

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕОРІЄНТОВАНИХ КОМПОНОВОК НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ НА МЕХАНІЧНИХ МОДЕЛЯХ

І.І. Чудик

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727137,
e-mail: chudoman@ukr.net

Розглядаються важливі питання підвищення техніко-економічних показників буріння нафтових і газових свердловин за рахунок вдосконалення технічних засобів і науково-методичних основ для їх експериментального дослідження. Для проведення експериментальних досліджень неорієнтованих компоновок низу бурильної колони запропоновано конструкцію лабораторного експериментального стенду. За рахунок компактних габаритних розмірів та простоти проведення дослідів розроблений експериментальний стенд забезпечує дослідження будь-якого типорозміру і конструкції неорієнтованих безопорних, одно- та двоопорних неорієнтованих компоновок низу бурильної колони для свердловин різного профілю в лабораторних умовах.

Запропоновано спосіб визначення приведених (усереднених) значень ваги погонного метра та довжини однієї безрозмірної одиниці для багатоеlementних конструкцій неорієнтованих компоновок низу бурильної колони незалежно від кількості та довжини ділянок низу бурильної колони. На основі результатів експериментальних досліджень визначаються фактичні величини статичних характеристик взаємодії елементів неорієнтованих компоновок з забоем та стінками свердловини. Розроблено метод перерахунку результатів експериментальних досліджень моделей бурильної колони на реальні конструкції натурних компоновок. Під час побудови методу описується довжина, вага і жорсткість елементів компоновок низу бурильної колони, таких як вали вибійних двигунів, невеликі ділянки обважнених бурильних труб.

Ключові слова: бурильна колона, проектування, сила, вісь, опір, свердловина.

Рассматриваются важные вопросы повышения технико-экономических показателей бурения скважин за счет совершенствования технических средств и научно-методических основ для их экспериментального исследования. Для проведения экспериментальных исследований неориентированных компоновок низа бурильной колонны предложена конструкция лабораторного экспериментального стенда. За счет компактных габаритных размеров и простоты проведения опытов разработанный экспериментальный стенд обеспечивает исследование любого типоразмера и конструкции неориентированных безопорных, одно- и двухопорных неориентированных компоновок низа бурильной колонны для скважин различного профиля в лабораторных условиях.

Предложен способ определения приведенных (усредненных) значений веса погонного метра и длины одной безразмерной единицы для многоэлементных конструкций неориентированных компоновок низа бурильной колонны независимо от количества и длины участков низа бурильной колонны. По результатам экспериментальных исследований определяются фактические величины статических характеристик взаимодействия элементов неориентированных компоновок с забоем и стенками скважины. Разработан метод пересчета результатов экспериментальных исследований моделей бурильной колонны на реальные конструкции натурных компоновок. При построении метода учитывается длина, вес и жесткость таких элементов компоновок низа бурильной колонны, как валы забойных двигателей, небольшие участки утяжеленных бурильных труб.

Ключевые слова: бурильная колонна, проектирование, сила, ось, сопротивление, скважина.

The article deals with the important issues of technical and economic parameters enhancement of oil and gas well drilling by improving technology, scientific and methodological bases for their experimental study. For performance of experimental studies of nonoriented assembly of the drill string bottomhole, the design of the laboratory experimental bench has been offered. Due to space-saving overall dimensions and experimentation simplicity, the designed experimental bench makes it possible to study one-pillar, two-pillar and unsupported drill string bottomhole nonoriented assemblies of all dimension types and designs that can be used in laboratory conditions for various well profiles.

A method of determining the reduced (averaged) values of one running meter weight and one dimensionless unit length for multiple-unit designs of the drill string bottomhole nonoriented assemblies, irrespective of the quantity and length of the drill string bottomhole areas. On the basis of experimental results, the actual values of static characteristics of the bottom hole nonoriented assembly element interaction with of elements with the borehole bottom and hole walls have been determined. The method has been developed, which makes it possible to convert drill string model experimental study results to real designs of full-scale assemblies. The method takes account of length, weight and stiffness of such elements of the drill string bottomhole as bottomhole motor shafts, small areas of heavy-weight drill pipe.

Keywords: drill string, design, force axis, resistance, well

Вступ. Збільшення видобутків нафти і газу вимагає підвищення техніко-економічних показників буріння свердловин та зменшення затрат на розробку родовищ. За кордоном цю пробле-

му вирішують шляхом спорудження похило-спрямованих (ПСС) та горизонтальних (ГС) свердловин. На сьогодні вони буряться в Україні, але в невеликих обсягах через складність

будівництва та недостатність відповідних технічних засобів. Одним із напрямків покращення якості їх спорудження є використання ефективних компоновок низу бурильної колони (КНБК), в тому числі й неорієнтованих. У процесі буріння свердловин застосовують різні їх конструкції та бажаного результату досягнути вдається не завжди через їх недосконалість, яка зумовлена недостатнім вивченням умов їх роботи у стовбурі свердловини та великим об'ємом теоретичних припущень при проектуванні.

Дослідженням неорієнтованих КНБК займалося багато вітчизняних і закордонних вчених, зокрема Аветисян Н.Г., Белоруссов В.О., Васько І.А., Векерик І.А., Вудс Г., Глушич В.Г., Гулізаде М.П., Григулецький В.Г., Калінін А.Г., Кауфман Л.Я., Козлов В.Г., Лубінський А., Мислюк М.А., Мілхейм К.К., Новиков В.Д., Поваліхін А.С., Орінчак М.І., Саврей С.Я., Сароян А.Є., Сушон Л.Я., Серєда Н.Г., Солодкий К.М., Герцберг Ю.М., Яремійчук Р.С., Ясов В.Г. та інші.

На даний час відомо декілька експериментальних стендів для дослідження питань, пов'язаних із роботою як бурильних колон, так і КНБК, зокрема [1-5]. Аналіз цих праць показав, що існують певні особливості конструкції компоновок (геометричні розміри деяких їх складових) та умови взаємодії ОЦЕ зі стінками свердловини, які не враховуються при розробці й проектуванні неорієнтованих КНБК. Тому проблема вдосконалення методики проектування неорієнтованих компоновок низу бурильної колони є актуальною і потребує подальшого розвитку.

Експериментальні дослідження є досить ефективним критерієм оцінки якості розроблених аналітичних методів. Їх застосування може відбуватися в реальних умовах – у свердловині та в лабораторних – на експериментальній установці. Проведення такого роду досліджень у свердловині є ефективним, але дорогим методом. Тому вивчення процесу взаємодії елементів КНБК із вибоєм та стінками свердловини в лабораторних умовах буде оптимальним рішенням для оцінки якості розробленого нового або вдосконаленого вже відомого теоретичного методу розрахунку.

Мета і задачі дослідження: розроблення теоретично-експериментального комплексу для дослідження в лабораторних умовах неорієнтованих КНБК для перевірки та коректування їх вдосконалених математичних моделей.

Об'єкт дослідження: неорієнтована КНБК.

Предмет дослідження: статичні характеристики взаємодії елементів неорієнтованих КНБК з вибоєм та стінками свердловини.

Методи дослідження: теорія пружності, математичне моделювання, програмування і статистика.

Розвиток проблеми дослідження. Процес статичної деформації будь-яких КНБК у стовбурі свердловини характеризують такі основні

параметри: P – осьове навантаження на долото; EI – жорсткість на згин елемента КНБК; q – вага одиниці довжини елемента КНБК; L – довжина компоновки; g – прискорення вільного падіння.

