

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

ФАФЛЕЙ ОЛЕГ ЯРОСЛАВОВИЧ



УДК 622.24.05

**ПІДВИЩЕННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ДВООПОРНИХ ЗАМКОВИХ
РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ**

05.05.12 – машини нафтової та газової промисловості

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2021

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
Артим Володимир Іванович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу, завідувач кафедри
будівництва та енергоефективних споруд.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Харченко Євген Валентинович,
Національний університет «Львівська
політехніка», завідувач кафедри опору
матеріалів та будівельної механіки;

кандидат технічних наук
Добровольський Ігор Володимирович,
ПрАТ «Укргазвидобуток»,
головний механік.

Захист відбудеться 22 квітня 2021 року о 13⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, 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, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий 20 березня 2021 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04
доктор технічних наук, доцент



А. П. Джус

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сьогодні у світі значна увага приділяється спорудженню глибоких і надглибоких свердловин. При цьому першочергового значення набуває забезпечення високої роботоздатності і надійності елементів бурильних колон, оскільки їх вартість у цьому випадку прирівнюється до вартості бурової установки. Найслабшим місцем бурильних колон залишаються замкові різьбові з'єднання (ЗРЗ), присутні в бурильних трубах, обважнених бурильних трубах (ОБТ), в бурильних інструментах та вибійних двигунах. Відповідно до статистичних даних 80% всіх аварій із ЗРЗ пов'язані з їх втомним руйнуванням. Процес ліквідації аварій, зокрема пов'язаних із руйнуванням ЗРЗ, є високовартісним, тому очевидно, що дослідження опору втомі ЗРЗ та пошук шляхів його підвищення є актуальним завданням, що потребує вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до “Енергетичної стратегії України на період до 2030 року” (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 24.07.13 р. № 1047-р) та базується на результатах науково-дослідних тематик:

– 79/6-28-17 «Розроблення і обґрунтування конструкції двоопорного різьбового з'єднання обважнених бурильних труб» (Державний реєстраційний номер № 0117U003370), у якій здобувач брав безпосередню участь.

– ДМ 2-19-П «Розроблення методології фрактодіагностування з урахуванням структурної неоднорідності високоміцних полікристалічних матеріалів для військово-промислового та нафтогазового комплексів» (РК 0119U000169).

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні втомної міцності двоопорних ЗРЗ елементів бурильної колони шляхом розроблення їх нових конструкцій з врахуванням напружено-деформованого стану та впливу асиметрії циклічного навантаження за напружень розтягу на тріщиностійкість матеріалу труб.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

– провести аналіз причин відмов елементів бурильної колони, огляд існуючих методів розрахунку їх довговічності та методик визначення моменту згвинчування, а також аналіз існуючих конструкцій ЗРЗ ОБТ;

– сформулювати комплекс методик для досліджень тріщиностійкості, імітаційного параметричного моделювання, розрахунку моменту згвинчування та експериментального дослідження ЗРЗ;

– дослідити особливості формування напружено-деформованого стану одноопорного та двоопорного ЗРЗ ОБТ та на основі отриманих результатів вдосконалити їх конструкції з метою підвищення втомної міцності;

– оцінити вплив асиметрії циклічного навантаження за напружень розтягу на швидкість поширення втомних тріщин матеріалу труб;

– провести апробацію отриманих наукових результатів.

Об'єкт досліджень – напружено-деформований стан і втомна міцність елементів бурильної колони.

Предмет дослідження – конструктивні способи і методи підвищення втомної міцності замкових різьбових з'єднань елементів бурильної колони.

Методи досліджень: комплексне застосування фізичного, математичного та комп'ютерного моделювання об'єктів дослідження для підтвердження адекватності отриманих результатів. Основні положення дисертаційної роботи, що складають наукову новизну, науково обґрунтовано із залученням математичних методів. Для підтвердження адекватності отриманих теоретичних результатів застосовано експериментальні методи досліджень.

Положення, що виносяться на захист:

1. Оцінка процесу формування напружено-деформованого стану ЗРЗ ОБТ залежно від їх конструктивних особливостей для підвищення втомної міцності з використанням програмних продуктів, що базуються на методі кінцевих елементів (МКЕ).

2. Оцінка впливу асиметрії циклічного навантаження за напружень розтягу на швидкість поширення втомних тріщин матеріалу елементів бурильних колон.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримані такі наукові результати:

– удосконалено метод розрахунку моменту згвинчування двоопорного ЗРЗ ОБТ з урахуванням впливу додаткового опорного торця ніпеля і муфти у його конструкції та зміни коефіцієнта тертя;

– удосконалено модель для автоматизованого проектування конструкцій двоопорних ЗРЗ ОБТ;

– вперше досліджено вплив конструктивних елементів розроблених двоопорних ЗРЗ ОБТ при дії моменту згвинчування на їх напружено-деформований стан та тріщиностійкість з урахуванням розкиду значень натягу на опорних торцях;

– вперше оцінено вплив асиметрії циклічного навантаження за напружень розтягу на швидкість поширення втомних тріщин матеріалу труб.

Практичне значення одержаних результатів:

– вибрано оптимальні геометричні параметри двоопорних ЗРЗ ОБТ за результатами дослідження впливу конструктивних елементів на їх напружено-деформований стан (патент № 125921, патент № 125922, патент № 125915, патент № 137086);

– удосконалено методику розрахунку моменту згвинчування двоопорного ЗРЗ ОБТ (впроваджено на підприємстві ДП "Завод обважнених бурильних та ведучих труб");

– розроблено удосконалені конструкції двоопорних замкових різьбових з'єднань ОБТ (впроваджено на підприємстві ДП "Завод обважнених бурильних та ведучих труб");

– удосконалена модель для автоматизованого проектування конструкцій двоопорних ЗРЗ ОБТ, що дає змогу спростити розроблення інших типорозмірів різьб аналогічної конструкції.

Особистий внесок здобувача.

Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В опублікованих у співавторстві роботах автором особисто:

– досліджено розподіл напружень по впадинах витків двоопорного замкового різьбового з'єднання ОБТ під дією моменту згвинчування [2, 3, 10, 12, 13];

– досліджено вплив конструктивних елементів двоопорних замкових різьбових з'єднань обважнених бурильних труб на їх напружено-деформований стан та вибрано оптимальні геометричні параметри ЗРЗ [1, 2, 13, 14, 15];

– розроблено конструкції двоопорних ЗРЗ для зменшення концентрації напружень в небезпечних зонах за трьома конструктивними рішеннями [5, 6, 7, 8];

– оцінено вплив асиметрії циклічного навантаження за напружень розтягу на швидкість поширення тріщин в матеріалі труб [4, 9, 11].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції “Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій” присвяченій 55-річчю заснування ТНТУ та 170- річчю з дня народження Івана Пулюя (м. Тернопіль, 19–21 травня 2015 р.), II Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції “Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі” (Кривий Ріг, 2017 р.), Міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні” (м. Дніпро, 29 березня 2018 р.), II Міжнародній науково-технічній конференції “Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE” (Івано-Франківськ, 24-27 квітня 2018 р.), Науково-практичному семінарі "Графічна освіта у закладах вищої освіти: стан та перспективи" (Івано-Франківськ, 19-21 вересня 2018 р.), International Scientific and Practical Conference “Problems and prospects of implementation of innovative research results” (Valletta, Republic of Malta, December 13 2019.), International Multidisciplinary Scientific and Practical Conference “The results of scientific mind's development” (Seoul, South Korea December 22 2019.).

