

Машини нафтової та газової промисловості

УДК 622.2

DOI: 10.31471/2304-7399-2025-21(79)-447-456

УДОСКОНАЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЕННЯ СВЕРДЛОВИННОГО ПАКЕРА

Р. В. Рачкевич , **Л. Є. Шкіца** , **І. Я. Фафлей** ,
О. М. Матвієнків , **В. Д. Миндюк** , **В. М. Ковтун** 

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. 0966587275, e-mail: oleh.faflei@nung.edu.ua

У статті розглянуто проблему підвищення герметизуючої здатності ущільнювачів свердловинних пакерів, які є ключовими елементами у складі експлуатаційного та технологічного обладнання нафтогазових свердловин. Пакери забезпечують ізоляцію окремих інтервалів стовбура свердловини, що необхідно для виконання технологічних операцій, таких як гідророзрив пласта, нагнітання води чи газу з метою підтримання пластового тиску, проведення термічних і кислотних обробок, а також випробувань обсадних колон і гирлового обладнання. Від герметичності пакера залежить ефективність цих процесів, безпека персоналу і запобігання аваріям у свердловині. У роботі детально проаналізовано конструкцію ущільнювальних вузлів пакерів та фактори, що впливають на їхню роботу. Показано, що основною проблемою при використанні традиційних гладких гумових манжет є нерівномірний розподіл контактних напружень уздовж поверхні ущільнення. Це призводить до передчасного зносу гуми, зниження герметизуючої здатності та збільшення ризику прориву робочого середовища. Встановлено, що матеріали ущільнювачів мають відповідати вимогам до стійкості проти дії агресивних середовищ, високих температур і тисків, а також до деформацій. Для дослідження роботи ущільнювального вузла виконано імітаційне моделювання методом скінченних елементів із використанням моделі Муні-Рівліна, яка адекватно описує нелінійну поведінку гумових матеріалів. Модель дозволила визначити розподіл контактних тисків між манжетою та обсадною колоною, а також оцінити вплив геометрії ущільнювача, коефіцієнта тертя та монтажних зусиль на герметичність системи. На основі результатів моде-

лювання розроблено вдосконалену конструкцію ущільнювального елемента із кільцевими виступами на зовнішній поверхні, що забезпечує більш рівномірний розподіл напружень і підвищення контактних тисків у зонах контакту. Дослідження показали, що застосування манжети із кільцевими виступами дозволяє досягти підвищення герметизуючої здатності на 15–20% при тих самих або менших монтажних зусиллях у порівнянні зі стандартним гладким ущільнювачем. Також встановлено, що зі збільшенням коефіцієнта тертя між гумою і металевою поверхнею відбувається часткове розвантаження верхнього ущільнювача, що може призводити до втрати герметичності. З метою зменшення цього ефекту рекомендовано застосування спеціальних мастильних матеріалів і поверхневих покриттів, які забезпечують стабільне тертя й покращують прилягання манжет до обсадної колони. Отримані результати дослідження мають важливе практичне значення для вдосконалення конструкцій свердловинних пакерів нового покоління.

Ключові слова: нафтогазове обладнання, свердловинне обладнання, свердловинний пакер, ущільнювальний елемент, імітаційне моделювання, контактний тиск.

Вступ. Пакери широко застосовуються на нафтових і газових свердловинах для проведення різних технічних операцій, серед яких: гідророзрив пласта, закачування води для підтримання пластового тиску, термічна та кислотна обробка привибійної зони, а також випробування противикидного та гирлового обладнання. Завдяки своїй універсальності пакери є незамінними інструментами для ізоляції окремих інтервалів свердловини, створення контрольованих умов у стовбурі та забезпечення ефективності технологічних процесів.

Основним елементом пакера є ущільнювальний вузол, від якого залежить герметичність усієї конструкції. Він повинен відповідати ряду вимог:

- забезпечувати високу герметичність навіть у складних умовах експлуатації;
- бути простим в обслуговуванні та монтажі, що особливо важливо при роботі у віддалених районах;
- мати стійкість до агресивних середовищ (високі концентрації солей, нафта, газ, кислоти, термічні впливи).

