№ 2(46) 2026



НАФТОГАЗОВА ЕНЕРГЕТИКА

ISSN 1993-9868 print
ISSN 2415-3109 online

https://nge.nung.edu.ua

Прийнято 20.08.2026. Прорецензовано 29.09.2025. Опубліковано 30.11.2026.

УДК 622.245 **DOI: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-149-164**

ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТОВЩИНИ ШАРУ АНАЕРОБНОГО ГЕРМЕТИКА ДЛЯ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ ОБСАДНИХ ТРУБ

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

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

Анотація. Досліджено вплив товщини шару анаеробного герметика на напружено-деформований стан різьбових з'єднань обсадних колон. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення механічної надійності різьбових з'єднань, які під час експлуатації свердловин зазнають дії значних осьових навантажень і внутрішнього тиску. Особливу увагу приділено впливу геометричних параметрів герметизувального прошарку на характер контактної взаємодії витків різьби, розподіл еквівалентних напружень та контактного тиску. Зміна товщини анаеробного герметика розглядається як один із чинників, що визначають механічну поведінку різьбового з'єднання. Метою дослідження статті є визначення впливу товщини шару анаеробного герметика на напружено-деформований стан різьбового з'єднання обсадної колони та обґрунтування раціональної товщини герметизувального прошарку за результатами чисельного моделювання. Дослідження виконано методом скінченних елементів (МСЕ) у середовищі ANSYS Mechanical. Для проведення розрахунків використано спрощену тривимірну модель різьбового з'єднання, яка включає обсадну трубу, муфту та шар анаеробного герметика. Проведено порівняльний аналіз шести розрахункових варіантів: без герметика та з товщиною герметизувального шару 0,02; 0,05; 0,10; 0,15 і 0,20 мм. За результатами порівняльного чисельного моделювання встановлено вплив товщини анаеробного герметика на характер розподілу еквівалентних напружень у зоні контакту витків різьби. Аналіз базової моделі без герметизувального матеріалу показав нерівномірний розподіл напружень із локальною концентрацією на окремих ділянках різьбового профілю. У моделях із герметизувальним прошарком виявлено зміни напружено-деформованого стану, пов'язані з перерозподілом навантажень між контактуючими поверхнями труби та муфти. Порівняння отриманих полів еквівалентних напружень засвідчило, що характер їх локалізації залежить від товщини полімерного шару. У межах представленого порівняльного аналізу товщину анаеробного герметика 0,10 мм визначено як раціональну серед досліджених варіантів за характером розподілу еквівалентних напружень. Для цієї розрахункової конфігурації відзначено зменшення локальної концентрації напружень та сприятливіші умови передачі навантажень між витками різьбового з'єднання. Подальше збільшення товщини герметизувального шару до 0,15–0,20 мм супроводжується зміною характеру контактної взаємодії, що свідчить про необхідність ураху-

Запропоноване посилання: Зелінський, А. А. & Фем'як, Я. М. (2026). Обґрунтування оптимальної товщини шару анаеробного герметика для різьбових з'єднань обсадних труб. Нафтогазова енергетика, 2(46), 149-164. doi: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-149-164.

* 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/)

вання геометричних параметрів полімерного прошарку під час оцінювання механічної роботи з’єднання. Отримані результати дозволяють уточнити закономірності впливу товщини анаеробного герметика на напружено-деформований стан різьбових з’єднань обсадних колон та обґрунтувати доцільність урахування цього параметра під час розроблення герметизувальних рішень. Подальші дослідження передбачають урахування нелінійних властивостей матеріалу, нерівномірності розподілу герметика після згвинчування та кількісне оцінювання герметичності з’єднання за умов дії пластового флюїду.

Ключові слова: анаеробний герметик, обсадні колони, різьбові з'єднання, метод скінченних елементів (FEM), контактний тиск.

Вступ

Надійність обсадної колони критично залежить від герметичності різьбових з'єднань труб, які протягом усього терміну експлуатації протистоять тиску, температурним перепадам, згинанню та агресивним середовищам [1]. Розгерметизація стиків викликає міжколонні перетоки, руйнування цементного каменю та прискорену корозію. У складних геологічних умовах навіть мінімальні порушення здатні призвести до дорогих ремонтів або повної втрати свердловини.

Герметичність різьбових з'єднань обсадних труб залежить від конструктивних, технологічних та експлуатаційних чинників. Навіть із високою точністю виготовлення між витками залишаються мікрозазори – потенційні канали для витоку пластових флюїдів. Під впливом високого тиску, температур та циклічних деформацій ці мікрозазори розширюються, що призводить до поступової втрати герметичності.

Застосування анаеробних герметиків є одним із найперспективніших напрямів підвищення герметичності з’єднань обсадних труб. У безкисневому середовищі ці матеріали полімеризуються, утворюючи суцільний герметизувальний прошарок. Завдяки високій адгезії до металу, а також стійкості до вібрацій, температур і пластових флюїдів, вони стають ефективною та надійною альтернативою традиційним ущільнювачам.

На відміну від традиційних мастил і компаундів, які лише знижують тертя під час згвинчування, анаеробні герметики полімеризуються та утворюють міцний полімерний прошарок. Цей шар працює з металом як єдине ціле, надійно захищаючи з'єднання від високого тиску, перепадів температур, вібрацій та агресивних середовищ у нафтогазових свердловинах.

Ефективність анаеробного герметика визначається не лише його фізико-механічними характеристиками, але й технологією нанесення. Зокрема, товщина шару безпосередньо впливає на формування контактної поверхні різьби. Тонкий шар не компенсує мікронерівності профілю, що створює умови для проникнення пластових флюїдів. Водночас надлишок герметика порушує контакт металевих поверхонь, змінюючи розподіл тиску та характер передачі навантаження.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Надійність нафтогазових свердловин безпосередньо визначається герметичністю різьбових з’єднань обсадних колон. Згідно зі стандартами API Spec 5CT та ISO 13679:2019, такі з’єднання повинні зберігати суцільність і щільність під дією комбінованих навантажень: осьового стиску, внутрішнього тиску, температурних коливань та агресивних середовищ [2, 3].

Втрата герметичності різьбових з’єднань виступає головною причиною виникнення міжколонного тиску, корозії труб та аварійних ситуацій. За даними Міжнародної асоціації бурових підрядників (IADC), понад 30 % експлуатаційних ускладнень зумовлені саме цими дефектами.

Слід зазначити, що досвід розробки родовищ в Україні підтверджує, що різьбові з'єднання обсадних колон є найменш надійним вузлом кріплення. Дані промислових спостережень на Прикарпатті вказують, що понад 35 % свердловин характеризуються наявністю міжколонних тисків, які є наслідком розгерметизації стиків [24, 25]. Подібні порушення призводять до ускладнень: виникає потреба у повторному тампонуванні або свердловина класифікується як дефектна, що об’єктивно підвищує вартість поточних ремонтів та зменшує ефективність розробки родовища [26,27].

Герметичність різьбових з'єднань обсадних колон визначається комплексом конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів [4, 5]. Незважаючи на високу точність виготовлення, між витками різьби залишаються мікронерівності. Під впливом високого внутрішнього тиску, температурних коливань та циклічних навантажень ці мікрозазори розширюються, утворюючи канали для міграції пластових флюїдів, що призводить до розгерметизації [6, 7].

Одним із дієвих рішень для нівелювання вказаних дефектів є використання анаеробних герметизувальних композицій [11, 12]. Їхній принцип дії базується на полімеризації в міжметалевому просторі за відсутності кисню. Сформований після згвинчування елементів суцільний полімерний шар ізолює мікронерівності профілю різьби, виконуючи водночас герметизувальну, антикорозійну та стабілізуючу функції [13, 14]. Висока адгезія матеріалу мінімізує ризик мікропротікань, блокує дифузію агресивних компонентів пластового середовища до металу та оптимізує розподіл контактних навантажень у різьбовому з'єднанні.

Ключовим параметром для анаеробних герметиків є товщина шару у з'єднанні. Вона визначає якість заповнення мікронерівностей різьби, характер взаємодії металевих поверхонь та умови для повної полімеризації. При згвинчуванні обсадної труби з муфтою анаеробний герметик утворює між витками тонкий прошарок, що бере участь у передачі контактних навантажень та забезпечує герметичність з'єднання. При цьому вирішальну роль відіграють параметри цього шару: його товщина визначає характер взаємодії металевих поверхонь, рівномірність розподілу тиску та здатність матеріалу компенсувати мікронерівності різьби. Недостатня товщина герметика залишає мікронерівності різьби незаповненими, провокуючи мікропротікання.

Водночас надмірний шар полімеру змінює характер взаємодії витків, порушуючи розподіл контактного тиску та напружено-деформований стан з'єднання. Отже, обґрунтування оптимальної товщини анаеробного герметика є актуальним завданням для підвищення надійності обсадних колон без зміни їх конструкції.

