

На правах рукописи



**КОПЕЙКИН ИЛЬЯ СЕРГЕЕВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАКЕРНО-ЯКОРНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНЫХ ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
МЕРОПРИЯТИЙ В НЕОБСАЖЕННОМ СТВОЛЕ СКВАЖИНЫ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая  
отрасль)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа 2021

Работа выполнена на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент  
Лягов Александр Васильевич

Официальные оппоненты:

Валеев Марат Давлетович  
доктор технических наук, профессор  
ООО НПП «ВМ система» / технический  
директор

Киреев Анатолий Михайлович  
доктор технических наук  
ООО «Югсон-Сервис» / генеральный  
директор

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный  
технический университет» (г. Ухта)

Защита диссертации состоится «15» июня 2021 года в 11.30 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Латыпов Олег Ренатович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Надежность и эффективность технических изделий как совокупность их потребительских свойств определяется рядом показателей из различных групп качества, определяющих их технический уровень, экономические аспекты и конкурентоспособность. Наиболее определяющими являются показатели назначения, при этом важнейшими считаются показатели функциональной и технической эффективности, определяющие полезный эффект при эксплуатации и прогрессивность технических решений. Для технических изделий эти показатели принято называть эксплуатационными. К показателям эксплуатационной эффективности пакерных систем (ПС), применяемых в необсаженном стволе скважины с целью ликвидации интервалов поглощения бурового раствора можно отнести: герметичность изолируемого интервала при перепаде давления; осевое усилие активации пакера; количество повторяющихся изоляций (до 10 посадок) за одну спуско - подъемную операцию (СПО).

Из нефтепромыслового машиностроения известно, что для обеспечения многократно-повторяющихся посадок в скважинных системах желательно использовать в качестве базовых узлов механизмы многократного действия с применением цанговых элементов, а для получения герметичной изоляции интервалов скважины при повторных посадках необходимо применять механизмы по типу узлов раздвижных опор. Однако влияние многократно-повторяющихся посадок на работу данных узлов и их эксплуатационную эффективность в пакерных системах не изучено.

Таким образом, задача разработки, испытания и внедрения в производство пакерных систем для геолого-технических мероприятий (ГТМ) в необсаженном стволе скважины, позволяющая достигнуть необходимого сочетание надежности и эффективности работы базовых узлов, является актуальной и определяется ростом технического уровня оборудования, обеспечивающего устранение осложнений, связанных с поглощением бурового раствора при бурении, освоении и текущем ремонте скважин.

## **Степень разработанности проблемы**

Большой вклад в решение проблемы разработки пакерных систем внесли коллективы отраслевых научно-исследовательских институтов гг. Бугульмы, Москвы, Казани, Тюмени, Уфы, а также специалисты и ученые в области разработки и совершенствования пакера: Е.М. Аванесов, М.Х. Аминьев, М.Д. Валеев, А.Н. Замараев, Г.Г. Ишбаев, В.А. Москалев, М.М. Нагуманов, В.Н. Сызранцев, Л.Г. Чичеров, С.С. Янкулев и др. Однако существующие проблемы, связанные со снижением эксплуатационной эффективности при многократно-повторяющихся посадках пакера остались не решенными.

## **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы» (нефтегазовая отрасль): пункт 3 «Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций».

## **Цель работы**

Повышение эксплуатационной эффективности пакерных систем при работе в необсаженном стволе скважины на основе совершенствования базовых узлов, используемых при многократно-повторяющихся посадках.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1 Анализ эксплуатационной эффективности существующих конструкций пакерных систем.

2 Разработка и исследование аналитических моделей напряженно-деформированного состояния рабочих элементов в базовых узлах пакера.

3 Экспериментальные исследования по определению эксплуатационных характеристик базовых узлов опытных образцов пакерной системы и анализ отклонений полученных результатов от расчетных.

4 Анализ полученных закономерностей изменения эксплуатационных характеристик на основе аналитических и экспериментальных исследований базовых узлов пакерной системы.

5 Технические решения на основе аналитических и экспериментальных исследований, направленные на повышение эксплуатационной эффективности пакерной системы.

### **Научная новизна**

1 Аналитическими исследованиями напряженно-деформированного состояния цангового элемента установлены и экспериментально подтверждены значения осевых усилий, находящихся в интервале от 30 до 60 кН, необходимых для многократно-повторяющихся срабатываний узла активации пакерной системы при герметизации интервалов необсаженного ствола скважины.

2 Экспериментально установлена линейная убывающая закономерность величины осевого усилия до 37–39% при срабатываниях механизмов многократного действия пакерной системы в зависимости от промежутка времени между посадками в необсаженном стволе скважины и их количества за одну СПО с зарегистрированным эффектом уменьшения раскрытия петли упругого гистерезиса, возникающего в узле активации пакерного устройства.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость диссертации заключается в установлении качественных и количественных закономерностей напряженно-деформированных состояний в механизмах многократного действия пакерной системы при повторных посадках в необсаженном стволе скважины с целью повышения эксплуатационной эффективности.

Практическая значимость диссертационной работы:

1 Предложена новая конструкция пакерной системы (патент РФ на полезную модель №182823), имеющая узел раздвижных опор, состоящий из секции шарнирно установленных в опоре и соприкасающихся с конусом для радиального перемещения и исключения разрушений резиновых манжет при герметизации интервалов необсаженного ствола скважины.

2 Разработана на уровне изобретения пакерная система для крепления хвостовика в необсаженном стволе скважины, имеющая устройство отсоединения бурильных труб с цанговым элементом, фиксирующим извлекаемую часть системы пакера (патент РФ на полезную модель № 198232).

3 Методика расчета эксплуатационных параметров пакера используется в учебном процессе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» при подготовке магистров по направлению подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело», программа «Проектирование, эксплуатация и диагностика технологических процессов и объектов нефтегазового производства»

### **Методология и методы исследования**

Решение поставленных задач осуществлено аналитически и экспериментально при помощи стандартных и самостоятельно разработанных методик, конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния механизмов многократного действия как базовых узлов пакерной системы, стендовых испытаний полноразмерного пакерного устройства и выполнения экспериментов с опытными образцами узла активации.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1 Описание работы узла активации пакерной системы, выраженной в научно обоснованной закономерности изменения осевых усилий, необходимых для многократно-повторяющихся посадок пакера за одну СПО.

2 Экспериментальное подтверждение влияния величины интервалов времени между посадками пакера и их количества на эксплуатационные характеристики узла активации, выражаемые возникновением эффекта упругого гистерезиса.

3 Результаты аналитических и экспериментальных исследований узла активации и узла раздвижных опор пакерной системы, при которых получены значения осевых усилий, необходимых для многократно-повторяющихся посадок пакера, и геометрических параметров секций раздвижных опор, обеспечивающих защиту резиновых манжет при герметизации интервалов скважины.

