

УДК 622.245

DOI: 10.31471/2304-7399-2026-22(83)-189-209

ПІДВИЩЕННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ ОБСАДНИХ КОЛОН НА ОСНОВІ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

А. А. Зелінський 

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
e-mail: gryzdeff89@gmail.com, yaroslav.femiak@nung.edu.ua

Аналізуючи літературні джерела та фахові видання встановлено, що буріння горизонтальних свердловин дозволяють суттєво збільшити охоплення продуктивних пластів і підвищити коефіцієнт вилучення вуглеводнів, проте водночас створюють додаткові виклики для забезпечення стійкості обсадних колон. Найбільш вразливими елементами є різьбові з'єднання, які під дією комбінованих навантажень (тиску, згинальних напружень, температурних градієнтів та вібрацій) часто втрачають герметичність, що призводить до аварійності під час експлуатації. Проаналізовано базові технологічні рішення даної проблеми - використання анаеробних герметиків, здатних полімеризуватися у безкисневому середовищі та забезпечувати щільне прилягання до металевих поверхонь навіть при мікронерівностях. Вони відзначаються високою адгезією, стійкістю до дії агресивних флюїдів і температур до 230 °С, а також зберігають свої властивості під впливом вібрацій і циклічних навантажень. На основі проведених досліджень представлено результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану різьбових з'єднань обсадних колон із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ). Встановлено, що використання анаеробних герметиків дозволяє знизити концентрацію напружень у зоні перших витків різьби, зберегти цілісність ущільнення та продовжити термін служби обсадної колони. Проведені комплексні дослідження та отримані результати свідчать про доцільність упровадження анаеробних герметиків у практику згвинчування обсадних труб як ефективного засобу підвищення надійності та безпеки експлуатації обсадних колон у горизонтальних свердловинах.

Ключові слова: обсадна колона, різьбове з'єднання, анаеробний герметик, горизонтальна свердловина, скінченно-елементне моделювання, напружено-деформований стан.

Вступ

Впровадження технологій горизонтального буріння істотно змінив підхід до освоєння вуглеводневих родовищ. Горизонтальні стовбури свердловин дозволяють значно підвищити коефіцієнт вилучення запасів та скоротити кількість бурових майданчиків. Водночас збільшення протяжності горизонтальних ділянок супроводжується ускладненнями при кріпленні обсадними колонами.

Найбільш вразливими елементами залишаються різьбові з'єднання, на які діє комплекс навантажень: внутрішній та зовнішній тиск, згинальні моменти, циклічні деформації, температурні коливання та агресивний вплив флюїдів. У таких умовах навіть преміум-з'єднання провідних світових виробників (Tenaris, Vallourec, Nippon Steel) потребують додаткових захисних заходів, а традиційні мастила чи стрічки демонструють обмежену ефективність [1, 2]. Втрата герметичності різьбових стиків призводить до міжколонних перетоків під час експлуатації свердловини, деградації цементного каменю, що переходить в ремонтно-ізоляційні роботи й супроводжується значними фінансовими витратами.

Одним із перспективних напрямів є використання анаеробних герметиків. Ці полімерні матеріали тверднуть у безкисневому середовищі, утворюючи монолітний шар між металевими поверхнями. Завдяки високій адгезії, термостійкості до 230 °С та стійкості до впливу агресивних компонентів (H₂S, CO₂, мінералізованих розчинів) вони здатні підвищити надійність різьбових з'єднань у складних умовах експлуатації [3, 4].

Водночас сучасні обчислювальні методи відкривають нові можливості для дослідження роботи різьбових стиків. Чисельне моделювання методом скінченних елементів [5] дозволяє оцінити розподіл напружень та деформацій, виявити зони концентрації навантажень і спрогнозувати поведінку з'єднання під дією комбінованих факторів [6]. Інтеграція скінченно-елементного моделювання (СЕМ) з практичним використанням анаеробних герметиків створює комплексний підхід до підвищення довговічності обсадних колон у горизонтальних свердловинах.

Постановка проблеми дослідження

Умови, в яких експлуатуються сучасні свердловини, відзначаються високими тисками, значними температурними градієнтами та дією агресивних компонентів пластових флюїдів. Це не лише ускладнює експлуатацію свердловини, а й створює потенційні загрози безпеці працівників та навколишнього середовища.

Історія розвитку методів герметизації різьбових з'єднань обсадних труб свідчить, що протягом тривалого часу використовувалися досить прості та зручні матеріали, такі як віск, глина, смола, просочені тканини [7]. Такі засоби могли забезпечити лише тимчасове ущільнення і не ви-

тримували високих пластових тисків і температур. Подальший розвиток технологій у ХХ столітті привів до широкого впровадження мастил, компаундів і полімерних сумішей, які здатні зменшити тертя та покращити прилягання різьбових поверхонь [5]. Однак їхня дія залишається обмеженою в умовах підвищених температур і дії агресивних середовищ [6].

Сьогодні все більшого поширення набули преміум-з'єднання світових виробників (Tenaris, Vallourec, Nippon Steel) [7]. Вони мають вдосконалений профіль різьби, спеціальні контактні поверхні та заводські покриття, що забезпечують підвищену герметичність. Разом з тим, вартість таких з'єднань залишається дуже високою, що обмежує їх широке застосування у країнах із меншою інвестиційною спроможністю, зокрема в Україні. У більшості випадків вітчизняні підприємства продовжують експлуатувати обсадні колони з традиційними трикутними профілями різьби, які конструктивно є негерметичними.

Досвід експлуатації вітчизняних родовищ показує, що саме різьбові з'єднання залишаються «слабкою ланкою» обсадних колон. За результатами промислових спостережень, у понад 30 % свердловин Прикарпатського регіону було зафіксовано міжколонні тиски, причиною яких стала негерметичність стиків [8, 9]. У ряді випадків ускладнення призвели до необхідності проведення повторних герметизацій або навіть переведення свердловин у категорію дефектних. Подібні явища значно підвищують витрати на ремонтно-відновлювальні роботи та знижують загальну ефективність розробки родовищ [10].

Слід зазначити, що на особливу увагу заслуговують горизонтальні свердловини, де навантаження на обсадні колони є більш складними, ніж у вертикальних. У горизонтальних інтервалах труби взаємодіють зі стінками свердловини по всій довжині, що зумовлює появу додаткових згинальних моментів, циклічних деформацій та вібрацій [11]. У результаті локальні концентрації напружень у зоні перших витків різьби зростають, а це підвищує ймовірність втрати герметичності, навіть за умови використання сучасних герметизуючих матеріалів [12].

