

ІНФОРМАЦІЙНІ ПРОГРАМИ ТА КОМП'ЮТЕРНО- ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 622.245.73

DOI: 10.31471/1993-9965-2021-1(50)-53-61

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ УЩІЛЬНЮВАЧІВ УНІВЕРСАЛЬНИХ ПРЕВЕНТОРІВ

В. В. Михайлюк, І. І. Чудик, Ю. Р. Мосора

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. +38 095 8601575,
e-mail: yuramosora@gmail.com*

Керування свердловинами в процесі їх спорудження є одним з важливих чинників забезпечення безпеки технологічного процесу. Для керування свердловинами застосовують противикидне обладнання, до складу якого входять універсальні превентори. Це стосується нафтових та газових свердловин, а також свердловин, що забезпечують дегазацію вугільних пластів для зменшення їх газодинамічної активності. Технологічні процеси безпечного ведення робіт вимагають розширення функціональних можливостей вузла ущільнення універсального превентора з одночасним забезпеченням його високих експлуатаційних характеристик. Одним з визначальних факторів для забезпечення необхідної довговічності ущільнювачів за різноманітних режимів експлуатації є дослідження їхнього напружено-деформованого стану. В даній роботі розглянуто можливість використання імітаційного тривимірного моделювання для дослідження впливу геометрії армуючих металевих вставок ущільнювача на його напружено-деформований стан в цілому. З цією метою запропоновано спосіб визначення та визначено константи матеріалу для реалізації моделі Муні-Рівліна, якою описується поведінка малостискувальної гуми в програмних продуктах на базі методу кінцевих елементів. Встановлено, що дві константи матеріалу можна застосовувати для імітаційного моделювання ущільнювача універсального превентора з деформаціями, які не перевищують 150%. Для моделювання ущільнювача з більшими деформаціями (до 600 %) необхідно визначити більше констант. Достовірність отриманих результатів проведених досліджень моделей характеризується сукупною похибкою експериментальних і теоретичних досліджень до 5 %. Таким чином, створено передумови та підтверджено можливість використання імітаційного моделювання для дослідження та проєктування елементів універсальних превенторів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: імітаційне моделювання, напружено-деформований стан, універсальний (кільцевий) превентор, ущільнювач.

Управление скважинами в процессе их сооружения является одним из важных факторов обеспечения безопасности технологического процесса. Для управления скважинами применяется противовибросовое оборудование, в состав которого входят универсальные превенторы. Это касается нефтяных и газовых скважин, а также скважин, обеспечивающих дегазацию угольных пластов для уменьшения их газодинамической активности. Технологические процессы безопасного ведения работ требуют расширения функциональных возможностей узла уплотнения универсального превентора с одновременным обеспечением его высоких эксплуатационных характеристик. Одним из определяющих факторов для обеспечения необходимой долговечности уплотнителей при различных режимах эксплуатации является исследование их напружено-деформованного состояния. В данной работе рассмотрена возможность использования имитационного трёхмерного моделирования при исследовании влияния геометрии армирующих металлических

вставок уплотнителя на его напряженно-деформированное состояние в целом. С этой целью предложен способ определения и установлены константы материала для реализации модели Муни-Ривлина, которой описывается поведение малосдавливаемой резины в программных продуктах на базе метода конечных элементов. Установлено, что две константы материала можно применять для имитационного моделирования уплотнителя универсального превентора с деформациями, не превышающими 150%. Для моделирования уплотнителя с большими деформациями (до 600%) необходимо определить больше констант. Достоверность полученных результатов проведённых исследований моделей характеризуется совокупной погрешностью экспериментальных и теоретических исследований до 5%. Таким образом, созданы предпосылки и подтверждена возможность использования имитационного моделирования при исследовании и проектировании элементов универсальных превенторов с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: имитационное моделирование, напряжённо-деформированное состояние, универсальный (кольцевой) превентор, уплотнитель.

Well control in the process of their construction is one of the important factors in ensuring the safety of the technological process. Blowout preventer equipment, which includes annular preventers, is used to control the wells. This applies to oil and gas wells, and wells that provide degassing of coal seams to reduce their gas-dynamic activity. Technological processes of safe work require the expansion of the functionality of the sealing unit of the annular preventer while ensuring its high performance. One of the determining factors to ensure the required durability of seals in different modes of operation is the study of their stress-strain state. In this paper, the possibility of using simulation three-dimensional modeling in the study of the influence of the geometry of the reinforcing metal inserts of the seal on its stress-strain state as a whole is considered. To this end, a method for determining and determining the material constants for the implementation of the Mooney-Rivlin model, which describes the behavior of low-compressibility rubber in software products based on the finite element method. It is established that two material constants can be used for simulation modeling of an annular preventer seal with deformations not exceeding 150%. More constants must be determined to model a sealant with larger deformations (up to 600%). The reliability of the obtained results of the model studies is characterized by a total error of experimental and theoretical studies of up to 5%. Thus, the prerequisites are created and the possibility of using simulation modeling in the study and design of elements of universal preventers with high performance is confirmed.

