



Прийнято 24.04.2026. Прорецензовано 14.05.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 622.245

DOI: 10.31471/1993-9868-2026-1(45)-146-158

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ ОБСАДНИХ КОЛОН У СВЕРДЛОВИННИХ УМОВАХ

Фем'як Я. М.

Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4445-6731>
e-mail: yaroslav.femiak@nung.edu.ua

Зелінський А. А. *

Аспірант
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0009-0001-0495-9935>
e-mail: gryzdeff89@gmail.com

Анотація. Проведено аналіз сучасних підходів до забезпечення герметичності обсадних колон, за яким виявлено, що зі зростанням складності буріння, зокрема горизонтальних свердловин, традиційні методи герметизації різьбових з'єднань обсадних колон стають неефективними. Навіть вдосконалені конструкції різьб не гарантують надійності через ризик локальної розгерметизації, зумовленої складним напружено-деформованим станом. Досліджено підходи до підвищення герметичності обсадних колон шляхом поєднання анаеробних герметиків та методів скінченно-елементного моделювання (МСЕ). Проаналізовано напружено-деформований стан контактних зон різьби за комбінованої дії експлуатаційних навантажень. Представлено 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. Роботу спрямовано на поглиблення попередніх досліджень через деталізоване моделювання роботи герметика в замкненому середовищі. На основі аналізу фізико-механічних характеристик встановлено закономірності напружено-деформованого стану з'єднань. Доведено, що анаеробні матеріали забезпечують герметизацію та водночас ефективно перерозподіляють навантаження у різьбових з'єднаннях. Застосування анаеробних герметиків підвищує надійність обсадних колон у горизонтальних свердловинах за рахунок зниження концентрації напружень, покращення стабільності контакту в різьбі та запобігання мікропротіканням у складних гірничо-геологічних умовах. 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: різьбове з'єднання; анаеробний герметик; горизонтальна свердловина; скінченно-елементне моделювання; напружено-деформований стан; комбіновані навантаження.

Запропоноване посилання: Фем'як, Я. М. & Зелінський, А. А. (2026). Комплексний підхід до оцінки надійності різьбових з'єднань обсадних колон у свердловинних умовах. Нафтогазова енергетика, 1(45), 146-158. doi: 10.31471/1993-9868-2026-1(45)-146-158.

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Вступ

Розвиток горизонтального буріння та складні гірничо-геологічні умови висувають жорсткі вимоги до надійності обсадних колон, передусім – до герметичності різьбових з'єднань. Складний напружено-деформований стан горизонтальних свердловин зумовлений поєднанням осьових навантажень, тиску, згину, температурних перепадів та вібрацій [1, 4]. Така комбінація факторів спричиняє нерівномірний розподіл контактних напружень і появу зон їх концентрації, що підвищує ризик втрати герметичності [2].

Попри широке застосування, традиційні методи фіксації не завжди забезпечують надійність у складних умовах експлуатації [3, 10]. Це зумовлює необхідність переходу від суто конструктивних рішень до комплексного врахування властивостей ущільнювальних матеріалів. Зокрема, особливої уваги потребують анаеробні герметики, здатні формувати суцільний контактний шар і впливати на перерозподіл навантажень, що відкриває нові можливості для підвищення ресурсу з'єднань.

Водночас оцінка ефективності таких рішень базується на сучасному скінченно-елементному моделюванні (СЕМ) [5, 9, 17]. Цей підхід дозволяє детально проаналізувати напружено-деформований стан з'єднань за умов, наближених до реальної експлуатації, що є передумовою для обґрунтованого вибору параметрів герметизації та підвищення довговічності обсадних колон [6].

Стабільність ущільнення різьбових з'єднань зумовлена не лише геометрією профілю, а й параметрами контактної взаємодії [7]. Особливу роль відіграють фізико-механічні властивості герметизуючого шару: його здатність адаптуватися до мікронерівностей, пружність та умови полімеризації, що безпосередньо впливають на рівномірність розподілу навантажень.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Надійність експлуатації нафтогазових свердловин безпосередньо залежить від герметичності різьбових з'єднань обсадних колон. Відповідно до стандартів API Spec 5CT та ISO 13679:2019, такі з'єднання мають зберігати цілісність під дією комбінованих навантажень: осьового стиску, внутрішнього тиску, температурних перепадів та агресивних середовищ [9-10].

Втрата герметичності різьбових з'єднань є критичним фактором, що призводить до між-

колонних тисків, корозійного руйнування труб та аварій [11]. Статистика IADC підтверджує, що понад 30 % експлуатаційних ускладнень спричинені саме дефектами різьбових з'єднань [12].

Досвід розробки вітчизняних родовищ підтверджує, що різьбові з'єднання є найбільш критичним вузлом обсадних колон. Промислові спостереження на Прикарпатті свідчать: понад 35 % свердловин мають міжколонні тиски, зумовлені негерметичністю з'єднань. Такі дефекти часто потребують повторної герметизації або призводять до виведення свердловин у категорію дефектних, що здорожує ремонтні роботи та знижує ефективність експлуатації покладів [14,16].

Особливої уваги заслуговують горизонтальні свердловини, в яких обсадні колони зазнають складніших навантажень порівняно з вертикальними. Взаємодія труб зі стінками свердловини по всій довжині горизонтальної ділянки зумовлює виникнення додаткових згинальних моментів, циклічних деформацій та вібрацій [15, 44]. Це призводить до зростання локальних напружень у зоні перших витків різьби, підвищуючи ризик втрати герметичності, навіть за умови застосування сучасних герметизуючих матеріалів [16, 17].

Аналіз еволюції методів герметизації різьбових з'єднань обсадних труб показує, що тривалий час застосовувалися прості матеріали: віск, глина, смола та просочені тканини [18]. Проте ці засоби забезпечували лише тимчасову герметичність і були неефективними за високих пластових тисків та температур. Розвиток технологій у ХХ столітті зумовив широке впровадження мастил, компаундів і полімерних сумішей, які підвищують якість прилягання різьбових поверхонь та зменшують тертя [13, 19, 24]. Водночас їхня ефективність суттєво знижується в умовах високих температур і впливу агресивних середовищ [10, 20-21].

Традиційні матеріали (мастила, стрічки, пасти) мають обмежене застосування в умовах циклічних навантажень та температур понад 120 °С [12, 22]. Перспективною альтернативою їм виступають анаеробні герметики, що утворюють міцну адгезійну плівку, стійку до агресивних середовищ (H₂S, CO₂, морська вода) [23]. Їхня висока адгезія до сталі та здатність витримувати тиск понад 80 МПа роблять їх ефективнішими за мастильні матеріали .

