

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАФТИ І ГАЗУ

**ВИТВИЦЬКИЙ ІВАН ІВАНОВИЧ**



УДК 622.245

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЦЕНТРУВАННЯ ОБСАДНИХ  
КОЛОН У ПОХИЛО СКЕРОВАНИХ СВЕРДЛОВИНАХ**

**05.15.10 – Буріння свердловин**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

**дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук (доктора філософії)**

Івано-Франківськ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Чудик Ігор Іванович**,  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу,  
проректор з наукової роботи.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент  
**Кунцяк Ярослав Васильович**,  
ПрАТ «Науково-дослідне бюро бурового  
інструменту», м.Київ,  
генеральний директор

кандидат технічних наук  
**Ставичний Євген Михайлович**,  
ПАТ «Укрнафта», м.Івано-Франківськ,  
начальник управління буріння

Захист дисертації відбудеться 11 квітня 2019 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.02 при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

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

Автореферат розісланий 07 березня 2019 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради, кандидат технічних  
наук, доцент



І. М. Ковбасюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Підвищення ефективності розробки нафтогазових родовищ та збільшення коефіцієнта флюїдовилучення можливе завдяки нарощуванню обсягів буріння похило скерованих свердловин. Однак практика спорудження таких свердловин поставила перед фахівцями цілу низку проблем, найважливіша серед яких – забезпечення необхідного рівня надійності їх кріплення як інженерної споруди. Кріплення нафтових і газових свердловин є одним з найвідповідальніших етапів у циклі їх спорудження, від надійності якого залежить довговічність експлуатації свердловини, кількість і тривалість міжремонтних періодів, забезпечення дотримання вимог охорони надр і довкілля. У зв'язку зі зростанням обсягів буріння похило скерованих та горизонтальних свердловин збільшується кількість проблем, пов'язаних з кріпленням. Аналіз промислових даних підтверджує, що у похило скерованих свердловинах втрата цілісності кріплення трапляється у 1,5-2 рази частіше, ніж у вертикальних.

Надійність кріплення таких свердловин залежить від багатьох чинників, зокрема від якості розмежування пластів. Унаслідок неякісного розмежування пластів виникають міжпластові перетоки, міжколонні тиски, утворюються грифони, що спричинює не лише втрати флюїду, але й необхідність використання додаткових коштів на ремонтно-ізоляційні роботи. Якість розмежування пластів безпосередньо залежить від ступеня заміщення промивальної рідини у кільцевому просторі свердловини на тампонажний розчин, при низькому рівні якого формуються так звані зони «защемлення». На процес формування таких зон впливає підготовка ствола свердловини до цементування, технологічне оснащення обсадних колон, кількість і характеристика центруючих пристроїв, інтервали їх встановлення та ефективність роботи цих пристроїв.

Незважаючи на широкий спектр інженерних рішень, скерованих на підвищення надійності кріплення свердловин, розв'язок задачі ефективного центрування обсадної колони за складної конфігурації осі свердловини на сьогодні залишається актуальною для нафтогазової галузі та потребує подальшого всебічного вивчення, особливо у зв'язку зі зростанням обсягів похило скерованого буріння.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота є фрагментом науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт Науково-дослідного інституту нафтогазової енергетики і екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за період 2001–2002 рр. за темою 153/2001 «Підвищення якості кріплення похило-спрямованих та горизонтальних свердловин на родовищах Прилуцького УБР» (№0101U000714), за період 2015–2017 рр. за темою «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу, їх транспортування та диверсифікації постачання для підвищення енергетичної безпеки України» (№0115U007099).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є забезпечення надійності кріплення похило скерованих свердловин шляхом підвищення ефективності центрування обсадних колон та їх проходження по стволу складної конфігурації.

Основні задачі досліджень:

1. Оцінити ефективність застосування центруючих пристроїв у процесі кріплення обсадними колонами похило скерованих свердловин.
2. Створити модель взаємодії центратора з жолобними виробками свердловини.
3. Визначити сили опору рухові обсадної колони в свердловині з клиновидним жолобом.
4. Розробити методику розрахунку віддалі між центраторами обсадної колони у свердловині
5. Розробити рекомендації щодо застосування пружно-жорстких центраторів для обсадних колон.

**Об'єктом дослідження** є процеси кріплення обсадними колонами похило скерованих свердловин, що ускладнені жолобними виробками.

**Предметом дослідження** є технічні характеристики центраторів різних типів та технології оснащення ними обсадних колон.

**Методи дослідження.** У роботі застосовано аналітичні методи побудови і реалізації математичних моделей взаємодії центратора та жолобної виробки на стінках свердловини, а також моделей різних типів центраторів для аналітичних досліджень їх характеристик, дослідно-промислові випробування та впровадження методики оснащення обсадних колон центраторами.

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

1. Вперше створено модель взаємодії центратора з жолобною виробкою різної форми на стінках свердловини, що дозволяє оцінити сили опору, які виникають під час такого контакту.
2. Вперше створено моделі оснащення обсадної труби центраторами різних типів та схем їх закріплення для розрахунку пружно-жорстких характеристик.
3. Удосконалено методику розрахунку віддалі між центраторами, що забезпечує заданий для якісного цементування зазор між стінкою свердловини та обсадною колоною.

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

Використання результатів наукових розробок дозволить розрахувати величину сил опору рухові обсадної колони під час її спуску в свердловину за наявності жолобних виробок різної форми та забезпечити допуск колони до проектної глибини її встановлення і виконання завдань поставлених перед свердловиною.

Для оцінювання працездатності центруючих пристроїв різних типів рекомендовано проводити розрахунок їх пружно-жорстких характеристик за різними схемами їх закріплення на обсадній трубі та, як наслідок, запобігти їх перевитратам чи недостатньому числу на інтервалі центрування.

Впровадження розробленої методики розрахунку оптимальної віддалі між центраторами забезпечить задану величину кільцевого зазору у свердловині з уникненням утворення застійних зон і, відповідно, заповненням цього простору тампонажним розчином і формуванням надійного та герметичного кріплення свердловини.

**Особистий внесок здобувача.** Автором проведено огляд літературних джерел з питань сучасного стану вивчення проблеми ефективного застосування центруючих пристроїв у процесі кріплення похило скерованих свердловин та проаналізовано промислові дані з їх кріплення на бурових підприємствах БУ «Укрбургаз» [1, 2]. Розглянуто причини утворення жолобних виробок на стінках свердловини. Запропоновано модель для описання контактної взаємодії обсадної колони з жолобом різних форм. Встановлено залежності сил опору просуванню колони від співвідношення розмірів свердловини та колони і від локальних параметрів форми жолоба (надто від конфігурації його гирла) [7]. Визначено вплив різних чинників на величину мінімально необхідного зазору між обсадною колоною та стінкою свердловини [4]. На підставі розв'язків контактних задач встановлено аналітичні залежності між притискною силою та взаємним зближенням колони і стінки свердловини, які характеризують радіальну жорсткість центратора, а також вирази для максимальних напружень, за якими оцінюють його міцність [3, 6, 8, 9]. Сформульована задача раціонального центрування обсадної колони, суть якої зводиться до того, щоб підібрати віддалі між пружно-жорсткими центраторами за умови забезпечення зазору між колоною та стінкою свердловини не менше допустимої величини, потрібної для якісного цементування [5]. Розроблено конструкцію самоорієнтовного центратора обсадної колони, яка захищена патентом України [10].

Складено програму у середовищі *Delphi* для визначення кількості центраторів та віддалі між ними і розроблено керівний документ, затверджений для використання підприємствами БУ «Укрбургаз».

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались на: Міжнародній науково-технічній конференції «Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі», 3–6 жовтня 2012 р. (м. Івано-Франківськ); Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика 2013», 7–11 жовтня 2013 р. (м. Івано-Франківськ); Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки», 10–14 березня 2014 р. (м. Одеса); Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-хімічні готехнології – 2018», 10–11 жовтня 2018 р. (м. Дніпро).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 10 наукових праць, з яких у співавторстві 5 статей у фахових наукових журналах (зокрема 2 статті у журналі, індексованому в базі даних Scopus), 4 тези доповідей на міжнародних наукових конференціях та отримано 1 патент України на корисну модель.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (90 найменувань). Викладено на 172 сторінках машинописного тексту, містить 44 рисунки та 16 таблиць.

