simulations, incorporating various rheological models such as Newtonian, Power Law, Bingham, and Herschel-Bulkley. Hydraulic loss analysis was performed for fluid injection into the coiled tubing with the diameter Ø44.5 mm and subsequent flow into the annular space between tubing Ø73 mm and coiled tubing Ø44.5 mm. Calculations were carried out for different technological fluids (fresh water and formation water) and under varying coiled tubing wall thickness conditions. The results demonstrate that reducing coiled tubing wall thickness to 3.18 mm ensures minimal hydraulic losses, while the use of formation water increases losses by 5–6 % compared to fresh water due to its higher density. Furthermore, non-uniform coiled tubing geometry (gradual transition from thicker to thinner walls) introduces additional hydraulic resistance compared to constant-wall designs. Obtained results confirm the importance of optimizing tubing geometry and fluid selection to reduce energy consumption and enhance operational efficiency during well intensification.

Keywords: intensification, hydraulic losses, coiled tubing, technological fluid, software-based modeling, rheological model.

Вступ. У сучасних умовах видобутку вуглеводнів особливу увагу приділяють оптимізації процесів, що впливають на їх ефективність. Одним із критичних факторів є гідравлічні втрати. Їхнє зменшення дозволяє знизити енерговитрати та покращити загальну економічну ефективність проведення процесів на свердловинах.

З огляду на складність фізичних процесів, що відбуваються в свердловинному просторі, комп'ютерне моделювання стає потужним інструментом для аналізу та прогнозування гідравлічних втрат. Воно дозволяє враховувати широкий спектр параметрів – від реологічних властивостей технологічних рідин та обладнання, що використовується в процесах, до геометрії свердловини та умов пласту.

Метою даного дослідження є аналіз гідравлічних втрат у свердловині з використанням комп'ютерного моделювання, що дає змогу виявити ключові чинники, які впливають на ефективність процесу, та запропонувати шляхи його оптимізації [1–3].

Технологічні рідини при інтенсифікації нафтогазових свердловин. Інтенсифікація свердловин – ключовий етап підвищення

ефективності видобутку вуглеводнів. Важливу роль у цьому процесі відіграють технологічні рідини, які покращують проникність порід, сприяють вилученню нафти й газу та мінімізують негативний вплив на пласт.

В якості технологічної рідини використовують прісну та пластову воду, ксантанову камедь. Прісна вода є найбільш доступною та економічною рідиною, що використовується на початкових етапах. Має низьку в'язкість і густину, високу проникність. Застосовується для гідророзриву, промивання, охолодження інструменту. Може спричинити набухання глинистих порід, тому потребує додавання реагентів. Пластова вода (природна вода з покладів), що містить розчинені солі, мінерали, органічні та неорганічні домішки. Її склад залежить від глибини та регіону. Висока мінералізація забезпечує стабільність пластового тиску, знижує ризик утворення осадів. Використовується для підтримки тиску та гідророзриву, особливо в глибоких пластах. Ксантанова камедь – це біополімер, що утворює гелеутворюючі розчини з високою в'язкістю навіть при низьких концентраціях. Стійкий до температури та солей, покращує транспортування шламу,

стабілізує тріщини, зменшує гідравлічні втрати. Ефективний у складних умовах, має змашувальні властивості.

Вибір тієї чи іншої рідини в якості технологічної залежить від процесу, що проєктується у свердловині [4–6].

Використання моделі Hydra програмного комплексу Cerberus (Evaluation Version) при розрахунках процесів інтенсифікації. Cerberus Hydra – це потужний симулятор гідравліки свердловин, призначений для виконання точних гідравлічних розрахунків при роботі з насосно-компресорними трубами (НКТ) та гнучкими насосно-компресорними трубами (ГНКТ). Модель забезпечує комплексне проєктування та моделювання операцій, що охоплюють широкий спектр технологій і типів насосного обладнання.

При використанні моделі стає можливим провести гідравлічні розрахунки в реальному часі та динамічні симуляції процесів, враховуючи при цьому особливості різних типів робочих середовищ. Система підтримує моделювання для рідин, газів, пінистих та багатофазних середовищ, що дозволяє адаптувати розрахунки до складних умов свердловини. Також беруться до уваги і розширені реологічні моделі (степеневого закону (Power Law), Бінгама, Гершеля-Булклі, ньютонівської рідини).

В Cerberus Hydra проводять проєктування наступних технологічних процесів [7–9]:

- розвантаження свердловин;
- газліфтні системи;
- операції з видалення піску;
- приплив або відтік води з пласту;
- моделювання роботи насадок та дроселів.