Проведений аналіз дозволив встановити, що на сьогодні світовий ринок демонструє стійку тенденцію до використання преміум-з'єднань від провідних виробників (Tenaris,

Vallourec, Nippon Steel). Завдяки вдосконаленому профілю різьби, спеціальним контактним поверхням та заводським покриттям, ці з'єднання забезпечують підвищену герметичність колони. Однак, висока вартість обмежує їх масове впровадження, зокрема в Україні. Як наслідок, вітчизняні підприємства здебільшого продовжують експлуатувати обсадні труби з традиційними трикутними різьбами типу ДСТУ, які конструктивно не забезпечують необхідної герметичності.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

На основі здійсненого літературного огляду та аналізу промислового матеріалу встановлено, що 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 свердловини. Перед авторами поставлено завдання розробити та впровадити технологічні рішення на основі анаеробних герметиків при згвинчуванні обсадних труб, що підвищить надійність та безпеку експлуатації обсадних колон у горизонтальних свердловинах [45]. Для надійного кріплення горизонтальних свердловин у складних умовах доцільно поєднувати застосування анаеробних герметиків із моделюванням напружено-деформованого стану (НДС) [25, 26]. Такий підхід забезпечує комплексну оцінку та оптимізацію різьбових з'єднань, гарантує їх герметичність завдяки точному аналізу їхнього стану [27-28].

У попередніх дослідженнях було встановлено, що навіть за використання сучасних конструкцій різьбових з'єднань та традиційних ущільнювальних матеріалів проблема локальної розгерметизації не втрачає актуальності, особливо за умов дії комбінованих навантажень [29, 30].

Крім того, актуальним є питання оцінки поведінки різьбового з'єднання в умовах змінних режимів навантаження, що характерні для сучасних технологій буріння та експлуатації свердловин [31]. Саме тому подальше дослідження спрямоване на деталізацію впливу окремих параметрів на НДС з'єднання та визначення умов, за яких застосування анаеробних герметиків забезпечує максимальний ефект з точки зору герметичності та довговічності [32].

Мета та завдання досліджень

Метою статті є обґрунтування та розробка комплексної технології герметизації різьбових з'єднань обсадних колон у горизонтальних свердловинах шляхом поєднання анаеробних герметиків із математичним моделюванням їхнього НДС. Дослідження спрямовані на розробку моделі НДС різьбового з'єднання, що враховує вплив герметизуючого складу та експлуатаційних навантажень, а також на оцінку фізико-механічних властивостей анаеробних герметиків для прогнозування тривалої герметичності з'єднань у складних геолого-технічних умовах [33-35].

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Складні умови роботи в горизонтальних свердловинах - високі згинальні навантаження, вібрації та термічні градієнти - створюють критичні перенапруження в різьбових з'єднаннях. Внаслідок цього, навіть надійні преміум-з'єднання обсадних колон можуть втрачати герметичність через сукупний вплив цих факторів [36].

Комплекс аналітичних досліджень, методів СЕМ та функціонального аналізу дозволив відтворити розподіл напружень і деформацій у зоні контакту «ніпель-муфта-герметик» під дією комбінованих навантажень. Результати (рис. 1 - 2) показують, що зона пікових напружень за фон Мізесом (Von Mises) [37] формується на перших витках різьби та кромці входу муфти. У цих зонах локалізуються небезпечні концентрації, які за відсутності герметика можуть перевищувати межу плинності сталі [38].

Застосування анаеробного герметика забезпечує рівномірний розподіл навантажень. Аналіз карти напружень (рис. 1) свідчить про зниження пікових значень на 15 - 20 %, що мінімізує ризик мікротріщин та витоків. Водночас карта деформацій (рис. 2) демонструє демпфуючий ефект: амплітуда локальних зсувів (зокрема на 1-2 витках) зменшується на 10-12 %, підвищуючи стабільність герметизації при вібраційних та циклічних навантаженнях [26].

СЕМ показало, що використання анаеробних герметиків є ефективним засобом стабілізації НДС різьбових з'єднань та ліквідації мікроперетоків, що суттєво підвищує їхню надійність та експлуатаційний ресурс у горизонтальних свердловинах.

Чисельне моделювання дозволило проаналізувати НДС різьбових з'єднань обсадних колон у горизонтальних свердловинах.

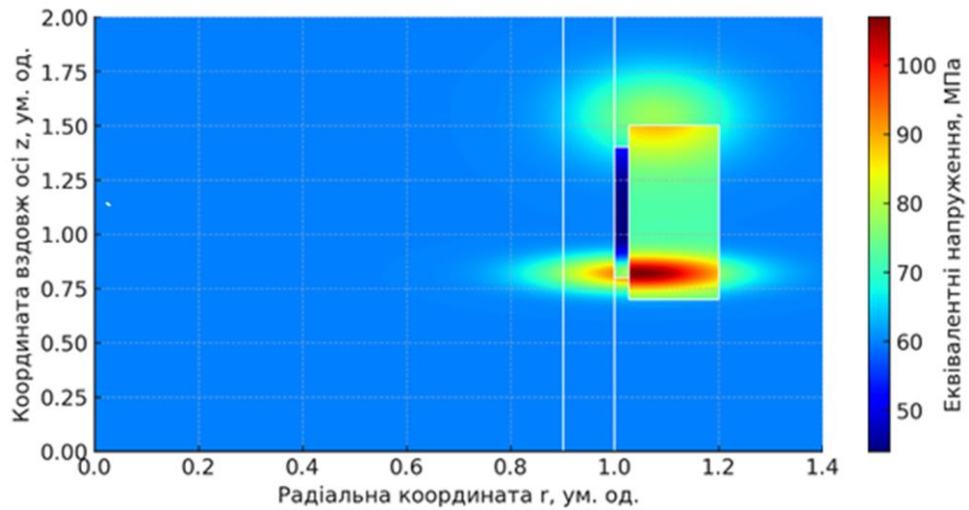


Рисунок 1 - Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом у поперечному перерізі різьбового з'єднання «труба–герметик–муфта» (результати скінченно-елементного моделювання)

