

## Фізико-технічні проблеми видобування енергоносіїв

УДК 622.243.272

### ЕНЕРГЕТИЧНІ ВТРАТИ, ЗУМОВЛЕНІ СИЛАМИ ОПОРУ ОСЬОВОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ НЕОРІЄНТОВАНИХ КОМПОНОВОК У СТОВБУРІ СВЕРДЛОВИНИ

Є.І.Крижанівський, І.І.Чудик, В.Р.Осадця

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

Наведено методику розрахунку втрат енергії, які зумовлені недовантаженням долота осьовим зусиллям стиснутої частини бурильної колони через великі сили опору осьового переміщення труб в місцях контактування опорно-центрувальних елементів неорієнтованих компоновок низу бурильної колони із стінками гірничої виробки. Шляхом аналітичних досліджень встановлено, що збільшення кількості опорно-центрувальних елементів у складі компоновок призводить до суттєвого недовантаження долота і зменшення енергії, спрямованої на руйнування гірської породи. Для її збільшення запропоновано використовувати конструкції неорієнтованих компоновок з найменшою кількістю центраторів.

Ключові слова: компоновка низу бурильної колони, енергетичні затрати, стовбур свердловини, сили опору, тертя.

Приведена методика расчета потерь энергии, обусловленных недогрузкой долота осевым усилием сжатой части буровой колонны вследствие больших сил сопротивления осевого перемещения труб в местах контактирования опорно-центрирующих элементов неориентированных компоновок низа буровой колонны со стенками горной выработки. Путем аналитических исследований установлено, что увеличение количества опорно-центрирующих элементов в составе компоновок ведет к существенной недогрузке долота и уменьшению энергии, направленной на разрушение горной породы. Для ее увеличения предлагается использовать конструкции неориентированных компоновок с наименьшим количеством центраторов.

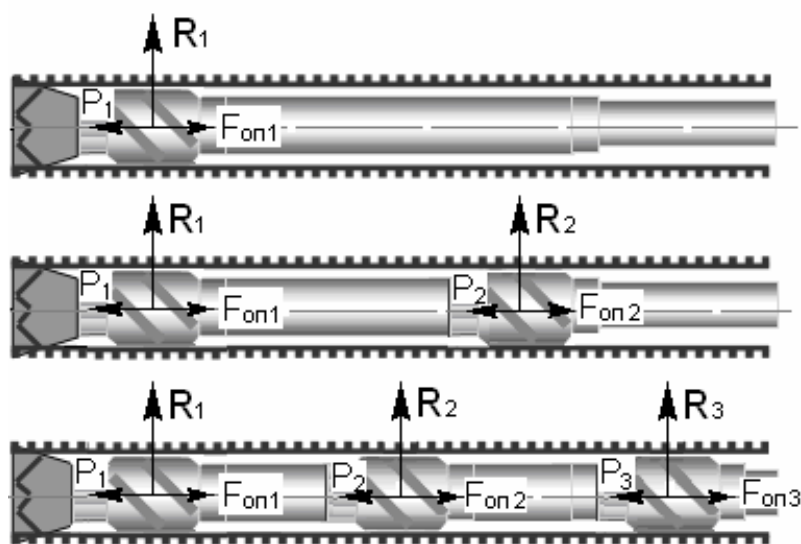
Ключевые слова: компоновка низа буровой колонны, энергетические потери, ствол скважины, силы сопротивления, трение.

The methodology of evaluating energy loss which conditioned bit under stressing of axial force of compression part of drill string because of huge pipe axial movement resistance force in the place of contact of support - centering element of nonoriented bottom drilling string assemblies with rock have been applied. In the way of analytical research it has been established that increasing of number of support-centering elements in assembly result in drastically bit under stressing and reducing energy, which directs to rock damage. For its increasing have been offered to use the construction of nonoriented assemblies with least number of centralizers

Keywords: bottom drilling string assemblies, energy consumption, well bore, resistance force, frictional force.

