

**Гребенюк С.Н.**, канд. техн. наук,  
**Решевская Е.С.**, канд. техн. наук, доцент,  
**Васько В.М.**, магистр  
 (ЗНУ),  
**Дорохов М.А.**, аспирант,  
**Костриба И.В.**, канд. техн. наук, доцент  
 (ИФНТУНГ),  
**Агальцов Г.Н.**, инженер,  
**Новикова А.В.**, магистр  
 (ИГТМ НАН Украины)

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗИНОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ПАКЕРОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ УСТЬЕВОГО И ПРОТИВОВЫБРОСОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Гребенюк С.М.**, канд. техн. наук, зав. каф.,  
**Решевська К.С.**, канд. техн. наук, доцент,  
**Васько В.М.**, магистр, викладач  
 (ЗНУ),  
**Дорохов М.А.**, магистр, аспірант,  
**Костриба І.В.**, канд. техн. наук, доцент  
 (ИФНТУНГ),  
**Агальцов Г.М.**, инженер, мол. наук. співр.,  
**Новікова А.В.**, магистр, мол. наук. співр.  
 (ИГТМ НАН України)

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГУМОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ ПАКЕРІВ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ УСТЬЕВОГО ТА ПРОТИВИКИДНОГО ОБЛАДНАННЯ

**Grebenyuk S.N.**, Ph. D. (Tech.), Head of the Department,  
**Reshevskaya K.S.**, Ph. D. (Tech.), Associate Professor,  
**Vasko V.M.**, Master of Science (Tech.), Teacher  
 (ZNU),  
**Dorokhov M.A.**, Master of Science (Tech.), Ph. D. Student,  
**Kostriba I.V.**, Ph. D. (Tech.), Associate Professor  
 (IFNUOG),  
**Agaltsov G.N.**, Engineer, Junior Researcher,  
**Novikova A.V.**, Master of Science (Tech.), Junior Researcher  
 (IGTM NAS of Ukraine)

## STUDY OF A STRESS-STRAIN STATE OF PACKER RUBBER SEALS FOR TESTING CONTROL HEAD AND BOP EQUIPMENT

**Аннотация.** Рассматривается напряжённо-деформированное состояние резинового уплотнения пакера манжетного типа. Такие пакеры относятся к самоуплотнительным, используются для проверки герметизационной способности нефтяных и газовых скважин и срабатывают под действием давления в скважине.

Для решения задачи в программном комплексе «МИРЕЛА+» используется пространственно-временной конечный элемент. В результате численного расчёта были получены распределения величин перемещений, деформаций и напряжений резинового элемента с учётом вязкоупругого деформирования. Получена величина осадки манжеты в зависимости от нагрузки с учётом реологических характеристик материала.

**Ключевые слова:** напряжённо-деформированное состояние, вязкоупругость, резина, пакер манжетного типа, самоуплотнительная манжета

**Введение.** В процессе сооружения нефтяных и газовых скважин с целью проверки герметизационной способности противовыбросовое и устьевое оборудование подлежит гидравлическому испытанию.

В большинстве случаев испытание проводится в условиях открытого ствола скважины. Создание в скважине при таких условиях испытательного давления может привести к

поглощению промывочной жидкости, а иногда даже до гидравлического разрыва пласта. Как следствие, в таком случае невозможно соблюсти регламентные требования процесса испытания смонтированного оборудования. Аналогичная ситуация имеет также место при испытании оборудования перед ремонтом нефтяных и газовых эксплуатационных скважин.

Для отделения ствола скважины от пре-венторов или устьевого оборудования при их испытании используют испытательные пакеры манжетного типа.

Испытательные пакеры манжетного типа относятся к самоуплотнительным и срабатывают под действием давления в скважине. Их характерная особенность – простота конструкции по сравнению с другими типами пакеров, а также одностороннее восприятие давления. На рис. 1 представлена наиболее распространённая конструкция пакера – УВЧ 168×50.