Keywords: simulation modeling, stress-strain state, universal (ring) preventer, seal.

Вступ

Одним з основних елементів контролю над свердловинами в процесі їх спорудження є противикидне обладнання, до складу якого входять універсальні превентори. Це стосується і свердловин, що забезпечують дегазацію вугільних пластів для зменшення їхньої газодинамічної активності. Сучасні технології ведення робіт вимагають розширення функціональних можливостей вузла ущільнення превентора з одночасним забезпеченням його експлуатаційних характеристик.

Зважаючи на те, що ущільнювач працює у закритому корпусі і доступу в процесі експлуатації до нього немає, актуальними є питання контролю технічного стану ущільнювача в процесі експлуатації превентора, прогнозування його ресурсу, розроблення відповідних критеріїв оцінки технічного стану.

Аналіз закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій

На даний час відомі окремі теоретичні та експериментальні дослідження, що стосуються проектування та експлуатації універсальних превенторів. У роботі [1] представлено науково-методичні основи аналізу та оцінки працездатності і довговічності герметизуючих еле-

ментів плашкових і кільцевих превенторів за результатами експлуатаційних випробувань противикидного обладнання з урахуванням якісних показників матеріалу герметизуючих елементів. Запропонований комплексний підхід дозволяє застосувати розрахункові методи як для оцінки ситуації, так і для вибору заходів щодо попередження та ліквідації ускладнень, пов'язаних з газонафтопроявами.

Однак результатів цих досліджень недостатньо для реалізації системного підходу до розроблення та освоєння надійних конструкцій універсальних превенторів загалом та їхнього вузла ущільнення зокрема [2]. Насамперед, не існує науково-обґрунтованої методики розрахунку геометричних та силових параметрів вузла універсального превентора та ущільнювача, яка б забезпечила герметизаційну здатність превенторів усіх передбачених стандартом типорозмірів. Не вивчено також і вплив геометрії арматури ущільнювача на напружено-деформований стан гуми ущільнювача.

Для вирішення багатьох завдань, які постають перед дослідниками та інженерами і не піддаються аналітичному вирішенню або потребують значних витрат часу, можливістю прискореного аналізу інженерної проблеми є імітаційне моделювання [3-5]. Прогрес у розро-

бці числових методів дає можливість істотно розширити спектр питань, які доступні аналізу. Отримані на основі цих методів результати використовуються практично у всіх галузях науки й техніки. На особливу увагу заслуговує, зокрема, метод кінцевих елементів.

Так, для універсальних (кільцевих) превенторів з використанням методу кінцевих елементів запропоновано спосіб проєктування ущільнення та його виготовлення [6]. Ущільнення включає вставку з жорсткого матеріалу, розташовану в еластомерному тілі.

Також задекларовано спосіб виготовлення, сертифікації та оптимізації ущільнення для превенторів. Метод поєднує генерування моделі ущільнення методом скінченних елементів, згладжування моделі ущільнення та аналіз її деформованої ділянки з урахуванням умов переміщення [7].

У [8] шляхом імітаційного моделювання досліджено напружено-деформований стан гумового ущільнення пакера манжетного типу. Такі пакери належать до самоущільнювальних, їх використовують для перевірки герметизаційної здатності нафтових і газових свердловин і вони спрацьовують під дією тиску в свердловині. Для вирішення задачі в програмному комплексі «МІРЕЛА+» використовують просторово-часовий кінцевий елемент. В результаті досліджень одержані розподіли величин переміщень, деформацій і напружень гумового елемента з урахуванням в'язкопружного деформування. Також визначено величину осадки манжети залежно від навантаження з урахуванням реологічних характеристик матеріалу

Колективом тих самих авторів у [9] запропоновано кінцево-елементний підхід до розв'язання тривимірної задачі дослідження напружено-деформованого стану гумових ущільнень пакерів манжетного типу. Підхід полягає у послідовному розв'язанні низки лінійних задач із перерахуванням на кожному кроці матриці жорсткості всієї конструкції. Наведено приклад чисельного розв'язання задачі про деформування еластомерної манжети у тривимірній постановці. У результаті розв'язання отримано компоненти напружено-деформованого стану гумового ущільнення пакера манжетного типу з урахуванням великих деформацій, що виникають у процесі перевірки герметизаційної здатності нафтових і газових свердловин.

Широке використання методу скінченних елементів є підтвердженням його досконалості, зокрема як методу дослідження поведінки конструкцій під навантаженням. Основною умовою одержання правильних і точних ре-

зультатів є коректний вибір моделі поведінки матеріалу конструкції, тобто фізичної моделі деформування і визначальних для нього фізичних параметрів.

Для забезпечення високої достовірності результатів імітаційного моделювання при дослідженні напружено-деформованого стану ущільнювачів та їх оптимізації необхідним є детальне експериментальне вивчення особливостей цього процесу та порівняння отриманих результатів із результатами відповідного імітаційного моделювання. Їх співпадіння створить можливість дослідження шляхом згаданого вже імітаційного моделювання.