На сьогодні частка споживання нафти і газу в Україні становить близько 35% від загальної кількості всіх існуючих енергетичних ресурсів проти 20% середньоєвропейських показників. Така тенденція збережеться і в найближчому майбутньому через відсутність альтернативних газу джерел енергії та непристосованості промисловості і комунального господарства до ефективної роботи в умовах енергозбереження. Існуючих на сьогодні розвіданих запасів нафти і газу з відносно нескладними умовами видобування і транспортування вуглеводневої сирови-

ни вистачить ще на 22-25 років. У зв'язку з цим стратегічним напрямком підвищення енергетичної незалежності держави є нарощування об'ємів бурових робіт на площах, де зосереджені поклади нафти і газу, але в силу гірничо-геологічних і техніко-технологічних причин вважаються важкодоступними. Для розробки таких покладів необхідно, в першу чергу, провести комплекс бурових робіт з використанням техніки і технологій похило-скерованого та горизонтального буріння, що є енерговитратним процесом, швидкість виконання якого значною



$$P_1 > P_2 > P_3$$

Рисунок 1 – Розрахункові схеми розподілу сил на опорах в неорієнтованих КНБК із різною кількістю ОЦЕ

мірою залежить від осевого навантаження на долото. Із збільшенням зенітного кута стовбура свердловини і довжини його ділянок, через зростання сил тертя між бурильною колоною (БК) і стінкою свердловини ускладнюється осьове її переміщення. Це стає основною причиною, що перешкоджає забезпеченню необхідних режимно-технологічних параметрів буріння на долоті і, відповідно, зменшення енергії, спрямованої на руйнування гірської породи (ГП) на вибої.

Невід’ємною складовою БК у наддолотній її частині є компоновка низу бурильної колони (КНБК), яка забезпечує просторову траєкторію буріння і для проходки похило-скерованих й горизонтальних ділянок свердловин комплектується здебільшого на базі вибійного двигуна [1]. До складу КНБК обов’язково включають опорно-центрувальні елементи (ОЦЕ), геометричними розмірами і місцем розташування яких отримують відповідне бокове (відхиляюче) зусилля на долоті. Проте, під дією великих поперечних сил від власної ваги компоновки ОЦЕ притискаються до стінки свердловини. Геометричні розміри робочих їх частин (планок, шарошок) характеризуються малими габаритними розмірами, що зумовлює появу значних контактних тисків в місцях взаємодії ОЦЕ із стінками свердловини. Внаслідок цього на “опорах” компоновки виникають сили опору не лише під час обертання БК, а і її осьовому переміщенню, які зменшують осьове навантаження на долото. Для визначення техніко-технологічних і гірничо-геологічних умов буріння на зменшення осевого навантаження на долоті і енергії від втрат на тертя, між елементами КНБК і стінками свердловини, спрямованої на руйнування ГП, необхідно провести відповідні дослідження, актуальність яких є очевидною.

Енергія, необхідна для подолання сил тертя при осьовому переміщенні КНБК, обчислюється за формулами:

$$E_{КНБК} = \sum_{i=1}^n F_{ОЦЕ.ОП} h_{БУР}, \quad (1)$$

де:  $F_{ОЦЕ.ОП}$  – сила опору при осьовому переміщенні КНБК у стовбурі свердловини;

$h_{БУР}$  – довжина інтервалу буріння.

Для дослідження впливу на осьове навантаження на долоті і енергозатрат на подолання опору осевого переміщення КНБК у стовбурі свердловини її конструктивних особливостей (рис. 1), геометричних і просторових параметрів профілю гірничої виробки необхідно провести дослідження сил притискування ОЦЕ до ГП. Для цього доцільно використовувати вже відомі математичні моделі [2, 3 та ін.].

Для розгляду даного питання запропоновано розрахункові схеми неорієнтованих компоновок з ОЦЕ, що визначають положення осі КНБК у стовбурі свердловини (рис. 2).

Для одноопорної компоновки (рис. 2, а) згин її пружної осі на першій ділянці описується диференціальним [1-5]:

$$EI y_1''(x_1) = -P y_1(x_1) + Q x_1 + \frac{qx_1^2 \sin(\alpha)}{2}, \quad (2)$$

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

$EI, q$  – жорсткість на згин та вага погонного метра КНБК;

$\alpha$  – зенітний кут нахилу осі свердловини.