Відповідно до основних положень теорії розмірностей для п'яти параметрів системи (n) та трьох основних одиниць вимірювання (r) було записано два критерії подібності ($r - n$):

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= (EI)^{\alpha_1} \cdot (g)^{\alpha_2} \cdot (q)^{\alpha_3} \cdot L; \\ K_2 &= (EI)^{\gamma_1} \cdot (g)^{\gamma_2} \cdot (q)^{\gamma_3} \cdot P; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – невідомі коефіцієнти.

Згідно з [6] співвідношення (3.1) мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \sqrt[3]{\frac{q}{EI}} \cdot L \\ K_2 &= \frac{P}{\sqrt[3]{EI \cdot L}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Отримані критерії використано для моделювання нижньої частини бурильної колони, а саме: для вибору матеріалу модельної трубки, її довжини та осьового навантаження на долото у відповідності до вибраної конструкції стенда [6].

Для проведення експериментальних досліджень одно- і двоопорних КНБК матеріалом модельної бурильної колони було вибрано мідь з фізико-механічними властивостями матеріалу, які наведені в таблиці 1.

Для обваження моделі КНБК було використано спосіб засипання внутрішньої порожнини важким сипким матеріалом (рапітовою стружкою) без зміни її жорсткості на згин. Це забезпечило збільшення ваги трубки при сталому значенні жорсткості на згин. Конструктивні параметри модельної трубки наведено в таблиці 2.

Для вимірювання і реєстрації показників під час лабораторного дослідження використовувалася електрична схема, укомплектована: давачами для вимірювання осьової і відхиляючої сил на долоті, реакції на нижній і верхній опорах, тензометричним інструментальним підсилювачем ТОПАЗ – 3.01, блоком живлення, реєструючим пристроєм. Тензометричні давачі розраховані на напругу 4,5 В. Під час деформування сталеві пластина, на яку наклеєні ці давачі, виникає зміна їх опору. Це спричиняє зміну сили струму в електричному колі і фіксується за допомогою реєструючого пристрою.

Експериментальні дослідження моделі КНБК включають серію дослідів, які відповідають визначеним навантаженням на долото, зазорам між секціями ОБТ, центраторів, калібраторів та стінками свердловини, розміщенням центраторів і кутами нахилу осі свердловини. Виконання експериментальних досліджень із вивчення впливу цих факторів на характер взаємодії елементів КНБК з вибоєм та стінками свердловини за допомогою даного стенду виконується для одно-, дво- і безопорних КНБК.

Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості матеріалу моделі КНБК

Властивості матеріалу	Матеріал	$E, \text{Н/м}^2$	$\sigma_t, \text{Н/м}^2 \times 10^6$	$\sigma_b, \text{Н/м}^2 \times 10^6$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Модель	Мідь	$1.05 \cdot 10^{11}$	70 – 320	210 – 420	8870

Таблиця 2 – Параметри конструкції моделі КНБК

ПАРАМЕТРИ	Значення
Зовнішній діаметр трубки $D_m, \text{м}$	0.015
Внутрішній діаметр трубки $d_m, \text{м}$	0.013
Площа поперечного перерізу $F, \text{м}^2$	$43.9 \cdot 10^{-6}$
Жорсткість на згин $EI_m, \text{Нм}^2$	129.9
Довжина трубки $L_m, \text{м}$	4.5
Вага одиниці довжини трубки $q_m, \text{Н/м}$	4.78
Діапазон зміни довжини безрозмірної одиниці ваги m_m при $\alpha=0^0 - 90^0, \text{м}$	3.07 – 3.76
Діапазон зміни ваги безрозмірної одиниці q_m при $\alpha=0^0 - 90^0, \text{Н}$	14.67 – 17.97

Для моделювання величини осьового навантаження на долото необхідно спочатку аналітично визначити загальну довжину КНБК L_n та приведені значення ваги погонного метра реальної конструкції КНБК:

$$L_n = \sum_{i=1}^n l_{n_i}, \quad (3)$$

$$q_{np} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{n_i} l_{n_i}}{L_n}, \quad (4)$$

де q_{n_i} – вага погонного метра ділянки реальної конструкції КНБК;

l_{n_i} – вага погонного метра і довжина ділянки реальної конструкції КНБК;
 n – кількість ділянок.

Приведені значення однієї безрозмірної одиниці довжини реальної конструкції КНБК $m_{np.p.}$ визначається за формулою:

$$m_{np.p.} = \frac{L_n}{\sum_{i=1}^n \frac{l_{n_i}}{m_{n_i}}}, \quad (5)$$

де m_{n_i} – безрозмірна одиниця довжини елемента реальної конструкції КНБК.

За отриманими значеннями q_{np} і $m_{np.p.}$ визначаються модельні величини осьового навантаження P_m і довжина L_m , які використовуються при експериментальному дослідженні КНБК:

$$P_m = \frac{P_n \cdot m_m \cdot q_m}{m_{np.p.} \cdot q}; \quad (6)$$

$$L_m = \frac{L_n \cdot m_m}{m_{np.p.}}. \quad (7)$$

Значення радіальних зазорів у місцях встановлення опор обумовлені діаметром внутрішньої обойми тензOMETричного давача і для модельної бурильної колони становлять 4 мм. Тому діапазон зміни радіального зазору можливий в межах від 0 до 4 мм, що дозволяє про-

водити дослідження компонок будь-яких конструкцій за різних діаметрів доліт та опор. Дослідний стенд передбачає дослідження одно-, дво- та безопорних КНБК. Діапазон відстаней для встановлення центрувальних пристроїв вибирається з умови (7) із врахуванням того, що максимальна довжина модельної трубки становить 4,5 м. Тому діапазон зміни відстані від долота до першої опори та між ними не повинні перевищувати 1,5 м.

Значення осьового навантаження на долото вибирається на основі залежності (6) в можливому діапазоні зміни від 0 до 200 Н. Це повністю забезпечує проведення досліджень впливу осьового навантаження на долото, на взаємодію елементів КНБК із вибоєм та стінками свердловини. Зміна величини зенітного кута нахилу від 0^0 до 90^0 дозволяє досліджувати КНБК в будь-яких ділянках профілю свердловини.

Хід виконання робіт на експериментальному стенді при дослідженні безопорних КНБК.

1. Експериментальний стенд встановлюється в робоче положення з відповідним кутом нахилу до вертикалі.

2. Усі вимірювальні вузли виставляються у вихідне положення:

а) давач для вимірювання P виставляється в нульове положення шляхом розвантаження модельної бурильної колони в місці встановлення долота;

б) давачі вимірювання Q і R обнуляються при усуненні контакту деформівної пластини і елемента КНБК.

3. У верхній частині експериментального стенда прикріплюються обмежувачі опори, що імітують нижню стінку свердловини.

4. Встановлюється необхідне осьове навантаження на долото.

5. За допомогою тензOMETричного давача вимірювання відхиляючої сили на долоті фіксується величина Q .

6. При кожному вимірюванні встановлюється витримка часу, тривалістю 3 хвилини.

7. Після витримування в часі дослід проводиться у зворотному напрямі і повторюється необхідну кількість разів.

8. У випадку, коли потрібно вимірювати відхиляючу силу на долоті для цієї ж конструкції КНБК при іншому куті нахилу осі свердловини або при навантаженні на долото, необхідно повторити всі вищеописані операції.