Мета роботи

Мета роботи полягає в оцінці можливості використання імітаційного моделювання для дослідження напружено-деформованого стану ущільнювачів під час проєктування елементів універсальних превенторів.

Викладення основного матеріалу

На сьогодні створено багато програмних продуктів, що ґрунтуються на методі скінченних елементів. Відповідно до призначення і сфери застосування в них закладають різні типи скінченних елементів і моделі поведінки матеріалів. Тому першим і дуже відповідальним етапом для правильної побудови скінченно-елементної моделі є вибір моделі поведінки матеріалу. Водночас необхідно визначити ряд фізичних властивостей, що відповідають обраній моделі.

Фізичні характеристики та залежність між деформацією і напруженням матеріалів, з яких виготовляють ущільнювальні елементи, задають гіперпружними моделями. Поведінка гуми під час деформування нагадує в'язку рідину. При цьому вона є практично нестисливим матеріалом. Діаграма розтягування має нелінійний характер і зазвичай одну або дві точки перегину (рис. 1).

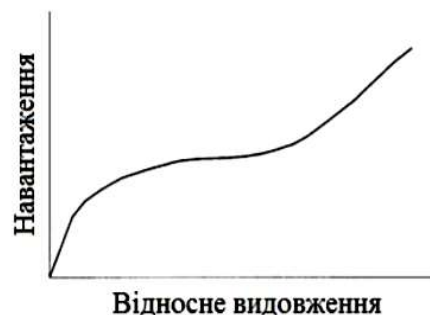


Рисунок 1 – Характер залежності «навантаження – відносне видовження» для гіперпружних матеріалів

Для моделювання та розрахунку методом скінченних елементів гумоподібних і деяких інших полімерних матеріалів існує кілька моделей поведінки матеріалів: Муні-Рівліна, Артура-Бойса і Блатц-Ко. Модель Муні-Рівліна (Mooney-Rivlin) [10,11] використовують для опису поведінки малостисливої гуми за розтягування-стискування і базується на залежності для функції густини енергії деформацій. Вона враховує до дев'яти параметрів у вигляді комбінації інваріантів тензора деформацій. Значення цих констант зазвичай визначають під час аналітичного опису експериментальних даних. У сучасних програмних продуктах є можливим обчислення потрібних параметрів шляхом обробки експериментальних даних і отримання графічної інтерпретації вихідної інформації.

Оскільки ущільнювальний вузол превентора зазвичай виготовлений з малостисливої гуми, то для представлення поведінки такого матеріалу скористаємось саме моделлю Муні-Рівліна. Моделі Муні-Рівліна існують з 2, 5 і 9 параметрами (константами). Ці параметри є константами, що характеризують властивості матеріалу і їх визначають із залежностей «напруження – деформація» за різних умов. Для визначення констант, необхідних для складання рівняння зміни енергії, необхідно експериментальним шляхом встановити залежність «навантаження – відносне видовження». Для цього необхідним є проведення ряду експериментальних досліджень із спеціально виготовленими зразками. Крім того, як уже зазначалось вище, для забезпечення високої достовірності результатів імітаційного моделювання ущільнювальних елементів необхідним є їх узгодження із результатами експерименту. З метою зменшення затрат на виконання експериментальних досліджень у нашому випадку поєднано етапи дослідження властивостей матеріалу і перевірки результатів імітаційного моделювання. Для цього попередньо проведено експериментальні дослідження спеціально виготовлених моделей, що враховують особливості конструкції ущільнювача універсального превентора. Визначення необхідних для реалізації моделі Муні-Рівліна двох констант і подальшого їх застосування під час проектування і дослідження ущільнень превентора здійснено з використанням імітаційного моделювання.

Дослідження проводили на гумово-металевих моделях, виконаних у вигляді сектора (рис. 2). Порівняно з натурними зразками досліджувана модель є дещо спрощеною. В той же час вона відповідає вимогам максимального наближення до реального процесу навантажу-

вання ущільнювача у місцях найбільш ймовірного руйнування. Розміри моделі визначалися з умови геометричного моделювання (М 1:2) основних параметрів ущільнювача превентора ПУ1 350 x 35. У спеціально розробленій прес-формі шляхом вулканізації отримано декілька моделей.



Рисунок 2 – Модель для експериментальних досліджень

Фізико-механічні властивості гуми для виготовлення моделей відповідали фізико-механічним властивостям гуми реального ущільнювача. Аналогічні вимоги були дотримані щодо технології виготовлення моделей.

Моделі виготовлені у вигляді гумових сегментів висотою 78 мм, кожен з яких армований однією металевою вставкою. Окремі сегменти відрізнялися між собою різними розмірами вставок (товщиною і шириною).