Для другої ділянки – за аналогією з (2):

$$EI y_2''(x_2) = -[P - qL_1 \cos(\alpha)] y_2(x_2) + Q(L_1 + x_2) + q \left( \frac{L_1^2}{2} + L_1 x_2 + \frac{x_2^2}{2} \right) \sin(\alpha) - R_1 x_2. \quad (3)$$

Для даної розрахункової схеми приймаються такі граничні умови:

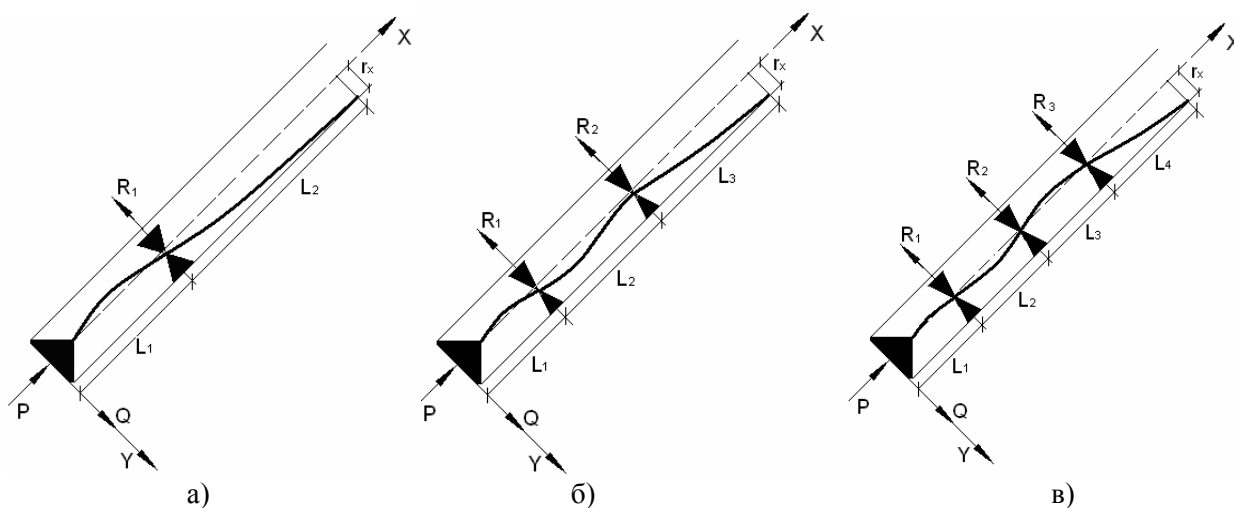


Рисунок 2 – Розрахункові схеми пружної осі неорієнтованих КНБК в ПСС

$$\begin{cases} x_1 = 0, y_1(0) = 0, \\ x_1 = L_1, x_2 = 0, y_1(L_1) = y_2(0) = r_1, \\ y_1^I(L_1) = y_2^I(0), \\ x_2 = L_2, y_2(L_2) = r_X, \\ y_2^I(L_4) = 0, y_4^{II}(L_n) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де:  $r_1$  – радіальний зазор між осями КНБК і свердловини в місці встановлення ОЦЕ;

$r_X$  – радіальний зазор між осями КНБК і свердловини у верхній точці їх контакту (рис. 2).

Для двоопорної компоновки (рис. 2, б) згин її пружної осі на першій і другій ділянках описуються диференціальними (2) і (3), а для третьої – за аналогією:

$$\begin{aligned} EIy_3^{II}(x_3) = & - \left[ P - \sum_{i=1}^2 qL_i \cos(\alpha) \right] y_3(x_3) + \\ & + q \left( \sum_{i=1}^2 \frac{L_i^2}{2} + x_3 \sum_{i=1}^2 L_i + L_1 L_2 + \frac{x_3^2}{2} \right) \sin(\alpha) + \\ & + Q \left( \sum_{i=1}^2 L_i + x_3 \right) - R_2 x_3 - R_1 (x_3 + L_2). \end{aligned} \quad (5)$$

Для даної розрахункової схеми приймаються є такі граничні умови:

$$\begin{cases} x_1 = 0, y_1(0) = 0 \\ x_i = L_i, x_{i+1} = 0, y_i(L_i) = y_{i+1}(0) = r_i, \\ y_i^I(L_i) = y_{i+1}^I(0); \quad \text{де } i = (1; 2), \\ x_3 = L_3, y_3(L_3) = r_X, \\ y_3^I(L_3) = 0, y_3^{II}(L_3) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Для триопорної компоновки (р. 2, в) згин її пружної осі на перших трьох ділянках описуються диференціальними (2) і (3) і (5), а для четвертої – за аналогією:

$$\begin{aligned} EIy_4^{II}(x_4) = & - \left[ P - \sum_{i=1}^3 qL_i \cos(\alpha) \right] y_4(x_4) + \\ & + Q \left( x_4 + \sum_{i=1}^3 L_i \right) - R_2 x_4 - R_1 \left( x_4 + \sum_{i=2}^3 L_i \right) + \\ & + q \left( \sum_{i=1}^4 \frac{L_i^2}{2} + L_3 \sum_{i=1}^2 L_i + L_4 \sum_{i=1}^3 L_i + x_4 \sum_{i=1}^4 L_i + \right. \\ & \left. + L_1 L_2 + \frac{x_4^2}{2} \right) \sin(\alpha). \end{aligned} \quad (7)$$

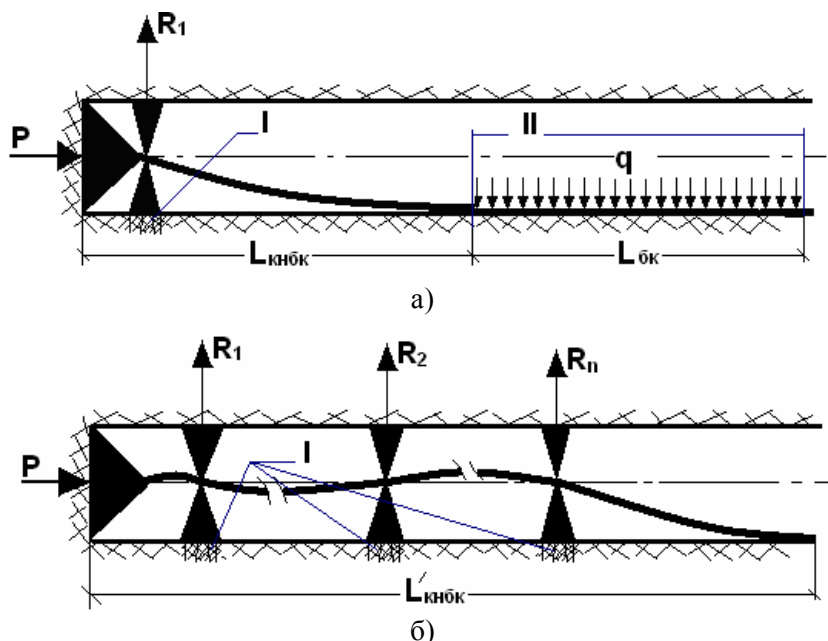
Для даної розрахункової схеми характерними існують такі граничні умови:

$$\begin{cases} x_1 = 0, y_1(0) = 0, \\ x_i = L_i, x_{i+1} = 0, y_i(L_i) = y_{i+1}(0) = r_i, \\ y_i^I(L_i) = y_{i+1}^I(0); \quad \text{де } i = (1; 2; 3), \\ x_4 = L_4, y_4(L_4) = r_X, \\ y_4^I(L_4) = 0, y_4^{II}(L_4) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Згідно з наведеними диференціальними рівняннями (2), (3), (5), (7) і за відповідних граничних умов для кожної із розрахункових схем (рис. 2, а, б, в), складаються системи рівнянь, результатом розв'язання яких є шукані величини  $Q, R_i, L_n$  та інші невідомі.

Сили опору при осьовому переміщенні КНБК у наддолотній частині визначаються двома чинниками, а саме: фрикційним тертям з фрезуванням стінки свердловини ОЦЕ  $F_{OP i}$ , (рис. 1) в зоні їх контактування (зони I, рис. 3, а і б) і адгезійним прилипанням труб до фільтраційної кірки (зона II, рис. 3, а).

Розглянемо неорієнтовані КНБК: одноопорну (рис. 3, а) і багатоопорну (рис. 3, б). При однакових довжинах КНБК ( $L^I_{КНБК} = L_{КНБК} + L_{\sigma_k}$ ), сили опору при осьовому їх переміщенні в стовбурі свердловини для безопорної компоновки визначаються так:



I – зона притискання ОЦЕ до стінки свердловини;  
 II – зона прилипання КНБК до фільтраційної кірки  
**Рисунок 3 – Розрахункові схеми сил осевого опору для неорієнтованих КНБК із різною кількістю ОЦЕ**

$$F_{OC.OP} = q L_{\delta k} \mu + A_{dg} S_K \quad (9)$$

Для компоновки з одним ОЦЕ – за аналогією:

$$F_{OC.OP} = F_{PIZ_i} + [R_i + q_{\delta k} L_{\delta k}] \mu + A_{dg} S_K, \quad (10)$$

