

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-18-23>

УДК 622.2

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ У ЗАМКОВОМУ РІЗЬБОВОМУ З'ЄДНАННІ БУРИЛЬНИХ ТРУБ

Артим В.І., Новосельський Б.А.

STUDY OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE LOCKED THREADED CONNECTION OF DRILL PIPES

Artym V.I., Novoselskyi B.A.

Вплив температури на різьбові з'єднання є одним з важливих чинників, який впливає на їх міцність, герметичність і довговічність в процесі експлуатації. При підвищених температурах матеріали різьби зазнають теплового розширення, що змінює геометричні параметри та посадки, впливає на зусилля затягування та герметичність з'єднання. Високі температури сприяють пластичній деформації поверхневих шарів різьби, пришвидшенню зносу й утворенню люфтів, що знижує надійність з'єднання. Замкове різьбове з'єднання (ЗРЗ), яке використовується у бурильних колонах, які застосовуються під час спорудження нафтових та газових свердловин, має відповідати вимогам міцності, втомної довговічності, герметичності. Для дослідження побудовано тривимірну модель ЗРЗ з різьбою NC50 відповідно до технічних умов та проведено її імітаційне моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) для визначення розподілу температури в тілі труби та ЗРЗ при умові температури бурового розчину 20 °C всередині труби і зовні труби – 100 °C. Встановлено, що розподіл температури з тілі труби та ЗРЗ є нерівномірним. Розглядаючи розподіл температури у ЗРЗ спостерігається зниження температури із сторони упорного торця ніпеля до тіла муфти з 70 °C до 47 °C. Отриманий температурний градієнт у трубі та ЗРЗ використаний як вхідні дані для подальшого аналізу напружено-деформованого стану ЗРЗ. Встановлено розподіл напружень у ЗРЗ під дією моменту згвинчування та моменту згвинчування в поєднанні із температурним впливом. Результати імітаційного моделювання показали, що температура знижує величини еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля на 15–19%, особливо у впадинах перших двох витків ніпеля. Це зниження напружень може позитивно вплинути на втомну міцність і ресурс

з'єднання. Отже, врахування температурного впливу є важливим під час проектування, виготовлення та оцінки надійності різьбових з'єднань, особливо в умовах експлуатації бурильних колон у змінних температурних режимах. Подальшим кроком є дослідження втомної міцності ЗРЗ з урахуванням температурного впливу та коректування розрахункового моменту згвинчування. **Ключові слова:** бурильна колона, замкове різьбове з'єднання, напружено-деформований стан, напруження, температура.

Вступ. Вплив температури на різьбові з'єднання має важливе значення для їх міцності та надійності під час експлуатації. При підвищених температурах в матеріалах різьби відбуваються теплові розширення, які можуть змінювати розміри елементів з'єднання, що впливає на посадки (зазори або натяги). Це призводить до зміни сил затягнення, які необхідні для забезпечення герметичності та міцності з'єднання.

Також висока температура сприяє пластичній деформації поверхневих шарів різьби, особливо в місцях локального контакту, що може викликати утворення люфтів або послаблення з'єднання. Внаслідок теплової деградації зношуються поверхні різьбових елементів, що знижує їх зносостійкість та довговічність.

Для компенсації теплових впливів у відповідальних різьбових з'єднаннях застосовують розширені допуски та посадки з зазором, а також підсилені способи затягування болтів або гвинтів. Особливо це важливо для

різбових з'єднань з натягом, де забезпечення гарантованих величин крутних моментів вигвинчування є критичним.

При роботі з жароміцними й нержавіючими матеріалами діаметри отворів під різьбу збільшують, щоб врахувати теплові деформації та забезпечити якісне нарізання різьби, що впливає на довговічність з'єднання.

Встановлено, що температура впливає на геометрію, міцність, точність посадки та експлуатаційні характеристики різбових з'єднань. Це вимагає врахування впливу температури при проектуванні, виготовленні та монтажі різбових з'єднань..

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій. Замкове різьбове з'єднання (ЗРЗ) застосовується для збирання бурильної колони з таких елементів як бурильні труби, перевідники, долото, калібратори тощо.

Під час експлуатації ЗРЗ має забезпечувати наступні вимоги, а саме: володіти необхідною статичною міцністю; чинити опір втомі при дії розтягуючих, стискаючих та згинаючих навантажень та крутних моментів; швидко розбиратись та збиратись; бути герметичним; мати високу зносостійкість тощо.