Хоча більшість досліджень фокусується на порівнянні типів герметиків чи їхніх фізико-механічних властивостях, параметри нанесення залишаються вивченими недостатньо. Зокрема, бракує комплексних праць щодо впливу товщини шару герметика на герметичність різьбового з'єднання та його напружено-деформований стан. Саме цей параметр визначає повноту заповнення мікронерівностей, характер передачі навантаження між витками та умови формування надійного бар'єра.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Попри широке застосування анаеробних герметиків у машинобудуванні та нафтогазовій галузі, питання визначення оптимальної товщини їхнього шару залишається вивченим недостатньо. Більшість досліджень фокусується на фізико-механічних властивостях складів, тоді як вплив геометричних параметрів нанесення залишається поза увагою.

Довговічність і герметичність обсадних колон безпосередньо залежать від процесу формування герметизувального шару. При нанесенні анаеробного герметика та згвинчуванні обсадної труби з муфтою між витками утворюється тонкий прошарок. Він бере участь у передачі навантажень та герметизації, де геометрія цього шару задає рівномірність розподілу контактного тиску.

Якщо шар затонкий, матеріал не заповнює локальні дефекти, створюючи мікроканали для проникнення флюїдів [15]. Це становить небезпеку в свердловинах із високими тисками та температурними перепадами, оскільки мікрозазори з часом збільшуються. Разом з тим, надмірна товщина не покращує герметичність [16]. Надлишок герметика змінює умови взаємодії витків, і частина навантаження перерозподіляється на полімер, що може змінити напружено-деформований стан вузла [17].

Товщину шару анаеробного герметика доцільно розглядати як технологічний параметр процесу, що безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики різьбового з'єднання. Визначення оптимальної товщини гарантує якісне заповнення мікронерівностей без порушення контакту між витками різьби. Саме тому обґрунтування раціональної товщини анаеробного матеріалу є важливим науково-практичним завданням. Його розв'язання дозволить ефективніше ущільнювати різьбові з'єднання обсадних труб, не змінюючи їхню конструкцію.

Дослідження такого впливу виключно експериментальними методами ускладнене через неможливість прямого контролю за процесами всередині різьбового з'єднання після його згвинчування [18]. Тому оптимальним інструментом оцінювання є метод скінченних елементів (МСЕ), який дозволяє моделювати контактну взаємодію поверхонь, аналізувати розподіл тиску, визначати локальні напруження та прогнозувати герметичність з'єднання залежно від шару анаеробного герметика [19, 20].

Мета та завдання досліджень

Метою статті є дослідження впливу товщини шару анаеробного герметика на напружено-деформований стан різьбових з'єднань обсадних труб та визначення раціональної товщини герметизувального прошарку з ураху-

ванням особливостей контактної взаємодії елементів з'єднання.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

1. Розробити тривимірну розрахункову модель різьбового з'єднання обсадної труби та муфти з урахуванням наявності шару анаеробного герметика.

2. Виконати чисельне моделювання напружено-деформованого стану різьбового з'єднання без герметика та за товщини герметизувального шару 0,02; 0,05; 0,10; 0,15 і 0,20 мм.

3. Проаналізувати вплив товщини анаеробного герметика на розподіл еквівалентних напружень і контактного тиску в зоні різьбового з'єднання.

4. На основі порівняльного аналізу результатів чисельного моделювання обґрунтувати раціональну товщину герметизувального шару за механічними критеріями.

Дослідження виконано методом скінченних елементів (МСЕ) у середовищі ANSYS Mechanical. Основну увагу приділено механічній поведінці різьбового з'єднання залежно від товщини анаеробного герметика.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Для дослідження впливу товщини шару анаеробного герметика на напружено-деформований стан різьбових з'єднань обсадних колон розроблено серію розрахункових моделей, які відрізнялися товщиною герметизувального прошарку. Це дозволило провести порівняльний аналіз механічної поведінки з'єднання за однакових геометричних і навантажувальних умов.

Чисельне дослідження виконано методом скінченних елементів (МСЕ) у середовищі ANSYS Mechanical [21]. Для проведення розрахунків використано параметричну тривимірну модель, що включає обсадну трубу, муфту та шар анаеробного герметика в зоні контакту різьбових поверхонь.

Для проведення чисельного дослідження використано спрощену тривимірну геометричну модель різьбового з'єднання обсадної труби та муфти з трикутним профілем різьби. Під час її побудови основну увагу приділено відтворенню геометрії контактуючих поверхонь та розміщенню шару анаеробного герметика між витками різьби. Прийняте геометричне спрощення дозволяє дослідити вплив товщини герметизувального шару на напружено-деформований стан з'єднання за однакових розрахункових умов. Водночас така модель не передбачає повного відтворення всіх конструктивних особливостей стандартизованих різьбових з'єднань обсадних труб.

Під час розробки моделі шар анаеробного герметика моделювався як самостійний геометричний об'єм у зазорі між різьбою труби та муфти [22]. Завдяки цьому з'явилася можливість змінювати виключно товщину шару без коригування інших параметрів. Такий метод гарантує коректність порівняльного аналізу для всіх варіантів та дозволяє чітко виокремити вплив геометричних характеристик герметика на напружено-деформований стан різьбового з'єднання.

У розрахунковій моделі товщину шару анаеробного герметика прийнято як змінний геометричний параметр, що дозволило провести порівняльний аналіз напружено-деформованого стану різьбового з'єднання за різних значень цього показника. Такий підхід дає змогу встановити характер впливу товщини герметизувального прошарку на розподіл напружень і контактну взаємодію поверхонь труби та муфти.

Під час побудови моделі враховано геометричні особливості різьбового профілю, фізико-механічні властивості матеріалів, умови контактної взаємодії, схему прикладання навантажень та параметри дискретизації. Завдяки уніфікованим граничним умовам для всіх розрахункових схем, вдалося дослідити виключно вплив товщини шару анаеробного герметика на напружено-деформований стан з'єднання. Основні параметри скінченно-елементної моделі наведено в табл. 1.

Механічну поведінку анаеробного герметика в розрахунковій моделі описано з використанням пружних характеристик матеріалу — модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона. Це дає змогу врахувати деформування герметизувального прошарку під дією прикладених навантажень та оцінити його вплив на напружено-деформований стан різьбового з'єднання. Вплив в'язкопружних властивостей, процесу полімеризації та можливих незворотних деформацій герметика у межах цього дослідження окремо не розглядався.

Побудована 3D-модель (рис. 1) охоплює основні елементи різьбового з'єднання обсадної колони: обсадну трубу, муфту та шар анаеробного герметика в зоні контакту витків [8, 9, 10]. Наближена до реальної геометрія моделі дозволяє точно відтворити характер взаємодії деталей під час згвинчування та подальшої експлуатації.

Таблиця 1 – Основні параметри побудови скінченно-елементної моделі

Група параметрів	Параметр	Позначення	Значення / прийнята умова	Призначення у моделі
геометрія	типорозмір труби та муфти	–	139,7 х 9,17 мм	базові геометричні параметри моделі
	тип різьби	–	трикутний профіль різьби обсадної труби	формування контактної пари
	просторова модель	–	3D	аналіз просторового НДС
	просторова модель	–	труба + муфта + герметик	побудова контактної системи
матеріал труби	марка сталі	–	API P110	матеріал конструкції
	модуль Юнга	E	207 ГПа	жорсткість конструкції
	коефіцієнт Пуассона	ν	0,30	поперечні деформації
	густина	ρ	7850 кг/м³	матеріальні характеристики
герметик	тип	–	анаеробний	досліджуваний матеріал
	модуль юнга	E_s	5 МПа	жорсткість герметизувального шару
	коефіцієнт Пуассона	ν_s	0,45	поперечні деформації
	закон поведінки	–	лінійно-пружний	опис деформування матеріалу
	товщина шару	h	0; 0,02; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20 мм	основний змінний параметр
контакт	тип контакту	–	Frictional	взаємодія поверхонь
	коефіцієнт тертя	μ	0,15	контактний розрахунок
	контактні елементи	–	CONTA174 / TARGE170	контактний розрахунок
скінченні елементи	тип елементів	–	SOLID186	просторове моделювання
	характер сітки	–	нерівномірна	підвищення точності
	локальне згущення	–	контакт різьби та герметика	уточнення напружень
навантаження	осьове навантаження	F	250кН	переднатяг різьби
	внутрішній тиск	P	10 МПа	робоче навантаження
розрахунок	тип аналізу	–	Static Structural	статичний аналіз
	метод	–	метод скінченних елементів (МСЕ)	чисельний розрахунок

Як показано на рисунку 1, розроблена модель охоплює всі елементи для коректного відтворення контактної взаємодії різьбового з'єднання обсадної колони: обсадну трубу, муфту та прошарок анаеробного герметика між витками різьби. Такий підхід дозволяє дослідити, як зміна товщини герметизувального шару впливає на напружено-деформований стан з'єднання, без зміни його конструктивних параметрів.