9. За допомогою вимірювальної стрічки визначається відстань від долота до точки дотику компоновки з нижньою стінкою свердловини.

Хід виконання робіт на експериментальному стенді при дослідженні одноопорних КНБК.

1. Виконуються пункти 1-5 характерних для дослідження безопорних компоновок.

2. На необхідній відстані від долота встановлюється тензOMETричний вузол для визначення реакцій на ОЦЕ і відцентруються його вимірювальні елементи за відношенням до основи стенда і модельної трубки.

3. Модельну бурильну колону закріплюється на стенді за допомогою спеціальних підставок.

4. Встановлюється необхідний радіальний зазор для імітації калібратора чи центратора в місці його розташування і виводиться на нуль покази тензOMETричного давача для вимірювання відповідної сили.

5. Модель КНБК встановлюється в робоче положення, і на долото створюється осьове навантаження.

6. Фіксуються значення реакції на опорі та відхиляючої сили на долоті.

7. Дослідження проводяться по прямому і зворотному напрямках з витримуванням в часі 3 хвилини.

8. За допомогою вимірювальної стрічки визначається відстань від долота до точки дотику компоновки з нижньою стінкою свердловини.

9. Під час проведення досліджень одноопорних КНБК за допомогою спеціального шаблона необхідно контролювати момент, після якого компоновка повністю лягає на її стінку між долотом і опором.

10. При будь-якій зміні технологічних параметрів необхідні дослідження проводять заново.

Хід виконання робіт на експериментальному стенді при дослідженні двоопорних КНБК.

1. Виконуються пункти 1-5 характерних для дослідження безопорних компоновок.

2. На необхідній відстані від долота встановлюється ще один тензOMETричний вузол.

3. Враховуючи те, що методика проведення експериментальних досліджень двоопорних КНБК є аналогічною як компоновка з одним центратором.

4. Між калібратором чи центратором і долотом, між самими опорами за допомогою спеціального шаблона виявляється момент макси-

мального прогину КНБК, після чого дослідження такої конструкції компоновки припиняються.

Для перерахунку результатів експериментальних досліджень моделей бурильної колони на натурні багатоелементні КНБК (складаються з n елементів різної власної ваги q_i і жорсткості на згин EI_i) пропонується такий метод [6].

Результатом взаємодії її елементів із вибоєм та стінками свердловини обов'язковими є: Q – відхиляюча сила на долоті, R_i – реакції на опорах та l_i – віддаль від верхньої опори до точки дотику КНБК із її стінкою, r_i – прогини осі компоновки та радіальні зазори на центраторах. Так як КНБК розглядається в похило-спрямованому стовбурі свердловини, то зенітний кут приймається рівним α .

Найпростішою моделлю компоновки може бути модель, виконана з однорозмірних трубок. Для неї величина однієї безрозмірної одиниці довжини є рівною:

$$m_m = \sqrt[3]{\frac{EI_m}{q_m \cdot \cos(\alpha)}} \quad (8)$$

і відповідно для промислової бурильної колони:

$$m_{n_i} = \sqrt[3]{\frac{EI_{n_i}}{q_{n_i} \cdot \cos(\alpha)}} \quad (9)$$

Із врахуванням того, що КНБК переважно складаються з декількох ділянок різних геометричних розмірів отримуємо:

$$\frac{l_m}{m_m} = \frac{l_{n_1}}{m_{n_1}} + \frac{l_{n_2}}{m_{n_2}} + \dots + \frac{l_{n_n}}{m_{n_n}} \quad (10)$$

При розрахунку КНБК одним з невідомих параметрів є l_{n_n} – віддаль від верхньої опори до точки її дотику зі стінкою свердловини. З рівності (10) отримуємо вираз для її визначення:

$$l_{n_n} = \left[\frac{l_m}{m_m} - \left(\frac{l_{n_1}}{m_{n_1}} + \frac{l_{n_2}}{m_{n_2}} + \dots + \frac{l_{n_{n-1}}}{m_{n_{n-1}}} \right) \right] \cdot m_{n_n} \quad (11)$$

Зважаючи на те, що КНБК складається з ділянок різної власної ваги q_i , приведенне значення для компоновки q_{np} визначається з рівності (3.12). Відповідно до отриманих залежностей, знаходимо приведену величину однієї безрозмірної одиниці довжини:

$$m_{np} = \frac{m_m}{l_m} \cdot [l_{n_1} + l_{n_2} + \dots + l_{n_n}] \quad (12)$$

і її вагу:

$$q_{m,np} = m_{np} \cdot q_{np} \quad (13)$$

З врахуванням (8)-(14) для перерахунку результатів експериментальних досліджень на реальні величини за допомогою таких формул:

$$\left. \begin{aligned} Q_{нi} &= \frac{Q_{m_i} \cdot q_{m,np}}{q_m \cdot m_m}; \\ R_{нi} &= \frac{R_{m_i} \cdot q_{m,np}}{q_m \cdot m_m}; \\ l_{нi} &= \frac{l_{m_i} \cdot m_{np}}{m_m}; \\ r_{нi} &= \frac{r_{m_i} \cdot m_{np}}{m_m}. \end{aligned} \right\} (14)$$

Параметри взаємодії КНБК з вибоєм та стінками свердловини при експериментальному моделюванні виражаються в безрозмірному вигляді. Це дозволяє проводити дослідження компоновок в межах пружних деформацій на трубах, що виконані із різних матеріалів, незалежно від геометричних розмірів, і використовувати їх для моделювання багаторозмірних бурильних колон. Відносна простота перерахунку експериментальних даних в промислові дозволяє однорозмірними модельними бурильними трубами досліджувати процеси деформації реальних КНБК будь-яких типорозмірів і конструкцій.

Для відповідності теоретичної моделі результатам експериментальних досліджень необхідно виконувати процедури статистичної обробки. На першому етапі результати експериментальних досліджень обробляються за допомогою регресійного аналізу з метою отримання оптимальних, з точки зору критеріальної статистики, рівнянь регресії, [7]. Із метою виявлення оптимального регресійного рівняння нами використано спеціалізовану програму Statistica 6.0 фірми StatSoft та Table Curve. З її використанням було проведено аналіз близько 8000 рівнянь двовимірних залежностей основних типів, серед яких і було встановлено, два переважаючих типи рівнянь регресії: ступеневі $y = a + b \cdot x^c$ та експоненційні $y = a + b \cdot e^{-x/c}$. Остаточну якість рівняння регресії оцінювалась за допомогою F-критерію [7]:

Моделі одноопорних КНБК досліджувалися при радіальних зазорах, рівних 0.25 і 0.5 мм, а з двома – при однакових значеннях – 0.5 мм. Графічні залежності (рис. 1-7) відображають зміну сил взаємодії долота і опор зі стінками свердловини від місця їх розташування в безрозмірних одиницях при різних зенітних кутах нахилу осі свердловини. У результаті апроксимації експериментальних даних було встановлено, що отримані криві описують двовимірні залежності зміни відхиляючої сили на долоті $Q(l)$ та реакцій на опорах $R(l)$ з коефіцієнтом кореляції 0.87 – 0.95. Це свідчить про достатньо високу тісноту зв'язків між наведеними величинами, отриманими у ході експериментальних досліджень сил взаємодії елементів неорієнтованих КНБК із стінками свердловини.

