

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ВИТРАТИ НА ОБЕРТАННЯ НЕОРІЄНТОВАНИХ КНБК У ПРОЦЕСІ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИНИ

Є.І.Крижанівський, І.І.Чудик, О.Ю.Витязь, О.І.Дерді

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 717967,  
e-mail: chudoman@ukr.net

*Встановлена енергоефективність використання неорієнтованих компоновок низу бурильної колони з різною кількістю опорно-центрувальних елементів при роторному способі буріння свердловини. Запропоновано методику визначення енергетичних витрат на подолання сил опору фрикційного тертя і фрезування стінок свердловини опорними елементами компоновок. Визначено основні техніко-технологічні причини впливу на енергоємність роботи компоновок і шляхи управління нею.*

Ключові слова: енергозатрати, бурильна колона, обертання, компоновка низу бурильної колони, стовбур свердловини

*Определена энергоэффективность использования неориентированных компоновок низа бурильной колонны с разным количеством опорно-центрирующих элементов при роторном способе бурения скважины. Предложена методика определения энергетических потерь на преодоление сил сопротивления фрикционного трения и фрезирования стенок скважины опорными элементами компоновок. Определены основные технико-технологические причины влияния на энергоёмкость работы компоновок и пути управления ею.*

Ключевые слова: энергозатраты, бурильная колонна, вращение, компоновка низа бурильной колонны, ствол скважины

*The article aims at determining of power efficiency of the use of no-directional bottom-hole assemblies with different quality of supporting and centric elements during the rotary drilling of the well. The methodology of energy losses calculation to overcome a force of friction and milling of the well walls with the help of assemblies supporting elements is proposed. Main technical and technological factors influencing the power intensity of the assemblies operation and the of its management are determined.*

Keywords: energy losses, boring column, the rotation, bottom hole assembly, wellbore

Сучасні темпи економічного, науково-технічного та соціального розвитку у світі зумовили різке зростання попиту на нафту та газ, що стало причиною збільшення кількості розроблених і вичерпаних родовищ. За період існування нафтогазовидобувної галузі в першу чергу освоювалися ті родовища, на яких без значних затрат ресурсів та часу можна було провести розгортання бурових і видобувних робіт та розпочати промислову розробку покладу. З часом кількість таких родовищ зменшувалася, зростали глибини їх залягання; рельєф місцевості, який значною мірою впливає на ефективність розробки родовищ із рівнин, почав зміщуватися в бік гір, боліт, густонаселених районів, рекреаційних зон та континентального шельфу. У зв'язку з цим багато нафтогазових родовищ отримали статус важкодоступних (з точки зору їх освоєння) із основним шляхом їх ефективної розробки – бурінням скерованих свердловин у заданому напрямі.

Ключову роль у процесі буріння свердловин відіграє бурильна колона (БК) та її наддолотні системи – компоновки низу бурильної колони (КНБК), які повинні відповідати високим експлуатаційним вимогам, що обумовлюються техніко-технологічними і гірничо-геологічними умовами буріння, а також показниками надійності, довговічності і енергоефективності. На сьогодні існує безліч різноманітних КНБК, як неорієнтованих, так і для буріння в заданому напрямі. У процесі буріння скерованих сверд-

ловин здебільшого використовувалися неорієнтовані КНБК, що забезпечують прокладання умовно-прямолінійних вертикальних, нахилених і горизонтальних ділянок гірничої виробки.

Теоретичними дослідженнями встановлено, що ефективність неорієнтованих КНБК залежить від кількості опорно-центрувальних елементів (ОЦЕ) [1, 2 та ін.], збільшення якої сприяє стабільній їх роботі. Проте, практикою буріння свердловин доведено низку негативних чинників використання багатоопорних компоновок, зокрема ризику прихоплення низу БК, ускладнення при СПО, погіршення транспортування шламу, зростання гідравлічних витрат у кільцевому просторі, виникнення додаткових моментів опору. Саме останній є чинником, що впливає на енергетичні затрати під час обертання бурильної колони. Для визначення впливу конструктивних особливостей КНБК на енергозатрати процесу, зокрема кількості ОЦЕ, і буде проведено низку аналітичних досліджень, актуальність яких не викликає сумніву.

