

ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

О. Я. Фафлей, В. В. Михайлюк, Р. В. Рачкевич, Р. О. Дейнега, А. І. Різничук, Р. С. Кравчук

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. +38 068 2130852,
e-mail: deynerga2004@i.ua

Для різноманітних інженерних розрахунків, досліджень та розроблення елементів обладнання сьогодні існує значна кількість комп'ютерних програм. Широкого розповсюдження для виконання таких робіт набула програма SolidWorks, яка дає змогу мінімізувати час, полегшити виконання необхідних розрахункових робіт, а також проаналізувати міцність, жорсткість, стійкість та витривалість виробів широкого спектру складності та призначення. У програмі застосовано метод скінченних елементів. Для дослідження можливостей програми побудовано збірну модель різьбового з'єднання насосних штанг. Проблемним під час моделювання в середовищі SolidWorks Simulation залишається імітація моменту згвинчування для різьбових з'єднань. Існує декілька способів імітування моменту згвинчування під час дослідження напружено-деформованого стану різьбових з'єднань. Для розв'язання задач в осесиметричній постановці оптимальним є метод перекриття торців ніпеля та муфти на необхідну величину. Щодо використання самої осесиметричної моделі, то у процесі імітаційного моделювання вона не погіршує отриманих результатів порівняно із 3D моделями. Натомість пришиває процес розрахунку, уможлиблює побудову дрібнішої сітки кінцевих елементів та отримання точніших результатів. Наведено алгоритм розрахунку величини натягу різьбових з'єднань насосних штанг, який може бути застосований і до різьбових з'єднань елементів бурильних колон з деякими коректуваннями. Відмінність полягає лише у формулі визначення моменту згвинчування, з якої виводять значення сили попереднього затягнення та площ небезпечних перерізів. Також у роботі проведено імітаційне дослідження за допомогою вибраного методу на прикладі різьбового з'єднання насосних штанг діаметром 19 мм. Отримано епюру переміщень та розподілу еквівалентних напружень у різьбовому з'єднанні та показано можливість визначення конкретних параметрів у певних точках досліджуваної моделі із наступною автоматизованою побудовою їх графічних залежностей.

Ключові слова: імітаційне моделювання, метод скінченних елементів, момент згвинчування, насосно-компресорна труба, насосна штанга.

Для различных инженерных расчетов, исследований и разработки элементов оборудования сегодня существует значительное количество компьютерных программ. Широкое распространение для выполнения таких работ получила программа SolidWorks, которая позволяет минимизировать время, облегчить выполнение необходимых работ, а также анализировать прочность, жесткость, устойчивость и выносливость изделий широкого спектра сложности и назначения. В программе использован метод конечных элементов. Для исследования возможностей такой программы построена модель резьбового соединения насосных штанг. Проблемным при моделировании в среде SolidWorks Simulation остается имитация момента свинчивания для резьбовых соединений. Существует несколько способов имитации момента свинчивания при исследовании напряженно-деформированного состояния резьбовых соединений. Для решения задач в осесимметричной постановке оптимальным является метод перекрытия торцов нипеля и муфты на необходимую величину. Использование осесимметричной модели в процессе имитационного моделирования не ухудшает полученных результатов по сравнению с 3D моделями. При этом ускоряя процесс расчета, она позволяет построение более мелкой сетки конечных элементов и получение более точных результатов. Приведен алгоритм расчета величины натяжения резьбовых соединений насосных штанг, который может быть применен и к резьбовым соединениям элементов бурильных колонн с некоторыми корректировками. Отличие состоит только в формуле определения момента свинчивания, из которой выводят значение силы предварительного затягивания и площадей опасных сечений. Также в работе проведено имитационное исследование с помощью выбранного метода на примере резьбового соединения насосных штанг диаметром 19 мм. Получена эпюра перемещений и распределения эквивалентных напряжений в резьбовом соединении, а также показана возможность определения конкретных параметров в определенных точках исследуемой модели с последующим автоматизированным построением их графических зависимостей.

Ключевые слова: имитационное моделирование, метод конечных элементов, момент свинчивания, насосно-компресорная труба, насосная штанга.