4 Техническое решение модели пакерной системы в модульном исполнении, позволяющее обеспечить надежную герметизацию кольцевого пространства в необсаженном стволе скважины.

## **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов подтверждена теоретическими и экспериментальными исследованиями с использованием современного стендового оборудования, прошедшего государственную проверку, высокой сходимостью расчетных величин с экспериментальными.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на Всероссийской научно-технической конференции «Инновационное нефтегазовое оборудование: проблемы и решения» (Уфа, 2014); XIV-й Молодежной научно-практической конференции ОАО «Татнефть» (Джалиль, 2014); Научно-технической конференции молодых ученых-специалистов ООО «БашНИПИнефть» (Уфа, 2015); Молодежной научно-практической конференции НГДУ «Альметьефть» (Альметьевск, 2014); 69-й и 70-й международных молодежных научных конференциях «Нефть и газ» РГУ Нефти и Газа имени И.М. Губкина (Москва, 2015, 2016); XII-й и XIII-й Международных научно-практических конференциях «Ашировский чтения» (Агой, 2015, 2016); Всероссийской научно-методической конференции «Роль математики в становлении специалиста» (Уфа, 2015, 2016, 2018, 2020); Молодежной научно-технической конференции ООО «УК Татбурнефть» (Альметьевск, 2016); Научно-технической конференцию «Юбилейная конференция нефтяных вузов России – 75 лет нефтяному образованию» (Уфа, 2018); Всероссийской научно-технической конференции «Трудно-извлекаемые запасы нефти и газа. Проблемы, исследования и инновации» (Уфа, 2019).

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 15 научных трудов: 5 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 9 работ в материалах международных и всероссийских конференций, 2 патента РФ на полезную модель.

## **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 139 наименований. Работа изложена на 198 страницах, содержит 100 рисунков, 21 таблицу и 6 приложений.

*Автор искренне благодарит к.т.н. А.Н. Замараева за консультации при подготовке диссертационной работы и директора ООО НПФ «Пакер» М.М. Нагуманова за изготовление и испытание опытного экземпляра пакера, разработанного по результатам работы.*

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, приведены цель, основные задачи и защищаемые положения, а также научная новизна выполненных исследований и их практическая значимость.

**Первая глава** диссертации посвящена обзору современных конструкций пакерных и якорных устройств (ПУ и ЯУ) входящих в состав пакерных систем и технологий их применения как в одной системе, так и самостоятельно на уровне подсистем. Основываясь на анализе конструктивных особенностей, технологий применения и способов активации была сформирована классификация ПУ и ЯУ (Таблица 1) в соответствии с возможностью их совместного применения при ГТМ в необсаженном стволе скважины.

Таблица 1 – Классификация применения пакерных и якорных подсистем

Показатели конструкции	Группа подсистемы	
	Пакерное устройство	Якорное устройство
Механические извлекаемые	+	+
Гидравлические извлекаемые и неизвлекаемые (перманентные)	+	+
Многопортовые	+	+
Заколонные	+	-
Набухающие	+	-

Анализ ПУ как подсистем показал, что асимметричное расположение устройства в скважине перед посадкой влияет на герметичность изоляции интервалов и снижает эксплуатационные характеристики резиновых манжет. При повторных посадках пакера за одну СПО риск разрушения резиновых манжет увеличивается. Однако существующие конструкции механизмов многократного действия позволяют сохранить эксплуатационные характеристики манжет, но не обеспечивают центрирование пакера в скважине.



Для обеспечения повторных посадок за одну СПО в ПУ используются узлы активации, которые можно отнести к механизмам многократного действия, имеющим различные конструкции, в которых применяются цанговые элементы. Однако, влияние повторных посадок пакера на эксплуатационные характеристики узла активации, а именно на изменения осевого усилия, необходимого для перевода пакера в рабочее положение, не изучено.

**Вторая глава** посвящена исследованию и совершенствованию ПС для необсаженного ствола скважины, которая должна уменьшить риски потери эксплуатационных характеристик устройства при многократно-повторяющихся посадках за одну СПО.

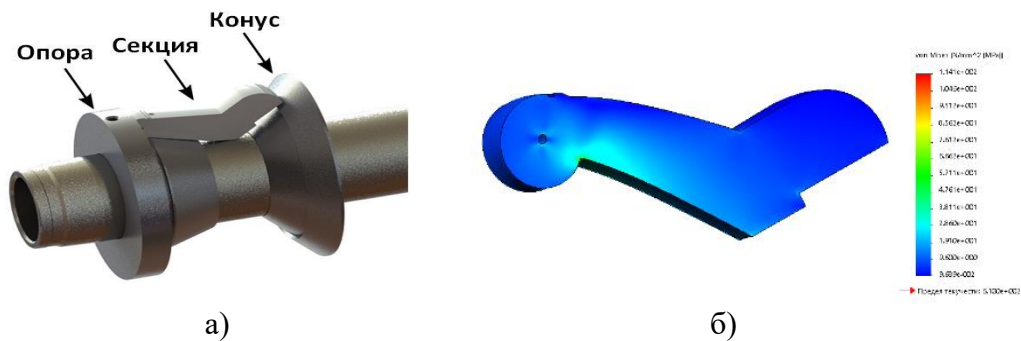
Предложенная во второй главе конструкция ПС предназначена для разобщения пластов ОС скважины с отдельным использованием пакерного и якорного устройства при проведении ГТМ с целью поиска и кольматирования интервалов, поглощающих буровой раствор с зенитным углом ствола до 65°. При разработке конструкции ПУ были заложены характеристики с учетом применения оборудования в необсаженных стволах скважин на месторождениях А.Ф. Титова и Р.В. Требса. Эксплуатационные характеристики пакера (Таблица 2) подбирались исходя из максимально возможного веса колонны бурильных труб над пакером и веса подвески хвостовика под ним, а также температуры пластов в интервалах 1000 - 1500 м в скважинах пробуренных, долотом габарита 220,7 мм.

С целью сохранения эксплуатационных характеристик резиновых манжет при многократно-повторяющихся посадках пакера в конструкции был предусмотрен узел раздвижных опор (Рисунок 1, а), состоящий из секций, шарнирно установленных в опоре и соприкасающихся с конусом для радиального перемещения на максимальный диаметр 220,7 мм при создании осевого усилия на ПУ. Благодаря такой конструкции, узел раздвижных опор позволяет исключить разрушения резиновых манжет при возникновении перепада давлений между отсекаемыми интервалами скважины и отцентрировать пакер относительно оси скважины. Так как секции выполнены равнопрочными элементами, для оценки прочностных характеристик раздвижных опор выполнен конечно-элементный анализ напряженно-

деформированного состояния (НДС) при помощи системы автоматизации инженерных расчётов (CAE) в среде SolidWorks Simulation (Рисунок 1, б) для одной секции. Анализ показал, что максимальное напряжение составляет  $\sigma_{\max} = 114 \text{ МПа}$  и не превышает допустимого для стали 45ХН.