Для визначення енергії, необхідної для подолання сил тертя під час обертання ділянки БК, яка лежить на стінці свердловини, навколо власної осі на кут  $2\pi$  можна скористатися такою залежністю:

$$E = \pi q L d \mu = 2\pi M_{OP} = 2\pi (M_D + \sum_{i=1}^n M_i), \quad (1)$$

де:  $q$ ,  $L$  і  $d$  – поперечна складова ваги погонного метра, довжина і діаметр БК;

$\mu$  – коефіцієнт тертя між БК і стінкою свердловини;

$M_{оп}$  – момент опору тертя під час обертання БК.

Ймовірними причинами збільшення крутного моменту і енерговитрат під час обертання неорієнтованих КНБК у стовбурі свердловини може бути низка чинників [1], зокрема:

- під час обертання БК ОЦЕ притискається до стінки свердловини з певною силою;

- діаметр ОЦЕ, а тим самим і радіус його обертання в місці встановлення, є більшими від діаметра БК;

- під дією сили притискання ОЦЕ до стінки свердловини відбувається його вдавлювання в неї за рахунок піддатливості гірської породи (ГП) під дією великих контактних тисків.

Для вивчення впливу на енерговитрати процесу обертання КНБК її конструктивних особливостей (рис. 1) і кутових параметрів профілю свердловини необхідно, насамперед, провести дослідження сил притискання ОЦЕ до стінок гірничої виробки за відповідними математичними моделями, опираючись на вже відомі наукові роботи [1, 2 та ін.].

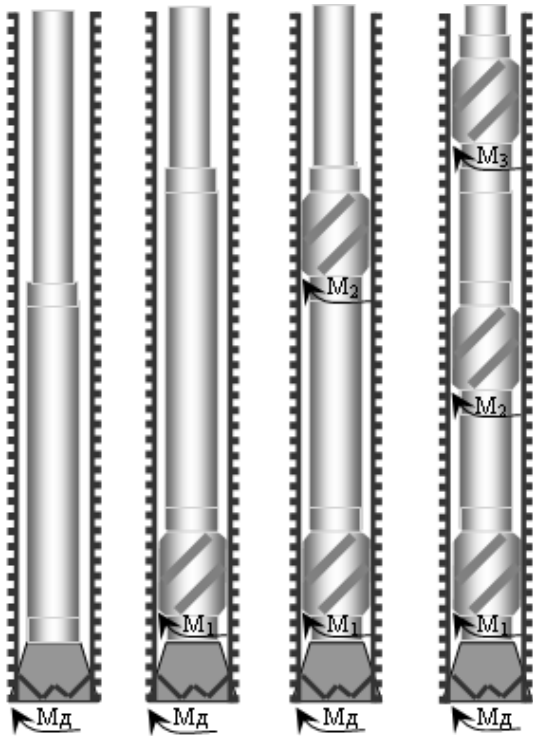


Рисунок 1 – Схеми конструкцій неорієнтованих КНБК

Розрахункові схеми неорієнтованих компоновок приймаються стрижневими системами, які складаються з ділянок різної власної ваги, жорсткості, геометричних розмірів, можуть включати ОЦЕ, що і визначають положення осі КНБК у свердловині. Під дією осьового навантаження, поперечної і поздовжньої складових ваги в похило-прямолинійному стовбурі сверд-

ловини КНБК набуває пружної форми згину осі, у відповідності до рис. 2.

Для безопорної компоновки (рис. 2, а) згин її пружної осі описується диференціальним рівнянням [1, 2]:

$$EI y_1''(x_1) = -P y_1(x_1) + Q x_1 + \frac{q x_1^2 \sin(\alpha)}{2}, \quad (2)$$

де:  $P$ ,  $Q$  – осьове навантаження та відхиляюче зусилля на долоті;

$EI$  – жорсткість на згин ділянки КНБК;

$\alpha$  – зенітний кут нахилу осі свердловини.

Для даної розрахункової схеми характерними є такі граничні умови:

$$x_1 = 0, y_1(0) = 0$$

$$x_1 = L, y_1(L) = r_x, y_1'(L) = 0, y_1''(L) = 0 \quad (3)$$

де:  $L$  – довжина ділянки безопорної КНБК від долота до верхньої точки її контакту із стінкою свердловини;

$r_x$  – радіальний зазор між осями свердловини і КНБК у верхній точці контакту із стінкою.

