

622.67512  
4-84

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАФТИ І ГАЗУ

Чудик Ігор Іванович



УДК 622.243.2

4-84 (043)

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ БУРІННЯ СКЕРОВАНИХ  
СВЕРДЛОВИН З МІНІМАЛЬНИМИ ВИТРАТАМИ ЕНЕРГІЇ**

05.15.06 – Розробка нафтових та газових родовищ

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Івано-Франківськ – 2011

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

**Науковий консультант:**

член-кореспондент НАНУ, доктор технічних наук, професор **Крижанівський Євстахій Іванович**, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, ректор

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Векерик Василь Іванович**, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри теоретичної механіки

доктор технічних наук, професор **Кожевников Анатолій Олександрович**, Національний гірничий університет (м. Дніпропетровськ), професор кафедри техніки розвідки родовищ корисних копалин

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, **Бондаренко Микола Олександрович**, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (м. Київ), завідувач лабораторії і керівник науково-технічного центру

Захист відбудеться **"9" грудня 2011** р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.02 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

Автореферат розісланий **"7" листопада 2011** р.

**Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради**



**Ковбасюк І. М.**



an2230

## АГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**теми.** Сучасні темпи економічного, науково-технічного та у людства зумовили різке підвищення попиту на нафту та газ і збільшили об'єми їх споживання. Першочергово освоювалися ті родовища, на яких в найкоротші терміни розгорталися бурові роботи і розпочиналося видобування вуглеводнів із продуктивних покладів з максимальною віддачею. Це поступово призвело до зростання кількості розроблених і вичерпаних родовищ. З часом їх кількість збільшилася, та зросли глибини залягання нафти і газу. Необхідність розгортання бурових робіт постала в рекреаційних зонах, морських акваторіях, зонах континентального шельфу, на родовищах скупчення покладів вугільного і сланцевого газу. При цьому основним шляхом вирішення проблем, пов'язаних із їх розробкою, є буріння скерованих свердловин.

Буріння свердловини є одним із найбільш енерговитратних етапів із циклу її будівництва. При цьому основними процесами, які впливають на якість спорудження і на енергетичні витрати, є дотримання заданої траєкторії, передача максимальної енергії по бурильній колоні до долота, ефективне промивання вибою від шламу і його винесення на устя.

Досліджували основні технологічні процеси буріння скерованих свердловин складних профілів такі вчені, як Аветисян Н. Г., Александров М. М., Белоруссов В. О., Векерик В. І., Гулізаде М. П., Григулецький В. Г., Григорян Н. А., Гасанов Г. Г., Дверій В. П., Епштейн Е. Ф., Калінін А. Г., Кауфман Л. Я., Кулієв В. Т., Куліков В. В., Мирзаджанзаде А. Х., Мислюк М. А., Мойшин В. М., Поваліхін А. С., Сароян А. Є., Степюха Е. І., Федоров В. С., Хакімов Л. З., Яремійчук Р. С., Ясов В. Г. та інші.

Основними критеріями, які ставилися науковцями при вдосконаленні існуючих і розробленні нових технічних засобів бурового і енергетичного обладнання та технології буріння, були збільшення рейсової швидкості і зменшення собівартості метра проходки. В результаті нафтогазовидобувна промисловість отримала енергоємні техніку та технології буріння скерованих свердловин, для яких коефіцієнт корисної енергії при передачі по бурильній колоні і буровому розчині до долота у вертикальних свердловинах не перевищував 15%, а в скерованих – 10%. Саме це і обумовило необхідність розроблення ефективних методів управління процесами буріння і промивання скерованих свердловин з урахуванням енергетичних витрат, що і визначає актуальність проблеми дослідження. На її реалізацію поставлено наукові засади підвищення коефіцієнта корисної дії при передачі енергії до долота для ефективного буріння і промивання скерованих свердловин та зменшення сумарних енергетичних втрат процесу їх спорудження. Це дозволить підвищити якість проведення скерованих свердловин, зменшити вартість їх будівництва, збільшити обсяги видобування нафти і газу та сприятиме підвищенню енергетичної безпеки держави.

an 2229 - an 2230

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності до програм науково-дослідних робіт за договорами: Д – 7 П МОН України “Наукове обґрунтування створення мобільних установок й інструменту для буріння та ремонту свердловин вантажопідйомністю до 1470 кН” (реєстр. № 0101U001667); Д-9/04 П МОН України “Розроблення нових технологій подовження ресурсу та підвищення ефективності роботи нафтогазового обладнання” (реєстр. № 0104U004087); НДР 199/2002 “Розроблення та впровадження СТП по вибору КНБК для буріння похило-спрямованих та горизонтальних свердловин” ДАТ “Чорноморнафтогаз” (реєстр. № 0102U002997); НДР 259/2005 “Забезпечення проектного профілю похило-скерованих свердловин в умовах жолобо- і кавернуотворення” ДАТ “Чорноморнафтогаз” (реєстр. № 0105U007557); Д-1-07-Ф МОН України “Дослідження нових енергоресурсозберігаючих, екологічнобезпечних технологій видобування та транспортування вуглеводнів” (реєстр. № 0107U001558); GR/F 27/0055 МОН України “Оптимізація глибинного бурового обладнання та технології буріння скерованих свердловин для освоєння важкодоступних нафтогазових покладів шляхом оцінки енергетичних витрат” (реєстр. № РК 0110U002629); Д-8-10-Ф МОН України “Удосконалення наукових основ управління технологічними процесами видобування та транспортування нафти і газу з мінімальними енерговитратами” (реєстр. № 0110U000145).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розроблення ефективних методів управління процесом буріння і промивання скерованих свердловин з урахуванням енергетичних витрат.

Поставлена мета досягається шляхом вирішення таких завдань:

1. Аналіз чинників, які впливають на енергетичні витрати при бурінні скерованих свердловин.
2. Поглиблене дослідження роботи бурильного інструменту в стовбурі свердловини для вдосконалення методів його проектування з урахуванням енергетичних витрат.
3. Розвиток наукових основ вибору конструкцій і режимів експлуатації бурильної колони для якісного буріння скерованих свердловин з урахуванням енергетичних витрат.
4. Розвиток наукових основ і розроблення засад енергоефективного промивання скерованих свердловин.
5. Лабораторна та дослідно-промислова перевірка основних результатів наукових досліджень.
6. Розроблення та впровадження у виробництво ефективних методів управління процесом буріння і промивання скерованих свердловин з урахуванням енерговитрат.

*Об'єкт дослідження:* технологічні процеси буріння скерованої свердловини.

*Предмет дослідження:* енергетичні витрати технологічних процесів при бурінні скерованої свердловини.

*Методи дослідження.* При вирішенні сформульованих завдань дослідження в дисертаційній роботі використано методи математичного і комп'ютерного моделювання, теорії пружності, гідроаеромеханіки, програмування і статистики, експериментальні дослідження в лабораторних і промислових умовах. Основні положення дисертації мають наукову новизну та практичну цінність, а сформульовані висновки і рекомендації є науково-обґрунтованими з використанням аналітичних методів та апробовані експериментально в лабораторних і промислових умовах.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Розроблено нові аналітичні методи розрахунку сил притискання долота і опорно-центрувальних елементів (ОЦЕ) неорієнтованих компоновок низу бурильної колони (КНБК) до стінок скерованої свердловини із врахуванням в їх математичних моделях величини згинального моменту, обумовленого деформацією стиснутої частини бурильної колони, розташованої над компоновками низу. Їх застосування сприяє уточненню величини бокового відхиляючого зусилля на долоті і реакцій на ОЦЕ, чим обумовлює підвищення якості буріння скерованих свердловин.
2. Розроблено нові науково-практичні підходи до проектування неорієнтованих КНБК для буріння скерованих свердловин із зменшеними енергетичними витратами шляхом використання спеціальних пристроїв, конструкції яких захищені охоронними документами. Їх застосування дозволяє проектувати і корегувати конструкції КНБК для управління траєкторією скерованих свердловин із мінімальними витратами енергії на ерозійне руйнування їх стінок та виконання спуско-підймальних операцій.
3. Вдосконалено методи розрахунку енергетичних витрат під час поглиблення вибою і формуванні стінки свердловини буровими долотами різних конструкцій. Запропоновано науково-практичний підхід для проектування конструкцій енергоефективного породоруйнівного інструменту на основі прогнозованої інформації про величину механічної швидкості буріння та енергетичні витрати на подолання гідравлічного опору в насадках долота та механічного опору при руйнуванні гірської породи на вибої і формуванні стінки свердловини.
4. Дістали подальший розвиток методи розрахунку сил опору осевого переміщення і обертання бурильної колони в стовбурі свердловини будь-якої кривизни із врахуванням зміни поздовжньої осевої сили внаслідок фрикційного тертя і адгезійного прилипання металу труб до фільтраційної кірки. Їх застосування дозволяє підвищити передачу енергії по бурильній колоні до долота для інтенсивнішого руйнування гірської породи вибою свердловини і формування її стінки.
5. Вдосконалено методи проектування продуктивності бурових насосів для зменшення енергетичних витрат під час промивання скерованих свердловин. Їх застосування дозволяє враховувати наближене до реальних умов ексцентричне розташування бурильної колони в стовбурі свердловини будь-якої кривизни, її обертання та явище налипання шламу на фільтраційну кірку і утворення застійної зони бурового розчину в кільцевому просторі.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Розроблено методи оцінки енергетичних витрат при поглибленні вибою буровими долотами, обертанні бурильної колони в стовбурі скерованої свердловини і її промиванні.
2. Розроблено методи проектування і вибору конструкцій неорієнтованих КНБК для зменшення енергетичних витрат на їх обертання та осьове переміщення у процесі буріння скерованих свердловин.
3. Вдосконалено наукові основи управління процесом промивання скерованих свердловин із зменшеною продуктивністю бурових насосів.
4. Сформовано науково-обґрунтований підхід до вибору конструкцій бурових доліт та їх промивальних систем для підвищення техніко-економічних показників і якості буріння скерованих свердловин в умовах мінімальних енергетичних витрат.
5. Розроблено і запатентовано конструкції пристроїв як складових елементів неорієнтованих КНБК для підвищення енергоефективності і якості буріння скерованих свердловин.
6. Розроблено і апробовано в промислових умовах науково-практичний підхід для вдосконалення конструкцій КНБК шляхом врахування реальної величини згинального моменту в математичних моделях компоновок, визначеного за допомогою спеціально розробленого пристрою, конструкцію якого захищено патентом України.