Ці вимоги повинні бути закладені ще на етапі конструкторської розробки пакера, оскільки саме від них залежить його надійність [1–3]. Особливу увагу приділяють гумовим ущільненням, які є найбільш вразливими елементами конструкції. Вони піддаються дії:

- механічних навантажень (стиск, розтяг, зсув);
- гідравлічного тиску бурових і технологічних рідин;
- термічних впливів при високих температурах у свердловині;
- хімічної агресії з боку пластових флюїдів і реагентів.

У результаті таких впливів гума швидко деформується, втрачає еластичність і герметизуючі властивості, що може призвести до аварійних ситуацій.

Для забезпечення міцності та довговічності гумових ущільнень, а також підвищення надійності всієї конструкції пакера, необхідно проводити ретельний аналіз чинників, що впливають на їхню роботу. До таких чинників належать:

- правильний вибір матеріалу (спеціальні гумові суміші, полімери, армовані композиції);
- оптимізація геометрії;
- використання захисних покриттів і добавок, що підвищують стійкість до зносу та корозії.

Ефективність пакера визначається не лише його конструктивними особливостями, але й якістю матеріалів ущільнювального вузла та здатністю витримувати комплексні навантаження. Вдосконалення конструкції елементів пакера є одним із ключових напрямів підвищення надійності та безпечності експлуатації нафтових і газових свердловин.

Наукова та практична цінність.

Цінність роботи полягає у вдосконаленні підходів до аналізу напружено-деформованого стану самоущільнювальних манжет пакерів та обґрунтуванні доцільності застосування ущільнювача із кільцевими виступами для підвищення контактного тиску.

Оцінки можливості використання отриманих результатів для розроблення пакерів із підвищеною герметичністю та надійністю.

Формування цілей статті. Мета роботи полягає у вдосконаленні та дослідженні ущільнювача свердловинного пакера за допомогою імітаційного моделювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- побудувати розрахункову схему роботи ущільнювача пакера із врахуванням як діючих навантажень та обмежень, так і різних коефіцієнтів тертя між його елементами;
- проаналізувати напружено-деформований стан стандартного ущільнювача пакера та вдосконалити його;
- виконати імітаційне моделювання вдосконаленої конструкції ущільнювача пакера та порівняти напружено-деформований стан із напружено-деформованим станом стандартної конструкції ущільнювача.

Основний матеріал і результати. Основними факторами, які впливають на герметизаційну здатність манжет свердловинних пакерів при випробуванні устьового та противикидного обладнання є експлуатаційні, конструктивні та технологічні. До експлуатаційних належить тиск випробувальної рідини, до конструктивних – геометричні розміри та форма ущільнення, величина радіального зазору між вузлом ущільнення та обсадною колоною [4].

Наразі не існує єдиної спеціалізованої бази для якісного проектування манжет свердловинних випробувальних пакерів. Для проведення експ-

периментальних і теоретичних досліджень ущільнювальної здатності самоущільнювальних манжет необхідно визначити підхід до їх комплексної оцінки. Комплексна оцінка ущільнювальної здатності гумових самоущільнювальних манжет у загальному машинобудуванні зазвичай проводиться за кількома критеріями [5]: максимальний початковий контактний тиск $q_{0таx}$ у зоні герметизації «манжета пакера – обсадна колона»; максимальний контактний тиск $q_{таx}$ у зоні герметизації «манжета пакера – обсадна колона» в процесі випробування, коефіцієнт герметизації. Останній критерій характеризує повноту перекриття мікронерівностей, каналів, раковин ущільнювальної поверхні. Більші значення критерію відповідають більшій ймовірності перекриття мікронерівностей.

Враховуючи специфіку експлуатації такого обладнання та необхідність отримання високонадійних результатів, необхідним є проведення серії експериментів для дослідження герметизаційної здатності з метою визначення контактного тиску спряжених поверхонь «самоущільнювальна манжета - обсадна колона». Оскільки герметизаційна здатність аналітично не залежить від експлуатаційних і конструктивних факторів, бажано дослідити напружено-деформований стан самоущільнювальної манжети свердловинного випробувального пакера. Для цього доцільно застосувати імітаційне моделювання методом скінченних елементів. Під час моделювання для опису поведінки гіперпружного матеріалу – гуми, з якої виготовлено ущільнення пакера, зазвичай застосовують модель Му-ні-Рівліна, яка найточніше описує його поведінку [6, 7, 8].