Найнебезпечнішими перерізами, по яких відбувається руйнування ЗРЗ, є перший спряжений виток різьби ніпеля, який знаходиться на відстані 24 мм від його упорного торця [1], та небезпечний переріз муфти, що знаходиться на відстані 10 мм від меншого торця ніпеля.

У роботі [2] для визначення напружено-деформованого стану різбового з'єднання, у якому є відхилення одного з найважливіших параметрів різьби, а саме, основної площини, побудовано тримірну модель з'єднання NC50 для дослідження методом скінченних елементів (МСЕ). У результаті проведеного імітаційного моделювання різбового з'єднання, основна площина якого розміщена відповідно до вимог нормативних документів, встановлено розподіл напружень по впадинах різьби ніпеля, згідно з яким максимальні напруження виникають у впадинах витків, розміщених ближче до опорного торця, а з віддаленням від них поступово знижуються. Такий розподіл напружень, отриманий за допомогою імітаційного моделювання збігається із відомими теоріями. Проведені імітаційні моделювання, за яких розміщення основної площини зміщено на 2 мм в бік опорного торця ніпеля, показали зміну розподілу та зростання величини напружень по впадинах різьби ніпеля

та зміну величини контактного тиску на опорних торцях ніпеля і муфти. Необхідно зауважити, що такі зміни негативно вплинуть на роботу різбового з'єднання. Дослідження різбового з'єднання, у якому основна площина зміщена на 2 мм у бік від опорного торця ніпеля, показали зростання напружень по впадинах витків різьби ніпеля та різке зниження величин контактного тиску на опорних торцях ніпеля та муфти. За таких умов різьбове з'єднання зруйнується за малої кількості циклів роботи.

У роботі [3] наведено моделювання та розрахунки болтового фланцевого з'єднання, що знаходиться в умовах підвищеної температури. Виконано аналіз зусиль, що діють на болт та з'єднувані елементи, на основі аналітичних формул та з використанням МСЕ. При теоретичних розрахунках застосовано рекомендації, наведені в матеріалах із основ проектування машин. Під час числових розрахунків використовується спрощена модель болта. Отримані результати розрахунків перевіряються на предмет виконання прийнятого критерію міцності, пов'язаного з допустимим термічним напруженням у болті. Наведено вибрані результати імітаційних досліджень МСЕ моделі з'єднання у вигляді розподілу температури в моделі. На основі порівняння результатів теоретичного та числового аналізу визначено корисність спрощеної моделі болта для розрахунків сил у болтах фланцевих з'єднань в умовах підвищеної температури.

Автори [4] зазначають, що вібрація та навантаження можуть спричинити втомне руйнування болтових з'єднань, особливо тих, які працюють при високих температурах. Досліджується малоциклова втома попередньо затягнутих болтів, що працюють при високій температурі. Розроблено новий випробувальний пристрій для досліджень з'єднань на втому на якому проведено малоциклові випробування попередньо затягнутих болтів при дії температур 550 °C та 650 °C. Крім того, запропоновано нову модель малоциклової втоми, яка базується на критерії еквівалентного напруження/деформації фон Мізеса, яка використовується для прогнозування високотемпературної малоциклової втоми попередньо затягнутих болтів відповідно до результатів напруження/деформації, отриманих МСЕ. Встановлено відповідність між експериментальними результатами та теоретичними результатами, що підтверджує точність запропонованої моделі втоми.

Результати дослідження забезпечать теоретичну основу для прогнозування малоциклової втоми попередньо затягнутих болтів.

У роботі [5] зазначено, що стирання різьби є однією з основних форм руйнування з'єднань нафтогазових труб. Проведено серію повномасштабних випробувань на зразках неосаджених різьбових з'єднань труб зі сталі API J55. Розподіл температури та полів напружень різьбового з'єднання труб вимірювався динамічно під дією різних крутних моментів та швидкостей згвинчування та розгвинчування різьбових з'єднань. Були вивчені основні фактори, які впливають на розподіл температур та полів напружень різьбових з'єднань труб, а їх вплив на руйнування внаслідок стирання узагальнено за допомогою теорії тертя та зношування. Моделі скінченних елементів різьбових з'єднань труб перевірено шляхом порівняння числових результатів з результатами натурних випробувань. Перевірені моделі згодом використовуються для проведення параметричних досліджень поведінки з'єднання.