Впроваджено у виробництво: методику вибору оптимальної подачі бурового насоса для буріння свердловин та методику розрахунку енерговитрат процесу буріння роторним способом нафтових і газових свердловин в ПАТ «ДАТ Чорноморнафтогаз» і ТзОВ «Газінвест»; інструкцію на визначення енергетичних витрат у процесі буріння скерованих нафтогазових свердловин; технічні рекомендації та комп'ютерну програму проектування КНБК з урахуванням жолобів і каверн в свердловині в ПАТ «ДАТ Чорноморнафтогаз»; технічні рекомендації з вибору енергоефективних неорієнтованих КНБК у ТзОВ «Газінвест».

**Особистий внесок здобувача.** Із наукових праць, які опубліковані автором у співавторстві, на захист винесено їх наукові положення, розроблені особисто дисертантом. Це, зокрема, розроблення методики розрахунку статичних форм рівноваги неорієнтованих КНБК у стовбурі свердловини будь-якої кривизни і визначення впливу основних техніко-технологічних чинників на сили притискання центраторів до стінок гірничої виробки [1], де особистий внесок здобувача становить 60%; розроблення методики розрахунку енергетичних витрат на фрезування стінок свердловини центраторами [2], де особистий внесок здобувача становить 40%; формування механізму фрезування стінок свердловини елементами неорієнтованих КНБК [3], де особистий внесок здобувача становить 40%; розроблення методики розрахунку контактних зон бурильної колони зі стіною свердловини та фільтраційною кіркою на ній [4], де особистий внесок здобувача становить 60%; розроблення методики проектування продуктивності бурового

насоса за механічною швидкістю буріння [5], де особистий внесок здобувача становить 60%; проведення аналізу промислового матеріалу і прогнозування продуктивності бурового насоса [6], де особистий внесок здобувача становить 70%; розроблення методики і проведення оцінки енергетичних витрат на деформацію та тертя бурильної колони у вертикальному стовбурі свердловини [7], де особистий внесок здобувача становить 50%; систематизація енергетичних витрат у різних технологічних процесах при бурінні свердловини і чинники, що впливають на них [8], де особистий внесок здобувача становить 60%; схематизація енергетичних витрат при бурінні свердловини різними способами [9], де особистий внесок здобувача становить 60%; обчислення енергетичних витрат у процесі буріння свердловини різними способами [10], де особистий внесок здобувача становить 60%; розроблення методики проектування і вибору продуктивності бурильної колони для різних техніко-технологічних параметрів буріння [11], де особистий внесок здобувача становить 40%; розроблення підходу до практичної оцінки навантаженості бурильної колони в наддолотній частині [12], де особистий внесок здобувача становить 15%; розроблення аналітичної методики оцінки навантаженості бурильної колони за результатами вимірювань в процесі буріння свердловини [13], де особистий внесок здобувача становить 40%; розроблення практичного підходу до вдосконалення конструкцій неорієнтованих компоновок за результатами вимірювань в процесі буріння свердловини [14], де особистий внесок здобувача становить 50%; розроблення методики оцінки енергоємності роботи бурових доліт різних конструкцій [15], де особистий внесок здобувача становить 50%; розроблення методики оцінки енергоємності роботи неорієнтованих компоновок різних конструкцій [16], де особистий внесок здобувача становить 25%; розроблення методики розрахунку енерговитрат на подолання опору осьового переміщення неорієнтованих компоновок у стовбурі свердловини [17], де особистий внесок здобувача становить 40%; розроблення методики розрахунку енерговитрат на подолання опору при обертанні неорієнтованих компоновок у стовбурі свердловини [18], де особистий внесок здобувача становить 30%; розширення можливостей неорієнтованих компоновок у плані зниження енерговитрат на їх роботу [19], де особистий внесок здобувача становить 40%; розроблення принципу роботи пристроїв і шляхів їх практичного використання у процесі буріння скерованих свердловин [20-22], де особистий внесок здобувача становить 25-30%; розроблення і обґрунтування механізму защемлення центраторів у свердловині для реалізації в математичній моделі КНБК і можливість його недопущення при використанні спеціального пристрою [23], де особистий внесок здобувача становить 30%; розроблення математичної моделі розрахунку енерговитрат під час обертання бурильної колони в буровому розчині скерованої свердловини [24], де особистий внесок здобувача становить 30%.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати та положення дисертації доповідались і обговорювались на 8-ій міжнародній науково-практичній

конференції “Нафта і газ України 2004” (м. Судак, 2004); 2-й міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених “Проблеми енергоефективності в нафтогазовому комплексі” (м. Гурзуф, 2007); міжнародній науково-технічній конференції “Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці”, “ІФНТУНГ – 40” (м. Івано-Франківськ, 2007); міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених “Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії” (м. Івано-Франківськ, 2008); міжнародній науково-технічній конференції “Геопетроль–2008” “Наука, техніка і технологія в розвідці і видобуванні вуглеводнів” (м. Закопане, Польща, 2008); міжнародній науково-практичній конференції “Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2008” (м. Одеса, 2008); міжнародному симпозиумі “Mineral resources and environment engineering” (м. Бая Маре, Румунія, 2008); міжнародній науково-практичній конференції “Carpatian euroregion specialists in industrial systems” (м. Бая Маре, Румунія, 2008); XII і XIII міжнародних конференціях “Породоразрушающий и металорежущий инструмент – техника и технология его изготовления и применения” (смт. Морське, АР Крим, 2009-2010); міжнародній науково-технічній конференції “East meets west” (м. Краків, Польща, 2010); I-й міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених “Трансфер технологій. Від ідеї до прибутку” (м. Дніпропетровськ, 2010).

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 36 наукових робіт, з яких 26 статей у фахових виданнях України, в тому числі 12 праць є одноосібними; отримано 4 патенти України.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 283 найменування на 31 сторінках та 15 додатків на 35 сторінках. Робота містить 122 рисунки (1 – на окремій сторінці), та 21 таблиця (2 – на окремій сторінці). Загальний обсяг дисертації – 338 сторінок, з них основного тексту – 272 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання та виділено об’єкт, предмет і методи досліджень, доведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, подано перелік місць апробації роботи.

У **першому розділі** досліджено сучасний стан проблем буріння скерованих свердловин. На основі проведеного аналізу літературних джерел і узагальнення виробничих спостережень розкрито суть основних проблем буріння скерованих свердловин і намічено шляхи їх вирішення. При цьому встановлено основні чинники, які визначають енергетичні витрати таких процесів, як промивання скерованої свердловини, передача енергії по бурильній колоні до долота і його робота під час поглиблення вибою та формування стінки за допомогою КНБК.



При управлінні траєкторією буріння скерованих свердловин найважливіше значення відіграють КНБК, проте їх робота в свердловині призводить до ерозійного руйнування стінок свердловини, зношення ОЦЕ, зниження показників стабільної роботи компоновки і навіть їх заклинювання. Це погіршує керованість КНБК у стовбурі скерованої свердловини і призводить до збільшення витрат енергії на роботу бурильної колони і процес буріння загалом.

Розташована вище КНБК бурильна колона у процесі буріння скерованих свердловин є ланкою передачі енергії від привода бурової установки до долота. Через малі відносно довжини стовбура свердловини поперечні розміри бурильна колона втрачає стійкість під впливом навантажень, що діють на неї. Внаслідок притискання елементів БК до стінок свердловини виникають сили тертя, на подолання яких витрачається енергія, що подається силовим приводом бурової установки для роботи долота на вибої. Окрім того, внаслідок ексцентричного розташування труб бурильної колони в стовбурі свердловини змінюється форма поперечного перерізу кільцевого простору, що впливає на ефективність і енергетичні витрати процесу промивання скерованої свердловини.

Основна частина енергії, яка подається по бурильній колоні, витрачається на подолання сил опору осевого переміщення й обертання трубної системи в стовбурі свердловини та гідравлічного опору в процесі її промивання. До долота потрапляє в кілька разів менше енергії, ніж підводиться до бурильної колони на усті свердловини. А зниження ефективності передачі долоту необхідної для руйнування гірської породи енергії, призводить до зростання енерговитрат і якості буріння скерованої свердловини.

Загальноприйнята стратегія промивання скерованих свердловин зорієнтована на використання завищених значень продуктивності бурових насосів, вибраної за такими критеріями: швидкість піднімання шламу по кільцевому простору стовбура свердловини, максимальна гідравлічна потужність на долоті і реалізація гідромоніторного ефекту.

В практиці буріння скерованих свердловин через технічну недосконалість і морально застаріле бурове обладнання використовують суттєво завищені і необґрунтовані з точки зору енерговитрат значення продуктивності бурових насосів. При змінній механічній швидкості проходки в одному й тому інтервалі вони залишаються постійними і стають причиною перевитрат енергії, а в нестійких гірських породах ще й передумовою розмивання стінок свердловини і зниження якості їх буріння.

Проведений аналіз засвідчив, що на сьогодні не існує дієвих методів управління процесом буріння і промивання скерованих свердловин з урахуванням енергетичних витрат. За умови забезпечення високої якості буріння скерованих свердловин з максимальними показниками рейсової і механічної швидкості та мінімальними значеннями собівартості метра проходки питання розроблення таких методів має наукову і практичну цінність.