Дискретизація геометричної моделі здійснювалася тетраедричними скінченними елементами другого порядку [23]. Це забезпечило високу точність апроксимації складного про-

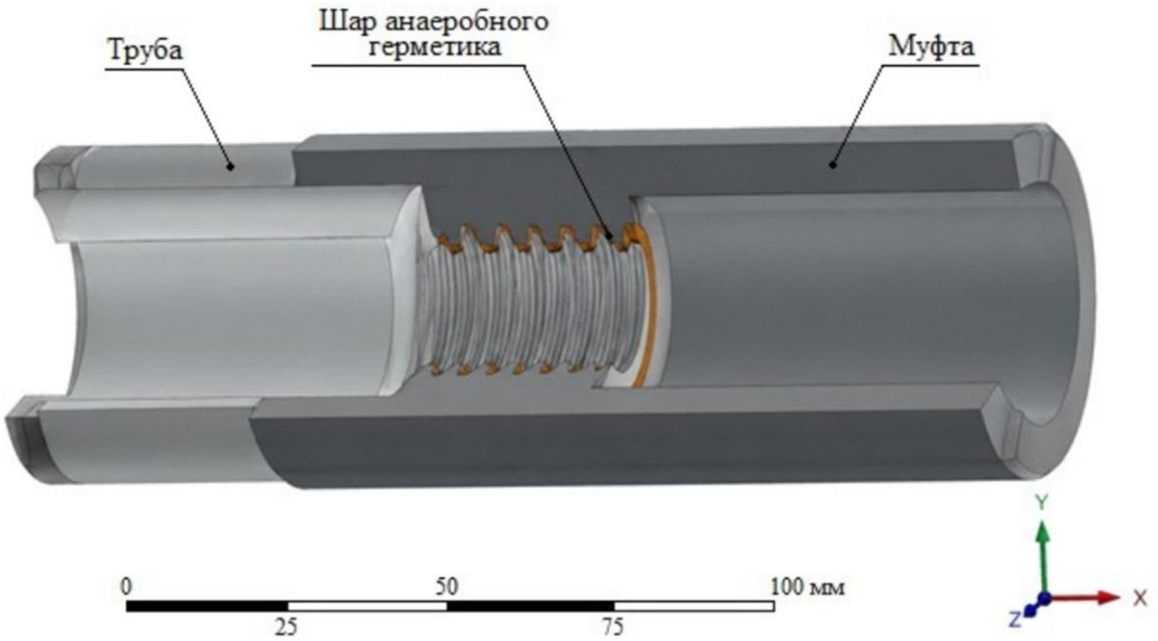
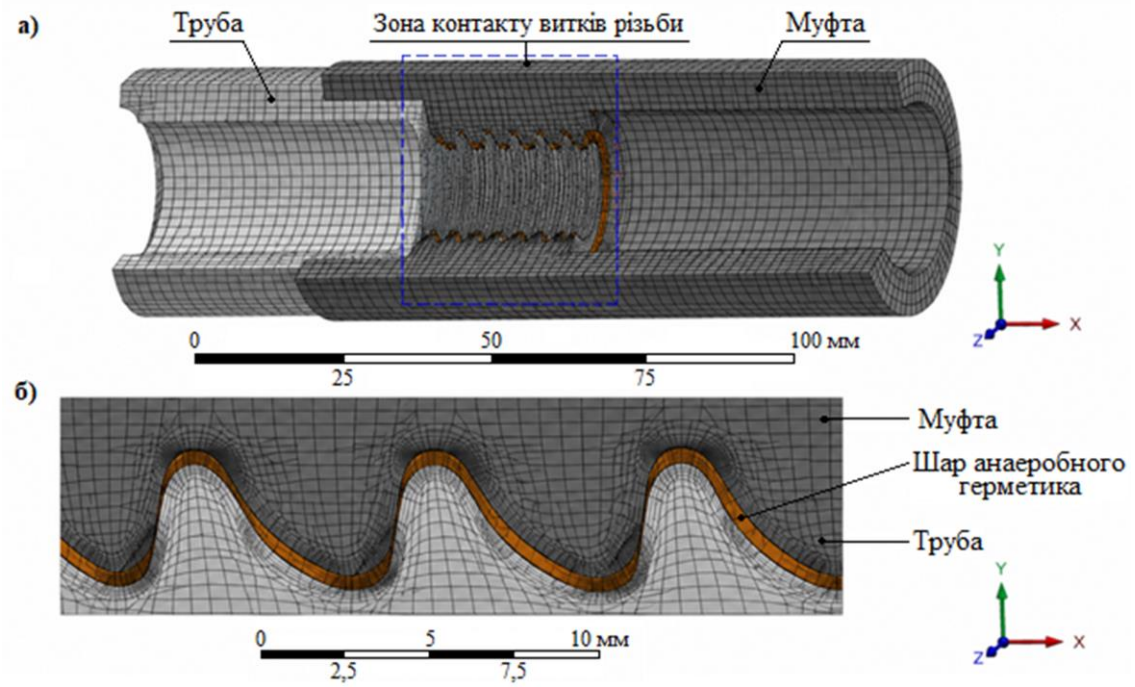


Рисунок 1 – Тривимірна геометрична модель різьбового з'єднання обсадної колони (труба–муфта) із шаром анаеробного герметика



а) – загальний вигляд; б) – збільшений фрагмент зони контакту

Рисунок 2 – Дискретизація скінченно-елементної моделі та локальне згущення сітки в зоні контакту витків різьби

філю різьби та адекватний опис контактної взаємодії поверхонь. Для підвищення достовірності чисельного розрахунку в зонах концентрації напружень виконано локальне згущення скінченно-елементної сітки.

Найбільшу густину скінченно-елементної сітки зосереджено в зоні контакту витків різьби та шару анаеробного герметика, де очікуються максимальні напруження та локальні деформації. Це дало змогу підвищити точність розрахунку контактного тиску, напружень за Мізесом і деформацій герметика без істотного збільшення часу моделювання.

Приклад побудованої сітки в зоні різьбового з’єднання наведено на рисунку 2.

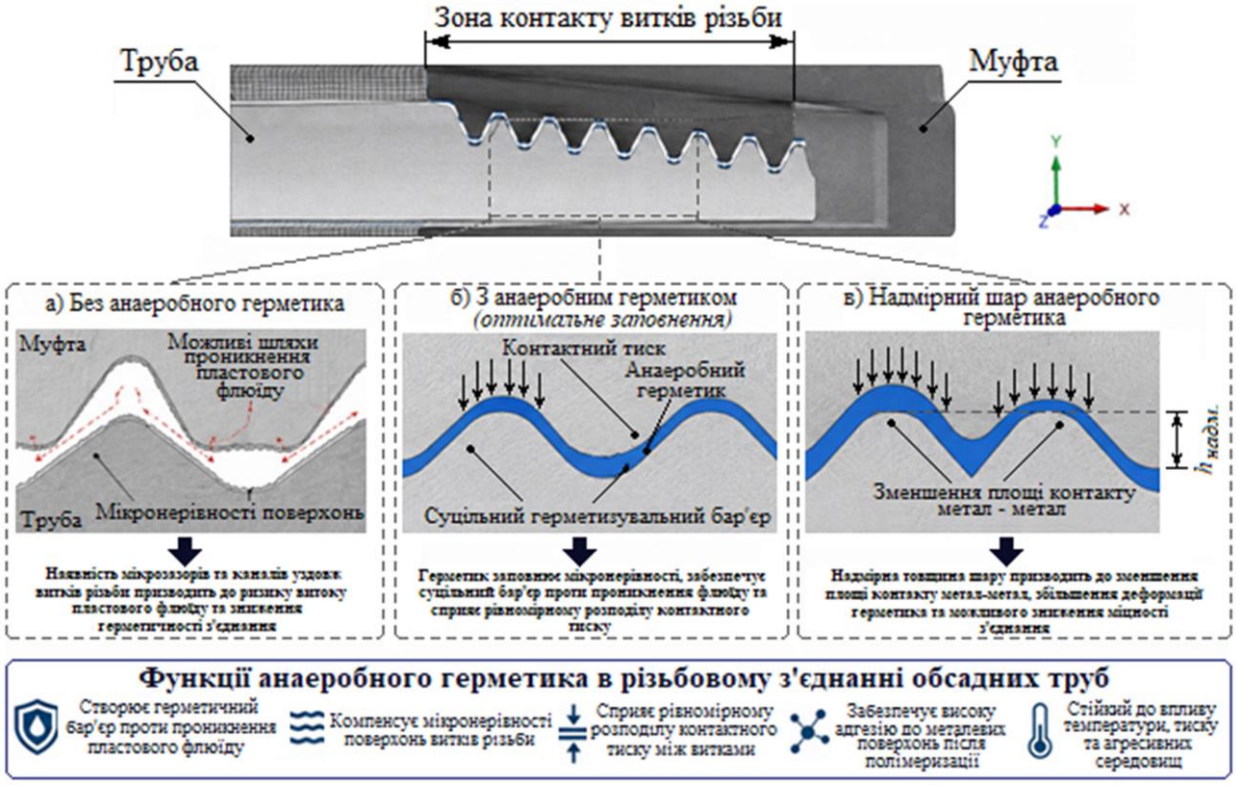


Рисунок 3 – Схема механізму формування герметизувального бар'єра анаеробним герметиком у різьбовому з'єднанні труб обсадної колони

Як видно з рисунка 2, локальне згущення сітки скінченних елементів дозволяє детально відтворити контактну взаємодію між поверхнями різьбового з'єднання у найбільш навантажених зонах. Саме тут формується поле локальних контактних напружень, яке визначає передачу навантаження між обсадною трубою та муфтою, а отже, і герметичність з'єднання загалом.