Проте у роботах, де досліджуються напружено-деформований стан ЗРЗ під час прикладання граничних умов зазвичай не враховується температура. Оскільки бурильна колона експлуатується у різні пори року, на її ресурс ЗРЗ буде впливати температура. Температура повітря взимку може сягати до мінус 40 °С, а температура у свердловині – плюс 100°С та більше. Тому в даній роботі основна увага буде приділена впливу зміни температури на напружено-деформований стан ЗРЗ бурильних труб.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Метою роботи є дослідження впливу температури на напружено-деформований стан ЗРЗ з врахуванням дії моменту згвинчування.

Для досягнення мети необхідно:

- встановити розподіл температур у ЗРЗ при температурі бурового розчину 20°С всередині ЗРЗ та 100°С ззовні.

- визначити напружено-деформований стан ЗРЗ при дії моменту згвинчування;

- дослідити напружено-деформований стан ЗРЗ при дії моменту згвинчування та температури;

- порівняти отримані результати дослідження, зробити висновки, окреслити напрями подальших досліджень.

Викладення основного матеріалу

Під час побудови тривимірної моделі ЗРЗ використано ТУ 26-12-775-90 [6] на замкові з'єднання для труби ОБТ НВ I із різьбою NC50 (рис. 1).

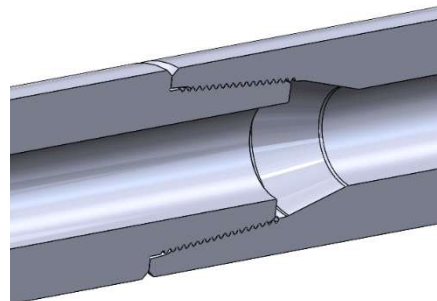


Рис. 1. Фрагмент моделі труби ОБТ НВ I із різьбою NC50

На рисунку 2 показано розрахункову схему для дослідження розподілу температур у ЗРЗ.

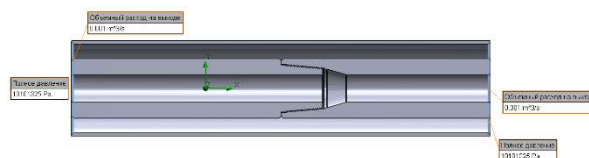


Рис. 2. Розрахункова схема для дослідження розподілу температур у ЗРЗ

Граничними умовами прийнято температуру рідини всередині ЗРЗ рівною 20 °С, ззовні ЗРЗ – 100 °С. Витрата рідини становить 0,001 м³/с.

У результаті імітаційного моделювання отримано розподіл температури у трубі та ЗРЗ (рис. 3).

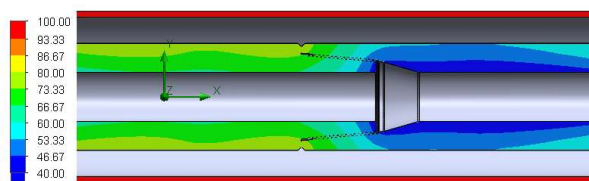


Рис. 3. Розподіл температури у трубі та ЗРЗ

Отже, згідно рисунку 3, розподіл температури у тілі труби та ЗРЗ є нерівномірним. Зниження температури у ЗРЗ відбувається із сторони упорного торця ніпеля до тіла муфти з 70 °С до 47 °С.

Для зручності розуміння отримуваних результатів імітаційного моделювання необхідно зазначити напрямок та початок відліку впадин різьб ніпеля (рис. 4).

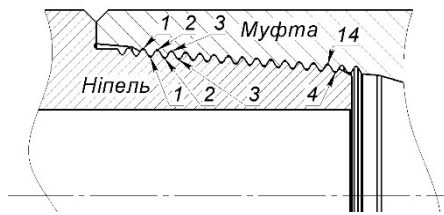


Рис. 4. Напрямки та початок відліку впадин різьби ніпеля та муфти

З метою побудови графічних залежностей розподілу температури у трубі та ЗРЗ на них виконано лінії (рис. 5).