У другому розділі подаються результати теоретичних досліджень роботи бурильного інструменту в стовбурі скерованої свердловини з метою вдосконалення методів його проектування з урахуванням енергетичних витрат. Основну увагу у ході дослідження зосереджено на вивченні природи і чинників енергетичних витрат під час роботи неорієнтованих КНБК із різною кількістю ОЦЕ і бурових доліт при руйнуванні вибою і формуванні стінки скерованої свердловини. Дослідження спрямовані на розроблення ефективних методів проектування конструкцій неорієнтованих КНБК із різною кількістю ОЦЕ за умови найменшої витрати енергії на їх обертання і осьове переміщення в стовбурі скерованої свердловини, а також бурових доліт з найвищими показниками відробки.

На основі аналізу результатів теоретичних і експериментальних досліджень було запропоновано вдосконалений метод проектування конструкцій безопорних, одноопорних і двоопорних неорієнтованих КНБК з використанням математичної моделі на основі розв'язку диференційних рівнянь їх пружної осі. Особливістю даного методу є врахування згинального моменту в граничних умовах математичних моделей КНБК, у їх верхній частині, зумовленого: в першому випадку (1) – викривленням бурильної колони над компоновкою, в другому (2) – кривизною стовбура свердловини:

$$M_n(l_n) = \frac{-EI_n}{R_{\pi\kappa}}; \quad (1)$$

$$M_n(l_n) = \frac{-EI_n}{R_{CB}}, \quad (2)$$

де  $M_n(l_n)$  - величина згинального моменту у верхній частині КНБК;  $l_n$  - довжина останньої ділянки КНБК;  $EI_n$  - жорсткість на згин останньої ділянки КНБК, яка контактує зі стінкою свердловини;  $R_{\pi\kappa}$  - радіус півхвилі згину елемента КНБК у верхній її частині, що контактує зі стінкою свердловини;  $R_{CB}$  - радіус викривлення свердловини в інтервалі розташування КНБК.

За результатами теоретичних досліджень встановлено, що незалежно від кількості ОЦЕ врахування згинального моменту в математичних моделях неорієнтованих КНБК, визначеного через радіус викривлення півхвилі згину бурильної колони, зумовлює збільшення відхиляючої сили на долоті від 5% до 83% і реакцій на центраторах від 10% до 70%, особливо при  $(500 < R_{\pi\kappa} < 4000)$  м. Крім того, кривизна стовбура свердловини спричиняє зміну величини відхиляючої сили на долоті і реакцій на ОЦЕ більш ніж на 100% при  $(0 < R_{CB} < 10^4)$  м.

Подальші дослідження і аналіз отриманих результатів довели, що саме відхиляюча сила на долоті і реакції на ОЦЕ є основним чинником енергетичних витрат, які проявляються у зменшенні крутного моменту (3) і осьового навантаження на долоті (4) і визначаються за наступними залежностями:

$$E_{КНБК}^{ОБ} = \left[ \pi D_{ОЦЕ} \mu \left( \sum_{i=1}^n R_i + Q \right) + 2\pi \sum_{i=1}^n M_i \right] \frac{h_{БВР}}{V_{МЭК}}, \quad (3)$$

$$E_{КНБК}^{ОС.ОП} = \sum_{i=1}^n F_{ОС.ОП} h_{БВР}, \quad (4)$$

де  $D_{ОЦЕ}$  і  $R_i$  - діаметр ОЦЕ і реакції на ньому;  $\mu$  - коефіцієнт тертя металу труб до стінок свердловини;  $Q$  - відхиляюче зусилля на долоті;  $M_i$ ,  $n$  - втрати крутного моменту на фрезкування стінки свердловини ОЦЕ і їх кількість в КНБК;  $F_{ОС.ОП}$  - сила опору осевого переміщення КНБК, обумовлена вдавлюванням кожного із ОЦЕ в гірську породу стінки свердловини;  $h_{БВР}$ ,  $V_{МЭК}$  - довжина інтервалу буріння і механічна швидкість його проходки.

Встановлено, що через фрезкування стінки свердловини використання кожного наступного ОЦЕ підвищує витрати енергії на обертання неорієнтованої КНБК приблизно на 6%. Під час осевого переміщення одноопорних КНБК у м'яких породах втрати енергії зростають на 10%, а в твердих – 80%, особливо для компоновок з кількістю ОЦЕ більше трьох.

При цьому основними чинниками, які впливають на енергетичні витрати при роботі неорієнтованих компоновок у стовбурі скерованої свердловини, є зенітний кут в інтервалі буріння; конструктивні параметри компоновок низу бурильної колони; фізико-механічні властивості гірської породи, а також адгезійні властивості фільтраційної кірки.

Як показали результати теоретичних досліджень, підведені до долота осеве навантаження і крутий момент витрачаються в основному на руйнування гірської породи вибою і фрезування стінки свердловини. Основними техніко-технологічними чинниками витрат механічної енергії при бурінні скерованих свердловин лопатевими і шарошковими долотами є осеве навантаження та швидкість його обертання, діаметр, а також параметри роботи КНБК. Чинниками втрат гідравлічної енергії на долоті є особливості конструктивного виконання промивальних систем.

Згідно з аналізом результатів теоретичних досліджень втрат гідравлічної енергії в насадках доліт різних конструкцій встановлено, що центральне промивання є в десятки разів менш енерговитратним за гідромоніторне. Енергоефективним гідромоніторне очищення вибою може бути тільки в тому випадку, коли механічна швидкість буріння збільшується в 2 і більше разів відносно такої у доліт з центральним промиванням.

У третьому розділі подаються результати теоретичних досліджень енергопровідності бурильної колони, енергетичних витрат на подолання сил тертя при її обертанні і осевому переміщенні в стовбурі скерованої свердловини. В математичних моделях бурильної колони враховано особливості її конструкції,

взаємодію поверхонь тіла труб і бурильних замків із фільтраційною кіркою на стінках свердловини, умови в'язкого тертя колони труб під час їх обертання в буровому розчині.

Так, за результатами теоретичних досліджень було встановлено два чинники енергетичних витрат при роботі бурильної колони в скерованій свердловині. Перший – це контактування поверхні бурильної колони із фільтраційною кіркою по бурильних замках, а другий – по бурильних замках і тілу труби. З практики буріння скерованих свердловин перший чинник має постійний характер, а другий проявляється у викривлених інтервалах свердловини, в умовах осьового стискаючого та поперечного навантаження на бурильну колону за зенітних кутів близько  $90^{\circ}$ .

Встановлено, що зона контакту бурильних замків із фільтраційною кіркою становить від 7% до 32% площі їх поверхні (рис. 1). Найбільш вагомий вплив при цьому має товщина кірки і жолобоутворення на стінці свердловини, діаметром стовбура  $D_d$ .

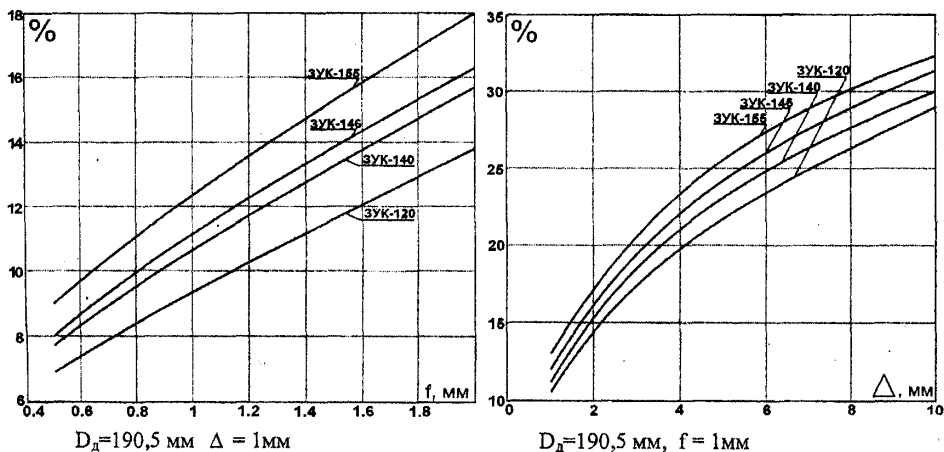


Рис. 1. Залежність площі контактування поверхні бурильних замків із фільтраційною кіркою від її товщини ( $f$ ) і глибини жолобоутворення на стінці свердловини ( $\Delta$ )

Для дослідження сил притискання елементів бурильної колони до стінок прямолінійного і викривленого інтервалів свердловини було запропоновано метод на основі розв'язку диференціальних рівнянь її пружної осі.

В математичній моделі описана конструкція бурильної колони із трьох труб з чотирма бурильними замками (рис. 2, а), які контактують із нижньою стінкою стовбура скерованої свердловини будь-якої кривизни. Тут на вісь бурильної колони діють поперечні ( $q$ ) і поздовжня сили ( $P$ ). В місці контактування бурильних замків

(діаметр  $D_{бз}$ ) і стінки свердловини діють реакції опор ( $R_i$ ), а також між ними виникають сили адгезійного і фрикційного тертя.

На першому етапі розрахунку з метою більш точного визначення характеру деформації трубної колони визначаються умови взаємодії тіла бурильної труби (діаметр  $d_{бт}$ ) зі стінкою свердловини по величині прогину пружної осі між другим і третім бурильними замками (як окреслено овалом на рис. 2, б).