Розрахунок гідравлічних втрат в системі ГНКТ з використанням моделі Hydra програмного комплексу Cerberus (Evaluation Version). Основна мета розрахунку – моделювання умов циркуляції робочих рідин, визначення перепадів тиску та оптимізація параметрів для безпечного й ефективного проведення операцій.

Для коректного розрахунку гідравлічних втрат необхідно виконати наступні кроки:

1. Змоделювати свердловину:
 - задати геометрію стовбура (глибину, діаметр, профіль);
 - врахувати наявність обсадних колон і відкритих інтервалів.
2. Додати ГНКТ та барабан:
 - вибрати тип і розмір гнучкої труби;
 - задати параметри барабана для намотування ГНКТ (довжина, діаметр, допустимий натяг).
3. Сформувані компоновку нижньої частини ГНКТ:
 - включити елементи: конектор, клапан, насадка;
 - визначити їх гідравлічні характеристики (коефіцієнти опору, діаметр отворів).
4. Додати робочі рідини:
 - вибрати типи рідин для закачування (вода, піниста система, газоріднинні суміші);
 - задати фізико-хімічні властивості: густина,

в'язкість, газовий фактор.

Усі ці компоненти доступні в розділі Managers, що забезпечує централізоване управління параметрами проєкту (рис. 1).

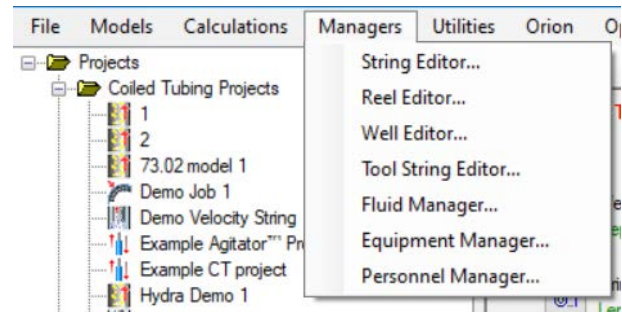


Рис. 1. Розділ Managers в програмі Cerberus

Для моделювання операцій із використанням ГНКТ у програмному комплексі Cerberus необхідно створити барабан, на який буде намотана труба. Цей елемент є ключовим для точного розрахунку натягу, довжини труби та гідравлічних параметрів під час роботи.

Етапами створення барабана в Reel Editor є:

1. запуск редактора барабанів (Reel Editor) у головному меню для роботи з барабанами;
2. створення нового проєкту (натистути на New Reel, щоб додати новий барабан у систему);
3. задання основних параметрів барабана: діаметру барабана (визначає радіус намотування труби), ширини барабана (впливає на кількість витків труби), максимальну довжину ГНКТ (повинна відповідати фактичній довжині труби, що використовується в операції), матеріал і допустиме навантаження (для перевірки безпеки при натягу);
4. перевірка відповідності об'єму барабана довжині ГНКТ (система автоматично розраховує, чи обрана конфігурація барабана здатна вмістити задану довжину труби);
5. збереження та використання барабана в проєкті.

Після налаштування барабан додається до моделі свердловини та використовується для розрахунків натягу, гідравлічних втрат і динаміки роботи ГНКТ.

Reel Editor має ще і додаткові можливості:

- візуалізувати намотування труби на барабан;
- автоматично розрахувати кількості витків і натягу при різних режимах роботи;
- інтегрувати з іншими модулями Cerberus для комплексного аналізу.

Готовий приклад барабана для ГНКТ наведено на рис. 2.

Для коректного моделювання гідравлічних процесів у програмному комплексі Cerberus необхідно створити і параметри ГНКТ. Це виконується через інструмент String Editor, який дозволяє налаштувати всі механічні та геометричні характеристики труби.

Для створення ГНКТ необхідно перейти до String Editor.

Алгоритм створення нової труби наступний:

Вибрати механічні параметрів (установлення зовнішнього діаметру труби).

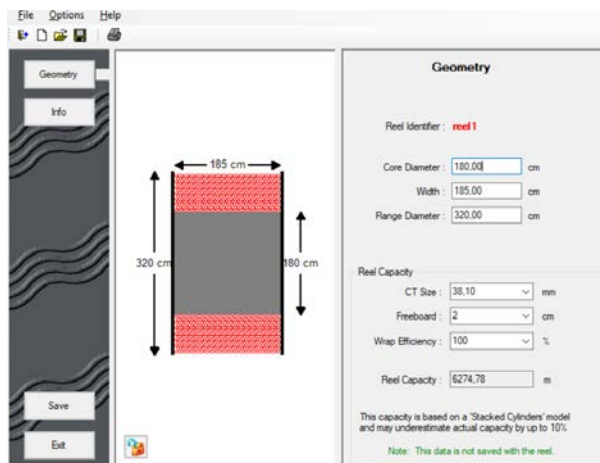


Рис. 2. Приклад моделювання барабану для ГНКТ

Встановити кількість секцій (якщо труба складається з декількох частин).