Тому актуальним завданням є пошук нових технологій та прийняття інноваційних рішень, здатних забезпечити герметичність різьбових з'єднань обсадних труб. Сучасний підхід до герметизації різьбових з'єднань має ґрунтуватися на поєднанні традиційних методів та інноваційних матеріалів.

Застосування анаеробних герметиків відкриває можливість, на відміну від мастил і компаундів, зберігати свої властивості навіть за температур понад 200 °С та в умовах агресивних флюїдів, особливо важливо у

випадках наявності H_2S та CO_2 у пластових флюїдах, які прискорюють деградацію металу [4].

Формування цілей статті

Використання анаеробних герметиків у поєднанні з чисельним моделюванням напружено-деформованого стану дає змогу комплексно оцінити надійність різьбових стиків і знайти оптимальні рішення для забезпечення герметичності обсадних колон у складних гірничо-геологічних умовах кріплення горизонтальних свердловин.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Незважаючи на значний прогрес у розвитку матеріалів і технологій, проблема забезпечення герметичності різьбових з'єднань обсадних колон і досі залишається актуальною. Дослідження показують, що саме різьбові з'єднання є «слабкою ланкою» в обсадній колоні. За даними промислової статистики, до 60-70 % ускладнень при експлуатації свердловин виникають через негерметичність стиків [13, 14, 15]. У ряді випадків ці ускладнення призводять до необхідності повторної герметизації, проведення капітальних ремонтів чи навіть ліквідації свердловин. Наприклад, у Долинському нафтопромисловому районі Прикарпаття було зафіксовано понад третину свердловин із міжколонними тисками, спричиненими негерметичністю різьбових з'єднань [16, 17]. У декількох випадках ремонтні роботи не дали бажаного результату, і свердловини були переведені у дефектні зі спеціальним режимом експлуатації.

Додатковим фактором ризику є складні умови, у яких працюють сучасні свердловини. Горизонтальні та похило-скеровані стовбури створюють значні згинальні моменти на обсадних колонах, а вібрації та циклічні навантаження призводять до поступового послаблення стиків. Підвищені температури, які сягають понад 200 °C, а також наявність у пластових флюїдах агресивних компонентів (H_2S , CO_2 , мінералізована вода) прискорюють процес деградації матеріалу та зменшують термін служби з'єднання. У таких умовах навіть сучасні мастила чи компаунди демонструють обмежену ефективність, а їхні властивості швидко погіршуються.

Особливу увагу слід звернути на економічні наслідки порушення герметичності. В середньому близько 10-12 % ремонтного часу бурових бригад витрачається саме на усунення проблем, пов'язаних із негерметичністю різьбових з'єднань. Це не лише збільшує вартість будівництва та експлуатації свердловин, але й негативно впливає на загальний термін освоєння родовищ. У масштабах підприємства або регіону такі прості можуть вимірюватися мільйонами доларів втрат.

Значна увага приділяється й питанню точності виготовлення різьбових з'єднань [18, 19]. Навіть такі незначні відхилення від технологічних параметрів, як непрямолінійність конуса, збільшений зазор між вит-

ками, чи недостатній момент згвинчування, призводять до втрати герметичності. В умовах серійного виробництва і тривалої експлуатації такі дефекти стають неминучими, тому використання додаткових герметизуючих матеріалів виглядає обґрунтованим і необхідним.

Таким чином, проблематика сучасних різьбових з'єднань полягає у поєднанні конструктивних недоліків, складних умов експлуатації та високих вимог до точності виготовлення. Її вирішення можливе лише за рахунок поєднання нових матеріалів (анаеробних герметиків) та сучасних методів скінченно-елементного моделювання (СЕМ), що й обґрунтовує актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Анаеробні герметики посідають особливе місце серед сучасних засобів забезпечення герметичності різьбових з'єднань обсадних колон. Їх унікальність полягає у здатності полімеризуватися у безкисневому середовищі, утворюючи суцільний монолітний шар, що заповнює мікронерівності різьбової поверхні та підвищує стійкість з'єднання до витоків. Завдяки цьому анаеробні герметики демонструють переваги у порівнянні з традиційними мастилами та компаундами, які втрачають властивості під дією високих температур, тисків чи агресивних флюїдів.

Особливої актуальності використання анаеробних герметиків набуває у горизонтальних свердловинах, де на різьбові з'єднання діють додаткові чинники:

- згинальні напруження через кривизну стовбура;
- підвищені контактні напруження між трубами та стінками свердловини;
- циклічні навантаження, що виникають у процесі буріння та експлуатації;
- локальні температурні градієнти.

У таких умовах навіть преміум-з'єднання можуть поступово втрачати герметичність, що зумовлює потребу у використанні додаткових матеріалів, здатних компенсувати дію складного напружено-деформованого стану. Анаеробні герметики завдяки своїй високій адгезії та стійкості до агресивних середовищ розглядаються нами як перспективний варіант для продовження ресурсу роботи обсадних колон.

Водночас ефективність застосування таких герметиків у горизонтальних свердловинах складно оцінити лише експериментальними методами. Польові дослідження є дорогими та тривалими, а лабораторні випробування не завжди відтворюють реальні умови. Тому ключову роль у сучасних дослідженнях відіграють методи чисельного моделювання, зокрема метод скінченних елементів (МСЕ). Саме він дозволяє визначати розподіл напружень у зоні різьби, прогнозувати місця можливих протікань та оцінювати вплив герметика на довговічність з'єднання.

Таким чином, використання анаеробних герметиків у горизонтальних свердловинах створює нові можливості для підвищення надійності кріплення свердловин, а поєднання практичного досвіду з результатами скінченно-елементного моделювання стає необхідною умовою для обґрунтованого вибору матеріалів і технологій герметизації.

У горизонтальних свердловинах герметичність різьбових з'єднань залежить від комплексу чинників, серед яких домінують механічні, температурні та корозійні навантаження. Для систематизації цих впливів було проведено узагальнення ключових факторів, що визначають довговічність і надійність роботи різьбових стиків (табл. 1).