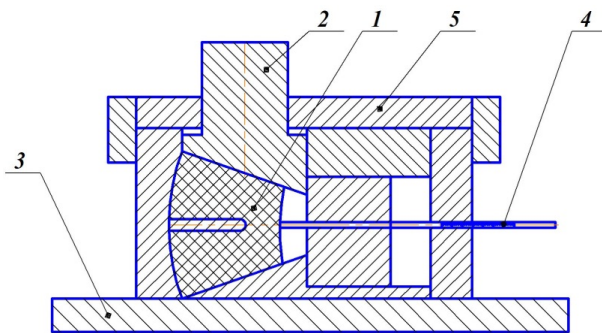
Лабораторні випробування проводили на установці, до складу якої входять силовий гідроциліндр 3, приставка 1 для навантажування випробовуваних моделей, гідравлічна система управління гідроциліндром, система вимірювання та контролю параметрів навантаження моделей (рис. 3).

Для створення навантаження використано гідроциліндр бічної кришки плашкового превентора, яку встановлювали на чотирьох стійках. Діаметр гідроциліндра – 200 мм. Осьове зусилля на штоку гідроциліндра при тиску 10 МПа становило 300 кН. Хід штока гідроциліндра – 150 мм.

Конструкція приставки (рис. 4) забезпечувала радіальний напрямок деформування випробовуваної моделі 1 під дією плунжера 2, що має місце при роботі натурального ущільнювача.



Рисунок 3 – Загальний вигляд установки для випробування



а)



б)

1 – досліджувана модель; 2 – плунжер;
3 – корпус; 4 – вказівник; 5 – кришка

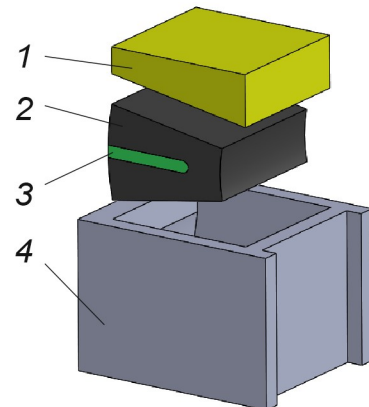
Рисунок 4 – Схема та загальний вигляд приставки

Для зменшення сил тертя при деформуванні моделі і візуального спостереження за процесом навантажування і станом випробовуваної моделі бічні стінки приставки обкладені зсередини скляними стінками. Для візуального спостереження в бічних стінках передбачені поздовжні прорізи.

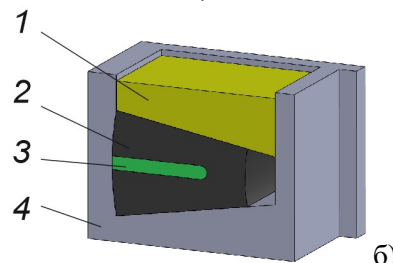
Осьове навантаження на випробовувану модель вимірювали і контролювали за допомогою тензодавача, вмонтованого в шток силового циліндра. Ступінь навантаження моделі визначалася величиною її радіальної деформації за вказівником 4.

Для відтворення у програмному продукті використано результати дослідження моделі, одержані за умов її контакту з контртілом, яке імітує ущільнювану трубу. Для моделі зі вставкою шириною 50 мм і товщиною 7 мм зазначена деформація одержана за навантаження 80 кН.

Для імітаційного моделювання процесу навантажування побудована модель приставки з геометричними параметрами, аналогічними використаній під час експериментальних досліджень (рис. 5). Також відтворено і безпосередньо модель ущільнювача 2, що містить вставку 3 із зазначеними вище параметрами.



а)



б)

а) – у рознесеному вигляді;

б) – у складеному вигляді

1 – пластина; 2 – гумовий елемент;

3 – металева вставка; 4 – корпус

Рисунок 5 – Модель приставки з елементом ущільнювача для імітаційного моделювання