Основная составляющая часть пакера – резиновая самоуплотнительная манжета (рис. 2).

Рабочая часть манжеты выполнена в виде двух губ – внешней и внутренней. Геометрия губ должна быть такой, чтобы после спуска пакера в скважину гарантировать создание предварительных контактных давлений  $q_0$  на сопряжённых поверхностях: внутренняя губа – ствол пакера и внешняя губа – обсадная труба, что позволит реализовать принцип самоуплотнения при работе манжеты. Последнее будет иметь место при наличии натяга указанных сопряжённых

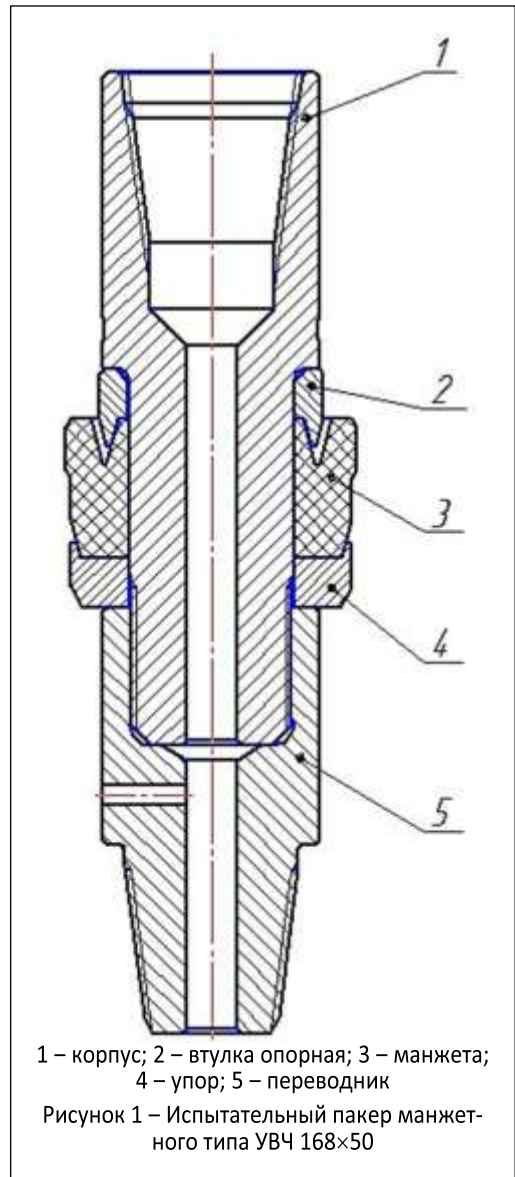


Рисунок 2 – Самоуплотнительная пакерная манжета

ных соединений.

Авторами проанализированы конструкции самоуплотнительных пакеров, изготавливаемые предприятиями Украины, России, Азербайджана, США и результаты проведённых научных исследований. Можно утверждать, что в настоящее время практически отсутствует научно-методическая база для проектирования самоуплотнительных манжет для скважинных пакеров. Отдельные рекомендации не дают возможности реализовать системный принцип проек-