де  $F_{PIZ_i}$  – сила опору, обумовлена вдавлюванням в стінку свердловини лопатей ОЦЕ [4, 5]:

$$F_{PIZ_i} = \sigma_{СК} \frac{1377 R_i (1 - \nu^2) [(1 - \nu) EI]^{0.44}}{n b^{0.76} E_0^{1.44} l}, \quad (11)$$

де:  $n, b, l$  – кількість, ширина і довжина лопаті ОЦЕ;

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

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

$\sigma_{СК}$  – границя міцності ГП на зсув [3, 4];

$L_{\delta k}$  – довжина КНБК вище точки її відриву від стінки свердловини, (рис. 3, б);

$A_{dg}$  – показник міцності фільтраційної кірки на зсув, [5];

$S_K$  – площа контакту КНБК і фільтраційної кірки на ділянці довжиною  $L_{BK}$  [6].

Для багатоопорної компоновки залежність (10) набуває іншого вигляду:

$$F_{OC.OP} = \sum_{i=1}^n (R_i \mu + F_{PIZ_i}). \quad (12)$$

Величина механічної енергії, яку необхідно підвести до долота з метою поглиблення вибою свердловини, визначається за формулою:

$$E_{ДОЛ} = M_{ДОЛ} \omega \frac{h_{БУР}}{V_{МЕХ}} = [M_{ПИТ} P + \Delta M] \omega \frac{h_{БУР}}{V_{МЕХ}}, \quad (13)$$

де:  $M_{ДОЛ}$ ,  $\omega$  – момент і кутова швидкість обертання долота;

$V_{МЕХ}$  – механічна швидкість буріння;

$M_{ПИТ}$  – питомий момент на одиницю осевого навантаження на долото.

$\Delta M$  – збільшення моменту опору при обертанні долота на вибої свердловини, зумовлене його конструкційними особливостями (ущільнена опора).

Після врахування в (13), чинників (9)-(12) отримуємо:

$$E_{ДОЛ}^* = [M_{ПИТ} [P - (q L_{\delta k} \mu + A_{dg} S_K)] + \Delta M] \omega \frac{h_{БУР}}{V_{МЕХ}}; \quad (14)$$

для одноопорної КНБК

$$E_{ДОЛ}^* = \left[ M_{ПИТ} \left[ P - \left( \frac{1377 R_i (1 - \nu^2) (1 - \nu)^{0.44}}{n b^{0.76} E_0^{1.44} l EI^{-0.44} \sigma_{СК}^{-1}} + [R_1 + q L_{\delta k}] \mu + A_{dg} S_K \right) \right] + \Delta M \right] \omega \frac{h_{БУР}}{V_{МЕХ}}; \quad (15)$$

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку КНБК

Кількість ОЦЕ, шт	Діаметр, мм		ЗТСШ-172	$L_i$ , м	$P, \times 10^4$ Н	$\alpha$ , град	$\Delta M$ , Нм
	долото	ОЦЕ					
безопорна		–	ЕІ=6650	-	6	70-90	700
1	215,9	215	кНм <sup>2</sup>	0	6	70-90	
2		215/215	q=1300 Н/м	0 / 11.4	6	70-90	
3		215/215/215		0 / 11.4 / 13.4	6	70-90	
$b$ , м	$l$ , м	$n$ , шт	$\nu$	$\sigma_{СК}$ , МПа	$\mu$	$E_0$ , МПа	$M_{ПШТ}$ , Н
0.04	0.3	4	0.25	20	0.3	0.2	0.02

для багатоопорної КНБК

$$E_{ДОЛ}^* = \left[ M_{ПШТ} \left[ P - \sum_{i=1}^n \frac{137(1-\nu^2)(1+\mu)\sigma_{СК}}{nlb^{0,76} E_0^{1,44} ((1-\nu)EI)^{-0,44}} R_i \right] + \Delta M \right] \omega \frac{h_{БУР}}{V_{МЕХ}} \quad (16)$$

Частка енергії, яка витрачається на подолання сил осьового опору в КНБК з боку стінок свердловини по відношенню до загальнопотрібної для руйнування долотом ГП згідно з (14)-(16), визначається:

$$\delta E = \frac{E_{ДОЛ} - E_{ДОЛ}^*}{E_{ДОЛ}} 100\% \quad (17)$$

Для дослідження впливу кількості ОЦЕ в КНБК і окремих техніко-технологічних і гірничо-геологічних чинників (табл. 1) на величину  $\delta E$  проведено аналітичні дослідження і отримано низку графічних залежностей (рис. 4).