Обрати матеріал труби для врахування міцності та допустимого натягу.

Задати геометричні характеристики: довжину труби (повинна відповідати фактичній довжині ГНКТ, що використовується в операції), товщину стінки (впливає на внутрішній діаметр і гідравлічні втрати).

Після введення даних система автоматично розраховує внутрішній діаметр, вагу труби та допустимі навантаження.

Приклад основних параметрів при побудові ГНКТ у String Editor та зовнішній вигляд створеної труби в інтерфейсі програми показано на рис. 3.

У програмному комплексі Cerberus важливо правильно налаштувати компоновку нижньої частини труби, яка включає ключові елементи: конектор, клапан та насадку. Ця компоновка визначає гідравлічні характеристики потоку, втрати тиску та ефективність операцій.

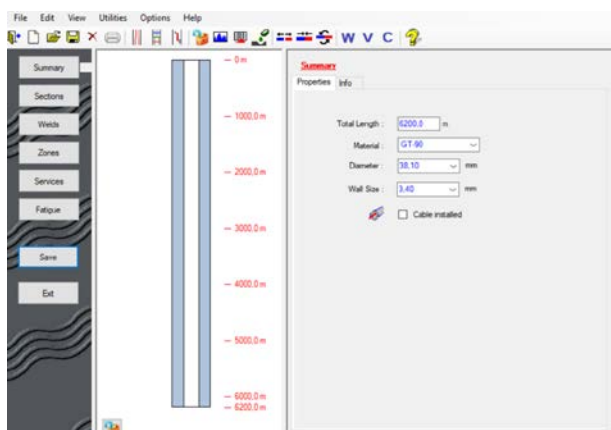


Рис. 3. Параметри ГНКТ у модулі String Editor

Етапи створення компоновки низу наступні:

1. Обрати Tool String Editor, який призначений для роботи з інструментами, що встановлюються на нижньому кінці ГНКТ. Створити новий проект та задати умовну назву для компоновки (рис. 4).

2. Додати основні елементів компоновки:

а) Connector (конектор), що забезпечує з'єднання ГНКТ з інструментами, вказавши тип конектора та

його діаметр.

б) Valve (клапан), що регулює потік рідини та запобігає неконтрольованому руху, задавши параметри відкриття/закриття, допустимий тиск.

в) Nozzle (насадка), що формує струмінь рідини для очищення або розвантаження свердловини.

3. Вказати діаметр отворів, кількість сопел, коефіцієнт опору.

4. Для кожного елемента задати довжину, зовнішній діаметр, внутрішній прохід, а також гідравлічні характеристики (коефіцієнти втрат, допустимий тиск).

Після введення даних система автоматично розраховує сумарну довжину компоновки, гідравлічні втрати та вплив на загальний потік.

На рис. 4 наведено приклад створеної компоновки низу для ГНКТ у Tool String Editor.

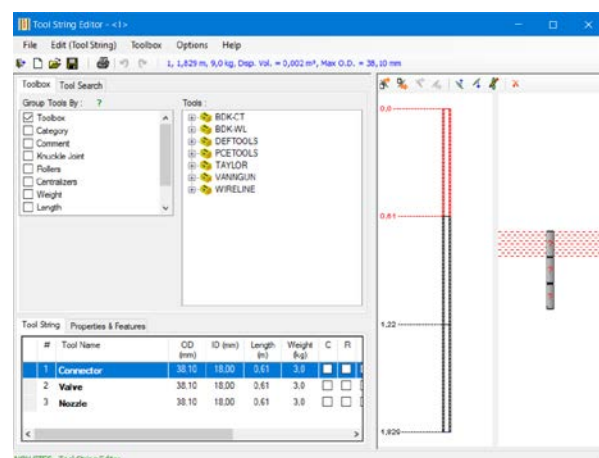


Рис. 4. Приклад створеної компоновки низу для ГНКТ

Для коректного моделювання гідравлічних процесів у свердловині необхідно створити та налаштувати робочі рідини, які будуть використовуватися під час закачування. Fluid Manager дозволяє додати будь-який тип рідини, задати її фізико-хімічні властивості та вибрати відповідну реологічну модель.

