

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕРМЕТИЗАЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ ГУМОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ УСТЬОВИХ ВИПРОБУВАЛЬНИХ ПАКЕРІВ

<sup>1</sup>М.А. Дорохов, <sup>2</sup>І.В. Костриба

<sup>1</sup> Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка;  
м. Полтава, пр. Першотравневий, 24, тел. (050) 6317980, e-mail: maxitri.5@gmail.com

<sup>2</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42264,  
e-mail: no@nimg.edu.ua

Проаналізовано проблематику випробування устьового та противикидного обладнання при бурінні чи підземному ремонті свердловин в умовах необсадженого ствола. Обґрунтовано доцільність використання свердловинних пакерів для проведення випробування та переваги від використання останніх на базі самоущільнюючих манжет. Висвітлено важливість забезпечення герметизаційної здатності вузла ущільнення устьового випробувального пакера при проведенні випробування устьового та противикидного обладнання. Зазначено умову герметизації самоущільнюючої манжети устьового випробувального пакера. Висвітлено фактори, що впливають на забезпечення стабільності контактних тисків на спряженій поверхні: манжета – обсадна труба. Проведено аналіз наукових праць з дослідження ущільнень свердловинних пакерів та самоущільнюючих манжет, що використовуються для запирання робочих рідин у рухомих та нерухомих з'єднаннях різноманітних гідравлічних та пневматичних систем агрегатів чи пристроїв. Описано метод дослідження контактних тисків на спряженій поверхні. Висвітлено конструкцію лабораторного стенду та тарувальної установки для проведення дослідження. Описано хід планування експерименту. Зазначено основні рівні, інтервали варіювання факторів та межі області дослідження контактних тисків. Проаналізовано графічні залежності зміни контактного тиску від дії різних факторів.

Ключові слова: устьове та противикидне обладнання, герметизаційна здатність, устьовий випробувальний пакер, самоущільнююча манжета, контактний тиск.

Проанализировано проблематику испытания устьевого и противовыбросового оборудования при бурении или подземном ремонте скважин в условиях необсаженного ствола. Обоснована целесообразность использования скважинных пакеров для проведения испытания и преимущества использования последних на базе самоуплотняющихся манжет. Освещены важность обеспечения герметизационной способности узла уплотнения устьевого испытательного пакера при проведении испытания устьевого и противовыбросового оборудования. Указано условие герметизации самоуплотняющейся манжеты устьевого испытательного пакера. Освещены факторы, влияющие на обеспечение стабильности контактных давлений на сопряженной поверхности: манжета – обсадная труба. Проведен анализ научных работ по исследованию уплотнений скважинных пакеров и самоуплотняющихся манжет, используемых для запирания рабочих жидкостей в подвижных и неподвижных соединениях различных гидравлических и пневматических систем агрегатов или устройств. Описан метод исследования контактных давлений на сопряженной поверхности. Освещены конструкции лабораторного стенда и тарировочной установки для проведения исследования. Описан ход планирования эксперимента. Указаны основные уровни, интервалы варьирования факторов и пределы области исследования контактных давлений. Проанализировано графические зависимости изменения контактного давления от действия различных факторов.

Ключевые слова: устьевое и противовыбросовое оборудование, герметизационная способность, устьевой испытательный пакер, самоуплотняющаяся манжета, контактное давление.

The article analyzes the problems of the test wellhead and blowout equipment during drilling or underground repair of wells in the open hole conditions. The expediency of using downhole packers for testing, as well as their use on the basis of the self-sealing cuffs, is proved. The article also highlights the importance of ensuring the sealing capability of the seal assembly of the wellhead test packer when testing the wellhead and blowout equipment. The condition for sealing of the self-sealing cuff of the wellhead test packer is indicated. There are also described the factors affecting the provision of stability of contact pressures on the mating surface: cuff – casing. The article analyzes some scientific studies on the downhole packer seals and self-sealing cuffs, used for shutting-off of working fluids in the mobile and fixed joints of different hydraulic and pneumatic systems, units or devices. The method for studying the specific contact pressures on the mating surface is described. The structure of the laboratory bench and calibration unit for carrying out the study is also depicted. The progress of experimental design is described. The main levels, intervals of factors variation, and boundaries of the study area of the specific contact pressures are indicated. Graphical dependencies of the specific contact pressure change on various factors effect are analyzed.

Key words: wellhead and blowout equipment, sealing capability, wellhead test packer, self-sealing cuff, specific contact pressure.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** При спорудженні та підземному ремонті нафтових і газових свердловин з метою перевірки герметиза-

ційної здатності противикидне та устьове обладнання підлягає гідравлічному випробуванню:

- перед встановленням на свердловині;
- після кожного монтажу на свердловині;

– після проведення ремонтних робіт (заміна плашок превентора, заміна ущільнення штока гідроциліндра плашкового превентора тощо);

– перед розкриттям продуктивного горизонту;

– періодично у відповідності до вимог бурової компанії або підприємства (згідно з вимогами стандарту API R 53 з інтервалом не більшим ніж 3 тижні) [1].