Для одноопорної компоновки (рис. 2, б) згин її пружної осі на першій ділянці описується диференціальним рівнянням (2), а для другої – за аналогією:

$$EI y_2''(x_2) = -[P - q L_1 \cos(\alpha)] y_2(x_2) +$$

$$+ Q(L_1 + x_2) + q \left( \frac{L_1^2}{2} + L_1 x_2 + \frac{x_2^2}{2} \right) \sin(\alpha) - R_1 x_2. \quad (4)$$

Для вказаної розрахункової схеми характерними є такі граничні умови:

$$x_1 = 0, y_1(0) = 0; \quad (5)$$

$$x_1 = L_1, x_2 = 0, y_1(L_1) = y_2(0) = r_1, y_1'(L_1) = y_2'(0);$$

$$x_2 = L_2, y_2(L_2) = r_x, y_2'(L_2) = 0, y_2''(L_2) = 0,$$

де  $r_1$  – радіальний зазор між осями свердловини і КНБК у місці встановлення ОЦЕ (рис. 2).

Для двоопорної компоновки (рис. 2, в) згин її пружної осі на першій і другій ділянках описується диференціальними рівняннями (2) і (4), а для третьої – за аналогією

$$EI y_3''(x_3) = - \left[ P - \sum_{i=1}^2 q L_i \cos(\alpha) \right] y_3(x_3) +$$

$$+ Q \left( \sum_{i=1}^2 L_i + x_3 \right) + q \left( \sum_{i=1}^2 \frac{L_i^2}{2} + x_3 \sum_{i=1}^2 L_i + L_1 L_2 + \frac{x_3^2}{2} \right) \sin(\alpha) - R_2 x_3 - R_1 (x_3 + L_2). \quad (6)$$

Для даної розрахункової схеми характерними є такі граничні умови:

$$x_1 = 0, y_1(0) = 0$$

$$x_i = L_i, x_{i+1} = 0, y_i(L_i) = y_{i+1}(0) = r_i \quad (7)$$

$$y_i'(L_i) = y_{i+1}'(0); \quad \text{де } i = (1; 2)$$

$$x_3 = L_3, y_3(L_3) = r_x, y_3'(L_3) = 0, y_3''(L_3) = 0.$$

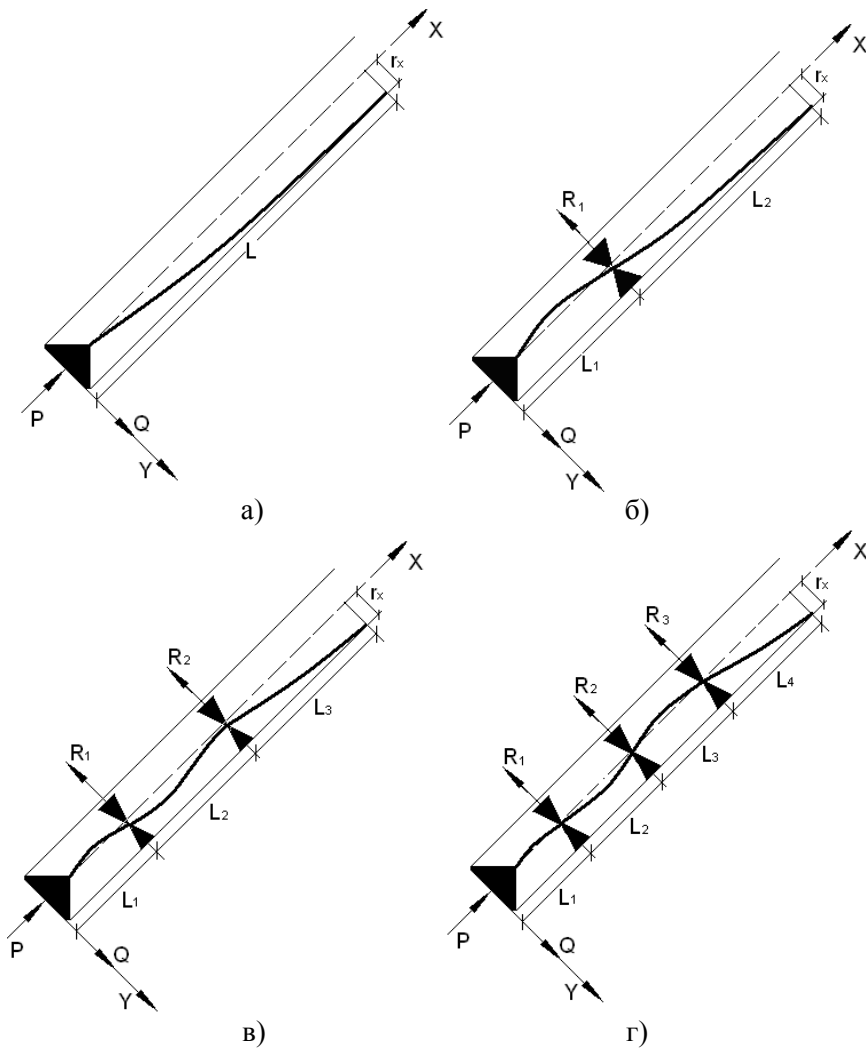


Рисунок 2 – Розрахункові схеми пружної осі неорієнтованих КНБК із різною кількістю ОЦЕ