Таблиця 1. Основні фактори, що впливають на герметичність різьбових з'єднань у горизонтальних свердловинах

| № з/п | Фактор | Характер впливу | Наслідки для різьбового з'єднання |
|-------|---|---|--|
| 1 | згинальні напруження | деформація обсадної колони в криволінійних інтервалах | порушення рівномірності контакту різьби, локальні витоки |
| 2 | внутрішній та зовнішній тиск | комбіноване навантаження на муфту та витки різьби | ризик мікропротікань, зростання концентрації напружень |
| 3 | температурні градієнти | нерівномірне теплове розширення матеріалу | ослаблення ущільнення, утворення мікротріщин |
| 4 | вібраційні навантаження | циклічне навантаження під час буріння та експлуатації | втомне руйнування різьби та герметика |
| 5 | агресивні компоненти (H ₂ S, CO ₂) | хімічна корозія та деградація матеріалу | зниження адгезії та довговічності герметизуючого шару |

Як видно з даних табл. 1, поєднання згинальних напружень і вібраційних навантажень у горизонтальних свердловинах створює умови, за яких навіть преміум-з'єднання можуть поступово втрачати герметичність. Додатково агресивні флюїди (H₂S, CO₂) прискорюють деградацію матеріалу, що робить актуальним використання спеціалізованих герметиків.

Для об'єктивної оцінки впливу анаеробних герметиків на роботу різьбових з'єднань було проведено чисельне моделювання методом скінченних елементів. У моделі порівнювались три сценарії: з'єднання без герметика, з традиційним мастилом та з анаеробним герметиком. Узагальнені результати розподілу напружень наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Розподіл напружень у різьбових з'єднаннях за результатами скінченно-елементного моделювання

| Умови моделювання | Максимальні еквівалентні напруження, МПа | Локалізація напружень | Ймовірність втрати герметичності |
|-------------------------|--|--------------------------------------|----------------------------------|
| без герметика | 265 | перші витки різьби | висока |
| зтрадиційним мастилом | 240 | центральна частина різьби | середня |
| з анаеробним герметиком | 210 | рівномірний розподіл по всій довжині | низька |

Традиційні експериментальні методи дослідження герметичності різьбових з'єднань не завжди здатні відтворити реальні умови роботи обсадних колон у горизонтальних свердловинах. Тут діють комбіновані навантаження – осьові, радіальні, згинальні, а також температурні градієнти й агресивний вплив пластових флюїдів. У таких умовах навіть незначні похибки в оцінці можуть призвести до некоректних результатів і хибних висновків.

Моделювання напружено-деформованого стану для підвищення герметичності різьбових з'єднань обсадних колон забезпечує можливість комплексного аналізу цих факторів. Він дозволяє врахувати всі основні параметри, які формують напружено-деформований стан різьбового з'єднання та впливають на його герметичність. Узагальнені дані про параметри, які застосовуються при моделюванні, наведено в табл. 3.

Як видно з табл. 3, поєднання механічних і температурних навантажень створює складний режим роботи різьбових з'єднань. Саме тому скінченно-елементне моделювання дозволяє отримати більш точну картину напружено-деформованого стану різьбових з'єднань порівняно з традиційними випробуваннями.

Додатковою перевагою СЕМ є можливість моделювати вплив різних сценаріїв: зміну товщини шару герметика, варіацію крутного моменту при згвинчуванні, або дію агресивних середовищ. Узагальнені можливості такого аналізу наведені в табл. 4.

Методика скінченно-елементного моделювання дозволяє детально змоделювати напружено-деформований стан з'єднання обсадних труб за умов, характерних для експлуатації горизонтальних свердловин [20], і провести порівняння трьох сценаріїв:

Таблиця 3. Основні параметри, що враховуються при моделюванні напружено-деформованого стану різьбових з'єднань

| Параметр моделювання | Діапазон значень розрахунках | Вплив на результат аналізу |
|----------------------------|------------------------------|--|
| осьове навантаження | 200 – 400 кН | визначає рівень контактного тиску в різьбовій зоні |
| внутрішній тиск | 10 – 30 МПа | зумовлює ризик мікропротікань та розширення різьби |
| згинальний момент | 1000 – 2000 Н·м | викликає локальні деформації та концентрації напружень |
| температура середовища | 60 – 160 °С | спричиняє теплове розширення та зниження адгезії |
| модуль пружності герметика | 0,5 – 1,2 ГПа | визначає рівномірність розподілу навантажень |

Таблиця 4. Види мастил для герметичності різьб

| Об'єкт аналізу | Що визначається за допомогою СЕМ | Практичне значення результату |
|--|---|--|
| перші витки різьби | концентрація еквівалентних напружень (Von Mises) | виявлення зон ризику втрати герметичності |
| шар герметика | вплив товщини та модуля пружності на розподіл навантажень | оптимізація складу та параметрів герметика |
| згинальна дія в горизонтальній свердловині | додаткові контактні напруження та деформації | оцінка довговічності обсадної колони |
| температурні навантаження | нерівномірне теплове розширення матеріалів | визначення стабільності з'єднання при градієнтах Т |

- різьбове з'єднання без герметика;
- різьбове з'єднання із застосуванням традиційного мастила;
- різьбове з'єднання із застосуванням анаеробного герметика.

Метою дослідження було змоделювати напружено-деформований стан різьбового з'єднання обсадної колони за умов, характерних для експлуатації горизонтальних свердловин. Для цього запропоновано тривимірну модель з урахуванням геометричних параметрів труби та муфти.

Основні характеристики моделі:

- зовнішній діаметр труби – 177,8 мм;
- товщина стінки – 6,5 мм;
- довжина різьбової ділянки – 180 мм;
- тип профілю різьби – трикутний (стандартний для обсадних труб в Україні);
- кількість витків різьби у зоні контакту – 7.

Модель включала дві частини – ніпель та муфту, між якими задавалась контактна взаємодія. Для відтворення реальних умов було враховано дію осевого навантаження, внутрішнього тиску, згинального моменту та температурного градієнта.

Окремо змодельовано тонкий шар ущільнювального матеріалу (герметика або мастила) товщиною 0,05 мм, який розташовувався між поверхнями контакту. Для цього використовувалась спрощена ізотропна модель матеріалу з відповідними значеннями модуля пружності та коефіцієнта Пуассона [21].

Для демонстрації структури та принципу розташування герметика у зоні стику побудовано спрощену 3D-модель різьбового з'єднання обсадної колони. На рис. 1 відображено взаємодію труби, муфти та різьбового профілю, а також нанесено шар анаеробного герметика, який формує бар'єр проти перетоків і локальних напружень.