Є можливість обрати необхідну модель виходячи з умов процесу:

- ньютонівську модель (Newtonian) – використовується для простих рідин, таких як прісна вода або пластова вода;

- степеневу модель (Power Law) – застосовується для неньютонівських рідин, наприклад, полімерних розчинів (прісна вода, оброблена ксантановою камеддю);

- іншу модель (Бінгама, Гершеля-Булклі) – для складних систем, включаючи пінисті та багатофазні рідини.

Головним є задати основні параметри рідини, а саме: густину (ρ), кг/м^3 ; в'язкість (μ); Па·с; газовий фактор, якщо рідина містить газову фазу; температурні залежності, якщо необхідно врахувати зміну властивостей при нагріванні.

Хотілось відмітити переваги моделі Hydra:

1. моделювання багатофазних систем (рідина + газ + тверді частинки);

2. врахування впливу температури та тиску на реологічні властивості;

3. автоматичний розрахунок об'єму рідини для заданої довжини ГНКТ.

Для моделювання рідини, обробленої полімером (наприклад, прісна вода з ксантановою камеддю), у розділі Managers → Fluid Manager необхідно обрати степеневу модель (Power Law).

Реологічні властивості рідини визначаються за допомогою роторного віскозиметра, де вимірюються: швидкість зсуву (приймається як швидкість обертання ротора) та напруження зсуву при різних оборотах.

Отримані дані вводяться в Fluid Manager, після чого програма автоматично розраховує параметри K (консистенційний коефіцієнт) та n (індекс течії), що характеризують властивості рідини за степеневим законом.

Подальшим є побудова свердловини у розділі Well Editor, де задаються всі параметри: кондуктор, експлуатаційна колона, НКТ і так далі.

І потім можна буде переходити до розрахунку гідравлічних втрат процесу інтенсифікації (рис. 5) [6; 10–13].

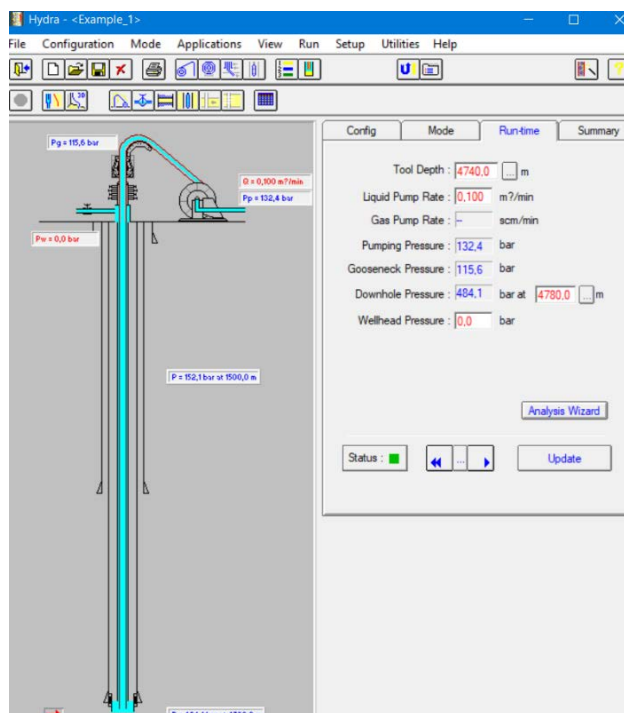


Рис. 5. Приклад моделювання гідравліки в моделі Hydra Cerberus

Розрахунок процесу інтенсифікації дослідної свердловини моделі Hydra Cerberus. Проведено дослідження та аналіз гідравлічних втрат при закачуванні рідини в трубний простір ГНКТ Ø38,1 мм і вихід у кільцевий простір між НКТ та ГНКТ. При дослідженнях використовувались різні рідини.

Вихідні дані для розрахунку:

- глибина свердловини – 5000 м;
- НКТ Ø73x5,51 мм – 4800 м;
- ГНКТ Ø38,1x4,45/3,4/3,18/4,45-3,4 мм – 6200 м;
- глибина спуску ГНКТ – 4000 м;

- густина прісної води – 1000 кг/м³.

- густина пластової води – 1060 кг/м³.

Результати досліджень гідравлічних втрат при закачуванні прісної води з густиною 1000 кг/м³ в ГНКТ показано в табл. 1–4.

Назви визначень в таблицях:

$dP_{св}$ – гідравлічні втрати по всій свердловині;

$dP_{ГНКТ}$ – гідравлічні втрати в ГНКТ;

$dP_{кп}$ – гідравлічні втрати в кільцевому просторі;

$dP_{кн}$ – гідравлічні втрати на компоновці низу ГНКТ (конектор-клапан-насадка).