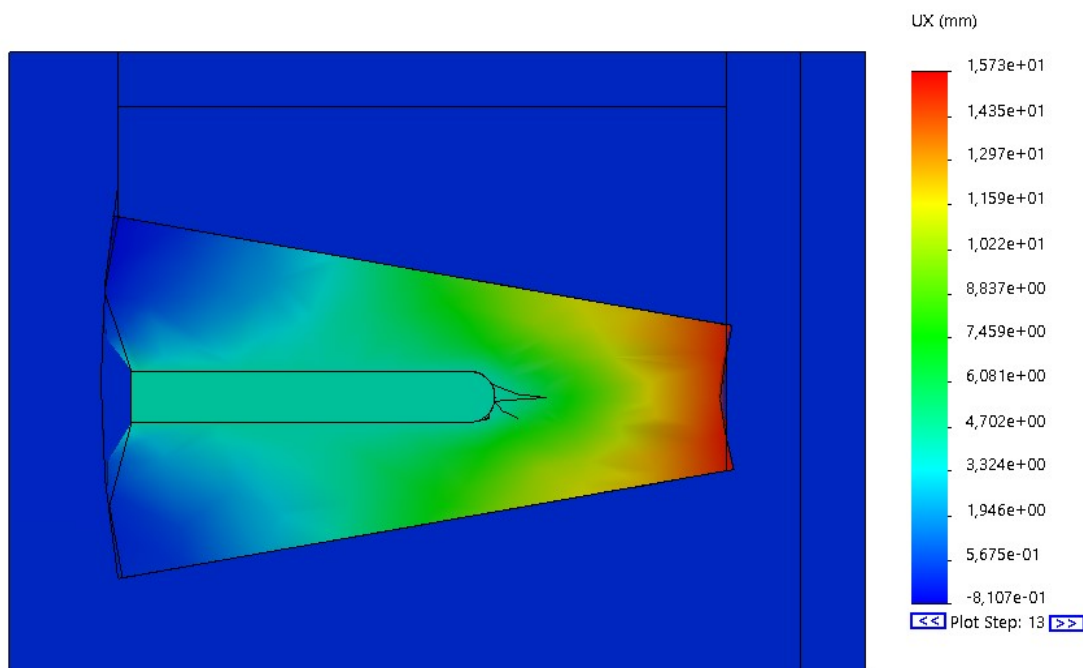


Рисунок 6 – Епюра переміщення гумового елемента за умов досягнення його максимуму

Метою досліджень на наступному етапі було розв'язання оберненої задачі. Вона полягала у відтворенні результату, одержаного у ході експерименту, та визначенні двох констант матеріалу для реалізації моделі Муні-Рівліна.

Для цього до пластини 1 (рис. 5) було прикладено навантаження, рівне 80 кН. Також встановлено обмеження щодо переміщення гумового елемента вздовж осі X, яке відповідає переміщенню ущільнювача в радіальному напрямку.

Шляхом виконання ряду ітерацій спроектована імітаційна модель була перетворена в таку, яка відповідає цілям моделювання. А саме, за зазначеного вище навантаження одержано максимальне переміщення, що становило 15,73 мм (рис. 6).

Застосовуваний метод є методом «проб і помилок», що передбачає послідовні циклічні зміни констант матеріалу, у результаті яких одержують модель, що задовольняє вимогам точності та адекватності. Таким чином, в результаті досліджень встановлено, що значення першої константи складає 1,8 МПа, а другої - 0,6 МПа (рис. 7)

Обговорення

У ході експериментальних досліджень було також встановлено значення навантажень, за яких аналогічного деформування зазнавали моделі із вставками шириною 30 та 40 мм. Вони становили відповідно 59 і 66 кН. Наявність цих результатів дала змогу перевірити достовір-

ність запропонованого способу визначення констант матеріалу для реалізації моделі Муні-Рівліна.

Змінюючи ширину вставки у побудованій для імітаційного моделювання параметричній моделі і використавши встановлені значення констант, одержано наступні результати дослідження напружено-деформованого стану. Для моделі із вставкою шириною 40 мм за прикладання навантаження 66 кН одержано результат, наведений на рисунку 8.

Для моделі із вставкою шириною 30 мм за прикладання навантаження 59 кН одержано результат, наведений на рисунку 9.

З порівняння наведених на рисунках 6, 8, 9 результатів, а саме значень максимальних переміщень, які складають 15,73 мм, 16,08 мм та 16,45 мм, можна зробити висновок про достатню достовірність отриманих результатів, яка характеризується похибкою до 5%. Разом з тим вказана похибка містить похибки імітаційного моделювання та експериментальних досліджень.

Проте варто зауважити, що визначені дві константи матеріалу можна застосовувати для імітаційного моделювання ущільнювача універсального превентора з деформаціями які не перевищують 150%. Для моделювання ущільнювача з більшими деформаціями (до 600%) необхідно визначити більше констант (до 5), що проводилося за наведеною вище методикою.