У повному обсязі результати досліджень доповідалися на наукових семінарах кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертаційній роботі, опубліковано 15 наукових праць, у тому числі 3 статті (одна одноосібна) у фахових журналах України, 1 закордонна у журналі, який входить до наукометричної бази (Index Copernicus), 7 тез конференцій та 4 патенти України на корисні моделі.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 136 найменувань на 15 сторінках, а також 7 додатків на 27 сторінках. Робота містить 16 таблиць та

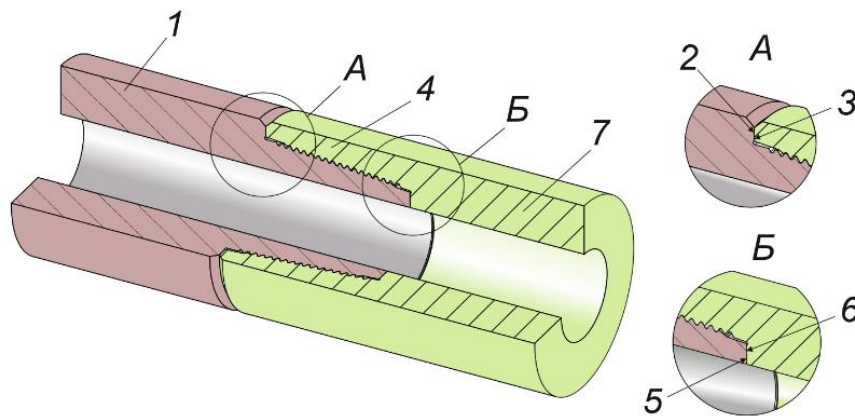
95 рисунків. Основний зміст дисертації викладений на 129 сторінках, загальний обсяг дисертація становить 171 сторінку.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, вказано мету роботи, завдання та методи дослідження, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, а також зазначено місця апробації роботи.

У **першому розділі** проаналізовано умови роботи елементів бурильної колони та встановлено причини їх відмов, які пояснюються втомними, корозійно-втомними пошкодженнями і недосконалістю конструкцій одноопорних ЗРЗ. Це вказало на необхідність проведення аналізу методів оцінки втомного і корозійно-втомного пошкодження ЗРЗ елементів бурильних колон та вдосконалення їх конструкцій.

Зважаючи на тенденції зростання глибин та спорудження свердловин із складним профілем і високою інтенсивністю набору кривизни, застосування одноопорних ЗРЗ є аварійно-небезпечним, оскільки міцність таких ЗРЗ є меншою міцності тіла труби. Для підвищення втомної міцності при одночасній дії моментів кручення, згину та осьового навантаження, сьогодні у світовій практиці спорудження свердловин починають застосовувати двоопорні ЗРЗ (рис. 1).



1 – ніпель; 2 – опорний уступ ніпеля; 3 – опорний торець муфти;
4 – замкова різьба; 5 – опорний торець ніпеля;
6 – опорний уступ муфти; 7 – муфта

Рисунок 1 – Схема двоопорного замкового з'єднання

Двоопорна конструкція ЗРЗ містить основну зовнішню опору (складається із опорного уступу ніпеля 2 та опорного торця муфти 3), що служить поверхнею ущільнення з'єднання, і додаткову внутрішню опору (складається з опорного уступу муфти 6 та опорного торця ніпеля 5), яка забезпечує додатковий опір прикладеному крутному та згинному моментам. Конструкції таких з'єднань мають різьбу як і стандартні з'єднання (одноопорні ЗРЗ).

Аналізуючи конструкції двоопорних ЗРЗ елементів бурильних колон світових виробників, можна виділити їхні переваги порівняно з одноопорними:

- більший момент згвинчування;
- можливість передачі вищого крутного моменту;
- вища стійкість до згального моменту;
- запобігання заклинюванню ЗРЗ при максимальних моментах кручення;
- вища втомна міцність;
- застосовуються для спорудження свердловин із складним профілем і високою інтенсивністю набору кривизни;
- кращі гідравлічні характеристики (менший гідравлічний опір руху промивальної рідини; зниження турбулентності);
- взаємозамінність із стандартними одноопорними ЗРЗ.

Проте, виходячи з проаналізованих джерел інформації, невідомими залишаються особливості конструкцій елементів цих ЗРЗ та сумнівними зазначені виробниками їх характеристики (величини крутних моментів та моментів згвинчування).

Проведено аналіз методик розрахунку моменту згвинчування різьбових з'єднань та встановлено, що основна методика, яка застосовується для одноопорних ЗРЗ як за кордоном, так і в Україні, наведена у стандарті API-7G-2. Вона найповніше враховує параметри різьби, але її застосування для розрахунку двоопорних ЗРЗ є неможливим без вдосконалення, яке повинно враховувати вплив на момент згвинчування конструктивних параметрів додаткової внутрішньої опори.

Попри значну кількість проведених в області забезпечення надійної роботи бурильної колони досліджень, на сьогодні відсутні досконалі методики оцінки втомної та корозійно-втомної довговічності елементів бурильних колон, які б дали змогу враховувати особливості їх експлуатаційного навантажування.

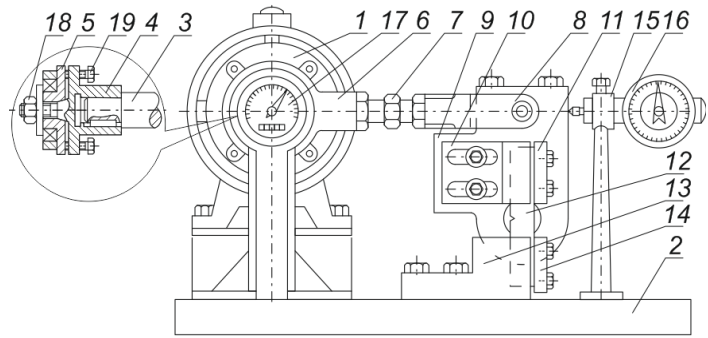
За результатами проведеного аналізу сформульовано мету дисертаційної роботи та завдання досліджень, необхідні для досягнення поставленої мети.

У другому розділі наведено методику оцінки тріщиностійкості матеріалу елементів бурильних колон із використанням установки УДПТ-1 (рис. 2). Пропонована методика дає можливість враховувати вплив асиметрії циклічного навантаження за напружень розтягу на швидкість поширення тріщин в матеріалі труб.

Проаналізовано можливі варіанти прикладання моменту згвинчування до ЗРЗ, що можуть бути застосовані при виконанні імітаційних досліджень за допомогою САЕ-систем. Вибрано варіант "гарячої посадки" та обґрунтовано доцільність використання осесиметричної моделі ЗРЗ. Наведено алгоритм виконання оптимізаційного імітаційного моделювання двоопорного ЗРЗ.



а)



б)

а) – загальний вигляд; б) – схема установки; 1 – електродвигун; 2 – плита; 3 – вал;
4 – кривошип; 5 – ексцентрикова втулка; 6 – шатун; 7 – тяга; 8 – вилка; 9 – планшайба;
10 – рухомий затискач; 11 – планка; 12 – зразок для дослідження; 13 – нерухомий затискач;
14 – гайка; 15 – стійка; 16 – індикатор; 17 – лічильник; 18 – гайка; 19 – болти

Рисунок 2 – Установка для дослідження поширення тріщин

Удосконалено методику розрахунку рекомендованого та максимального моменту згвинчування двоопорного ЗРЗ шляхом введення у формули (1) та (2)

доданків $\frac{SA}{12} \cdot p l \cdot R_{s1} f_1$ та $\frac{Y_m A}{12} \cdot p l \cdot R_{s1} f_1$ відповідно, які враховують вплив на момент згвинчування конструктивних параметрів додаткової внутрішньої опори (рис. 3).