Для одноопорних конструкцій КНБК, незалежно від радіального зазору на ОЦЕ, відхиляюча сила на долоті, виражена в безрозмірних одиницях (рис. 1-2), монотонно спадає, причому

чим більший зенітний кут нахилу осі свердловини, тим інтенсивніше зменшується Q . При віддалі між долотом і ОЦЕ 0,55 – 0,6 м для радіального зазору $r_m=0,5$ мм та 0,45 – 0,5 м при $r_m=0,25$ мм відхиляюча сила дуже мало змінюється при збільшенні зенітного кута від 10^0 до 60^0 . Це означає, що для одноопорних конструкцій КНБК, незалежно від величини зенітного кута нахилу осі свердловини, відхиляюча сила на долоті є практично однаковою.

Реакція на ОЦЕ зі збільшенням відстані від долота до місця його встановлення дещо спадає і досягає мінімального значення при $l = 0,6 - 1$ м (рис. 3 і 4). Чим менші зенітний кут і радіальний зазор, тим спад величини R є інтенсивнішим. З подальшим збільшенням віддалі від долота до ОЦЕ від 1 до 2 м, реакція на опорі дещо зростає, причому однаково на всьому діапазоні зміни зенітного кута нахилу осі свердловини. З наведених графічних залежностей видно, що для одноопорних конструкцій КНБК збільшення віддалі від долота до опори зменшує її вплив на відхиляючу силу на долоті і реакцію на ОЦЕ.

Для двоопорних конструкцій КНБК відхиляюча сила (рис. 5) та реакція на нижньому ОЦЕ (рис. 6) при збільшенні віддалі між опорами і величини зенітного кута інтенсивно зростає і досягає мінімального значення в момент максимально можливого прогину тіла компоновки між центраторами. На верхньому ОЦЕ (рис. 7) сила притискання також зростає зі збільшенням віддалі між центраторами (менш інтенсивно, ніж R_1) і набуває лінійного характеру при зменшенні зенітного кута α .

За розробленою методикою встановлення фізичної подібності між результатами експериментальних досліджень моделей бурильної колони та промислових конструкцій КНБК фактичних було проведено перерахунок результатів лабораторних досліджень для реальних конструкцій одно- та двоопорних компоновок. При аналітичному та експериментальному дослідженнях використовувалося три різних турбінних неорієнтованих КНБК, особливості конструкції яких наведено в таблиці 3.

Як бачимо, наведені в табл. 3 конструкції компоновок низу бурильної колони складаються з елементів різної ваги погонного метра q_i , жорсткості на згин EI_i і довжини l_i . Складаючи одну конструкцію, ділянки з різними значеннями q_i , EI_i формують деяку її загальну жорсткість на згин з приведеною вагою погонного метра q_{np} . Чим більша кількість таких ділянок, тим більше ускладнюється аналітична схема компоновки і форма її пружної осі. При переході від експериментальних досліджень моделі КНБК до її фактичної конструкції, необхідним є використання коефіцієнтів подібності, які значною мірою залежать від реальної конструкції компоновки, а саме від її ваги жорсткості на згин і кількості елементів з різними геометричними розмірами.

На рис. 8 зображено графічну залежність зміни величини q_{np} для одноопорної КНБК із врахуванням в її аналітичній схемі дослідження

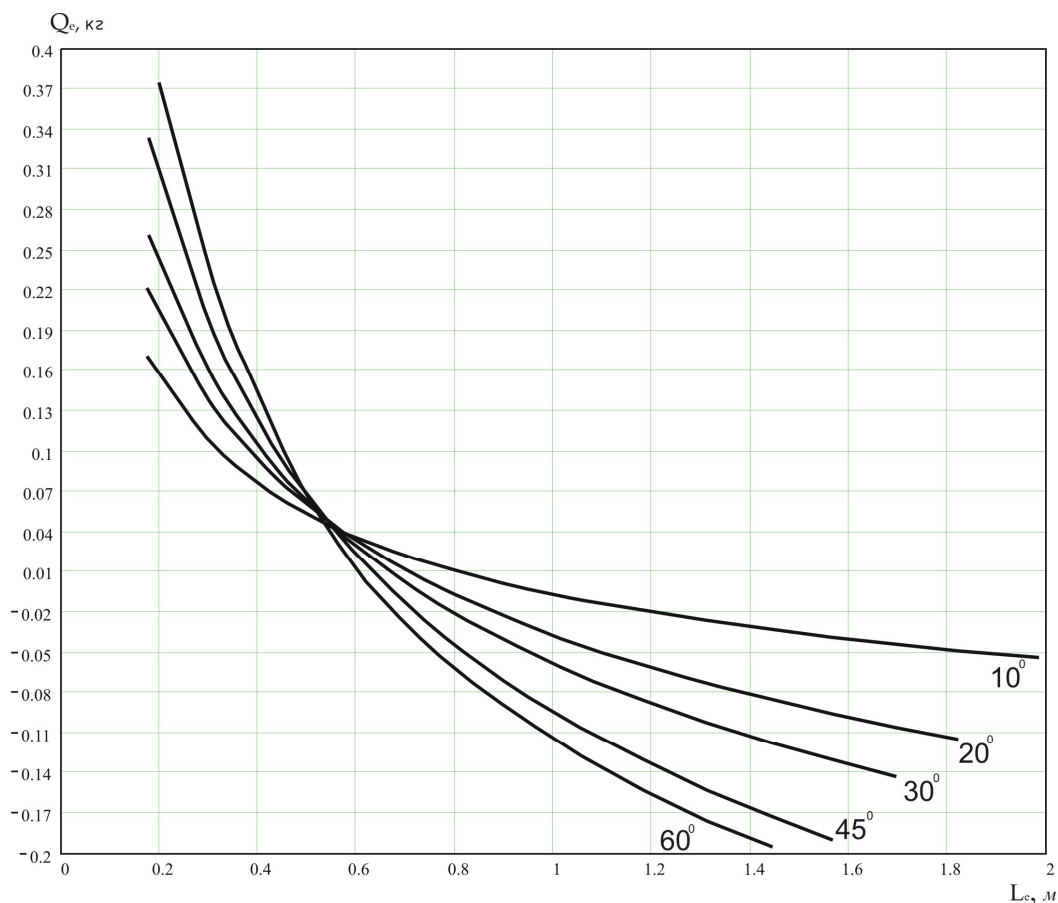


Рисунок 1 – Залежність зміни відхиляючої сили на долоті від місця встановлення ОЦЕ для одноопорної конструкції КНБК при $r_m=0,5$ мм