У процесі буріння свердловин часто виникає необхідність у випробуванні превенторів при наявності необсадженого ствола свердловини. Створення в свердловині надлишкового тиску при випробуванні може призвести до поглинання рідини свердловиною, а інколи навіть до гідравлічного розриву пласта. Як наслідок, у такому разі неможливо дотриматись регламентованих вимог процесу випробування змонтованих превенторів. Аналогічна ситуація має місце також при випробуванні змонтованих превенторів перед ремонтом нафтових і газових експлуатаційних свердловин [2].

На часі для відокремлення ствола свердловини від противикидного та устьового обладнання при їх випробуванні використовують свердловинні пакери. Для випробування повинні використовуватись пакери, які відрізняються простотою експлуатації та високою герметизаційною здатністю. Таким вимогам на сьогоднішній день відповідають пакери на базі самоущільнюючих манжет. Для досягнення герметизації відсутня необхідність у прикладанні зовнішніх зусиль, оскільки ущільнення пакерів на базі самоущільнюючих манжет спрацьовують автоматично при появі надлишкового тиску випробувальної рідини в надпакерному просторі.

Сучасний ринок обладнання для спорудження чи експлуатації нафтових і газових свердловин характеризується різноманітністю конструкції пакерів на базі самоущільнюючих манжет. Серед наявних найбільш вдало себе зарекомендувала конструкція пакера типу УВЧ виробництва спеціальної аварійно-рятувальної служби «ЛКВО» ПАТ «Укргазвидобування» [3].

Успішність проведення випробування устьового та противикидного обладнання за допомогою пакера залежить від герметизаційної здатності його основного конструктивного елемента – вузла ущільнення.

Герметизаційна здатність як комплексний показник властивостей ущільнення визначається характерними умовами роботи ущільнення та експлуатаційними факторами.

Виходячи з умов роботи самоущільнюючої манжети устьового випробувального пакера, для успішної герметизації затрубного простору необхідне забезпечення умови герметизації

$$q \geq P, \quad (1)$$

де  $q$  – контактний тиск на спряженій поверхні: манжета – обсадна труба;

$P$  – робочий тиск випробувальної рідини.

Отже, одним із основних факторів, що впливають на герметизаційну здатність ущільнення, є забезпечення стабільності контактних

тисків на спряженій поверхні: манжета – обсадна труба протягом періоду випробування устьового та протвикидного обладнання.

Забезпечення стабільності контактних тисків, а, отже, і надійної герметизації, пов'язано із забезпеченням збалансованості конструктивних параметрів вузла ущільнення, фізико-механічних характеристик матеріалу манжети, стану ущільнюючої поверхні, величини тиску випробування та часу протягом якого відбувається випробування.

Вміння оперувати величиною контактних тисків є дуже важливою задачею як з практичної так і з наукової точки зору. Вирішення цієї задачі вимагає ґрунтовних досліджень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми.** Дослідженню герметизаційної здатності свердловинних пакерів присвячено численну кількість наукових праць.

Авторами роботи [4] проведено дослідження з визначення умов герметизації (1) ущільнюючого елемента свердловинного пакера. Причому встановлена залежність між контактними тисками на спряженій поверхні: ущільнення – обсадна труба та випробувальним тиском.

Враховуючи той факт, що дослідження проводилися з свердловинними пакерами на базі циліндричних ущільнень (механізм герметизації полягає у радіальній деформації ущільнення при його осьовому стисканні зовнішньою силою), результати експериментальних досліджень не можуть бути застосовані для конструювання самоущільнюючих манжет устьових випробувальних пакерів, які автоматично спрацьовують під дією тиску.

В роботі [5] висвітлено конструктивні особливості випробувального пакера на базі самоущільнюючої манжети з деякими практичними рекомендаціями щодо підвищення герметичності в процесі випробування устьового та противикидного обладнання. В роботі надано рекомендації щодо радіального зазору між упором вузла ущільнення та стінкою обсадної колони але відсутні будь-які експериментальні або теоретичні підтвердження наданих рекомендацій. Практичний досвід застосування конструкції самоущільнюючого вузла пакера, описаного в роботі [5], свідчить про необхідність створення імпульсних навантажень (закачування випробувальної рідини з великою продуктивністю насосних агрегатів) для спрацювання манжети і досягнення герметизації в процесі випробування. Такий режим випробування викликаний замалим натягом самоущільнюючої манжети, а, отже, відсутністю достатніх початкових контактних тисків. Зважаючи на незначну глибину встановлення випробувальних пакерів з самоущільнюючими манжетами, а, отже, як наслідок на обмежений об'єм затрубного простору куди закачується випробувальна рідина, не виключена можливість руйнування обладнання і травмування працюючих за умов імпульсних навантажень.

Враховуючи відсутність чітко сформульованих критеріїв забезпечення герметичності самоущільнюючих манжет свердловинних випробувальних пакерів, було проведено критичний аналіз наукових праць з дослідження роботи та конструкцій самоущільнюючих манжет в галузі загального машинобудування. Принцип роботи самоущільнюючих манжет свердловинних випробувальних пакерів є абсолютно аналогічним принципу роботи манжет, що використовуються для ізолювання робочих рідини у рухомих та нерухомих з'єднаннях різноманітних гідравлічних та пневматичних систем агрегатів чи пристроїв.

