

ПІДГОТОВКА ДОСЛІДНОЇ МОДЕЛІ УЩІЛЬНЮВАЧА УНІВЕРСАЛЬНОГО ПРЕВЕНТОРА ДО ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Ю. Р. Мосора, Damian Dzienniak, P. O. Дейнега, В. В. Михайлюк, В. Р. Процюк, О. Я. Фафлей

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15;
e-mail: yuramosora@gmail.com

²AGH Науково-технічний університет; алея Міцкевича 30, 30-059; м. Краків, Польща;
e-mail: ddamian@agh.edu.pl

Під час розроблення нових та удосконалення існуючих елементів нафтогазових машин та обладнання застосовуються сучасні підходи до проектування, імітаційне моделювання та нові технології виготовлення. Однією з таких технологій є адитивна (3D-друк). За допомогою цієї технології можна виготовляти деталі найрізноманітніших за складністю форм. З метою експериментальних досліджень та подальшої оптимізації конструкції ущільнювача універсального превентора розроблено конструкцію пресформи для його виготовлення. Особливістю розробленої конструкції пресформи є наявність циліндро-поршневої пари із ущільненням, за допомогою якої силіконова суміш подається безпосередньо у її внутрішню порожнину крізь систему отворів. Пресформу та елементи моделі ущільнювача превентора виготовлено за допомогою 3D-принтера CreatBot DX Plus, а його ущільнювач виготовлений методом виливання із силікону. Характеристики силікону SKR-788 встановлено за результатами тестування дослідних зразків на розривній установці Instron 4500 – отримано константи за теорією Муні-Рівліна. Отримані результати тестування зразків силікону верифіковано із імітаційним моделюванням за аналогічних їх геометричних розмірів та граничних умов. Розбіжність між результатами складає близько 7%. Результатом роботи є виготовлення готової моделі ущільнювача універсального превентора. Для подальших досліджень необхідно розробити програму та методику випробувань виготовленої моделі ущільнювача превентора, а також провести серію його імітаційних моделювань для різних геометричних параметрів, форм і розмірів вставок та визначити їх оптимальний варіант.

Ключові слова: універсальний превентор; ущільнювач превентора; 3D-друк; дослідний зразок; пресформа; силікон.

Today, during the development of new and improvement of existing elements of oil and gas machines and equipment, modern approaches to design, simulation modeling and new manufacturing technologies are used. One of the modern technologies used for the aforementioned purpose is additive – the process of sequential construction of a part by building up layers of material (3D printing). With the help of this technology, it is possible to manufacture parts of the most diverse in terms of complexity of forms. For the purpose of experimental research and further optimization of the sealing design of the universal preventer, the design of the mold for its manufacture was developed. A feature of the developed design of the mold is the presence of a cylinder-piston pair with a seal, with the help of which the silicone mixture is fed directly into its inner cavity through a system of holes. The mold and sealing elements (inserts) of the preventer were made using the CreatBot DX Plus 3D printer. The seal of the preventer is made of SKR-788 silicone, the characteristics of which are determined by the results of testing samples on an Instron 4500 rupture unit - the constants are obtained according to the Mooney-Rivlin theory. Verification of the obtained results of testing silicone samples with simulation modeling under similar geometric dimensions and boundary conditions was carried out. The difference between the results is about 7%. The result of the work is the production of a ready model of the universal preventer seal. For further research, it is necessary to develop a program and test methodology for the produced preventer sealing model, conduct a series of simulated sealing simulations for different geometric shapes and sizes of inserts, and determine their optimal option.

Keywords: universal preventer; preventer seal; 3D printing; prototype; mold; silicone.

Вступ

Створення сучасних нафтогазових машин та обладнання, що має різноманітне призначення, сьогодні ускладнене новими технічними і економічними вимогами. Конструктивно складні елементи машин чи обладнання можуть ви-

готовлятися серійно, і тоді допущені під час проектування помилки обернуться як великими економічними втратами, так і втратою пріоритету напрямку розробок.

Під час розроблення нових конструкцій машин та обладнання іноді доводиться прово-

дити експериментальні дослідження на їх моделях, зменшених у декілька разів. Такий підхід застосовується тоді, коли фізично складно досліджувати той чи інший виріб у натуральну величину. Прикладом у нафтогазовій галузі може слугувати колона бурильних труб, насосно-компресорних труб, вертлюгів, плашкових та універсальних превенторів тощо.