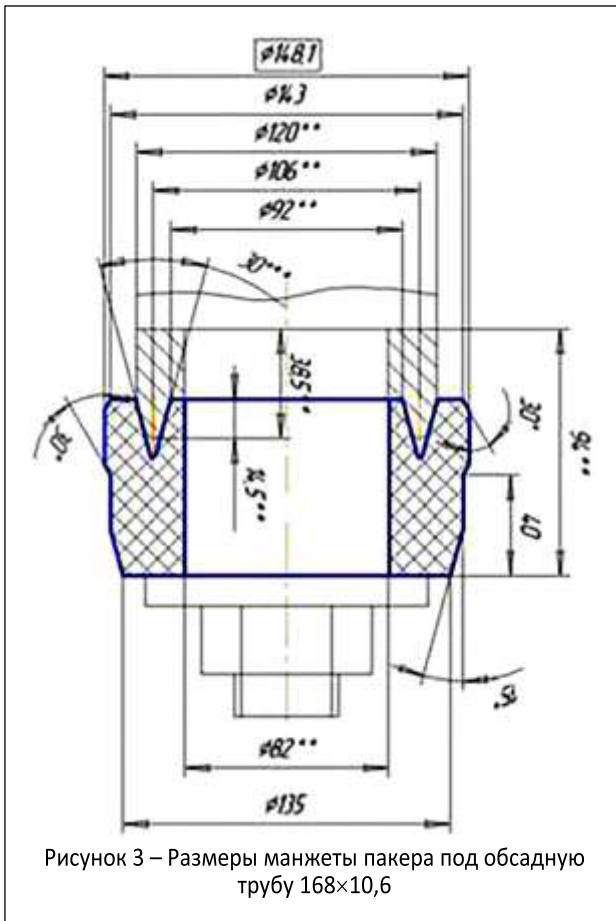


Рисунок 3 – Размеры манжеты пакера под обсадную трубу 168×10,6

тирования, не учитывают ряд факторов, имеющих место при эксплуатации пакеров.

Сложность расчёта и проектирования оптимальной конструкции манжеты связана прежде всего с особенностями механического поведения резины при значительных нагрузках, а именно: нелинейной зависимостью напряжения от деформации, не позволяет использовать законы классической теории упругости; изменением геометрической формы манжеты при нагрузках, что является следствием эластичности резины; выдавливание резины в свободные пространственные зоны и, как следствие, возникновение сложного неоднородного напряжённо-деформированного поля в материале манжеты и т.д.

Для определения напряжённо-деформированного состояния элементов со сложной формой свободной поверхности точные аналитические методы не приемлемы вследствие сложностей в решении нелинейных систем дифференциальных уравнений

в частных производных при решении краевых задач термовязкоупругости. Так, используются численные методы, основным из которых является метод конечных элементов [2].

Поэтому с помощью программного продукта «МИРЕЛА+» и была решена задача по определению напряжённо-деформированного состояния самоуплотнительной манжеты устьевого пакера.

**Численный расчёт.** Стандартный метод конечных элементов в форме метода перемещений не позволяет учитывать жёсткие смещения конечного элемента и фиктивные сдвиговые деформации – «эффект ложного сдвига». Чтобы устранить перечисленные недостатки, будем использовать моментную схему конечного элемента [3].

Для решения задачи в программном комплексе «МИРЕЛА+» [4] будем использовать пространственно-временной конечный элемент [5].

Рассмотрим эластомерную манжету, размеры которой приведены на рис. 3. Из условий эксплуатации моделируем следующие граничные условия: грань  $AB$  жёстко закреплена, грани  $AQ$  и  $CD$  закреплены в радиальном направлении, к граням  $QR$ ,  $RG$ ,  $GF$ ,  $FE$ ,  $ED$  приложена осевая нагрузка, остальные грани свободны (рис. 4).

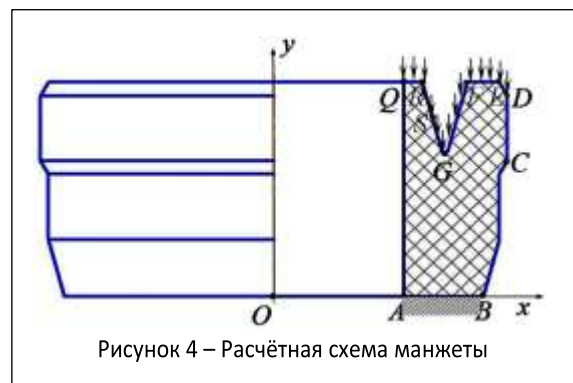


Рисунок 4 – Расчётная схема манжеты

Соответствующая конечно-элементная модель приведена на рис. 5. Упругие характеристики:  $G_0 = 2,425$  МПа,  $G_\infty = 1,312$  МПа,  $\nu = 0,49$ . Нагрузка задана на гранях  $SG$ ,  $FG$ ,  $FE$  и  $ED$ , величина её варьировалась от  $p = 0,1$  МПа до  $p = 0,5$  МПа.