Таблица 2 – Эксплуатационные характеристики пакерного устройства

Наименование показателя	Значение
Диаметр исследуемых скважин, мм	220,7-230
Перепад давления, МПа	50
Нагрузка растягивающая, кН	350
Нагрузка сжимающая, кН	300
Нагрузка, при которой срабатывает узел активации, кН	60-70
Нагрузка для пакеровки, кН	100-160



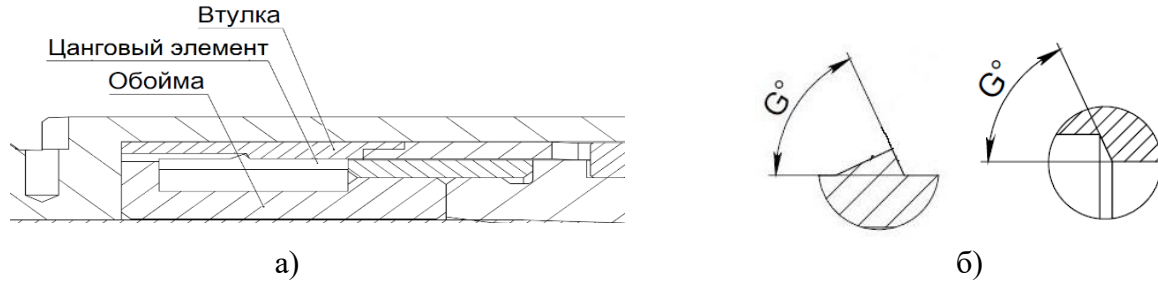
а) секция раздвижной опоры; б) секции трапецидальной формы

Рисунок 1 – Узел раздвижных опор пакерного устройства

В ПУ была реализована конструкция узла активации, обеспечивающая многократно-повторяющиеся посадки за одну СПО и предотвращающая несанкционированные срабатывания (Рисунок 2, а).

Посадка пакера осуществляется созданием осевого усилия с упором на нижерасположенное ЯУ. При достижении предельной нагрузки, цанговый элемент, имеющий форму разрезного кольца, сжимается и поясок на поверхности (Рисунок 2, б) выходит из зацепления с втулкой. Цанговый элемент перемещается вдоль оси пакера вместе с обоймой, передавая сжимающее усилие на резиновые манжеты для герметизации интервала скважины. Происходит

посадка пакера. Для перевода ПУ в транспортное положение необходимо создать растягивающее усилие, при этом поясok цангового элемента повторно войдет в зацепление с втулкой.

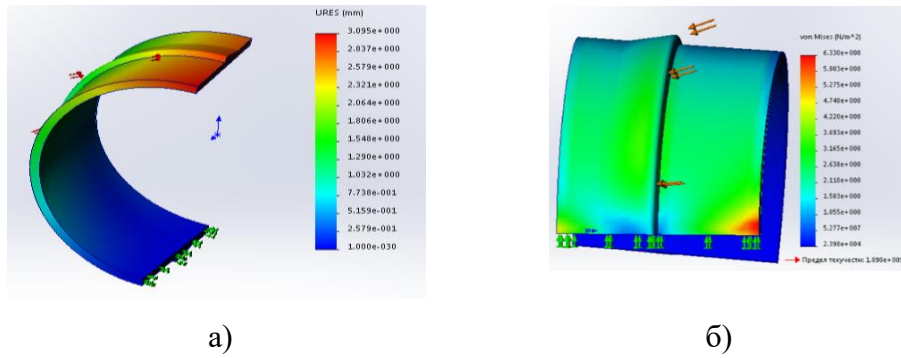


а) конструкция узла активации пакера; б) угол поясков на деталях

Рисунок 2 – Схема узла активации ПУ

В результате конечно-элементного анализа узла активации в САЕ (Рисунок 3, а и 3, б) было получено и изучено НДС цангового элемента. Изучение НДС цангового элемента позволило определить эксплуатационные характеристики узла активации с различными углами  $G$ . При создании сжимающего давления на поясok цангового элемента в 60 кН максимальная деформация в радиальном направлении равнялась  $\Delta l_{max} = 3,7$  мм – это означало, что цанговый элемент находится в состоянии активации (Рисунок 3, а). Изменения  $\Delta l_{max}$  от сжимающей нагрузки демонстрирует Таблица 3. Симуляции показали, что максимальное значение напряжения  $\sigma_{max} = 633$  МПа (Рисунок 3, б). При известном пределе текучести для стали 60С2А  $\sigma_T = 1090$  МПа, минимальный запас прочности в цанговом элементе составил  $n = 1,92$ .

На основе выполненного анализа в главе 1 и проектировочных расчетов в главе 2 была предложена конструкция пакерной системы (Рисунок 4), позволяющая повысить эксплуатационную эффективность за счет центрирования оборудования в скважине с помощью многосекционного узла раздвижных опор и модульного исполнения технических устройств в ПС (патент РФ на полезную модель №182823 от 29.06.2018 г.).

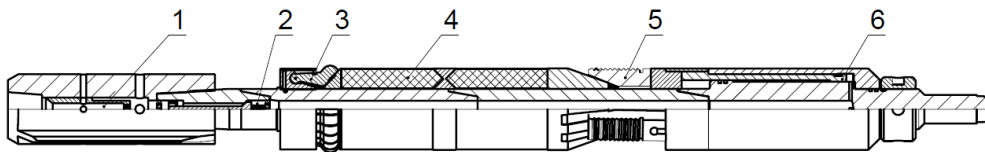


а)  $\Delta l_{\text{ма}}$  незакрепленной кромки; б) узловое напряжение по Мизесу

Рисунок 3 – Напряженно-деформированное состояние цангового элемента

Таблица 3 – Изменения деформации цангового элемента от нагрузки

Нагрузка, кН	0	10	20	30	40	50	60
Перемещение, мм	0	0,6	1,2	1,9	2,5	3,1	3,7



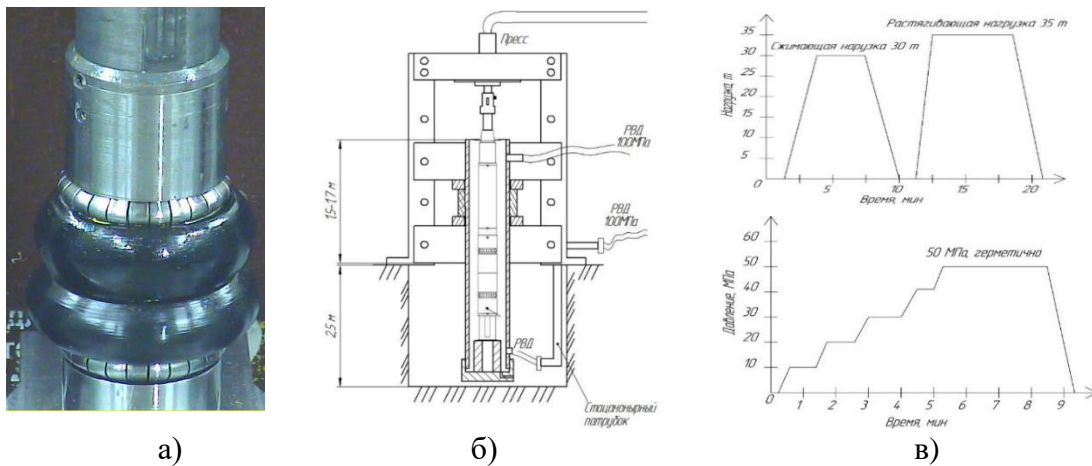
1 – модуль устройства разъединения; 2 – модуль обратного клапана; 3 – узел раздвижных опор; 4 – модуль ПУ; 5 – модуль ЯУ; 6 – узел активации