Автор висловлює щире подяку колективу кафедри буріння свердловин ІФНТУНГ за підтримку і сприяння у проведенні наукових досліджень.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** розкрито сучасний стан проблеми та її значення для нафтогазової галузі, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, відображено наукове та практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача та подано інформацію про апробацію результатів роботи.

**У першому розділі** проаналізовано промислові дані з кріплення похило скерованих і горизонтальних свердловин буровими підприємствами БУ «Укрбургаз», обсяг буріння яких за останні роки значно зріс. Відзначено, що такі свердловини часто не мають надійного кріплення внаслідок ускладнень, пов'язаних з недопуском обсадних колон до проектної глибини та недопідйомом цементного розчину у кільцевому просторі. Зокрема впродовж 2000-2018 рр. недопуск обсадних колон зафіксовано у 26 свердловинах, а витрати часу на ліквідацію ускладнень склали більше 10 000 год. Аналіз статистичних даних щодо кріплення свердловин свідчить, що ускладнення у процесі кріплення свердловин виникають не тільки під час спуску експлуатаційних та проміжних колон, але й кондукторів, спущених на відносно невелику глибину. Ці проблеми загалом є наслідком ексцентричного розташування обсадних колон у свердловині, спричиненого складною конфігурацією її профілю, та недостатньою ефективністю роботи центруючих пристроїв.

Дослідженню питань щодо підвищення надійності кріплення похило скерованих свердловин присвячені роботи багатьох вітчизняних та зарубіжних учених, зокрема: Я. С. Коцкулича, Б. А. Тершака, М. М. Александрова, А. І. Булатова, А. Г. Калініна, Б. А. Нікітіна, К. М. Солодкого, Б. З. Султанова, Е. П. Фролова, Д. В. Барановського, В. І. Крилова, П. П. Макаренка, В. Г. Григулецького, В. Ф. Буднікова, Ю. М. Басаригіна, С. А. Оганова, В. І. Тарасевича, Ф. Ф. Ахмадішиніна, В. А. Богатирьова, А. В. Перова, Г. С. Оганова, В. Ю. Близнюкова, Р. Г. Муфід-Заде, І. С. Катєєва, Т. Р. Катєєва, І. В. Гуськова, А. К. Дудаладова, В. І. Ваніфатьєва, І. М. Фриза, Н. Р. Гаджієва, В. І. Гуляєва, В. В. Гайдайчука, Л. В. Гловача, З. Г. Керимова, Ф. А. Шіхалієва, Д. М. Махмудова, А. Б. Гасанова, Р. І. Медведського, Ю. А. Воропаєва, Г. Е. Касьянова, А. П. Аветисова, Х. Рабіа, Ю. М. Кісельмана, В. П. Банатова та багатьох інших.

Однак, на сьогодні відсутні обґрунтовані підходи щодо визначення інтервалів розташування центруючих пристроїв, їх необхідної кількості, відповідності їхніх пружних характеристик, що ускладнює процес спуску обсадної колони у свердловину, особливо за наявності жолобних виробок різної форми та зменшення розмірів кільцевих зазорів, унаслідок чого знижується якість та надій-

ність кріплення свердловини. Крім того, відсутність обґрунтованих методик оснащення обсадних колон центруючими пристроями зумовлює їх перевитрати в одних інтервалах та недостатню кількість в інших. Виходячи із зазначеного сформульована мета роботи та основні завдання досліджень.

**Другий розділ** присвячено дослідженню впливу конфігурації ствола свердловини та сил опору на прохідність обсадної колони по ній. Розглянуто причини утворення жолобних виробок на стінках свердловини та їх форми. У процесі спуску колони обсадних труб у похило скеровану чи горизонтальну свердловину відбувається активна взаємодія колони зі стінками свердловини та рідиною, що міститься в ній. Ця взаємодія має складний характер і проявляється у вигляді опору спуску колони обсадних труб у свердловину, внаслідок чого можливий їх недопуск до проектної глибини.

На величину сили опору впливають фізичні та геометричні групи чинників. Фізичними чинниками у певній мірі можна керувати, зводячи силу опору від кожного з них до мінімально можливої, тоді як сила опору від геометричних чинників набагато більша за абсолютною величиною і є визначальною з точки зору можливості допуску колони труб до проектної глибини.

Для оцінювання сил опору запропоновано модель взаємодії центратора з жолобом свердловини. Роль центраторів як засобів підвищення якості кріплення свердловини на практиці може бути знівельована зниженням прохідності колони на складних інтервалах і, як наслідок, появою ризиків недоспуску колони. З іншого боку, конструкції центраторів можуть мати менший опір просуванню, аніж елементи з'єднання обсадних труб, що є позитивним моментом.

Для якісної оцінки зазначених вище тенденцій запропоновано таку методологію.

Нехай  $N_{\kappa,i}$  – нормальна складова взаємодії колони зі стінками свердловини, а  $f_{\kappa,i}$  – коефіцієнт тертя колони по породі на  $i$ -ому інтервалі свердловини. Тоді сила опору просуванню нецентрованої колони

$$T_{\kappa} = \sum_i f_{\kappa,i} N_{\kappa,i}. \quad (1)$$

Аналогічно для колони, оснащеної центраторами на цьому інтервалі, сила опору буде:

$$T_u = \sum_i f_{u,i} N_{u,i}, \quad (2)$$

де  $N_{u,i}$  – нормальна реакція в точках контакту центраторів зі стінками свердловини;

$f_{u,i}$  – коефіцієнт тертя центраторів по породі.

З виразів (1) і (2) отримаємо:

$$\chi = \frac{T_u}{T_{\kappa}} = \frac{\sum_i f_{u,i} N_{u,i}}{\sum_i f_{\kappa,i} N_{\kappa,i}}. \quad (3)$$

Очікуваними є такі нерівності:  $N_{y,i} > N_{\kappa,i}$  – завдяки неминучому зменшенню зазору,  $f_{y,i} \leq f_{\kappa,i}$  – через, можливо, більш “обтічну” конструкцію центратора порівняно з елементами з’єднання обсадних труб.

Тому у разі домінування приросту нормальних реакцій над зменшенням коефіцієнтів тертя отримаємо зниження прохідності колони ( $\chi > 1$ ). Якщо ж зменшення фрикційних опорів переважає над збільшенням нормальних реакцій у контактах, то центрування колони не заважатиме її прохідності ( $\chi < 1$ ). Вплив зазначених ефектів можна оцінити за формулою (3), попередньо розрахувавши  $N_{\kappa,i}$  та  $N_{y,i}$  для конкретних конфігурацій свердловини та типу центратора.

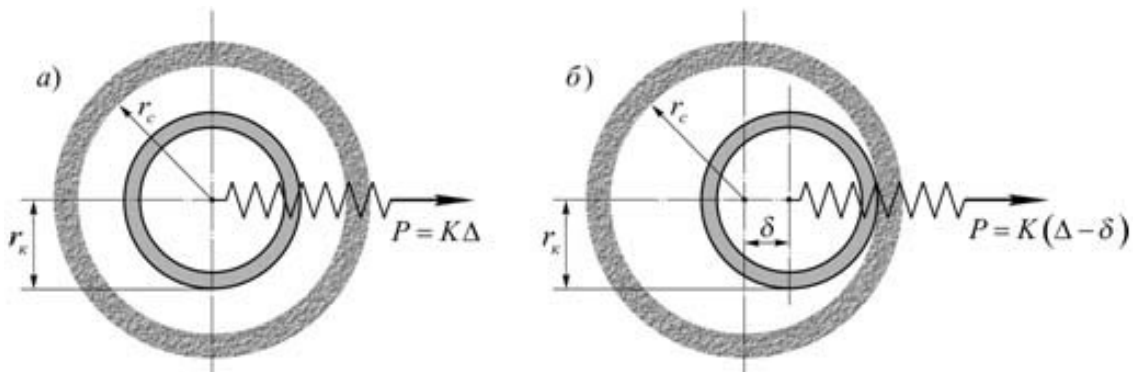
Для оцінювання впливу оснащеної центратором обсадної колони на її прохідність через ділянку з жолобом, прийнято, що центратор абсолютно жорсткий, притискні сили у свердловині із заданим криволінійним профілем осі розраховані та залежать головно від жорсткості колони, кривини свердловини та величини затрубних зазорів. Притискання колони в конкретному поперечному перерізі уподібнено натягові деякої пружини (рис. 1). Жорсткість цієї пружини  $K$  асоціюється з жорсткістю обсадної колони, а лінійне видовження  $\Delta$  – зі ступенем відхилення колони від прямолінійної форми.  $P = K\Delta$  – притискна сила для ідеально центрованої колони (рис. 1, а). Тоді у лінійному наближенні для системи з зазором (рис. 1, б)

$$P = K(\Delta - \delta), \quad (4)$$

де  $\delta = r_c - r_\kappa$  – віддаль між осями свердловини і труби;

$r_c$  – радіус свердловини;

$r_\kappa$  – радіус труби.