Метод скінченних елементів використовується у САЕ-систем, що дає можливість швидко та ефективно проводити дослідження з різною варіацією вхідних даних [9].

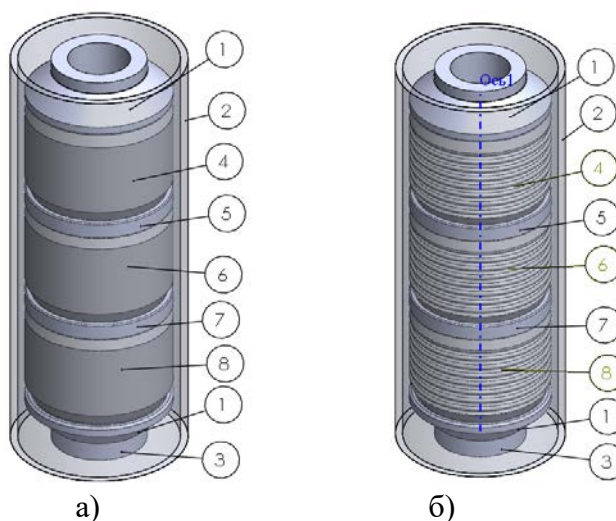
У роботах Дорохова [10, 11] проведено дослідження напружено-деформованого стану самоущільнювальної манжети пакера, результати яких засвідчили суттєву нерівномірність розподілу еквівалентних напружень по тілу манжети з концентрацією їх максимальних величин в опорній частині близько до зони радіального зазору. Доведено, що зі збільшенням радіального зазору витискання матеріалу в зазор суттєво зростає. Для прототипної манжети пакера з діаметральним натягом 1 мм та радіальним зазором 3 мм характерними є коефіцієнт запасу міцності 1,92 та низький коефіцієнт герметизації $\alpha=0,73$. Цим доведено необхідність розроблення самоущільнювальної манжети з урахуванням встановлених раціональних конструктивних параметрів.

В праці [12] побудовано розрахункову схему роботи ущільнення пакера із врахуванням як діючих навантажень та обмежень, так і різних коефіцієнтів тертя між її елементами. Закцентовано, що герметизуюча здатність ущільнення пакера залежить від величини та розподілу контактного тиску на поверхнях ущільнювачі – експлуатаційна колона, а також від геометричної форми складових елементів. Принцип роботи трьох ущільнювачів пакера, величини та розподіл контактного тиску на

їх ущільнювачах будуть однаковими за умови, що коефіцієнт тертя гума-сталь буде наближатись до нуля, що не можливо досягнути за реальних умов. Проведене імітаційне моделювання роботи ущільнення пакера дозволило встановити величини та розподіл контактних тисків на ущільнювачах за різних величин коефіцієнтів тертя.

Аналіз досліджень розподілу та величин контактних тисків у конструкціях свердловинних пакерів показує їх нерівномірність по ущільнювачах, та низькі величини. Аналізуючи різноманітні конструкції та особливості елементів свердловинних пакерів помічено, що у них зазвичай застосовуються гладкі поверхні ущільнювачів. Натомість, у сучасних конструкціях ущільнювачів, які використовуються у автотранспорті, зовнішні поверхні мають кільцеві виступи. Для підвищення величин контактних тисків доцільно спробувати змінити конструкцію ущільнювачів та встановити їх розподіл та величини за умови прикладання таких же граничних умов, як і до стандартного ущільнювача.

Конструкція ущільнювача пакера, яке використовувалось під час імітаційного моделювання, наведено на рис. 1. Принцип роботи наступний: конус 1 встановлений нерухомо на штоку 3, на якому також розміщені послідовно ущільнювачі 4, 6, 8 відокремлені між собою за допомогою кілець 5 та 7. Конус 1 при дії осьового зусилля переміщується вгору, що призводить до стискання у осьовому напрямку ущільнювачів 4, 6, 8, які при цьому розтискаються у радіальному напрямку і контактують із експлуатаційною колоною 2. При цьому на поверхні контакту створюється контактний тиск, який за величиною повинен бути більшим тиску середовища, що герметизується.