Рисунок 4 – Пакерное устройство в модульном исполнении

По итогу расчетов, выполненных в главе 2, была разработана опытно-промышленная конструкция ПУ для применения в ГТМ при борьбе с поглощением бурового раствора (Рисунок 5, а).

В третьей главе описаны результаты стендовых испытаний ПУ в модели открытого ствола (МОС) скважины на производственной площадке ООО НПФ «Пакер». Испытания ПУ выполнены на сертифицированном стенде (Рисунок 5, б) по утвержденным методикам в три этапа: **1-й этап** опрессовка ПУ внутренним давлением для выявления возможных утечек по внутренним узлам; **2-й этап** – проверка ПУ на максимальные растягивающие и сжимающие нагрузки, **3-й этап** – проверка основных эксплуатационных характеристик ПУ.

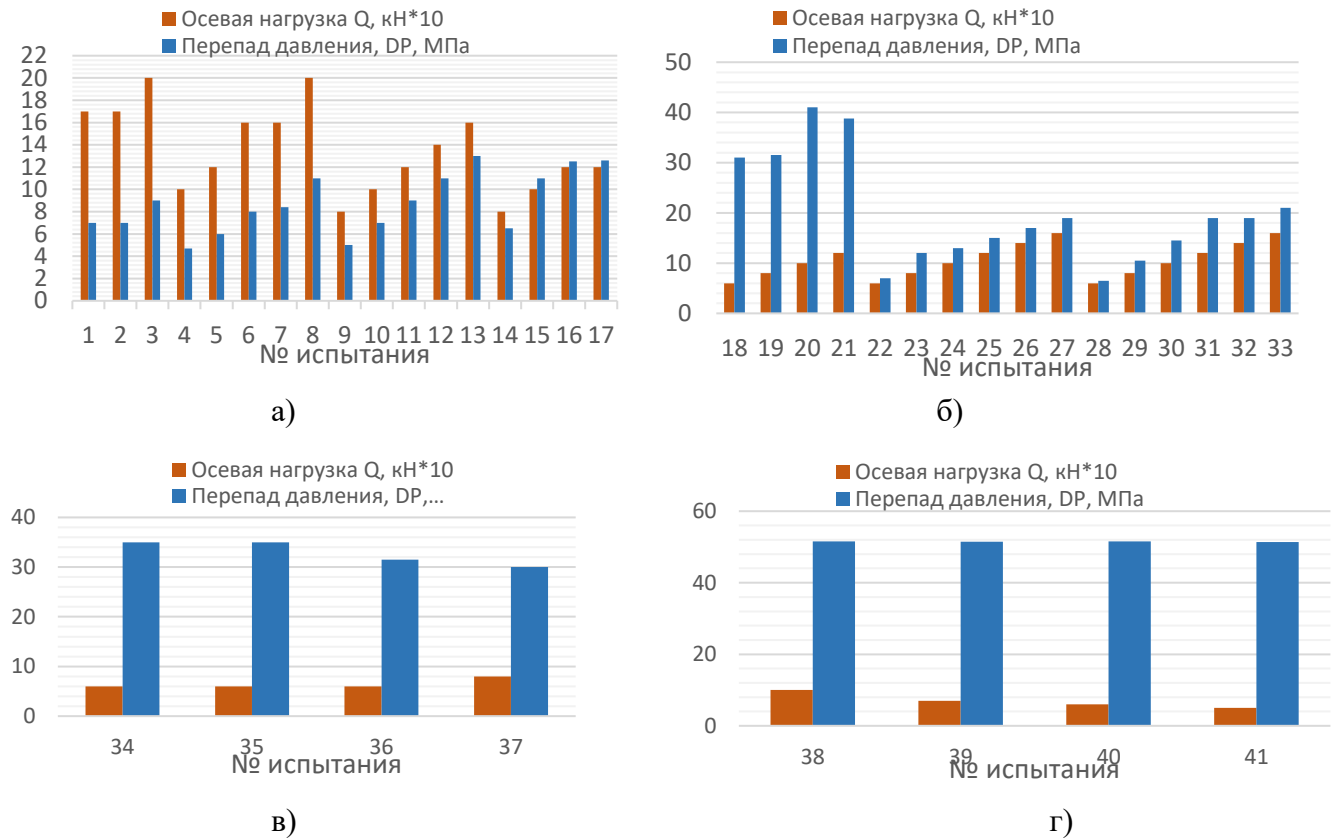
Основная цель испытаний – опытное подтверждение соответствия ПУ эксплуатационным характеристикам, указанным в Таблице 2. В испытаниях 1-го и 2-го этапа (без МОС) при создании избыточного внутреннего давления в 50 МПа утечек по внутренней полости ПУ не было зафиксировано (Рисунок 5, в). Также не было зафиксировано разрушений в базовых узлах ПУ при создании сжимающей и растягивающей нагрузок в 300 и 350 кН соответственно (Рисунок 5, в).



а) опытный образец пакера б) стенд для испытания ПС;  
 в) результаты 1-го и 2-го этапа испытаний  
 Рисунок 5 – Стендовые испытания пакерного устройства

На **3-м этапе** испытаний выполнялась герметизация интервала МОС с помощью опытного образца ПУ. Поскольку требуемые эксплуатационные характеристики, указанные в таблице 2, были достигнуты после доработок ПУ, результаты испытаний разделены на 4 блока. В каждом блоке происходило совершенствование базовых узлов ПУ без изменения технологии выполнения испытаний. Результаты испытаний блока 1, блока 2 и блока 3 (Рисунок 7, а, 7, б, 7, в) показали несоответствие ПУ после доработки его эксплуатационным характеристикам. При осевой нагрузке на пакер  $Q = 50$  кН, не было получено герметичной изоляции  $G_r$  интервалов МОС при перепаде давлений  $\Delta P = 50$  МПа. Итоговая конструкция ПУ была принята по результатам испытаний блока 4 (Рисунок 7, г), в которых было получено герметичное разобщение интервалов

МОС при перепаде давлений  $\Delta P = 51,6$  МПа и сжимающей нагрузке  $Q = 50$  кН. В пакер было включено стальное кольцо между резиновыми манжетами для получения более жесткой системы уплотнения кольцевого пространства. Узел раздвижных опор был выполнен с ограничением по выходу секций на максимальный диаметр меньше на 5 мм внутреннего диаметра МОС равного 220,7 мм.