A significant number of computer programs exist today for various engineering calculations, research and development of equipment elements. The SolidWorks software has become widespread for such work, which allows you to minimize time, facilitate the performance of the necessary work, as well as analyze the strength, stiffness, stability and endurance of products of a wide range of complexity and purpose. The program uses the finite element method, which has both a number of advantages and certain disadvantages. To investigate the possibilities of such a program, a model of a threaded connection of sucker rods has been built. Simulation of make-up torque for threaded connections remains problematic when modeling in SolidWorks Simulation. There are several ways to simulate the make-up moment during the study of the stress-strain state of threaded connections. To solve problems in an axisymmetric setting, the optimal method is to overlap the ends of the nipple and coupling by the required amount. The use of an axisymmetric model in the process of simulation does not impair the results obtained in comparison with 3D models. But it speeds up the calculation process, allows you to build a fine mesh of finite elements and get more accurate results. The paper presents an algorithm for calculating the tension of the threaded connections of sucker rods, which can be applied to threaded connections of drill string elements with some adjustments. The only difference will be in the formula for determining the make-up moment, from which the value of the pre-tightening force and the areas of dangerous sections are derived. Also, in the work, a simulation study was carried out using the selected method using the example of a threaded connection of sucker rods with a diameter of 19 mm. A diagram of displacements and distribution of equivalent stresses in a threaded connection was obtained and the possibility of determining specific parameters at certain points of the model under study was shown with subsequent automated construction of their graphical dependencies.

Key words: simulation modeling, finite element method, make-up torque, tubing, sucker rod.

Вступ

Розробляючи обладнання, застосовують різноманітні комп'ютерні програми, що дають змогу мінімізувати час та матеріальні витрати, полегшити виконання необхідних робіт (розроблення технічної документації, проведення різноманітних розрахунків та досліджень елементів обладнання) тощо.

Широкого розповсюдження для виконання таких робіт набула програма SolidWorks з прикладним модулем Simulation, який дає змогу аналізувати міцність, жорсткість, стійкість та витривалість виробів широкого спектру складності та призначення. Математичним забезпеченням модуля Simulation є метод кінцевих елементів (МКЕ). До його переваг відносять високу точність розрахунку та наочність отриманих результатів. До недоліків – розрахункову трудомісткість або необхідність формування специфічної для цього методу розрахункової схеми конструкції, що відрізняється від загальноприйнятої в інженерній практиці.

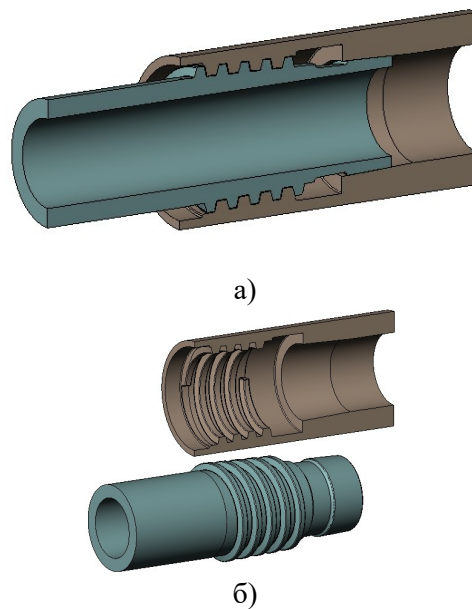
Для дослідження напружено-деформованого стану різьбових з'єднань (бурильних, насосно-компресорних труб, насосних штанг тощо) необхідно мати такі вихідні дані: геометрію моделі, властивості матеріалу, властивості скінченних елементів, граничні умови та провести необхідні налаштування програми.

Проте існують певні складнощі у процесі дослідження різьбових з'єднань, що пов'язані зі складністю розрахунку 3D моделей. Натомість є можливість дослідження цих з'єднань у осесиметричній постановці із певними спрощеннями. Це дає змогу пришвидшити процес розрахунку, не втрачаючи водночас точності отриманих результатів. Але виникає проблема

у заданні граничних умов, а саме – моменту згвинчування з'єднання.

Аналіз закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій

Застосування модуля Simulation під час дослідження 3D моделей різьбових з'єднань є досить зручним, проте має деякі обмеження. У літературі [1] наведено алгоритм дослідження різьбового з'єднання труб (рис. 1).