У роботах [6–8] висвітлено результати досліджень гумових манжет силових гідроциліндрів у вигляді графічної залежності між випробувальним тиском; величиною радіального зазору: між упором та стінкою гідроциліндра та безпосередньо величиною об'єму матеріалу манжети, що витискується під час її роботи в зазор.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття.** Результати наукових праць [6–8], що стосуються теоретичних та експериментальних досліджень самоущільнюючих манжет в галузі загального машинобудування, не можуть повною мірою бути використані для дослідження герметизаційної здатності та конструювання манжет устьових випробувальних пакерів внаслідок зовсім іншої конфігурації останніх. Підтвердження цьому є ряд досліджень [9], які свідчать, що працездатність та значення напружень, які виникають під час експлуатації, суттєво залежать, від розмірів, форми, матеріалу та температури експлуатації ущільнення тощо. Порівнюючи складові конфігурації самоущільнюючих манжет устьових випробувальних пакерів та манжет загального машинобудування, можна стверджувати, що, окрім принципу роботи, вони не мають нічого спільного.

Аналіз наукових праць розглядуваної тематики свідчить, що на часі недостатньо інформації стосовно дослідження самоущільнюючих манжет устьових випробувальних пакерів в умовах комплексної дії на останні силових, геометричних параметрів та властивостей матеріалу. Відсутня систематизована база розподілу контактних тисків за умов різних рівнів напруженого стану ущільнюючого елемента при різних значеннях випробувального тиску, радіального зазору та натягу.

Підсумовуючи вище зазначену інформацію авторами було вирішено провести експериментальні дослідження на натурних зразках манжет устьових випробувальних пакерів в умовах, наближених до реальних.

**Мета роботи.** Проведені експериментальні дослідження ставили за мету: визначити характер розподілу контактних тисків по довжині спряженої поверхні: зовнішня поверхня робочої та опорної частин манжети – обсадна труба з метою подальшого вдосконалення конструкції

самоущільнюючого вузла устьового випробувального пакера.

**Висвітлення основного матеріалу дослідження.** Для проведення експерименту з визначення контактних тисків було розроблено та виготовлено лабораторний стенд, що дозволив провести дослідження натурних зразків манжет. Принципова схема та загальний вигляд установки показані на рисунках 1 та 2 відповідно.

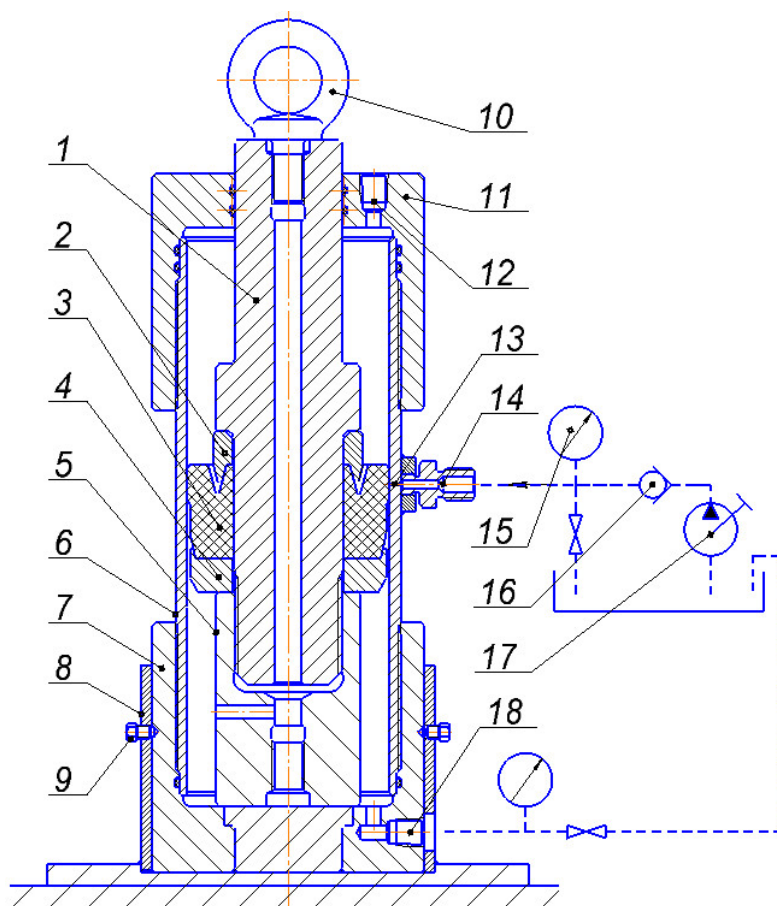
Лабораторний стенд, передбачає встановлення попередньо зібраного випробувального пакера натурних розмірів, на корпусі 1 якого розміщені упорна втулка 2, самоущільнююча манжета 3 та упор 4, що складають разом вузол ущільнення пакера та затягаються упорною гайкою 5. Зібраний пакер з попереднім натягом вставляють у патрубок 6 (представлений відрізком обсадної труби), яка попередньо згвинчена з нижньою кришкою 7. Остання, в свою чергу, зафіксована від можливого обертання при збиранні установки відносно упорного стакана 8 стопорними гвинтами 9. Після цього вся компоновка герметично загвинчується верхньою кришкою 11.