- а) результаты испытаний в блоке №1; б) результаты испытаний в блоке №2;  
в) результаты испытаний в блоке №3; г) результаты испытаний в блоке №4

Рисунок 7 – Результаты испытаний ПУ 3-го этапа

В процессе выполнения блоков испытаний 3-го этапа было зафиксировано отсутствие постоянного значения усилий активации ПУ (Рисунок 8). Значения усилий колебались в меньшую и большую сторону, но не превышали заданных параметров в 50-60 кН. Анализ усилий активации ПУ в зависимости от времени показал, что при многократно-повторяющихся посадках с временными промежутками  $t1 = t2 = t3 = t4 \leq 10$  мин. происходит уменьшение значений

усилий, необходимых для срабатывания ПУ. При этом, если следующий промежуток времени между посадками больше предыдущих  $t_5 > t_1 = t_2 = t_3 = t_4$ , происходит увеличение значений усилий необходимых для активации. Причиной возникновения данной зависимости является наличие эффекта упругого гистерезиса в узле активации ПУ, который подтверждён и описан в главе 4.

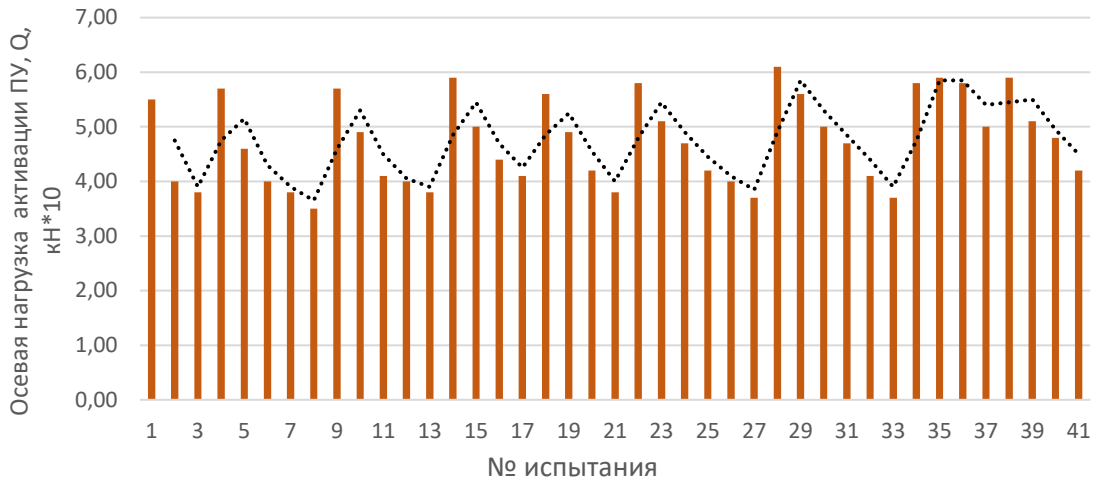


Рисунок 8 – Колебания значений осевых усилий  $Q$  необходимых для активации пакера при эксплуатационных испытаниях

Таблица 4 - Оптимальные условия герметизации пакерного устройства

Номер блока испытаний	Перепад давлений $\Delta P$ , МПа.	Сжимающая нагрузка, $Q$ , кН
1	16,3	137,5
2	36,2	109,5
3	34,8	72,5
4	51,6	53,4

На основе результатов испытаний 3-го этапа были определены оптимальные условия герметизации  $\Gamma p$  интервалов МОС для каждого блока с целью количественной и качественной оценки эксплуатационной эффективности используемых конструкций ПУ. Для этого выполнено построение и анализ модели герметизации  $\Gamma p$  интервалов МОС с помощью пакера:

$$\overline{\Gamma p} = f(x_1, x_2) \quad (1)$$

где  $x_1$  – перепад давления  $\Delta P$ , МПа;  $x_2$  – осевая нагрузка  $Q$ , кН. Зависимость  $Gr$  от двух переменных  $Q$  и  $\Delta P$  была выражена через уравнение второго порядка. Для 1-го блока испытаний это уравнение приняло вид:

$$Gr = 0,481 + 0,068x_1 + 0,038x_2 + 1,255x_1^2 - 0,921x_1x_2 + +0,073x_2^2. \quad (2)$$

При решении уравнения 2 были получены оптимальные условия герметизации  $Gr$  для 1-го блока испытаний. Подобные условия были найдены для каждого блока испытаний 3-го этапа (Таблица 4). Анализ данных приведенных в Таблиц 4, данных показал, что наиболее эффективной является конструкция ПУ, используемая в 4 блоке испытаний.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований работы узла активации ПУ, основанные на аналитических расчетах, конечно-элементном анализе в САЕ и выполненных экспериментах. В целях математического описания работы узла активации ПУ была разработана аналитическая модель цангового элемента. Для этого было рассмотрено условие устойчивости изогнутого участка длиной  $ds$  (Рисунок 9, а), находящегося под действием равномерно распределённой внешней нагрузки  $q$ . В сечении рассматриваемого участка возникает поперечная сила  $Q$ , изгибающий момент  $M$  и нормальная сила, которая представлена в виде суммы докритической силы  $qR$  и малой добавки  $N$ . Принимая во внимание, что  $M = EJ \kappa$ , где  $E$  – модуль упругости Юнга,  $J$  – минимальный момент инерции поперечного сечения,  $\kappa$  - изменение радиуса кривизны, и исключив  $Q$  и  $N$  как величины малые, удерживаемые только их первой степенью, а  $\kappa$  выразив через местный радиус кривизны  $R_1$  и радиус кривизны кольца  $R$  ( $\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} - \kappa$ ) цангового элемента, было получено уравнение равновесия сил в цанговом элементе длиной  $ds$ :

$$EJ \frac{d^3\kappa}{ds^3} + \left( qR + \frac{EJ}{R^2} \right) + \frac{d\kappa}{ds} + \frac{dq_n}{ds} + \frac{1}{R} q_t = 0. \quad (3)$$



Для определения критической нагрузки  $q_{кр}$  на поясок цангового элемента, при которой происходит потеря устойчивости, из уравнения 3 была получена известная зависимость:

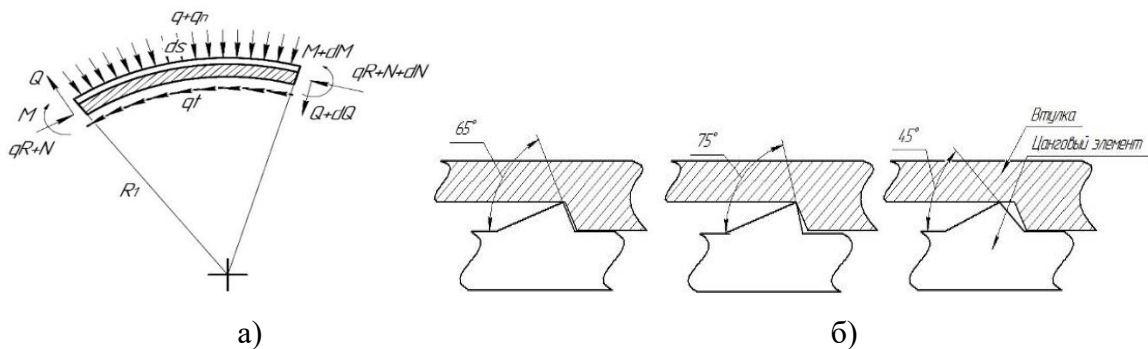
$$q_{кр} = \frac{3EJ}{R^3}. \quad (4)$$

Так как цанговый элемент имеет форму разрезного кольца, в уравнении 4 был учтен вырезанный участок (сектор) с помощью коэффициента  $\xi = \alpha/360^\circ$ , где  $\alpha$  – угол вырезанного сектора. Кроме того, в зависимость 4 был включен коэффициент трения стали по стали без смазки  $f = 0,15$ .

$$q_{кр} = \frac{3EJ\xi}{R^3 f}. \quad (5)$$

Критическая нагрузка  $q_{кр}$  воздействует на наклонную поверхность пояса цангового элемента периметром  $P$  и углом наклона  $65^\circ$  (Рисунок 9, б). Таким образом осевая нагрузка  $Q$ , необходимая для деформации цангового элемента выражается из уравнения 5 следующим образом:

$$Q = \frac{3EJ\xi}{PR^3 f} \operatorname{tg} 65^\circ. \quad (6)$$



а) условие равновесия изогнутого участка цангового элемента

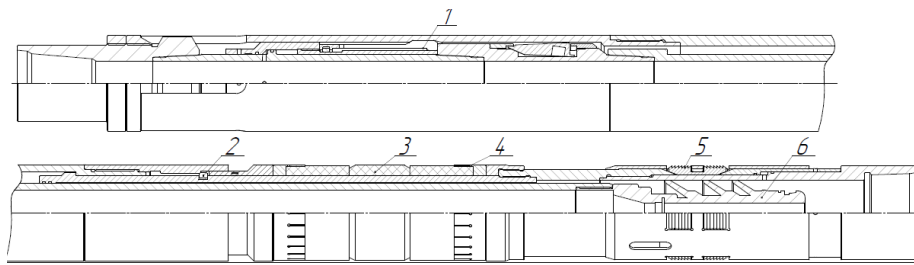
б) углы поясков на деталях узла активации

Рисунок 9 – аналитическая модель цангового элемента

Для образца цангового элемента, изготовленного для экспериментов, нагрузка потери устойчивости по формуле 6 будет равняться:

$$Q = \frac{3EJ\epsilon}{PR^3f} \operatorname{tg}65^\circ = \frac{3 \cdot 0,21 \cdot 30 \cdot 0,067}{0,798 \cdot 360 \cdot 0,132^3 \cdot 0,15} \cdot 2,14 \cdot 10^4 = 49,2 \text{ кН.}$$

На основе выполненных аналитических расчетов была разработана конструкция ПС для крепления хвостовика в необсаженном стволе скважины (Рисунок 10), имеющая узел раздвижных опор, узел активации с цанговым элементом в форме разрезного кольца и устройство отсоединения бурильных труб, удерживающее извлекаемую часть системы с помощью цангового элемента в форме разрезного цилиндра (патент на полезную модель №198232).

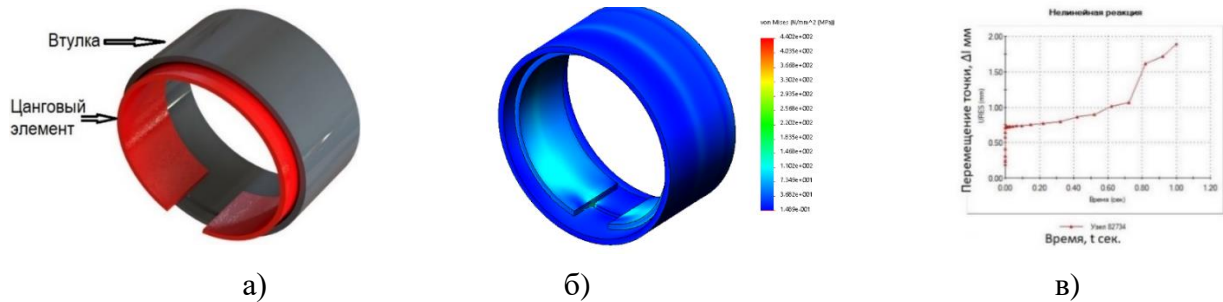


1 – устройство разъединения; 2 – узел активации; 3 – узел раздвижных опор;  
4 – пакерное устройство; 5 – узел цементировочной пробки 6 – якорное устройство

Рисунок 10 – Пакерная система подвески хвостовика

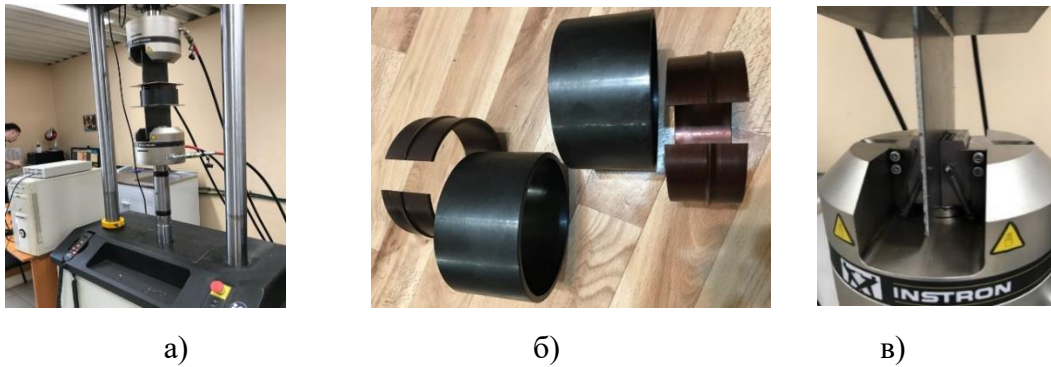
Конечно-элементный анализ НДС узла активации (Рисунок 11, а) с различными углами пояска показал, что требуемым эксплуатационным характеристикам соответствует конфигурация с углом пояска  $65^\circ$  (опытный образец ПУ), так как срабатывание узла произошло при осевой нагрузке  $Q = 50$  кН. Условие подтверждается наличием перемещения точек в цанговом элементе  $\Delta l = 1,75$  мм (Рисунок 11, в), при этом максимальные напряжения  $\sigma_{\max}$ , возникающие в элементах узла активации не превышают допустимых значений (Рисунок 11, б). Анализ данных НДС конфигураций узла активации с углами поясков в  $45^\circ$  и  $75^\circ$  показал несоответствие необходимым эксплуатационным характеристикам.