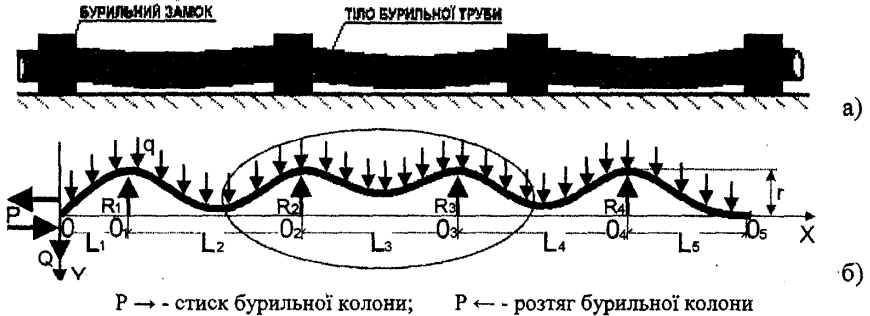


Рис. 2. Розрахункова схема бурильної колони у стовбурі скерованої свердловини

Після уточнення математичної моделі та зменшення кількості граничних умов зокрема на кінцях осі бурильної колони, переходимо до другого етапу розрахунку за уточненими схемами взаємодії бурильних замків і тіла труби зі стінкою свердловини (рис. 3, а і б).

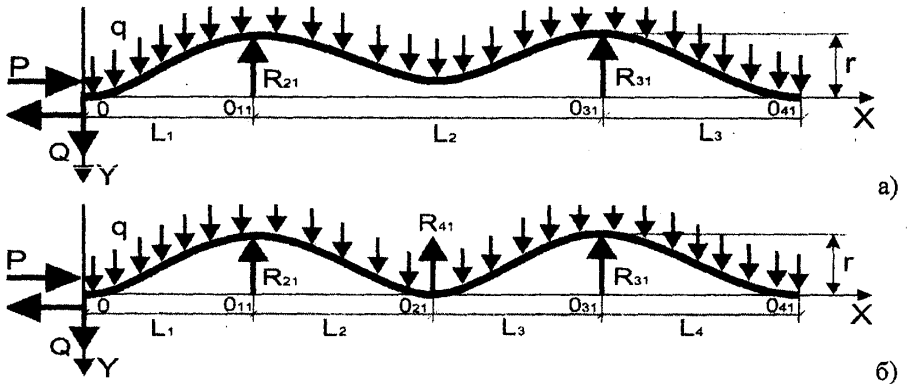


Рис. 3. Уточнені розрахункові схема бурильної колони у стовбурі свердловини

На другому етапі розрахунку за однією із розрахункових схем, зображених на рис. 3, для елемента бурильної колони (виділено овалом на рис. 2, б) визначаються сили  $R_{ii}$  (рис. 3) за довільного осьового навантаження ( $P$ ), ваги погонного метра ( $q$ ) і

радіального зазору між осями бурильної колони і свердловини ( $r$ ) за таких граничних умов:

$$\begin{cases} x_1 = 0 \Rightarrow y_1(0) = 0; y_1'(0) = \arccos[L_1/R_{CB}] \\ \left. \begin{matrix} x_{i+1} = 0 \\ x_i = L_i \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} y_i'(L_i) = y_{i+1}'(0) & y_i(L_i) = r & y_{i+1}(0) = r \end{matrix} \right. \\ x_n = L_n \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} y_n'(L_n) = \arccos[L_n/R_{CB}] & y_n(L_n) = 0 & y_n''(L_n) = 0 \end{matrix} \right. \end{cases} \quad (5)$$

В точках  $O$  і  $O_{41}$  -  $r=0$ ; в точках  $O_{11}$  і  $O_{31}$ :  $r = -(D_{БЗ} - d_{БТ})/2 \pm R_{CB}(1 - \cos[L_1/R_{CB}])$ ; в точці  $O_{21}$ :  $r = \pm R_{CB}(1 - \cos[(L_1 + L_2)/R_{CB}])$ .

Знак "+" приймається для розрахунку в інтервалі набору зенітного кута, а "-" - в інтервалі зменшення зенітного кута.

За результатами розрахунку для кожної наступної бурильної труби визначається площа контактування із фільтраційною кіркою  $S_K$ , сила опору її переміщення вздовж стовбура свердловини  $F_{OC.OP}$ :

$$F_{OC.OP} = q L \mu + A_{dg} S_K, \quad (6)$$

де  $L$  і  $S_K$  - довжина і площа контактування бурильних труб з фільтраційною кіркою;  $A_{dg}$  - міцність фільтраційної кірки на зсув.

Після встановлення величини  $F_{OC.OP}$  визначається зміна осьового навантаження  $P_{i+1}$ , яке діє на бурильну колону:

$$P_{i+1} = P_i - qL \cos(\alpha) - F_{OC.OP}, \quad (7)$$

де  $\alpha$  - зенітний кут свердловини в інтервалі розташування бурильної колони.

Момент опору при обертанні бурильної колони для однієї труби з врахуванням фрикційного і адгезійного тертя в стовбурі скерованої свердловини визначається з виразу:

$$M_i = (D_{БЗ}/2) [\mu(R_{21} + R_{31}) + A_{dg} S_{КБЗ}] + (d_{БТ}/2) [\mu R_{41} + A_{dg} S_{КБТ}], \quad (8)$$

де  $S_{КБЗ}$  і  $S_{КБТ}$  - площі контактування поверхні бурильного замка і тіла труб з фільтраційною кіркою.

Наявність бурового розчину в стовбурі свердловини впливає на енергетичні витрати при обертанні бурильної колони. Отримані аналітичні результати досліджень показали, що на обертання бурильної колони навколо осі свердловини в середовищі бурового розчину витрачається у декілька разів більша енергія, ніж на її обертання навколо власної осі. Причиною цього є більша сила притискання, яка обумовлена питомим навантаженням і визначається за наступною залежністю:

$$P_i(v) = (1/4) \rho_{БР} d_{БТ}^2 [2C_1 V_i^2(v) + C_2 \pi d_{БТ} a_i(v)], \quad (9)$$

де  $C_1$  і  $C_2$  - відповідно коефіцієнти швидкісного та інерційного опору при обтіканні бурильної колони в буровому розчині;  $V_i(v)$ ,  $a_i(v)$  - швидкість та доцент-

рове прискорення обтікання бурильної колони буровим розчином;  $\rho_{БР}$  - густина бурового розчину.

Одним із чинників втрати стійкості бурильної колони є її обертання в стовбурі скерованої свердловини, внаслідок чого збільшується площа контактування з фільтраційною кіркою, зростають сили тертя, що вимагає додаткового збільшення крутного моменту і енергетичних витрат на виконання даного процесу. Окрім того, тертя в опорі вертлюга і викривлення стовбура свердловини також обумовлюють необхідність додаткового збільшення крутного моменту для обертання бурильної колони, який з врахуванням вищезгаданих чинників визначається за формулою:

$$\Delta M_{\text{кр}} = \left[ \frac{-(M_{\text{ДОЛ}} + M_{\text{БК}} + M_{\text{ВЕРТ}}) + \sqrt{(M_{\text{ДОЛ}} + M_{\text{БК}} + M_{\text{ВЕРТ}})^2 + 2 GJ_{\text{БК}} \left( \frac{EI_{\text{БК}}}{R_{\text{БК}}^2} + \frac{P_{\text{ОС}}^2}{E S_{\text{БК}}} \right)}}{2} \right], \quad (10)$$

де  $M_{\text{ДОЛ}}$ ,  $M_{\text{БК}}$ ,  $M_{\text{ВЕРТ}}$  - відповідно момент опору на обертання долота на вибої свердловини, момент опору на подолання тертя бурильної колони до стінки свердловини і бурового розчину, момент тертя в опорі вертлюга;  $P_{\text{ОС}}$  - осьова сила, яка діє на бурильну колону;  $GJ_{\text{БК}}$  і  $S_{\text{БК}}$  - жорсткість бурильної колони на кручення і її поперечний переріз;  $E$  - модуль пружності металу тіла труб.

Встановлено, що для зменшення крутного моменту і енерговитрат на обертання бурильної колони у викривленому інтервалі свердловини необхідно використовувати легкосплавні бурильні труби та їх сталеві з'єднуючі елементи зі зниженою жорсткістю на згин і кручення, зменшуючи при цьому дію осьового навантаження і швидкість її обертання.

За результатами теоретичних досліджень розроблено і успішно апробовано в промислових умовах метод розрахунку енергетичних витрат при підйманні бурильної колони із скерованої свердловини. Перевитрати енергії при цьому склали більше ніж 100%, більша частина з яких пов'язана із часом роботи приводних двигунів бурової лебідки, зокрема під час опускання бурильної колони, згвинчування і розгвинчування різбових з'єднань труб. Основними шляхами зниження енергоємності спуско-підймальних операцій є зменшення часу на згвинчування і розгвинчування різбових з'єднань, додавання мастильних домішок до бурового розчину, використання легкосплавних бурильних труб.

**В четвертому розділі** подаються результати досліджень основних чинників енергетичних витрат процесу промивання скерованої свердловини та розроблення методів проєктування продуктивності бурового насоса для ефективного винесення шламу потоком бурового розчину.

За результатами теоретичних досліджень енергетичних витрат на подолання гідравлічних опорів в елементах бурильної колони і кільцевому просторі встановлено, що найменш енерговитратою є її комплектація трубами ТБН (рис. 4).

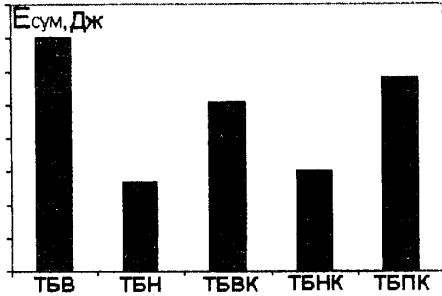


Рис. 4. Витрати гідравлічної енергії для різних типів бурових труб

Встановлено, що площа застійної зони бурового розчину для БТ 114 є у двічі більшою, ніж для БТ 127, а для БТ 140 – в 2,5 рази більша площа застійної зони бурового розчину і може сягати 33 % від загальної площі кільцевого простору. За таких умов зміни площі кільцевого перерізу повинно забезпечуватися якісне очищення свердловини і винесення шламу на устя.