Застосування зменшених моделей виробів під час експериментальних досліджень повинно забезпечити за мінімальних витрат засобів і часу отримання добре узгоджених результатів із теоретичними розрахунками. Для отримання такої узгодженості слід дотримуватись аналогії розрахункових схем, величин навантажень та обмежень, властивостей матеріалів тощо.

Сьогодні надзвичайно активно розвиваються адитивні технології виготовлення різноманітних виробів. Аддитивна технологія (3D-друк) – процес послідовної побудови деталей шляхом нарощування шарів матеріалу. Існує цілий ряд технологій 3D-друку, кожна із яких має переваги і недоліки та здатність друкувати деталі із різноманітних матеріалів [1]. Ця технологія дозволяє виготовляти деталі різноманітних складних форм.

Застосування технології 3D-друку під час проектування елементів машин та обладнання у поєднанні із технологією литва дозволяє проводити різноманітні дослідження виробів з подальшою їх оптимізацією та впровадженням у виробництво. Одним із таких виробів, для дослідження якого добре підходять вищезазвані технології, є ущільнювач універсального превентора.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

На сьогодні виконано як теоретичні, так і експериментальні дослідження з проектування та експлуатації універсальних превенторів. Запропонований у роботі [2] комплексний підхід дає змогу вибрати заходи для попередження або ліквідації ускладнень, пов'язаних з газонафтопроявами. Проте результатів цих досліджень недостатньо для реалізації системного підходу щодо розробки надійних елементів конструкцій універсальних превенторів. Перш за все, відсутня науково обґрунтована методика розрахунку геометричних і силових параметрів універсальних превенторів та ущільнювальних вузлів, яка б гарантувала герметичність превенторів усіх типорозмірів.

Також не досліджено вплив геометрії елементів армування ущільнювачів універсальних превенторів на напружено-деформований стан

гуми. Імітаційне моделювання може бути використане для прискорення аналізу інженерних задач для вирішення багатьох проблем, з якими стикаються дослідники та інженери, і які не можуть бути вирішені аналітично або потребують на це значного часу [3-5].

У роботі [6] для проектування ущільнювача універсального превентора було запропоновано метод скінченних елементів.

Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми

Зважаючи на складність конструкції та великі габаритні розміри ущільнювачів універсальних превенторів, проведення їх досліджень на натурних моделях є складним процесом. З цією метою можна використовувати моделі ущільнювачів, габаритні розміри яких є набагато меншими. Для виготовлення ущільнювача превентора зазвичай застосовують металеві пресформи. Проте, виготовлення такої форми сьогодні є дорогавартісним, а заважаючи на заплановані дослідження ущільнювачів, таких пресформ буде потрібно декілька. Тому у статті розроблено конструкцію пресформи для виготовлення ущільнювача універсального превентора. За допомогою надрукованої на 3D-принтері пресформи буде виготовлено дослідну модель ущільнювача.

Мета та завдання досліджень

Мета роботи полягає у підготовці дослідної моделі ущільнювача універсального превентора до лабораторних випробувань.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– розробити та виготовити конструкцію пресформи ущільнювача універсального превентора;

– виготовити модель ущільнювача універсального превентора з врахуванням особливостей характеристик матеріалу ущільнювача;

– окреслити подальші напрямки дослідження конструкцій універсального превентора.

Висвітлення основного матеріалу і дослідження

Матеріалами для виготовлення різних виробів, механічні властивості яких мають нелінійну залежність напруження від переміщення, сьогодні використовують різноманітні литтєві силікони. Силікони зазвичай складаються з двох компонентів: основи та каталізатора. У таблиці 1 наведено характеристику силікону SKR-788, який застосований для виготовлення елементів моделі ущільнювача універсального превентора [7].

Таблиця 1 – Характеристики силікону SKR-788

Параметри	Усереднена в'язкість	Час життя	Твердість (за Шором А)	Опір на розрив, кН/м	Відносне видовження на розрив, %	Умовна міцність на розрив, МПа	Співвідношення основи та катализатора	Лінійна усадка, %	Температурний інтервал експлуатації, °С	Густина, г/см ³ при 25°С
Значення	19000 СПз при 25°С	від 30 хв при 25°С	30±3	23	580	3,5	100:2	0,3	- 60 +250	1,1

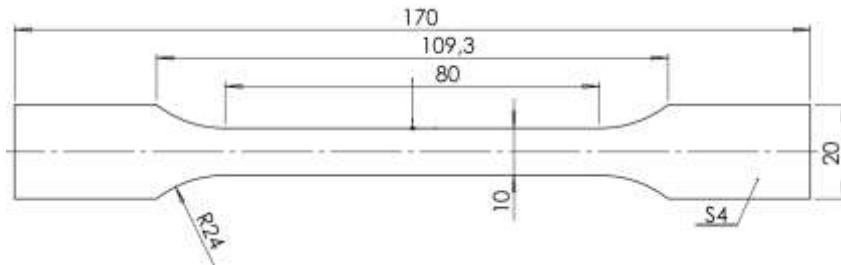


Рисунок 1 – Розміри дослідного зразка



Рисунок 2 – Дослідний зразок



Рисунок 3 – Установка Instron 4500

Щоб уникнути прилипання силікону до форми, використано воскову розділову пасту Release Wax [8].