Для триопорної компоновки (рис. 2, г) згин її пружної осі на перших трьох ділянках описуються диференційними рівняннями (2) і (4) і (6), а для четвертої – за аналогією:

$$\begin{aligned}
 EIy_4''(x_4) = & - \left[ P - \sum_{i=1}^3 qL_i \cos(\alpha) \right] y_4(x_4) + \\
 & + Q \left( x_4 + \sum_{i=1}^3 L_i \right) - R_3 x_4 - R_2 (x_4 + l_3) - \\
 & - R_1 (x_4 + \sum_{i=2}^3 l_i) + q \left( \sum_{i=1}^4 \frac{L_i^2}{2} + L_3 \sum_{i=1}^2 L_i + \right. \\
 & \left. + L_4 \sum_{i=1}^3 L_i + x_4 \sum_{i=1}^4 L_i + L_1 L_2 + \frac{x_4^2}{2} \right) \sin(\alpha).
 \end{aligned} \tag{8}$$

Для даної розрахункової схеми характерними є такі граничні умови:

$$\begin{aligned}
 x_1 = 0, \quad y_1(0) = 0 \\
 x_i = L_i, \quad x_{i+1} = 0, \quad y_i(L_i) = y_{i+1}(0) = r_i \quad (9) \\
 y_i^I(L_i) = y_{i+1}^I(0); \quad \partial e i = (1; 2; 3)
 \end{aligned}$$

$$x_4 = L_4, \quad y_4(L_4) = r_X, \quad y_4^I(L_4) = 0, \quad y_4^{II}(L_4) = 0.$$

Відтак за відповідними граничними умовами для кожної із розрахункових схем (рис. 2, а, б, в, г), складаються системи рівнянь, результатами розв'язання яких є невідомі  $Q, R_i, L_n$  та інші невідомі величини. Визначення ж енерговитрат на подолання опору від притискування боковими силами долота (без врахування руйнування вибою свердловини) і ОЦЕ до стінок свердловини (рис. 1) з врахування тільки фрикційного тертя є можливим у разі використання такої залежності:

$$E_{np} = \pi D_{ОЦЕ} \left( \sum_{i=1}^n R_i + Q \right), \tag{10}$$

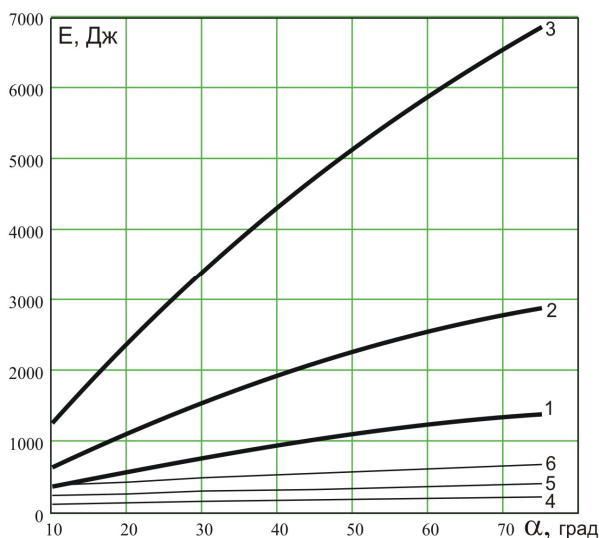
де  $n$  і  $D_{ОЦЕ}$  – кількість і діаметр ОЦЕ.