Слід зазначити, що, на відміну від традиційних мастильних матеріалів, що зберігають рідку консистенцію після згвинчування, анаеробні герметики полімеризуються, стаючи повноцінним елементом з'єднання. Утворений полімерний прошарок не лише герметизує мікрозазори, а й перерозподіляє контактні навантаження, знижуючи напруження на найбільш навантажених ділянках різьби. Висока адгезія анаеробного герметика до металу створює суцільний бар'єр, який блокує проникнення пластових флюїдів по різьбі. Водночас полімерний шар заповнює мікронерівності, рівномірно розподіляючи тиск між витками. Це підвищує надійність з'єднання за змінних експлуатаційних навантажень.

Для детального розгляду взаємодії анаеробного герметика з поверхнями різьбового з'єднання окремо представлено збільшений фрагмент контактної зони. У розрахунковій моделі використано геометрично гладкі поверхні витків різьби без окремого відтворення їх мікронерівностей. Такий підхід дозволяє зосередити увагу на впливі товщини герметизувального шару на напружено-деформований стан з'єднання та характер контактної взаємодії його елементів. Водночас процес заповнення мікронерівностей герметиком у межах застосованої моделі безпосередньо не досліджувався. Схематичне представлення контактної зони наведено на рисунку 3.

Наведений на рисунку 3 механізм взаємодії анаеробного герметика з різьбою пояснює фізичні процеси герметизації з'єднання обсадної колони. Після полімеризації матеріал не лише блокує канали для пластового флюїду, а й рівномірно розподіляє контактний тиск між витками, покращуючи напружено-деформований стан контактної пари. Водночас ефективність герметизувального шару залежить не лише від його фізико-механічних властивостей, а й від геометричних параметрів, головний з яких – товщина полімерного прошарку. Зміна цього показника може як покращити герметизацію, так і вплинути на характер контактної взаємодії у різьбовому з'єднанні [28].

Тому подальше дослідження спрямоване на кількісну оцінку впливу товщини шару ана-

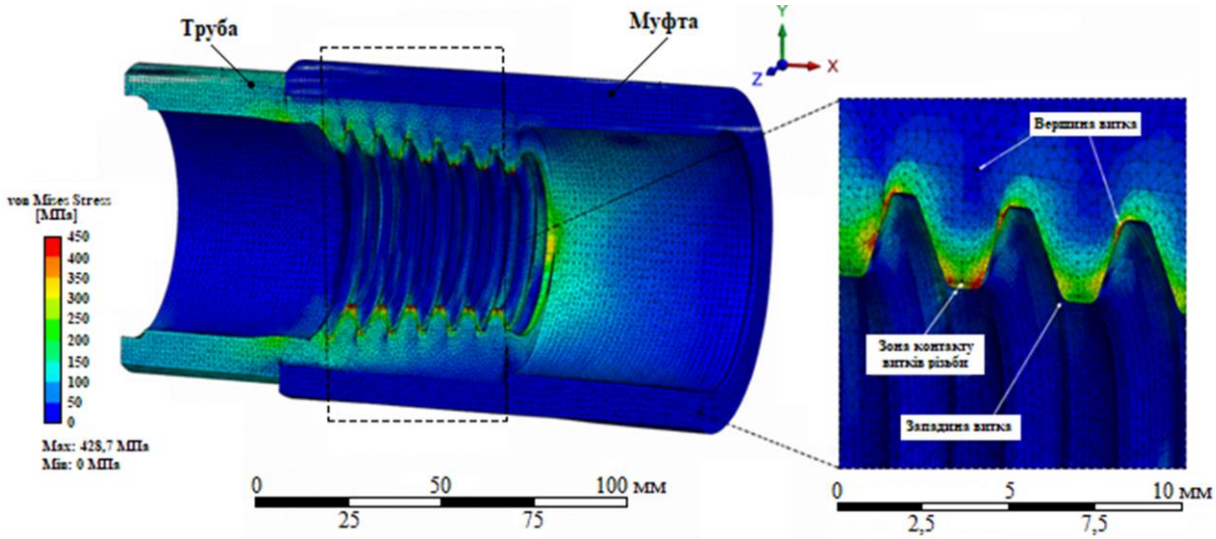


Рисунок 4 – Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом у різьбовому з'єднанні обсадної колони без анаеробного герметика

еробного герметика на напружено-деформований стан різьбового з'єднання труби обсадної колони методом скінченних елементів (МСЕ). Результати чисельного моделювання та їх порівняльний аналіз для різних варіантів товщини герметизувального шару наведено нижче.

Для оцінювання впливу анаеробного герметика на герметичність різьбового з'єднання, попередньо виконано чисельне моделювання базової конструкції без герметизувального матеріалу. Ці результати слугують еталоном для порівняльного аналізу моделей із різною товщиною шару герметика. Без нього контакт обсадної труби та муфти забезпечується виключно взаємодією металевих поверхонь різьби. У такому разі характер навантаження визначається геометрією профілю, зусиллям згвинчування та внутрішнім тиском [29]. Аналіз напружено-деформованого стану (НДС) здійснювався за розподілом еквівалентних напружень (за Мізесом), що дозволило виявити найбільш навантажені ділянки з'єднання та оцінити концентрацію напружень у зоні контакту витків [30].

Результати чисельного моделювання наведено на рисунку 4.

Як показано на рисунку 4, без анаеробного герметика найбільші еквівалентні напруження зосереджуються в зоні контакту витків різьби – переважно на їхніх робочих бокових поверхнях та ділянках зміни геометрії профілю. Найвищу концентрацію напружень фіксуємо на перших витках з боку муфти, оскільки саме вони сприймають основну частку осьового навантаження та внутрішнього робочого тиску.

Одержані результати свідчать про нерівномірний розподіл еквівалентних напружень у зоні різьбового з'єднання. Найбільш навантаженими є окремі ділянки робочих поверхонь витків, де спостерігається локальна концентрація напружень. Такий характер їх розподілу зумовлений геометрією різьбового профілю та особливостями передачі навантаження між трубою і муфтою. Відсутність герметизувального прошарку в розглянутій моделі дає змогу оцінити напружено-деформований стан з'єднання за безпосередньої контактної взаємодії металевих поверхонь. Одержані результати використано як базові для подальшого порівняння з моделями, що передбачають застосування анаеробного герметика.

Для оцінки впливу анаеробного герметика на з'єднання обсадної колони ми провели чисельне моделювання для п'яти варіантів товщини шару – від 0,02 до 0,20 мм – та порівняли їх із базовою конструкцією без герметизації. Це дозволило ізолювати дію герметика від інших факторів. У кожному випадку аналізували розподіл еквівалентних напружень за Мізесом, контактний тиск та особливості механічної взаємодії елементів різьбового з'єднання.

На першому етапі дослідження провели моделювання з'єднання з мінімальною товщиною анаеробного герметика 0,02 мм. Цей шар відповідає початковому заповненню мікронерівностей профілю та дозволяє оцінити вплив навіть мінімальної кількості полімеру на перерозподіл напружень і контакт між трубою і муфтою. Результати чисельного моделювання наведено на рисунку 5.