$Q_{на}$ – подача, продуктивність насоса.

Таблиця 1 – Результати досліджень гідравлічних втрат при закачуванні прісної води з густиною 1000 кг/м³ в ГНКТ Ø38,1x4,45 мм

$Q_{на}$, л/хв	$dP_{св}$, бар	$dP_{ГНКТ}$, бар	$dP_{кп}$, бар	$dP_{кн}$, бар
50	53,2	45,8	3,9	3,5
80	130,2	112,1	9,3	8,8
100	199,9	172,2	14	13,7
120	284,2	244,9	19,7	19,6
150	438,1	377,6	29,9	30,6
200	767,5	661,7	51,5	54,3

Таблиця 2 – Результати досліджень гідравлічних втрат при закачуванні прісної води з густиною 1000 кг/м³ в ГНКТ Ø38,1x3,4 мм

$Q_{на}$, л/хв	$dP_{св}$, бар	$dP_{ГНКТ}$, бар	$dP_{кп}$, бар	$dP_{кн}$, бар
50	39,8	32,5	3,9	3,4
80	97	79	9,3	8,7
100	148,9	121,2	14	13,7
120	211,5	172,2	19,6	19,7
150	325,6	265,1	29,8	30,7
200	569,7	463,9	51,2	54,6

Таблиця 3 – Результати досліджень гідравлічних втрат при закачуванні прісної води з густиною 1000 кг/м³ в ГНКТ Ø38,1x3,18 мм

$Q_{на}$, л/хв	$dP_{св}$, бар	$dP_{ГНКТ}$, бар	$dP_{кп}$, бар	$dP_{кн}$, бар
50	37,6	30,3	3,9	3,4
80	91,7	73,7	9,3	8,7
100	140,6	112,9	14	13,7
120	199,7	160,4	19,6	19,7
150	307,5	247	29,8	30,7
200	537,8	432	51,2	54,6

Таблиця 4 – Результати досліджень гідравлічних втрат при закачуванні прісної води з густиною 1000 кг/м³ в ГНКТ Ø38,1x4,45-3,4 мм

$Q_{на}$, л/хв	$dP_{св}$, бар	$dP_{ГНКТ}$, бар	$dP_{кп}$, бар	$dP_{кн}$, бар
50	43,3	36	3,9	3,4
80	105,9	87,9	9,3	8,7
100	162,5	134,8	14	13,7
120	231	191,7	19,6	19,7
150	355,8	295,3	29,8	30,7
200	622,9	517	51,3	54,6

За мінімальної подачі насоса, що становить 50 л/хв, сумарні гідравлічні втрати дорівнюють 53,2 бар, що є найнижчим значенням серед усіх досліджених режимів. Основний внесок у ці втрати забезпечує опір у трубному просторі ГНКТ, величина якого становить 45,8 бар. Втрати тиску в кільцевому просторі та на компоновці низу ГНКТ при цьому режимі також мінімальні й складають відповідно 3,9 бар та 3,5 бар.

Зі збільшенням витрати робочої рідини всі компоненти гідравлічних втрат демонструють суттєве зростання. При максимальній подачі насоса 200 л/хв загальні втрати досягають 767,5 бар, причому найбільший приріст спостерігається для втрат у трубному просторі ГНКТ, які становлять 661,7 бар.

Аналіз отриманих даних свідчить про нелінійний характер залежності гідравлічних втрат від подачі насоса. Збільшення витрати у 4 рази (з 50 до 200 л/хв) призводить до зростання загальних втрат більш ніж у 14 разів (з 39,8 до 569,7 бар), що підтверджує домінуючий вплив швидкісного фактора на гідравлічний опір. Найбільший внесок у загальні втрати забезпечує трубний простір ГНКТ (понад 80 % від загальних втрат при максимальній подачі), тоді як втрати в кільцевому просторі та на компоновці низу залишаються порівняно незначними, але також демонструють тенденцію до зростання. Це вказує на необхідність оптимізації режимів закачування та конструктивних параметрів ГНКТ для зниження енергетичних витрат при високих витратах рідини.