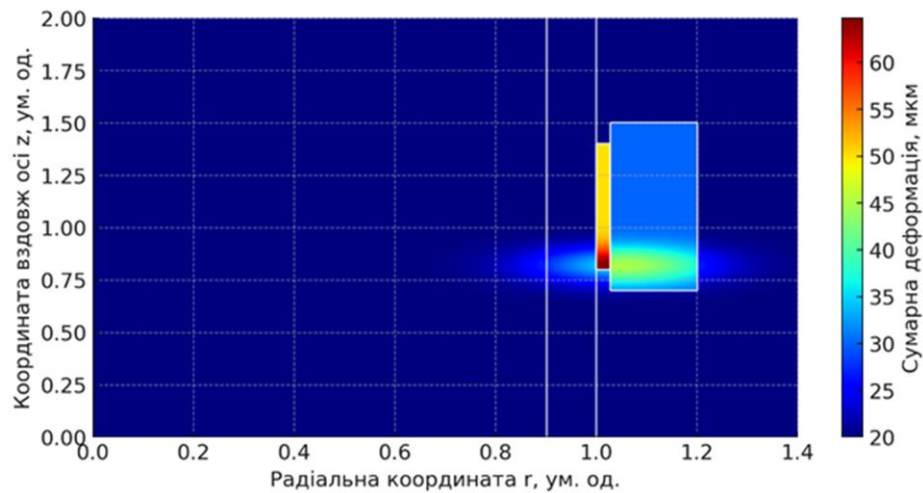


Рисунок 2 - Розподіл сумарних деформацій у поперечному перерізі різьбового з'єднання

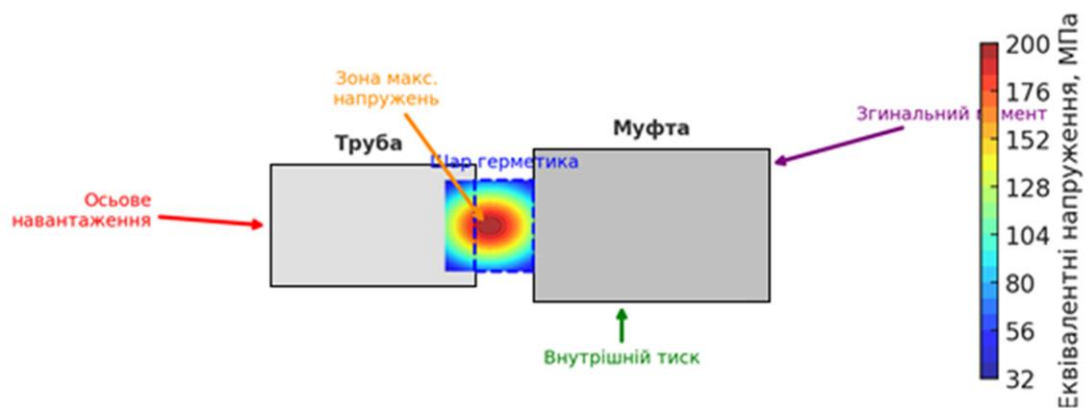


Рисунок 3 - Схема концентрації напружень у різьбовому з'єднанні обсадної труби з анаеробним герметиком

Встановлено, що зонами максимальної концентрації напружень і деформацій є перші витки різьби та ділянка входу муфти. Саме ці області є визначальними для надійності та довговічності з'єднання.

Для кращого розуміння розподілу напружень та деформацій у різьбовому з'єднанні обсадної колони результати моделювання подано графічно. Тривимірна модель (рис. 3) наочно демонструє розподіл еквівалентних на-

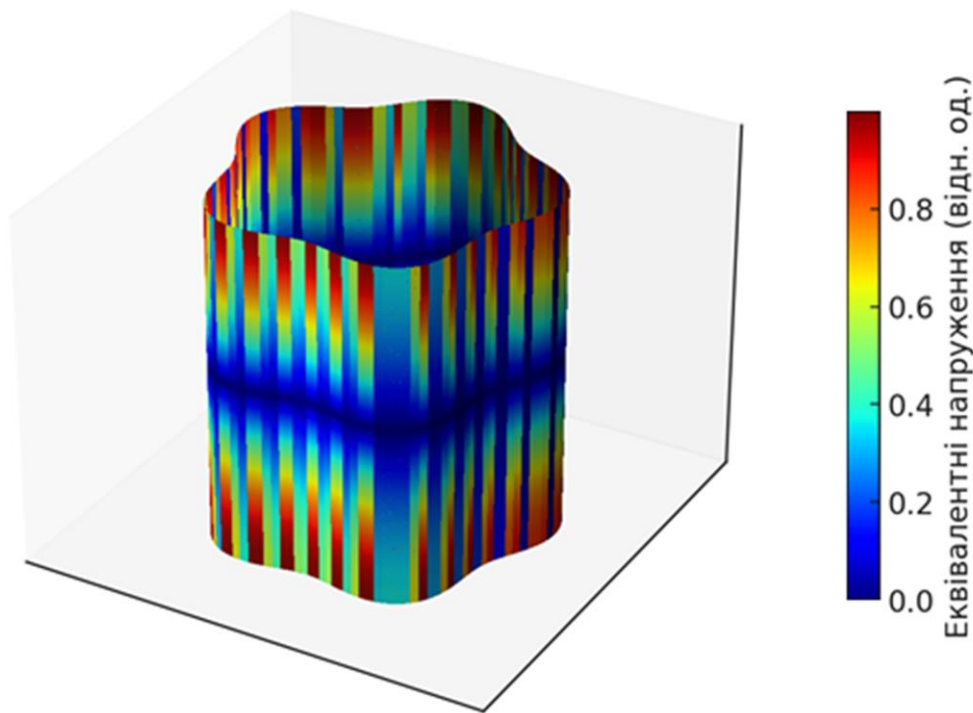


Рисунок 4 – 3D-модель різьбового з'єднання з трикутним профілем (ГОСТ-ДСТУ / ISO 68-1) та імітацією розподілу напружень

пружень по поверхні труби і муфти. Це дозволяє ідентифікувати найбільш навантажені ділянки та візуально підтвердити демпфуючий ефект герметика.

Встановивши загальні закономірності НДС різьбових з'єднань, доцільно перейти до аналізу конкретних профілів різьб, що використовуються в бурінні. Саме вибір профілю різьби безпосередньо впливає на герметичність, навантажувальну здатність та експлуатаційний ресурс обсадних колон.