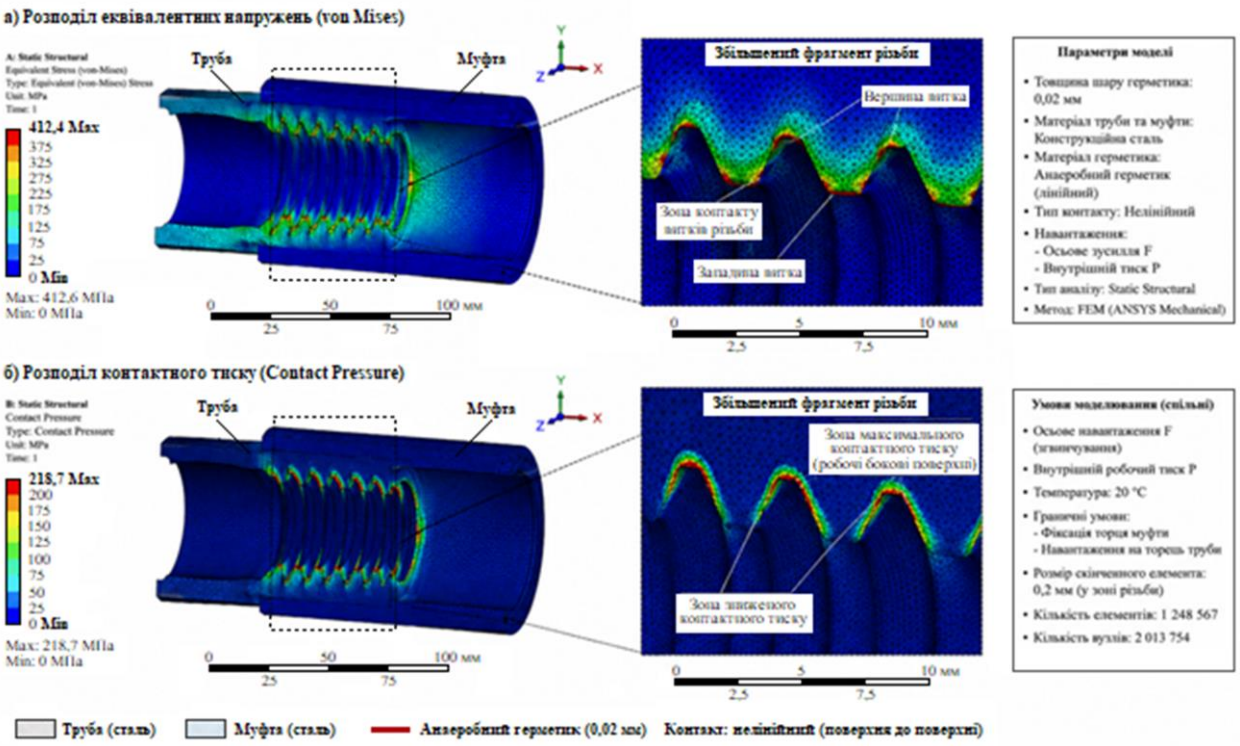


Рисунок 5 – Розподіл (а) еквівалентних напружень та (б) контактного тиску в різьбовому з'єднанні труби обсадної колони із шаром анаеробного герметика товщиною 0,02 мм

Аналіз рисунка 5 свідчить, що нанесення анаеробного герметика шаром завтовшки 0,02 мм суттєво змінює характер контактної взаємодії поверхонь різьбового з'єднання, порівняно з базовою моделлю. Заповнюючи мікронерівності профілю різьби, полімерний шар сприяє рівномірнішому розподілу робочих навантажень.

Дослідження поля еквівалентних напружень (за фон Мізесом) виявляє, що найбільші навантаження зосереджені на робочих профілях перших витків. Однак при використанні анаеробного герметика локальні концентратори напружень є менш критичними порівняно з «сухим» з'єднанням. Це обумовлено демпфувальним ефектом полімерного шару, який заповнює мікронерівності та сприяє рівномірному розподілу навантаження в зоні контакту «труба-муфта».

Згідно з картою контактного тиску, використання анаеробного герметика покращує напружено-деформований стан різьбового з'єднання, роблячи контакт витків рівномірнішим. Водночас результати моделювання для шару товщиною 0,02 мм характеризують початкові зміни напружено-деформованого стану з'єднання та не дають достатніх підстав для визначення раціональної товщини герметика. Для подальшого оцінювання його впливу на контактну взаємодію поверхонь необхідно розглянути результати моделювання за більшої товщини шару.

Для встановлення раціональної товщини ущільнювального шару необхідно провести додаткове моделювання зі збільшеною товщиною герметика (рис. 6).

Аналіз рисунка 6 показує, що шар герметика завтовшки 0,05 мм сприяє більш рівномірному розподілу напружень у різьбовому з'єднанні. На відміну від моделі з шаром 0,02 мм, де напруження концентруються локально, збільшення товщини гарантує плавніший перерозподіл навантаження між контактуючими поверхнями.

Анаеробний герметик шаром 0,05 мм якісніше компенсує мікронерівності різьби, збільшуючи площу фактичного контакту труби й муфти. Внаслідок цього контактний тиск рівномірніше розподіляється вздовж робочих поверхонь витків, мінімізуючи ймовірність утворення локальних мікрозазорів і формуючи надійний герметичний бар'єр.

Як видно з рисунка 7, збільшення товщини шару анаеробного герметика до 0,10 мм забезпечує більш рівномірний розподіл еквівалентних напружень у зоні контакту витків різьби. Порівняно з попередніми варіантами, спостерігається зниження локальних піків напружень, що свідчить про ефективніший перерозподіл навантаження між трубою та муфтою.

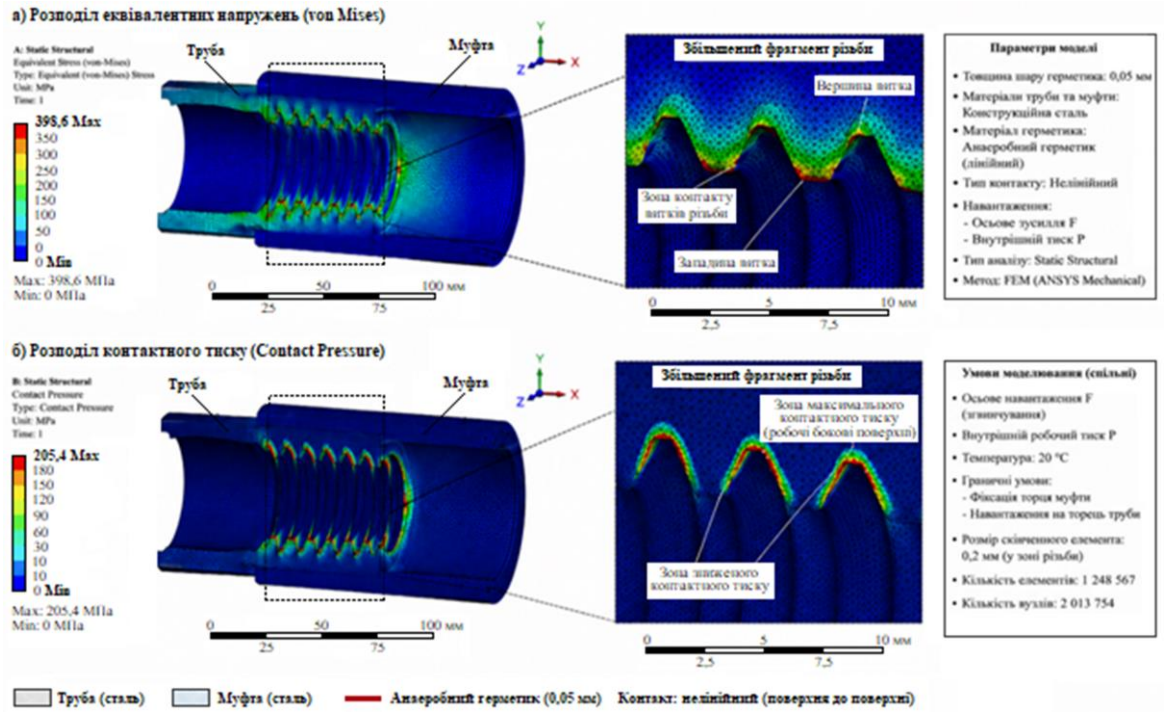


Рисунок 6 – Розподіл (а) еквівалентних напружень та (б) контактного тиску в різьбовому з'єднанні труби обсадної колони із шаром анаеробного герметика товщиною 0,05 мм

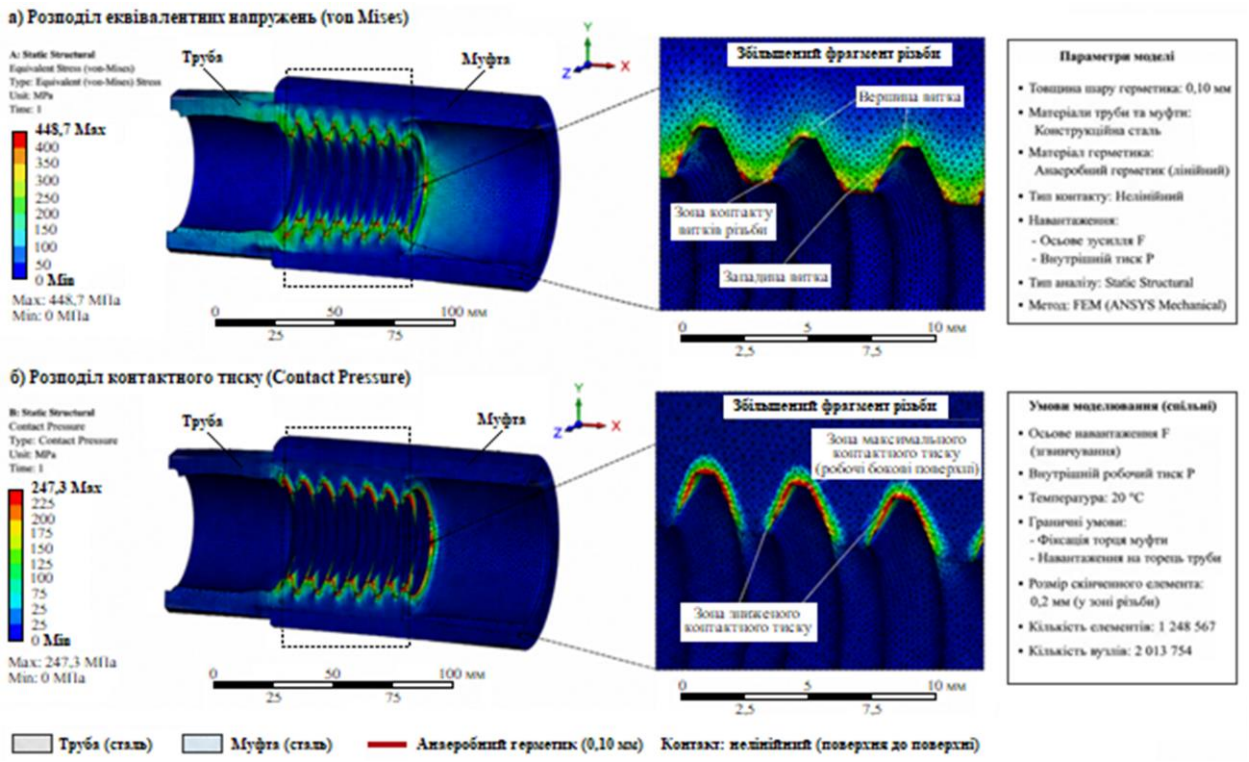


Рисунок 7 – Розподіл (а) еквівалентних напружень та (б) контактного тиску в різьбовому з'єднанні труби обсадної колони із шаром анаеробного герметика товщиною 0,10 мм

