

УДК 622.242.6

*Дорохов М.А., асистент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
Костриба І.В., к.т.н., професор,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і
газу*

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ УЩІЛЬНЕННЯ СВЕРДЛОВИННИХ ПАКЕРІВ

Розглянуто проблематику процесу випробування устьового та противикидного обладнання під час спорудження та підземного ремонту свердловин. Показана актуальність використання свердловинних пакерів для проведення зазначеного процесу. Описані існуючі конструкції пакерів для проведення випробування та їх недоліки. Зазначено переваги свердловинних пакерів на базі самоущільнюючих манжет. Виділено важливість вузла ущільнення пакера в розрізі герметизаційної здатності устьового випробувального пакера та якості проведення процесу випробування вцілому. Обґрунтовано необхідність проведення досліджень умових самоущільнюючих манжет. Виконано комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану самоущільнюючої манжети з врахуванням експлуатаційних факторів.

***Ключові слова:** устьовий випробувальний пакер, самоущільнююча манжета; комп'ютерне моделювання, напружено-деформований стан.*

Постановка проблеми. В нафтових і газових свердловинах під час здійснення різних технологічних і ремонтних процесів: експлуатації свердловин, гідравлічного розриву пласта, термічної або кислотної обробки привибійної зони свердловини, нагнітання в продуктивний пласт води для підтримання пластового тиску, випробування устьового та противикидного обладнання, діагностування експлуатаційної колони широко використовуються свердловинні пакери, які виконують функцію герметичного розділення ствола свердловини на два інтервали – підпакерний і надпакерний [1].

Існує ряд конструкцій пакерів для випробування устьового та противикидного обладнання [2]. Високим вимогам проведення зазначеного технологічного процесу відповідають устьові випробувальні пакери манжетного типу, які належать до самоущільнювальних і спрацьовують під дією надлишкового тиску в свердловині. Їх характерна особливість – простота конструкції в порівнянні з іншими типами пакерів, а також одностороннє сприйняття тиску. На рисунку 1 представлена конструкція випробувального пакера ПВ 168x50, розробленого авторами даної роботи

[3]. Основним елементом конструкції випробувального пакера є його вузол ущільнення. Від цього конструктивного елементу залежить герметичність розділення ствола свердловини, а, отже, і якість всього процесу випробування устьового та противикидного обладнання.

Особливе місце займають пакери при випробуванні устьового та противикидного обладнання під час спорудження або підземного ремонту свердловини. Випробування устьового та противикидного обладнання є важливим етапом підготовчих робіт перед спорудженням або ремонтом свердловини, від якості виконання якого залежить фонтанна безпека всього циклу спорудження або підземного ремонту свердловини.

Зважаючи на важливість вузла ущільнення в системі роботи всього пакера, особливе місце займає етап розроблення його раціональної конструкції. На даний час практично відсутня науково-методична база для проектування самоущільнювальних манжет. Окремі рекомендації не дають можливості реалізувати системний принцип проектування, не враховують ряд чинників, що мають місце при експлуатації пакерів.

Складність розрахунку та проектування оптимальної конструкції манжети пов'язана, насамперед, з особливостями механічної поведінки матеріалу, що представлений в більшості випадків гумою, при навантаженнях, а саме: нелінійною залежністю напруження від деформації, що не дає змогу використати закони класичної теорії пружності; зміною геометричної форми манжети при навантаженнях, що є наслідком еластичності гуми; витискання гуми у вільні просторові зони і, як наслідок, виникнення складного неоднорідного напружено-деформованого поля в матеріалі манжети тощо.

Зважаючи на викладене, виникає ряд нерозв'язаних науково-технічних задач, для вирішення яких необхідні додаткові дослідження.

Аналіз досліджень і публікацій. Сьогодні опубліковано ряд наукових праць присвячених дослідженню герметизаційної здатності пакерів на базі циліндричних манжет [4, 5]. Але принцип роботи ущільнень цього типу пакерів, який полягає у прикладанні додаткового зовнішнього зусилля осевого спрямування для розпакерування, накладає відповідні обмеження на використання виведених аналітичних

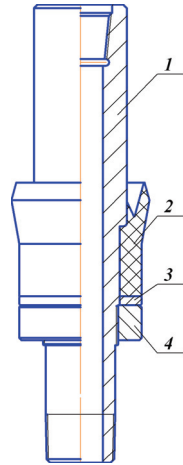


Рисунок 1 – Випробувальний пакер манжетного типу:

- 1 – ствол пакера;
- 2 – самоущільнююча манжета;
- 3 – опорне кільце;
- 4 – гайка.