В Україні та країнах пострадянського простору досі широко застосовуються різьбові з'єднання трикутного профілю, конструкція яких історично базувалася на стандартах ГОСТ та адаптована до чинних вимог ДСТУ. Попри простоту виготовлення, вони не забезпечують належної герметичності при вібраціях та високому тиску. Різьби ДСТУ 8932:2019, що використовуються в обсадних колонах, мають конструктивні обмеження. Для різьбових з'єднань обсадних труб із трикутним профілем різьби через особливості геометрії профілю характерна концентрація напружень у западинах різьби. Через профіль із кутом 60° вони позбавлені спеціальних ущільнювальних поверхонь, тому герметичність залежить лише від мастил чи герметиків [39]. Це спричиняє концентрацію напружень у западинах різьби, що призводить до мікротріщин та міжколонних перетоків. Подібні недоліки притаманні також

різьбовим з'єднанням типу Батресс та ОТТМ, які без використання додаткових ущільнювальних елементів не забезпечують стабільної герметичності, особливо в умовах газових свердловин.

Практика свідчить, що різьбові з'єднання за ДСТУ прийнятні лише для простих умов буріння: тиск до 35-40 МПа та відсутність агресивних флюїдів. У горизонтальних свердловинах через вібрації та згинальні навантаження такі з'єднання швидко втрачають герметичність. Це зумовлює необхідність використання сучасних герметиків або переходу на преміум-з'єднання з модифікованим профілем та спеціальними ущільнювальними поверхнями.

Тривимірною моделлю різьбового з'єднання з трикутним профілем (рисунок 4) ілюструє місце концентрації напружень [7]. Кутові зони конструкції є найбільш вразливими: без додаткового ущільнення вони стають потенційними каналами для перетоків робочого середовища.

Одним із напрямів удосконалення обсадних колон стало впровадження труб із трапецієдальною герметичною різьбою (ОТТГ). Конструкція ОТТГ, що є еволюцією стандартних з'єднань, забезпечує підвищену герметичність завдяки наявності спеціальних ущільнювальних ділянок на витках, які створюють додаткову зону контакту між трубою та муфтою [40]. У промислових умовах ці з'єднання показали вищу надійність порівняно зі стандартними

ДСТУ, особливо при роботі у свердловинах середньої та великої глибини.

На рисунку 5 наведено тривимірну модель різьбового з'єднання типу ОТТГ, яка відображає ущільнювальні поверхні та характерний контактний взаємозв'язок труби з муфтою.



Рисунок 5 – 3D-модель різьби типу ОТТГ з виділеними зонами ущільнення

Моделювання показує, що оптимізація геометрії різьби в з'єднаннях ОТТГ забезпечує часткове розвантаження перших витків завдяки застосуванню спеціальних ущільнювальних поверхонь. Це підвищує експлуатаційну надійність ОТТГ порівняно зі стандартними ДСТУ-з'єднаннями, у яких концентрація напружень зосереджена виключно в кутових западинах.

Проте СЕМ показує, що локальні напруження в критичних зонах залишаються високими. У випадку циклічних навантажень або роботи в агресивному середовищі (H_2S та CO_2) це може призвести до втрати герметичності. Інакше кажучи, конструктивні удосконалення підвищують надійність, але не усувають проблему повністю.

У реальних умовах горизонтальних свердловин надійність ОТТГ забезпечується додатковими герметизуючими матеріалами. Анаеробні герметики критично важливі, оскільки гарантують стійкість до згинальних навантажень, вібрацій та температурних градієнтів. Це підтверджує: лише поєднання вдосконаленої геометрії різьби та анаеробних матеріалів гарантує безпеку обсадних колон.

Ще одним етапом удосконалення різьбових профілів стало впровадження трубно-різьби з герметичним обтиском (ТБО). На відміну від ДСТУ і навіть ОТТГ, у ТБО передбачено спеціальні ущільнювальні пояски та контактні поверхні, які при згвинчуванні створюють додаткову зону обтиску [41]. Це забезпечує не лише механічне зчеплення, а й високий рівень герметичності без обов'язкового застосування мастил чи герметиків.

Основними перевагами ТБО є:

- підвищена герметичність завдяки ущільнювальним поверхням;
- стійкість до високих внутрішніх тисків;
- кращий розподіл напружень у порівнянні з ДСТУ і ОТТГ;
- можливість експлуатації у свердловинах із агресивними середовищами (H_2S , CO_2).

На рисунку 6 представлено тривимірну модель різьби типу ТБО. Характерні зони контакту, що працюють як ущільнювальний бар'єр, відображені на моделі.

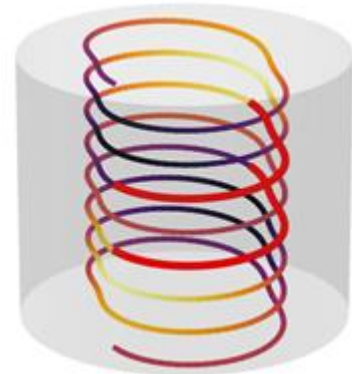


Рисунок 6 – 3D-модель різьбового з'єднання типу ТБО з розподілом контактних напружень

На відміну від ДСТУ та ОТТГ, різьба ТБО (рис. 6) має два ущільнювальні пояски (чорвоний колір). Така конструкція створює подвійний бар'єр герметизації, що значно підвищує надійність з'єднання, мінімізує ризик перетоків та збільшує стійкість до високого внутрішнього тиску.

Аналіз СЕМ підтверджує наявність зон підвищених напружень у ТБО на перших витках різьби та в місцях переходу геометрії. В умовах горизонтального буріння: під впливом вібрацій, згинальних моментів та перепадів температур - ці ділянки є потенційними осередками втрати герметичності.

Слід зазначити, що попри переваги ТБО перед ДСТУ 8932:2019 і ОТТГ, вони не дають стовідсоткової надійності. Для захисту від перетоків та розвантаження пікових напружень варто застосовувати анаеробні герметики. Саме поєднання вдосконалених різьбових профілів із сучасними герметизуючими матеріалами є оптимальним рішенням для горизонтальних свердловин.

Одним із найпоширеніших преміум-з'єднань у світовій практиці буріння є система **VAM TOP**. Завдяки конструктивній особливості - подвійному ущільненню - вона забезпечує вищу герметичність порівняно зі стандар-

ртами ДСТУ, ОТТГ або ТБО. Візуалізацію зон ущільнення на 3D-моделі з'єднання наведено на рисунку 7.