а) зібране з'єднання; б) елементи з'єднання
Рисунок 1 – Модель різьбового кінцевого з'єднання

У процесі аналізу реальних конструкцій момент згвинчування трактуємо як залежність між кутом (кількістю обертів) повороту труби відносно нерухомої муфти (або навпаки) та не-

обхідним для цього крутним моментом. Тобто кут є змінною, а момент – функцією реалізації повороту. Таким чином, отримуємо, що у системі діє тільки динамічне тертя. Ситуації, пов'язаних із необхідністю «докріплення» з'єднання, не розглядаємо.

Безпосередньо моделювання цього процесу в SolidWorks Simulation можна реалізувати завдяки нелінійній процедурі, у якій визначальним параметром (що залежить безпосередньо від умовного часу) буде кут повороту ніпеля, а функцією – реактивний момент в муфті у місці її фіксування.

Водночас можливі ускладнення алгоритму під час ідентифікації рівноважного стану системи і, що практично неминуче, проблеми алгоритму у процесі реалізації «великих» кутів повороту. Справа в тому, що Simulation не перебудовує сітку між кроками розрахунку. Тому зміщення, зіставні з розмірами декількох кінцевих елементів для граней, що обертаються одні відносно одних, вочевидно, не будуть змодельовані з достатньою точністю.

Виходячи із цих міркувань, можна використовувати більш трудомісткий, з огляду на складність обчислення, алгоритм, у якому визначальним фактором є крутний момент. Геометрична розрахункова модель спрощеного з'єднання показана на рис. 2.

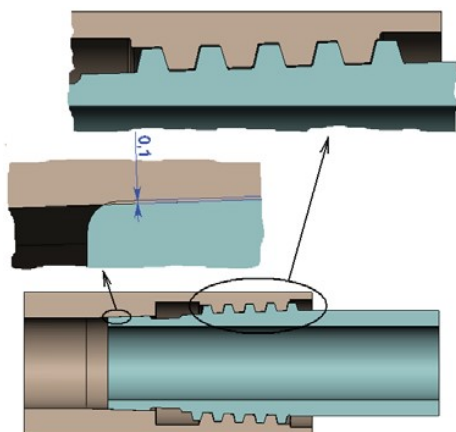


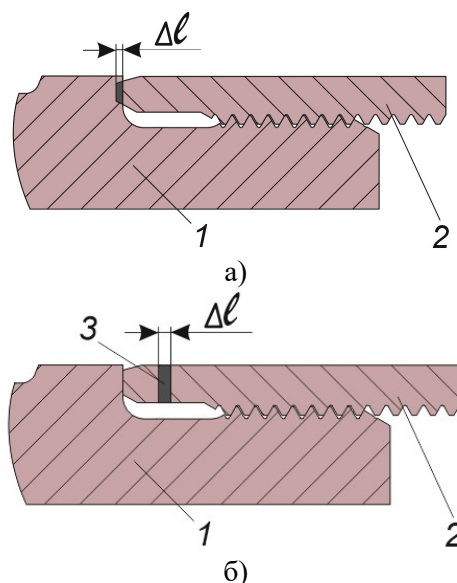
Рисунок 2 – Розрахункова геометрична модель з'єднання та її характерні фрагменти

Збірна модель різьбового з'єднання виконана як деталь, що складається із двох тіл. Це дало змогу з мінімальними зусиллями забезпечити спряження контактних поверхонь різьб. Як видно, взаємне положення ніпеля та муфти у моделі запобігає їх вільному поступальному зміщенню. Натяг у натурному з'єднанні спричинений дією крутного моменту, який прикладений до ніпеля з подальшим його поворотом, зміщенням вздовж осі та деформацією у цій

моделі реалізований через посадку з натягом (рис. 2). Цей алгоритм має побічний наслідок, який дозволяє нівелювати вплив «крайових» ефектів (зміни площадок контакту через поворот деталей), що впливають на характеристики з'єднання. Систематичною похибкою апроксимації у запропонованій моделі є те, що збільшення інтерференції досягається не завдяки осьовому зміщенню ніпеля, а через збільшення діаметру кінцевого кінця. Для цього можна використати команду SolidWorks «Переместить грань». За адекватної величини натягу супутня похибка може бути проігнорована.