Імітаційне моделювання виробів, які виготовлені із гіперпружних матеріалів, зазвичай є досить складним завданням, оскільки, на відміну від металевих матеріалів, для цього потрібно мати декілька констант – характеристик гіперпружних матеріалів, які надзвичайно рідко можна знайти у літературних джерелах. Константи залежать від складу матеріалу, тому навіть незначна зміна пропорцій його складових призводить до зміни характеристик самого матеріалу.

Виходячи з цього, було прийнято рішення для отримання в подальшому високої узгодженості між теоретичними та експериментальними дослідженнями (імітаційними моделюваннями) визначити характеристики силікону.

Для визначення констант матеріалу згідно з рис. 1 було виготовлено дослідні зразки (рис. 2) із силікону SKR-788.

Визначення характеристик силікону SKR-788 проводилось за допомогою установки Instron 4500 (рис. 3).

За результатами досліджень зразків отримано такі дані: "Навантаження (N)", "Час (s)",

"Видовження (mm)", "Напруження (MPa)", "Деформація (mm/mm)".

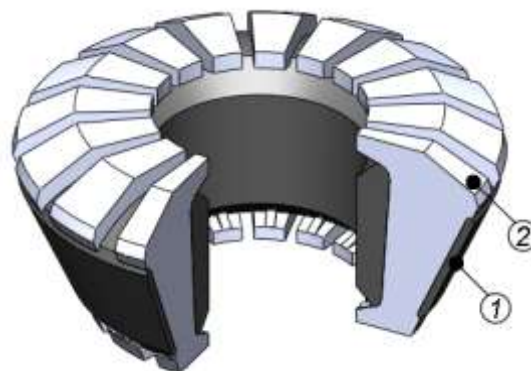
Для визначення констант гіперпружного матеріалу за моделлю Муні-Рівліна [9, 10] застосовано інструменти програми Ansys: C10=-1,0335E+05 Па; C01=5,7534E+05 Па; C11=93309 Па.

З метою верифікації результатів отриманих експериментально та методом скінченних елементів було проведено імітаційне моделювання аналогічного за розмірами зразка та схеми навантаження. Розбіжність між результатами складає близько 7%. Це в подальшому дасть змогу проводити різноманітні імітаційні моделювання з врахуванням різних геометричних розмірів та форм елементів ущільнювача універсального превентора.

Методи швидкого прототипування на даний час є одними із основних у розвитку виробничих процесів. Їх широке застосування дозволяє усунути конструктивні похибки виробів ще на стадії проектування, знижуючи при цьому витрати. Одним із методів швидкого прототипування виробів є виготовлення їх за допомогою 3D-принтерів. Ця технологія знаходить застосування практично у всіх галузях промисловості [11].

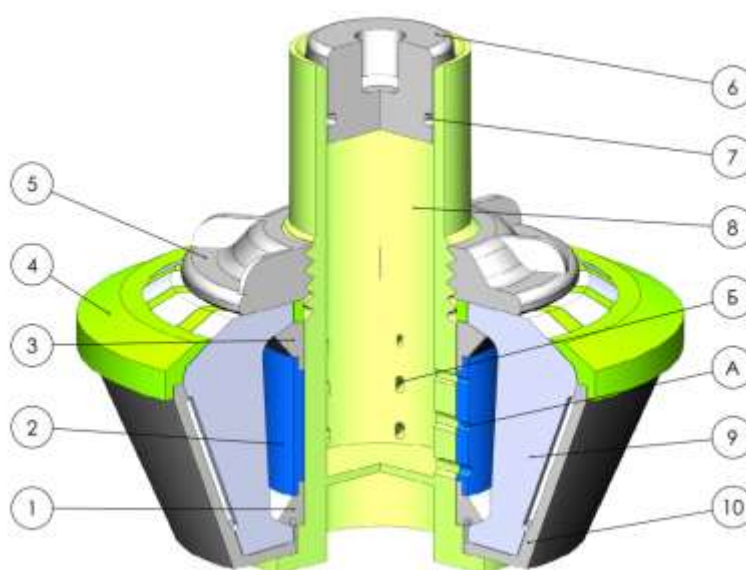


Рисунок 4 – 3D-принтер CreatBot DX Plus



1 – ущільнювач; 2 – вставка

Рисунок 5 – Ущільнювач превентора



1 – вкладиш нижній; 2 – втулка; 3 – вкладиш верхній; 4 – кришка; 5 – гайка;
6 – поршень; 7 – ущільнення поршня; 8 – циліндр; 9 – вставка; 10 – корпус