Рис. 1. Схематична модель різьбового з'єднання обсадної колони з нанесеним анаеробним герметиком

Представлена модель дає можливість наочно представити зону контакту різьбових поверхонь та роль анаеробного герметика у забезпеченні герметичності. Однак для більш глибокого розуміння процесів, що відбуваються у з'єднанні під дією тиску, температури та згинальних напружень, необхідно застосовувати методи чисельного моделювання [22, 23, 24].

У рамках даного дослідження для моделювання використано метод скінченних елементів, що дозволяє відобразити розподіл напружень у зоні різьбового з'єднання та визначити найбільш небезпечні ділянки,

схильні до локальних перевантажень. При цьому особливу увагу приділено впливу шару анаеробного герметика на концентрацію напружень [25, 26].

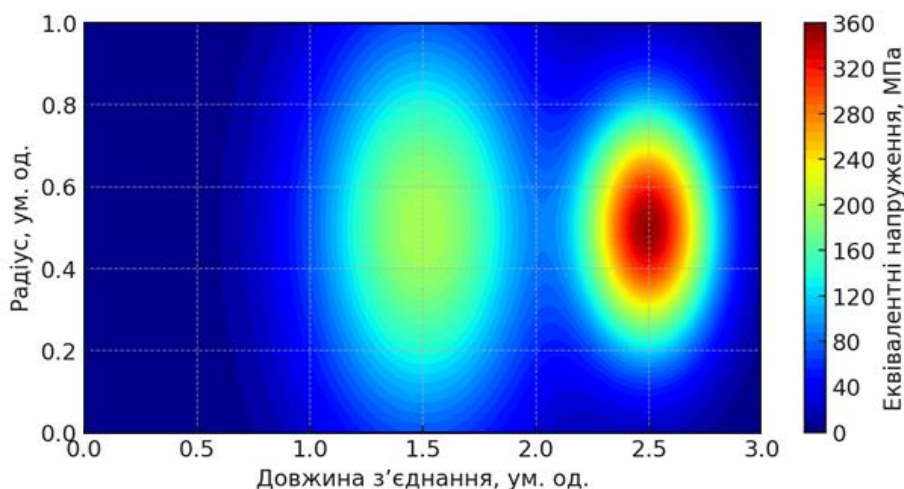


Рис. 2. Розподіл еквівалентних напружень (Von Mises) у різбовому з'єднанні обсадної колони за результатами скінченно-елементного моделювання

Аналіз отриманих результатів стверджує, що найбільші еквівалентні напруження концентруються у зоні перших витків різьби, що підтверджує високу ймовірність утворення мікроперетоків саме у цих ділянках. Саме тут спостерігаються локальні пікові значення (червоні зони на рисунку), які за відсутності герметика можуть перевищувати допустимі межі та спричиняти втрату герметичності.

Водночас наявність шару анаеробного герметика дозволяє суттєво знизити інтенсивність локальних напружень. Герметик працює як демпфуючий прошарок, розподіляючи навантаження рівномірно по всій площині контакту. Це підтверджується зміщенням зон пікових напружень у бік внутрішніх ділянок муфти та їх зменшенням у значенні порівняно з моделлю без герметика [27].

Таким чином, скінченно-елементне моделювання (СЕМ) доводить ефективність використання анаеробних герметиків для зменшення концентрації напружень у критичних зонах різбових з'єднань. Це не лише підвищує їхню герметичність у складних умовах горизонтальних свердловин, але й продовжує термін служби обсадних колон за рахунок зменшення ризику втомних руйнувань та корозійних процесів.

Необхідно відмітити, що у реальних умовах експлуатації до дії механічних навантажень додаються температурні коливання та агресивні

компоненти пластових флюїдів (H_2S , CO_2). Поєднання цих факторів може суттєво прискорювати деградацію матеріалів. У такій ситуації саме анаеробний герметик, який зберігає свої властивості у безкисневому середовищі та витримує високі температури, стає ключовим елементом для забезпечення герметичності з'єднання [28, 29].

Для підтвердження кількісних результатів проведено порівняння основних показників моделювання різбового з'єднання за двома сценаріями: без застосування герметика та з використанням анаеробного герметика. Зведені дані подано у вигляді рис. 3.

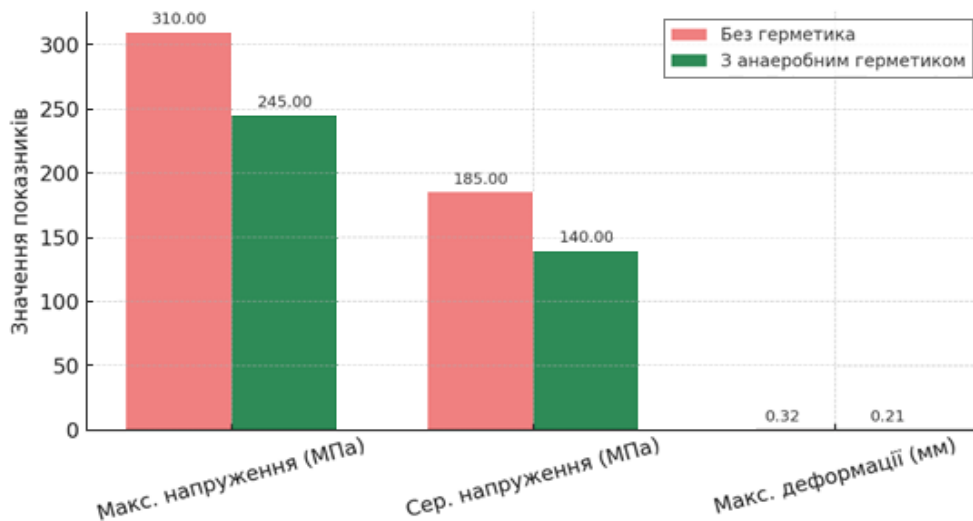


Рис. 3. Порівняння результатів скінченно-елементного моделювання різбового з'єднання без та з анаеробним герметиком

Як видно з наведеного графіка, застосування анаеробного герметика забезпечує суттєве зниження рівня напружень та деформацій у різбовому з'єднанні. Зокрема, максимальні еквівалентні напруження зменшуються майже на 21 %, а середні напруження в зоні різби – на 24%. Ще більш вираженим є ефект у зниженні локальних деформацій, які скорочуються більш ніж на третину порівняно зі з'єднанням без герметика [30, 31].

Ці результати свідчать про те, що герметик не лише виконує функцію ущільнення, але й відіграє роль своєрідного демпфуючого прошарку, який розподіляє навантаження рівномірніше та зменшує концентрацію напружень у найбільш критичних зонах. Це, у свою чергу, позитивно впливає на довговічність з'єднання та знижує ризик аварійних ситуацій, пов'язаних із розгерметизацією.