### Висновки

1. На основі аналізу аналітичних досліджень і промислово-практичних даних за даною проблемою встановлено, що використання неорієнтованих КНБК у процесі буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин є поширеною технологією, в якій не розкрито питання втрат осьового навантаження та енергії на долоті в процесі тертя і адгезійної взаємодії їх елементів із стінками гірничої виробки.

2. Шляхом аналітичних досліджень встановлено, що використання ОЦЕ в неорієнтованих стабілізаційних КНБК в стовбурі свердловини із zenітним кутом 75 – 90° при  $Q = 0$  призводить до суттєвого зменшення осьового навантаження на долото і енергії, спрямованої на руйнування ГП на вибої свердловини (від 15 до 80% і більше) (рис. 4) і навіть до заклинювання компоновки, що може бути викликане збільшенням низки техніко-технологічних і гірничо-геологічних чинників, таких як: zenітний кут (рис. 4, а); вага і жорсткість на згин КНБК (рис. 4, б, в), кількість ОЦЕ, модуль пружності ГП (рис. 4, д) і її міцності на зсув (рис. 4, г), показник міцності фільтраційної кірки на зсув (рис. 4, е).

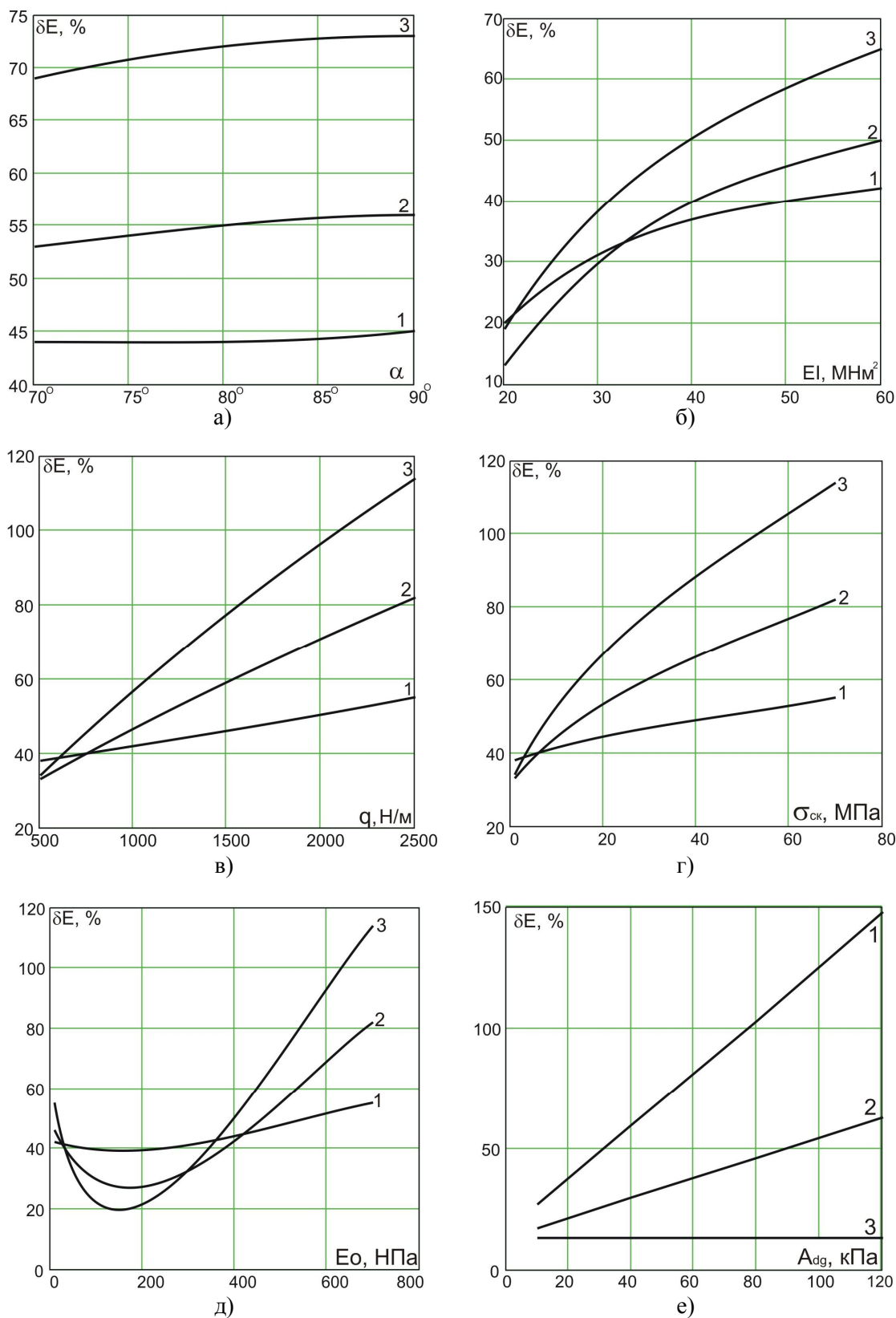
3. Найбільш енерговитратними компонентами у плані їх використання при бурінні стабілізаційних ділянок похило-скерованих і горизонтальних свердловин із zenітним кутом, більшим 75°, є їх триопорні (і більше) конструкції. Адже, при їх осьовому переміщенні в стовбурі свердловини витрачається понад 80% енергії, спрямованої до долота, яка йде на подолання тертя між притиснутими під дією попереочної складової ваги ОЦЕ до стінок свердловини. При цьому долото не доотримує потрібного осьового навантаження і, відповідно, зменшується механічна енергія, спрямована на руйнування ГП.