залежностей при розробленні саме самоущільнючих манжет устьових випробувальних пакерів.

Окремі праці [6,7] присвячені аналізу практичного застосування пакерів самоущільнюючого типу для випробування устьового та противикидного обладнання. По суті це несистематизовані емпіричні дані, причому їх кількість і параметричний діапазон замалий для узагальнень, що не дає підстав використовувати їх при системному підході до проектування самоущільнюючих манжет для випробувальних пакерів. Крім того, дані роботи не враховують вплив на герметизаційну здатність низки значимих факторів.

Мета статті – дослідити герметизаційну здатність вузлів ущільнення самоущільнюючих пакерів, зокрема, дослідження напружено-деформованого стану манжети вузла ущільнення. Це дозволить систематизувати дослідно-конструкторські роботи манжет самоущільнюючого типу, сформувані наукові підходи цих досліджень.

Виклад матеріалу і результати. Пріоритетним напрямком є експериментальні дослідження на натурних зразках манжет устьових випробувальних пакерів в умовах наближених до реальних.

Зважаючи на достатню високу вартість експериментальних досліджень з врахуванням всіх факторів та можливих технічних та конструктивних параметрів манжети було обрано альтернативні методи дослідженням – аналітичний та чисельний методи.

Для більш складних конструкцій і граничних умов використовуються численні (комп'ютерні) методи вирішення задач, які дозволяють з достатньою для інженерних задач точністю описати нелінійні геометричні форми та способи прикладення зовнішнього навантаження.

Одним із методів, який успішно застосовується для комп'ютерного моделювання об'єктів з напружено-деформованим станом є метод скінченних елементів. Метод заснований на заміні досліджуваної області довільної форми скінченними елементами простішої конфігурації з відомими властивостями, які зв'язані між собою у вузлах. За відомими значеннями області на границях моделі (граничні умови) знаходять параметри в будь-якій внутрішній точці. Сьогодні даний метод є найбільш розповсюдженим для рішення подібного класу задач внаслідок універсальності підходу.

Метод скінченних елементів, зокрема, дозволяє вирішуються задачі знаходження деформацій та напруження моделей з різними геометричними розмірами та властивостями матеріалів, контактних взаємодій різнорідних тіл в залежності від прикладених навантажень та умов взаємодії з оточуючими тілами.

Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану самоущільнюваної манжети пакера проводилося в наступній послідовності:

– побудова геометричної моделі вузла ущільнення;

- вибір моделі поведінки матеріалу ущільнення;
- розбиття манжети на скінченні елементи;
- визначення граничних умов та навантажень, які діють в процесі експлуатації устьового випробувального пакера;
- проведення досліджень з отриманням відповідних епюр напружено-деформованого стану.

В розрізі перших і найбільш відповідальних етапів, для правильної побудови скінченно-елементної моделі є вибір моделі поведінки матеріалу ущільнення. Тобто, необхідно визначити характер деформування і ряд фізичних параметрів, які притаманні наявній моделі. Фізичні характеристики та залежність між деформацією та напруженням гуми детермінуються гіперпружними моделями.

Для дослідження напружено-деформованого стану манжети було обрано модель Муні-Рівліна, яка використовується для опису поведінки малостисної гуми при її розтязі та стиску і базується на визначенні характеристик поля щільності енергії деформації. При цьому варіативна частина включає до дев'яти параметрів у вигляді комбінацій інваріантів тензора деформацій, значення яких були визначені експериментальним шляхом [9].

Після побудови геометричної моделі було створено сітку скінченних елементів (рис. 2, а) та задані відповідні граничні умови по кінематиці елементів вузла ущільнення в процесі дії на останні випробувального тиску (рис. 2, б).

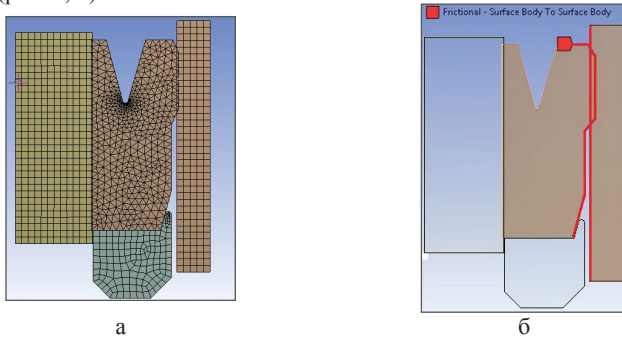


Рисунок 2 – Підготовчі етапи скінченно-елементного моделювання:

а – створення сітки скінченних елементів; б – задання граничних умов

Задачею моделювання було отримання максимальних еквівалентних напружень (за Мізесом) та аналіз їх розподілу по тілу манжети під дією навантаження. Знання розподілу максимальних еквівалентних напружень є дуже важливим з точки зору дослідження екструзії матеріалу манжети в процесі випробування устьового обладнання в радіальний зазор між опором манжети та внутрішньою стінкою обсадної колони.