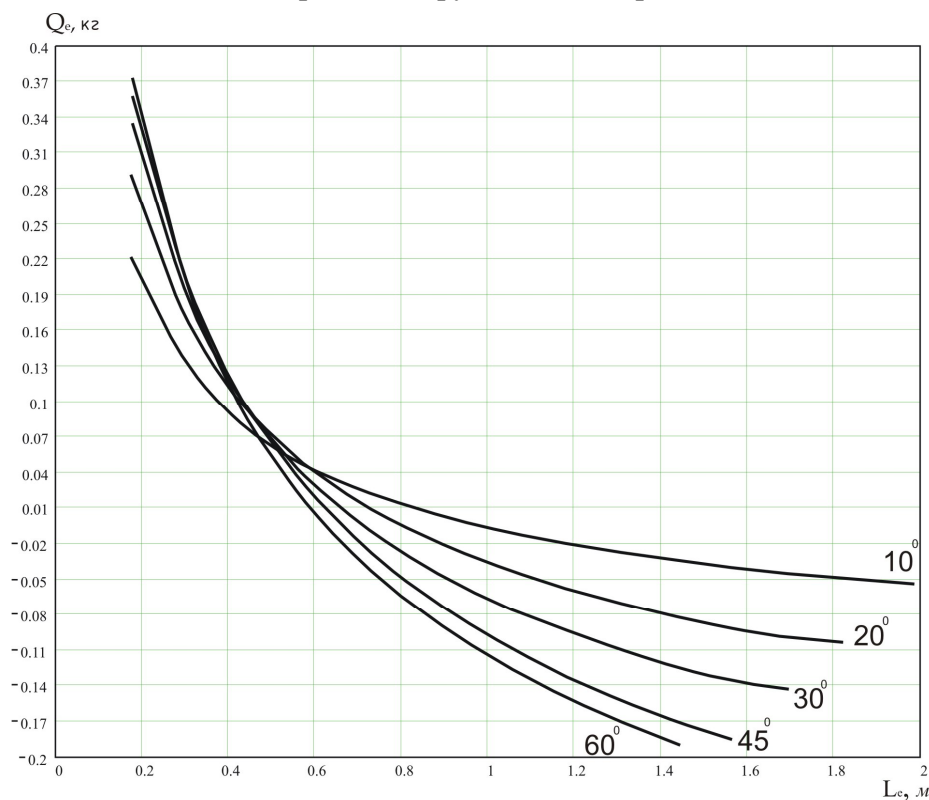


Рисунок 2 – Залежність зміни відхиляючої сили на долоті від місця встановлення ОЦЕ для одноопорної конструкції КНБК при $r_m=0,25$ мм

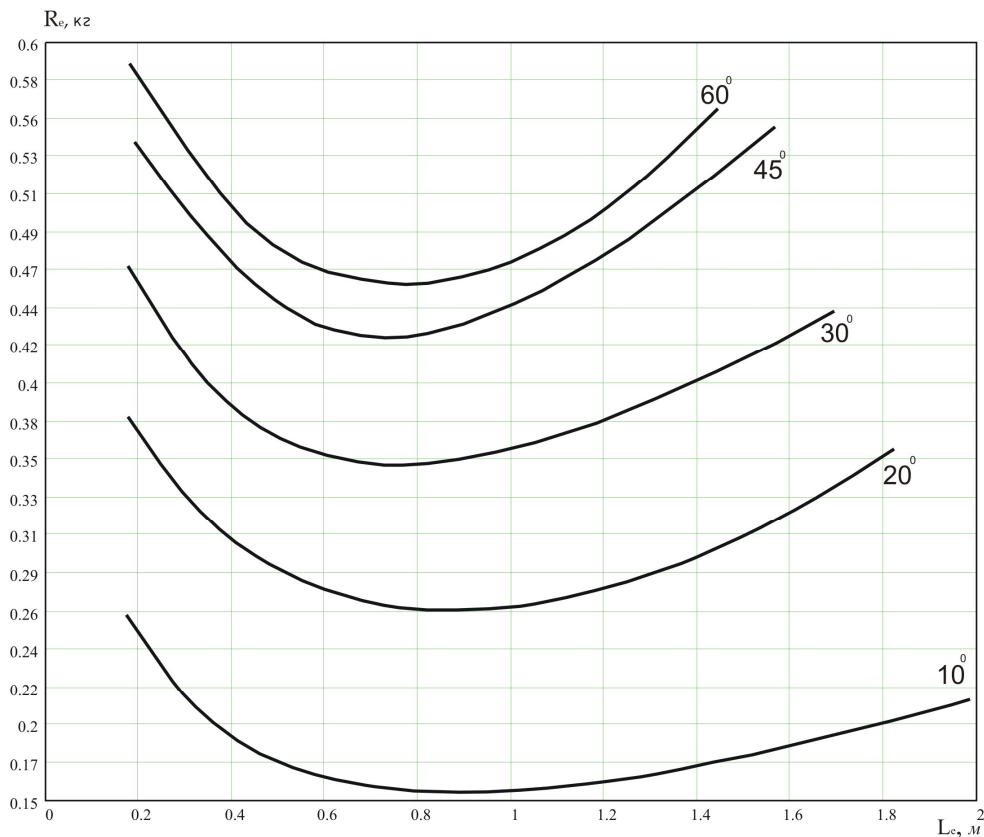


Рисунок 3 – Залежність зміни реакції на ОЦЕ від місця його встановлення для одноопорної конструкції КНБК при $r_m=0,5$ мм

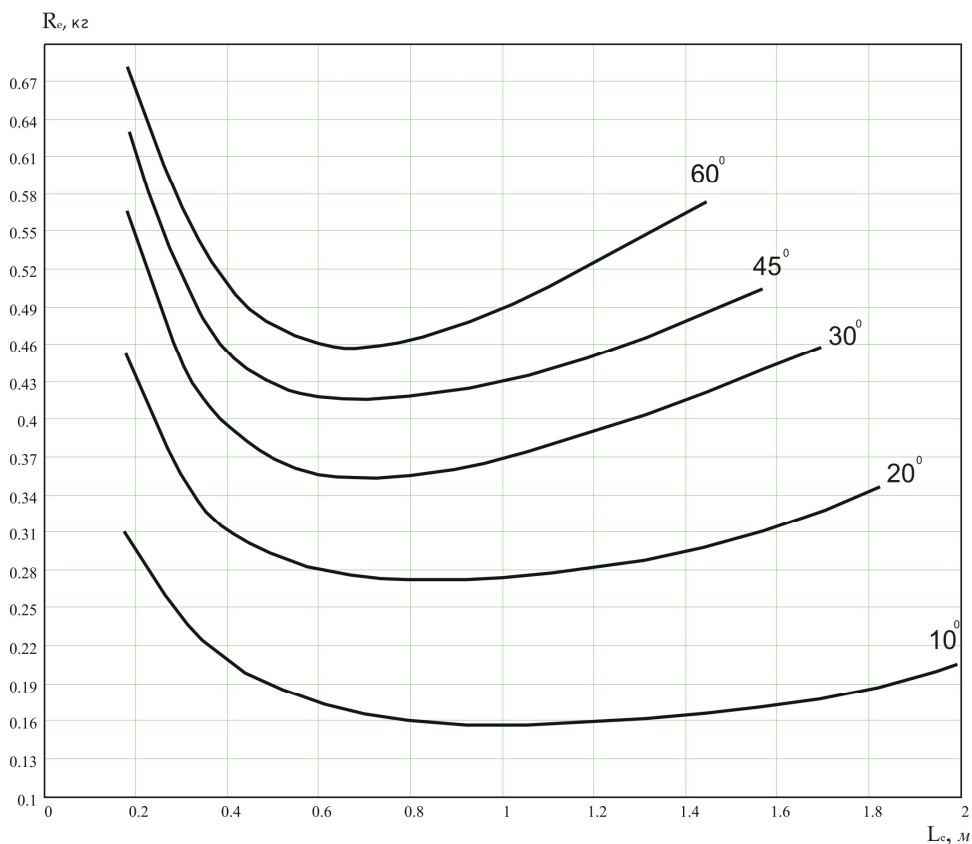


Рисунок 4 – Залежність зміни реакції на ОЦЕ від місця його встановлення для одноопорної конструкції КНБК при $r_m=0,25$ мм