За результатами теоретичних досліджень розроблено методику проектування продуктивності бурового насоса для забезпечення якісного транспортування шламу потоком бурового розчину по кільцевому простору з умовою запобігання його налипанню на стінку свердловини. Згідно з розробленою теорією частинка шламу піднімається по кільцевому простору свердловини під дією сил, схема розподілу яких зображена на рис. 5. Тут  $F_{\text{відц}}$  - відцентрова сила,  $F_{\text{доц}}$  - доцентрова сила,  $F_{\text{тер}}$  - сила тертя,  $F_{\text{оп}}$  - сила опору в'язкого середовища,  $F_{\text{тяж}}$  - сила тяжіння,  $F_{\text{Арх}}$  - сила Архімеда,  $F_{\text{під}}$  - сила, обумовлена відштовхуванням від бурової колони.

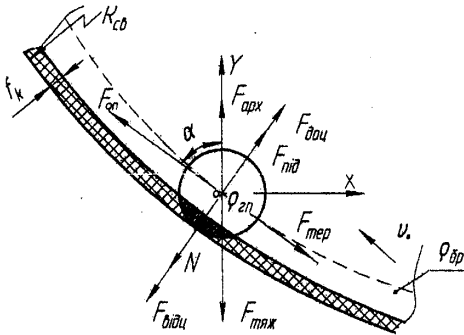


Рис. 5. Сили, що діють на частинку шламу в буровому розчині кільцевого простору викривленого стовбура свердловини

За результатами теоретичних досліджень було розроблено метод проектування продуктивності бурового насоса для видалення потоком бурового розчину частинки шламу із зони руйнування долотом вибою свердловини.

За цією теорією на частинку шламу на вибої свердловини діють  $F_1$  - вага частинки шламу;  $F_2$  - сила тертя частинки шламу до вибою свердловини;  $F_3$  - сила удару струмини бурового розчину по вибою свердловини;  $F_4$  - сила від дії гідростатичного тиску на вибої;  $F_5$  - сила

В основі проведених досліджень лежить необхідність врахування застійної зони бурового розчину в нижній частині кільцевого простору, що є причиною зміни форми і площі поперечного перерізу рухомого ядра потоку  $S_{\text{кп}}^*$ :

$$S_{\text{кп}}^* = (\pi/4)[D_{\text{св}}^2 - d_{\text{бт}}^2] - A_t, \quad (11)$$

де  $D_{\text{св}}$  - діаметр свердловини;  $A_t$  - площа поперечного перерізу застійної зони бурового розчину в кільцевому просторі стовбура свердловини.



бокового зміщення частинки шламу потоком бурового розчину;  $F_6$  - сила, обумовлена різницею швидкостей вище і нижче частинки;  $F_7$  - сила в'язкого тертя частинки шламу в буровому розчині;  $F_8$  - сила пластового тиску (рис. 6).

В результаті теоретичних досліджень було встановлено, що для вимивання з вибою свердловини частинок шламу розміром менше 10 мм продуктивність бурового насоса не повинна перевищувати 30 л/с, а для 10-14 мм – відповідно 8-40 л/с.

За результатами досліджень було встановлено основні чинники, які необхідно враховувати при виборі продуктивності бурових насосів з метою за безпечення процесу якісного промивання скерованої свердловини за мінімальних енергетичних витрат. До них відносяться: інтервал буріння (кондуктор, проміжні й експлуатаційна колони), його довжина та інтенсивність викривлення; діаметри долота і бурильної колони; тип промивальної системи долота; реологічні параметри бурових розчинів і густина гірської породи, дані про товщину і адгезійну міцність фільтраційної кірки на зсув.

Використовуючи вказані параметри, проектується продуктивності бурових насосів, і з двох значень вибирається більше. За величиною механічної швидкості буріння для будь-якого інтервалу, у відповідних техніко-технологічних і гірничо-геологічних умовах визначається об'ємна концентрація  $C$  шламу в буровому розчині кільцевого простору і проводиться корегування діючої продуктивності бурового насоса з умови, що  $2\% \leq C \leq 5\%$ .

Встановлено, що при бурінні свердловин долотами діаметром від 190,5 до 393,7 мм і більше за зміни механічної швидкості проходки від 1 до 22 м/год і об'ємної концентрації шламу в кільцевому просторі свердловини 2% продуктивність бурового насоса коливається в межах від 0.002 до 0.035 м<sup>3</sup>/с (рис. 7).

За результатами промислових досліджень було отримано практичне підтвердження використання завищених значень продуктивності бурового насоса, зокрема при бурінні свердловини Монастирчани №6. Для промивання цієї свердловини в інтервалі 1953-2252 м за механічної швидкості буріння близько 0.35 м/год продуктивність бурового насоса була встановлена на рівні 0,0184-0,0216 м<sup>3</sup>/сек. При цьому об'ємна концентрація шламу в кільцевому просторі свердловини не перевищувала 0,3% (при нормі від 2% до 5%), що зумовило майже чотириразову перевитрату енергії за практично незмінної механічної швидкості буріння.

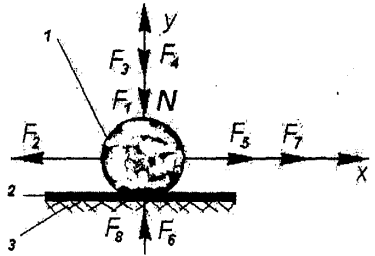


Рис. 6. Сили, що діють на частинку шламу на вибої свердловини:  
1 – частинка шламу; 2 – фільтраційна кірка;  
3 – стінка свердловини

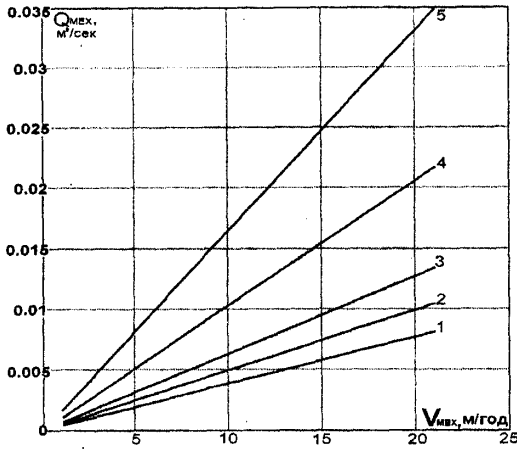


Рис. 7. Залежність продуктивності бурового насоса від механічної швидкості буріння при  $C=2\%$ :

- 1 –  $D_d=190,5$  мм; 2 –  $D_d=215,9$  мм; 3 –  $D_d=244,5$  мм;  
4 –  $D_d=311,0$  мм; 5 –  $D_d=393,7$  мм

колони в умовах прямолінійно-нахилоного і викривленого стовбурів скерованої свердловини на розроблених лабораторних стендах. З метою використання результатів досліджень, проведених на моделях бурильної колони, для її реальних типорозмірів було запропоновано метод переведення експериментальних значень в натурні величини. На прикладі реальних конструкцій бурильної колони кількісно і якісно підтверджено достовірність розроблених аналітичних методів.

Експериментальні дослідження холостого обертання розтягнутої частини бурильної колони у викривленій свердловині включали серію дослідів, які відповідають визначеним режимно-технологічним параметрам і кривизні свердловини. Отримані в результаті досліджень дані оброблено статистичними методами. Встановлено, що отримані експериментальні криві підтверджують теоретичні залежності зміни відхиляючої сили на долоті з коефіцієнтом кореляції 0.89-0.96.

Для оцінки сил притискання елементів неорієнтованих КНБК і бурильної колони вище неї до стінок свердловини було розроблено лабораторний стенд. За його допомогою визначено вплив викривлення стовбура свердловини і кривизни півхвиль бурильної колони на величини відхиляючого зусилля на долоті і сили притискання ОЦЕ та бурильних замків до стінок свердловини. Запис результатів досліджень проводився із використанням багатоканального аналого-цифрового перетворювача і персонального комп'ютера.

За результатами досліджень було розроблено двовимірні криві, що є залежностями зміни сили притискання ОЦЕ і бурильних замків до стінок свердловини. Встановленими величинами осьового навантаження на бурильну колону, радіальних зазорів на її елементах, зенітних кутів викривлення свердловини

Промислово апробацію розроблених наукових основ і засад енергоефективного промивання свердловин було проведено при бурінні свердловини Славецька №7 ТзОВ "Газінвест". Під час випробувань продуктивність бурового насоса було знижено на 13% відносно встановленої згідно з проектом. При цьому не лише зменшились енерговитрати, а й на 40% зросла механічна швидкість буріння.

П'ятий розділ присвячено розробленню методик та засобів експериментального дослідження енергетичних витрат процесів деформації та обертання бурильної

з коефіцієнтом кореляції 0.9-0.94 було підтверджено достовірність розроблених математичних методів розрахунку.

Промислова апробація методики розрахунку енергетичних витрат при бурінні була апробована на свердловині Славецька №7 глибиною 302 м. В результаті досліджень було встановлено, що потреби в енергії на її буріння склали близько 35,9 ГДж, з яких на виконання спуско-підймальних операцій – 492 МДж. Загалом перевитрати енергії склали 93 % (з яких 63 % – на процес буріння). Основними причинами при цьому слід вважати завищену проектну продуктивність бурового насоса; використання надпотужного бурового обладнання (зокрема бурового насоса); довготривале виконання спуско-підймальних операцій ( $\approx 45$  год.), при якому більша частина часу витрачається на допоміжні операції, що виконуються при працюючому двигуні бурової установки; використання гідромоніторних доліт.

**Шостий розділ** присвячено розробленню та впровадженню у виробництво науково-практичних методів і технічних засобів для підвищення якості буріння скерованих свердловин з мінімальними витратами енергії.

За результатами теоретичних досліджень було розроблено спосіб управління режимами буріння скерованих свердловин за зменшених витрат енергії шляхом використання керованого відхильника. Застосування цього способу розширює технологічні можливості безопорних неорієнтованих КНБК на базі вибійного двигуна, які проявляються в отриманні відхиляючого зусилля на долоті близько 15 кН.