Аналіз отриманих результатів свідчить про подальше зниження сумарних гідравлічних втрат порівняно з попередніми серіями розрахунків, де товщина стінки ГНКТ становила 3,4 мм та 4,45 мм. Це підтверджує загальну закономірність: зменшення товщини стінки призводить до зниження гідравлічних опор. Найменші втрати спостерігаються при мінімальній подачі насоса ($Q = 50$ л/хв) і становлять 37,6 бар. Зі збільшенням витрати робочої рідини гідравлічні опори зростають, що обумовлює пропорційне збільшення втрат. Максимальні втрати зафіксовані при подачі $Q = 200$ л/хв і дорівнюють 537,8 бар. Порівняння з попередніми даними показує, що зменшення товщини стінки ГНКТ до 3,18 мм забезпечує найнижчі гідравлічні втрати на всіх режимах роботи, що підтверджує пряму залежність між товщиною стінки та величиною втрат.

Тобто, зменшення товщини стінки ГНКТ знижує внутрішній гідравлічний опір, що є ключовим фактором у формуванні загальних втрат тиску. Це пояснюється збільшенням внутрішнього діаметра труби при меншій товщині стінки, що зменшує швидкість потоку та, відповідно, втрати на тертя. Таким чином, оптимізація товщини стінки є ефективним способом зниження енергетичних витрат при високих витратах рідини.

Результати досліджень гідравлічних втрат відрізняються від попередніх серій тим, що розглядається труба з поступовим переходом товщини стінки від більшої до меншої, тобто різнопрохідна конструкція. Найменші загальні втрати

спостерігаються при мінімальній подачі насоса ($Q = 50$ л/хв) і становлять 43,3 бар. Зі збільшенням витрати робочої рідини втрати тиску закономірно зростають, досягаючи 622,9 бар при максимальній подачі ($Q = 200$ л/хв).

Аналіз показує, що загальні втрати в трубі з різнопрохідною товщиною стінки займають проміжне положення між втратами для труб із постійною товщиною 4,45 мм та 3,4 мм. Це очікувано, оскільки гідравлічні характеристики такої труби є середнім значенням між двома крайніми варіантами. Зміна товщини стінки по довжині впливає на розподіл втрат тиску, але загальна тенденція зростання втрат зі збільшенням подачі зберігається. Найменші втрати досягаються при використанні труб із найтоншими стінками (3,18 мм), що пояснюється збільшенням внутрішнього діаметра та зменшенням опору потоку. Плавний перехід товщини (4,45–3,4 мм) демонструє компромісний результат: втрати нижчі, ніж у трубі з товщиною 4,45 мм, але вищі, ніж у трубі з товщиною 3,4 мм. Труби з товстими стінками (4,45 мм) мають найбільші втрати, особливо при високих витратах, через підвищений гідравлічний опір.

Додатково проведено розрахунки для пластової води ($\rho = 1060$ кг/м³) за аналогічних умов, що дозволяє оцінити вплив густини рідини на величину втрат.

Результати досліджень гідравлічних втрат при закачуванні пластової води з густиною 1060 кг/м³ в ГНКТ 38,1 мм і вихід з кільцевого простору показано в табл. 5–8.

Таблиця 5 – Результати досліджень гідравлічних втрат при закачуванні пластової води з густиною 1060 кг/м³ в ГНКТ Ø38,1x4,45 мм

$Q_{\text{на}},$ л/хв	$dP_{\text{св}},$ бар	$dP_{\text{ГНКТ}},$ бар	$dP_{\text{кп}},$ бар	$dP_{\text{кн}},$ бар
50	56,1	48,4	4,1	3,6
80	137,5	118,5	9,7	9,3
100	211,3	182,1	14,7	14,5
120	300,6	259	20,7	20,9
150	463,7	399,7	31,4	32,6
200	812,8	700,7	54,1	58

Таблиця 3.6 – Результати досліджень гідравлічних втрат при закачуванні пластової води з густиною 1060 кг/м³ в ГНКТ Ø38,1x3,4 мм

$Q_{\text{на}},$ л/хв	$dP_{\text{св}},$ бар	$dP_{\text{ГНКТ}},$ бар	$dP_{\text{кп}},$ бар	$dP_{\text{кн}},$ бар
50	42	34,3	4,1	3,6
80	102,5	83,5	9,7	9,3
100	157,4	128,2	14,7	14,5
120	223,6	182	20,7	20,9
150	344,6	280,6	31,4	32,6
200	603,2	491,1	54,1	58

Збільшення витрати робочої рідини у 4 рази (з 50 до 200 л/хв) призводить до зростання загальних втрат більш ніж у 14 разів (з 56,1 до 812,8 бар), що свідчить про нелінійний характер залежності. Основним фактором є інтенсивне зростання втрат на тертя в трубному просторі при підвищенні швидкості потоку. Це підтверджує необхідність оптимізації режимів

закачування для зниження енергетичних витрат при високих продуктивностях.