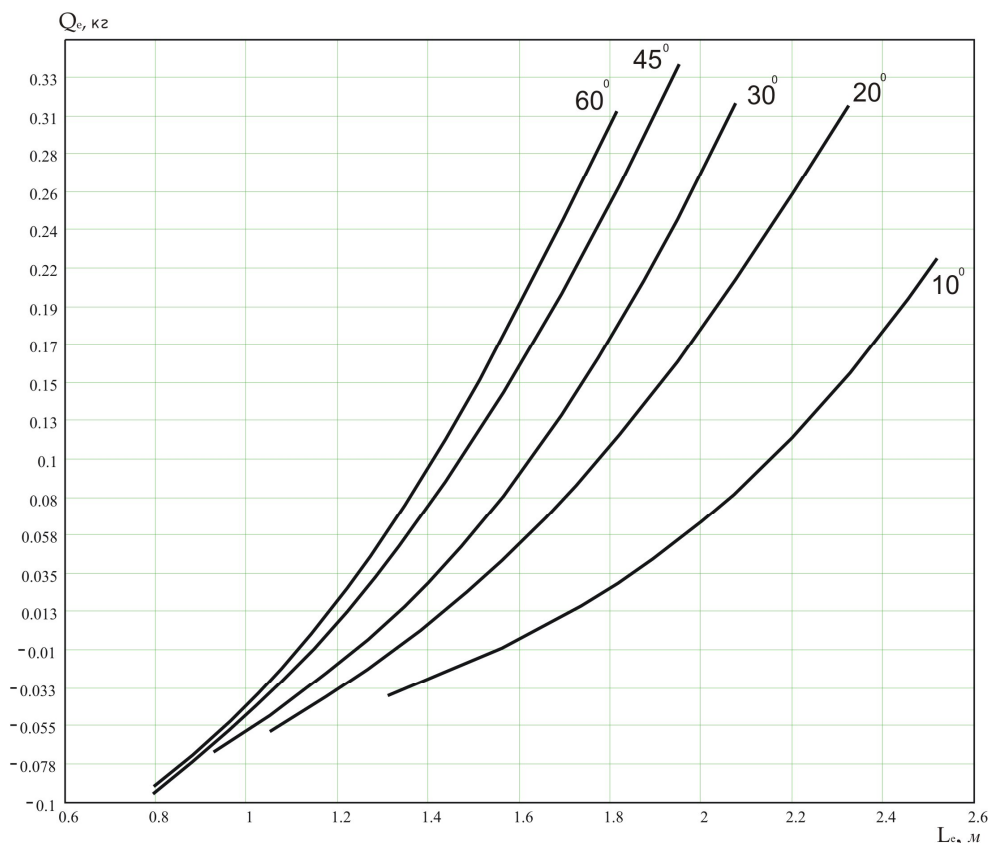


Рисунок 5 – Залежність зміни відхиляючої сили на долоті від відстані між ОЦЕ для двоопорної моделі КНБК при $\gamma_m=0,25$ мм

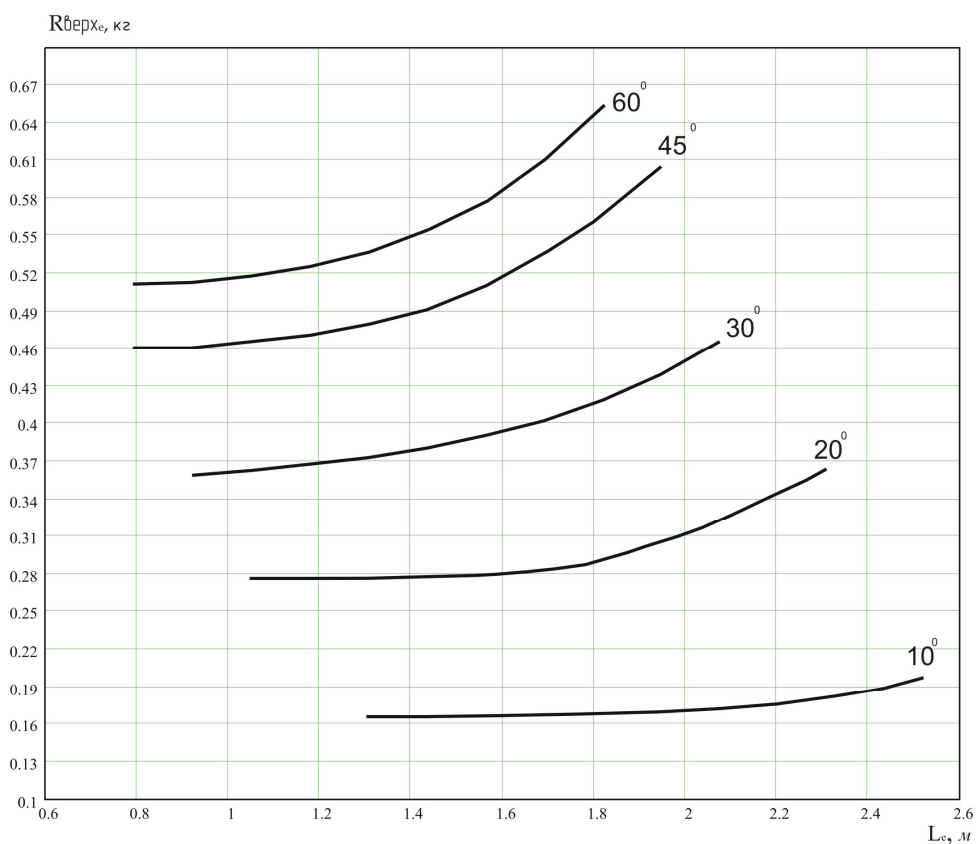


Рисунок 6 – Залежність зміни реакції на нижньому ОЦЕ від відстані між ними для двоопорної моделі КНБК при $\gamma_m=0,25$ мм