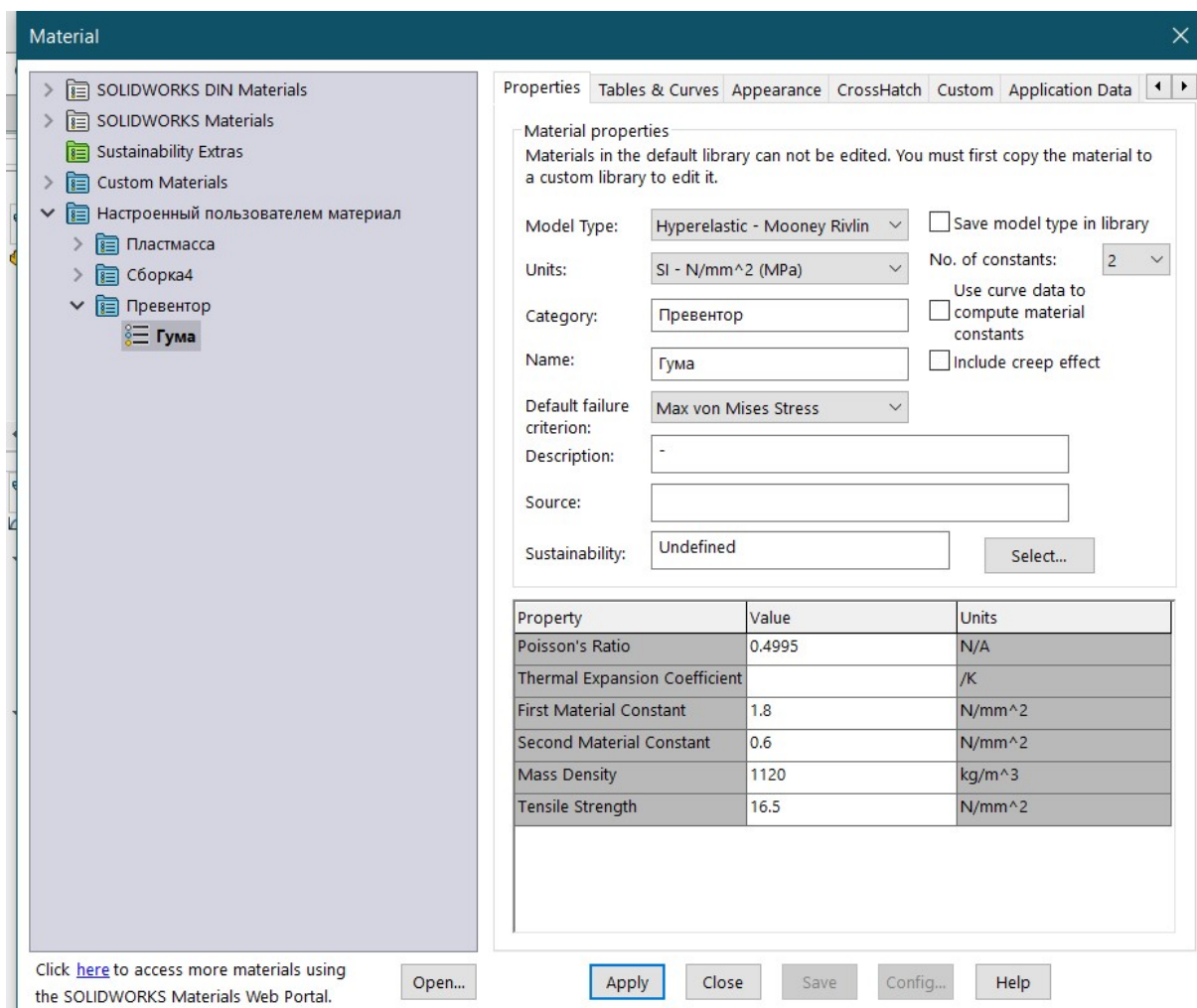


Рисунок 7 – Вікно програми із визначеними константами

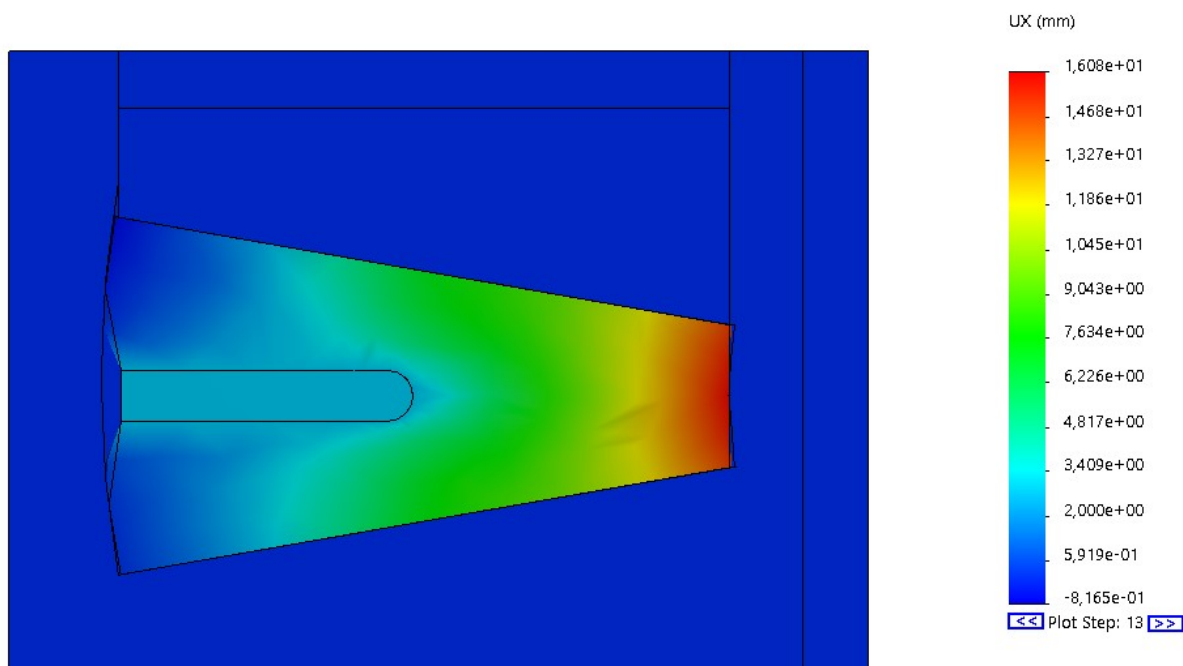


Рисунок 8 – Епюра переміщення гумового елемента зі вставкою шириною 40 мм за навантаження 66 кН