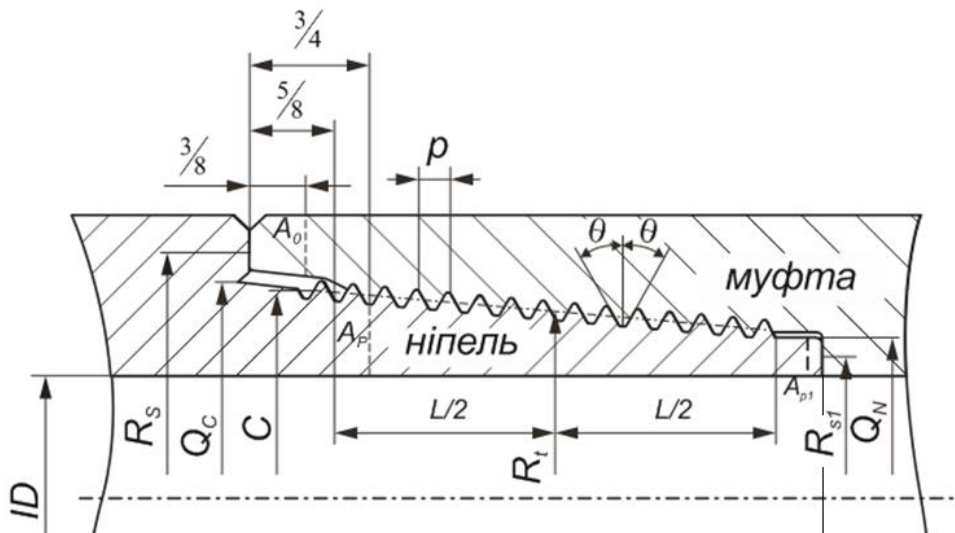


Рисунок 3 – Розрахункова схема двоопорного ЗРЗ

Рекомендований момент згвинчування T двоопорного ЗРЗ визначається:

$$T = \frac{SA}{12} \left(\frac{p}{2\pi} + \frac{R_t f}{\cos \theta} + R_s f \right) + \frac{SA}{12} p l \cdot R_{s1} f_1. \quad (1)$$

Максимальний момент згинчування T_y двоопорного ЗРЗ визначається:

$$T_y = \frac{Y_m A}{12} \left(\frac{p}{2\pi} + \frac{R_t f}{\cos \theta} + R_s f \right) + \frac{Y_m A_{p1}}{12} \cdot R_{s1} f, \quad (2)$$

де S – допустиме напруження для матеріалу, з якого виготовлено ЗРЗ ($S = Y_m/k$, Y_m – границя плинності; k – коефіцієнт запасу міцності для двоопорного ЗРЗ ОБТ); p – крок різьби; f – коефіцієнт тертя на бічних поверхнях витків різьби й основному опорному торці ніпеля та муфти ($f = 0,08 \dots 0,10$, згідно стандарту API 7G-2 приймається $f = 0,08$); f_1 – коефіцієнт тертя на додатковому опорному торці ніпеля та муфти, $f_1 = 0,08 \dots 0,15$; θ – половина кута профілю різьби; R_s – середній радіус контактної поверхні основної опори (опорного уступу ніпеля та опорного торця муфти); R_t – середній радіус різьби; R_{s1} – середній радіус контактної поверхні додаткової опори; A – площа поперечного перерізу A_b (муфти) або A_p (ніпеля) (у розрахунках приймається менше зі значень A_b або A_p); A_{p1} – площа поперечного перерізу додаткової опори (опорного торця ніпеля).

За удосконаленою методикою, рекомендований момент згинчування для двоопорного ЗРЗ порівняно із одноопорним збільшується на 48,58% для з'єднань з розвантажувальною канавкою та на 46,61% для з'єднань без розвантажувальної канавки.

Для підтвердження працездатності розробленої конструкції двоопорного ЗРЗ створено програму та методику експериментальних досліджень натурального зразка.

В третьому розділі досліджено напружено-деформований стан одноопорного та двоопорного ЗРЗ елементів бурильної колони за допомогою імітаційного моделювання. У двоопорному ЗРЗ розподіл напружень по впадинах витків різьби є рівномірнішим, ніж у одноопорного з'єднання, причому величина напружень у першій впадині витка різьби ніпеля у двоопорному з'єднанні є на 15 % меншою, а у останній впадині – більшою на 55 %. Величини напружень по впадинах середніх витків різьби є також вищими у двоопорному ЗРЗ на 35 %, що, в свою чергу, позитивно вплине на тривалість експлуатації такого з'єднання при дії знакозмінних навантажень.

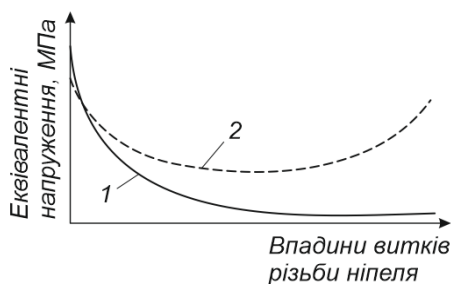


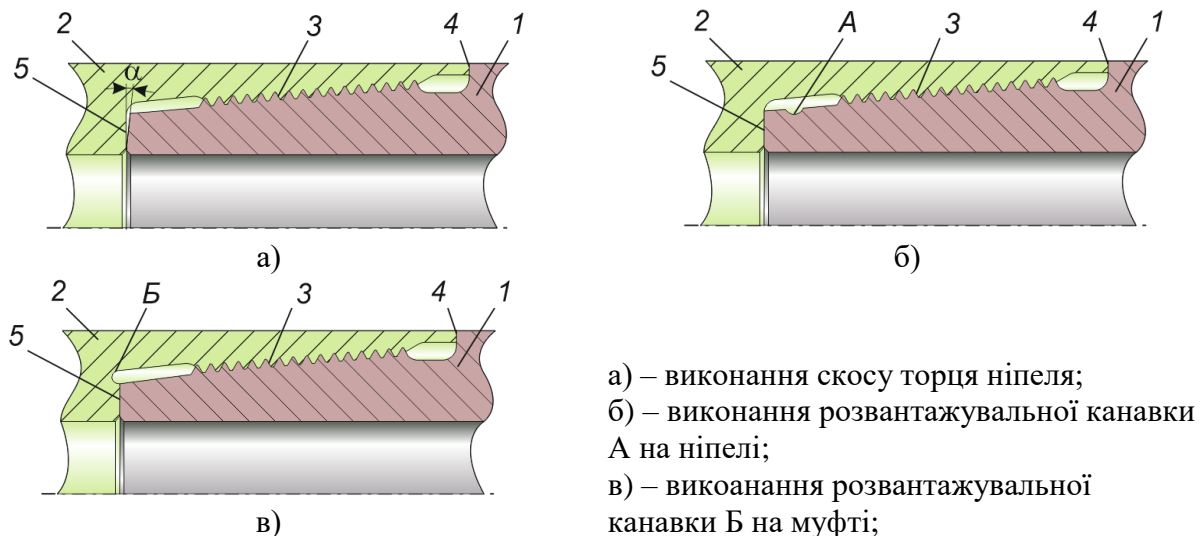
Рисунок 4 – Узагальнені графічні залежності розподілу еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля

руйнування під час експлуатації. Тому для зменшення або зміни локалізації напружень у зоні додаткового опорного торця ЗРЗ запропоновано та досліджено

На рисунку 4 наведено отримані узагальнені графічні залежності розподілу еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля одноопорного (крива 1) та двоопорного (крива 2) ЗРЗ. Проте, у досліджуваному двоопорному ЗРЗ спостерігається концентрація максимальних напружень в зоні додаткового опорного торця муфти, що є небажаним, оскільки призведе до її руйнування під час експлуатації. Тому для зменшення або зміни локалізації напружень у зоні додаткового опорного торця ЗРЗ запропоновано та досліджено

три різні варіанти його виконання, які зображені на рисунку 5. Найкращим є варіант із скосом додаткового опорного торця ніпеля. Визначено оптимальне значення скосу, що становить $\alpha = 0,3$ градуси (рис. 5, а).