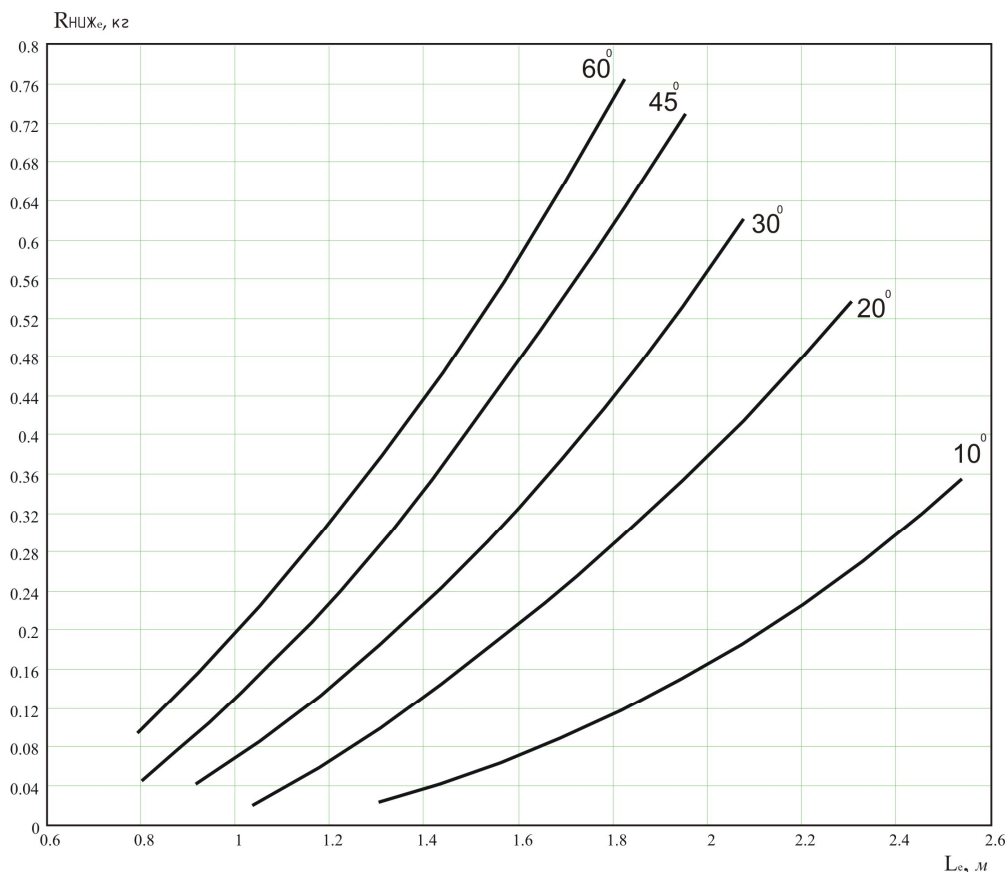


Рисунок 7 – Залежність зміни реакції на верхньому ОЦЕ від відстані між ними для двоопорної моделі КНБК при $r_m=0.2$ мм

Таблиця 3 – Конструктивні особливості КНБК

Номер КНБК	Кількість ОЦЕ	Діаметр ОЦЕ, мм	Діаметр долота, мм	Вибійний двигун	Зовн. діаметр ОБТ, мм
1	1	208	215,9	ДГ – 172	146
2	1	212	215,9	ДГ – 172	146
3	2	212 / 212	215,9	ДГ – 172	146

вала шпинделя вибійного двигуна і без нього, від відстані між долотом та ОЦЕ за різних зенітних кутів нахилу осі свердловини.

Як видно з графічної залежності, зі збільшенням відстані між ОЦЕ діаметром 208 мм і долотом величина приведеної ваги погонного метра для даних конструкцій КНБК зменшується в середньому на 5 %. Наявність в КНБК вала шпинделя зумовлює зменшення q_{np} в середньому на 5 – 8 %. Згідно із геометричними характеристиками для вибійного двигуна вага погонного метра є дещо більшою, ніж для ОБТ. За рахунок збільшення віддалі від долота до ОЦЕ зростає довжина компоновки, а тим самим і ОБТ, що й викликає зменшення приведеної ваги погонного метра КНБК. При експериментальному дослідженні КНБК у процесі переходу до фактичних даних така незначна різниця може спричинити розбіжності.

На рис. 9 зображено зміну значення m_{np} від відстані між долотом та ОЦЕ. Як видно з графічної залежності, зростання відстані від долота до центратора майже не змінює величину m_{np}

(на 3%), а наявність в аналітичній схемі компоновки вала шпинделя вибійного двигуна зменшує на 5 – 6 %.

При збільшенні віддалі від долота до ОЦЕ змінюються значення q_{np} і m_{np} , а це дає підстави зробити висновок про те, що кожній конструкції КНБК і певному місцю встановлення ОЦЕ відповідають конкретне приведені значення ваги погонного метра та величина однієї безрозмірної одиниці довжини. Це є важливим аспектом при експериментальному дослідженні компоновок, а саме: при переході від результатів лабораторних досліджень до фактичних.

Для отримання величини відхиляючої сили на долоті та реакцій на ОЦЕ для реальних конструкцій КНБК за результатами експериментальних досліджень, необхідно знати величину приведеної ваги однієї безрозмірної одиниці довжини компоновки – $q_{m,np}$. Для КНБК різних конструкцій (за наявності в аналітичній схемі компоновки вала вибійного двигуна і без нього) визначено значення $q_{m,np}$ при зміні місця розташування центратора (таблиця 4).

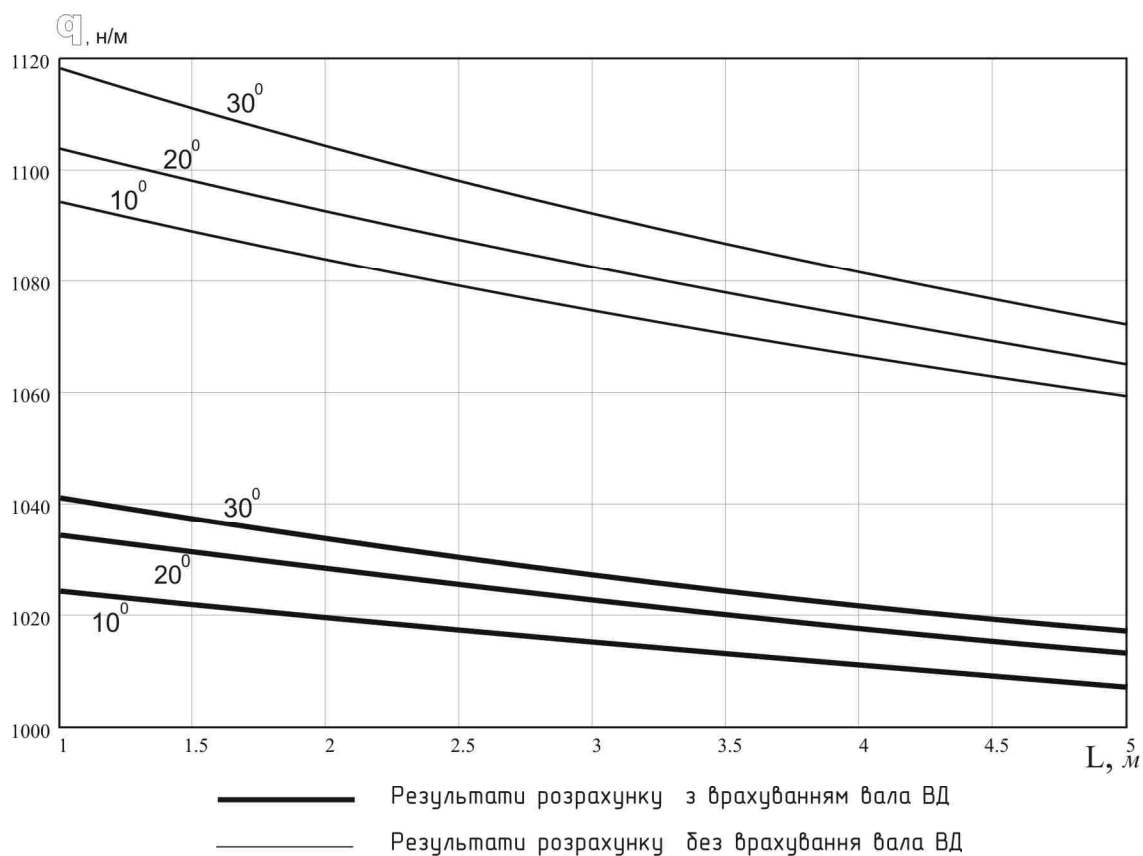


Рисунок 8 – Залежність зміни приведеної ваги погонного метра КНБК $q_{пр}$ від відстані між ОЦЕ і долотом