Метод дослідження контактних тисків за допомогою описаного лабораторного стенду дістав назву «метод контрольних отворів».

За даним методом контактний тиск на спряженій поверхні визначається тиском зовнішньої вимірювальної гідравлічної системи, яка з'єднана з радіальним отвором малого діаметра 13, вихід із якого закритий зовнішньою поверхнею самоущільнюючої манжети. Остання під час випробування перебуває у внутрішньому просторі лабораторного стенду під дією тиску випробування  $P$ . Коли тиск у зовнішній гідравлічній системі, до якої входять контрольний манометр 15, зворотний клапан 16, ручний гідравлічний насос 17, стане рівним контактному тиску в місці контакту манжети з виходом радіального отвору, між зовнішньою поверхнею манжети та внутрішньою поверхнею обсадної труби з'явиться щілина, по якій рідина із вимірювальної зовнішньої гідравлічної системи пройде в порожнину зливу до зливного отвору 18. Тиск в момент відкриття щілини приймають рівним контактному тиску з деякою поправкою, яка була досліджена на спеціальній тарувальній установці.

Призначення тарувальної установки, принципова схема якої зображена на рисунку 3 – перевірити працездатність «методу контрольних отворів» за допомогою гумового елемента, який звулканізований з тієї ж гумової суміші, що й самоущільнююча манжета устьового випробувального пакера.

Тарувальна установка, загальний вигляд якої показаний на рисунку 4, представлена вантажем 1, гумовим зразком 2, опорною плитою 3, змінною вставкою 4 із контрольним отвором 5. Шорсткість контактної поверхні змінної вставки відповідала шорсткості внутрішньої поверхні обсадної труби при випробуванні на лабораторному стенді.

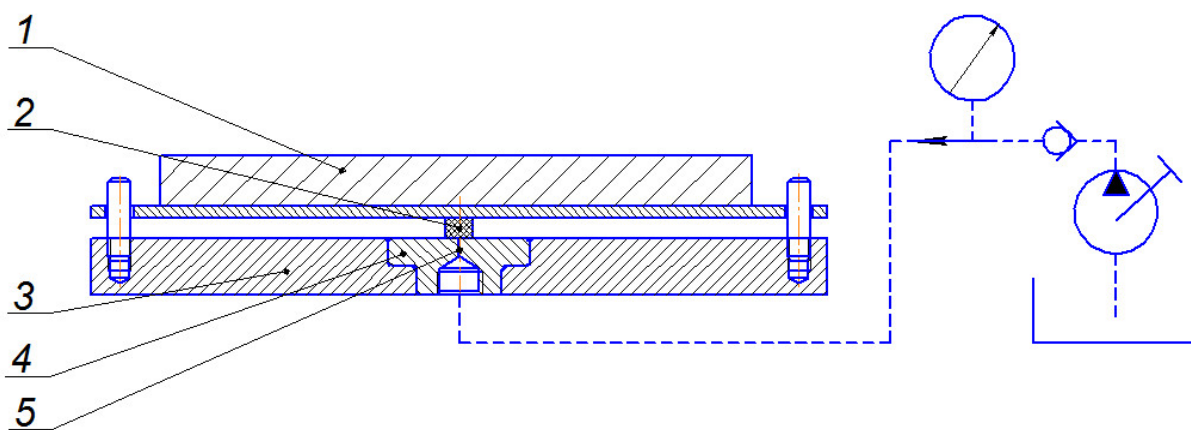


1 – ствол пакера; 2 – упорна втулка; 3 – самоущільнююча манжета; 4 – упор; 5 – упорна гайка;  
 6 – патрубок; 7 – нижня кришка; 8 – упорний стакан; 9 – стопорні гвинти; 10 – рим-болт;  
 11 – верхня кришка; 12 – вхідний отвір для підведення випробувальної рідини;  
 13 – радіальний випробувальний отвір; 14 – запобіжний штуцер; 15 – контрольний манометр;  
 16 – зворотний клапан; 17 – ручний гідравлічний насос; 18 – зливний отвір

**Рисунок 1 – Принципова схема лабораторного стенду**



**Рисунок 2 – Загальний вигляд лабораторного стенду для дослідження контактних тисків**



1 – вантаж; 2 – гумовий зразок; 3 – опорна плита; 4 – змінна вставка; 5 – контрольний отвір

Рисунок 3 – Тарувальна випробувальна установка



Рисунок 4 – Загальний вигляд тарувальної випробувальної установки

Сутність визначення контактних тисків на тарувальній установці аналогічна сутності визначення на лабораторному стенді для випробування устьового пакера. Під час проведення експерименту передбачалося, що якщо навантажити гумовий зразок 2 з контактної площею  $1 \text{ см}^2$  силою в  $10 \text{ Н}$ , то контактний тиск на спряженій поверхні, гумовий елемент – змінна вставка, має складати  $0,1 \text{ МПа}$ . По наближенню значення маси вантажу до значення контактного тиску на спряженій поверхні і визначалась достовірність проведення експерименту. Після проведення випробувань на тарувальній установці було отримано залежність (рисунок 5), яка враховувалась при визначенні контактних тисків на лабораторному стенді.