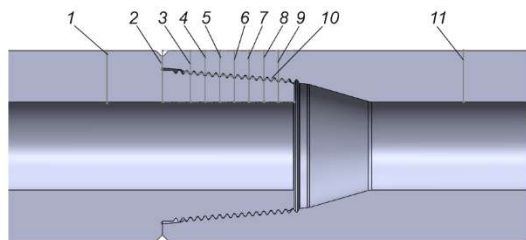


Рис. 5. Лінії для побудови графічних залежностей:

- 1 – тіло труби; 2 – на торцях ніпеля та муфти;
- 3 – впадина першого витка ніпеля; 4 – впадина третього витка ніпеля; 5 – впадина п'ятого витка ніпеля; 6 – впадина сьомого витка ніпеля;
- 7 – впадина дев'ятого витка ніпеля; 8 – впадина одинадцятого витка ніпеля; 9 – впадина тринадцятого витка ніпеля; 10 – середній діаметр різьби; 11 – тіло муфти

На рисунку 6 показано зміну температури по поздовжніх перерізах труби та ЗРЗ згідно рисунку 5, а на рисунку 7 – зміну температури по середньому діаметрі різьби ЗРЗ.

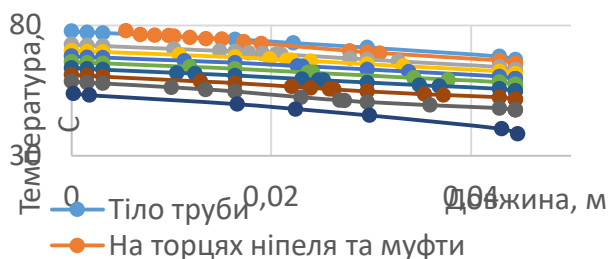


Рис. 6. Зміна температури по поздовжніх перерізах труби та ЗРЗ (згідно рисунку 5)

Отже, виходячи з результатів поданих на рисунку 6, у поздовжніх перерізах труби та ЗРЗ спостерігається пропорційний спад температури із максимуму 75°C до 38°C.

Що стосується зміни температури ЗРЗ по середньому діаметру різьби, то вона спадає з 70°C до 45°C (рис. 7).

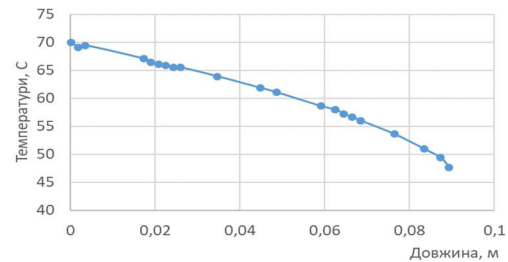


Рис. 7. Зміна температури по середньому діаметрі різьби ЗРЗ

Розглянемо та порівняємо розподіл еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля при дії на ЗРЗ тільки моменту згинчування та моменту згинчування разом із температурою. Розподіл температури у трубі та ЗРЗ буде використаний як вхідне навантаження у модуль Simulation із модуля FlowSimulation.

Оскільки різьбове з'єднання побудоване не по гвинтовій лінії, а як проточки, то для імітації моменту згинчування застосовано перекриття торців ніпеля та муфти на величину натягу 0,1 мм (аналогічно як у працях [2, 7]). Виходячи з того, що коефіцієнт запасу міцності для різьбових з'єднань становить 1,5 і границя міцності для матеріалу з яких виготовляють труби (45ХГМА) рівна 758 МПа, до такого з'єднання має прикладатися момент згинчування, за якого напруження в ньому не перевищуватимуть 505 МПа. Під час моделювання враховується коефіцієнт тертя у всіх елементах різьби – 0,1.

На рисунку 8 показано розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі ЗРЗ (тільки від дії моменту згинчування).

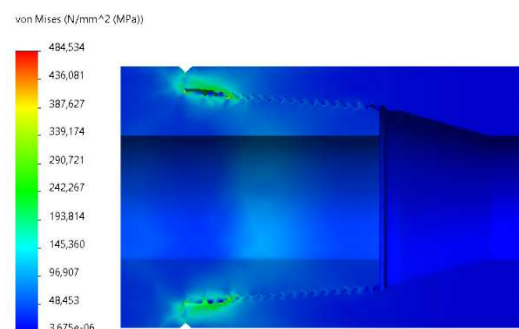


Рис. 8. Розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі ЗРЗ (від дії моменту згинчування)

Для порівняння розподілу еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля при дії навантаження, а саме прикладання до ЗРЗ тільки

моменту згинчування та моменту згинчування і температури побудовано графічні залежності, які наведені на рисунку 9.