Компоновка з керованим відхильником має прямолінійну форму, що не обмежує час і швидкість спуско-підймальних операцій, не спричиняє заклинювання бурильної і пошкодження обсадної колон. Після встановлення долота на вибій свердловини і розвантаження бурильної колони відбувається згин плечей відхильника на кут  $\beta$  від 0 до  $3^\circ$ , і функціональні можливості компоновки змінюються.

Для розрахунку відхиляючого зусилля на долоті і проектування конструкцій КНБК з керованим відхильником розроблено математичну модель, проведено розрахунки і встановлено, що в залежності від кута згину його плечей суттєво змінюється відхиляюча сила на долоті за будь-якої величини зенітного кута свердловини (рис. 8). Найефективнішим є використання керованого відхильника в безопорних компоновках при розширенні

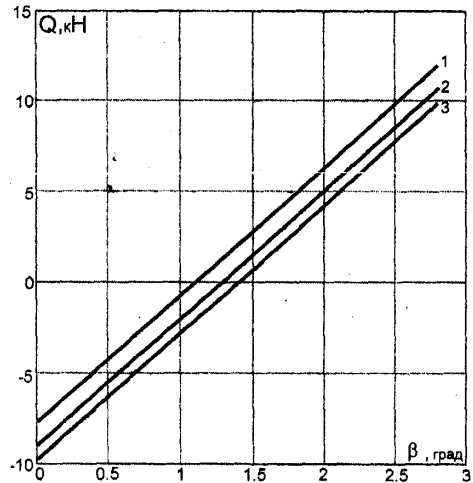


Рис. 8. Залежність відхиляючої сили на долоті від кута скривлення осей керованого відхильника:

$$1 - \alpha = 45^\circ \quad 2 - \alpha = 60^\circ \quad 3 - \alpha = 75^\circ$$

діаметра стовбура свердловини, що проявляється в стабільній величині відхиляючого зусилля на долоті.

Зі збільшення коефіцієнта кавернозності від 1 до 1,2 для КНБК з керованим відхильником бокове зусилля на долоті зменшується на 11-35%, що для компоновок з ОЦЕ відбивається в зміні функціонального призначення компоновок і зводиться до втрати параметрів проектного профілю свердловини.

Для забезпечення стабільної роботи неорієнтованих КНБК з вибійним двигуном в умовах ступінчастої внаслідок ерозійного руйнування та зносу по діаметру ОЦЕ стінки свердловини запропоновано його вдосконалениу конструкцію.

Технологічною перевагою вдосконаленого ОЦЕ є можливість зміщення радіального зазору осі КНБК вище осі похило-прямолинійного і горизонтального стовбурів свердловини на 1-5 мм безпосередньо після того, як колону опущено на вибій. Після закінчення додання та зняття навантаження на долоті, ОЦЕ під власною вагою робочої частини займає стійке положення, яке відповідає нульовому радіальному зазору і не перешкоджає виконанню спуско-підймальних операцій. Це для типових центруючих пристроїв є неможливим.

Математична модель КНБК з вибійним двигуном і даним центруючим пристроєм реалізується шляхом розв'язання диференціальних рівнянь. За результатами теоретичних досліджень встановлено, що використання в похило-прямолинійних і горизонтальних стовбурах свердловини ОЦЕ зі зміщенням осей КНБК вище осі виробки на  $r=(0,5-3,5)$  мм забезпечує збільшення відхиляючого зусилля на долоті від 2 до 24 кН (рис. 9).

За рахунок цього неорієнтована одноопорна КНБК може працювати як відхильовач і використовуватися при зміні зенітного чи азимутального кутів викривлення стовбура скерованої свердловини.

При управлінні роботою неорієнтованих КНБК в процесі буріння скерованих свердловин важливе значення має відповідність її технологічних можливостей реальним умовам роботи. Під час проектування конструкції КНБК за основу беруться граничні умови, які моделюють умови її стійкості в стовбурі свердловини. Для покращення технологічних можливостей КНБК не обхідним є наближення граничних умов її математичних моделей, які використовуються на етапі проектування, до умов їх роботи в свердловині.

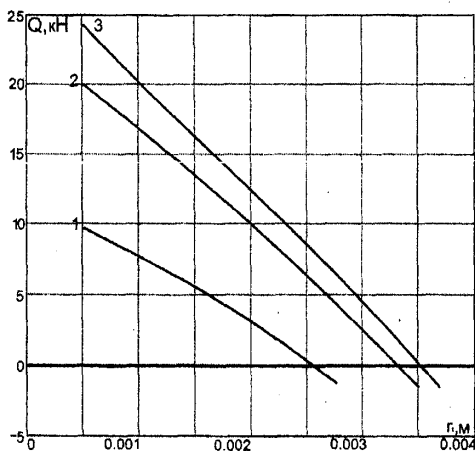


Рис. 9. Залежність відхиляючої сили на долоті від радіального зазору  $r$  на ОЦЕ при зміні зенітного кута  $\alpha$ :  
1 -  $\alpha = 10^\circ$ ; 2 -  $\alpha = 45^\circ$ ; 3 -  $\alpha = 75^\circ$

Інструментом для цього може бути використання величини згинального моменту, визначеного в будь-якому перерізі компоновки безпосередньо в свердловині. За його величиною з використанням відповідних розрахункових методів можна проводити корегування конструкції компоновки і режимів її експлуатації.

Для вимірювання і реєстрації величини згинального моменту в будь-якому перерізі КНБК було розроблено і виготовлено конструкцію спеціального пристрою. При довжині 1,1 м і зовнішньому діаметрі 0,195 м даний пристрій можна використовувати з долотами діаметрами 244,5 мм і 295,3 мм за максимального крутного (28 кН) і згинального (226 кН) моментів. Для налаштування і визначення робочих характеристик пристрою проведено його лабораторне випробування, за результатами якого побудовано тарувальну криву, розроблено методики інтерпретації результатів вимірювань і корегування конструкцій для різних КНБК.

Пристрій і методики корегування конструкцій КНБК успішно апробовані на свердловині Микитинецька №1 ТзОВ «Газінвест» на глибині буріння 274 м. Пристрій було включено до складу КНБК (долото діаметром 295,3 мм, ОБТ32-178 – 6 м; експериментальний пристрій; ОБТ32-178). В момент проведення випробування зенітний кут стовбура свердловини становив  $5^{\circ}$ , густина бурового розчину –  $1220 \text{ кг/м}^3$ , осьове навантаження на долото – 100 кН (за індикатором ваги).

За результатами проведених випробувань величина згинального моменту становила 4645 Нм на певній віддалі від долота. Відповідно реальне значення осьового навантаження на долоті склало 89 кН (менше від встановленого на 11%), а відхиляюча сила на долоті – 305 кН (при проектній близько 600 Н). Окрім того, було доведено, що даний пристрій є надійним технічним засобом, який дозволяє корегувати конструктивні параметри КНБК, забезпечує уточнення величини осьового навантаження на долото і реакції на ОЦЕ.

З практики буріння скерованих свердловин із застосуванням неорієнтованих КНБК відомі моменти їх заклинювання в стовбурі свердловини, що відбувається в умовах контактування діагонально протилежних частин робочої поверхні опор з верхньою і нижньою стінками гірничої виробки. При цьому мінімізується вплив розташованої вище защемленої частини компоновки на бокову і осьову сили на долоті, реакції на ОЦЕ (рис. 10).

За результатами досліджень підтверджено, що защемлення ОЦЕ в стовбурі свердловини, не залежить від осьового навантаження на долоті й діаметра опори (214 і 215,9 мм) і стає причиною суттєвої зміни відхиляючого зусилля на долоті Q (понад 30%) та збільшення реакції R – (до 15%).

Для недопущення защемлення неорієнтованих КНБК слід враховувати умови контактування ОЦЕ зі стінками свердловини і вдосконалювати їх конструктивні параметри. Перша умова реалізується в аналітичній моделі компоновки, а друга – шляхом розроблення конструкції спеціального шарнірного пересувного центратора, який обмежує защемлення ОЦЕ в свердловині.

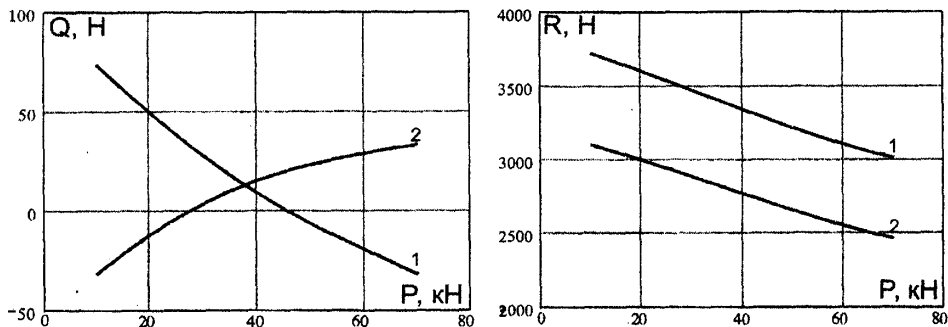


Рис. 10. Зміна відхиляючого зусилля на долоті і реакції на ОЦЕ від осьового навантаження:

1 – враховується заземлення ОЦЕ в стовбурі свердловини;

2 – заземлення ОЦЕ в стовбурі свердловини не враховано

Конструкція даного пристрою забезпечує оперативну заміну КНБК безпосередньо на буровій без застосування спеціального обладнання, володіє високою зносостійкістю в гірських породах з різними фізико-механічними властивостями, майже не впливає на ерозійне руйнування стінки свердловини, не створює бар'єру для затримування шламу в свердловині та має багаторазове використання.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті досліджень отримано нове вирішення науково-технічної проблеми буріння скерованих свердловин на основі аналізу енерговитрат і сформовано наступні висновки.