а – колона ідеально центрована, б – колона, притиснута до стінки

Рисунок 1 – Модель взаємодії обсадної колони зі стінками свердловини без жолоба

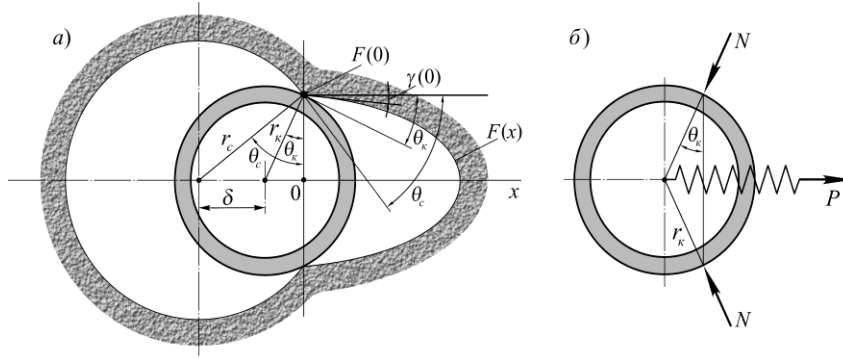
Отже, зміщення осі колони відносно осі свердловини (зазор  $\delta$ ) прогнозовано зумовлює зменшення сили притискання (рис. 1, б).

Припускаємо, що на стінці свердловини вироблено жолоб (рис. 2–5), форму якого описано незрозстаючою функцією  $F(x)$  в системі координат з початком у гирлі жолоба.

Розглянуто три можливі варіанти взаємодії колони труб та жолоба: коло-

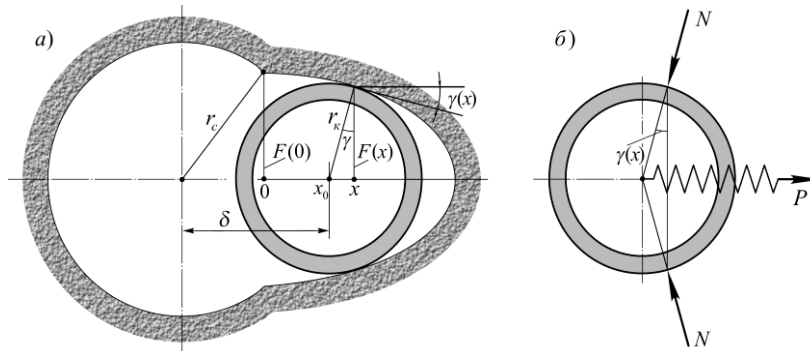


на контактує з гирлом жолоба, колона контактує зі стінками жолоба та дном жолоба.



*a* – геометрична, *б* – силова

Рисунок 2 – Схеми взаємодії обсадної колони зі стінкою свердловини, ускладненою жолобом



*a* – геометрична, *б* – силова

Рисунок 3 – Схеми взаємодії обсадної колони зі стінками жолоба

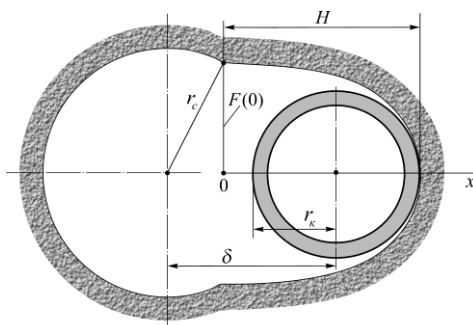


Рисунок 4 – Взаємодія обсадної колони з дном жолоба

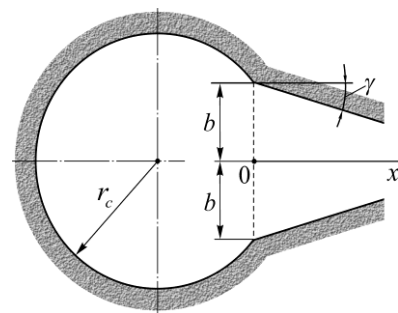


Рисунок 5 – Схема поперечного перерізу свердловини з клиноподібним жолобом

Якщо обсадна колона контактує з гирлом жолоба, то

$$F(0)\sqrt{1+(F'(0))^2} < r_k < r_c, \quad (5)$$

сила опору просуванню обсадної колони буде:

$$T = f \cdot 2N = \frac{fK \left( \Delta - \left( \sqrt{r_c^2 - (F(0))^2} - \sqrt{r_k^2 - (F(0))^2} \right) \right) r_k}{\sqrt{r_k^2 - (F(0))^2}}. \quad (6)$$

За умови потрапляння обсадної колони в жолоб

$$r_k < F(0) \sqrt{1 + (F'(0))^2} < r_c, \quad (7)$$

силу опору визначаємо із загальом трансцендентних співвідношень:

$$T = f \cdot 2N = - \frac{fK \left( \Delta - \left( \sqrt{r_c^2 - (F(0))^2} + x + F(x)F'(x) \right) \right) r_k}{F(x)F'(x)}, \quad (8)$$

$$r_k = F(x) \sqrt{1 + (F'(x))^2}. \quad (9)$$

У разі взаємодії обсадної колони з дном свердловини

$$\delta = \sqrt{r_c^2 - (F(0))^2} + H - r_k, \quad (10)$$

сила опору така:

$$T = 2fN = fK \left( \Delta - \left( \sqrt{r_c^2 - (F(0))^2} + H - r_k \right) \right). \quad (11)$$

Розглянуто приклад аналізу, який принципово роз'яснює вплив жолоба клиноподібної форми та центратора на опір просуванню обсадної колони (рис. 5):  $F(x) = b - x \operatorname{tg} \gamma$ , де  $2b$  – ширина гирла жолоба,  $2\gamma$  – кут розхилу клина.

Підсумкові результати щодо сил опору для клиноподібного жолоба подано у вигляді:

$$T = \frac{fK \left( \Delta - \left( \sqrt{r_c^2 - b^2} - \sqrt{r_k^2 - b^2} \right) \right) r_k}{\sqrt{r_k^2 - b^2}}, \quad r_k \cos \gamma \geq b; \quad (12)$$

$$T = \frac{fK \left( \Delta - \left( \sqrt{r_c^2 - b^2} + \frac{b \cos \gamma - r_k}{\sin \gamma} \right) \right)}{\sin \gamma}, \quad r_k \cos \gamma \leq b. \quad (13)$$

Аналіз отриманих виразів показує, що збільшення радіуса обсадної колони, зокрема й з урахуванням оснащення її центратором, зумовлює плавне підвищення контактної реакції при  $r_k \cos \gamma < b$  (колона в жолобі) та істотне зменшення контактної реакції при  $r_k \cos \gamma$  (колона поза жолобом) через усунення ефекту клина.

Збільшення ширини жолоба спричинює різке підвищення нормальної реакції при  $b \rightarrow r_k \cos \gamma$  (колона потрапляє в гирло жолоба); подальший ріст дає зниження контактної реакції (ефект випрямлення колони).

У разі зміни геометричних параметрів колони та жолоба притискні сили  $P$  змінюються незначно, водночас сили опору  $T = f \cdot 2N$  підпорядковуються описаним вище закономірностям.