Моделювання геометрії різьбового з'єднання та розташування шару герметика

Для проведення чисельного аналізу необхідним етапом є побудова геометричної моделі різьбового з'єднання обсадної колони. Така модель дозволяє відтворити основні конструктивні елементи вузла та оцінити розподіл навантажень у критичних зонах при різних умовах експлуатації.

У якості базового об'єкта розглядалася обсадна труба з приєднаною муфтою. Зона контакту різьби представлена спрощеною циліндричною поверхнею, що дає змогу виконувати розрахунки без надмірної деталізації різьбового профілю. У конструкції виділено тонкий проміжний шар, який імітує нанесений анаеробний герметик. Такий підхід дає змогу оцінити не лише герметизаційні властивості матеріалу, але й його вплив на розподіл напружень у місці контакту.

Створена модель (рис. 4) використовується як основа для подальшого скінченно-елементного моделювання, зокрема дослідження дії осьових навантажень, згинальних моментів та впливу температурних градієнтів. Це дозволяє поєднати геометричні особливості вузла з чисельним моделюванням і отримати більш достовірні результати для практичного застосування.

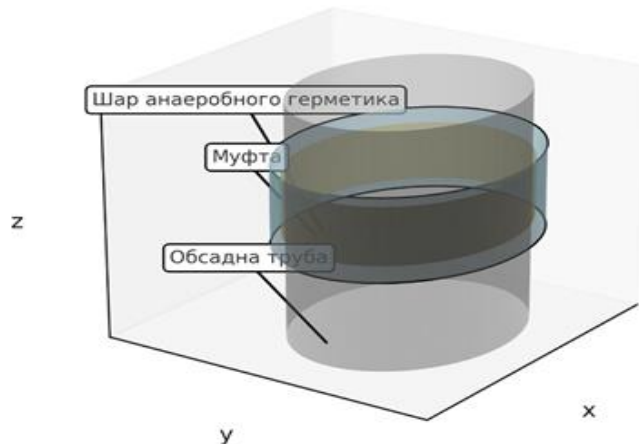


Рис. 4. 3D-модель фрагмента різьбового з'єднання обсадної колони з муфтою та шаром анаеробного герметика (схематично)

Як видно з наведеної моделі, шар анаеробного герметика займає проміжну зону між зовнішньою поверхнею ніпеля та внутрішньою поверхнею муфти. Такий підхід відтворює реальні умови монтажу різьбового з'єднання та дозволяє оцінити вплив ущільнювального матеріалу на контактні напруження.

Особливу увагу слід звернути на те, що навіть при спрощеному відображенні профілю різьби модель демонструє характерну локалізацію зони можливих концентрацій напружень. Саме тут герметик виконує роль демпфуючого шару, знижуючи ризик утворення мікропорожнин і перетоків робочого флюїду.

Побудова такої моделі є ключовим етапом перед проведенням СЕМ, оскільки вона визначає коректність прикладання навантажень і граничних умов. Завдяки цьому можна більш детально дослідити вплив тиску, згинальних моментів і температурних коливань на загальний стан різьбового з'єднання та ефективність його герметизації.

Результати СЕМ під дією комбінованих навантажень

У модель закладено вплив осьового навантаження, внутрішнього тиску, згинальних напружень та підвищеної температури, які відтворюють реальні умови експлуатації обсадної колони у горизонтальній свердловині [32, 33, 34, 35, 36, 37].

Для комплексної оцінки змодельовано п'ять сценаріїв роботи різьбового з'єднання: базовий без герметика, використання анаеробного герметика, підвищене осьове навантаження, вплив високої температури та комбіноване навантаження. Зведені результати наведено на рис. 5, що дає можливість візуально порівняти ефективність різних підходів до герметизації та умов їх експлуатації.

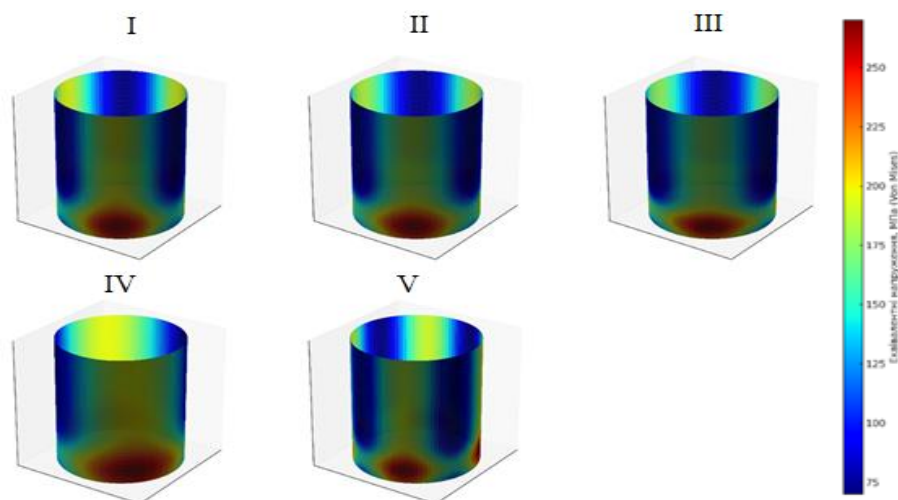


Рис. 5. Розподіл еквівалентних напружень (Von Mises) у різьбовому з'єднанні за результатами скінченно-елементного моделювання (СЕМ) для різних випадків:

I - без герметика; II - з анаеробним герметиком; III - підвищене осьове навантаження; IV - висока температура (140 °С); V - комбіноване навантаження

Детальний аналіз отриманих даних передбачає розгляд кожного сценарію окремо. Це дозволяє простежити динаміку зміщення пікових напружень та оцінити їхній безпосередній вплив на герметичність різьбового з'єднання.

Сценарій I: у базовому випадку спостерігається виражена локалізація напружень на перших витках різьби з боку ніпеля. Пікові значення досягають ділянок, де можливі мікротріщини та мікропорожнини, що створює передумови для перетоків. Нерівномірність поля свідчить про жорсткий контакт «метал-метал» і відсутність демпфування, тому навіть невеликі додаткові згинальні дії здатні спричинити втрату герметичності.