За мінімальної подачі насоса ($Q = 50$ л/хв) сумарні гідравлічні втрати становлять 42 бар, що пояснюється низькою швидкістю потоку та мінімальним опором руху рідини. При максимальній подачі ($Q = 200$ л/хв) втрати досягають 603,2 бар, що свідчить про суттєвий вплив швидкості потоку на величину гідравлічних опорів.

Таблиця 7 – Результати досліджень гідравлічних втрат при закачуванні пластової води з густиною 1060 кг/м^3 в ГНКТ $\varnothing 38,1 \times 3,18 \text{ мм}$

$Q_{\text{на}},$ л/хв	$dP_{\text{св}},$ бар	$dP_{\text{ГНКТ}},$ бар	$dP_{\text{кп}},$ бар	$dP_{\text{кн}},$ бар
50	39,7	32	4,1	3,6
80	96,9	77,9	9,7	9,3
100	148,6	119,4	14,7	14,5
120	211,2	169,6	20,7	20,9
150	325,3	261,3	31,4	32,6
200	569,4	457,3	54,1	58

Таблиця 8 – Результати досліджень гідравлічних втрат при закачуванні пластової води з густиною 1060 кг/м^3 в ГНКТ $\varnothing 38,1 \times 4,45\text{--}3,4 \text{ мм}$

$Q_{\text{на}},$ л/хв	$dP_{\text{св}},$ бар	$dP_{\text{ГНКТ}},$ бар	$dP_{\text{кп}},$ бар	$dP_{\text{кн}},$ бар
50	45,7	38	4,1	3,6
80	111,9	92,8	9,8	9,3
100	171,8	142,6	14,7	14,5
120	244,3	202,7	20,7	20,9
150	376,6	312,6	31,4	32,6
200	659,5	547,3	54,2	58

За мінімальної подачі насоса ($Q = 50$ л/хв) сумарні гідравлічні втрати становлять 39,7 бар, що пояснюється низькою швидкістю потоку та мінімальним опором руху рідини. При максимальній подачі ($Q = 200$ л/хв) втрати досягають 569,4 бар, що підтверджує суттєвий вплив швидкості потоку на величину гідравлічних опорів.

Отримані результати узгоджуються з попередніми дослідженнями та підтверджують, що зменшення товщини стінки ГНКТ призводить до значного зниження гідравлічних втрат. Це пояснюється збільшенням внутрішнього діаметра труби, що зменшує швидкість потоку при заданій витраті та, відповідно, втрати на тертя.

За мінімальної подачі насоса ($Q = 50$ л/хв) сумарні гідравлічні втрати становлять 45,7 бар, що пояснюється низькою швидкістю потоку та мінімальним опором руху рідини. При максимальній подачі ($Q = 200$ л/хв) втрати досягають 659,5 бар. Такий приріст підтверджує суттєвий вплив швидкості потоку на величину гідравлічних опорів.

Неоднорідність геометрії труби, зокрема поступовий перехід від більшої товщини стінки до меншої, призводить до додаткових

01.11.2025). гідравлічних втрат порівняно з трубами постійного перерізу. Це пояснюється зміною

внутрішнього діаметра по довжині труби, що впливає на локальні швидкості потоку та розподіл втрат тиску.

Висновки. 1. Мінімальні гідравлічні втрати спостерігаються при найменшій подачі насоса ($Q = 50$ л/хв) і становлять 45,7 бар, що обумовлено низькою швидкістю потоку та мінімальним опором руху рідини.

2. Максимальні гідравлічні втрати фіксуються при найбільшій подачі насоса ($Q = 200$ л/хв) і досягають 659,5 бар, що підтверджує суттєвий вплив швидкості потоку на величину гідравлічних опорів.

3. Неоднорідність геометрії труби (коли конструкція включає плавний перехід від більшої товщини стінки до меншої) призводить до додаткових місцевих гідравлічних втрат порівняно з трубами постійного перерізу.

4. Для мінімізації гідравлічних втрат доцільно використовувати труби з найменшою товщиною стінки (3,18 мм). Якщо необхідна підвищена міцність або зниження навантаження на окремих ділянках свердловини, оптимальним компромісом є різнопрохідна труба (4,45–3,4 мм).

5. Використання пластової води ($\rho = 1060 \text{ кг/м}^3$) збільшує гідравлічні втрати на 5–6 % порівняно з прісною водою через вищу густину. При роботі з пластовою водою слід враховувати додаткові втрати та розглядати можливість застосування полімерних розчинів для їх зниження.