Аналіз розподілу контактного тиску свідчить, що збільшення товщини герметика забезпечує стабільніший контакт витків різьби. За результатами чисельного моделювання, за товщини герметизувального шару 0,10 мм спостерігається більш рівномірний характер розподілу еквівалентних напружень у зоні контакту витків різьби. Зменшення їх локальної концентрації свідчить про сприятливіші умови передачі навантажень між елементами з'єднання, що має важливе значення для забезпечення його механічної надійності.

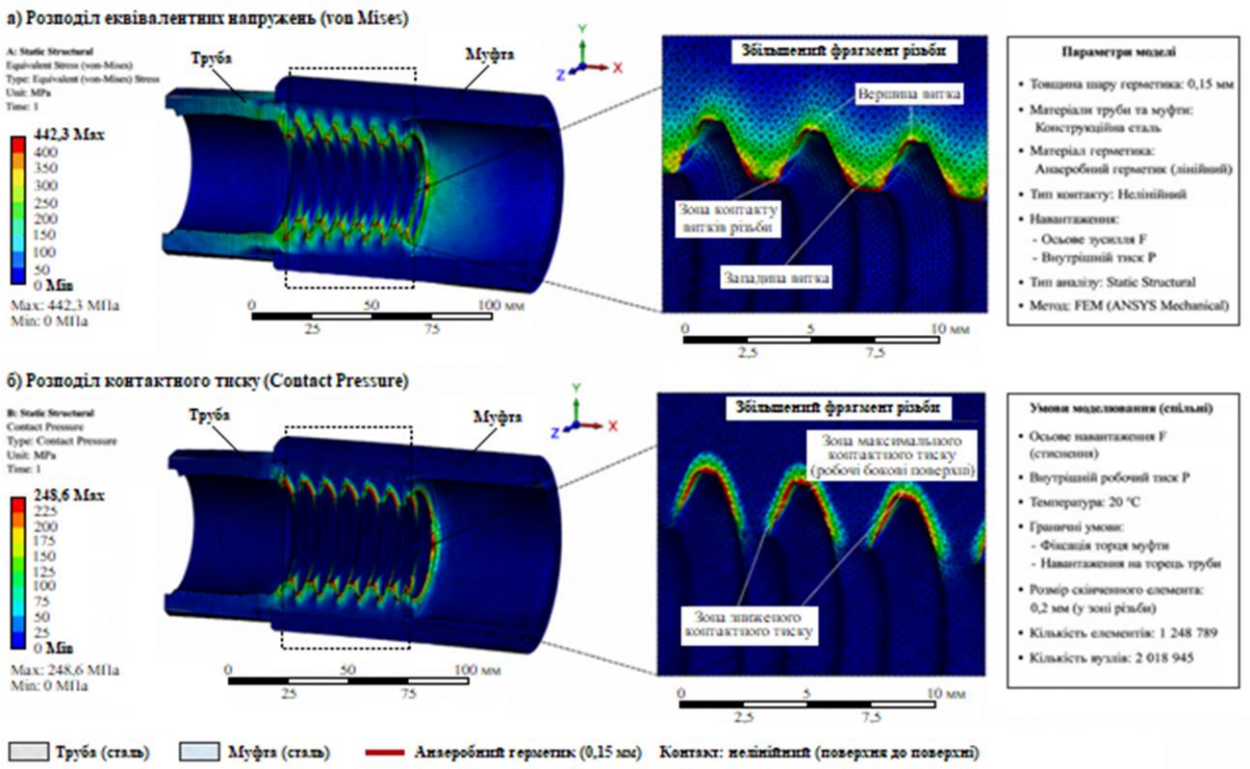


Рисунок 8 – Розподіл (а) еквівалентних напружень та (б) контактного тиску в різьбовому з'єднанні труби обсадної колони із шаром анаеробного герметика товщиною 0,15 мм

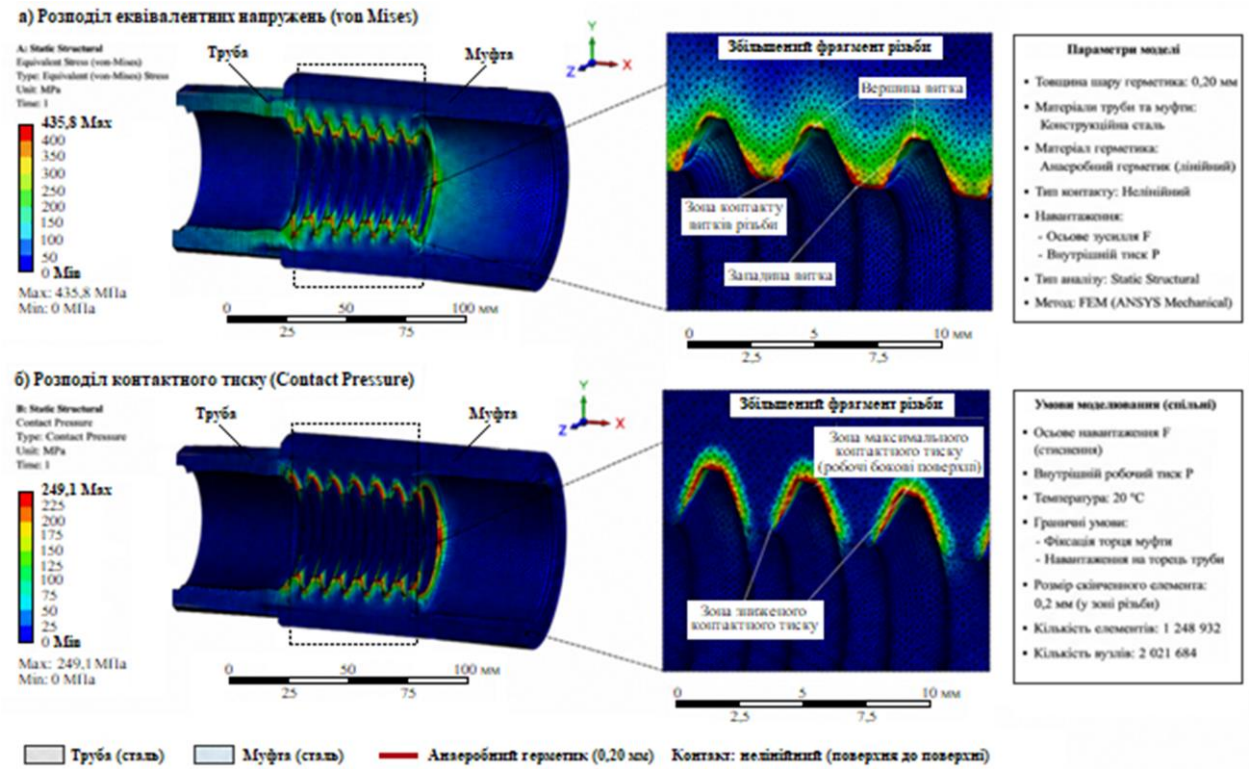


Рисунок 9 – Розподіл (а) еквівалентних напружень та (б) контактного тиску в різьбовому з'єднанні труби обсадної колони із шаром анаеробного герметика товщиною 0,20 мм

Збільшення товщини анаеробного герметика до 0,10 мм покращує напружено-деформований стан різьбового з'єднання. Однак, остаточний висновок щодо ефективності цього рішення буде зроблено після моделювання та порівняння варіантів із більшою товщиною шару (0,15 і 0,20 мм), результати яких представлено на рисунках 8 і 9.

Збільшення товщини прошарку анаеробного герметика до 0,15 мм (рис. 8) сприяє рівномірнішому розподілу еквівалентних напружень та зменшенню їх локальної концентрації відносно попередніх моделей. Це свідчить про ефективніший перерозподіл навантаження в системі «труба–муфта».