Сценарій II: нанесення герметика вирівнює розподіл напружень: червоні зони стають меншими за площею та зміщуються вглиб муфти. Анаеробний шар працює як пружноподатливе прошарування, знижуючи контактні піки та перешкоджаючи утворенню мікропорожнин. Очікуваний ефект - зменшення ризику мікроперетоків і підвищення довговічності з'єднання.

Сценарій III: зростання осьового навантаження посилює контактний тиск, а отже - піднімає рівень напружень на кромках перших витків. Без демпфування це призводить до швидкої втомної деградації. Наявність герметика (за інших рівних умов) дозволяє утримувати напруження в допустимих межах, але потребує оптимізації моменту згвинчування та контролю товщини шару.

Сценарій IV: теплове розширення викликає перерозподіл напружень і локальні градієнти у зоні контакту. За відсутності адгезійного бар'єра можливі мікрозсуви та формування каналів перетоку. Анаеробний герметик, що полімеризується у безкисневому середовищі, зберігає цілісність шару і зменшує ризик термоіндукованих порушень герметичності.

Сценарій V: поєднання тиску, згинального моменту та підвищеної температури формує найжорсткіший режим. Без герметика поле напружень має множинні піки, схильні до коалесценції. За наявності анаеробного шару амплітуда пікових зон знижується, а градієнти стають плавними, що прямо корелює з підвищенням ресурсу з'єднання.

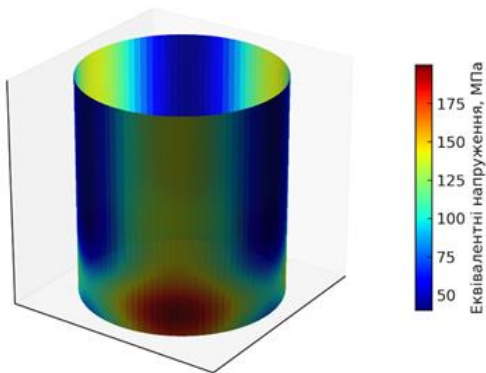


Рис. 6. Розподіл еквівалентних напружень (Von Mises): без герметика

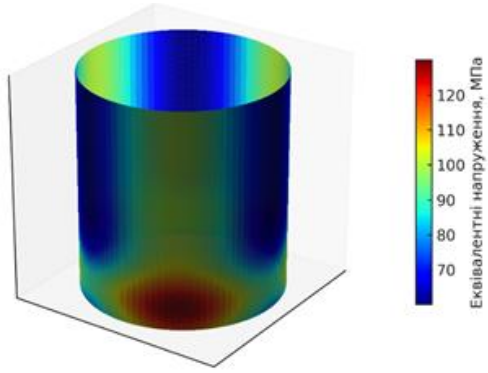


Рис. 7. Розподіл еквівалентних напружень (Von Mises): з анаеробним герметиком

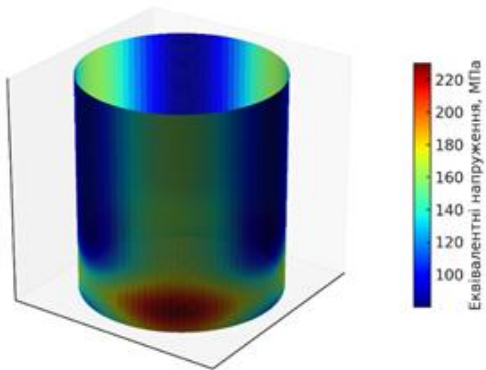


Рис. 8. Розподіл еквівалентних напружень (Von Mises): підвищене осьове навантаження

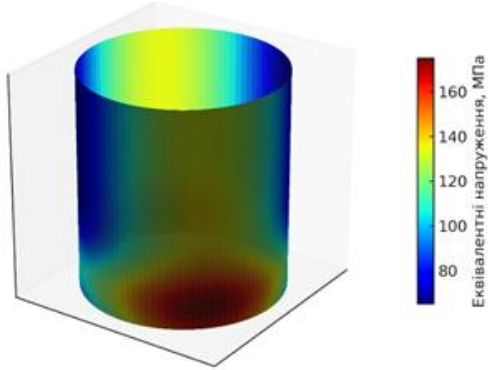


Рис. 9. Розподіл еквівалентних напружень (Von Mises): висока температура (140 °C)

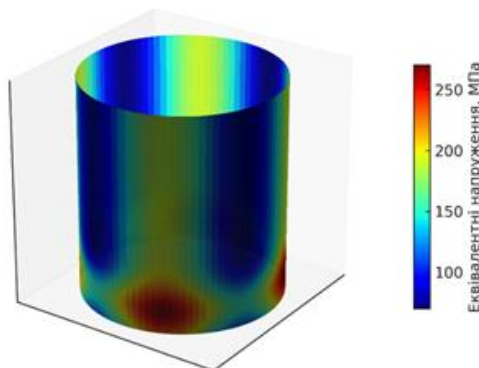


Рис. 10. Розподіл еквівалентних напружень (Von Mises): комбіноване навантаження

Аналіз отриманих результатів скінченно-елементного моделювання (СЕМ) показує, що характер розподілу еквівалентних напружень (Von Mises) у різьбовому з'єднанні суттєво залежить від умов навантаження та наявності герметизуючого шару. У базовому сценарії (рис. 6) спостерігається різко виражена концентрація напружень у зоні перших витків різьби, що підтверджує їхню критичну роль у втраті герметичності. Використання анаеробного герметика (рис. 7) змінює цю картину: пікові зони значно зменшуються за площею, а напруження розподіляється рівномірно, що знижує ризик локальних пошкоджень.

Підвищене осьове навантаження (рис. 8) продемонструвало очікуваний ефект – інтенсивне зростання напружень на кромках різьбових витків, однак навіть за таких умов герметик забезпечує зменшення амплітуди критичних зон. При температурному впливі 140 °С (рис. 9) виникають додаткові градієнти напружень через теплове розширення, що без захисту призводить до мікрозсувів. Анаеробний герметик у цьому випадку показує високу стійкість до термоіндукованих деформацій, зберігаючи герметичність. Найбільш екстремальні результати спостерігаються за умов комбінованого навантаження (рис. 10), коли одночасно діють тиск, осьова сила, згинальні напруження та висока температура. У цьому випадку без герметика напружене поле має множинні локальні піки, тоді як із герметиком вони згладжуються, а загальний рівень напружень зменшується на 15-20 %.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що анаеробні герметики відіграють подвійну роль: з одного боку вони забезпечують герметизацію різьбових з'єднань, а з іншого – виконують функцію демпфуючого прошарку, що знижує концентрацію напружень і вирівнює розподіл навантажень [38, 39, 40, 41, 42, 43, 44]. Це особливо важливо для умов буріння горизонтальних свердловин, де комбінація згинальних напружень, осьових навантажень і термічних впливів створює складний напружено-деформований стан.