Під дією сил притискування  $R_i$  лопаті ОЦЕ вдавлюється в стінку свердловини, і в процесі обертання відбувається її фрезкування до утворення каверн, що також є енерговитратним процесом. З умови піддатливості стінки свердловини глибина вдавлювання ОЦЕ в ГП визначається за залежністю [3, 4]:

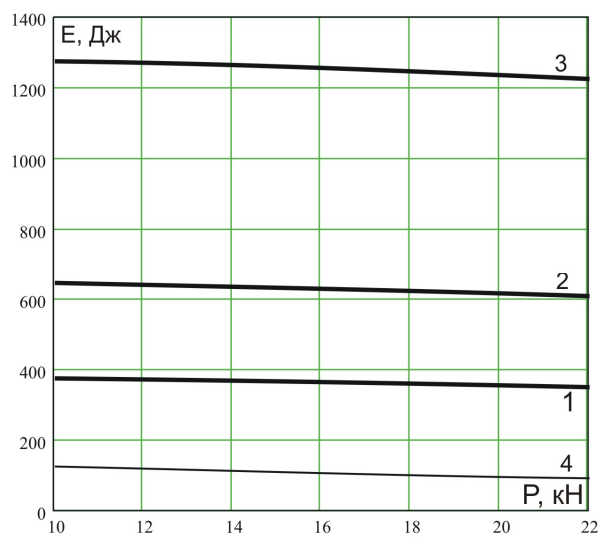
$$h = \frac{R_i}{n_{нл} b_{нл} K l_{нл}}, \tag{11}$$

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку енергетичних витрат на обертання КНБК

| Кількість ОЦЕ, шт   | $D_{\text{Дол}}$ , мм | $D_{\text{ОЦЕ}}$ , мм              | ОБТ 146  | $L_i$ , м                  | $P$ , $\times 10^4$ Н        | $\alpha$ , град |
|---------------------|-----------------------|------------------------------------|--|----------------------------|------------------------------|-----------------|
| –<br>1<br>2<br>3    | 190,5                 | –<br>190<br>190/190<br>190/190/190 | $EI=10600 \text{ кНм}^2$<br>$q=1010 \text{ Н/м}$ | –<br>5; 7; 9<br>8 / 26     | 10; 15; 20<br>10<br>20<br>20 | 1-30            |
| $b_{\text{ПЛ}}$ , м | $l_{\text{ПЛ}}$ , м   | $n_{\text{ПЛ}}$ , шт               | $\nu$  | $\sigma_{\text{СК}}$ , МПа | $\mu$                        | $E_0$ , МПа     |
| 0.04                | 0.3                   | 4                                  | 0.25   | 20                         | 0.3                          | 0.8-1.2         |



1, 2, 3 – кількість ОЦЕ в КНБК;  
4, 5, 6 – безопорні КНБК з 1, 2, 3-ма ОЦЕ і відповідними довжинами  
**Рисунок 3 – Енерговитрати під час обертання неорієнтованими КНБК на кут  $2\pi$  з різною кількістю ОЦЕ в прямолінійному стовбурі свердловини зі зміною  $\alpha$**



1, 2, 3 – відповідно кількість ОЦЕ в КНБК;  
4 – безопорна КНБК  
**Рисунок 4 – Енерговитрати під час обертання неорієнтованими КНБК на кут  $2\pi$  з різною кількістю ОЦЕ в прямолінійному стовбурі свердловини зі зміною  $P$  при  $\alpha = 10^\circ$**

де:  $n_{\text{пл}}$ ,  $b_{\text{пл}}$ ,  $l_{\text{пл}}$  – кількість, ширина і довжина лопаті на ОЦЕ відповідно;  
 $K$  – коефіцієнт піддатливості стінки свердловини:

$$K = 2,46 \cdot 10^{-3} \cdot \left[ \frac{b_{\text{пл}}}{2S} \right]^{1,32} \left[ \frac{E_0}{b_{\text{пл}} (1 - \nu^2)} \right], \quad (12)$$

де  $S$  – пружна характеристика ГП [3, 4]:

$$S = 3 \sqrt{\frac{2(1 - \nu)EI}{b_{\text{пл}} E_0}}, \quad (13)$$

де:  $\nu$  і  $E_0$  – коефіцієнт Пуассона і модуль пружності ГП [3, 4].