Дослідження контактного тиску вказує на те, що збільшена товщина герметика забезпечує стабільний контакт робочих поверхонь, якісно заповнює мікронерівності різьби та збільшує фактичну площу взаємодії. Це сприяє рівномірному розподілу тиску по довжині різьбового з'єднання загалом. Таким чином, перехід до товщини 0,15 мм покращує напружено-деформований стан вузла. Визначення раціональної товщини потребує додаткового аналізу та комплексного порівняння з результатами моделювання для шару 0,20 мм.

Згідно з рисунком 9, збільшення шару анаеробного герметика до 0,20 мм суттєво змінює розподіл еквівалентних напружень і контактного тиску, а також площу фактичного контакту витків. Проте цей вплив є неоднозначним, що потребує комплексного зіставлення всіх варіантів. Порівняння розрахункових моделей без герметика та з анаеробним герметиком різної товщини свідчить про зміну характеру розподілу еквівалентних напружень у зоні контакту витків різьби. Для досліджених варіантів, у яких спостерігається зниження максимальних напружень, це є позитивним результатом, оскільки зменшення їх локальної концентрації сприяє покращенню напружено-деформованого стану різьбового з’єднання. Водночас величина такого ефекту залежить від товщини герметизувального шару та умов контактної взаємодії поверхонь.

Аналіз моделі з максимально досліджуваною товщиною 0,20 мм показав, що надмірне збільшення товщини анаеробного герметика не підвищує ефективність різьбового з'єднання. Натомість збільшення полімерного шару призводить до того, що навантаження починає сприймати сам герметик, а не металеві поверхні різьби. У результаті приріст герметизувальної здатності припиняється, що підтверджує наявність раціональної межі товщини матеріалу.

Отримані результати завершують серію чисельних експериментів. Вони слугують основою для порівняльного аналізу моделей, що дозволить визначити раціональну товщину герметика для забезпечення герметичності труб обсадної колони. Запропонований підхід дозволяє обґрунтувати раціональну товщину герметизувального шару, удосконалити технологію збирання різьбових з'єднань, підвищити їхню герметичність та знизити ризик міжколонних перетоків під час будівництва й експлуатації свердловин.

Перспективний напрям подальших досліджень – розширення розрахункової моделі з урахуванням нелінійних властивостей герметика, температурних впливів, циклічних навантажень і багаторазового згвинчування-розгвинчування. Подальша експериментальна верифікація чисельного моделювання дозволить сформувати вичерпні науково обґрунтовані рекомендації для різних умов експлуатації.

Висновки

1. Проведене дослідження підтвердило важливість урахування товщини шару анаеробного герметика під час оцінювання надійності різьбових з’єднань обсадних колон. Основним призначенням анаеробного герметика є формування герметизувального бар’єра між контактуючими поверхнями труби та муфти, однак після полімеризації його шар також бере участь у передачі механічних навантажень. Результати чисельного моделювання показали, що зміна товщини герметизувального прошарку впливає на розподіл еквівалентних напружень і характер контактної взаємодії витків різьби. Отже, вибір раціональної товщини анаеробного герметика має враховувати не лише його герметизувальне призначення, а й вплив на напружено-деформований стан з’єднання.

2. Аналіз базової моделі різьбового з’єднання без герметика показав нерівномірний характер розподілу еквівалентних напружень у зоні контакту витків різьби. Найбільш навантаженими є окремі ділянки профілю, де виникає локальна концентрація напружень, зумовлена особливостями геометрії з’єднання та передачі навантаження між трубою і муфтою. Отримані результати характеризують напружено-деформований стан з’єднання за відсутності герметизувального прошарку та слугують основою для порівняння з розрахунковими моделями, що передбачають застосування анаеробного герметика. Водночас на підставі проведеного статичного розрахунку неможливо зробити однозначний висновок щодо герметичності з’єднання, оскільки процес витоку пластового флюїду в межах застосованої моделі не досліджувався.

3. Результати порівняльного чисельного моделювання свідчать, що товщина шару анаеробного герметика впливає на характер роз-

поділу напружень у різьбовому з'єднанні обсадної колони. За результатами проведеного аналізу найбільш раціональною серед розглянутих варіантів є товщина шару 0,10 мм, за якої спостерігається сприятливіший розподіл еквівалентних напружень та зменшення їх локальної концентрації. Отримані результати характеризують вплив товщини герметизувального шару на механічну роботу з'єднання та можуть бути використані як основа для подальшого дослідження його герметичності.

4. Встановлено, що ефективність герметизації різьбових з'єднань обсадних колон анаеробними герметиками залежить як від фізико-механічних характеристик матеріалу, так і від геометричних параметрів його нанесення. Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) дозволило виявити закономірності формування контактної взаємодії поверхонь, дослідження яких експериментальним шляхом призводить до руйнування з'єднання. Це розширює сучасні уявлення про механізми роботи таких ущільнень.

Подяки
Відсутні.

Конфлікт інтересів
Відсутній.

Список використаних джерел

1. Specification 5CT: Casing and Tubing. 10th ed. Washington : API Publishing Services, 2018. 288 p. (API Specification 5CT).
2. API Specification 5B: Threading, Gauging and Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads. Washington : American Petroleum Institute, 2017. 132 p.
3. Petroleum and Natural Gas Industries — Procedures for Testing Casing and Tubing Connections : ISO 13679:2019. Geneva : ISO, 2019. 148 p.
4. Petroleum and Natural Gas Industries — Formulae and Calculations for Casing, Tubing and Drill Pipe Properties : ISO 10400:2007. Geneva : ISO, 2007. 142 p.
5. Steel Pipes for Use as Casing or Tubing for Wells : ISO 11960:2020. Geneva : ISO, 2020. 164 p.
6. API RP 5C1: Care and Use of Casing and Tubing. Washington : American Petroleum Institute, 2016. 44 p.
7. API TR 5C3: Technical Report on Casing and Tubing Performance. Washington : American Petroleum Institute, 2018. 188 p.
8. TENARIS. Premium Connections for OCTG : product catalogue. Tenaris, 2020. 84 p.
9. Vallourec. VAM® Premium Connections Running Book. Vallourec, 2020. 112 p.
10. Schlumberger. Threaded Connection Integrity in High-Deviation Wells : technical report. Schlumberger, 2021. 24 p.
11. Henkel. Loctite Product Catalogue : technical documentation. Henkel, 2022. 156 p.
12. Henkel. Technical Data Sheet – LOCTITE® 577 Thread Sealant. Henkel, 2021. 4 p.
13. Henkel. Loctite Anaerobic Adhesives & Sealants Overview. Henkel, 2022. 16 p.
14. Baker Hughes. Thread Sealant Series : product catalogue. Baker Hughes, 2021. 12 p.
15. Фем'як Я. М., Зелінський А. А. Забезпечення герметичності обсадних колон у газових свердловинах шляхом використання анаеробних герметиків. *Modern Research in World Science* : зб. матеріалів конф. (Львів, 2024). Львів, 2024. С. 145–152.
16. Фем'як Я. М., Зелінський А. А. Вдосконалення герметичності обсадних колон у газових свердловинах за допомогою анаеробних герметиків. *Scientific Research and Innovation* : зб. матеріалів конф. (Дніпро, 2024). Дніпро, 2024. С. 88–95. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/server/api/core/bitstreams/f1c4f8f2-2ac7-4662-b610-97ea7146634e/content (дата звернення: 20.10.2026).
17. Зелінський А. А., Фем'як Я. М. Особливості герметизації різьбових з'єднань обсадних колон у похило-скерованих свердловинах. *Modern Research in World Science* : зб. матеріалів конф. (Львів, 2024). Львів, 2024. С. 210–218.
18. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method. 6th ed. Oxford : Elsevier, 2005. 752 p.
19. Bathe K. J. Finite Element Procedures. Cambridge, MA : MIT Press, 1996. 1037 p.
20. Logan D. L. A First Course in the Finite Element Method. 5th ed. Stamford : Cengage Learning, 2012. 992 p.