У роботі [2] під час дослідження напружено-деформованого стану різьбових з'єднань насосних штанг використовуємо величина натягу Δl опорних торців ніпеля та муфти, як показано на рис. 3, а.

Також існує спосіб імітації моменту згвинчування з допомогою введення у конструкцію деталі з'єднання ділянки матеріалу з коефіцієнтом теплового розширення, відмінним від такого основного матеріалу елементів з'єднання, як показано на рис. 3, б.

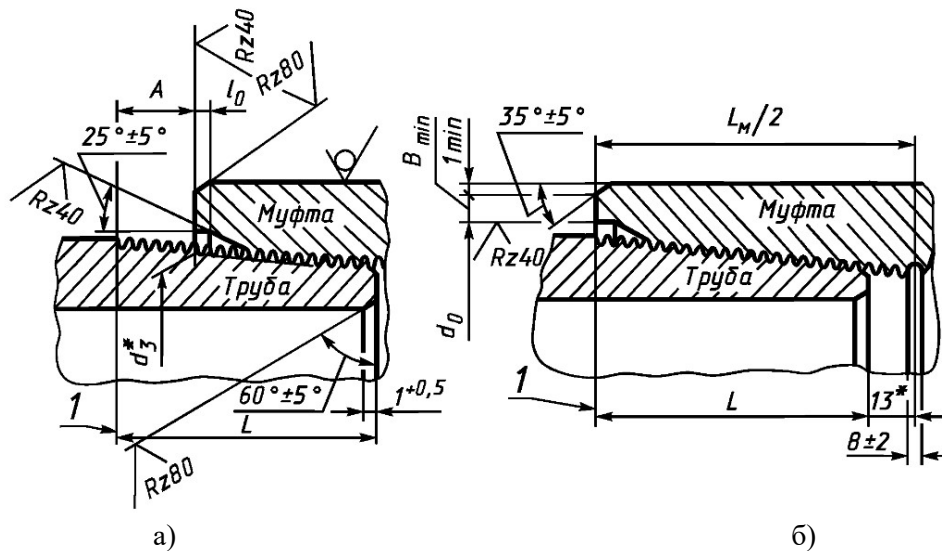


1 – ніпель; 2 – муфта; 3 – ділянка з матеріалом, коефіцієнт теплового розширення якого є відмінним від основного матеріалу елементів з'єднання

а) натяг Δl опорних торців ніпеля та муфти;
б) теплове розширення ділянки матеріалу

Рисунок 3 – Способи імітування моменту затягування при згвинчуванні

Отже, для імітування моменту згвинчування під час дослідження напружено-деформованого стану різьбових з'єднань можливі такі способи:



а) згвинчене вручну; б) згвинчене на верстаті
Рисунок 4 – З'єднання насосно-компресорних труб [3]

– прикладання до елементів замкового з'єднання моменту згвинчування, який повністю імітує реальні умови;

– введення в конструкцію з'єднання ділянки, тепловий коефіцієнт розширення матеріалу якої є значно більшим за основний матеріал елементів з'єднання;

– використання перекриття торців, наприклад, ніпеля та муфти.

Перший спосіб імітування моменту згвинчування застосовують тільки у випадку використання тримірних моделей, два наступні – як під час використання тримірної моделі, так і застосування осесиметричної моделі.

Варто зазначити, що використання тримірної моделі майже повністю імітує реальну конструкцію різьбового з'єднання, проте має ряд недоліків: тривалий час обчислення, трудомісткість вирішення оптимізаційних задач тощо. Тому, незважаючи на певні обмеження щодо застосування осесиметричних задач (неможливість прикладання згинаючого моменту), їх доцільно використовувати для моделювання різьбових з'єднань.

Мета роботи

Мета роботи полягає в аналізі способів імітування моменту затягування при згвинчуванні різьбових з'єднань під час їх розрахунку методом скінченних елементів під час розв'язання задач в осесиметричній постановці.