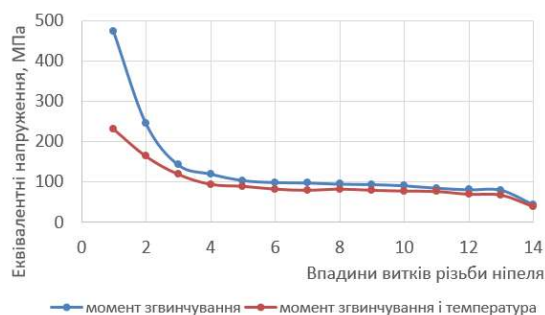


Рис. 9. Розподіл еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля

Виходячи з отриманих результатів, спостерігається вплив температури на розподіл еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля, а саме зниження їх величини на 15-19%. Найбільше зниження еквівалентних напружень спостерігається у перших двох витках ніпеля.

Зниження величин еквівалентних напружень вплине на втомну міцність ЗРЗ, визначення якої буде предметом подальших досліджень.

Висновки. Встановлений розподіл температур у замковому різбовому з'єднанні при температурі бурового розчину 20 °С всередині та 100 °С зовні дозволив візуалізувати температурний градієнт у тілі труби та ЗРЗ.

Проведений аналіз напружено-деформованого стану ЗРЗ при дії моменту згинчування з урахуванням фізичних характеристик матеріалу та коефіцієнта тертя між елементами з'єднання дозволив встановити розподіл еквівалентних напружень по впадинах витків ЗРЗ. Отриманий розподіл напружень добре узгоджується із відомими теоріями, та згідно нього найбільше навантаження сприймає декілька витків ніпеля, а на інших витках напруження залишаються майже однаковими.

Визначено напружено-деформований стан ЗРЗ при дії на нього моменту згинчування та температури, яка виходячи з попередніх досліджень розподіляється нерівномірно.

Порівняння розподілу еквівалентних напружень при врахуванні градієнту температури та моменту згинчування показало зниження їх величин на 15-19% порівняно із прикладанням до ЗРЗ тільки моменту згинчування, що свідчить про суттєвий вплив температурного поля на напружений стан ЗРЗ. Зниження напружень спостерігається у перших

двох витках ніпеля, що може позитивно вплинути на довговічність і втомну міцність з'єднання, проте може його знизити герметичність.

Отримані результати підкреслюють необхідність врахування температурного впливу при оцінці міцності ЗРЗ, а визначення втомної міцності й її подальший аналіз будуть предметом майбутніх досліджень.

Література

1. Копей Б.В., Лях М.М. Нафтогазове обладнання: у 11 т. / За заг. ред. Б.В. Копея. Т. 2 Розрахунок, конструювання, монтаж та експлуатація машин та обладнання для спорудження свердловин: підручник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 612 с.
2. Фафлей О. Я., Михайлюк В. В., Дейнега Р. О., Мельник В. О., Шатан М. В., Пригоровський О. В. Дослідження впливу розміщення основної площини різби на напружено-деформований стан замкового різбового з'єднання елементів бурильної колони. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2021. № 2(51). С. 66–72. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2\(51\)-66-72](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2(51)-66-72)
3. P. Towarnicki & R. Grzejda (2018) Analysis of the impact of temperature load on the state of stress in a bolted flange connection. *International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPHDW)*, Świnouście, Poland. 2018. pp. 96-98. DOI: <https://doi.org/10.1109/IIPHDW.2018.8388333>
4. Yu, Q., Zhou, H., Yu, X., & Yang, X. (2018). High-Temperature Low Cycle Fatigue Life Prediction and Experimental Research of Pre-Tightened Bolts. *Metals*, 8(10), 828. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8100828>
5. Guangjie, Y., Zhenqiang, Y., Qinghua, W., & Zhentong, T. Numerical and experimental distribution of temperature and stress fields in API round threaded connection. *Engineering Failure Analysis*, 2006, 13, p. 1275–1284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.11.006>
6. API-7G-2. Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits. Washington: API Publishing Services, 2003. 30 p.
7. Артım 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. С. 77-87.