6. За результатами моделювання найбільші втрати спостерігаються при закачуванні пластової води в трубний простір ГНКТ $\varnothing 44,5 \times 4,45 \text{ мм}$ та виході в затрубний простір між НКТ $\varnothing 73 \times 5,51 \text{ мм}$ і ГНКТ $\varnothing 44,5 \times 4,45 \text{ мм}$. При подачі насоса 200 л/хв гідравлічні втрати становлять 441,5 бар.

Список літератури

- Omomo K. O., Esiri A., Olisakwe H. Hydraulic modeling and real-time optimization of drilling fluids: A future perspective. *Global Journal of Research in Engineering and Technology*. 2024. Vol. 2, issue 2. P. 30–38. doi: 10.58175/gjret.2024.2.2.0030
- Moreno M. A. J., Hernandez J. C. J., Barajas J. R. H., Cordova A. R., Quiroga J. G. P. Simulation and Optimization of Hydraulics Applied in Oil Well Drilling. *Computación y Sistemas*. 2023. Vol. 27, no. 1. P. 63–77. doi: 10.13053/cys-27-1-4092
- Meng L., Zhang X., Jin Y., Yan K., Li Z., Fu H., Li S. Prediction model and real-time diagnostics of hydraulic fracturing pressure for highly deviated wells in deep oil and gas reservoirs. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 3539. doi: 10.1038/s41598-025-88027-y
- Li M., Wen B., Ren L., Xu M., Han Y. Research and Application of Stimulation Technology for Shallow Heavy Oil Reservoirs. *Proc. of the Int. Field Exploration and Development Conf.* 2024. Vol. 8. Singapore : Springer, 2025. doi:10.1007/978-981-96-5158-0_34
- Ramy C., Ripeanu R. G., Nassreddine S., Tănase M., Zouein E. Y., Diniță A., Muresan C. C. Recent Advances in Stimulation Techniques for Unconventional Oil Reservoir and Simulation of Fluid Dynamics Using Predictive Model of Flow Production. *Processes*. 2025. Vol. 13, issue 4. P. 1138. doi: 10.3390/pr13041138
- Global Tubing. Field Handbook*. Dayton, Texas : Global Tubing LLC.
- Varma N., Nagar A., Manish K., Srivastav P., Nekkanti S., Bohra A., Srivastav P. Prosper & Cerberus Modelling for Efficient WBCOs in Artificial Lift Flowing Wells. *SPE Oil and Gas India Conf. and Exhibition (9–11 April 2019, Mumbai, India)*. 2019. P. SPE-194687-MS. doi: 10.2118/194687-MS
- SeaLand. Coiled Tubing Services*. URL: <https://sealandws.com/coiled-tubing-services/> (accessed

9. Stump J., Thomas T., Ables C. Real-time force monitoring improves CT drillout efficiency. *Drilling Contractor*. URL: <https://drillingcontractor.org/real-time-force-monitoring-improves-ct-drillout-efficiency-62854> (accessed 01.11.2025).
10. *Cerberus v 14.0 Software User Guide*. 2022.
11. *Adapted Solutions GmbH. Cerberus 14.0 – New Features and Improvements*. URL: https://www.adapted-solutions.com/web/pdf-en/Cerberus_14.0_NewsEN.pdf (accessed 01.11.2025).
12. *NOV Inc. Cerberus Modeling Software*. URL: <https://www.nov.com/products/cerberus-modeling-software> (accessed 01.11.2025).
13. *NOV CTES. Cerberus Software User Guide*. URL: <https://manualzz.com/doc/7025772/nov-ctes-cerberus-software-user-guide> (accessed 01.11.2025).

Надійшла (received) 10. 11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Римчук Данило Васильович (Rymchuk Danylo) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Видобування нафти газу та конденсату»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1750-9140>; e-mail: daniorymchuk@gmail.com

Рєзва Ксенія Сергіївна (Rezvaia Kseniya) – 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/0000-0002-2457-0097>; e-mail: rezvayaks@gmail.com

Шудрик Олександр Леонідович (Shudryk Oleksandr) – кандидат технічних наук, АТ "Укрнафта", провідний інженер-супервайзер; м. Охтирка, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0991-2498>; e-mail: shudral88@gmail.com

Мінчукова Наталія Федорівна (Minchukova Nataliia) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Видобування нафти газу та конденсату»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9307-1550>; e-mail: minchukova@ukr.net

Хрущов Данило Юрійович (Khrushchov Danylo) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Видобування нафти газу та конденсату»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4153-9204>; e-mail: danyakh@ukr.net