Викладення основного матеріалу

Спосіб імітації моменту згвинчування під час імітаційного моделювання залежить від конструктивних особливостей різьбових

з'єднань. Наприклад, для імітації моменту згвинчування насосно-компресорних труб величину натягу різьби ніпеля та муфти можна встановити згідно з ГОСТ [3]. Розглянемо детальніше цей алгоритм. Перед імітаційним дослідженням проводимо побудову різьби ніпеля та муфти згідно з ГОСТом. Потім різьби з'єднуємо, як показано на рис. 4, а. Контрольним розміром буде розмір А. Далі у процесі зміщення у осьовому напрямку ескізу муфти (на величину А) (рис. 4, б) має відбутися зміщення ескізу її різьби у радіальному напрямку. У результаті ця величина зміщення і буде імітувати момент згвинчування різьби НКТ.

Складнішим є імітація моменту згвинчування різьбових з'єднань насосних штанг. Тут необхідно провести попередні розрахунки, що дадуть змогу визначити необхідну величину натягу.

Зазвичай для визначення моменту затягування різьбових з'єднань насосних штанг використовують формулу 1 [4].

$$M_d = \frac{F_v}{2} \left(\frac{P}{\pi} + \frac{D_2 \cdot \mu''}{\cos \alpha} + D_A \cdot \mu_A \right), \quad (1)$$

де M_d – момент згвинчування різьби штанги;

F_v – сила попереднього затягнення;

P – крок різьби;

D_2 – середній діаметр різьби;

μ'' – коефіцієнт тертя бокових поверхонь витків різьби;

α – половина кута профілю різьби;

D_A – середній діаметр контактної поверхні торців муфта – ніпель;

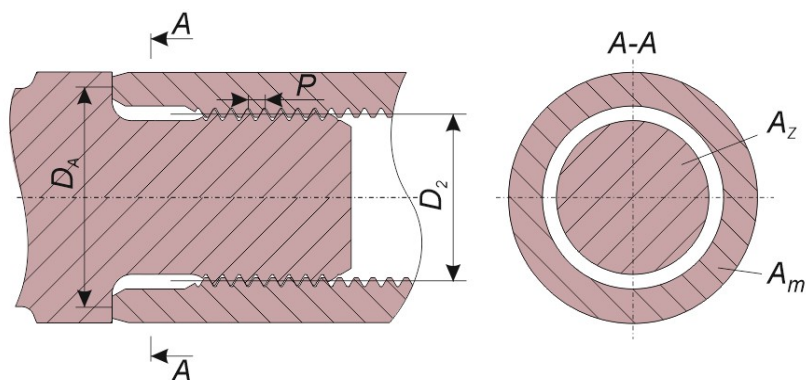


Рисунок 5 – Розрахункова схема різьби насосної штанги

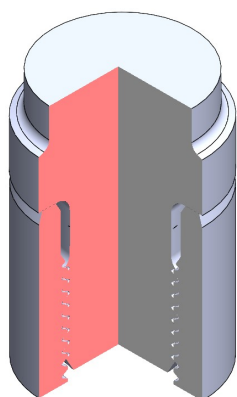


Рисунок 6 – Спрощена тримірна модель з'єднання

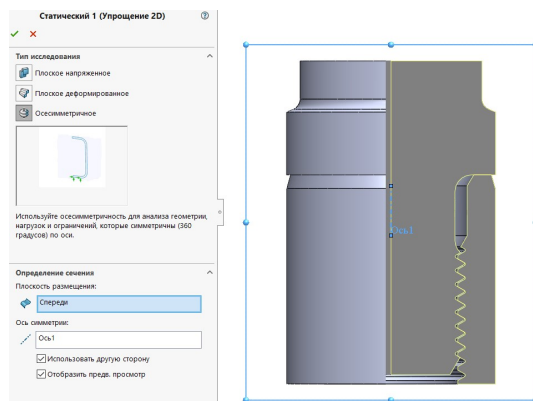


Рисунок 7 – Вікно модуля Simulation (вибирається осесиметричний тип дослідження)

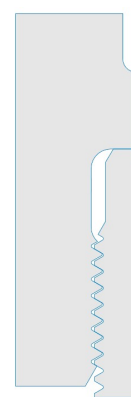


Рисунок 8 – Двомірна осесиметрична модель різьбового з'єднання

μ_A – коефіцієнт тертя опорної поверхні муфта – ніпель;

A_z – площа задньої проточки ніпеля (зарізьбової канавки).