Під час дослідження контактних тисків використовувалися манжети різних типорозмірів, що звulkanізовані з гумової суміші ІРП-1293.

З метою отримання максимуму інформації при мінімумі витрат було проведено планування експерименту, що полягав у визначенні залежної змінної (відгуку), у виборі параметрів

оптимізації та їх рівнів варіювання, визначення необхідного числа дослідів, встановленні порядку проведення експерименту, складанні математичної моделі і перевірці суттєвості статистичних зв'язків за допомогою дисперсійного і кореляційного аналізів [10].

При плануванні експерименту на основі апріорної інформації та попередніх досліджень за незалежні фактори приймали: діаметральний натяг –  $\Delta$ , мм; тиск опресування  $P$ , МПа; радіальний зазор  $\delta$  між опорною втулкою та обсадною трубою, мм та модуль зсуву матеріалу  $\sigma_{зс}$ , МПа. В якості цільової функції  $E$ , МПа було прийнято величину контактного тиску. Експеримент поставлено за програмою центрального композиційного рототабельного плану другого порядку Бокса-Хантера. Ядро плану було представлено напівреплікою  $2^{5-1}$  ( $1=X_1 X_2 X_3 X_4 X_5$ ). Реалізовано 28 дослідів.

Основні рівні варіювання факторів та межі області дослідження вибрані за результатами попередніх експериментів і на основі апріорної інформації (таблиця 1).

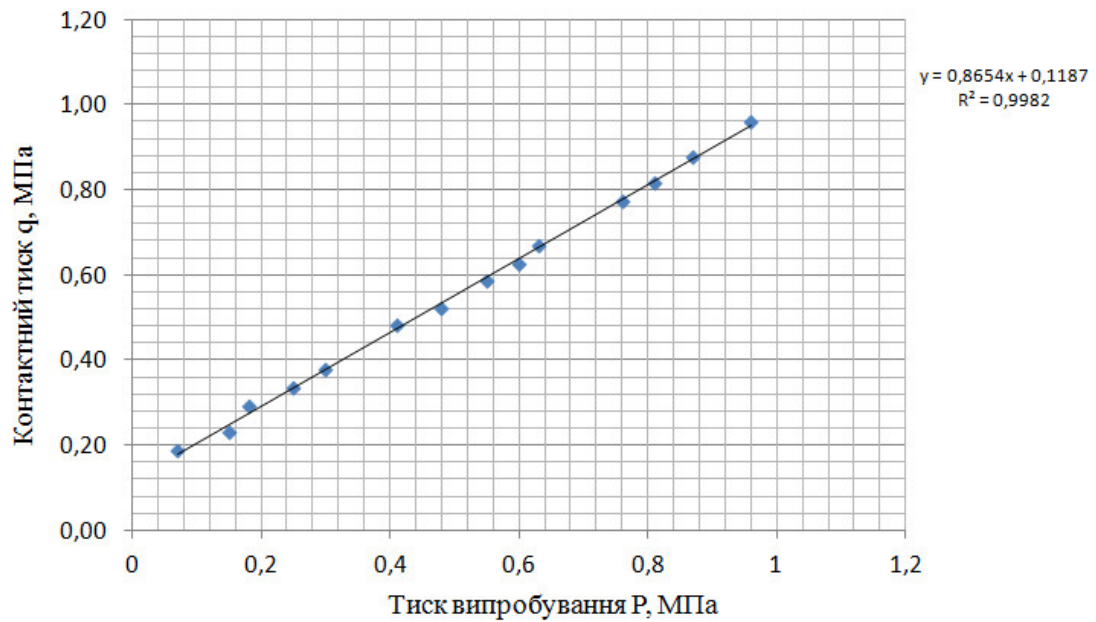


Рисунок 5 – Графічна залежність контактної тиску від тиску випробування

Таблиця 1 – Основні рівні, інтервали варіювання факторів та межі області дослідження

Фактор	Позначення	Код	Одиниця виміру	Інтервал виміру	Основні рівні				
					-2	-1	0	+1	+2
Діаметральний натяг	$\Delta$	$X_1$	мм	1	1	2	3	4	5
Тиск випробування	P	$X_2$	МПа	5	10	15	20	25	30
Радіальний зазор	$\delta$	$X_3$	мм	1	1	2	3	4	5
Модуль зсуву матеріалу ущільнення	$\sigma_{зс}$	$X_4$	МПа	10%	2,93	2,75	2,47	1,94	1,72

Функція відгуків апроксимована поліномом другого порядку виду

$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} X_i X_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} X_i^2, \quad (2)$$

де  $k$  – число незалежних змінних.