Отже оснащення обсадної колони центратором (умовно збільшується  $r_k$ ) зумовлює зростання сили опору, якщо колона перебуває в жолобі

( $r_k \cos \gamma < b = 0,06\Delta = 0,6r_c$ ), тому що зростає притискна сила. Якщо ж від центрування добуток  $r_k \cos \gamma$  починає перевищувати півширину гирла  $b$ , то маємо різке зменшення сили опору, тому що усувається ефект заклинювання. У такому разі наявність центратора може бути доцільною, оскільки не дозволяє колоні потрапити в жолоб.

Розбурювання жолоба, яке асоціюємо зі збільшенням  $b$ , підвищує опір просуванню обсадної колони, якщо вона є поза жолобом ( $b < r_k \cos \gamma \approx 0,06\Delta = 0,6r_c$ ) та дозволяє дещо знизити силу опору для колони, що потрапила в жолоб ( $r_k > b \cos \gamma$ ). Зазначене вище проілюстровано низкою графічних залежностей нормальної реакції від геометричних розмірів колони та жолоба, а також сили притискання та сили опору від їхніх геометричних розмірів.

Як приклад на рис. 6 та 7 подані залежності сил притискання та опору в свердловині з жолобом від розмірів свердловини та від ширини жолоба для таких умов: діаметр обсадної колони  $D_k = 140$  мм; діаметр свердловини дорівнює діаметру долота  $D_o = 190,5$  мм; діаметр бурильної колони  $D_{ок} = 127$  мм, діаметр замка  $D_з = 155$  мм. Обчислена притискна сила, що діє на колону на заданому інтервалі  $P = K\Delta = 10$  кН. Свердловина ускладнена жолобом з шириною гирла  $2b = 156$  мм та з кутом клина  $\gamma = 0,1$  рад.

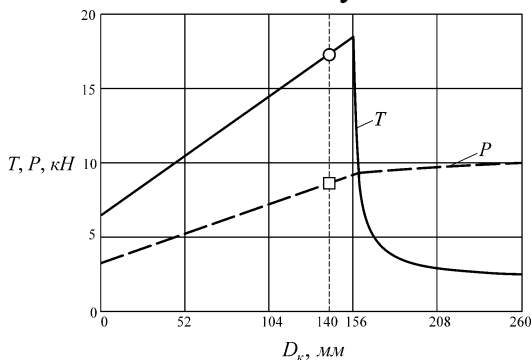


Рисунок 6 – Залежності сили притискання ( $P$ ) та сили опору ( $T$ ) від діаметра обсадної колони у свердловині з жолобом  $2b = 156$  мм

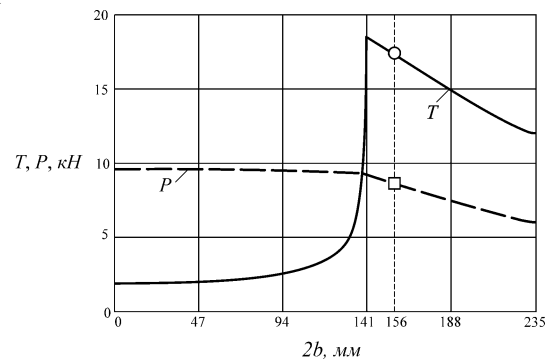


Рисунок 7 – Залежності сили притискання ( $P$ ) та сили опору ( $T$ ) від ширини гирла жолоба для обсадної колони  $D_k = 140$  мм

Із рис. 6 видно, що колона перебуває в жолобі. Якщо колону  $D_k = 140$  мм оснастити центратором, діаметр якого більший за ширину жолоба ( $D_u > 2b = 156$  мм), то можна запобігти потраплянню обсадної колони у жолоб, притискна сила дещо збільшиться, а сила опору її просуванню різко спаде (з  $17,5$  кН до  $10$  кН, а то й далі). Відповідно, з рис. 7 впливає, що для обсадної колони  $D_k = 140$  мм без центратора, яка може потрапити в жолоб з гирлом завширшки  $2b = 156$  мм, незначний позитивний ефект дає розбурювання жолоба. Так, наприклад, збільшення ширини гирла від  $156$  мм до  $188$  мм зумовить зме-

ншення сили опору від  $17,5 \text{ кН}$  до  $15 \text{ кН}$ . Тому значне розбурювання свердловини є екстенсивним способом підвищення прохідності обсадної колони з побічним недоліком – зростанням об'єму свердловини та збільшенням витрати матеріалів на кріплення.

У третьому розділі досліджено ефективність центрування обсадної колони у похило скерованій свердловині. Надійне кріплення свердловини може бути сформоване за умови, коли обсадна колона у ній буде відцентрована. Для цього використовують показник ступеня центрування, який за міжнародними стандартами має складати не менше 67%.

Пружні характеристики центратора є важливим чинником для визначення їх необхідної кількості для обсадної колони. Розглянуто модель центратора, який складається з циклічної системи дугоподібних стержневих ланок, змонтованих на спільних кільцях, що охоплюють трубу.

У роботі досліджено вплив умов різних схем зв'язку ланок у конструкції центратора (шарнірна і жорстка) та схем закріплення центратора на обсадній трубі (рухома та нерухома схема), які подано на рис. 8.

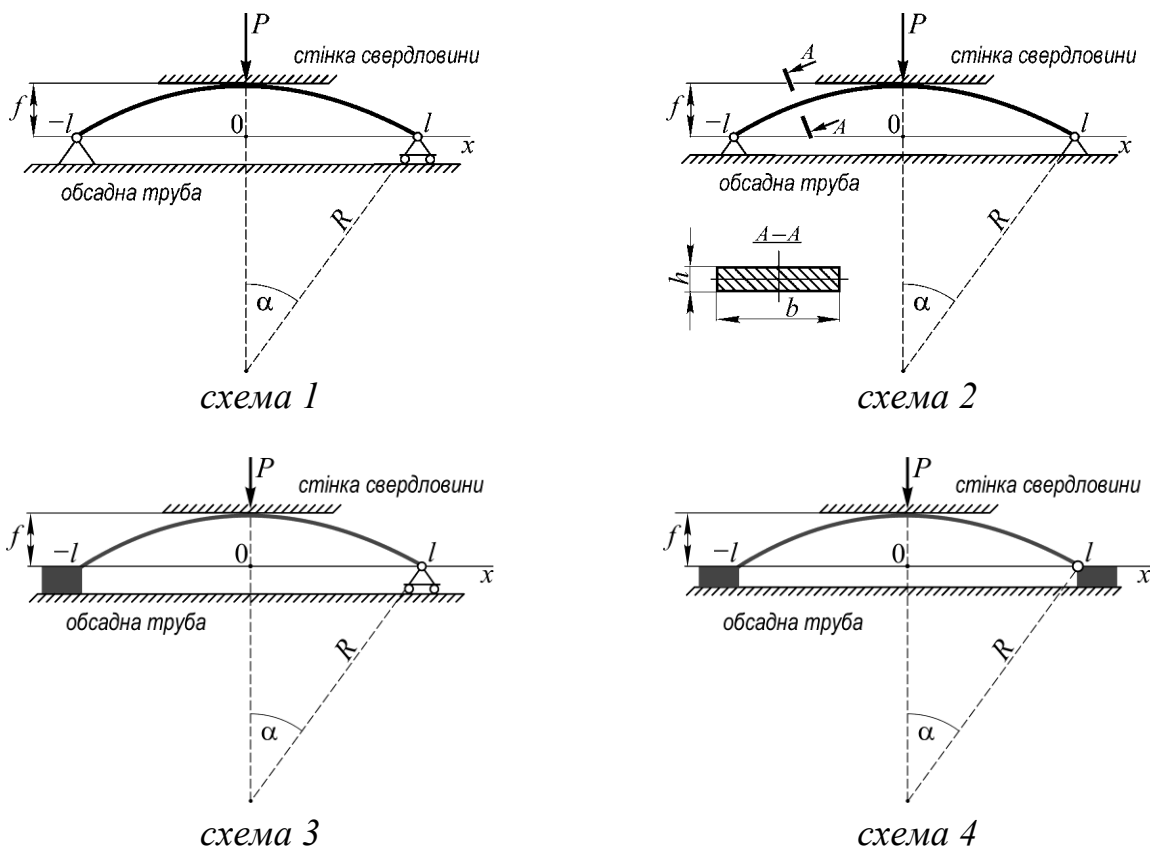


Рисунок 8 – Схема контактної взаємодії ланки центратора зі стінкою свердловини: шарнірно закріплена і є аксіально рухомою (схема 1); шарнірно закріплена і є аксіально нерухомою (схема 2); жорстко закріплена і є аксіально рухомою (схема 3); жорстко закріплена і є аксіально нерухомою (схема 4)

Ключові рівняння для кожної схеми моделі такі:  
рівняння рівноваги

$$\frac{dN}{dx} = 0, \frac{dQ}{dx} + \frac{N}{R} = -P\delta(x), \frac{dM}{dx} - Q = 0, \quad x \in (-l, l); \quad (14)$$

фізичні співвідношення

$$\frac{du}{dx} + \frac{w}{R} = 0, \quad M = EJ \frac{d^2 w}{dx^2}, \quad x \in (-l, l). \quad (15)$$

Тут  $P$  – контактна сила;  $N$ ,  $Q$  – осьова та поперечна сили;  $M$  – згинальний момент;  $EJ$  – жорсткість ланки на згин;  $u$  – тангенціальне переміщення;  $w$  – прогин ланки;  $x$  – координата;  $\delta(x)$  – функція Дірака.