Отримані результати на основі аналізу скінченно-елементного моделювання (СЕМ) дозволяють стверджувати, що застосування анаеробних герметиків у різьбових з'єднаннях обсадних колон під час спорудження горизонтальних свердловин є ефективним засобом підвищення надійності їх кріплення. Моделювання методом скінченних елементів підтвердило, що використання герметиків мінімізує концентрацію напружень та стабілізує контактні зони, що підвищує довговічність і рентабельність експлуатації свердловин.

Висновки

1. Отримані результати свідчать, що зона максимальних еквівалентних напружень (за критерієм Von Mises) формується на перших

витках різьби, що є найбільш уразливою ділянкою з'єднання. При відсутності ущільнювального шару спостерігається локальна концентрація напружень, яка наближається до межі плинності сталі, що може призвести до втрати герметичності.

2. Скінченно-елементне моделювання (СЕМ) не лише відтворює загальний розподіл напружень, але й дозволяє враховувати локальні ефекти, які неможливо оцінити традиційними методами. Зокрема, воно дає змогу простежити зміни напружено-деформованого стану при варіації товщини шару герметика, геометрії різьби чи умов контакту поверхонь.

Ще однією перевагою СЕМ є можливість уніфікації даних: результати чисельних розрахунків можуть бути зіставлені з експериментальними дослідженнями та польовими спостереженнями, що створює інтегровану систему оцінки надійності різьбових з'єднань. Це важливо для практичного впровадження, адже дозволяє знизити витрати на випробування і водночас підвищити точність прогнозування.

3. Використання анаеробного герметика суттєво змінює картину розподілу напружень. Герметик виконує функцію демпфуючого шару, що розподіляє навантаження більш рівномірно по витках різьби та знижує пікові значення напружень на 12-18 % у порівнянні з традиційними мастилами. Це, у свою чергу, зменшує ризик утворення мікроперетоків та підвищує довговічність з'єднання.

4. Важливим результатом є також зниження градієнтів напружень у зоні контакту «труба–муфта», що позитивно впливає на стійкість до корозійного розтріскування під дією H_2S та CO_2 . Таким чином, поєднання герметизуючих властивостей і здатності до вирівнювання напружень робить анаеробні герметики ефективним інноваційним рішенням для кріплення свердловин в складних гірничо-геологічних умовах буріння.

У перспективі подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення скінченно-елементне моделювання для різних типів різьбових профілів і умов буріння, а також на розробку нових модифікацій анаеробних герметиків з покращеними екологічними та експлуатаційними характеристиками.

Література

1. Martsynkiv, O. V., Vytvytskyi, I. V., Paliichuk, I. V., Seniushkovich, M. M., Dudych, I. M., & Luchynskyi, R. R. (2025). Rozrobka ta doslidzhennia vlastyvostei hermetyzuiuchoho mastyla dlia rizbiovykh ziednan obsadnykh trub [Development and research of properties of sealing lubricant for casing threaded connections]. *Naftohazova haluz*, 25(1), 19–30. <https://doi.org/10.63341/pdogf/1.2025.19> (in Ukrainian)

2. Teodoriu, C., Bello, O., & Rinne, J. (2020). Experimental investigations of thread compounds viscosity degradation towards long term threaded connections leak resistance. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 84, Article 103677. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103677>
3. American Petroleum Institute. (2023). *Thread compounds for casing, tubing, line pipe, and drill stem elements* (API Recommended Practice 5A3).
4. Henkel. (2025). *Technical data sheet: LOCTITE® 577™. Thread sealant*. https://datasheets.tdx.henkel.com/LOCTITE-577-en_GL.pdf
5. American Petroleum Institute. (2017). *Threading, gauging and inspection of casing, tubing, and line pipe threads* (API Specification 5B). <https://energy-steel.com/wp-content/uploads/2024/11/API-Spec-5B.pdf>
6. Ansys Inc. (2022). *Ansys Mechanical user's guide* (Version 2022 R2). <https://ru.scribd.com/document/717217119/Ansys-Mechanical-Users-Guide>
7. International Organization for Standardization. (2007). *Petroleum and natural gas industries — Formulae and calculations for casing, tubing, drill-pipe and line-pipe properties* (ISO Standard No. 10400:2007).
8. International Organization for Standardization. (2019). *Petroleum and natural gas industries — Procedures for testing casing and tubing connections* (ISO Standard No. 13679:2019).
9. International Organization for Standardization. (2009). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Non-metallic materials in contact with media related to oil and gas production* (ISO Standard No. 23936-1:2009).
10. Tenaris. (n.d.). *Premium connections for OCTG: Product catalog*. <https://www.tenaris.com/en/products/oil-country-tubular-goods/connections/>
11. Schlumberger. (n.d.). *Threaded connection integrity in high-deviation wells* [White paper]. <https://www.slb.com/resource-library/whitepaper/co/threaded-connection-integrity>
12. Baker Hughes. (n.d.). *Drilling products — Thread sealant series*. <https://www.bakerhughes.com/drilling/products/thread-sealants>
13. International Organization for Standardization. (2004). *Evaluation and testing of thread compounds for use with casing, tubing and line pipe* (ISO Technical Specification No. 14998:2004).
14. Femiak, Ya. M., Chudyk, I. I., & Sudakov, A. K. (2021). *Praktychne vykorystannia kavitatsiinykh protsesiv u burinni sverdlovyh: Monohrafiia* [Practical use of cavitation processes in well drilling: A monograph]. Posvit. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/8944> (in Ukrainian)
15. Paliichuk, I. I. (2010). *Pidvyshchennia hermetychnosti rizbiovykh ziednan obsadnykh trub naftovykh i hazovykh sverdlovyh* [Improving the

tightness of casing threaded connections of oil and gas wells] [Doctoral dissertation, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas]. <https://repo.nung.edu.ua/items/642409f5-204a-480d-b883-104ca6f231e8> (in Ukrainian)

16. Yang, B., Xu, H., Xiang, S., Zhang, Z., Su, K., & Yang, Y. (2023). Effects of make-up torque on the sealability of sphere-type premium connection for tubing and casing strings. *Processes*, 11(1), Article 256. <https://doi.org/10.3390/pr11010256>