Рисунок 7 – 3D скінченно-елементна візуалізація преміум-з'єднання VAM TOP з додатковою системою ущільнення

З'єднання демонструють високу надійність у вертикальних свердловинах, проте при горизонтальному бурінні їхня ефективність знижується. Складні умови (згинальні моменти, вібрація та температурні градієнти) - призводять до втрати герметичності VAM TOP [42]. Скінченно-елементний аналіз підтвердив, що локальні напруження зосереджуються на перших двох витках різьби, які є найбільш вразливими до мікропошкоджень.

Попри конструктивні переваги, преміум-з'єднання потребують додаткового захисту. Найкращим рішенням у складних умовах (високий тиск, H_2S , CO_2) є анаеробні герметики. Вони нівелюють мікронерівності різьби та зменшують пікові навантаження на 15 – 20 %, забезпечуючи надійну герметизацію з'єднання. Анаеробні герметики забезпечують суттєве зниження пікових напружень та стабілізують контактну взаємодію в системі «ніпель-муфта». Це підвищує надійність з'єднань, зменшуючи ризик міжколонних перетоків та аварійних ремонтів. За розрахунками, використання герметиків знижує ймовірність втрати герметичності на 20 - 25 % порівняно з традиційними мастилами, що є критично важливим для горизонтальних свердловин із високими механічними та температурними навантаженнями.

Таблиця 1 – Основні властивості анаеробних герметиків

Показник	Loctite 577	Permabond A131	ThreeBond 1305
Робоча температура, °С	-55...+230	-60...+200	-50...+220
Міцність на зсув, МПа	25	28	24
Час полімеризації, хв.	10 ÷ 20	15 ÷ 25	12 ÷ 18
Хімічна стійкість до H_2S/CO_2	висока	висока	висока
Адгезія до сталі	відмінна	відмінна	добра

Щоб порівняти фізико-механічні властивості та термостійкості найпоширеніших анаеробних герметиків, ми проаналізували їхні характеристики (табл. 1) [16].

Для кількісного аналізу ефективності анаеробних герметиків застосовують метод скінченних елементів (МСЕ/FEM). Він дозволяє відтворити реальний розподіл напружень у різьбовому з'єднанні, враховуючи геометрію профілю, тертя та властивості герметика.

Для аналізу розподілу еквівалентних напружень у зоні контакту витків було розроблено скінченно-елементну модель різьбового з'єднання обсадної колони (рис. 8) [8]. Моделювання виконано із застосуванням програмного комплексу ANSYS за таких умов: осьове навантаження – 350 кН, внутрішній тиск – 25 МПа, температура – 180 °С.

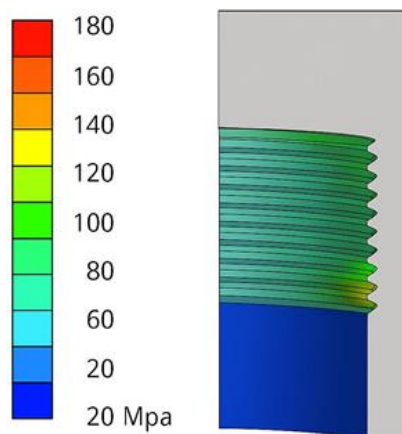


Рисунок 8 - Розподіл еквівалентних напружень (за Мізесом) у різьбовому з'єднанні обсадної колони Ø177,8 мм (FEM-модель, ANSYS Workbench)

Об'єктом моделювання обрано різьбове з'єднання типу ТМ для обсадних труб (сталь 35ХГСА, API Spec 5CT).

Характеристика об'єкта:

- зовнішній діаметр 177,8 мм;
- крок різьби 5 мм;
- кут профілю 60°;
- кількість витків 8;
- середній діаметр контакту 165 мм.

Для підвищення точності розрахунку в області контакту витків застосовано локальне згущення сітки до розміру елемента 0,25 мм, що забезпечило загальну кількість скінченних елементів у моделі близько 320 тис.

Умови контакту включали коефіцієнт тертя $f = 0,12$ для сухої поверхні та $f = 0,06$ – для різьби з анаеробним герметиком. Механічні властивості сталі прийнято згідно із сертифікаційним паспортом:

модуль Юнга $E = 2,1 \times 10^5$ МПа,
коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$,
межа текучості $\sigma_m = 540$ МПа,
межа міцності $\sigma_s = 680$ МПа.

Для моделювання шару герметика (товщиною 0,15 мм) прийнято характеристики матеріалу типу Loctite 577:

модуль пружності $E = 2,5 \times 10^3$ МПа;
коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,48$.

Граничні умови моделі передбачали фіксацію нижнього торця муфти та прикладення осьового навантаження 350 кН, внутрішнього тиску 25 МПа і температури 180 °С.

Моделювання проведено для трьох випадків: сухого з'єднання, використання різьбового компаунду та застосування анаеробного герметика. Розподіл контактної тиску для анаеробного герметика наведено на рисунку 9, а порівняльний аналіз усіх сценаріїв – на рисунку 10.

МСЕ-моделювання показало, що у базовому варіанті (суха різьба) максимальні значення контактної тиску досягають 110-115 МПа на перших двох витках, після чого спостерігається різке зниження до 40-50 МПа на крайніх витках (рис. 10). Така нерівномірність призводить до локального перевантаження й зародження мікротріщин у зоні першого витка, що є основною причиною розгерметизації обсадних колон.

При використанні мастила розподіл напружень стає стабільнішим, а пікові значення знижуються на 10-12 %. Проте нерівномірність розподілу зберігається, і недостатньо навантажена центральна частина різьбового з'єднання з часом послаблюється під дією температури чи тиску.

Використання анаеробного герметика кардинально змінює характер навантаження різьбового з'єднання. Згідно з МСЕ-візуалізацією (рис. 9), контактний тиск рівномірно розподіляється по всій довжині різьби ($85 \pm 6,8$ МПа) без локальних піків. Це знижує рівень еквівалентних напружень у муфті на 10 - 15 %, мінімізуючи їх концентрацію та подовжуючи втомний ресурс деталі.