Відповідно крайові умови закріплення кінців ланки  $x = \pm l$  та її точкової ( $x = 0$ ) взаємодії зі стінкою свердловини для схеми 1 мають вигляд:

$$M(-l) = 0; u_x(-l) \equiv u(-l) + w(-l)\alpha = 0; u_y(-l) \equiv w(-l) + u(-l)\alpha = 0; \\ N_x(l) \equiv N(l) - Q(l)\alpha = 0; M(l) = 0; \quad u_y(l) \equiv w(l) - u(l)\alpha = 0; w(0) = -\Delta. \quad (16)$$

Послуговуючись методом початкових параметрів, остаточні результати розв'язку задачі мають вигляд:

$$N(x) = N = const, \quad Q(x) = Q_{-l} - \frac{N}{R} \frac{x+l}{1!l} - PH(x), \quad (17)$$

$$M(x) = M_{-l} + Q_{-l} \frac{x+l}{1!l} - \frac{N}{R} \frac{(x+l)^2}{2!l^2} - P \frac{x}{1!l} H(x), \quad (18)$$

$$\vartheta(x) = \vartheta_{-l} + \frac{1}{EJ} \left( M_{-l} \frac{x+l}{1!l} + Q_{-l} \frac{(x+l)^2}{2!l^2} - \frac{N}{R} \frac{(x+l)^3}{3!l^3} - P \frac{x^2}{2!l^2} H(x) \right), \quad (19)$$

$$w(x) = w_{-l} + \vartheta_{-l} \frac{x+l}{1!l} + \frac{1}{EJ} \left( M_{-l} \frac{(x+l)^2}{2!l^2} + Q_{-l} \frac{(x+l)^3}{3!l^3} - \frac{N}{R} \frac{(x+l)^4}{4!l^4} - P \frac{x^3}{3!l^3} H(x) \right), \quad (20)$$

$$u(x) = u_{-l} - \frac{w_{-l}}{R} \frac{x+l}{1!l} - \frac{\vartheta_{-l}}{R} \frac{(x+l)^2}{2!l^2} - \\ - \frac{1}{EJR} \left( M_{-l} \frac{(x+l)^3}{3!l^3} + Q_{-l} \frac{(x+l)^4}{4!l^4} - \frac{N}{R} \frac{(x+l)^5}{5!l^5} - P \frac{x^4}{4!l^4} H(x) \right), \quad (21)$$

де  $H(\dots)$  – одинична функція Гевісайда.

Невідомі сталі  $N$ ,  $Q_{-l}$ ,  $M_{-l}$ ,  $u_{-l}$ ,  $w_{-l}$ ,  $\vartheta_{-l}$ , а також лінійний зв'язок між  $P$  і  $\Delta$  для кожної з схем, поданих на рис. 8, визначено з конкретної групи крайових умов.

Несучу здатність конструкції центратора оцінено за першою теорією міцності (теорія найбільших нормальних напружень):

$$\sigma_{eq} = \max_x |\sigma(x)| = \max_x \left| \frac{M(x)h}{2J} + \frac{N(x)}{F} \right| \leq [\sigma], \quad (22)$$

де  $[\sigma]$  – допустиме напруження для матеріалу ланки центратора;

$F$ ,  $J$  – площа поперечного перерізу та момент інерції ланки центратора відповідно.

Результати обчислень для схеми 1 на рис. 8, за умови що  $\frac{f}{l} = 0,1$ ,  $\frac{h}{l} = 0,024$ , зображено на рис. 9 та 10.

Аналогічні розрахунки та аналіз графічних залежностей виконано у роботі також для решти схем контактної взаємодії ланки центратора зі стінкою свердловини.

Результати таких розрахунків використано для оцінювання жорсткості конструкції різних схем, зазначених вище:

$$C_1 = 6 \frac{EJ}{l^3} = \frac{1}{2} Eb \left( \frac{h}{l} \right)^3, \quad C_2 = 256 \frac{EJ}{l^3} = \frac{64}{3} Eb \left( \frac{h}{l} \right)^3, \quad C_3 = \frac{96}{7} \frac{EJ}{l^3} = \frac{8}{7} Eb \left( \frac{h}{l} \right)^3,$$

$$C_4 = 288 \frac{EJ}{l^3} = 24 Eb \left( \frac{h}{l} \right)^3, \text{ значення індекса } i \text{ відповідає номеру схеми.}$$

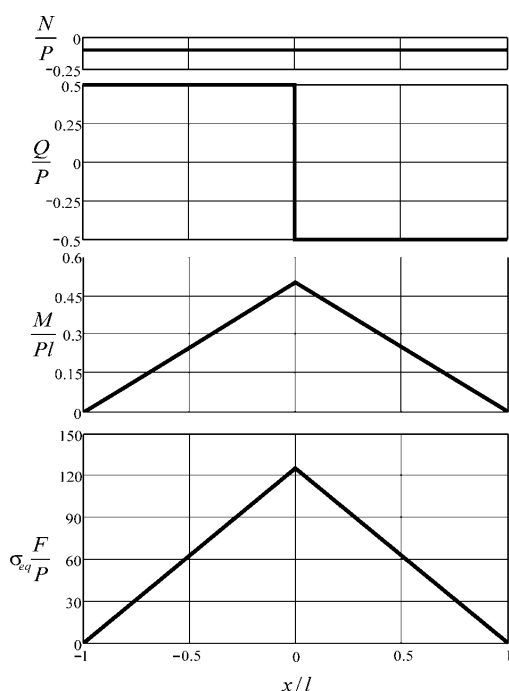


Рисунок 9 – Розподіл тангенціальних і поперечних зусиль, згинальних моментів та еквівалентних напружень у ланці центратора

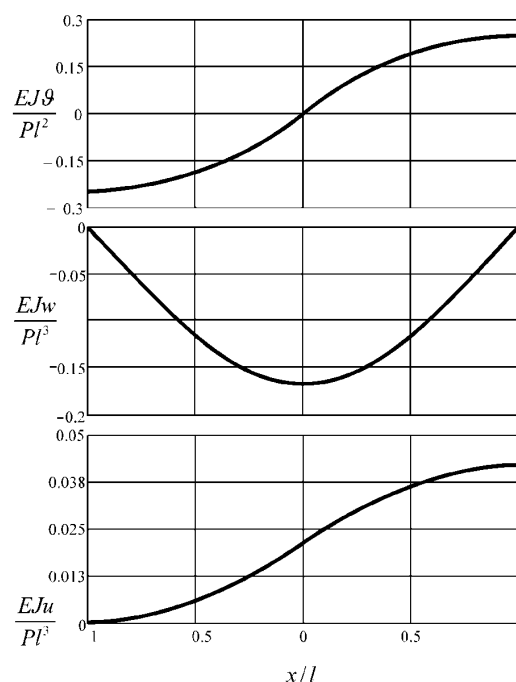


Рисунок 10 – Розподіл кутів повороту, нормальних та тангенціальних переміщень ланки центратора

Порівняльний аналіз різних конструкцій центратора та схем їхніх закріплень на обсадній трубі спонукає до таких висновків. Неможливість взаємного переміщення опор вздовж труби у шарнірному центраторі збільшує

його жорсткість у  $C_2/C_1 = 256/6 \approx 43$  рази. Реальна жорсткість шарнірного центратора з урахуванням сумісної роботи його ланок  $C_u$  лежить у діапазоні  $C_1 \leq C_u \leq C_2$ .