Практичний досвід показує, що така екструзія є причиною руйнування опорної частини манжети та розгерметизації пакера в процесі експлуатації. Моделювання проводилося з врахуванням найбільш значимих факторів впливу: модуля зсуву матеріалу (визначений експериментальним шляхом), величини випробувального тиску, величини радіального зазору між упором вузла ущільнення та внутрішньою стінкою обсадної колони, та натягом манжети.

На рис. 3 представлені проміжні результати моделювання напружено-деформованого стану манжети із зазначенням відповідних обмежень.

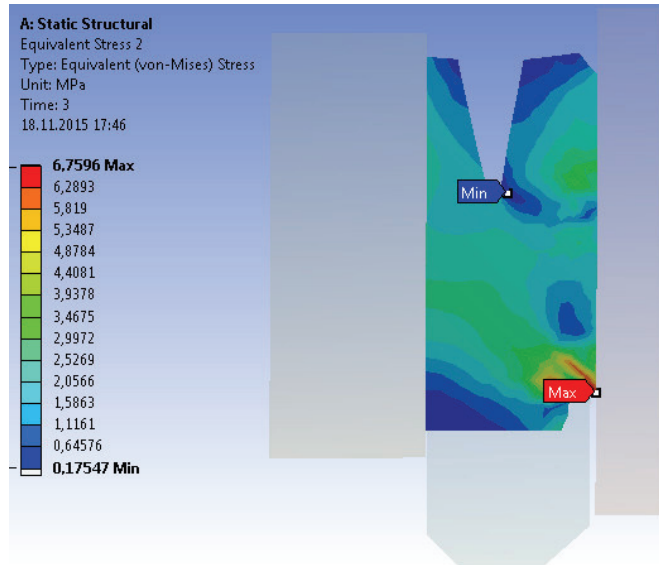


Рисунок 3 – Розподіл еквівалентних напружень (за Мізесом) при наступних умовах: $\Delta=2$ мм, $\delta=1$ мм, $\sigma_{zc}=2,47$ МПа, $P=30$ МПа

Результатом проведення досліджень стали відповідні графічні залежності, що описують напружено-деформований стан манжети пакера (рис. 4). Зокрема, встановлено, що при певному значенні діаметрального натягу $\Delta \geq 4$ мм максимальні еквівалентні напруження стабілізуються на рівні 4,25 МПа.

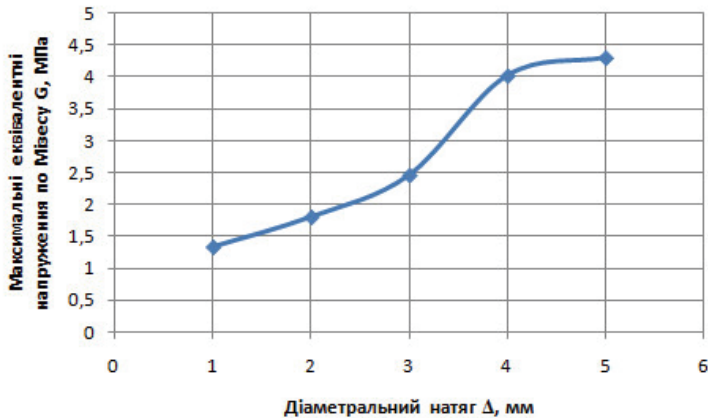


Рисунок 4 – Залежність максимальних еквівалентних напружень G від величини натягу Δ самоущільнюючої манжети.

Отримані модельні залежності були співставлені з результатами експериментальних досліджень. Розбіжність між результатами комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження склала 8 %. Цей факт дає підставу стверджувати, що чисельне моделювання є ефективним інструментом дослідження та створення раціональної конструкції вузлів ущільнень свердловинних випробувальних пакерів.

Висновки. Проведене комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану самоущільнюючої манжети устьового випробувального пакера дало можливість зробити наступні висновки:

- 1) Найбільш небезпечною зоною концентрації напружень є нижня зона опорної частини манжети, що межує з радіальним зазором.
- 2) Максимальні еквівалентні напруження при радіальному зазорі в 4 мм і вище стабілізуються на рівні 4,25 МПа.
- 3) Суттєве значення має величина кута нахилу опорної частини манжети в місці контакту з упором пакера.
- 4) При зменшенні модуля зсуву матеріалу зростає еластичність матеріалу, але збільшується величина екструзії матеріалу в зазор. Моделювання показало, що раціональним модулем зсуву можна вважати значення $\sigma_{zc}=2,47$ МПа.
- 5) Суттєве значення на розподіл напружень має величина натягу манжети. Раціональним натягом за умов мінімально необхідних значень контактних тисків прийнято діапазон 3 – 4 мм.