Досліджено вплив розміщення основної площини різьби ЗРЗ та встановлено, що похибка при виготовленні призведе до значної концентрації напружень по впадинах витків різьби, і, як наслідок, до зменшення контактного тиску на поверхнях торців ніпеля та муфти. Результатом цього буде руйнування з'єднання за малої кількості циклів його роботи.



- а) – виконання скосу торця ніпеля;
 б) – виконання розвантажувальної канавки А на ніпелі;
 в) – виконання розвантажувальної канавки Б на муфті;

1 – ніпель; 2 – муфта; 3 – з'єднання різьб напеля та муфти;
 4 – основний опорний торець, 5 – додатковий опорний торець

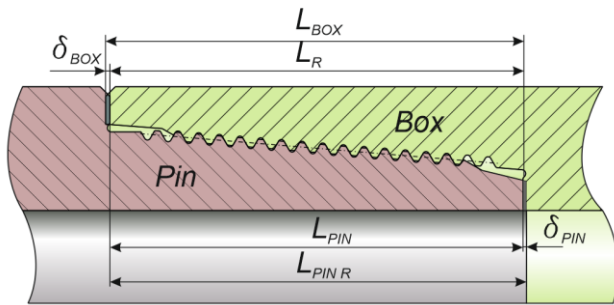
Рисунок 5 – Варіанти виконання додаткового опорного торця ніпеля та муфти ЗРЗ

Для розроблення двоопорних ЗРЗ інших типорозмірів удосконалено модель для автоматизованого проектування у САЕ-системах, яка дає можливість зберігати геометричні параметри елементів муфти під час визначення необхідних довжин ніпеля L_{PIN} для забезпечення відповідного натягу в зоні додаткового опорного торця. Особливостями удосконаленої моделі для проектування є поєднання між собою ескізів різьби ніпеля та муфти за допомогою спряжень, застосування таблиці геометричних параметрів та керуючих розмірів L_R і L_{PIN} (рис. 6).

Застосування параметричного моделювання за розробленою методикою автоматизованого проектування двоопорних замкових різьбових з'єднань ОБТ дало змогу скоротити час на його виконання, підвищити ефективність проектування аналогічних конструкцій з великою кількістю змінних параметрів.

Для зменшення впливу точності виготовлення елементів двоопорних ЗРЗ ОБТ (від сотих до десятих міліметра) на ефективність їх експлуатації запропоновано встановити пружні елементи 6, 7 з оптимальною величиною кутів 55° (рис. 7), значення яких встановлено за допомогою імітаційного моделювання. Це дає змогу створювати необхідні осьові навантаження як на внутрішні так і на зовнішні опорні стики та збереження їх співвідношення протягом всього періоду

експлуатації. Ці пружні елементи можна застосовувати під час ремонту двоопорних ЗРЗ ОБТ, що дасть змогу продовжити термін експлуатації ОБТ із такими замками.



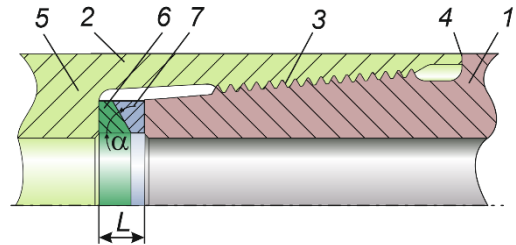
L_{BOX} – довжина муфти;

L_{PIN} – довжина ніпеля; L_R – керуючий розмір;

δ_{BOX} – величина перекриття муфти;

δ_{PIN} – величина перекриття ніпеля

Рисунок 6 – Модель для проектування ЗРЗ



1 – ніпель; 2 – муфта; 3 – з'єднання різьб ніпеля та муфти; 4 – основний опорний торець; 5 – додатковий опорний торець; 6, 7 – пружні елементи

Рисунок 7 – Двоопорне різьбове з'єднання із встановленим пружним елементом

У четвертому розділі за допомогою удосконаленої моделі для автоматизованого проектування конструкцій двоопорних ЗРЗ ОБТ визначено оптимальні довжини ніпельної частини додаткової опори з'єднань різьби типу NC50 та NC55 чотирнадцяти типорозмірів. З метою застосування отриманих результатів при розробленні інших типорозмірів різьб аналогічної конструкції виведено безрозмірний уніфікаційний коефіцієнт K_F та побудовано його залежності від величини перекриття ніпеля та муфти у зоні додаткового опорного торця δ_{PIN} (рис. 8 та 9).

Уніфікаційний коефіцієнт K_F визначається:

$$K_F = \frac{S_{op}}{S_{do}} \quad (3)$$

де S_{op} – площа контакту торця ніпеля та муфти основної опори з'єднання;

S_{do} – площа контакту торця ніпеля та муфти додаткової опори з'єднання.

Встановлено, що із зростанням уніфікаційного коефіцієнта K_F збільшується величина δ_{PIN} .

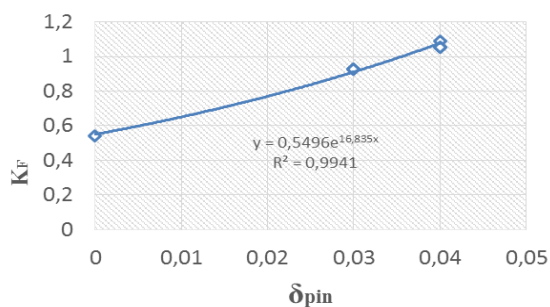


Рисунок 8 – Залежність δ_{PIN} від K_F для різьби типу SIF50 (NC50)

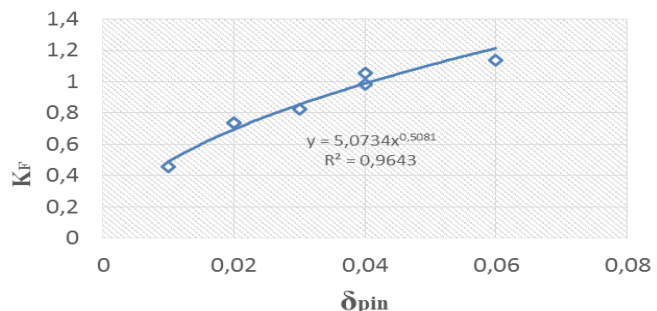
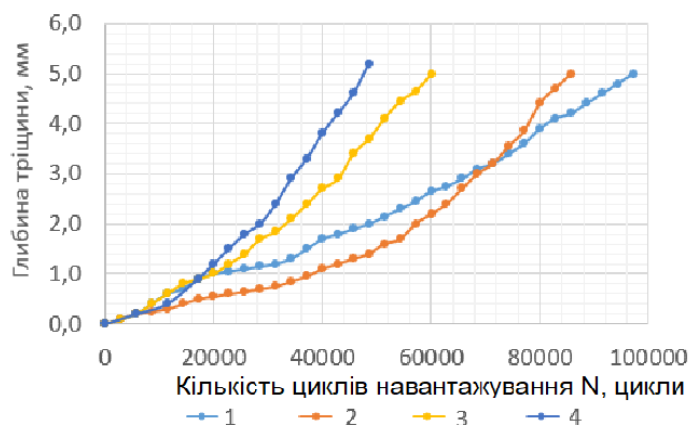