З іншого боку, неможливість взаємного переміщення опор вздовж труби центратора жорсткої конструкції збільшує його жорсткість у  $C_4/C_3 = 288/(96/7) = 21$  раз. Реальна жорсткість такого центратора з необмеженим поздовжнім переміщенням  $C_u = C_3$ , оскільки його ланки не взаємодіють, і відповідно нема потреби у просторовому розрахунку.

Порівнюючи жорсткість ланок за схемами 1 та 3, визначаємо, що центратор з жорстко закріпленими ланками з вільним осьовим переміщенням є жорсткішим за однотипну шарнірну конструкцію в  $C_3/C_1 = (96/7)/6 \approx 2,3$  рази. Аналогічне порівняння для нерухомих у поздовжньому напрямку ланок буде  $C_4/C_2 = 288/256 \approx 1,1$  рази.

У разі обладнання ланок центратора додатковими радіальними упорами, його радіальні переміщення будуть обмеженими, тобто  $\Delta \leq \Delta_0$ , де  $\Delta_0 = f - f_0$ ;  $f_0$  – висота упору. Тоді нелінійна характеристика пружно-жорсткого центратора буде мати такий вигляд:

$$\Delta = \Lambda(P) = \frac{P}{C_u} H\left(\Delta_0 - \frac{P}{C_u}\right) + \Delta_0 H\left(\frac{P}{C_u} - \Delta_0\right). \quad (23)$$

Крім того, у роботі отримано аналітичні оцінки допустимих сил притискання для кожної схеми.

Результати проведених досліджень дають змогу виконувати проектні розрахунки центраторів різних конструкцій та різних схем їх кріплення на обсадній колоні.

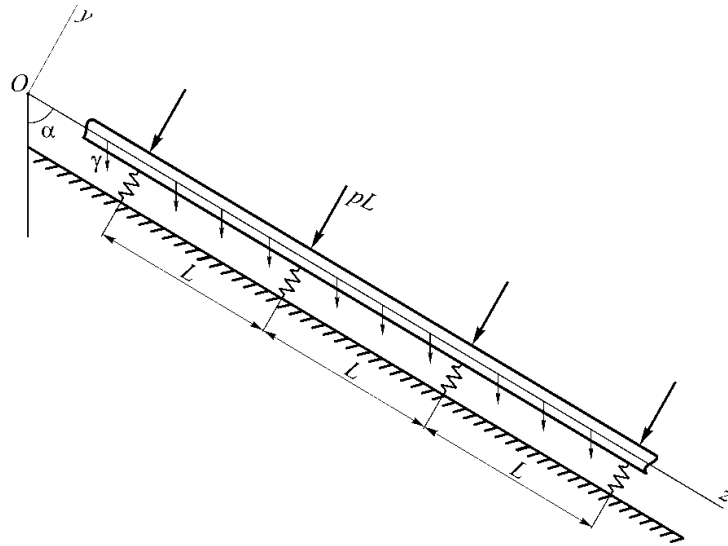
У четвертому розділі розглянуто методологічні засади оснащення обсадних колон центруючими пристроями. Сформульована задача раціонального центрування обсадної колони яка полягає у тому, щоб підібрати віддалі між центраторами так, аби найменший зазор між нею та стінкою свердловини перевищував мінімальну величину, потрібну для якісного цементування. Для цього змодельовано безмежно довгу колону, розміщену на пружно-жорстких опорах, сили ваги якої та притискні зусилля рівномірно розподілені по довжині. Відповідну схему для розрахунку подано на рис. 11.

Враховуючи, що усі ділянки труби перебувають в однакових умовах, сформульовано крайову задачу на періоді:

$$E_\kappa I_\kappa \frac{d^4 y}{dz^4} + q = 0, \quad z \in (0, L); \quad (24)$$

$$y(0) + \Lambda(Q(0) - Q(L) + pL) = 0, \quad M(0) = M(L), \quad \vartheta(0) = \vartheta(L), \quad y(0) = y(L), \quad (25)$$

де  $\vartheta$  – кут повороту перерізу;  $y$  – поперечне переміщення осі колони;  $E_\kappa I_\kappa$  – жорсткість колони на згин.



$z$  – вісь труби;  $L$  – віддаль між центраторами, яку вважаємо значно меншою від радіуса кривини свердловини;  $p$  – розподілена притискна сила;  $pL$  – сила притискання, що припадає на центратор;  $\gamma$  – вага одиниці довжини труби в цементному розчині;  $q = \gamma \sin \alpha$  – поперечна складова сили ваги;  $\alpha$  – зенітний кут

Рисунок 11 – Схема навантаження обсадної труби

Розв'язок задачі (24), (25) виконаний методом початкових параметрів, зокрема знайдено найбільше за модулем переміщення труби, яке спостерігається посередині прольоту:

$$y\left(\frac{L}{2}\right) = -\Lambda((q+p)L) - \frac{qL^4}{384E_{\kappa}I_{\kappa}}. \quad (26)$$

Перший доданок означає просідання центратора під дією сили ваги труби та під дією притискної сили, другий доданок – провисання труби відносно центратора під дією сили ваги.

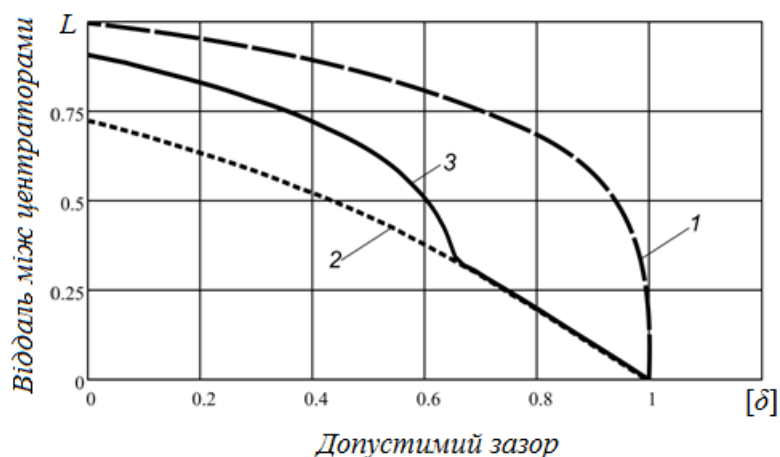
З урахуванням виразу (26) та умови  $\min \delta \geq [\delta]$  отримано обмеження для віддалі між центраторами:

$$\frac{(p+q)L}{C_{\kappa}} H\left(\Delta_0 - \frac{(p+q)L}{C_{\kappa}}\right) + \Delta_0 H\left(\frac{(p+q)L}{C_{\kappa}} - \Delta_0\right) + \frac{qL^4}{384E_{\kappa}I_{\kappa}} \leq \delta_0 - [\delta]. \quad (27)$$

За результатами обчислень отримано графічні залежності віддалі між центраторами від різних величин. Так на рис. 12 подана залежність віддалі між центраторами  $L$  від допустимого зазору  $[\delta]$  для обсадної колони, навантаженої силами власної ваги  $q = \gamma \sin \alpha$  за відсутності додаткового притискання ( $p = 0$ ).

Встановлено, що урахування пружності центраторів зумовлює значне зменшення віддалі між ними, яка в усіх випадках є найменшою для жорсткого центратора (лінія 1) і найбільшою для пружного (лінія 2). Центратор, облаштований додатковим упором, працює у двох областях: збільшує допустиму віддаль між центраторами в діапазоні малих допустимих зазорів  $[\delta] < \delta_0 - \Delta_0$  і не змінює результату, тобто зменшує віддаль між ними, в разі потреби більш якісного центрування (діапазон  $[\delta] > \delta_0 - \Delta_0$ ).