Обробкою результатів експерименту та аналіз регресійної моделі здійснено за допомогою модуля «Планування експерименту» статистичної програми Statgraphics 5.0 Plus. Рівняння регресії з урахуванням значущості коефіцієнтів набуло вигляду

$$q = 30,475 + 1,28975 \cdot X_1 + 1,99608 \cdot X_2 - 1,62917 \cdot X_3 + 1,19583 \cdot X_4 - 0,031875 \cdot X_1^2 + 0,10625 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,11875 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,00625 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,045375 \cdot X_2^2 - 0,11875 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,00625 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,27875 \cdot X_3^2 + 0,00625 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,04625 \cdot X_4^2. \quad (3)$$

Коефіцієнти моделі наведено у нормованому (кодованому) вигляді. Адекватність отриманої регресійної моделі підтверджується ве-

ликим значенням коефіцієнта детермінації  $R^2$ -квадрат, який склав 99,55%. Значення коефіцієнтів моделі визначали за допомогою  $F$ -рівня і відображена на стандартизованому Парето-графіку (рисунок 6).

Вертикальна лінія на графіку відповідає 95% статистичній значущості коефіцієнтів.

За результатами проведених досліджень були отримані значення та графічні залежності контактних тисків від вказаних факторів впливу.

На рисунку 7 представлено тривимірний графік залежності контактної тиску від тиску випробування та натягу. На рисунку 10 показано тривимірний графік залежності контактної тиску від тиску випробування та радіального зазору.

Враховуючи нестабільність контактних тисків по довжині спряженої поверхні було отримано графічну залежність при тиску випробування 35 МПа (рисунок 8).

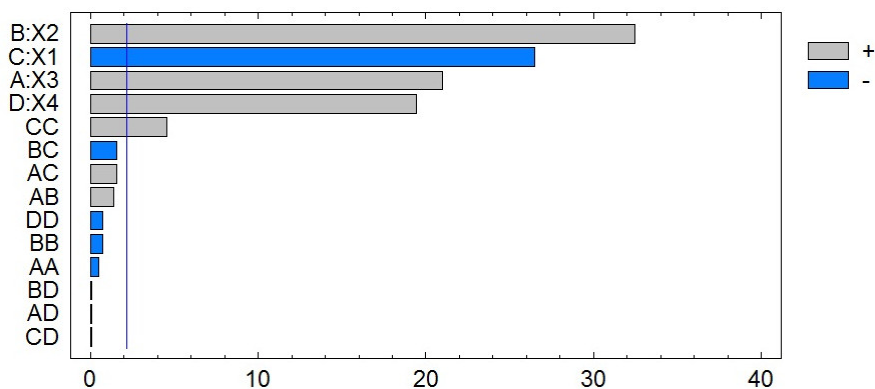
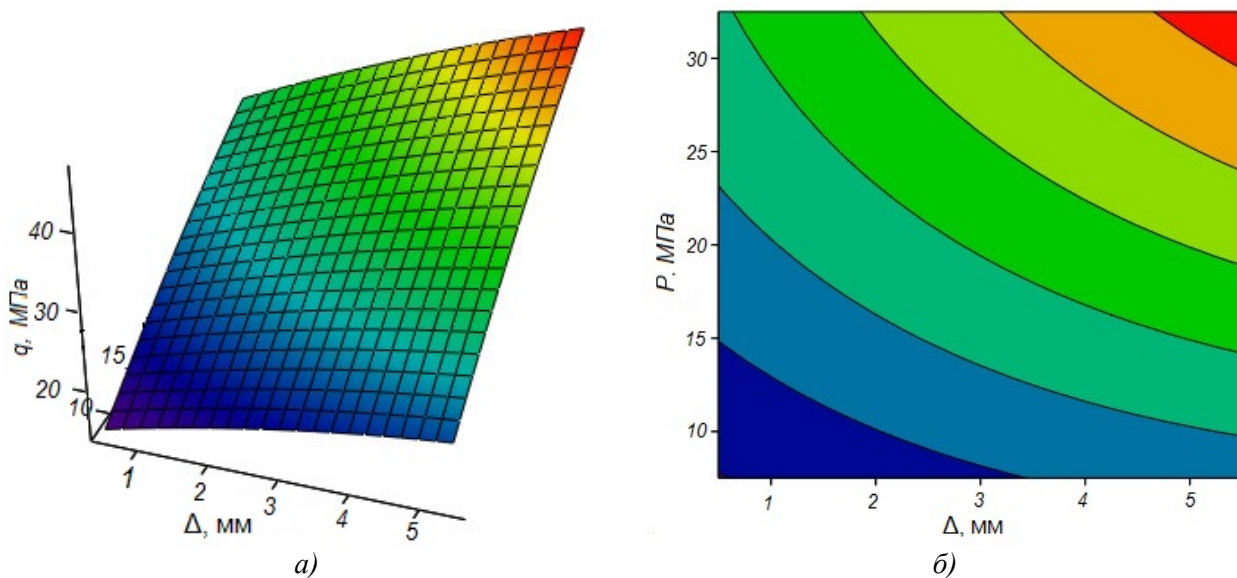
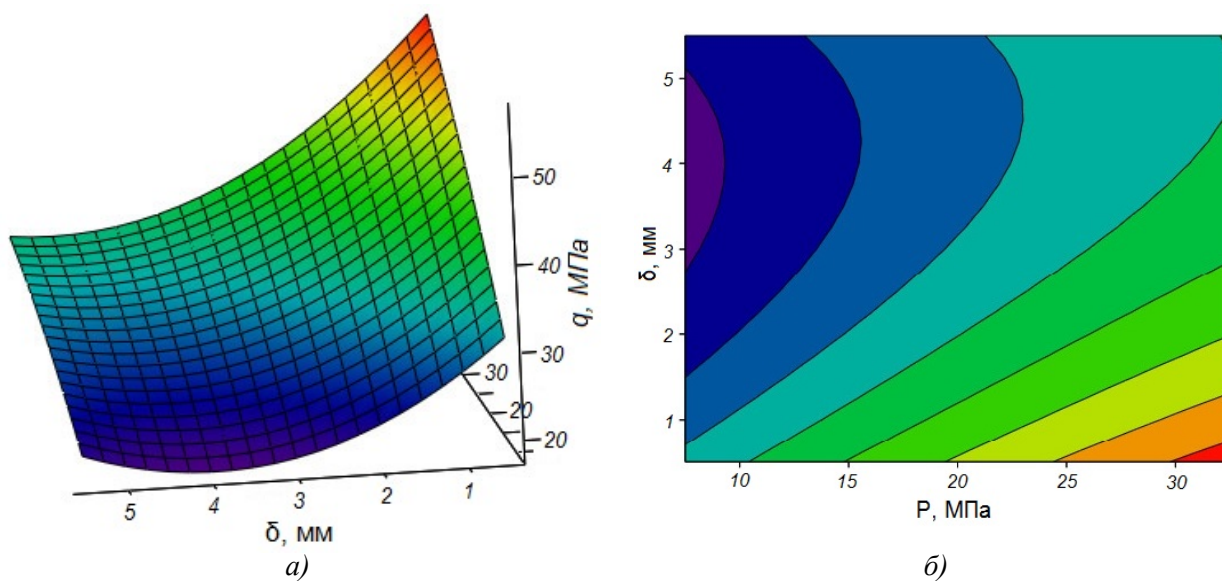