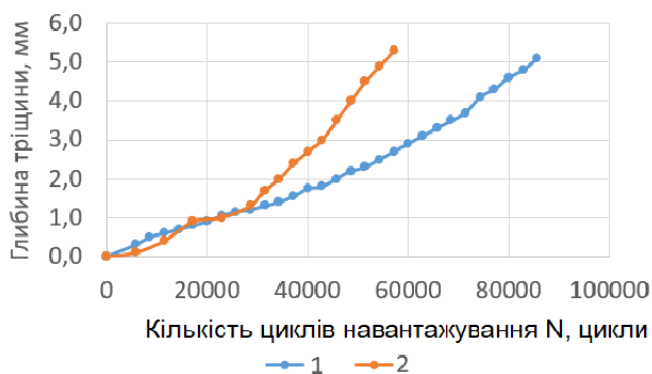
Рисунок 9 – Залежність δ_{PIN} від K_F для різьби типу SIF55 (NC55)

На основі положення механіки руйнування та методики тріщиностійкості проведено експериментальні дослідження кінетики поширення втомних тріщин матеріалу труб з врахуванням впливу асиметрії навантаження за напружень розтягу. Дослідження проводили у два етапи. Згідно першого етапу навантаження отримана закономірність для двох груп сталей G105 та 40XH, а саме із збільшенням асиметрії навантаження кількість циклів напрацювання зменшується (рис. 10, 11 (де a – амплітуда навантаження, R – коефіцієнт асиметрії)).



1 – при $a=0,45$ мм, $R=0$; 2 – при $a=0,45$ мм, $R=0,18$;
3 – при $a=0,45$ мм, $R=0,25$; 4 – при $a=0,45$ мм, $R=0,31$

Рисунок 10 – Зведена залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів навантаження для сталі G105



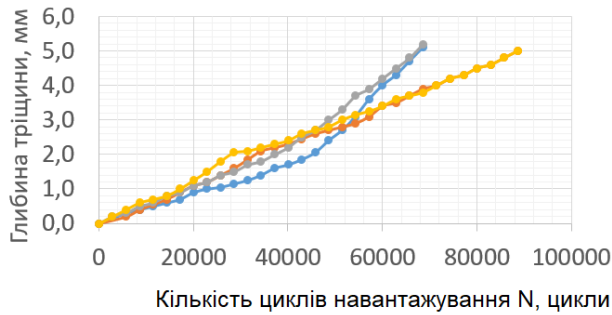
1 – при $a=0,45$ мм, $R=0$; 2 – при $a=0,45$ мм, $R=0,31$

Рисунок 11 – Залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів навантаження для сталі 40XH

Згідно рисунку 12 інтенсивність поширення тріщини за однакових режимів навантаження для обох сталей є досить подібною. Отримано характеристики тріщиностійкості з врахуванням впливу асиметрії навантаження за напружень розтягу для сталі G105: $K^* = 26,15 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; $n = 1,73$, які можуть бути використані при прогнозуванні довговічності.

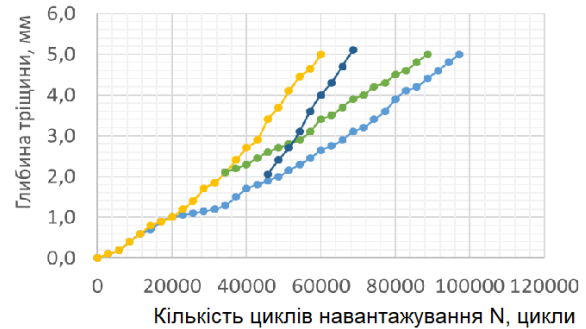
На другому етапі проводили дослідження впливу блокового навантаження із однаковою амплітудою та різною асиметрією. Тріщину вирощували до 2 мм спершу без асиметрії із амплітудою 0,45, а потім продовжували із коефіцієнтом асиметрії 0,25 до 5 мм і навпаки для обох груп сталей. Встановлено, що у випадку

двоступеневого навантажування при переході з низького до високого рівня асиметрії навантажування та навпаки різниця швидкостей поширення тріщини порівнянно з одноступеневим навантажуванням несуттєва (рис. 13). Це дає змогу використовувати лінійну теорію накопичення втомних пошкоджень для ЗРЗ за аналогічних режимів навантажування.



- 1 — сталь G105 при $R=0-0,25$;
 — 2 — сталь 40ХН при $R=0-0,25$;
 — 3 — сталь G105 при $R=0,25-0$;
 — 4 — сталь 40ХН при $R=0,25-0$

Рисунок 12 – Зведена залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів навантажування для сталі 40ХН та G105 із різною програмою блокового навантаження



- 1 – при $a=0,45$ мм, $R=0$;
 2 – при $a=0,45$ мм, $R=0,25$;
 3 – при $a=0,45$ мм, $R=0,25-0$;
 4 – при $a=0,45$ мм, $R=0-0,25$

Рисунок 13 – Зведена залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів навантажування при регулярному та блоковому навантаженні для сталі G105

Залежність швидкості поширення тріщини від коефіцієнта асиметрії є не лінійною: із збільшенням коефіцієнта асиметрії градієнт швидкості підвищується (рис. 14).

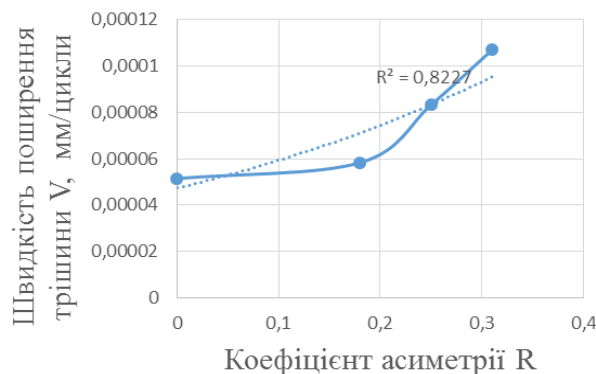
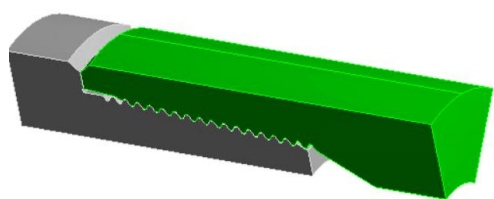


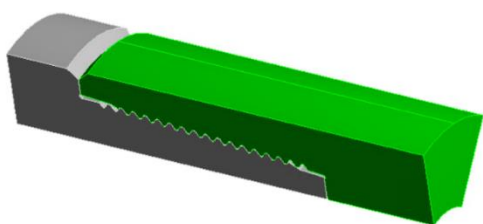
Рисунок 14 – Залежність швидкості росту втомної тріщини від коефіцієнта асиметрії при регулярному навантаженні для сталі G105

Для порівняння довговічності одноопорної конструкції ЗРЗ із розробленою двоопорною визначено коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) у напівеліптичній тріщині, розміщеній у небезпечному перерізі ніпеля (впадині першого повного витка).

На рисунку 15 наведено сегменти тривимірних моделей ЗРЗ, а на рисунку 16 – розміщення тріщини на досліджуваній моделі.