Сила опору при сколюванні ГП ОЦЕ визначається за формулою:

$$F_{\text{ОП}} = \sigma_{\text{СК}} S_{\text{РІЗ}}, \quad (14)$$

де:  $S_{\text{РІЗ}}$  – площа різання планкою ОЦЕ ГП;  
 $\sigma_{\text{СК}}$  – межа міцності ГП на сколювання.

$$S_{\text{РІЗ}} = l_{\text{пл}} h. \quad (15)$$

Енерговитрати під час фрезування ОЦЕ стінки свердловини за таких умов визначаються як:

$$E_{\text{РІЗ}} = \pi D_{\text{ОЦЕ}} F_{\text{ОП}}. \quad (16)$$

Із врахуванням (10) і (15) сумарні енерговитрати на обертання КНБК визначаються:

$$E_{\text{КНБК}} = \pi D_{\text{ОЦЕ}} \left[ \left( \sum_{i=1}^n R_i + Q \right) \mu + F_{\text{ОП}} \right]. \quad (17)$$

Для дослідження впливу кількості ОЦЕ в КНБК, а також інших техніко-технологічних чинників (табл. 1) на енергетичні витрати у процесі буріння було проведено дослідження і отримано низку графічних залежностей (рис. 3, 4), за якими встановлено наступне:

– збільшення кількості ОЦЕ в неорієнтованих КНБК при  $Q = 0$  (рис. 3) обумовлює різке зростання енергетичних витрат на їх обертання. Так, по відношенню до безопорної для одноопорної компоновки ці енерговитрати збільшуються від 2 до 6 разів відповідно в діапазоні зміни зенітного кута від  $10^\circ$  до  $75^\circ$ , для двоопор-

ної – від 2 до 7, а для триопорної – від 4 до 10 разів. Отримано, що кожен наступний ОЦЕ, включений до КНБК, буде збільшувати енерговитрати на її обертання приблизно удвічі;

– збільшення zenітного кута (в даному випадку від 10 до 75°) і кількості ОЦЕ (від 1 до 3) в неорієнтованих КНБК стає причиною різкого зростання енергетичних витрат. Так, для безопорної КНБК така зміна величини  $\alpha$  обумовлює збільшення енерговитрат приблизно удвічі, для одноопорної – в 3.8, для двоопорної – в 4.6, а для триопорної – в 5.5 разів;

– основними чинниками, що зумовлюють зміну  $Q$  і  $R$  в неорієнтованій КНБК, є  $q$ ,  $EI$  і  $\alpha$  [1, 2]. Збільшення осьового навантаження на долото (рис. 4) (в даному випадку від 100 до 220 кН) стає причиною часткового зменшення енергетичних витрат на обертання КНБК. Для безопорної компоновки ця величина становить близько 25%, для одноопорної – 8%, для двоопорної – 6%, а для триопорної – 4%;

– для встановлених вихідних даних на фрезування стінки свердловини ОЦЕ витрачається близько 4% від загальної (на обертання КНБК) енергії; проте із зменшенням міцнісних характеристик ГП остання величина збільшується і сягає 10%;

– енергія необхідна для обертання триопорної неорієнтованої компоновки в прямолінійному стовбурі свердловини є співмірною з тією, яка витрачається на обертання БК довжиною близько 2000 м за відповідного zenітного кута, або потрібна на руйнування ГП долотом даної компоновки;

– для зменшення енергетичних затрат на обертання БК у процесі буріння похилоскерованих і горизонтальних свердловин необхідно використовувати такі конструкції неорієнтованих КНБК, які передбачають використання найменшої кількості ОЦЕ;

– основними напрямками оптимізації неорієнтованих КНБК для проходки прямолінійних ділянок скерованих свердловин за критерієм мінімальних енергетичних витрат є: використання в їх складі спеціальних засобів, які дають змогу зменшити кількість ОЦЕ і одночасно забезпечити траєкторію буріння; зменшення жорсткості на згин і ваги компоновки шляхом використання легкоплавних матеріалів та гнучких трубних елементів.

## Література

1 Султанов Б. З. Работа бурильной колонны в скважине / [Б. З. Султанов, Е. И. Ишемгужин, М. Х. Шаммасов и др.] – М.: Недра, 1973. – 217 с.

2 Івасів В. М. Розрахунок компоновок низу бурильної колони (КНБК) з двома центраторами / В. М. Івасів, І. І. Чудик, А. В. Козлов, В. Г. Глушич // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2002. – № 2(3). – С. 15 – 16.

3 Kryzhanivsky Y. One of cases of inefficient energy expenditure during well drilling operations. The international symposium. 2008. / Y. Kryzhanivsky, I. Chudyk, R. Karpuk. - Baia Mera, Romania. P. 47.

4 Гулизаде М. П. Методика определения размеров центратора с учетом требований искривления ствола скважины и предотвращения желобообразования / М. П. Гулизаде, С. А. Оганов, И. З. Гасанов, С. М. Джалалов // Нефть и газ. – 1978. – №4. – С. 21 – 24.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*20.01.10*

*Рекомендована до друку професором  
Коцюличем Я.С.*