Рисунок 6 – Конструкція пресформи для виготовлення ущільнювача превентора

Для виготовлення моделі ущільнювача превентора застосовано 3D-принтер CreatBot DX Plus (рис. 4) кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

На рисунку 5 показано ущільнювач превентора, модель якого необхідно виготовити.

З метою відтворення всіх особливостей елементів ущільнювача превентора розроблено конструкцію пресформи (рис. 6). Модель ущільнювача превентора виконана у масштабі.

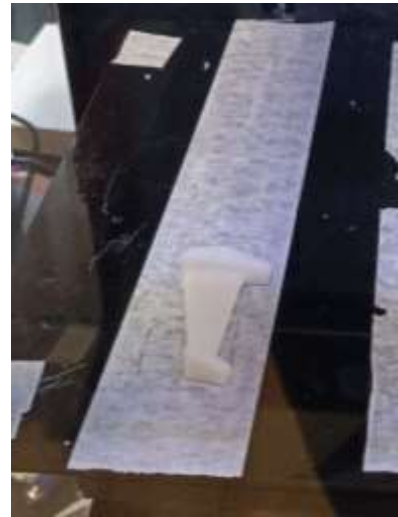
Особливістю цієї пресформи є те, що вона містить у своїй конструкції не тільки деталі, які формують ущільнювач, але й циліндро-поршневу пару із ущільненням, за допомогою якої відбувається подача гумової (силіконової) суміші безпосередньо у внутрішню порожнину пресформи крізь отвори А та Б. Отвори Б цилін-

дра 8 збігаються із отворами А, які виконані у втулці 2. Для зручності розбирання форми після виливання ущільнювача превентора верхній 1 та нижній 3 вкладиші виконані розрізними та складаються із трьох частин кожен. Для утримання форми у зібраному вигляді та сприйняття навантажень від дії тиску суміші, що створюється поршнем 6, використовується гайка 5, що безпосередньо нагвинчується ззовні на циліндр 8.

Слід зауважити, що при заповненні сумішню форма повинна розміщуватись у вертикальному положенні. Необхідний для заповнення порожнини форми об'єм силіконової суміші визначається за допомогою спеціального інструменту програми SolidWorks, що дозволяє зменшити витрату суміші.



а)



б)

а) – друк моделі; б) – надрукована модель

Рисунок 7 – Виготовлення моделі вставки ущільнювача універсального превентора



а)



б)

а) – деталі пресформи; б) – пресформа у зборі

Рисунок 8 – Виготовлені на 3D-принтері елементи конструкції пресформи та деталі ущільнювача перентора

На рисунку 7, а зображено вставку ущільнювача превентора в процесі друку, а на рисунку 7, б – надруковану.

На рисунку 8 показано виготовлені на 3D-принтері всі елементи конструкції пресформи та деталі вставки універсального превентора.

Після заливання пресформи та витримання її деякий час отримано готову модель ущільнювача універсального превентора, яка показана на рисунку 9.

Для подальших досліджень планується розробити програму та методику випробувань виготовленої моделі ущільнювача превентора, використавши для цього дослідну установку, загальний вигляд якої показано на рисунку 10.

Окрім цього, за наявних характеристик матеріалу ущільнювача (визначених сталих мате-

ріалу силікон SKR-788) також планується провести серію імітаційних моделювань ущільнювача для різних геометричних форм і розмірів вставок та визначити їх оптимальний варіант. Для підтвердження результатів імітаційних моделювань знову провести лабораторні випробування нових варіантів ущільнювача.