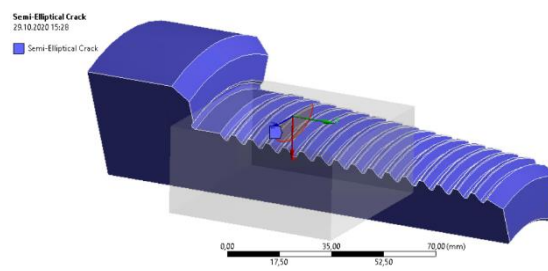


а)

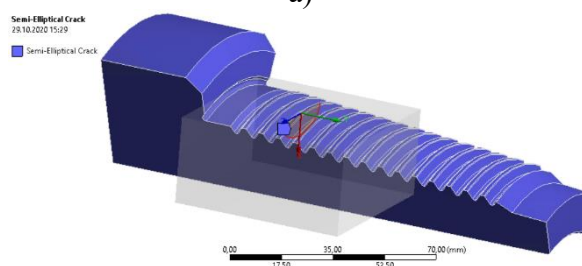


б)

а) – одноопорне; б) – розроблене двоопорне
**Рисунок 15 – Сегмент тримірної моделі
 різьбового з'єднання NC50**



а)



б)

а) – одноопорне; б) – розроблене двоопорне
**Рисунок 16 – Розміщення тріщини
 на досліджуваній моделі**

Під час проведення дослідження побудовано напівеліптичні тріщини з співвідношенням довжини до глибини 4:1 з глибиною тріщини до 6 мм.

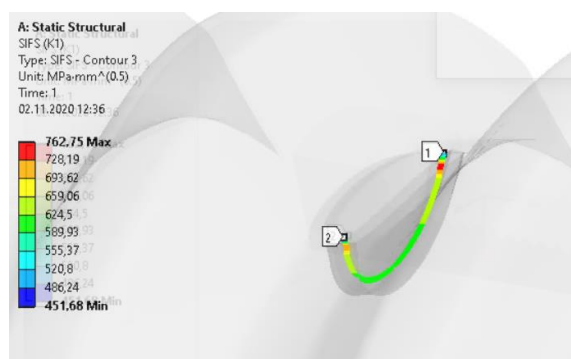
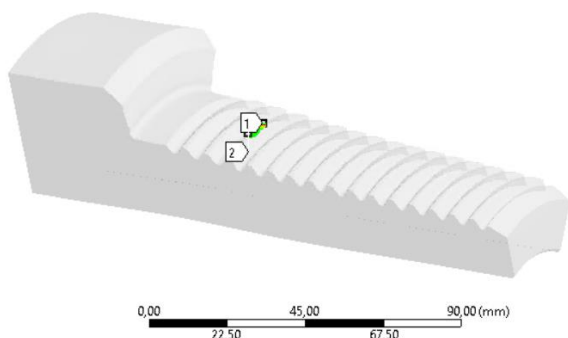


Рисунок 17 – Графічне відображення зміни значення КІН по довжині контуру інтегрування

Результати проведеного дослідження наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Величини коефіцієнту інтенсивності напружень K_I при різній геометрії напівеліптичної тріщини у ЗРЗ

Глибина тріщини h , мм	Величина коефіцієнту інтенсивності напружень K_I , МПа·м ^{1/2} (від дії зусилля розтягу та моменту згинчування)	
	Одноопорне з'єднання	Двоопорне з'єднання
1	26,4	14,4
2	27,1	16,9
3	27,9	20,8
4	29,1	23,5
5	30,6	26,2
6	32,3	28,7

Отримано залежності коефіцієнту інтенсивності напружень в результаті апроксимування значень з таблиці 1. Використовуючи положення механіки

руйнування, залежності K_I з таблиці 1, величину коефіцієнта пропорційності й емпіричного параметру формули П. Паріса, визначені за методикою тріщиностійкості, розраховано втомну довговічність (у кількостях циклів навантажування (табл. 2).

Таблиця 2 – Значення розрахункової втомної довговічності

Втомна довговічність одноопорного ЗРЗ, цикли	Втомна довговічність двоопорного ЗРЗ, цикли	Відмінність (Зростання втомної довговічності), %
$43,8 \times 10^6$	$75,5 \times 10^6$	72,4

Відповідно до отриманих результатів, втомна довговічність двоопорного ЗРЗ збільшується на 72,4 % порівняно із одноопорним.

Результати розрахунку при використанні САД-систем суттєво залежать від форми та розмірів сітки скінчених елементів та низки інших параметрів. Тому вирішено виконати перевірку побудованих числових моделей. Проведено верифікацію результатів, отриманих за допомогою МКЕ та загальновідомою формулою Аокі-Кіучі.

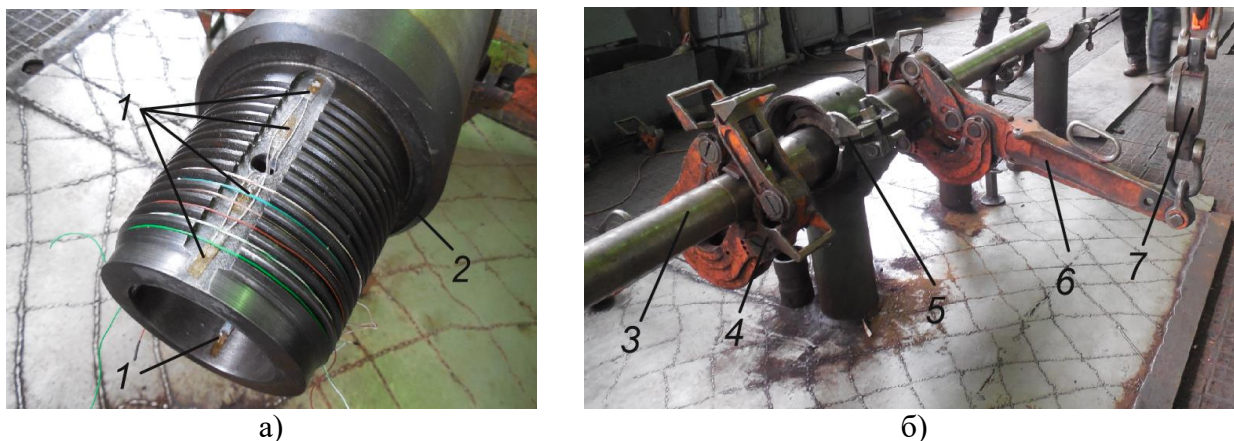
Результати обчислень наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати визначення коефіцієнту інтенсивності напружень згідно з першим і другим блоками обчислень

Глибина тріщини, мм	Напівдовжина тріщини, мм	Величина коефіцієнту інтенсивності напружень K_I , МПа·м ^{1/2}		Відхилення, %
		Ф-ла Аокі та Кіучі	Метод скінчених елементів	
1	2	13,71	14,4	7,22
2	4	19,38	16,9	12,8
3	6	23,74	20,8	12,4
4	8	27,41	23,5	14,3
5	10	30,65	26,2	14,5
6	12	33,61	28,7	14,6

Отже, похибка результатів, отриманих різними методами, не перевищує 15 %.

Працездатність натурних зразків (рис. 18) двоопорних ЗРЗ (виготовлених ДП "Завод обважнених бурильних та ведучих труб") експериментально підтверджено згідно розробленої програми та методики.