С целью изучения влияния эффекта упругого гистерезиса, возникающего в узле активации при многократно-повторяющихся посадках ПС выполнены эксперименты на сервогидравлической испытательной системе INSTRON 8801 (Рисунок 12, а) с использованием опытных образцов узла, имеющих конфигурации поясков  $65^\circ$  и  $75^\circ$  (Рисунок 12, б), и разработанной оснастки (Рисунок 12, в).



а) модель узла активации; б) Максимальные напряжения  $\sigma_{\max}$ ; в) перемещение точек  $\Delta l$

Рисунок 11 – Симуляция узла активации с углом пояска  $65^\circ$



а) испытательный стенд INSTRON 8801 б) образцы узла активации в) оснастка.

Рисунок 12 – Эксперимент с узлом активации пакерного устройства

Эксперимент состоял из 3-х блоков последовательных опытов. В каждом блоке узел активации 5 раз переводился в рабочее положение с периодичностью  $t = 10$  мин. Между блоками опытов устанавливался продолжительный временной период  $T = 60 \dots 30$  мин., в котором узел активации не работал. В первом опыте было установлено значение осевого усилия  $Q = 51$  кН. Сходимость опытных данных с расчетными составило 97-99%.

Результаты эксперимента (Рисунок 13) показали, что при многократных срабатываниях узла активации усилие, необходимое для деформации цангового элемента (при повторях) снижается на 37 - 38% и характеризуется возникновением эффекта упругого гистерезиса (Рисунок 14). Так же эксперимент показал, что площадь петли упругого гистерезиса, возникающего в узле активации, зависит от временного промежутка между срабатываниями.

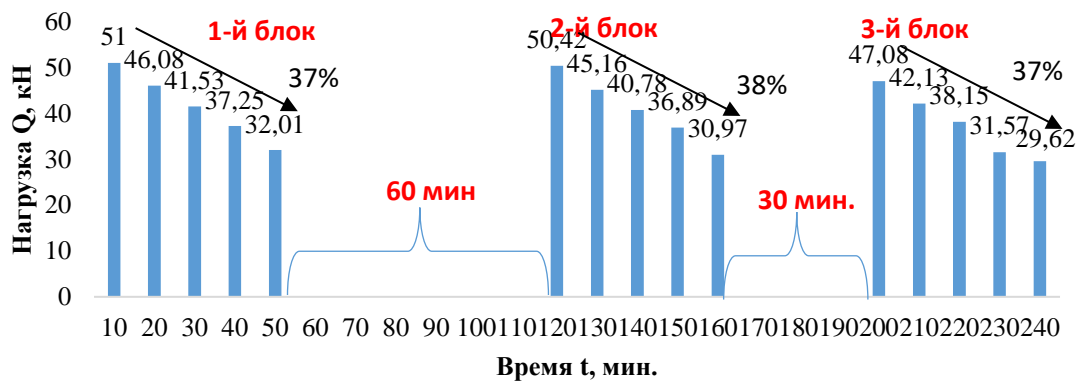


Рисунок 13 – Гистограмма активации узла в эксперименте из 3-х блоков испытаний с конфигурацией пояса 65°

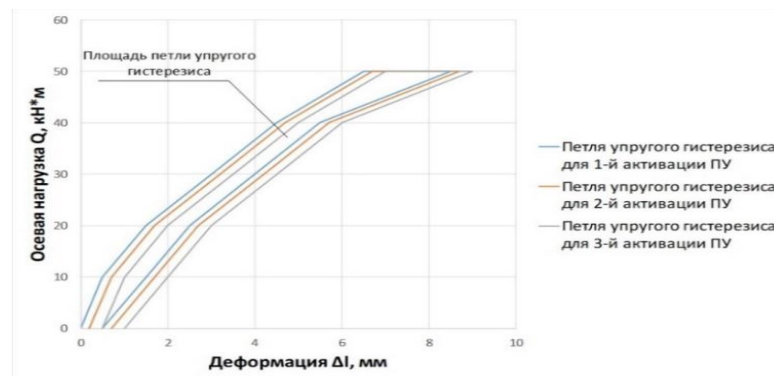


Рисунок 14 – Упругий гистерезис узла в зависимости от количества срабатываний

Для получения закономерности уменьшения необходимого усилия  $Q$  от временного промежутка  $T$  между срабатываниями узла активации, в котором происходит уменьшение площади петли упругого гистерезиса, каждый блок испытаний был описан следующими уравнениями:

$$q = k_{0i} + k_{1i}t \quad (7)$$

где  $k_{0i}$ ,  $k_{1i}$  – коэффициенты уравнения;  $t$  – значения времени в установленной точке,  $i$  – номер блока опытов. Коэффициенты  $k_{0i}$  и  $k_{1i}$  характеризуют количество срабатываний узла активации были определены с помощью общеизвестных формул наименьших квадратов. Уравнения для каждого блока приняли вид:

$$q = 55,62 - 0,47t \text{ для 1-го блока опытов;}$$

$$q = 54,99 - 0,42t \text{ для 2-го блока опытов;}$$

$$q = 51,35 - 0,45t \text{ для 3-го блока опытов.}$$

Зависимости изменения коэффициентов  $k_0$  и  $k_1$  от временного промежутка  $T$  были получены следующим образом:

$$k_0(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T; \quad (8)$$

$$k_1(T) = \beta_0 + \beta_1 T, \quad (9)$$

где  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta_0$  и  $\beta_1$  – коэффициенты, характеризующие количество блоков опытов в эксперименте и вычисляемые по формуле наименьших квадратов,  $T$  – время промежутка между срабатываниями. Уравнения 8 и 9 приняли вид:

$$k_0(T) = 47,71 + 0,5T,$$

$$k_1(T) = -0,44 - 0,45T.$$

Закономерность уменьшения осевого усилия  $Q$  в зависимости от временного промежутка между срабатываниями  $T$ , при котором происходит уменьшение площади петли упругого гистерезиса, выглядит следующим образом:

$$Q = k_0(T) + k_1(T) = 47,71 + 0,5T - 0,44 - 0,45T = 47,27 + 0,05T. \quad (10)$$

Уравнение 10 позволяет определить изменения осевого усилия, необходимого для срабатывания узла активации в зависимости от продолжительности временного промежутка между посадками, что позволяет

сохранить эксплуатационную эффективность ПС и снизить риск возникновения осложнений.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

1 Анализ существующих конструкций ПС показал, что при многократно-повторяющихся посадках пакера за одну СПО происходит разрушение резиновых манжет и изменение усилия, необходимого для активации пакера. Данный недостаток ПС приводит к сокращению количества возможных герметичных изоляций интервалов скважины и росту рисков возникновения осложнений, при этом эксплуатационная эффективность всей пакерной системы снижается.