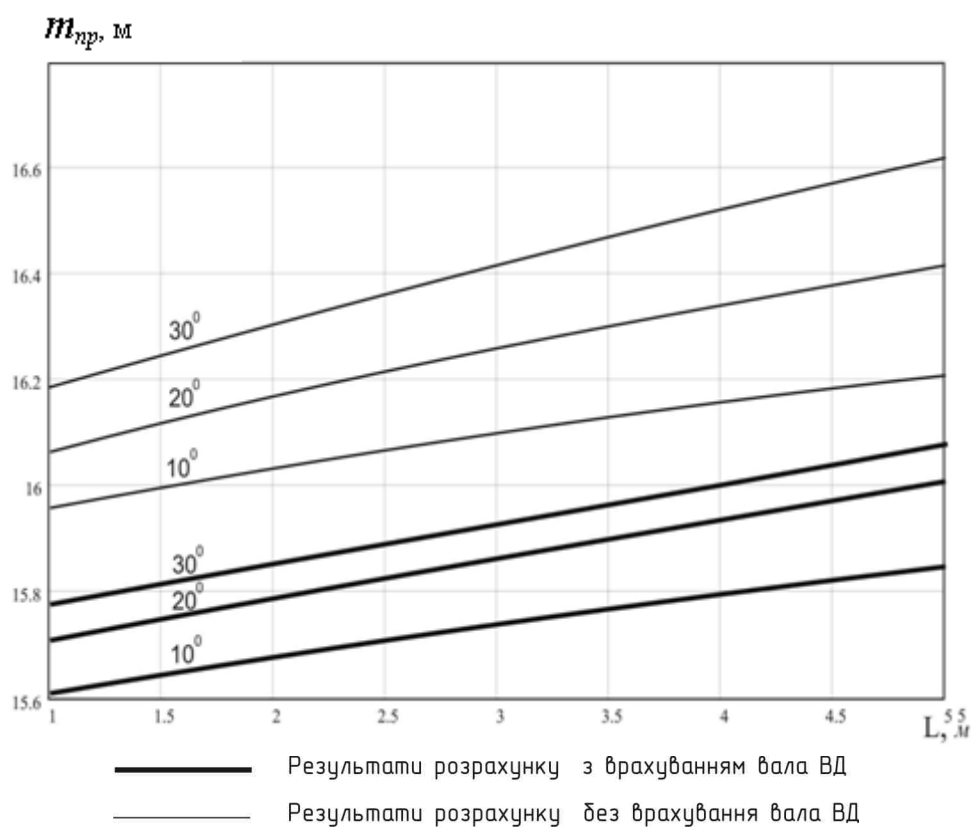


Рисунок 9 – Залежність зміни приведенного значення однієї безрозмірної одиниці довжини $m_{пр}$ КНБК від відстані між ОЦЕ і долотом

Таблиця 4 – Вага однієї приведені безрозмірної одиниці довжини для одноопорних конструкцій КНБК

Наявність вала ДГ 172	Відстань від долота до ОЦЕ, м	Зенітний кут нахилу стовбура свердловини				
		10°	20°	30°	45°	60°
В аналітичній схемі враховується вал шпинделя вибійного двигуна	1.3	15980	16250	16700	17870	20070
	2.3	15980	16240	16690	17860	20060
	3.3	15970	16230	16690	17860	20050
	4.3	15970	16230	16680	17860	20040
	5.3	15970	16220	16670	17840	20030
В аналітичній схемі не враховується вал шпинделя вибійного двигуна	1.3	17260	17650	18250	19260	22210
	2.3	17170	17530	18110	19460	21920
	3.3	17080	17350	18000	19330	21760
	4.3	17010	17270	17900	19210	21620
	5.3	16940	17270	17810	19110	21500

Згідно із табличними даними видно, що наявність вала вибійного двигуна зменшує величину $q_{m,пр}$ для даних конструкцій КНБК на 5 – 10%. А це означає, що детальне врахування елементів малої довжини при дослідженні та проектуванні компоновок має обґрунтовану необхідність.

Висновки

Для проведення експериментальних досліджень неорієнтованих КНБК запропоновано конструкцію лабораторного експериментального стенду. При цьому бурильну колону виконано з суцільнокатаної мідної трубки, що запобігає локальним перегибам у місцях замкових з'єднань. Конструкція вимірювальних тензометричних вузлів дозволяє проводити дослідження в площинах зенітного та азимутального викривлення, незалежно від типу профілю свердловини. Для імітації нижньої стінки свердловини на основу стенда під модельну трубку встановлено спеціальні підставки. За рахунок їх товщини та місця розташування можна імітувати її стовбур з будь-якою кривизною. За рахунок компактних габаритних розмірів та простоти проведення дослідів розроблений експериментальний стенд забезпечує дослідження будь-якого типорозміру і конструкцій неорієнтованих одно- та двоопорних КНБК для свердловин різного профілю в лабораторних умовах.

Запропоновано спосіб визначення приведених (усереднених) значень ваги погонного метра $q_{пр}$ та довжини однієї безрозмірної одиниці $m_{пр}$ для багатоелементних конструкцій КНБК незалежно від кількості та довжини ділянок низу бурильної колони. На основі результатів експериментальних досліджень визначаються фактичні величини статичних характеристик взаємодії елементів неорієнтованих КНБК з вибоєм та стінками свердловини.

Запропоновано метод перерахунку результатів експериментальних досліджень моделей бурильної колони на реальні конструкції натурних компоновок. При побудові методу враховується довжина, вага і жорсткість елементів КНБК (вали вибійних двигунів, невеликі ділянки ОБТ, бурильних труб та ін.). За допомогою методики можна в лабораторних умовах ефек-

тивно досліджувати неорієнтовані одно- та двоопорні компоновки будь-яких конструкцій.

Література

- 1 Балицкий А. В. Исследование на механической модели статической устойчивости колонны бурильных труб // *Материалы межвузовского совещания “Нефтяное машиностроение”*. – Том 3. – Москва, 1958. – С. 57–81.
- 2 Беляев В. М. Компоновки нижней части бурильной колонны. – М.: ВНИИОЭНГ, 1972. – 140 с. – Сер. Бурение.
- 3 Григулецкий В. Г. Проектирование компоновок нижней части бурильной колонны / В. Г. Григулецкий, В. Т. Лукьянов. – М.: Недра, 1990. – 304 с.
- 4 Марков О. А. Экспериментальное исследование технологических факторов на искривление скважин при бурении с невращающейся бурильной колонной в изотропной толще пород: Автореф. дис... канд. техн. наук 05. 05. 12 / Моск. Ин-т. нефти и газа. – М., 1967. – 20 с.
- 5 Оганов С. А. Экспериментальное исследование низа бурильной колонны в наклонной скважине // С. А. Оганов, И. С. Цибульский // *Теория и практика бурения наклонных скважин*. – 1981. – С. 8–12.
- 6 Крижанівський Є. І. Моделювання пружної осі трубних колон в похило-спрямованих свердловинах / Є. І. Крижанівський, І. І. Чудик, В. М. Івасів, М. М. Яворський // *Тези науково-практичної конф. “Стан і перспективи розвитку родовищ нафти і газу України 2003”*. – Івано-Франківськ, 2003. – С. 254 – 256.
- 7 Родионов Д. А. Справочник по математическим методам в геологии / Д. А. Родионов, Р. И. Коган, В. А. Голубева. – М.: Недра, 1987. – 335 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 19.09.13

Рекомендована до друку професором Коцкуличем Я.С. (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) д-ром техн. наук Бондаренком М.О. (Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України, м. Київ)