а) 1 – тензодавачі; 2 – ніпель ЗРЗ ОБТ; 3 – натурний зразок;
 б) 4, 6 – ключ УМК; 5 – стенд; 6 – динамометр

Рисунок 18 – Натурний зразок ніпеля із встановленими на ньому тензодавачами (а) та дослідного зразка, розміщеного на випробувальному стенді (б)

Відхилення значень параметрів отриманих в результаті імітаційного моделювання та експериментальних досліджень натурального зразка знаходиться в межах 5-15 %. Це підтверджує достовірність досліджень та роботоздатність даної конструкції двоопорного ЗРЗ.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ

На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень вирішено науково-практичну задачу, яка полягає у підвищенні втомної міцності двоопорних замкових різьбових з'єднань елементів бурильної колони шляхом розроблення їх нових конструкцій з врахуванням напружено-деформованого стану та впливу асиметрії циклічного навантаження за напружень розтягу на тріщиностійкість матеріалу труб, а саме:

1. Проведений огляд існуючих одноопорних конструкцій різьбових з'єднань елементів бурильної колони підтвердив їх недосконалість для спорудження глибоких свердловин із складним профілем. Для таких умов починають використовувати їх двоопорні конструкції. Проаналізовано існуючі методики розрахунку моменту згвинчування різьбових з'єднань та встановлено, що жодна з них не може бути застосована для двоопорних замкових різьбових з'єднань. Обґрунтовано необхідність вдосконалення існуючих двоопорних конструкцій замкових різьбових з'єднань з детальною оцінкою їх напружено-деформованого стану та довговічності для підвищення їх втомної міцності.

2. Сформовано комплекс методик для: оцінки тріщиностійкості матеріалу бурильних труб з врахуванням впливу асиметрії циклічного навантаження за напружень розтягу; імітаційного параметричного моделювання із обґрунтуванням використання осиметричної моделі ЗРЗ ОБТ; розрахунку рекомендованого та максимального моменту згвинчування двоопорного ЗРЗ ОБТ, згідно якої встановлено, що рекомендований момент згвинчування для двоопорного з'єднання порівняно із одноопорним збільшується на 48,58 % для

з'єднань з розвантажувальною канавкою та на 46,61 % для з'єднань без розвантажувальної канавки; проведення експериментальних досліджень натурального взірця розробленого двоопорного ЗРЗ ОБТ.

3. Дослідження напружено-деформованого стану одноопорного та двоопорного замкового різьбового з'єднання ОБТ показали, що розподіл напружень по впадинах витків різьби є рівномірнішим у двоопорного з'єднання, причому величина напружень у першій впадині витка різьби ніпеля є на 15% меншою, а у останній впадині – більшою на 55 %. Величини напружень по впадинах середніх витків різьби є також вищими на 35 %, що, в свою чергу, позитивно вплине на тривалість експлуатації такого з'єднання при дії знакозмінних навантажень. Встановлено, що критичні значення напружень у такому з'єднанні спостерігаються у зоні додаткового опорного торця. Для їх зменшення запропоновано та досліджено три різні варіанти його виконання та встановлено найкращий – скос торця ніпеля з оптимальним кутом 0,3 градуси. Удосконалено модель для автоматизованого проектування конструкцій двоопорних ЗРЗ ОБТ, особливістю якої є можливість зберігати геометричні параметри муфти та визначати оптимальні довжини ніпельної частини додаткової опори з'єднань різьби ОБТ типу NC50 та NC55. Встановлено залежність виведеного безрозмірного коефіцієнта уніфікації від довжини ніпельної частини додаткової опори з'єднання з метою розроблення інших типорозмірів різьб аналогічної конструкції. Для зменшення впливу точності виготовлення різьбового з'єднання з сотих до десятих міліметра запропоновано використання пружних елементів та встановлено оптимальні значення їх геометричних параметрів.

4. В результаті проведення експериментальних досліджень поширення швидкості тріщин у матеріалі труб при дії асиметрії навантаження за напружень розтягу в умовах одноступеневого та двоступеневого навантаження визначено кількість циклів до руйнування для сталі G105 та 40ХН. Встановлено, що із збільшенням коефіцієнта асиметрії кількість циклів до руйнування зменшується. Зміна швидкості поширення тріщини від коефіцієнта асиметрії є нелінійною, причому її градієнт підвищується із збільшенні коефіцієнта асиметрії. Побудовано кінетичну діаграму втомного руйнування та отримано характеристики тріщиностійкості, які можуть бути використані при прогнозуванні довговічності елементів бурильних колон. Встановлено, що у випадку двоступеневого навантаження при переході від низького до високого рівня асиметрії навантаження та навпаки різниця швидкостей поширення тріщини в порівнянні з одноступеневим навантаженням несуттєва. Це дає змогу використовувати лінійну теорію накопичення втомних пошкоджень. Використовуючи положення механіки руйнування та МКЕ встановлено, що довговічність двоопорного з'єднання є на 72,4 % вищою за довговічність одноопорного. Проведено верифікацію результатів отриманих за допомогою методу кінцевих елементів та аналітично за формулою Аокі і Кіучі. Встановлено, що відмінність між ними становить не більше 15 %.

5. Результати експериментальних досліджень розробленої конструкції та методики розрахунку моменту згвинчування двоопорного замкового різьбового з'єднання підтверджують проведені теоретичні дослідження. Отримано патенти на корисну модель розроблених конструкцій двоопорного замкового різьбового з'єднання ОБТ. Розроблені конструкції та методика розрахунку моменту згвинчування впроваджені у ДП "Завод обважнених бурильних та ведучих труб".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Закордонні видання

1. Mykhailiuk V. V., Artym V. I., Faflei O. Y., Deineha R. O., Yurych A. R. Improvement of the operational efficiency of double shoulder tool joint of drill collars. *East European Scientific Journal*. 2019. № 51(5). С. 40-48.

Фахові видання України

2. Артими В. І., Фафлей О. Я., Дейнега Р. О., Михайлюк В. В. Дослідження впливу конструктивних елементів двоопорних замкових з'єднань бурильних труб на їх напружено-деформований стан. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. № 4(65). С. 77-87.

3. Артими В. І., Фафлей О. Я., Дейнега Р. О., Михайлюк В. В. Аналіз сучасних конструкцій замкових з'єднань обважнених бурильних труб. *Нафтогазова енергетика*. 2017. № 2(28). С. 22-30.

4. Фафлей О. Я. Дослідження впливу асиметричного навантаження на кінетику втомних тріщин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 1(66). С. 44-52.

Патенти

5. Двоопорне замкове з'єднання бурильних труб : патент 125921 Україна : МПК E21B 17/042, E21B 17/02. № u 201800265 ; заявл. 09.01.2018 ; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10. 4 с.

6. Двоопорне замкове з'єднання бурильних труб : патент 125922 Україна : МПК E21B 17/042, E21B 17/02. № u 201800266 ; заявл. 09.01.2018 ; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10. 4 с.

7. Двоопорне замкове з'єднання бурильних труб : патент 125915 Україна : МПК E21B 17/042, E21B 17/02. № u 201713152 ; заявл. 29.12.2017 ; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11. 4 с.

8. Двоопорне замкове з'єднання бурильних труб : патент 137086 Україна : МПК E21B 17/042, E21B 17/02. № u 201907819 ; заявл. 10.07.2019 ; опубл. 25.09.2019, Бюл. № 18. 4 с.

Матеріали конференцій

9. Артими В. І., Фафлей О. Я., Семенчук А. В. Удосконалення методів розрахунку довговічності елементів бурильної колони при глибокому бурінні. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та

прикладні проблеми сучасних технологій» присвяченої 55-річчю заснування ТНТУ та 170 - річчю з дня народження Івана Пулюя, 19–21 травня 2015 р., Тернопіль, С. 66-68.

10. Фафлей О. Я., Дейнега Р. О., Михайлюк В. В. Кінцево-елементний аналіз двоопорних замкових з'єднань бурильних труб. Матеріали II Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції *«Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі»*. Кривий Ріг: ДВНЗ Криворізький національний університет, 2017. С. 313.