1 – конус; 2 – експлуатаційна колона; 3 – шток; 4 – верхній ущільнювач; 5,7 – кільце; 6 – середній ущільнювач; 8 – нижній ущільнювач; а) ущільнювач гладкий; б) ущільнювач із кільцевими виступами

Рис. 1. Конструкції елементів пакерів

Оскільки герметизуюча здатність ущільнення пакера залежить від величини та розподілу контактного тиску на поверхнях ущільнювачів та експлуатаційної колони, то проведено імітаційне моделювання. За наведеного принципу роботи ущільнення пакера величини та розподіл контактного тиску на ущільнювачах 4, 6 та 8 будуть однаковими при умові, що коефіцієнт тертя гума-сталь буде наближатись до нуля. За реальних умов експлуатації ущільнення досягнути такого значення коефіцієнту тертя неможливо. Частина досліджень, що стосуються ущільнювача пакера (рис. 4, а) наведені у праці [12].

Вдосконалення конструкції пакера полягає у зміні форми контактуючих поверхонь ущільнювачів, а саме заміна гладкої на поверхню із кільцевими виступами (рис. 4, б). Форма та розміри ущільнювача із кільцевими виступами прийнята з конструктивних міркувань. У конструкції ущільнення пакера передбачено зазори між кільцями 5, 7 та штоком 3, а також між штоком 3 та конусом 1. Ці зазори компенсують деформації елементів ущільнення, що можуть бути викликані дією температури.

Конструкції ущільнювачів досліджувались за однакових граничних умов, і відповідно, однакової розрахункової схеми, згідно якої конус 1 закріплений нерухомо на штоку 3. Конус 1 може переміщуватись в осьовому напрямку на величину 55 мм [12].

Під час проведеного імітаційного моделювання застосовано осесиметричну модель ущільнення герметизатора.

Для деталей ущільнення пакера, а саме конуса 1, експлуатаційної колони 2, штока 3 та кільця 5,7 прийнято сталь. Для верхнього ущільнювача 4, середнього ущільнювача 6 та нижнього ущільнювача 8 – гума.

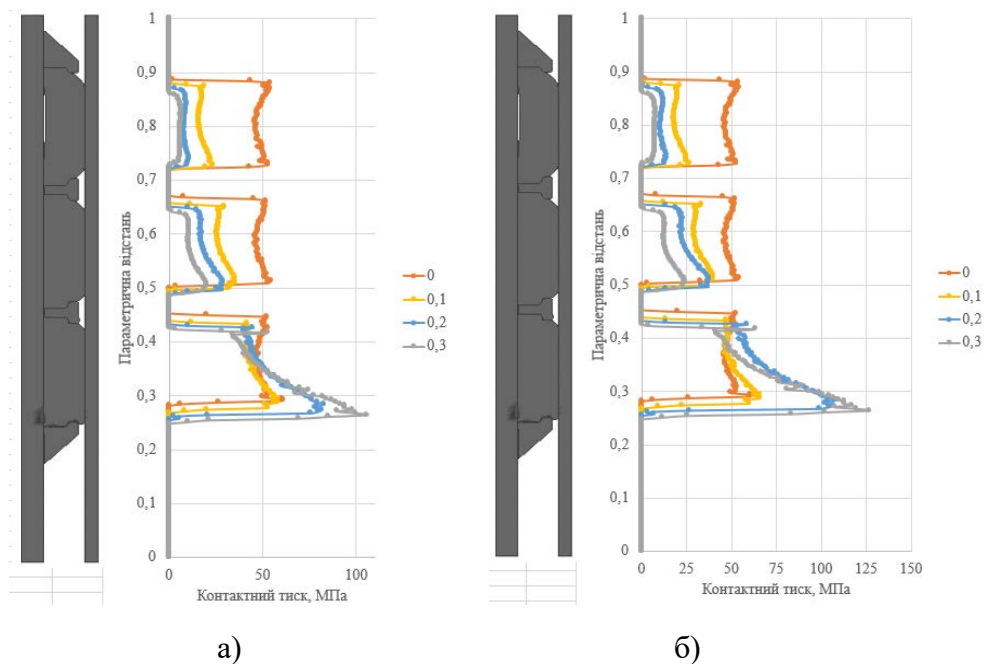
Дослідження роботи ущільнень пакерів проведено за різних коефіцієнтів тертя (0; 0,1; 0,2; 0,3) між поверхнями ущільнення-експлуатаційна колона.