В результате численного расчёта были получены распределения величин перемещений, деформаций и напряжений эластомерного элемента в условиях вязкоупругого деформирования.

Деформированная конечно-элементная модель эластомерного образца представлена на рис. 6.

Величины осадки и напряжений манжеты в различные моменты времени изображены на рис. 7 – рис. 9.

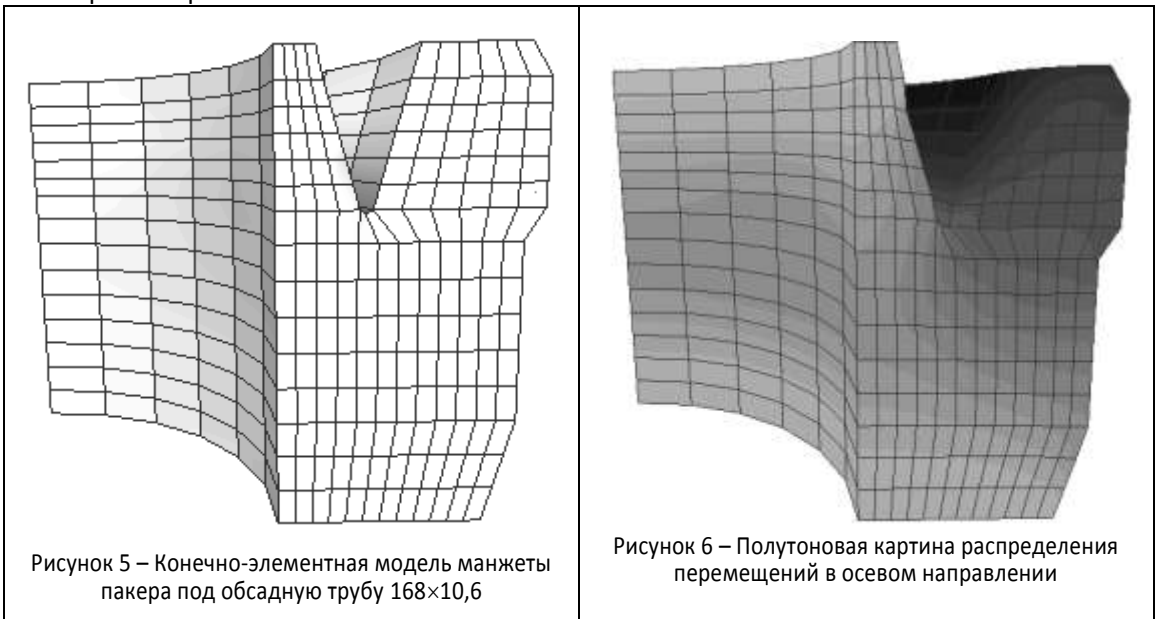


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель манжеты пакера под обсадную трубу 168×10,6

Рисунок 6 – Полутоновая картина распределения перемещений в осевом направлении

Таблица 1 – Максимальные перемещения точек грани  $DC$  эластомерного образца

Нагрузка, МПа	Перемещения ( $10^{-3}$ ), м	
	начальный момент времени	конечный момент времени
0,2	-0,064471	-0,086431
0,4	-0,12894	-0,17286
0,6	-0,19341	-0,25929
0,8	-0,25789	-0,34573
1	-0,32236	-0,43216

Таблица 2 – Величины напряжений грани  $DC$  эластомерного образца в зависимости от прикладываемых нагрузок