Рисунок 6 – Значення коефіцієнтів моделі



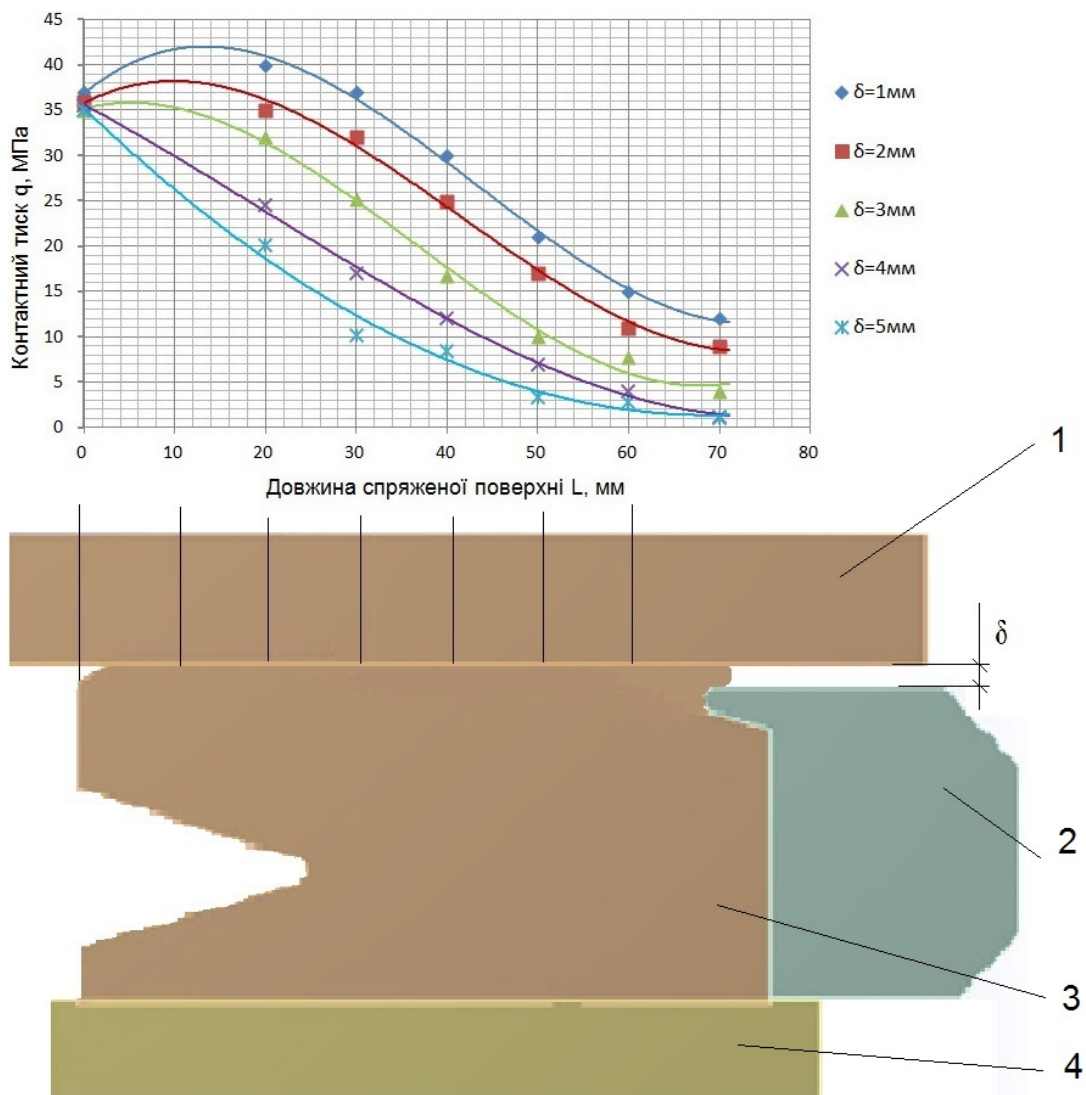
*a – тривимірна поверхня; б – контурна крива*