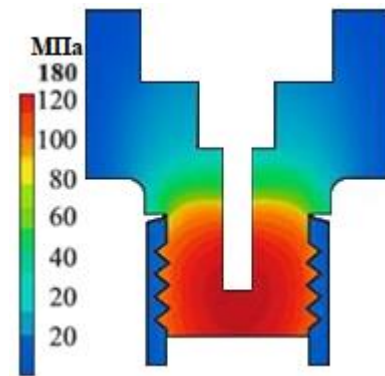


Рисунок 9 – Розподіл контактної тиску в різьбовому з'єднанні обсадної колони з анаеробним герметиком (результати МСЕ-моделювання)

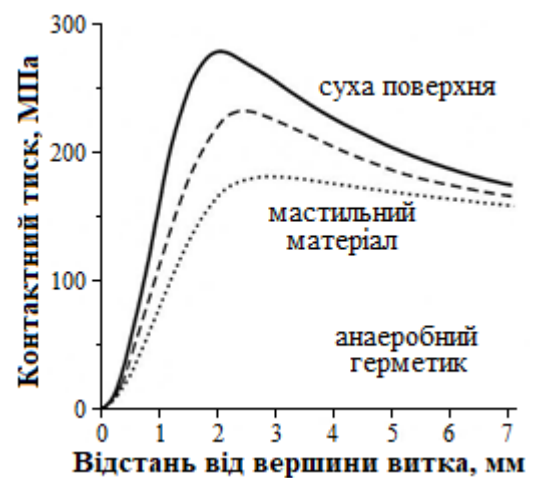


Рисунок 10 – Порівняння розподілу контактної тиску між витками різьбового з'єднання обсадної колони для різних видів ущільнення

Результати свідчать: анаеробні герметики не лише замінюють мастила, а створюють якісно інший механізм взаємодії в різьбі. Завдяки перерозподілу навантаження, демпфуванню пікових напружень та компенсації мікронерівностей забезпечується герметичність за екстремальних умов (180 °С, 25 МПа), де традиційні матеріали виявляються неефективними.

Для узагальнення результатів дослідження порівняно основні типи різьбових з'єднань, що застосовуються у бурінні. У таблиці 2 наведено порівняльну характеристику різьб ДСТУ, ОТТГ, ТБО та VAM TOP, а також оцінено вплив анаеробних герметиків на їх герметичність у складних умовах горизонтальних свердловин.

Досвід лідерів галузі (Tenaris, Vallourec, Nippon Steel) доводить: навіть преміальні з'єднання потребують додаткового захисту. Результати СЕМ підтверджують, що викорис-

Таблиця 2 - Порівняльна характеристика різьбових з'єднань обсадних колон при використанні анаеробних герметиків

Тип різьби / з'єднання	Рівень базової герметичності	Стійкість до згинальних і вібраційних навантажень	Стійкість до H ₂ S та CO ₂	Вплив застосування анаеробних герметиків
ДСТУ (трикутний профіль)	Низький	Дуже низька	Низька	Підвищує герметичність, але не усуває проблем повністю
ОТТГ	Середній	Середня	Середня	Знижує пікові напруження, підвищує стійкість до мікроперетоків
ТБО	Високий (завдяки подвійним)	Вища за середню	Середньо-висока	Забезпечує подвійний захист: механічний + хімічний
VAM TOP (без герметика)	Дуже високий у вертикальних свердловинах, нижчий у горизонтальних	Висока, але не абсолютна	Висока	Часткова втрата герметичності у складних умовах можлива
VAM TOP (з герметиком)	Максимальний рівень	Висока і стабільна	Висока	Оптимальний варіант: мінімізує ризик перетоків, знижує пікові напруження на 15 – 20 %

тання герметизуючих матеріалів суттєво подовжує життєвий цикл обладнання в агресивних середовищах (H₂S та CO₂) [43].

Отже, результати моделювання та практичні дані підтверджують перспективність використання анаеробних герметиків для підвищення надійності обсадних колон. Це дозволяє розглядати їх як невід'ємний елемент комплексної стратегії зміцнення свердловин у сучасному бурінні, а не лише як ущільнювач [46].

Висновки

1. На основі МСЕ-моделювання НДС встановлено, що традиційні методи ущільнення різьбових з'єднань забезпечують нерівномірний розподіл контактних напружень, створюючи локальні перевантаження (до 110-115 МПа). Це є критичним фактором, що зумовлює ризик розгерметизації обсадних колон.

2. Встановлено, що застосування анаеробних герметиків забезпечує рівномірний розподіл контактного тиску вздовж різьби, знижує еквівалентні напруження (σ_{eq}) у муфті на 10-15 % та гарантує стабільну роботу з'єднання в умовах підвищених температур (до 180 °C) і тиску (до 25 МПа).

3. Результати підтверджують: анаеробні герметики не просто замінюють мастила, а формують стійке з'єднання з покращеною адгезією. Це забезпечує компенсацію дефектів про-

філю різьби та надійне поглинання (демпфування) динамічних навантажень. СЕМ засвідчило, що герметизуючий шар перерозподіляє контактні напруження та знижує їхню концентрацію у навантажених витках. Це стабілізує роботу різьби, безпосередньо підвищуючи герметичність і ресурс з'єднань.

4. Завдяки впровадженню анаеробного герметика вдалося досягти перерозподілу зусиль у різьбі, що знижує пікові навантаження на 10-20 %. Запропонований підхід обґрунтовує доцільність впровадження анаеробних герметиків у промислові технології кріплення обсадних колон. Це є критично важливим для забезпечення надійності та довговічності свердловин у глибоких і високотемпературних умовах.