Нагрузка, МПа	Напряжения, МПа	
	начальный момент времени	конечный момент времени
0,2	-0,30695	-0,30698
0,4	-0,6139	-0,61396
0,6	-0,92085	-0,92094
0,8	-1,2278	-1,2279
1	-1,5347	-1,5349

В результате численного расчёта была получена величина осадки эластомерной манжеты в зависимости от прикладываемой нагрузки с учётом реологических свойств материала. Также определены величины напряжений в эластомерном образце. При этом необходимо отметить, что вследствие эффекта релаксации, напряжения в начальный и конечный моменты времени незначительно отличаются друг от друга. Учёт реологических свойств увеличивает перемещения конструкции приблизительно на 25 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СОУ 11.2-00135390-080:2011 Обустройство скважин устьевого и противовыбросового оборудования.
2. Булат, А.Ф. Прикладная механика упруго-наследственных сред. Т. 2. Методы расчёта эластомерных деталей / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. – К.: Наук. думка, 2012. – 614 с.
3. Киричевский, В.В. Обобщение моментной схемы конечных элементов для исследования конструкций из слабосжимаемых эластомеров / В.В. Киричевский // Пробл. прочности. – 1986. – № 11. – С. 105-110.
4. Метод конечных элементов в вычислительном комплексе «MIRELA +» / В.В. Киричевский, Б.М. Дохняк, Ю.Г. Козуб, С.И. Гоменюк, Р.В. Киричевский, С.Н. Гребенюк. – К.: Наук. думка, 2005. – 403 с.
5. Гребенюк, С.Н. Моментная схема конечного элемента для расчета эластомерных материалов в условиях вязкоупругого деформирования / С.Н. Гребенюк, В.М. Тархова // Вісник Запорізького національного університету: Збірник наукових статей. Фізико-математичні науки. – 2009. – № 1. – С. 78-86.

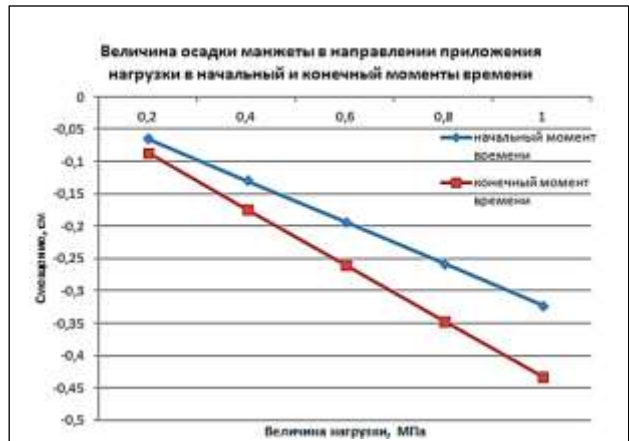


Рисунок 7 – Максимальные осевые перемещения точек грани DC манжеты

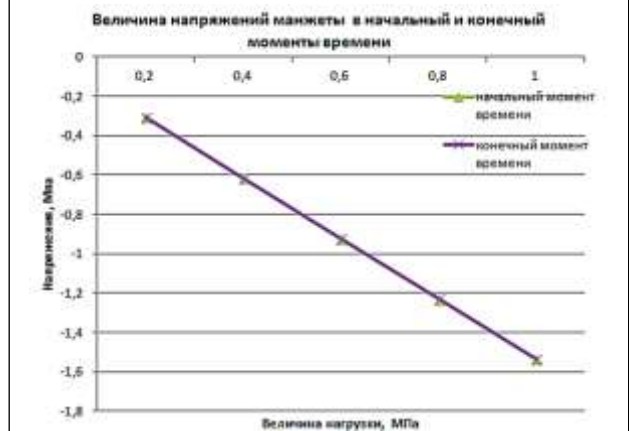


Рисунок 8 – Величина напряжений эластомерного элемента в начальный и конечный моменты времени на грани DC