4. Для одно- і двоопорних конструкцій КНБК при довжинах, співмірних із триопорною, характерною буде взаємодія її елементів із стінками свердловини не лише в місцях розташування ОЦЕ, а і й по твірній вибійного двигуна, де характерним є адгезійне прилипання елементів компоновки до фільтраційної кірки. При порівнянні результатів проведених досліджень встановлено, що лише в окремих випадках (при  $A_{dg} > 10$  кПа,  $E_0 < 400$  МПа) (рис. 4, е) одно- і двоопорні КНБК чинять більший опір осьовому їх переміщенню в стовбурі свердловини, а ніж трьохопорні конструкції.

5. Для підвищення енергоефективності буріння (з використанням вибійних двигунів) стабілізаційних ділянок похило-скерованих і горизонтальних свердловин доцільно використовувати неорієнтовані КНБК на базі одного (або не більше двох) ОЦЕ, а також впроваджувати нові технічні рішення, які дають змогу зменшити вплив сил тертя на осьове навантаження і збільшити частку енергії на долото, спрямувавши її на руйнування ГП.

### Література

- 1 Калинин А.Г. Бурение наклонных и горизонтальных скважин. / [А.Г.Калинин, Б.А.Никитин, К.М.Солодкий, Б.З.Султанов] – М.: Недра, 1997. – 651 с.
- 2 Султанов Б.З. Работа бурильной колонны в скважине / Б. З. Султанов, Е. И. Ишемгузин, М. Х. Шаммасов, В. Н. Сорокин. – М.: Недра, 1973. – 217 с.



1, 2, 3 – кількість ОЦЕ в КНБК

Рисунок 4 – Графічні залежності зміни величини  $\delta E$  для КНБК з різною кількістю ОЦЕ від техніко-технологічних і гірично-геологічних умов буріння

3 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.

4 Kryzhanivsky Y. One of cases of inefficient energy expenditure during well drilling operations. The international symposium / Y. Kryzhanivsky, I. Chudyk, R. Karpuk. – Baia Mare, Romania. – 2008. – С. 47.

5 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] // Изв. ВУЗов "Нефть и газ". – 1978. – №4. – С. 21–24.

6 Чудик І.І. Розрахунок контактних зон бурильних труб зі стінками свердловини і фільтраційною кіркою / І. І. Чудик, В. В. Буй // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – № 4 (25). – 2007. – С. 84 – 88.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*30.03.10*

*Рекомендована до друку професором*

**Я. С. Коцкуlichem**