5. Використання анаеробних герметиків є перспективним етапом еволюції технологій герметизації різьбових з'єднань, спрямованим на формування нового стандарту надійності свердловинних конструкцій нового покоління.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. American Petroleum Institute. Specification 5CT: Casing and Tubing. Washington: API Publishing Services, 2018. 250 с.
2. API Specification 5B. Threading, Gauging and Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads. Washington: API, 2017. 200 с.
3. ISO 13679:2019. Petroleum and natural gas industries – Procedures for testing casing and tubing connections. Geneva: ISO, 2019.
4. ISO 10400:2007. Petroleum and natural gas industries – Formulae and calculations for casing, tubing and drill pipe properties. Geneva: ISO, 2007.
5. Bourgoyne A.T. Applied Drilling Engineering. SPE, 1991.
6. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. Elsevier, 2005.
7. Bathe K.J. Finite Element Procedures. MIT Press, 1996.
8. Cook R.D. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. Wiley, 2001.
9. COMSOL Multiphysics®. Thread Sealing Simulation Example. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.comsol.com/model/thread-sealing-13971>
10. ISO 15156. Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production. Geneva: ISO, 2015.
11. OGS – Oil & Gas Systems. Thread Compounds Technical Overview.
12. NOV Tuboscope. Thread Compound Reference Guide.
13. API RP 5C5. Recommended Practice for Thread Compounds for Casing, Tubing, and Line Pipe. Washington: API, 2017.
14. Loctite Anaerobic Adhesives & Sealants Overview. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.henkel-adhesives.com>
15. Technical Data Sheet – LOCTITE® 577 Thread Sealant. Henkel.
16. Baker Hughes. Thread Sealant Series Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.bakerhughes.com>
17. Logan D.L. A First Course in the Finite Element Method. Cengage Learning, 2012.
18. Belytschko T. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. Wiley, 2013.
19. Ansys Inc. Ansys Mechanical User's Guide. Version 2022 R2.
20. Schlumberger. Threaded Connection Integrity in High-Deviation Wells.
21. ASTM A370-21. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM International, 2021.
22. Bickford J.H. An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints. CRC Press, 2007.
23. Johnson K.L. Contact Mechanics. Cambridge University Press, 1985.
24. Dowson D. Elastohydrodynamic Lubrication. Elsevier, 1998.
25. API RP 5C1. Care and Use of Casing and Tubing. Washington: API, 2016.
26. API TR 5C3. Technical Report on Casing and Tubing Performance. Washington: API, 2018.
27. Лисак О.В. Герметизація різьбових з'єднань обсадних колон: сучасний стан та перспективи. Нафтогазова справа. 2022. №2. С. 59–67.
28. Гриценко І.І., Коваленко А.С. Моделювання міцності різьбових з'єднань методом скінченних елементів. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2021. №3. С. 77–84.
29. Зелінський А.А. Підвищення герметичності обсадних колон у газових свердловинах: магістерська робота. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2022. 85 с.
30. Зелінський А.А. Звіт про проходження виробничої практики: фах «Нафтогазова інженерія». Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.
31. Stavychnyi Ye. M., Rudyi S. M., Femiak Ya. M. et al. Influence of acid systems on bottomhole zone decolmatization and set cement stability. Journal of Physics and Chemistry of Solid State. 2024. Vol. 25, No. 3. P. 664–674. DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.25.3.664-674>
32. Stavychnyi Ye. M., Femiak Ya. M., Vytyaz O. Yu. et al. Improving the reliability of oil and gas well cementing using composite plugging systems. SOCAR Proceedings. 2025. No. 3. P. 59–69. DOI: <https://doi.org/10.5510/OGP20250301097>
33. Stavychnyi Ye. M., Femiak Ya. M. et al. Research of cement stone permeability. Journal of Physics and Chemistry of Solid State. 2025. Vol. 26, No. 3. P. 480–488. DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.26.3.480-488>

34. ДСТУ 4149-2003. Свердловини на нафту і газ. Терміни та визначення понять. К.: Держспоживстандарт України, 2003.
35. ДСТУ Б В.2.7-212:2009. Матеріали ущільнювальні. Загальні технічні умови. К.: Мінрегіонбуд України, 2009.
36. TENARIS. Premium Connections for OCTG. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.tenaris.com>
37. Vallourec. VAM® Connections Catalog. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.vallourec.com/en/products/oil-gas/connections>
38. Nippon Steel Corporation. Oilfield Tubular Goods Catalog. Tokyo, 2021. 110 с.
39. Фем'як Я. М., Зелінський А. А. Забезпечення герметичності обсадних колон у газових свердловинах шляхом використання анаеробних герметиків. Modern Research in World Science : матеріали III Міжнародної конференції. Львів, 2024.
40. Фем'як Я. М., Зелінський А. А. Вдосконалення герметичності обсадних колон у газових свердловинах за допомогою анаеробних герметиків. Scientific Research and Innovation : матеріали конференції. Дніпро, 2024.
41. Зелінський А. А., Фем'як Я. М. Особливості герметизації різьбових з'єднань обсадних колон у похило-скерованих свердловинах. Modern Research in World Science : матеріали конференції. Львів, 2024.
42. Budynas R., Nisbett J. Shigley's Mechanical Engineering Design. McGraw-Hill, 2015.
43. Timoshenko S. Strength of Materials. McGraw-Hill, 1955.
44. Stavychnyi Ye. M. et al. Features of drilling and improving well cementing quality. Nauka–Technika–Technologia. 2024. DOI: <https://doi.org/10.7494/978-83-68219-19-7>
45. Stavychnyi Ye. M. et al. Complex units for sectional casing of oil and gas wells. Нафтогазова енергетика. 2024. № 2(42). С. 85–98. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-2\(42\)-85-98](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-2(42)-85-98)
46. Stavychnyi Ye. M. et al. Application of cement plugs in well construction. Прикарпатський вісник НТШ. 2024. № 19(73). С. 155–174. DOI: [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2024-19\(73\)-155-174](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2024-19(73)-155-174)

References

1. American Petroleum Institute. Specification 5CT: Casing and Tubing. Washington : API Publishing Services, 2018. 250 p.
2. American Petroleum Institute. API Specification 5B: Threading, Gauging and Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads. Washington : API, 2017. 200 p.
3. International Organization for Standardization. ISO 13679:2019. Petroleum and natural gas industries – Procedures for testing casing and tubing connections. Geneva : ISO, 2019.
4. International Organization for Standardization. ISO 10400:2007. Petroleum and natural gas industries – Formulae and calculations for casing, tubing and drill pipe properties. Geneva : ISO, 2007.
5. Bourgoyne A. T. Applied Drilling Engineering. SPE, 1991.
6. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method. Elsevier, 2005.
7. Bathe K. J. Finite Element Procedures. MIT Press, 1996.
8. Cook R. D. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. Wiley, 2001.
9. COMSOL Multiphysics®. Thread Sealing Simulation Example. Electronic resource. Available from: <https://www.comsol.com/model/thread-sealing-13971>
10. International Organization for Standardization. ISO 15156. Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production. Geneva : ISO, 2015.
11. Oil & Gas Systems. Thread Compounds: Technical Overview.
12. NOV Tuboscope. Thread Compound Reference Guide.
13. American Petroleum Institute. API RP 5C5: Recommended Practice for Thread Compounds for Casing, Tubing, and Line Pipe. Washington : API, 2017.
14. Henkel AG & Co. Loctite Anaerobic Adhesives and Sealants Overview. Electronic resource. Available from: <https://www.henkel-adhesives.com>
15. Henkel AG & Co. Technical Data Sheet: LOCTITE® 577 Thread Sealant.
16. Baker Hughes. Thread Sealant Series. Electronic resource. Available from: <https://www.bakerhughes.com>
17. Logan D. L. A First Course in the Finite Element Method. Cengage Learning, 2012.