21. Ansys Mechanical User's Guide : Version 2022 R2. Ansys Inc., 2022. 2850 p. URL: https://www.scribd.com/document/904551747/File-C-Program-Files-ANSYS-Inc-v222-Aisol-DesignSpace-D (date of access: 20.10.2026).
22. COMSOL Multiphysics®. Thread Sealing Simulation Example : application note. COMSOL AB, 2022. 18 p.
23. Johnson K. L. Contact Mechanics. Cambridge : Cambridge University Press, 1985. 464 p.
24. Influence of Acid Systems on Bottomhole Zone Decolmatization and Set Cement Stability / Ye. M. Stavychnyi et al. *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
25. Improving the Reliability of Oil and Gas Well Cementing Using Composite Plugging Systems / Ye. M. Stavychnyi et al. *SOCAR Proceedings*. 2025. No. 3. P. 59–69. DOI: https://doi.org/10.5510/OGP20250301097
26. Research of Cement Stone Permeability Based on Composite Plugging Material for Oil and Gas Wells / Ye. M. Stavychnyi et al. *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
27. Well Rehabilitation is a Promising Area for Increasing Hydrocarbon Production / S. Piatkivskyi et al. *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 74, no. 1. P. 85–94. DOI: https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0015
28. Zhu W., Liang Y., Zhao L. Modeling Surface Roughness and Flow of Gases in Threaded Connections to Analyze Sealing Performance. *Processes*. 2024. Vol. 12, no. 3. Art. 574. DOI: https://doi.org/10.3390/pr12030574
29. Zhang T., Yang L., Bai F., Zhu C. Gas-Tightness Evaluation of Threaded Connections for Deep Oil and Gas Wells at High Temperature. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 17. Art. 4539. DOI: https://doi.org/10.3390/en18174539
30. On the Sealability of Metal-to-Metal Seals with Application to Premium Casing and Tubing Connections / D. Ernens et al. *SPE Drilling & Completion*. 2019. Vol. 34, no. 4. P. 312–324. DOI: https://doi.org/10.2118/194146-PA

References

1. American Petroleum Institute. (2018). *Specification 5CT: Casing and tubing* (10th ed.). API Publishing Services.
2. American Petroleum Institute. (2017). *API Specification 5B: Threading, gauging and inspection of casing, tubing, and line pipe threads* (16th ed.). API Publishing Services.
3. International Organization for Standardization. (2019). *Petroleum and natural gas industries — Procedures for testing casing and tubing connections* (ISO Standard No. 13679:2019).
4. International Organization for Standardization. (2007). *Petroleum and natural gas industries — Formulae and calculations for casing, tubing and drill pipe properties* (ISO Standard No. 10400:2007).
5. International Organization for Standardization. (2020). *Steel pipes for use as casing or tubing for wells* (ISO Standard No. 11960:2020).
6. American Petroleum Institute. (2016). *API RP 5C1: Recommended practice for care and use of casing and tubing* (18th ed.). API Publishing Services.
7. American Petroleum Institute. (2018). *API TR 5C3: Technical report on casing and tubing performance* (7th ed.). API Publishing Services.
8. Tenaris. (n.d.). *Premium connections for OCTG* [Product catalogue].
9. Vallourec. (2020). *VAM® premium connections running book*. Vallourec.
10. Schlumberger. (n.d.). *Threaded connection integrity in high-deviation wells* [Technical document].
11. Henkel. (2022). *Loctite product catalogue* [Technical documentation]. Henkel.
12. Henkel. (n.d.). *Technical data sheet – LOCTITE® 577 thread sealant*. Henkel.
13. Henkel. (n.d.). *Loctite anaerobic adhesives & sealants overview* [Technical document]. Henkel.
14. Baker Hughes. (n.d.). *Thread sealant series* [Product literature].
15. Femiak, Ya. M., & Zelinskyi, A. A. (2024). Zabespetshennia hermetychnosti obsadnykh kolonn u hazovykh sverdlovynakh shliakhom vykorystannia anaerobnykh hermetykiv [Ensuring the tightness of casing strings in gas wells using anaerobic sealants]. *Modern Research in World Science*, (3), 415–422. (in Ukrainian)

16. Femiak, Ya. M., & Zelinskyi, A. A. (2024). Vdoskonalennia hermetychnosti obsadnykh kolonn u hazovykh sverdlovynakh za dopomohoiu anaerobnykh hermetykiv [Improving the tightness of casing strings in gas wells using anaerobic sealants]. *Scientific Research and Innovation*, (4), 112–119. https://dspace.dsau.dp.ua/server/api/core/bitstreams/f1c4f8f2-2ac7-4662-b610-97ea7146634e/content (in Ukrainian)
17. Zelinskyi, A. A., & Femiak, Ya. M. (2024). Osoblyvosti hermetyzatsii rizboykh z'iednan obsadnykh kolonn u pokhylo-skyerovanykh sverdlovynakh [Peculiarities of sealing threaded connections of casing strings in directional wells]. *Modern Research in World Science*, (5), 230–237. (in Ukrainian)
18. Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The finite element method* (6th ed.). Elsevier.
19. Bathe, K. J. (1996). *Finite element procedures*. MIT Press.
20. Logan, D. L. (2012). *A first course in the finite element method* (5th ed.). Cengage Learning.
21. Ansys Inc. (2022). *Ansys mechanical user's guide* (Release 2022 R2). https://www.scribd.com/document/904551747/File-C-Program-Files-ANSYS-Inc-v222-Aisol-DesignSpace-D
22. COMSOL Multiphysics®. (n.d.). *Thread sealing simulation example* [Application model documentation].
23. Johnson, K. L. (1985). *Contact mechanics*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139167970
24. Stavychnyi, Ye. M., Rudyi, S. M., Femiak, Ya. M., & et al. (2024). Influence of acid systems on bottomhole zone decolmatization and set cement stability. *Journal of Physics and Chemistry of Solid State*, *25*(3), 664–674. https://doi.org/10.15330/pcss.25.3.664-674
25. Stavychnyi, Ye. M., Femiak, Ya. M., Vytyaz, O. Yu., & et al. (2025). Improving the reliability of oil and gas well cementing using composite plugging systems. *SOCAR Proceedings*, (3), 59–69. https://doi.org/10.5510/OGP20250301097
26. Stavychnyi, Ye. M., & et al. (2025). Research of cement stone permeability based on composite plugging material for oil and gas wells. *Journal of Physics and Chemistry of Solid State*, *26*(3), 480–488. https://doi.org/10.15330/pcss.26.3.480-488
27. Piatkivskyi, S., Stavychnyi, Y., Femiak, Y., & et al. (2024). Well rehabilitation is a promising area for increasing hydrocarbon production. *Strojnícky Časopis – Journal of Mechanical Engineering*, *74*(1), 185–196. https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0015
28. Zhu, W., Liang, Y., & Zhao, L. (2024). Modeling surface roughness and flow of gases in threaded connections to analyze sealing performance. *Processes*, *12*(3), Article 574. https://doi.org/10.3390/pr12030574
29. Zhang, T., Yang, L., Bai, F., & Zhu, C. (2025). Gas-tightness evaluation of threaded connections for deep oil and gas wells at high temperature. *Energies*, *18*(17), Article 4539. https://doi.org/10.3390/en18174539
30. Ernens, D., Pérez-Ràfols, F., van Hoecke, D., & et al. (2019). On the sealability of metal-to-metal seals with application to premium casing and tubing connections. *SPE Drilling & Completion*, *34*(4), 320–333. https://doi.org/10.2118/194146-PA

JUSTIFICATION OF THE OPTIMAL ANAEROBIC SEALANT LAYER THICKNESS FOR THREADED CONNECTIONS OF CASING PIPES

Zelinskyi A. A.
Postgraduate Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0009-0001-0495-9935
e-mail: gryzdeff89@gmail.com

Femiak Ya. M.
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Well Drilling
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-4445-6731
e-mail: yaroslav.femiak@nung.edu.ua

Abstract. The influence of the thickness of an anaerobic sealant layer on the stress-strain state of threaded casing connections was investigated. This study is relevant because there is a need to improve the mechanical reliability of threaded connections that are subjected to significant axial loads and internal pressure during well operation. Particular attention was paid to how the geometric parameters of the sealing layer influence thread contact interaction, equivalent stress distribution and contact pressure. The effect of variations in anaerobic sealant thickness on the mechanical behaviour of threaded casing connections was also considered. This study aimed to determine the influence of anaerobic sealant layer thickness on the stress-strain state of a threaded casing connection, and to identify a rational thickness based on numerical modelling. The investigation was performed using the finite element method (FEM) in ANSYS Mechanical. A simplified three-dimensional model consisting of a casing pipe, a coupling and an anaerobic sealant layer was employed. Six configurations were analysed: a connection without sealant, and connections with sealant layer thicknesses of 0.02, 0.05, 0.10, 0.15 and 0.20 mm. A comparative numerical analysis was performed to demonstrate the influence of the thickness of the anaerobic sealant layer on the distribution of equivalent stresses within the threaded contact region. The reference model without a sealant layer exhibited non-uniform stress distribution, with localised stress concentrations in specific areas of the thread profile. Models incorporating a sealing layer showed changes in the stress-strain state, which were associated with load redistribution between the contacting surfaces of the pipe and coupling. Comparing the calculated equivalent stress fields showed that the location and distribution of stress concentrations depend on the thickness of the polymeric interlayer. Based on the comparative analysis presented, a sealant layer thickness of 0.10 mm was identified as a rational value among the configurations investigated in terms of equivalent stress distribution. For this configuration, reduced localised stress concentrations and more favourable load transfer conditions between the engaged threads were observed. Increasing the sealant layer thickness further to 0.15–0.20 mm altered the contact interaction, highlighting the importance of considering polymer layer geometry when evaluating the mechanical behaviour of threaded connections. The results obtained provide further insight into the relationship between anaerobic sealant layer thickness and the stress-strain state of threaded casing connections. The findings support the consideration of sealing layer geometry in the development of sealing solutions for casing connections. Further research should address the non-linear mechanical properties of the sealant, its non-uniform distribution after connection assembly, and the quantitative evaluation of sealing performance under formation fluid pressure.

Keywords: anaerobic sealant; casing strings; threaded connection; Finite Element Method (FEM); contact pressure.