З цієї формули (за умови відомого значення моменту згвинчування та параметрів різьби) силу попереднього затягнення (зусилля на торці ніпеля чи муфти) можна визначити як:

$$F_v = \frac{2M_d}{\left(\frac{P}{\pi} + \frac{D_2 \cdot \mu''}{\cos \alpha} + D_A \cdot \mu_A \right)} \quad (2)$$

У процесі згвинчування такого різьбового з'єднання відбувається як видовження ніпеля, так і скорочення муфти від попереднього затягнення. Тому їх можемо визначити за формулами:

– видовження l_z ніпеля від попереднього затягнення

$$l_z = \frac{F_v \cdot \delta_z}{A_z \cdot E},$$

де δ_z – довжина розтягнутої частини ніпеля;

– скорочення l_M муфти від попереднього затягнення

$$l_M = \frac{F_v \cdot \delta_M}{A_m \cdot E},$$

де δ_M – довжина стисненої частини муфти.

Розглянутий алгоритм може бути застосований і до різьбових з'єднань елементів буринь колон з деякими коректуваннями. Відмінність полягатиме тільки у формулі визначення моменту згвинчування, з якої виводимо значення сили попереднього затягнення та площ небезпечних перерізів [5].

Розглянемо імітаційне дослідження на прикладі різьбового з'єднання насосних штанг діаметром 19 мм [6].

Для цього побудовано спрощену тримірну модель з'єднання (рис. 6). У ній різьба виконана у вигляді проточок, а не за спіраллю.

Далі виконано осесиметричну постановку дослідження у модулі Simulation (рис. 7). Двомірну осесиметричну модель різьбового з'єднання подано на рис. 8.

У процесі моделювання застосовано коефіцієнт тертя 0,15 між витками різьби та тип контакту «Нема проникнення». Між торцевими поверхнями ніпеля та муфти застосовано тип контакту «Гаряча посадка» з коефіцієнтом тер-

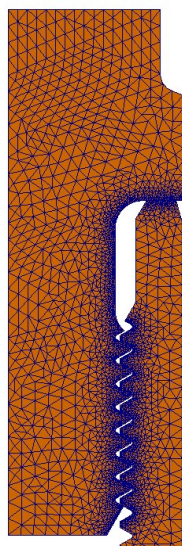


Рисунок 9 – Сітка кінцевих елементів

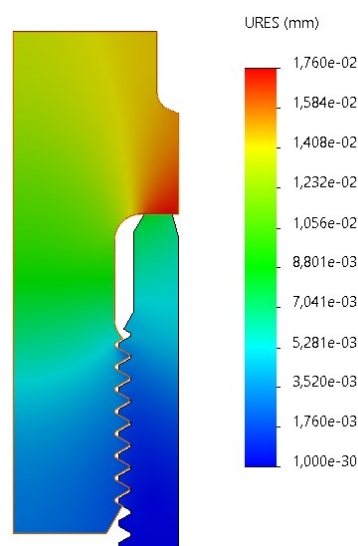
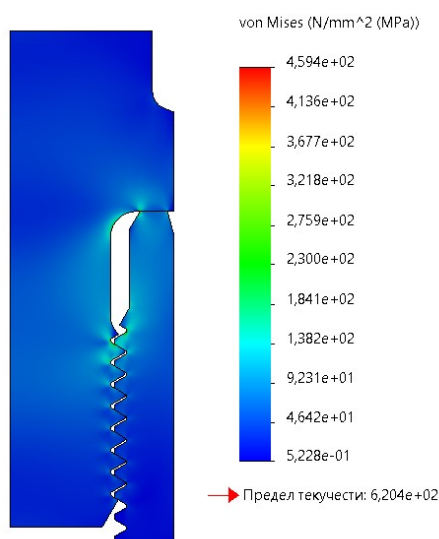
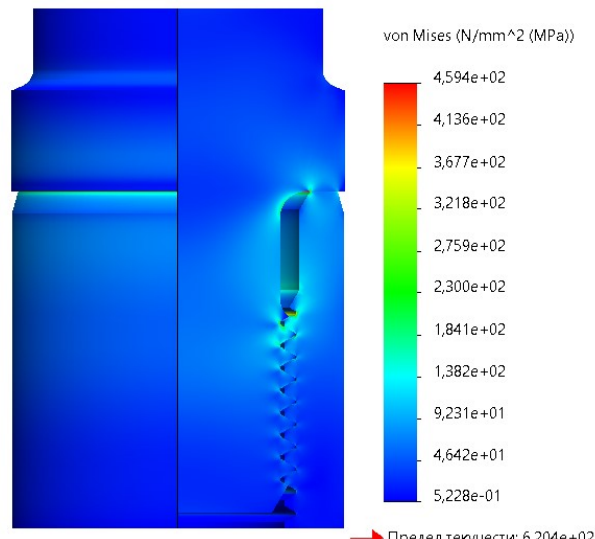