11. Фафлей О. Я., Фафлей І. Я., Харламов Б. В. Експериментальні дослідження впливу розтягуючого асиметричного навантаження на швидкість поширення втомних тріщин. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції *«Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні»*, секція *«системний аналіз і синтез процесів у металургії та машинобудуванні»*, 27 – 29 березня 2018 р. Дніпро, С.117-118.

12. Артım В. І., Фафлей О. Я., Петрик І. Я., Фафлей І. Я. Проектування двоопорних замкових з'єднань бурильних труб. Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції *«Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE – 2018»*, 24-27 квітня 2018р. Івано-Франківськ. С.182-185.

13. Артım В. І., Дейнега Р. О., Михайлюк В. В., Фафлей О. Я. Імітаційне моделювання двоопорного замкового з'єднання обважненої бурильної труби. Матеріали науково-практичного семінару *«Графічна освіта у закладах вищої освіти: стан та перспективи»*, 19-21 вересня 2018 р., м. Івано-Франківськ. С. 76-78.

14. Михайлюк В. В., Фафлей О. Я., Дейнега Р. О., Юрич А. Р., Семенчук А. В. Аналіз способів зменшення впливу зносу та точності виготовлення двоопорних замкових різьбових з'єднань обважнених бурильних труб. Collection of scientific papers «ЛОГОΣ» with Proceedings of the International Scientific and Practical Conference *«Problems and prospects of implementation of innovative research results»*, December 13, 2019. Valletta, Republic of Malta: European Scientific Platform NGO. P. 58-64.

15. Михайлюк В. В., Фафлей О. Я., Дейнега Р. О., Юрич Л. Р., Семенчук А. В. Підвищення експлуатаційних характеристик замкового різьбового з'єднання обважнених бурильних труб. Papers of participants of the International Multidisciplinary Scientific and Practical Conference *«The results of scientific mind's development: 2019»*, Seoul (South Korea), December 22, 2019. P. 98-104.

АНОТАЦІЯ

Фафлей О. Я. Підвищення втомної міцності двоопорних замкових різьбових з'єднань елементів бурильної колони. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.12 – машини нафтової та газової промисловості. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2021.

Удосконалено метод розрахунку рекомендованого та максимального моментів згвинчування двоопорного замкового різьбового з'єднання елементів бурильної колони з урахуванням впливу додаткового опорного торця ніпеля і муфти та зміни величини коефіцієнта тертя. Удосконалено модель для автоматизованого проектування конструкцій двоопорних замкових різьбових з'єднань обважнених бурильних труб. Досліджено вплив конструктивних елементів розроблених різьбових з'єднань при дії моменту згвинчування на їх напружено-деформований стан та тріщиностійкість. Оцінено вплив асиметрії циклічного навантаження за напружень розтягу на швидкість поширення втомних тріщин в матеріалі труб.

Ключові слова: бурильна колона, бурильний замок, двоопорна замкова різьба, ніпель, муфта, напружено-деформований стан, втомна міцність, асиметрія циклічного навантаження, тріщиностійкість, імітаційне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Фафлей О. Я. Повышение усталостной прочности двухопорных замковых резьбовых соединений элементов бурильной колонны. - Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.05.12 - машины нефтяной и газовой промышленности. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2021.

Усовершенствован метод расчета рекомендуемого и максимального моментов свинчивания двухопорного замкового резьбового соединения элементов бурильной колонны с учетом влияния дополнительного опорного торца ниппеля и муфты, изменения величины коэффициента трения. Усовершенствована модель для автоматизированного проектирования конструкций двухопорных замковых резьбовых соединений утяжеленных бурильных труб. Исследовано влияние конструктивных элементов разработанных резьбовых соединений при действии момента свинчивания на их напряженно-деформированное состояние и трещиностойкость. Оценено влияние асимметрии циклической нагрузки при напряжении растяжения на скорость распространения усталостных трещин в материале труб.

Ключевые слова: бурильная колонна, бурильный замок, двухопорная замковая резьба, ниппель, муфта, напряженно-деформированное состояние, усталостная прочность, асимметрия циклической нагрузки, трещиностойкость, имитационное моделирование.

ABSTRACT

Faflei O. Ya. Increase of Fatigue Strength of Double-Shoulder Threaded Tool Joints of Drill String Elements. – Qualification Scientific Paper with the Manuscript Copyright.

Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in Specialty 05.05.12 – Machines of Oil and Gas Industry. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2021.

The thesis is devoted to the issues of increasing the fatigue strength of the double-shoulder threaded tool joints of drill string elements by assessing their stress-strain state, influence of the cyclic tensile stress asymmetry on the pipe material crack resistance and development of new structures.

The operating conditions of drill strings and their threaded joints were analyzed and the influence of operational factors on the failures of drill string elements were determined in the paper. The available designs of threaded joints (single- and double-shoulder) and design peculiarities of an additional shoulder of the double-shoulder threaded tool joint were studied. An overview of the existing methods for calculation of drill string elements (calculation of makeup torques of threaded joints and methods for durability evaluation of drill string elements) was provided.

The author used the methods for studying the crack resistance. The methods for determining the stress-strain state of the tool joints of drill string elements were provided and the model for computer-aided structural design of the drill collar double-shoulder threaded tool joints was developed. The methods for calculating the makeup torques of double-shoulder threaded tool joints were improved. The methods and program of experimental studies of full-scale samples of the drill collar double-shoulder threaded tool joints were developed.

The stress-strain state of the drill collar single- and double-shoulder threaded tool joints was studied. The influence of the structural elements on the distribution of stresses in double-shoulder threaded tool joints was determined. The geometrical parameters of the additional pin shoulder of the drill collar double-shoulder threaded tool joints were optimized. The influence of placement of the base thread plane of the double-shoulder threaded tool joints of drill string elements on the stress-strain state was investigated.

In order to reduce the influence of the accuracy of manufacturing of elements of the drill collar double-shoulder threaded tool joints, it was proposed to use additional elastic elements with optimized parameters.

The optimal lengths of the additional pin shoulder for 14 standard sizes of the developed design of the drill collar double-shoulder threaded tool joints were determined. The dimensionless coefficient was worked out and its dependence on the value of the pin and box overlap in the area of the additional shoulder end face was

constructed (it can be used for the development of other similar design and standard size threads).

The influence of the tensile strength asymmetry on the crack resistance of the material of the drill pipes that belong to G105 and 40XH strength groups was estimated. The crack resistance parameters, which can be used to predict the durability, were obtained.

The stress intensity coefficients were determined using the FEM for the single-shoulder and developed double-shoulder structure of the threaded tool joints with the semi-elliptical crack located in the critical pin section (first full thread trough). The values of the durability of these threaded tool joint structures for the single-shoulder and double-shoulder structures of threaded tool joints were obtained. The fatigue durability of double-shoulder threaded tool joints increases by 72.4% when compared to single-shoulder ones.

The results obtained using the FEM and well-known Aoki and Kiuchi's formula were verified. The deviations between the results obtained with the help of different methods do not exceed 15%.

The results of the full-scale experimental studies of the developed design and methods for calculation of the makeup torque of double-shoulder threaded tool joints confirm the conducted studies by simulation modeling. The designs and methods for calculation of the makeup torque of double-shoulder threaded tool joints were introduced into production at the Subsidiary Enterprise "Drill Collars and Kellys Plant" (Sumy).

Key words: drill string, box-and-pin joint, double-shoulder tool joint, pin, box, stress-strain state, fatigue strength, cyclic stress asymmetry, crack resistance, simulation modeling.