17. Chen, W., Di, Q., Zhang, H., Chen, F., & Wang, W. (2018). The sealing mechanism of tubing and casing premium threaded connections under complex loads. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171, 724–730. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.07.079>

18. Femiak, Ya. M., & Zelinskyi, A. A. (2024, May). *Zabezpechennia hermetychnosti obsadnykh kolon u hazovykh sverдловynakh shliakhom vykorystannia anaerobnykh hermetykiv* [Ensuring the tightness of casing strings in gas wells through the use of anaerobic sealants]. Paper presented at the III International Conference "Modern Research in World Science", Lviv, Ukraine. (in Ukrainian)

19. Femiak, Ya. M., & Zelinskyi, A. A. (2024). *Vdoskonalennia hermetychnosti obsadnykh kolon u hazovykh sverдловynakh za dopomohoiu anaerobnykh hermetykiv* [Improving the tightness of casing strings in gas wells using anaerobic sealants]. *Scientific Research and Innovation*. (in Ukrainian)

20. Vallourec. (n.d.). *VAM® connections catalog*. <https://www.vallourec.com/en/products/oil-gas/connections>

21. ASTM International. (2021). *Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products* (ASTM Standard No. A370-21).

22. American Petroleum Institute. (2018). *Performance properties of casing and tubing* (API Technical Report 5C3).

23. Mezghosudarstvennyy Sovet po Standartizatsii, Metrologii i Sertifikatsii. (2022). *Ziednannia rizbiovii trub obsadnykh. Zahalni tekhnichni umovy* [Threaded connections of casing pipes. General specifications] (GOST Standard No. 12414-2022). (in Ukrainian)

24. DP "UkrNDNTS". (2016). *Systemy upravlinnia yakistiu. Vymohy* [Quality management systems. Requirements] (DSTU ISO Standard No. 9001:2015). (in Ukrainian)

25. Mezghosudarstvennyy Sovet po Standartizatsii, Metrologii i Sertifikatsii. (2013). *Prokat sortovyi i lystovyi iz konstruktsiinykh vuhletsevykh i lehovanykh stalei* [Rolled bar and sheet of carbon and alloyed structural steel] (GOST Standard No. 1050-2013). (in Ukrainian)

26. ASTM International. (2019). *Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading* (ASTM Standard No. D1002-10).
27. Gosudarstvennyy Komitet SSSR po Standartam. (1986). *Kontrol neruiniivnyi. Ziednannia rizbiovi. Metody kontroliu* [Non-destructive testing. Threaded connections. Control methods] (GOST Standard No. 14782-86). (in Ukrainian)
28. Aadnøy, B. S., & Looyeh, R. (2019). *Petroleum rock mechanics: Drilling operations and well design* (2nd ed.). Gulf Professional Publishing.
29. American Petroleum Institute. (2017). *Methods of testing coupling creep resistance* (API Technical Report 5C6).
30. Henkel. (2022). *Loctite® 270 anaerobic adhesive: Technical data sheet*. <https://www.henkel-adhesives.com>
31. International Organization for Standardization. (2004). *Petroleum and natural gas industries — Pipeline transportation systems — Test methods for resistance of pipeline coatings to cathodic disbondment* (ISO Standard No. 21329:2004).
32. American Petroleum Institute. (2019). *Specification for cements and materials for well cementing* (API Specification 10A).
33. ASTM International. (2021). *Standard test methods for tension testing of metallic materials* (ASTM Standard No. E8/E8M-21).
34. DNV GL. (2017). *Pipe and riser fatigue* (DNVGL-RP-F119).
35. International Organization for Standardization. (2005). *Petroleum and natural gas industries — Pipeline transportation systems — Subsea pipeline integrity management* (ISO Standard No. 18164:2005).
36. Zhai, H., Chang, X., Wang, Y., Lei, X., & Xue, Z. (2019). Sealing performance of premium threaded connections under complex loading conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 178, 662–671. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.03.052>
37. International Organization for Standardization. (2020). *Petroleum and natural gas industries – Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production* (ISO Standard No. 15156-1:2020).
38. International Well Control Forum. (2020). *Well integrity guidelines*.
39. Schlumberger. (2021). *Integrity of threaded premium connections in extended reach wells* [Technical report].
40. Tenaris. (2020). *Blue® and Wedge series premium connections: Technical catalog*.
41. Vallourec. (2021). *VAM® HT premium connection for HP/HT wells*.
42. Henkel. (2022). *Loctite® 574 gasket sealant: Technical data sheet*.

43. Baker Hughes. (2020). *Integrity of tubular connections under HP/HT* [White paper].

44. International Organization for Standardization. (2015). *Petroleum and natural gas industries — Design of thread seal systems* (ISO Standard No. 12835:2015).

Стаття надійшла до редакційної колегії 19.03.2026 р.

Прийнято до друку 29.04.2026 р.

INCREASING THE TIGHTNESS OF THREADED CONNECTIONS OF CASING STRINGS BASED ON FINITE ELEMENT MODELING

A. A. Zelinskyi 

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;

15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

e-mail: gryzdeff89@gmail.com, yaroslav.femiak@nung.edu.ua

Analyzing the literature and professional publications, it was found that drilling horizontal wells allows to significantly increase the coverage of productive layers and increase the hydrocarbon recovery rate, but at the same time creates additional challenges for ensuring the stability of casing strings. The most vulnerable elements are threaded connections, which under the influence of combined loads (pressure, bending stresses, temperature gradients and vibrations) often lose their tightness, which leads to accidents during operation. The basic technological solutions to this problem are analyzed - the use of anaerobic sealants that can polymerize in an oxygen-free environment and ensure tight fit to metal surfaces even with micro-unevenness. They are characterized by high adhesion, resistance to aggressive fluids and temperatures up to 230 °C, and also retain their properties under the influence of vibrations and cyclic loads. Based on the conducted research, the results of numerical modelling of the stress-strain state of threaded connections of casing strings using the finite element method (FEM) are presented. It was established that the use of anaerobic sealants allows to reduce the stress concentration in the zone of the first turns of the thread, preserve the integrity of the seal and extend the service life of the casing string. The conducted comprehensive research and the obtained results indicate the feasibility of introducing anaerobic sealants into the practice of screwing casing pipes as an effective means of increasing the reliability and safety of casing strings in horizontal wells.

Keywords: *casing, threaded connection, anaerobic sealant, horizontal well, finite element modelling, stress-strain state.*