### REFERENCES

1. SOU 11.2-00135390-080:2011: *Obustroystvo skvazhin ust'yevogo i protivovybrosovogo oborudovaniya*.
2. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zviagilskii, E.L. and Kobets, A.S. (2012), *Prikladnaya mekhanika uprugonastledstvennykh sred. Tom 2. Metody rascheta elastomernykh detalei* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 2. Design techniques of elastomeric parts], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
3. Kirichevskiy, V.V. (1986), "Generalized moment scheme of finite elements for the study of constructions of slightly compressible elastomers", *Problemy prochnosti*, no. 11, pp. 105-110.
4. Kirichevskiy, V.V., Dokhnyak, B.M., Kozub, Yu.G., Gomenyuk, S.I., Kirichevskiy, R.V. and Grebenyuk, S.N. (2005), *Metod konechnykh elementov v vychislitel'nom komplekse «MIRELA +»* [The finite element method in the computational complex "MIRELA +"], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
5. Grebenyuk, S.N. and Tarkhova, V.M. (2009), "Moment scheme of a finite element for calculation of elastomeric materials under viscoelastic deformation", *Visnik Zaporiz'kogo natsional'nogo universitetu. Fiziko-matematichni nauki*, no. 1, pp. 78-86.

### Об авторах

**Гребенюк Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой математического анализа Запорожского национального университета (ЗНУ), Запорожье, Украина

**Решевская Екатерина Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий Запорожского национального университета (ЗНУ), Запорожье, Украина

**Васько Вікторія Михайлівна**, магістр, преподаватель кафедры математического моделирования Запорожского национального университета (ЗНУ), Запорожье, Украина

**Дорохов Максим Анатольевич**, аспирант кафедры нефтегазового оборудования Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа (ИФНТУНГ), Ивано-Франковск, Украина, maximpu.5@gmail.com

**Костриба Иван Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового оборудования Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа (ИФНТУНГ), Ивано-Франковск, Украина

**Агалцов Геннадий Николаевич**, инженер, младший научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина

**Новикова Алина Вячеславовна**, магістр, младший научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, a\_v\_novikova@mail.ru

### About the authors

**Grebenyuk Sergey Nikolayevich**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of the Department of Mathematical Analysis in Zaporizhzhya National University (ZNU), Zaporizhzhya, Ukraine

**Reshevskaya Yekaterina Sergeevna**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor of Information Technologies in Zaporizhzhya National University (ZNU), Zaporizhzhya, Ukraine

**Vas'ko Viktoriya Mikhailovna**, Master of Science (Tech.), Teacher of the Department of Mathematical Modelling in Zaporizhzhya National University (ZNU), Zaporizhzhya, Ukraine

**Dorokhov Maksim Anatol'yevich**, Master of Science (Tech.), Ph. D. Student of the Department Oil and Gas Equipment in Ivano-Frankovsk National Technical University of Oil and Gas (IFNUOG), Ivano-Frankovsk, Ukraine, maximpu.5@gmail.com

**Kostriba Ivan Vasil'yevich**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor of the Department Oil and Gas Equipment in Ivano-Frankovsk National Technical University of Oil and Gas (IFNUOG), Ivano-Frankovsk, Ukraine

**Agaltsov Gennady Nikolaevich**, Engineer, Junior Researcher of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine

**Novikova Alina Vyacheslavovna**, Master of Science (Tech.), Junior Researcher in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, a\_v\_novikova@mail.ru

**Анотація.** Розглядається напружено-деформований стан гумового ущільнення пакера манжетного типу. Такі пакери належать до самоущільнювальних, використовуються для перевірки герметизаційної здатності нафтових і газових свердловин і спрацьовують під дією тиску в свердловині. Для вирішення задачі в програмному комплексі «MIRELA+» використовується просторово-часовий кінцевий елемент. В результаті чисельного розрахунку були отримані розподіли величин переміщень, деформацій і напружень гумового елемента з урахуванням в'язкопружного деформування. Отримана величина осадки манжети залежно від навантаження з урахуванням реологічних характеристик матеріалу.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, в'язкопружність, гума, пакер манжетного типу, самоущільнювальна манжета

**Abstract.** The article considers a stress-strain state of the rubber seal in the collar-type packer. These packers are self-sealing and are used to check pressurization ability of oil and gas wells, and they are actuated by the pressure in the well.