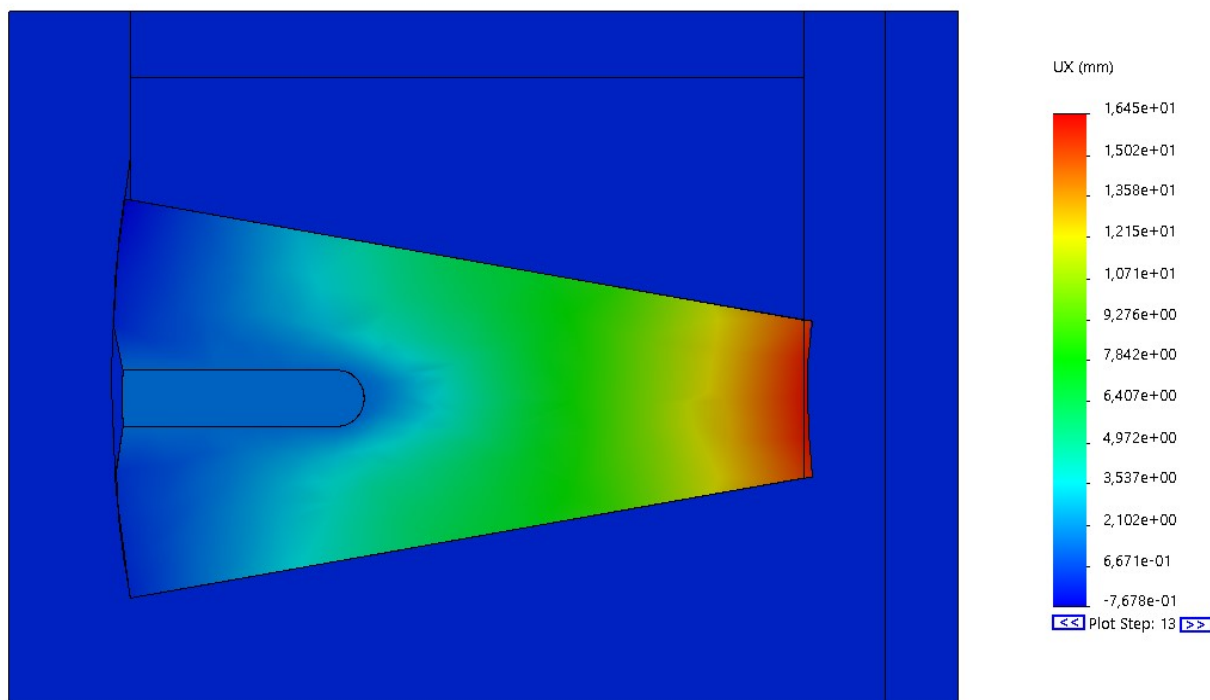


Рисунок 9 – Епюра переміщення гумового елемента зі вставкою шириною 30 мм за навантаження 59 кН

Висновки

У ході проведених теоретичних і експериментальних досліджень визначено константи матеріалу для реалізації моделі Муні-Рівліна, яку використовують для опису поведінки мало-стисливої гуми в програмних продуктах на базі методу кінцевих елементів. Водночас опробовано спосіб визначення констант матеріалу ущільнювача за результатами досліджень його спрощеної моделі. Високою достовірністю одержаних результатів, яка характеризується сукупною похибкою експериментальних і теоретичних досліджень до 5 %, підтверджено можливість використання імітаційного моделювання для проектування елементів універсальних превенторів, і, зокрема, для дослідження впливу геометрії арматури ущільнювача на його напружено-деформований стан загалом.

Література

1. Шпехт Г. Ю. Повышение фонтанной безопасности процесса бурения и освоения скважин путем оценки технического состояния герметизирующий элементов противовыбросового оборудования: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ставрополь, 2005.

2. Мосора Ю., Костриба І., Бембенек М. Надійність противикидного обладнання – важливий чинник підвищення безпеки при спору-

дження та освоєнні нафтогазових свердловин. *Геотехнології*. 2018. № 1. С. 65-71.

3. Джус А. П., Сусак О. М., Шкіца Л. Є. Обґрунтування доцільності використання імітаційного моделювання для дослідження процесів заповнення суден CNG. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. №2/3(68). С. 4-9.

4. Джус А. П. Дослідження напружено-деформованого стану елементів комбінованих посудин високого тиску. *Молодий вчений*. 2015. №11. С. 24-28.

5. Дорохов М. А., Костриба І. В. Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану ущільнення свердловинних пакерів. *Нафтогазова інженерія*. 2016. № 1. С. 103–109.