Висновки

З метою проведення лабораторних випробувань дослідної моделі ущільнювача універсального превентора розроблено конструкцію пресформи для виготовлення її із силікону. Запропонована пресформа є простою за конструкцією та легко і швидко виготовляється із пластику за допомогою 3D-принтера. Пресформа виконана розбірною та може використовуват-



Рисунок 9 – Виготовлена модель ущільнювача превентора



Рисунок 10 – Установка для дослідження конструкції моделей ущільнювачів універсальних превенторів

тись повторно. При виготовленні моделі ущільнювача універсального превентора враховано особливості підготовки силіконової суміші, що дозволило уникнути наявності всередині ущільнювача бульбашок повітря, які спотворюють результати лабораторних досліджень. Використання воскової розділової пасти Release Wax під час виготовлення ущільнювача значно спростило вилучення його із пресформи. Окреслено напрямок подальших дослідження конструкцій ущільнювача універсального превентора, що полягає у розробленні програми та методики випробувань виготовленої моделі ущільнювача превентора на спеціальній дослідній установці. Також планується проведення серії імітаційних моделювань фрагментів моделей ущільнювача для різних геометричних форм і розмірів вставок з метою визначення оптимальних їх варіантів. Для підтвердження результатів імітаційних моделювань необхідним буде провести серію лабораторних випробувань пропонуваніх варіантів ущільнювача універсального превентора.

Література

1. Михайлюк В., Ердей З., Джус А., Дічюк В., Родіч В. Проектування та 3D-прототипування: посібник. Івано-Франківськ: Фоліант, 2022. 124 с.

2. Мосора Ю., Костриба І., Бембенек М. Надійність противикидного обладнання – важливий чинник підвищення безпеки при спорудженні 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. SKR-788 – Твердий силікон для форм. URL: <https://silikoni.com.ua/ru/skr-788-silikon-dlya-form> (дата звернення: 15.11.2023).

8. Release Wax – воскова розділова паста (40 грам). URL: <https://silikoni.com.ua/release-wax-voskova-rozdilova-pasta-40-hram> (дата звернення: 15.11.2023).

9. <https://getwelsim.medium.com/mooney-rivlin-hyperelastic-model-for-nonlinear-finite-element-analysis-b0a9a0459e98>

10. Bembenek M., Kowalski Ł., Kosoń-Schab A. Research on the Influence of Processing Parameters on the Specific Tensile Strength of FDM Additive Manufactured PET-G and PLA Materials. *Polymers*. 2022, No. 12(14). P. 2446. <https://doi.org/10.3390/polym14122446>

11. Bembenek M., Михайлюк В., Gazda W., Рудейченко О., Дейнега Р. Аналіз можливості

вдосконалення 3D-друку обертових елементів методом FDM. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. № 1(52). С. 73–81. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-73-81](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-73-81)

Reference

1. Mykhailiuk V., Erdei Z., Dzhus A., Dichiuk V., Rodich V. Proektuvannia ta 3D-prototypuvannia: posibnyk. Ivano-Frankivsk: Foliant, 2022. 124 p. [in Ukrainian]
2. Mosora Yu., Kostyba I., Bembenek M. Nadiinist protyvykydnoho obladnannia – vazhlyvyi chynnyk pidvyshchennia bezpeky pry sporudzheni ta osvoinni naftohazovykh sverdlovyn. *Heotekhnolohii*. 2018. No 1. P. 65-71. [in Ukrainian]
3. Dzhus A. P., Susak O. M., Shkitsa L. Ye. Obruntuvannia dotsilnosti vykorystannia imitatsiinoho modeliuvannia dlia doslidzhennia protsesiv zapovnennia suden CNG. *Vostochno-Evropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohyi*. 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., Kostyba I. V. Kompiuterne modeliuvannia napruzhenodeformovanoho stanu ushchilnennia sverdlovynnykh 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. SKR-788 – Tverdyy silikon dlia form. URL: <https://silikoni.com.ua/ru/skr-788-silikon-dlya-form> (data zvernennia: 15.11.2023). [in Ukrainian]
8. Release Wax – voskova rozdilova pasta (40 hram). URL: <https://silikoni.com.ua/release-wax-voskova-rozdilova-pasta-40-hram> (data zvernennia: 15.11.2023). [in Ukrainian]
9. <https://getwelsim.medium.com/mooney-rivlin-hyperelastic-model-for-nonlinear-finite-element-analysis-b0a9a0459e98>
10. Bembenek, M.; Kowalski, Ł.; Kosoń-Schab, A. Research on the Influence of Processing Parameters on the Specific Tensile Strength of FDM Additive Manufactured PET-G and PLA Materials. *Polymers*. 2022, No. 12(14). P. 2446. <https://doi.org/10.3390/polym14122446>
11. Bembenek M., Mykhailiuk V., Gazda W., Rudeichenko O., Deineha R. Analiz mozhyvosti vdoskonalennia 3D-druku obertovykh elementiv metodom FDM. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. No 1(52). P. 73–81. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-73-81](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-73-81) [in Ukrainian]