1. За результатами аналізу наукових досліджень, практичного вітчизняного і зарубіжного досвіду встановлено основні чинники, які визначають якість буріння скерованих свердловин з врахуванням енергетичних витрат на процеси промивання свердловини, обертання бурильної колони, роботу долота під час руйнування гірської породи та роботу КНБК при управлінні траєкторією буріння.

2. Розроблено методи і проведено оцінку розподілу енергетичних витрат, пов'язаних із роботою безпорних, одно- і двоопорних конструкцій неорієнтованих КНБК в умовах прямолінійного і викривленого, гладкого та ступінчастого стовбурів свердловини. Так за рахунок фрезування ОЦЕ стінки свердловини збільшуються витрати енергії на обертання низу бурильної колони (близько 6% на кожну опору). Під час осьового переміщення неорієнтованих КНБК у твердих гірських породах витрати енергії збільшуються на 10–80%. Визначальними чинниками, які впливають на витрати енергії при роботі неорієнтованих КНБК, є сили притискування долота і опор до стінок свердловини. Доведено, що на їх величину суттєво впливає радіус

викривлення бурильної колони у верхній частині КНБК, особливо при  $(600 < R_{\text{кр}} < 6000) \text{ м}$ , який зумовлює зміну відхиляючої сили на долоті від 5% до 83% і реакції на ОЦЕ від 10% до 70%. Радіус викривлення стовбура свердловини  $(0 < R_{\text{св}} < 10^4) \text{ м}$  її криволінійних ділянок змінює відхиляючу силу на долоті і реакції на ОЦЕ більш ніж на 100%.

3. Розроблено методи розрахунку енерговитрат на обертання та деформацію бурильної колони і її піднімання із свердловини будь-якої кривизни. В результаті аналітичних та експериментальних досліджень встановлено залежності енерговитрат при обертанні бурильної колони і її осьовому переміщенні з врахуванням адгезійного прилипання труб до фільтраційної кірки під дією згинального моменту, обумовленого кривизною свердловини, осьовим стискаючим, розтягаючим і поперечним навантаженнями та закручуванням колони бурильних труб у різних режимах буріння.

4. Для забезпечення максимальної ефективності очищення вибою скерованої свердловини і винесення шламу на устя за мінімальних витрат енергії розроблено методику визначення оптимальної продуктивності бурового насоса. При цьому враховується контактування шламу із стінками свердловини і фільтраційної кірки та величина зенітного кута. В результаті теоретичних досліджень та промислових випробувань встановлено, що для вимивання з вибою свердловини частинок шламу розміром менше 10 мм продуктивність бурового насоса не повинна перевищувати 30 л/с, а для 10–14 мм – відповідно 8–40 л/с.

5. За результатами лабораторних експериментальних досліджень встановлено закономірності впливу на енергетичні витрати при обертанні бурильної колони її конструктивних параметрів, інтенсивності викривлення скерованої свердловини, зенітного кута, осьових і поперечних сил, вдавлювання в гірську породу елементів КНБК. За результатами промислових випробувань встановлено закономірності зміни з глибиною в часі витрат енергії процесу буріння і промивання свердловини. Визначено основні умови енергоефективного використання гідромоніторних бурових доліт, як чинника зміни механічної швидкості буріння.

6. Для зменшення енергетичних витрат на обертання і осьове переміщення КНБК запропоновано конструкції керованого відхильника, пристрою для буріння похило-скерованих свердловин та шарнірного ОЦЕ. Для вдосконалення неорієнтованих КНБК у відповідності до реальних вибійних умов їх роботи розроблено конструкцію спеціального пристрою, який дозволяє визначати величини осьової і відхиляючої сил на долоті і реакції на ОЦЕ. Всі конструкції пристроїв захищені патентами України, а останній – виготовлений, і під час дослідно-промислової перевірки показав високу ефективність.

7. За результатами виконаних досліджень розроблено керівні документи: методика розрахунку енерговитрат процесу буріння нафтових і газових свердловин роторним способом; методика проектування і вибору подачі бурового насоса у

процесі буріння свердловини; інструкція на визначення енергетичних витрат при бурінні скерованих нафтогазових свердловин; технічні рекомендації та комп'ютерна програма проектування КНБК з урахуванням жолобів і каверн в свердловині; технічні рекомендації з вибору енергоефективних неорієнтованих КНБК, які пройшли дослідно-промислово перевірку та впроваджені в ПАТ «ДАТ Чорноморнафтогаз» та ТзОВ «Газінвест».

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Чудик І. І. Вплив кривизни стовбура свердловини на статичні форми рівноваги неорієнтованих КНБК / І. І. Чудик, А. А. Козлов // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2006. – № 1(13). – С. 50-54.
2. One of cases of inefficient energy expenditure during well drilling operations. The international symposium – 2008 [Текст]: матеріали Міжнар. симпозиуму, (Baia Mera, Romania, 21-23 may 2008). – Baia Mera. – P. 47.
3. Чудик І. І. Врахування каверно- і жолобоутворення при проектуванні неорієнтованих КНБК [Текст] / І. І. Чудик, А. А. Юрич, А. А. Козлов // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 2(23). – С. 45-50.
4. Чудик І. І. Розрахунок контактних зон бурильних труб зі стінками свердловини і фільтраційною кіркою [Текст] / І. І. Чудик, В. В. Буй // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 4 (25). – С. 84-88.
5. Чудик І. І. Оптимальна подача промивальної рідини на вибій свердловини при бурінні свердловини [Текст] / І. І. Чудик, Р. Б. Бабій // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 3 (4). – С. 71-75.
6. Чудик І. І. Експериментальні дослідження процесу промивання свердловини [Текст] / І. І. Чудик, С. П. Мелінішин // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 1(6). – С. 27-30.
7. Чудик І. І. Методика розрахунку енергії деформації та обертання бурильної колони у вертикальному стовбурі свердловини [Текст] / І. І. Чудик, В. В. Гриців // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 2(7). – С. 60-64.
8. Енергоемність буріння свердловин і шляхи її зменшення [Текст]: матеріали другої міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених "Проблеми енергоефективності в нафтогазовому комплексі" (Гурзуф, АР Крим, 2007). – 2007. – С. 339-342.
9. Сравнительный анализ потерь гидравлической мощности для разных типов бурильных труб [Текст]: матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Геопетроль 2008" (Закопане, Польща, 2008). – 2008. – С. 613-617.
10. Чудик І. І. Енергоспоживання процесу обертального буріння свердловини різними способами [Текст] / І. І. Чудик, В. Р. Осадца // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 4(9). – С. 39-41.



11. The graph-analytic method of optimum pumpage choice by criterion "mechanical drilling speed". [Текст]: scientific bulletin. Serie C, Volume XXII. Fachicle: Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology (Baia Mera, Romania, 2008). – 2008. – Baia Mera. – P. 47.
12. Пат. України 20126, МПК E21 B19/00. Пристрій для вимірювання зусиль в колоні бурильних труб [Текст] / Івасів В. М., Василів М. В., Артим В.І., Козлов А. А., Чудик І. І., Юрич А. Р.; заявник і патентовласник Івано-Франківський нац. техн. ун-тет нафти і газу. - № 200607356; заявл. 03.07.2006; опубл. 15.01.2007. – Бюл: № 11. – 5 с.: іл.
13. Нові можливості контролю завантаженості бурильної колони при бурінні свердловини [Текст]: матеріали міжнародної науково-практичної конференції “Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2008” (Одеса, Україна, 2008). – 2008. – Одеса. - С.18–23.
14. Чудик І. І. Нові можливості вдосконалення неорієнтованих компоновок низу бурильної колони [Текст] / І. І. Чудик, А. Р. Юрич // Породоразрушающий и металообработывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сборник научных трудов. – 2010. – Вып. 13. – С. 117-122.
15. Чудик І. І. Енерговитрати у процесі буріння свердловини долотами різних конструкцій [Текст] / І. І. Чудик, В. Р. Процюк, І. В. Підберезький // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 4 (33). – С. 109-113.
16. Крижанівський Є. І. Розширення технологічних можливостей та оцінювання енергоефективності роботи неорієнтованих компоновок низу бурильної колони [Текст] / Є. І. Крижанівський, І. В. Воевідко, І. І. Чудик // Породоразрушающий и металообработывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сборник научных трудов. – 2010. – Вып. 13. – С. 25-30.
17. Крижанівський Є. І. Енергетичні втрати, зумовлені силами опору осевого переміщення неорієнтованих компоновок низу бурильної колони [Текст] / Є. І. Крижанівський, І. І. Чудик, В. Р. Осадца // Нафтогазова енергетика. – 2010. – № 1(12). – С. 39-41.
18. Крижанівський Є. І. Енергетичні втрати на обертання неорієнтованих КНБК у процесі буріння свердловини. [Текст] / Є. І. Крижанівський, І. І. Чудик, О. Ю. Витязь, О. І. Дерді // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – № 2 (35). – С. 36-40.
19. Чудик І. І. Розширення можливостей неорієнтованих компоновок низу бурильної колони [Текст] / І. І. Чудик, В. Р. Осадца, К.С. Дзядик // Нафтогазова енергетика. – 2010. – № 2(24). – С. 7-13.
20. Пат. України 50920, МПК E21 B109/26. Опорно-центруючий пристрій [Текст] / Крижанівський Є. І., Воевідко І. В., Шандровський Т. Р., Чудик І. І.; заявник і патентовласник Івано-Франківський нац. техн. ун-тет нафти і газу. - № 2001053042; заявл. 04.05.2001; опубл. 15.11.2002. – Бюл: № 11. – 4 с.: іл.
21. Пат. України 50920 А, МПК7 E21 B4/02. Пристрій для похило-спрямованого