6. Shafiq Khandoker. Seal for blowout preventer with selective debonding. US 2008/0023917 A1. 2008.

7. Shafiq, Khandoker. Method of designing blowout preventer seal using finite element analysis. US 2008/0027693 A1. 2008.

8. Гребенюк С. Н., Решевская Е. С., Васько В. М., Дорохов М. А., Костриба І. В., Агальцов Г. М., Новикова А. В. Исследование напряженно-деформированного состояния резиновых уплотнений пакеров для испытания устьевого и противовыбросового оборудования. *Геотехническая механика: межвед. сб. научн. тр.* 2014. № 116. С. 174–179.

9. Васько В. М., Гребенюк С. Н., Решевская Е. С., Дорохов М. А., Агальцов Г. Н. Расчёт эластомерной манжеты в условиях нелинейного деформирования. *Геотехнічна механіка*. 2015. Вип. 121. С. 239-245.

10. Huei-Huang Lee Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 14. Jun 2012.

11. Буялич К. Г. Выбор параметров модели Моoney-Rivlin для расчетов уплотнений. *Сборник докладов студентов и аспирантов Кузбасского государственного технического университета*. По результатам 52-й студенческой научно-практической конференции. Кемерово, 2007. С. 104–106.

12. Dzhus A., Romanyshyn L., Mykhailiuk V., Mosora Y. The use of simulation modeling in the design of elements of annular preventers. *New Trends in Production Engineering. MONOGRAPH*. 2019. P. 295-303. DOI 10.2478/ntpe-2019-0031. ISBN: 978-83-66675-14-8, ISBN: 978-83-956095-0-3 (print)

References

1. Shpeht G. Yu. Povyishenie fontannoy bezopasnosti protsessy bureniya i osvoeniya skvazhin putem otsenki tehničeskogo sostoyaniya gemitiziruyuschiy elementov protivovybrosovogo oborudovaniya: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tehničkih nauk. Stavropol, 2005. [in Russian]

2. Mosora Yu., Kostryba I., Bembenek M. Nadiinist protyvykydnoho obladnannia – vazhlyvyi chynnyk pidvyshchennia bezpeky pry sporudzheni ta osvoienni naftohazovykh sverdlovyh. *Heotekhnolohii*. 2018. No 1. P. 65-71. [in Ukrainian]

3. Dzhus A. P., Susak O. M., Shkitsa L. Ye. Obhruntuvannia dotsilnosti vykorystannia imitatsiinoho modeliuvannia dlia doslidzhennia protsesiv zapovnennia suden CNG. *Vostochno-Evropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*. 2014. No 2/3(68). P. 4-9. [in Ukrainian]

4. Dzhus A. P. Doslidzhennia napruzhenodeformovanoho stanu elementiv kombinovanykh posudyn vysokoho tysku. *Molodyi vchenyi*. 2015. No 11. P. 24-28. [in Ukrainian]

5. Dorokhov M. A., Kostryba I. V. Kompiuterne modeliuvannia napruzhenodeformovanoho stanu ushchilnennia sverdlovyhnykh pakeriv. *Naftohazova inzheneriia*. 2016. No 1. P. 103–109. [in Ukrainian]

6. Shafiq Khandoker. Seal for blowout preventer with selective debonding. US 2008/0023917 A1. 2008.

7. Shafiq, Khandoker. Method of designing blowout preventer seal using finite element analysis. US 2008/0027693 A1. 2008.

8. Grebenyuk S. N., Reshevskaya E. S., Vasko V. M., Dorohov M. A., Kostriba I.V., Agaltsov G.M., Novikova A.V. Issledovanie napryazhenodeformirovannogo sostoyaniya rezinovyih uplotneniy pakerov dlya ispytaniya ustevogo i protivovybrosovogo oborudovaniya. *Geotekhnicheskaya mehanika: mezhved. sb. nauchn. tr*. 2014. No 116. P. 174–179. [in Russian]

9. Vasko V. M., Grebenyuk S. N., Reshevskaya E. S., Dorohov M. A., Agaltsov G. N. RaschYot elastomernoy manzhetyi v usloviyah nelineynogo deformirovaniya. *GeotehnIchna mehanIka*. 2015. Vol. 121. P. 239-245. [in Russian]

10. Huei-Huang Lee Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 14. Jun 2012.

11. Buyalich K. G. Vyibor parametrov modeli Mooney-Rivlin dlya raschetov uplotneniy. *Sbornik докладов студентов и аспирантов Кузбасского государственного технического университета*. По результатам 52-й студенческой научно-практической конференции. Кемерово, 2007. P. 104–106. [in Russian]

12. Dzhus A., Romanyshyn L., Mykhailiuk V., Mosora Y. The use of simulation modeling in the design of elements of annular preventers. *New Trends in Production Engineering. MONOGRAPH*. 2019. R. 295-303. DOI 10.2478/ntpe-2019-0031. ISBN 978-83-66675-14-8, ISBN 978-83-956095-0-3 (print)