Налаштування сітки скінченних елементів виконано із ввімкненою функцією автоматичного переходу та інструменту "керування сіткою" програми, що дозволило оптимізувати розміри скінченних елементів біля контактних поверхонь деталей пакера [6].

У результаті досліджень за допомогою імітаційного моделювання очікувалось отримати підтвердження того, що на контактуючих поверхнях за використання ущільнювача із кільцевими виступами буде отримано більшу величину контактного тиску порівняно із гладким ущільнювачем.

Аналізуючи отримані результати імітаційного моделювання, а саме розподіл переміщень у досліджуваній моделі, можна зробити висновок, що при збільшенні коефіцієнта тертя відбувається вихід з контакту першого (зверху) ущільнювача, тобто утворюється зазор між внутрішньою поверхнею ущільнювача і штоком. Таке переміщення зменшує герметизуючу здатність першого ущільнювача.

Розподіл контактного тиску на поверхні контакту «ущільнювач із кільцевими виступами-обсадна колона» за різних величин коефіцієнтів тертя та конструкцій ущільнювача (гладкого та із кільцевими виступами) показано на рис. 2.



а) ущільнювач гладкий; б) ущільнювач із кільцевими виступами

Рис. 2. Розподіл контактний тиску по довжині кромки експлуатаційної колони та ущільнювача за різних величин коефіцієнтів тертя

Отже, виходячи із отриманих результатів імітаційного моделювання, для забезпечення герметичності ущільнення пакера слід при його збиранні знижувати величину коефіцієнта тертя на поверхнях контакту всіх деталей, застосовуючи для цього відповідні мастильні матеріал [12].

Порівнявши два ущільнювачі (гладкий та із кільцевими виступами) можна зробити висновок, що ущільнювач із кільцевими виступами має більші контактні тиски при меншій силі установки пакера. Тобто якщо в свердловині будуть високі тиски і не вистачатиме ваги колони НКТ для повного герметичного встановлення пакера з гладким ущільненням, то можна використати експериментальний ущільнювач із кільцевими виступами. За допомогою зубців збільшується контакт між ущільнювачом і експлуатаційною колоною і при таких самих навантаженнях як і на гладкий ущільнювач, витримуватиме більші тиски на 15-20%.

Висновок. Для комплексної оцінки самоущільнювальних пакерів проаналізовано основні фактори впливу на їх герметизаційну здатність та виділено основні критерії для подальшого дослідження. Враховуючи

особливості їх експлуатації та необхідність отримання результатів високої достовірності використано метод кінцевих елементів, який дозволяє визначити напружено-деформований стан елементів, отримати значення контактних тисків, деформацій, переміщень, тощо.

Побудовано розрахункову схему роботи ущільнення пакера із врахуванням як діючих навантажень та обмежень, так і коефіцієнтів тертя між елементами ущільнення та самої форми складових частин пакера, які відіграють ключову роль при роботі цих елементів.

Проаналізовано напружено-деформований стан стандартного ущільнювача пакера та встановлено розподіл та величини контактного тиску, які є різними для кожного з трьох ущільнювачів.

З метою підвищення величин контактного тиску вдосконалено стандартну конструкцію ущільнювача пакера, а саме змінено форму контактуючих поверхонь ущільнювачів – з гладкої на поверхню із кільцевими виступами.

Виконане імітаційне моделювання вдосконаленої конструкції ущільнювача пакера та порівняння його напружено-деформованого стану із напружено-деформованим станом стандартного ущільнення дало змогу зробити висновок, що ущільнювач із кільцевими виступами має більші контактні тиски при меншій силі установки пакера. За допомогою зубців збільшується контакт між ущільнювачем та експлуатаційною колоною, і за однакових навантажень вдосконалений ущільнювач витримуватиме більші тиски на 15-20% порівняно із гладким ущільнювачем.