2 Аналитическое решение научной задачи, связанной с работой цангового элемента в узле активации как механизма многократного действия пакера путем разработки математической модели и ее численного решения, показало сходимость полученных значений осевого усилия необходимого для посадки пакера с опытными результатами – 97...99%.

3 В результате экспериментальных исследований над полноразмерными образцами пакерной системы: подтверждена достоверность конечно-элементного анализа НДС секций раздвижных опор; обоснованы выбранные геометрические формы элементов узла активации и узла раздвижных опор; получены необходимые эксплуатационные характеристики пакерной системы.

4 Установлена линейная закономерность уменьшения величины осевого усилия, необходимого для активации пакера при многократной изоляции интервалов необсаженной скважины за одну СПО от промежутка времени между посадками. Полученные закономерности подтверждены экспериментальными исследованиями, в которых установлено наличие эффекта упругого гистерезиса при работе узла активации пакера, влияющего на эксплуатационные характеристики пакерной системы при многократно-повторяющихся посадках.

5 На основании выполненных исследований и анализа работы ПС в необсаженном стволе скважины предложена новая конструкция: пакерная система (патент РФ на полезную модель №182823 от 29.06.2018г.), позволяющая

исключить разрушение резиновых манжет при многократной герметизации интервалов необсаженного ствола скважины и пакерная система для крепления хвостовика скважины, имеющая устройство отсоединения колонны бурильных труб с цанговым элементом, фиксирующим извлекаемую часть системы пакера.

### **Основные положения диссертационной работы отражены в следующих работах:**

*Статьи из журналов, рекомендованных ВАК РФ:*

1 Копейкин И.С. Разработка пакера гидравлического для разобщения интервалов открытого ствола скважины при многостадийном заканчивание скважин / И.С. Копейкин, А.В. Лягов // Научный журнал «Известия Самарского научного центра РАН». – 2017. – Т. 19. – №1(2). – С. 244-246.

2 Копейкин, И.С. Перспективы применения погружной компоновки для селективного испытания продуктивных пластов в открытом стволе нефтегазовых скважин / И.С. Копейкин, А.Е. Тихонов, А.Г. Губайдуллин, А.В. Лягов // Нефтегазовое дело. –2016. – №1. – С. 65-73.

3 Копейкин, И.С. Пакер, применяемый в открытом стволе нефтегазовых скважин для проведения различных геолого-технических мероприятий / И.С. Копейкин, А.В. Лягов, А.Н. Замараев // Экспозиция НефтьГаз. –2016. –№5(51). -С. 48-51.

4 Копейкин, И.С. Исследование напряженно-деформированного состояния базовых узлов пакера для необсаженной скважины / И.С. Копейкин, Р.С Миргородский, А.В. Лягов // Нефтегазовое дело. – 2016. – №5. – С. 63-82.

5 Копейкин, И.С. Применение феномологических моделей и математических методов в расчетах напряженно-деформированного состояния базовых узлов пакерно-якорного комплекса, работающего в открытых стволах скважины // И.С. Копейкин / Научно-методический электронный журнал «Концепт». – Киров: Изд-во Межрегион. центр инновац. технол. в образ. – 2016. – Т. 11. – С. 416–420.

*Патенты:*

6 Пат. 182823 Рос. Федерация, МПКЕ21В33/12. Пакерный модуль для автономной изоляции интервалов негерметичности в необсаженной скважине / Копейкин И.С., Лягов А.В., Булюкова Ф.З.; Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «УГНТУ». заявл. 26.06.2018; опубл. 04.09.2018, Бюл. №25.

7 Пат. 198232 Рос. Федерация, E21В43/10, E21В33/14, E21В33/12. Пакер-подвеска для крепления хвостовика с устройством отсоединения бурильных труб / Копейкин И.С., Савельев И.С., Лягов А.В.; Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «УГНТУ». заявл. 02.12.2019; опубл. 25.06.2020, Бюл. №18.

*В других изданиях;*

8 Копейкин, И.С. Исследования работы узла активации пакерного устройства как механизма многократного действия / И.С. Копейкин // Роль математики в становлении специалиста: материалы Междун. научн.-прак. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2020. – С. 14-19.

9 Копейкин, И.С. Изменения эксплуатационных характеристик базовых узлов пакерных систем при многократно-повторяющихся посадках / И.С. Копейкин // Наука и

технологии в нефтегазовом деле: тез. докл. II Междун. науч.-техн. конф. – Краснодар. Изд-во КубГТУ. – 2020. – С. 25 – 28.

10 Копейкин, И.С. Повышение показателей эксплуатационной эффективности резиновых манжет пакерной системы, применяемой в условиях многократно-повторяющихся посадок / И.С. Копейкин // Norwegian journal of development of the international science. – 2020. – №39-1. – С. 38-41.

11 Копейкин И.С. Влияние эффекта упругого гистерезиса на эксплуатационные характеристики пакерного устройства при многократно-повторяющихся посадках / И.С. Копейкин // Современные проблемы нефтегазового оборудования: сб. тр. Междун. науч.-техн. конф., посвященной 70-летию кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» УГНТУ – Уфа. Изд-во «Нефтегазовое дело». – 2019. – С. 226-230.

12 Копейкин И.С. Результаты исследований цанговых элементов, используемых в узлах активации пакерного оборудования / И.С. Копейкин // Трудноизвлекаемые запасы нефти и газа: сб. стат. докл. и выступ. Всероссийской науч.-техн. конф. – Уфа. Изд-во «Нефтегазовое дело». – 2019. – С. 14-15.

13 Копейкин И.С. Исследование эффективности применения пакерно-якорных систем при селективных работах в необсаженном стволе нефтяных и газовых скважин // И.С. Копейкин / 75 лет нефтяному образованию в республике Башкортостан: тез. докл. Всероссийской науч.-техн. конф., посвященной 70-летию УГНТУ. – Уфа: Изд-во ООО "РН-БашНИПИнефть". – 2018. – С. 99.

14 Копейкин И.С. Способы диагностики технического состояния пакера для необсаженного ствола скважины / И.С. Копейкин, Р.С. Миргородский // Опыт, проблемы и перспективы развития неразрушающих методов контроля и диагностики машин и агрегатов: сб. тр. Междун. науч.-техн. конф. «Вибродиагностика машин и агрегатов нефтяной промышленности». – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2017. – С. 276-283.

15 Копейкин И.С. Усовершенствование пакерно-якорного оборудования, используемого в работах при борьбе с поглощениями в открытых стволах скважин / И.С. Копейкин // Нефть и Газ – 2015: тез. докл. 69-ой Междун. Молодеж. науч. конф. – М.: Изд-во РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина. – 2015. – С. 168-169.