1 – жорсткий центратор, 2 – пружний центратор, 3 – пружно-жорсткий центратор;  
 $\delta_0 = r_{\text{ц}} - r_{\text{к}}$ ;  $\Delta_0$  – максимально можливе радіальне переміщення центратора

Рисунок 12 – Залежності віддалі між центраторами від допустимого зазору у колоні, навантаженої силами власної ваги  $q = \gamma \sin \alpha$  за відсутності додаткового притискання ( $p = 0$ )

У таблиці 1 наведено результати розрахунку віддалі між центраторами для обсадної колони зовнішнім діаметром  $D_{\text{к}} = 146 \text{ мм}$  у похило скерованій свердловині, пробуреної долотом  $D_{\text{д}} = 215,9 \text{ мм}$ . Для заданого коефіцієнта кавернозності  $k_{\alpha} = 1,1$  відповідний середній діаметр свердловин  $D_{\text{с}} = k_{\alpha} D_{\text{д}} = 237,5 \text{ мм}$ . Для пружно-жорсткого центратора прийнято такі параметри: лінійна жорсткість  $C_{\text{ц}} = 5 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$ , стріла підйому  $f = \delta_0$ , переміщення до упору  $\Delta_0 = \delta_0 / 3$ . Додаткова притискна сила дорівнює нулю, а  $q = \gamma \sin \alpha$ ; значення zenітного кута – від  $5^\circ$  до  $90^\circ$  та допустимі зазори  $[\delta] = 0,4\delta_0$  і  $[\delta] = 0,6\delta_0$ .

Таблиця 1 – Необхідна віддаль між центраторами  $L$ , м

Зенітний кут $\alpha$ , град	Діаметри обсадної колони та долота: $D_{\text{к}} = 146 \text{ мм}; D_{\text{д}} = 215,9 \text{ мм}$		Зенітний кут $\alpha$ , град	Діаметри обсадної колони та долота: $D_{\text{к}} = 146 \text{ мм}; D_{\text{д}} = 215,9 \text{ мм}$	
	$[\delta] = 0,6\delta_0$	$[\delta] = 0,4\delta_0$		$[\delta] = 0,6\delta_0$	$[\delta] = 0,4\delta_0$
5	20,0	28,3	50	11,6	16,4
10	16,8	23,8	55	11,4	16,1
15	15,2	21,5	60	11,3	15,9
20	14,2	20,1	65	11,1	15,7
25	13,5	19,1	70	11,0	15,6
30	12,9	18,3	75	11,0	15,5
35	12,5	17,6	80	10,9	15,4
40	12,1	17,1	85	10,9	15,4
45	11,8	16,7	90	10,8	15,4

Для зручності виконання розрахунків за розробленою методикою складено програму у середовищі *Delphi*, яка дозволяє визначити кількість центраторів та віддаль між ними для різних варіантів вихідних даних. Програма адаптована для будь-якої системи Windows та дозволяє виконувати розрахунки у разі просторового викривлення осі свердловини, враховувати додаткову притискову силу, «плаваючу» вагу колони за наявності різних рідин всередині колони та у кільцевому просторі свердловини, жорсткість обсадної колони, жорсткість центратора та його геометричні параметри.

За результатами проведених досліджень розроблено, затверджено та прийнято до використання «Рекомендації щодо застосування пружно-жорстких центраторів для обсадних колон при кріпленні похило скерованих свердловин на родовищах БУ «Укрбургаз».

## ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій на основі виконаних теоретичних та промислових досліджень удосконалено методологічні засади оснащення обсадних колон центруючими пристроями для кріплення похило скерованих свердловин, ускладнених жолобними виробками.

Отримано такі основні результати:

1. На основі аналізу чинних на сьогодні керівних документів, які регламентують виконання технологічних процесів кріплення скерованих свердловин, встановлено наявність різноманітних та недостатньо обґрунтованих підходів щодо оснащення обсадних колон центруючими пристроями. Внаслідок цього погіршується якість виконання процесу цементування похило скерованих свердловин і, як наслідок, знижується довговічність системи кріплення свердловини в цілому.

2. Встановлено причини утворення жолобних виробок на стінках свердловини, їх форми та вплив на прохідність обсадної колони по стволу. Вперше запропоновано модель контактної взаємодії обсадної колони з жолобними виробками різних форм, яка дозволяє оцінити сили опору просуванню колони. Визначено вплив різних чинників на величину зазору між обсадною колоною та стінкою свердловини, мінімальна величина якого має складати не менше 67% від можливого.

3. З використанням багатофакторного аналізу оцінено вплив різних чинників (прогин обсадних труб, zenітний кут, розтягувальна сила, жорсткість обсадних труб, густина рідини всередині колони, густина рідини у кільцевому просторі) на довжину півхвилі згину обсадної колони. Встановлено, що довжина півхвилі згину обсадної колони найбільше залежить від розтягувальної сили та zenітного кута. Причому, довжина півхвилі зростає зі збільшенням величини розтягувальної сили нижче центратора, і зменшується зі збільшенням zenітного кута.

4. Встановлено аналітичні залежності між притисковою силою та взаємним зближенням колони і стінки свердловини, які характеризують жорсткість центратора, а також вирази для визначення максимальних напружень, за якими

оцінюють його міцність. Для розрахунку пружно-жорстких характеристик центраторів вперше створено моделі оснащення обсадної труби центраторами різних типів і схем їх закріплення та за результатами досліджень встановлено закономірності розподілу тангенціальних і поперечних сил, згинальних моментів, еквівалентних напружень, кутів повороту нормальних та тангенціальних переміщень ланки центратора.

5. Сформульовано задачу раціонального центрування обсадної колони з умови забезпечення мінімально допустимого зазору між колоною та стінкою свердловини. Встановлено, що упор центратора за умови його достатньої міцності може гарантувати достатній зазор при значних навантаженнях колони. Проведено розрахунки віддалі між пружно-жорсткими центраторами для різних діаметрів обсадних колон і величин допустимого зазору, які підтверджують отримані закономірності.

6. Для підвищення якості робіт з кріплення свердловин розроблено «Рекомендації щодо застосування пружно-жорстких центраторів для обсадних колон при кріпленні похило скерованих свердловин на родовищах БУ «Укрбургаз», які затверджені та прийняті до впровадження. Складено програму у середовищі *Delphi* для визначення віддалі між центраторами та їх кількості і розроблено конструкцію пружно-жорсткого центратора обсадної колони, яка захищена патентом України.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті, в яких опублікуванні основні результати дисертації

1. Коцкулич Я.С., Ковбасюк І.М., Марцинків О. Б., Палійчук І.І., Витвицький І.І. Розрахунок обсадних колон при складному навантаженні. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2011. №4 (30). С.16–20.
2. Коцкулич Я.С., Сенюшкович М.В., Марцинків О.Б., Витвицький І.І., Білецький Я.С. Особливості проектування обсадних колон для кріплення похило скерованих свердловин. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2012. №1 (31). С. 29–34.
3. Шацький І.П., Білецький Я.С., Витвицький І.І. Двобічні оцінки жорсткості і міцності центратора обсадної колони. Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. Вип. 1(43). 2014. С. 68–73.
4. Коцкулич Я.С., Сенюшкович М.В., Марцинків О.Б., Витвицький І.І. Центрування обсадних колон у похило скерованих свердловинах. Науковий вісник національного гірничого університету. м. Дніпропетровськ. 2015. № 3(147). С. 23–30.
5. Vytvytskyi I. I., Seniushkovych M. V. , Shatskyi I. P. Calculation of distance between elastic-rigid centralizers of casing. Scientific Bulletin of National Mining University Scientific and technical journal Dnipro. 2017. № 5(161). P. 29–35.

### Тези наукових конференцій

6. Білецький Я.С., Витвицький І.І., Шацький І.П. Розрахункові схеми для оцінювання жорсткості та міцності центраторів обсадної колони. Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 3–6 жовт. 2012 р.). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. С. 84–85.

7. Витвицький І. І., Шацький І.П. Про взаємодію колони з жолобом свердловини. Нафтогазова енергетика 2013: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 7–11 жовт. 2013 р.). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. С. 136–137.

8. Шацький І.П., Білецький Я.С., Витвицький І.І. Двобічні оцінки жорсткості та міцності центратора обсадної колони. Актуальные проблемы инженерной механики. Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. (10–14 марта 2014 г., Одесса). Общ. ред. – Н.Г.Сурьянинов. – Одесса: ТЭС, 2014. – С. 47–48.