Рисунок 7 – Тривимірний графік залежності контактного тиску від тиску випробування та натягу манжети



*a – тривимірна поверхня; б – контурна крива*

Рисунок 8 – Тривимірний графік залежності контактного тиску від тиску випробування та радіального зазору



1 – обсадна труба; 2 – упор; 3 – самоущільнююча манжета; 4 – ствол пакера  
**Риснок 9 – Графік розподілу контактних тисків по довжині спряженої поверхні залежно від радіального зазору при тиску випробування 35 МПа**

Аналіз отриманої графічної залежності (рисунк 9) свідчить, що при максимальному тиску випробування, герметизаційна здатність самоущільнюючої манжети знижується вже при величині понад 2 мм. При значенні радіального зазору більше за 2 мм, тиск випробування має бути зменшеним, що не завжди відповідає плану робіт з випробування устьового та противикидного обладнання.

### Висновки

1 Контактні тиски зменшуються при збільшенні радіального зазору від кромки робочої губи до опорної частини манжети. Інтенсивність спаду контактних тисків збільшується, коли радіальний зазор перевищує 2 мм.

2 Контактні тиски зменшуються при збільшенні модуля зсуву матеріалу манжети. Це пов'язано з тим, що при збільшенні модуля зсуву збільшується опір пружній деформації, а, отже, зменшується інтенсивність росту контактних тисків.

3 Визначення величини попередніх контактних тисків дало змогу визначити раціональний натяг манжети, що склав від 4 до 6 мм на діаметр.

4 Отримано характер розподілу контактного тиску по довжині спряженої поверхні від дії різних факторів, що було враховано при конструюванні вдосконаленої самоущільнюючої манжети.

### Література

1 Костриба І.В. Гумові технічні вироби в нафтогазовому обладнанні [Текст] / І.В. Костриба, І.І. Шостаківський. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. – 324 с.

2 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. – Івано-Франківськ, 2013. – С. 54-56.



3 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.

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 Римчук Д.В. Нові технічні засоби ДП «ЛІКВО» для забезпечення фонтанної та газової безпеки під час буріння та капітального ремонту свердловин [Текст] // Нафтогазова галузь України. – 2015. – № 6. – С.37–40.

6 Buyalich G.D. Modeling of Hydraulic Power Cylinder Seal Assembly Operation [Text] / G. D. Buyalich, K. G. Buyalich // Presented at Mining 2014: Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control: Chinese Coal in the Century: Mining, Green and Safety, China, Qingdao, 17–20 October 2014. – Amsterdam – Paris – Beijing: Atlantis Press, 2014. – P. 167–170.

7 Boart P. On the Normal Stress Effect in Grease-Lubricated Bearing Seals [Text] // P. Boart, M. Lugt, B. Procash // Tribology Transactions. – 2014. – Vol. 57. – Issue 5. – P. 939–943.

8 Huang Y. Simulation of the Effects of a Plunge Ground Rod on Hydraulic Rod Seal Behavior [Text] // Y. Huang, R. Slant // Tribology Transactions. – 2013. – Vol. 56. – Issue 6. – P. 986–996.

9 Лепетов В.А. Расчет и конструирование резиновых изделий [Текст] / В.А. Лепетов, Л.Н. Юрцов. – М: Химия. – 1977. – 408 с.

10 Сергеев П.В. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин (практикум) [Текст] / П.В. Сергеев, В.С. Білецький. – Маріуполь: Східний видавничий дім, 2016. – 119 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
12.05.16*

*Рекомендована до друку  
професором **Бойком В.С.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Павленком А.М.***

*(Полтавський національний технічний  
університет ім. Ю. Кондратюка, м. Полтава)*