Одержані результати моделювання можуть бути використані при визначенні раціональної конструкції і вдосконаленні устьового випробувального пакера.

Література

1. Костриба, І.В. Аналіз сучасного стану проектування свердловинних пакерів в Україні [Текст] / І.В. Костриба, М.А. Дорохов, А.М. Шульга // *Питання розвитку газової промисловості України*. – 2012. – Випуск XL – С. 156–156.
2. Фик І.М. Облаштування газових та нафтових свердловин при експлуатації. Частина перша. Колонні обв'язки [Текст] / І.М. Фик, Д.В. Римчук. – Харків.: ТО Ексклюзив, 2014. – 299 с.
3. Костриба, І.В. Розроблення та дослідження пакерів для випробування противикидного обладнання [Текст] / І.В. Костриба, М.А. Дорохов // *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика 2013», 7-11 жовтня 2013 р. : Тези доповідей*. – Івано-Франківськ. – 2013. – С. 54-56.
4. Яковлев, А. С. Исследование работы манжетных уплотнителей пакеров в режиме саомуплотнения [Текст] / А.С. Яковлев, С.С. Яковлев // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2006. – № 9 С.44 – 46.
5. Литвинов, А.В. Повышение работоспособности уплотнительного элемента пакера [Текст] // Литвинов А.В. // *Нефтепромышленное дело*. – 2007. – № 3. – С. 41-45.
6. Ледяшов, О.А. Пакеры для опрессовки устья скважин типа ПОУ [Текст] / О.А. Ледяшов, В.Г. Никитченко, Е.Н. Штахов // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2008. – № 1 С.25 – 27.
7. Римчук, Д.В. Нові технічні засоби ДП «ЛКВО» для забезпечення фонтанної та газової безпеки під час буріння та капітального ремонту свердловин [Текст] // *Нафтогазова галузь України*. – 2015. – № 6 С.37 – 40.
8. Дорохов, М.А. Дослідження механічних властивостей гумових ущільнень свердловинних пакерів [Текст] / М.А. Дорохов // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. – 2014. – 2(37) – С. 27–31.
9. Дорохов, М.А. Чисельний метод у дослідженні вузлів ущільнень випробувальних свердловинних пакерів [Текст] / М.А. Дорохов // *Матеріали 68-ої наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, 19 – 22 квітня 2016 р. : Тези доповідей*. – Полтава. – 2016. – С. 54-57.

*Dorokhov M., assistant
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University
Kostryba I.V., Ph. D. (Tech.), Professor,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

COMPUTER MODELING OF STRESS-STRAIN STATE SEALS WELL PACKER

We consider the problems of the process of testing the well's wellhead and BOP in the construction and repair of underground wells. Illuminated the urgency of using well packers to conduct this process. Identify existing designs of packers for the test and their shortcomings. These advantages of well packers based on self-sealing assembly. It highlights the importance of the packer's seal assembly in the context sealing ability of the wellhead packer testing and quality of the testing process as a whole. The necessity of basic research self-sealing rubber cuffs. When covering the steps and the results of computer modeling of stress-strain state self-sealing cuff based on operational factors.

Keywords: *wellhead packer test, self sealing cuff, computer modeling, stress-strain state*

*Дорохов М.А., асистент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія
Кондратюка
Костриба І.В., к.т.н., професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти
і газу*

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИИ УПЛОТНЕНИЯ СКВАЖЕННЫХ ПАКЕРОВ

Рассмотрена проблематика процесса испытания устьевого и противовыбросового оборудования при сооружении и подземном ремонте скважин. Показана актуальность использования скважинных пакеров для проведения указанного процесса. Описаны существующие конструкции пакеров для проведения испытания и их недостатки. Указано преимущества скважинных пакеров на базе самоуплотнительной манжеты. Выделено важность узла уплотнения пакера в разрезе герметизационной способности устьевого испытательного пакера и качества проведения процесса испытания в целом. Обоснована необходимость проведения фундаментальных исследований резиновых самоуплотнительных манжет. Выполнено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния самоуплотнительной манжеты с учетом эксплуатационных факторов.

Ключевые слова: *устьевой испытательный пакер, самоуплотнительная манжета, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние.*