18. Belytschko T. *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*. Wiley, 2013.
19. Ansys Inc. *Ansys Mechanical User's Guide*. Version 2022 R2.
20. Schlumberger. *Threaded Connection Integrity in High-Deviation Wells*.
21. ASTM International. *ASTM A370-21: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. ASTM International, 2021.
22. Bickford J. H. *An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints*. CRC Press, 2007.
23. Johnson K. L. *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, 1985.
24. Dowson D. *Elastohydrodynamic Lubrication*. Elsevier, 1998.
25. American Petroleum Institute. *API RP 5C1: Care and Use of Casing and Tubing*. Washington : API, 2016.
26. American Petroleum Institute. *API TR 5C3: Technical Report on Casing and Tubing Performance*. Washington : API, 2018.
27. Lysak O. V. Sealing of threaded casing connections: current state and prospects. *Oil and Gas Industry*. 2022. No. 2. P. 59–67.
28. Hrytsenko I. I., Kovalenko A. S. Strength modeling of threaded connections using the finite element method. *Scientific Bulletin of IFNTUOG*. 2021. No. 3. P. 77–84.
29. Zelinskyi A. A. Improvement of casing string tightness in gas wells : Master's thesis. Ivano-Frankivsk : IFNTUOG, 2022. 85 p.
30. Zelinskyi A. A. Industrial internship report: Oil and Gas Engineering specialty. Ivano-Frankivsk : IFNTUOG, 2020. 42 p.
31. Stavychnyi Ye. M., Rudyi S. M., Femiak Ya. M. et al. Influence of acid systems on bottomhole zone decolmatization and set cement stability. *Journal of Physics and Chemistry of Solid State*. 2024. Vol. 25, No. 3. P. 664–674. DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.25.3.664-674>
32. Stavychnyi Ye. M., Femiak Ya. M., Vytyaz O. Yu. et al. Improving the reliability of oil and gas well cementing using composite plugging systems./ *SOCAR Proceedings*. 2025. No. 3. P. 59–69. DOI: <https://doi.org/10.5510/OGP20250301097>
33. Stavychnyi Ye. M., Femiak Ya. M. et al. Research of cement stone permeability. *Journal of Physics and Chemistry of Solid State*. 2025. Vol. 26, No. 3. P. 480–488. DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.26.3.480-488>
34. DSTU 4149-2003. *Oil and gas wells – Terms and definitions*. Kyiv : Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2003.
35. DSTU B V.2.7-212:2009. *Sealing materials – General specifications*. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009.
36. Tenaris. *Premium Connections for OCTG*. Electronic resource. Available from: <https://www.tenaris.com>
37. Vallourec. *VAM® Connections Catalog*. Electronic resource. Available from: <https://www.vallourec.com/en/products/oil-gas/connections>
38. Nippon Steel Corporation. *Oilfield Tubular Goods Catalog*. Tokyo, 2021. 110 p.
39. Femiak Ya. M., Zelinskyi A. A. Ensuring the tightness of casing strings in gas wells using anaerobic sealants. *Proceedings of the III International Conference “Modern Research in World Science”*. Lviv, 2024.
40. Femiak Ya. M., Zelinskyi A. A. Improvement of casing string tightness in gas wells using anaerobic sealants. *Scientific Research and Innovation*. Dnipro, 2024.
41. Zelinskyi A. A., Femiak Ya. M. Features of sealing threaded casing connections in directional wells. *Modern Research in World Science*. Lviv, 2024.
42. Budynas R., Nisbett J. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill, 2015.
43. Timoshenko S. *Strength of Materials*. McGraw-Hill, 1955.
44. Stavychnyi Ye. M., Femiak Ya. M., Vytyaz O. Yu., Ziaja J. Features of drilling and improving the quality of well cementing in conditions of abnormally low reservoir pressures. *Nauka–Technika–Technologia*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.7494/978-83-68219-19-7>
45. Stavychnyi Ye. M., Romaniv M. V., Femiak Ya. M. et al. Complex units for sectional casing of oil and gas wells. *Naftogazova Energetyka*. 2024. No. 2(42). P. 85–98. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-2\(42\)-85-98](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-2(42)-85-98)
46. Stavychnyi Ye. M., Mykhailiuk V. V., Femiak Ya. M. et al. Application of cement plugs in well construction. *Prykarpatskyi Visnyk NTSh*. 2024. No. 19(73). P. 155–174. DOI: [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2024-19\(73\)-155-174](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2024-19(73)-155-174)

COMPREHENSIVE EVALUATION OF THREADED CASING CONNECTION INTEGRITY UNDER WELL CONDITIONS

Femiak Ya. M.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76000, 15 Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4445-6731>
e-mail: yaroslav.femiak@nung.edu.ua

Zelinskyi A. A.

Postgraduate Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76000, 15 Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0001-0495-9935>
e-mail: gryzdeff89@gmail.com

Abstract. An analysis of modern approaches to casing string sealing has been conducted, revealing that as drilling complexity increases, particularly in horizontal wells, traditional methods of sealing casing threaded connections become ineffective. Even advanced thread designs do not guarantee reliability due to the risk of local seal failure caused by a complex stress-strain state. Approaches to improving the tightness of casing strings, combining anaerobic sealants and finite element modeling (FEM), have been investigated. The stress-strain state of thread contact zones under combined operational loads has been analyzed. Basic technological solutions for this issue are presented – the use of anaerobic sealants capable of polymerizing in an oxygen-free environment and providing tight contact with metal surfaces, even in the presence of micro-irregularities. They are characterized by high adhesion, resistance to aggressive fluids and temperatures up to 230 °C, and maintain their properties under vibrations and cyclic loads. The work aims to deepen previous studies through detailed modeling of the sealant behavior in a confined environment. Based on the analysis of physical and mechanical characteristics, patterns of the stress-strain state of connections have been established. It is proven that anaerobic materials ensure sealing while simultaneously effectively redistributing loads in threaded connections. The application of anaerobic sealants increases the reliability of casing strings in horizontal wells by reducing stress concentrations, improving thread contact stability, and preventing micro-leakage in challenging geological conditions. Comprehensive studies and the results obtained demonstrate the feasibility of implementing anaerobic sealants into casing assembly practice as an effective means of enhancing the reliability and operational safety of casing strings in horizontal wells.

Key words: threaded connection; anaerobic sealant; horizontal well; finite element modeling; stress-strain state; combined loads.