- буріння [Текст] / Крижанівський С. І., Воевідко І. В., Чудик І. І.; заявник і патентовласник Івано-Франківський нац. техн. ун-тет нафти і газу. - № 2001021348; заявл. 27.02.2007; опубл. 15.11.2002. - Бюл: № 11. - 4 с.: іл.
22. Пат. України 18147, МПК7 E21 B7/04. Керований відхильник [Текст] / Івасів В. М., Василів М. В., Козлов А. А., Олексюк М. П., Чудик І. І.; заявник і патентовласник Івано-Франківський нац. техн. ун-тет нафти і газу. - № 200607355; заявл. 03.07.2006; опубл. 16.10.2006. - Бюл: № 10. - 4 с.: іл.
23. Підвищення технологічних можливостей неорієнтованих компонок низу бурильної колони для буріння в ускладнених умовах / І. І. Чудик, Л. Д. Пітулей, І. В. Підберезький, Ю. В. Буй, М. В. Коваль // Наукові праці Донецького національного технічного університету. - 2011. - Вып. 14(181). - С. 127-134. - Серія гірничо-геологічна.
24. Дослідження процесів обертання бурильної колони у викривленій свердловині в середовищі бурового розчину / І. І. Чудик, Т. Г. Лавинкокова, Я. С. Гриджук, В. М. Гнатківський // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент - техника и технология его изготовления и применения. Сборник научных трудов. - 2011. - Вып. 14. - С. 102-109.
25. Чудик І. І. Удосконалення методики розрахунку сил притискання опор неорієнтованих КНБК до стінок свердловини [Текст] / І. І. Чудик // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2008. - № 3(28). - С. 35-41.
26. Чудик І. І. Про затрати гідравлічної потужності на промивання свердловини [Текст] / І. І. Чудик // Нафтогазова енергетика. - 2007. - № 4(5). - С. 54-59.
27. Чудик І. І. Порівняльний аналіз втрат гідравлічної потужності для різних типів бурильних труб [Текст] / І. І. Чудик // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2008. - № 4(29). - С. 54-57.
28. Чудик І. І. Дослідження впливу деяких техніко-технологічних чинників на холосте обертання бурильної колони [Текст] / І. І. Чудик // Науковий вісник ІФНТУНГ. - 2008. - № 2(18). - С. 76-80.
29. Чудик І. І. Вплив ексцентричного розташування бурильної колони у стовбурі свердловини на його промивання [Текст] / І. І. Чудик // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2008. - № 1(26). - С. 44-48.
30. Чудик І. І. До питання визначення потужності окремих видів обертання бурильної колони в стовбурі свердловини [Текст] / І. І. Чудик // Нафтогазова енергетика. - 2008. - № 3(8). - С. 15-18.
31. Чудик І. І. Математична модель розрахунку взаємодії бурильної колони із горизонтальним та викривленим стовбурами свердловини [Текст] / І. І. Чудик; Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2009. - № 1(30). - С. 32-37.
32. Чудик І. І. До втрат гідравлічної енергії під час промивання свердловини [Текст] / І. І. Чудик // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2009. - № 2(31). - С. 43-47.

33. Чудик І. І. Енергетичні витрати в процесі буріння свердловини [Текст] / І. І. Чудик // Нафтогазова енергетика. – 2007. – №2(3). – С. 5-8.
34. Чудик І. І. Дослідження величини подачі насоса для промивання скерованих свердловин [Текст] / І. І. Чудик // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – № 4(37). – С. 39-46.
35. Чудик І. І. Енергетичні витрати, пов'язані з використанням бурових доліт [Текст] / І. І. Чудик // Нафтогазова енергетика. – 2010. – № 2(13). – С. 5-8.
36. Чудик І. І. Метод розрахунку сил притискання бурильної колони до стінок свердловини довольної кривизни [Текст] / І. І. Чудик // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2010. – № 2(24). – С. 32-36.

### АНОТАЦІЇ

**Чудик І. І. Розвиток наукових основ буріння скерованих свердловин з мінімальними витратами енергії.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.06 – Розробка нафтових та газових родовищ. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2011.

Дисертацію присвячено вирішенню проблем зменшення енергетичних витрат процесу буріння скерованих свердловини і розроблення методів для підвищення якості реалізації параметрів їх проектного профілю.

Вдосконалено методи проектування і вибору конструкцій бурильного інструменту з урахуванням енергетичних витрат. Розроблено засади промивання скерованих свердловин при зменшених значеннях продуктивності бурового насоса. Основні результати досліджень впроваджено у виробництво.

Комплексне виконання теоретичних і експериментальних досліджень таких технологічних процесів, як обертання бурильної колони, руйнування вибою буровими долотами, його промивання і видалення шламу на устя та спуско-підіймальні операції дало змогу вдосконалити методи проектування технічних засобів і бурового інструменту, а також режимів їх експлуатації для підвищення якості буріння скерованих свердловин з мінімальними витратами енергії.

**Ключові слова:** енергетичні витрати, якість буріння, скерована свердловина, бурильна колона, тертя, компоновка.

**Чудик И. И. Развитие научных основ бурения направленных скважин с минимальными потерями энергии.** – Рукопись.

Диссертация на получение научной степени доктора технических наук по специальности 05.15.06 - Разработка нефтяных и газовых месторождений. – Ивано-

Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2011.

Диссертация посвящена решению проблем сокращения энергетических затрат процесса бурения направленных скважин и разработке методов повышения качества реализации параметров их проектного профиля.

Усовершенствованы методы проектирования и выбора конструкций бурильного инструмента с учетом энергетических потерь. Разработаны основы процесса промывки направленных скважин при уменьшенных значениях производительности бурового насоса. Основные результаты исследования внедрены в производство.

Теоретически и экспериментально исследовано распределение энергетических потерь, связанных с работой в скважине неориентированных компоновок низа бурильной колонны (КНБК), предложены усовершенствованные математические модели расчета ступенчатых, одно- и двухопорных конструкций в условиях прямолинейного и искривленного стволов скважины.

По результатам аналитических и экспериментальных исследований установлено, что вдавливание опорно-центрирующих элементов (ОЦЭ) с эрозийным разрушением горной породы приводит к потере энергии, ухудшению параметров разрушения забоя, является причиной заклинивания и спиральной деформации бурильной колонны. Установлено, что интенсивность искривления ствола скважины и увеличение зенитного угла приводит к увеличению энергетических потерь на вращение бурильной колонны и уменьшению передаваемой долоту энергии.

Разработаны и экспериментально апробированы в лабораторных условиях теоретические методы расчета энергетических потерь на вращение и деформацию бурильной колонны, а также ее подъем из скважины произвольной кривизны. Путем аналитических и экспериментальных исследований установлена зависимость энергетических потерь при вращении бурильной колонны от: воздействия сил адгезионного прилипания труб к фильтрационной корке; сопротивления бурового раствора; изгибающего момента; обусловленного кривизной ствола скважины; осевой сжимающей, растягивающей и поперечной нагрузок; закручивания бурильной колонны; диаметров бурильных замков и их количества; режимов бурения; сил трения в опоре вертлюга.

Разработаны и промышленно апробированы с положительным результатом научные основы проектирования уменьшенной производительности бурового насоса, базирующегося на принципах минимальных энергетических потерь и максимальной эффективности процесса промывки скважины при условиях, учитывающих эксцентрическое кольцевое пространство в стволе скважины, взаимодействие шлама с фильтрационной коркой стенки скважины, зенитный угол и вращение бурильной колонны.

По результатам экспериментальных исследований на усовершенствованном лабораторном стенде доказано значимое влияние на энергетические потери вращения бурильной колонны сил прижатия элементов КНБК к стенкам скважины, обусловленных радиусом искривления полуволны изгиба бурильной колонны в верхней точке ее взаимодействия со стенкой скважины.

Для уменьшения энергетических потерь на вращение и осевое перемещение бурильной колонны, обусловленных использованием КНБК, предложены конструкции управляемого отклонителя, устройства для бурения наклонно-направленных скважин и шарнирного ОЦЭ, запатентованные в Украине. Путем аналитических исследований доказана энергетическая эффективность и целесообразность использования разработанных конструкций при бурении скважин.

Для определения реальных значений осевой и отклоняющей сил на долоте, реакций на ОЦЭ и радиальных зазоров разработана конструкция специального устройства, защищенная патентом Украины, а также изготовлен и апробирован его опытно-промышленный образец, позволяющий проектировать конструкции неориентированных КНБК в соответствии с реальными условиями.

Результаты научных исследований прошли опытно-промышленную апробацию при бурении скважин в ООО "Газинвест" и ПАО «ГАО Чорноморнефтегаз», что подтверждают акты внедрения ряда методик: методики расчета энергетических потерь процесса бурения нефтяных и газовых буровых скважин роторным способом; методики проектирования и выбора подачи бурового насоса при бурении скважины; инструкции на расчет энергетических потерь при бурении скважин.

Комплексное выполнение теоретических и экспериментальных исследований таких технологических процессов, как вращение бурильной колонны, разрушение забоя буровыми долотами, промывание скважины, а также спуско-подъемных операций позволило усовершенствовать методы проектирования и режимы эксплуатации технических средств и бурового инструмента для повышения качества бурения направленных скважин с минимальными потерями энергии.

Ключевые слова: энергетические потери, качество бурения, направленная скважина, бурильная колонна, трение, компоновка.

**Chudyk I. Scientific fundamentals development of the directed wells drilling with minimal charges of energy. - Monography.**

Thesis for gaining Doctor of Science (Engineering) in speciality 05.15.06 – Development of oil and gas deposits. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2011.

The thesis is devoted to solving problems concerning to reducing power charges in the directed well drilling process and methods development to implement design characteristics.

Design methods and selection of drilling instrument constructions have been improved considering power charges. Principles of directed wells washing out were worked out using diminished values of drilling pump productivity. The main results have been implemented in practice.

Complex implementation of theoretical and experimental researches of such technological processes as drilling column rotation, destruction of coalface by drilling chisels, washing it out and replacing mud to headwell and drilling round-trip enabled to improve methods and facilities design and drilling tools as well as modes of their operation to enhance quality of directed wells drilling with minimal energy charges.

Key words: power charges, quality of drilling, directed well, drilling column, friction, composition.