9. Shatskyi I., Velychkovych A., Vytvytskyi I., Seniushkovych M., Dutkiewicz M. Analytical study of mechanical properties of rod-like centralizers for casing tubes. Physical & Chemical Geotechnologies – 2018: Mater. Int. Sci. & Pract. Conf. (Program of reports). – Дніпро: НТУ «ДП», 2018. – Р. 234.

### Патенти

10. Пат. №53679 Україна, МПК E21B 17/08. Самоорієнтовний центратор для обсадних колон вертикальних і похило скерованих свердловин. Білецький Я.С., Білецький М.С., Коцкулич Я.С., Колос І.Я., Сенюшкович М.В., Витвицький І.І. № u201005438; заявл. 05.05.2010; опуб. 11.10.2010, Бюл. №19.

### АНОТАЦІЯ

Витвицький І. І. Удосконалення технології центрування обсадних колон у похило скерованих свердловинах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.15.10 – Буріння свердловин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2018.

Дисертація присвячена удосконаленню технології центрування обсадних колон у похило скерованих свердловинах з метою підвищенню рівня надійності їх кріплення.

Розроблено модель контактної взаємодії обсадної колони з жолобними виробками різних форм, яка дозволяє оцінити сили опору просуванню колони та визначено вплив різних чинників на величину зазору між обсадною колоною та стінкою свердловини.

Отримано аналітичні залежності між притисковою силою та взаємним зближенням колони і стінки свердловини, які характеризують радіальну жорсткість центратора, а також вирази для визначення максимальних напружень, за якими оцінюють його міцність. Для розрахунку пружно-

жорстких характеристик центраторів вперше створено моделі оснащення обсадної труби центраторами різних типів та схем їх закріплення.

Сформульовано задачу раціонального центрування обсадної колони з умови забезпечення мінімально допустимого зазору між колоною та стінкою свердловини. Проведено розрахунки віддалі між пружно-жорсткими центраторами для різних варіантів конструкцій свердловин та величин допустимого зазору, які підтверджують отримані закономірності.

Складено програму у середовищі *Delphi* для визначення віддалі між центраторами та їх кількості і розроблено «Рекомендації щодо застосування пружно-жорстких центраторів для обсадних колон при кріпленні похило скерованих свердловин на родовищах БУ «Укрбургаз».

**Ключові слова:** похило скерована свердловина, кріплення, обсадна колона, ефективність центрування, центратор, конфігурація ствола свердловини, кільцевий зазор, жолобна виробка, прохідність обсадної колони.

## SUMMARY

Vytvytskyi I.I. Improvement of the centering technology of casing strings in directional wells. – Manuscript.

Thesis for the Candidate's degree (PhD) in Engineering by the specialty 05.15.10 – Well drilling. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2018.

The thesis is devoted to the problem of improvement of the centering technology of casing strings in directional wells in order to increase the level of reliability of their casing.

The model of contact interaction of a casing string with key seat of different forms is developed, which allows for estimating forces of resistance of the column advance; the influence of various factors on the size of the gap between the casing and the well wall is determined.

The analytical dependences between the clamping force and the mutual approximation of the string and the well wall, which characterize the radial rigidity of the centralizers, as well as the expressions for determining the maximum stresses, by which its strength is evaluated, are obtained. For calculating the elastically rigid characteristics of centralizers models of equipping of a casing with centralizers of different types and their fastening schemes have for the first time been created.

The problem of rational centering of the casing string with the condition of providing the minimum allowable gap between the column and the well wall is formulated. The calculations of distance between elastically rigid centralizers for different variants of well designs and sizes of permissible gap, which confirm the received regularities, are carried out.

A program for determining the number of centralizers and distance between them has been developed in the Delphi environment. "Recommendations for the use of elastically rigid centralizers for casing of directional wells on the fields of Ukrbuzhaz have been elaborated.

**Keywords:** directional well, casing, casing string, centering efficiency, centralizer, borehole configuration, annular gap, key seat, casing advance.

### АННОТАЦИЯ

Витвицкий И. И. Усовершенствование технологии центрирования обсадных колонн в наклонно направленных скважинах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.15.10 – Бурение скважин. – Иваново-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Иваново-Франковск, 2018.

Диссертация посвящена усовершенствованию технологии центрирования обсадных колонн в наклонно направленных скважинах с целью повышения уровня надежности их крепления.

Проанализировано состояние сооружения наклонно направленных скважин на отдельных месторождениях ДДв и установлено, что одной из причин снижения надежности их крепления являются недостаточно обоснованные подходы по оборудованию обсадных колонн центрирующими устройствами. Практика бурения наклонно направленных скважин свидетельствует, что ее ствол практически всегда имеет сложную конфигурацию вследствие образования желобных выработок. Рассмотрены причины образования желобных выработок на стенках скважины и факторы, влияющие на их форму и размеры.

Для оценки сил сопротивления предложена модель контактного взаимодействия центратора с желобом скважины различных форм. Роль центраторов, как средства повышения качества крепления скважины на практике может быть нивелирована снижением проходимости колонны на сложных интервалах и, как следствие, появлением рисков недопуска колонны.

По результатам исследований установлены зависимости сил сопротивления продвижению колонны от соотношения размеров скважины и колонны, от локальных параметров формы желоба (особенно от конфигурации его устья). Показано, что через немонотонную зависимость этих сил от радиуса колонны, введение центратора неоднозначно сказывается на проходимости колонны: в случае попадания колонны в желоб центратор ухудшает ее проходимость, зато при взаимодействии колонны с устьем желоба возможно значительное снижение сил сопротивления за счет устранения арочного (клинового) эффекта из-за вывода центратором колонны из желоба.

Определено влияние различных факторов на величину минимально необходимого зазора между обсадной колонной и стенкой скважины. Проведен многофакторный анализ для оценки влияния различных факторов на величину длины полуволны прогиба обсадной колонны.

На основании решений контактных задач установлены аналитические зависимости между прижимной силой и взаимным сближением колонны и стенки скважины, характеризующие радиальную жесткость центратора, а также выражения для максимальных напряжений, служащие для оценки его прочности.

Значительное влияние на указанные характеристики имеет способ закрепления звена центратора вдоль оси трубы, в частности, решающими являются наличие или отсутствие свободы взаимного перемещения концов звена в аксиальном направлении. Для этих двух случаев получены зависимости, которые можно использовать для двусторонней оценки жесткости и прочности конструкций шарнирного и жесткого центрирующих устройств.

Сформулирована задача рационального центрирования обсадной колонны из условия обеспечения минимально допустимого зазора между колонной и стенкой скважины. Показано влияние величин нагрузок и проиллюстрировано роль жесткого упора в рассматриваемой задаче. В частности, установлено, что упор центратора при его достаточной прочности может гарантировать достаточный зазор при значительных нагрузках колонны. Проведены расчеты расстояния между упруго-жесткими центраторами для различных вариантов конструкций скважин и величин допустимого зазора, подтверждающие полученные выше закономерности.

Для удобства выполнения расчетов по разработанной методике составлена программа в среде Delphi которая позволяет определить количество центраторов и расстояние между ними для любого варианта исходных данных.

За результаты проведенных исследований разработаны, утверждены и приняты к использованию «Рекомендации по применению упруго-жестких центраторов для обсадных колонн при креплении наклонно направленных скважин на месторождениях БУ «Укрбургаз».

Разработана конструкция упруго-жесткого центратора обсадной колонны, которая защищена патентом Украины.

Ключевые слова: наклонно направленная скважина, крепление, обсадная колонна, эффективность центровки, центратор, конфигурация ствола скважины, кольцевой зазор, желобная выработка, проходимость обсадной колонны.

Підписано до друку 05.03.2019 р.  
Формат 60x84 1/16. Умов. друк. арк. 0,9.  
Папір офсетний. Гарнітура “Times New Roman”.  
Друк цифровий. Зам № 704.  
Тираж 100 примірників.



Видавець Кушнір Г. М.  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів  
видавничої продукції: серія ІФ №31 від 26.01.2009 р.  
76000, м. Івано-Франківськ, вул. Шота Руставелі, 1,  
тел. (099) 700-47-45, e-mail: kgm.print@i.ua