Рисунок 10 – Переміщення у різьбовому з'єднанні



а)



б)

а) осесиметрична модель; б) тримірна модель

Рисунок 11 – Розподіл еквівалентних напружень у різьбовому з'єднанні

тя також 0,15. Варто зауважити, що тип контакту «Гаряча посадка» може бути застосовано тільки за умови інтерференції деталей. У нашому випадку має бути створено попереднє перекриття торців ніпеля та муфти, як показано на рис. 3, а.

Сітку кінцевих елементів з'єднання насосних штанг показано на рис. 9. Її особливістю є те, що під час створення застосовано елемент «Керування мережею», який дав змогу зробити її дрібнішою у зоні контакту як витків різьби, так і опорних торців.

Отримані результати моделювання наведено на рис. 10 та 11. Особливістю виведення результатів є можливість їх подання тримірними (рис. 11, а).

Також у модулі Simulation є можливість визначення конкретних параметрів у певних точках досліджуваної моделі із наступною автоматизованою побудовою графічних залежностей (рис. 9).

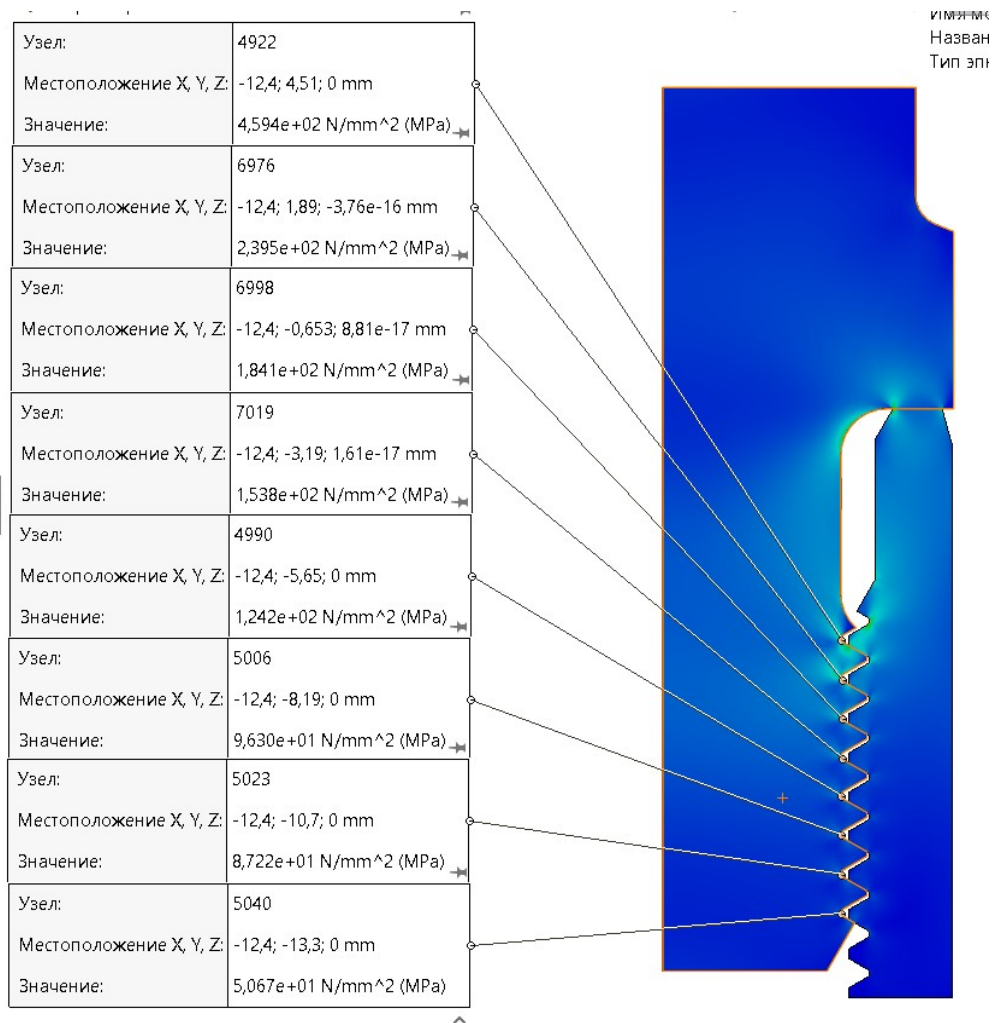


Рисунок 12 – Виведення значень величин еквівалентних напружень у певних місцях



Рисунок 13 – Графічні залежності розподілу еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля

Висновки

Розроблення нового та вдосконалення існуючого обладнання на стадії його розробки є досить важливим етапом, який вимагає об'єктивних підходів у процесі застосування імітаційного моделювання, яке іноді не повністю може відобразити реальні умови роботи обладнання.

Застосовувані задля цього спрощення розрахункових моделей мають враховувати всі навантаження. На прикладі показано імітаційне моделювання різьбового з'єднання насосних штанг у осесиметричній постановці, яка вимагає специфічного підходу до імітації моменту згвинчування – перекриттям торців ніпеля та муфти на попередньо визначену величину. Цю величину можна визначати за наведеними у статті формулами.