To solve the problem, a space-time finite element is used in the software package "MIRELA+". As a result of the numerical calculation, values of displacement, strain and stress distributions in the rubber element were obtained with taking into account viscous-elastic deformation. Value of the collar sediment was calculated depending on the load and with taking into account rheological properties of the material.

**Keywords:** stress-strain state, viscous elasticity, rubber, collar-type packer, self-sealing collar

Статья поступила в редакцию 03.09.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, профессором В.И. Дырдой

Калганков Є.В., аспірант  
Цаніді І.М., магістр  
(ІГТМ НАН України)

## ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ГУМОВОЇ ФУТЕРОВКИ

Калганков Е.В., аспірант  
Цаниди И.Н., магістр  
(ИГТМ НАН Украины)

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕЗИНОВОЙ ФУТЕРОВКИ

Kalgankov Ye.V., Ph. D. Student  
Tsanidy I.N., M. Sc. (Tech.)  
(IGTM NAS of Ukraine)

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF RUBBER LININGS DURABILITY

**Анотація.** В статті розглянуто проблеми забезпечення довговічності гумових футеровок шарових барабанних млинів. Встановлено основні види та характер зносу гумової футеровки, що виникають в процесі роботи млина та виділено найбільш актуальні, що суттєво впливають на довговічність футеровки, а саме гідро-абразивно-втомний знос який утворює хвилясту поверхню матеріалу.

Наведено методику та результати визначення ступеня зносу матеріалу за енергетичним критерієм руйнування. Обчислено енергію руйнування в одиниці об'єму матеріалу від дії абразивного та втомного зносів. Пропонується отримані дані використовувати в розрахунку довговічності гумових футеровок.

**Ключові слова:** довговічність, знос, гумова футеровка, енергія руйнування, втомний знос, гідро-абразивний знос, стадія подрібнення, млин

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами.** Гумова футеровка – є складним і відповідальним елементом конструкції млина, вона характеризується довгим терміном роботи який в 2-2,5 рази перевищує, термін роботи металеві футеровки і має суттєві переваги [1, 2]. Використання гумової футеровки почалось з початку 60 х років минулого століття Швецькою компанією «Skega AB».

Довговічність перших гумових футеровок складала 1-3 тисячі годин, на сьогодні цей показник виріс в десятки разів і становить 25-30 тисяч годин для другої стадії подрібнення [1, 2]. Але такого строку служби вдається досягти не всім виробникам і на сьогодні питання забезпечення довговічності стоїть досить гостро. Особливо це стосується першої стадії подрібнення на яку припадають найбільші навантаження та витрати.

**Аналіз досліджень та публікацій.** С початку використання гуми в якості матеріала для футеровок, вчені досить скептично ставились до доцільності заміни металеві футеровки на гумову [3]. За майже 70 років розвитку та впровадження гумових футеровок було проведено багато досліджень, розроблено різні типи та форми футеровок [2, 4], проведено аналіз можливості їх застосування але однозначності щодо забезпечення довговічності гумових футеровок серед вчених немає.

**Метою** роботи є – дослідження довговічності гумової футеровки на першій стадії подрібнення.

Теоретичні засади виникнення та протікання різних процесів зношування детально розглянуті в роботі [2]. Для обстеженої футеровки привалюючим є гідро-абразивний та втомний зноси, так як інші види зносу передбачають тривале протікання процесу, враховуючи тривалість проведення експерименту кавітаційний та корозійний зноси не суттєво впливають на роботу млина.