Література

1. Dorokhov M., Kostriba I, Biletskyi V. Experimental research on the sealing ability of borehole packers. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Т. 4, N 8(82). С. 56–62. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.74831 (Scopus).
2. Дорохов М. А., Костриба І. В. Дослідження герметизаційної здатності гумових ущільнень устьових випробувальних пакерів. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2016. № 2 (59). С. 22–30.
3. Дорохов М. А., Костриба І. В. Розробка свердловинного пакера для випробування устьового та противикидного обладнання. Нафтогазова енергетика. 2016. № 1(25). С. 12–21.
4. Світлицький В.М. Ягодовський С.І., Галустян Г.Р. Поточний та капітальний ремонт свердловин. – К.: Логос, 2001. – 344 с.
5. Рудь Ю. С. Основи конструювання машин: підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. – 2-ге вид., переробл. – Кривий Ріг : Видавець ФО-П Чернявський Д. О., 2015. – 492 с.: іл.
6. Mooney, M. A theory of large elastic deformation. Journal of Applied Physics 1940; 11(9): 582–592.

7. Rivlin, R.S. Large elastic deformations of isotropic materials. VI. Further results in the theory of torsion, shear and flexure. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences 1949; 242: 173–195.
8. Buyalich G. D., Buyalich K. G. Modeling of Hydraulic Power Cylinder Seal Assembly Operation. Presented at Mining 2014: Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control: Chinese Coal in the Century: Mining, Green and Safety (17–20 October 2014, Qingdao). Amsterdam, 2014. – pp. 167–170. DOI: 10.2991/mining-14.2014.26.
9. <https://www.solidworks.com>.
10. Дорохов М. А., Костриба І. В., Михайлюк В. В. Аналіз герметизаційної здатності гумових ущільнень випробувальних пакерів у рамках САЕ-систем. Зб. наук. праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Полтава, 2016. № 2 (47). С. 303–313. (Index Copernicus).
11. Дорохов М. А., Костриба І. В. Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану ущільнення свердловинних пакерів. Нафтогазова інженерія. 2016. С. 103–109.
12. Федорович Я.Т., Фафлей О.Я., Фафлей І.Я., Захара І.Я., Борушак Л.О., Самсонов О.О. Дослідження роботи свердловинного пакера за різних величин коефіцієнтів тертя між його елементами. Нафтогазова енергетика, 2024. №1 (41). С.76-85. DOI: 10.31471/1993-9868-2024-1(41)-76-85.

Стаття надійшла до редакційної колегії 03.11.2025 р.

Прийнято до друку 02.12.2025 р.

IMPROVEMENT AND RESEARCH OF WELLBORE PACKER SEAL

**R. V. Rachkevych , L. Y. Shkitsa , I. Ya. Faflei ,
O. M. Matvienkiv , V. D. Myndiuk , V. M. Kovtun **

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, Karpatska St., 15*

The article describes the problem of increasing the tightness of the seals of well packers, which are important elements of operational and technological equipment of oil and gas wells. Packers isolate separate well intervals, which is necessary to perform technological operations, such as hydraulic fracturing of a productive horizon, injection of water or gas to maintain productive horizon pressure, carry out thermal and acid treatments and tests of casing and mouth equipment. The effectiveness of these processes, the safety of staff and the prevention of accidents in the well depends on the tightness of the packer. The article analyzes the design of the packers sealing units and the factors that affect their work. It is shown that the main

problem when using traditional smooth rubber cuffs is the uneven distribution of contact stresses along the surface of the seal. This is the cause of intense wear of rubber, reducing tightness and increasing the risk of breakthrough of the working environment. It is established that seals materials should meet the requirements for resistance against aggressive environment, high temperatures and pressures, as well as deformation. To study the functioning of the sealing unit, simulation modeling was made by the method of finite elements using a model of Muni-Rivlin, which adequately describes the nonlinear behavior of rubber materials. The model allowed to determine the distribution of contact pressure between the cuff and the casing, as well as to evaluate the effect of the geometry of the seal, the friction coefficient and the installation efforts on the tightness of the system. On the basis of modeling results, an advanced structure of the sealing element with a corrugated surface was developed, which provides a more uniform distribution of stresses and increase contact pressure in contact areas. Our research have shown that the use of a corrugated cuff allows to increase the sealing capacity by 15-20% with the same or smaller installation efforts regarding to a standard smooth seal. It is also established that the increase of the friction coefficient between the rubber and the metal surface causes partial unloading of the upper seal, which can cause loss of tightness. To reduce this effect, it is recommended to use special lubricants and surface coatings that provide stable friction and improve the fit of the cuffs to the casing. The results of the article have of great practical importance for improving the new generation well packers.

Key words: Oil and gas equipment, well equipment, well packer, simulation modeling, contact pressure.