References

1. Kopei B.V., Liakh M.M. Naftohazove obladnannia: u 11 t. / Za zah. red. B.V. Kopeia. T. 2 Rozrakhunok, konstruiuvannia, montazh ta ekspluatatsiia mashyn ta obladnannia dlia sporudzhennia sverdlodyn: pidruchnyk. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2021. 612 p.
2. Faflei O. Ya., Mykhailiuk V. V., Deineha R. O., Melnyk V. O., Shatan M. V., Pryhorovskiy O. V. Doslidzhennia vplyvu rozmishchennia osnovnoi ploschchyny rizby na napruzhenno-deformovanyi stan zamkovoho rizbovoho ziednannia elementiv burylnoi kolony. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnogo tekhnichnogo universytetu nafty i hazu*. 2021. № 2(51). P. 66–72. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2\(51\)-66-72](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2(51)-66-72).
3. P. Towarnicki & R. Grzejda (2018) Analysis of the impact of temperature load on the state of stress in a bolted flange connection. *International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPhDW)*, Świnouście, Poland. 2018. pp. 96-98. DOI: <https://doi.org/10.1109/IIPhDW.2018.8388333>.
4. Yu, Q., Zhou, H., Yu, X., & Yang, X. (2018). High-Temperature Low Cycle Fatigue Life Prediction and Experimental Research of Pre-Tightened Bolts. *Metals*, 8(10), 828. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8100828>
5. Guangjie, Y., Zhenqiang, Y., Qinghua, W., & Zhentong, T. Numerical and experimental distribution of temperature and stress fields in API round threaded connection. *Engineering Failure Analysis*, 2006, 13, p. 1275–1284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.11.006>
6. API-7G-2. Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits. Washington: API Publishing Services, 2003. 30 p.
7. Artym V.I., Faflei O. Ya., Deineha R.O., Mykhailiuk V. V. Doslidzhennia vplyvu konstruktyvnykh elementiv dvoopornykh zamkovykh ziednan burylnykh trub na yikh napruzhenno-deformovanyi stan. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2017. № 4. P. 77-87.

Artym V.I., Novoselskyi B. A. Study of temperature distribution in the locked threaded connection of drill pipes

The effect of temperature on threaded connections is one of the important factors affecting their strength, tightness, and durability during operation. At elevated

temperatures, thread materials undergo thermal expansion, which changes their geometric parameters and fits, affecting the tightening force and tightness of the connection. High temperatures contribute to plastic deformation of the surface layers of the thread, accelerated wear, and the formation of backlash, which reduces the reliability of the connection. The lock threaded connection (LTC) used in drill strings for oil and gas well construction must meet the requirements for strength, fatigue life, and tightness. For the study, a three-dimensional model of an SC with NC50 thread was constructed in accordance with the technical conditions, and its simulation modeling was performed using the finite element method (FEM) to determine the temperature distribution in the pipe body and SC at a drilling fluid temperature of 20 °C inside the pipe and 100 °C outside the pipe. It was found that the temperature distribution in the pipe body and the ZRZ is uneven. Considering the temperature distribution in the ZRZ, there is a decrease in temperature from the thrust end of the nipple to the coupling body from 70 °C to 47 °C. The obtained temperature gradient in the pipe and the ZRZ was used as input data for further analysis of the stress-strain state of the ZRZ. The distribution of stresses in the ZRZ under the action of the screw-in torque and the screw-in torque in combination with the temperature effect was established. The results of simulation modeling showed that temperature reduces the equivalent stresses in the recesses of the nipple threads by 15–19%, especially in the recesses of the first two nipple threads. This reduction in stress can have a positive effect on the fatigue strength and service life of the connection. Therefore, it is important to take temperature effects into account when designing, manufacturing, and evaluating the reliability of threaded connections, especially when drilling pipes are operated in variable temperature conditions. The next step is to study the fatigue strength of threaded connections, taking into account temperature effects and adjusting the calculated tightening torque.

Key words: drill string, lock threaded connection, stress-strain state, stress, temperature.

Артим Володимир Іванович – д . т . н, професор кафедри будівництва, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Новосельський Богдан Андрійович – аспірант кафедри нафтогазових машин та обладнання, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Стаття подана 01.09.2025.