Використання осесиметричних моделей у процесі імітаційного моделювання не погіршує отриманих результатів порівняно із 3D моделями. Натомість пришвидшує процес розрахунку, дає змогу побудови дрібнішої сітки кінцевих елементів та отримання точніших результатів.

Осесиметричні моделі можна застосовувати для багатьох елементів, використовуваних у нафтогазовій галузі: посудин, що працюють під тиском, труб, свай, коліс, дисків, шестірень, шківів тощо.

Література

1. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М.: ДМК Пресс, 2015. 562 с.
2. Копей В. Б. Скінченно-елементний аналіз та оптимізація різьбових з'єднань. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування* : збірник наукових праць. 2010. № 58. С. 42–47.
3. ГОСТ 633-80 Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним
4. Фаерман И. Л. Штанги для глубинных насосов. Баку: Азнефтеиздат, 1955. 323 с.
5. API RP 7G-2 Recommended Practice for Inspection and Classification of Used Drill Stem Elements
6. ГОСТ 13877-96. Межгосударственный стандарт. Штанги насосные и муфты штанговые. Технические условия. К: Госстандарт Украины, 2002. 28 с.

References

1. Alyamovskiy A. A. SolidWorks Simulation. Inzhenernyi analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii. M.: DMC Press, 2015. 562 p. [in Russian]
2. Kopei V. B. Skinchenno-elementnyi analiz ta optymizatsiia rizbovykh ziednan. *Visnyk NTUU «KPI». Mashynobuduvannia*. 2010. No 58. P. 42–47. [in Ukrainian]
3. GOST 633-80 Trubyi nasosno-kompressornyie i muftyi k nim [in Russian]
4. Faerman I. L. Shtangi dlya glubinyih nasosov. Baku: Aznefteizdat, 1955. 323 p. [in Russian]
5. API RP 7G-2 Recommended Practice for Inspection and Classification of Used Drill Stem Elements
6. GOST 13877-96. Mezhhosudarstvennyi standart. Shtangi nasosnyie i muftyi shtangovyie. Tehnicheskie usloviya. K. Gocstandart Ukrainyi, 2002. 28 p. [in Russian]