

*На правах рукописи*



**Каракетов Азарий Валерьевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТАНОВКИ УДАРНОГО  
ВНУТРИСКВАЖИННОГО ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАЛЕЖЬ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2017

Работа выполнена на кафедре «Технологические машины и оборудование» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Дроздов Александр Николаевич**

Официальные оппоненты: **Бурьян Юрий Андреевич**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Омский государственный  
технический университет» / кафедра  
«Основы теории механики и автоматичес-  
кого управления», заведующий кафедрой

**Дубинский Геннадий Семенович**  
кандидат технических наук,  
ГАНУ "Институт стратегических  
исследований" Республики Башкортостан /  
лаборатория моделирования процессов  
нефтегазоизвлечения, ведущий научный  
сотрудник

Ведущая организация: ФГБУН «Институт машиноведения имени  
А.А. Благонравова Российской академии  
наук», (г. Москва)

Защита диссертации состоится «19» декабря 2017 года в 16:30 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 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 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Абуталипова Елена Мидхатовна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

В настоящее время в России наметилась тенденция применения технологии волнового воздействия на залежь, как метода увеличения нефтеотдачи (МУН), вследствие простоты реализации и относительно невысоких эксплуатационных затрат. В их основе лежат различные способы генерации и направленной передачи энергии от источника в пласт в виде распространяющихся возмущений.

Достижение максимальной энергоэффективности вибросейсмического воздействия (ВСВ) возможно при применении устройств ударного внутрискважинного вибросейсмического воздействия на залежь (УВСВ), обеспечивающих минимизацию потерь волновой энергии и активацию не только процессов, приводящих к увеличению нефтеотдачи и обладающих эффектом последействия, но также и процессов, для которых необходимо постоянное волновое излучение.

Известные на сегодняшний день модификации УВСВ обладают рядом конструктивных недостатков, существенно ограничивающих их межремонтный период и рабочий диапазон. Также, одним из факторов, препятствующих промышленному применению УВСВ, является отсутствие полноценной методики расчета и алгоритма проектирования, исходя из условия проведения эффективного воздействия на пласт при сохранении целостности крепи скважины.

Таким образом, решение задач по совершенствованию установки вибросейсмического воздействия на залежь, а также разработки методики расчета и алгоритма ее проектирования предопределяет высокую актуальность и значимость диссертационного исследования.

### **Степень разработанности**

К началу работы над диссертацией известны наиболее значимые научные положения, в которых детально разъясняются физические основы, и дается оценка влияния волнового излучения на процессы фильтрации флюидов в пористых средах и геомеханическое состояние пластовой системы. Однако в них отсутствуют сведения о методиках расчета установок внутрискважинного вибросейсмического воздействия на залежь и их проектировании.

**Область исследования** соответствует паспорту специальности 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы»: п.5 – разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и процессов и оценки их экономической эффективности и ресурса; п.6 – исследование технологических процессов, динамики машин, агрегатов, узлов и их взаимодействия с окружающей средой.

**Цель работы** – разработка технических и методологических решений по расширению рабочего диапазона установки ударного внутрискважинного вибросейсмического воздействия на залежь.

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

1 Аналитический обзор физических принципов, методов и устройств для реализации волнового воздействия на пласт.

2 Оптимизация конструкций элементов УВСВ по критериям минимизации износа внутренней поверхности корпуса подъемного узла и максимизации рабочего диапазона УВСВ и долговечности штока ударника, а также модернизация компоновки внутрискважинного оборудования для ВСВ на залежь.

3 Разработка методики расчета усовершенствованной установки ударного внутрискважинного вибросейсмического воздействия на залежь.

4 Экспериментальные исследования рабочих характеристик УВСВ и оценка влияния параметров подъемного узла (контактного угла, силы сцепления) на ширину рабочего диапазона установки.

### **Научная новизна**

1 Разработаны и верифицированы математические модели процессов падения ударника в сборе и плунжера в стесненных условиях в восходящем потоке скважинной продукции, на основе которых впервые получены кинематические зависимости скоростей и положений ударника в сборе и плунжера УВСВ от времени их движения.

2 Установлено, что при уменьшении величины контактного угла седла клапана УВСВ с  $30^\circ$  до  $10^\circ$  достигается более чем двукратное расширение ее рабочего диапазона по расходу среды, в частности, у опытного образца УВСВ – с

(40÷140) до (40÷300) м<sup>3</sup>/сут, у лабораторной модели УВСВ – с (35÷170) до (35÷320) м<sup>3</sup>/сут.

### **Методы исследования**

Решение задач диссертационного исследования осуществлялось теоретически и экспериментально при помощи стандартных и самостоятельно разработанных методик, специально созданного аттестованного экспериментального стенда, методов статистической обработки данных и применения современных программных комплексов и систем компьютерного моделирования.

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

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании выбора оптимальных параметров конструкции УВСВ, исходя из условий обеспечения ее долговечности и эффективности.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1 Разработана новая модификация УВСВ, имеющая улучшенные эксплуатационные характеристики, получен патент РФ на изобретение № 2515623.

2 Результаты диссертационного исследования по части моделирования рабочего цикла, проектирования и оптимизации конструкции УВСВ приняты ко внедрению» в АО «Новомет-Пермь», а по части экспериментального исследования влияния ударного воздействия УВСВ на величину нефтеотдачи – в ООО СК «РУСВЬЕТПЕТРО.

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

1 Оптимизированные конструкции центратора штока, подъемного узла и ударника в сборе, обеспечивающие увеличение долговечности и расширение рабочего диапазона УВСВ.

2 Методика расчета и алгоритм проектирования УВСВ, позволяющая определять основные параметры установки под конкретные условия ее эксплуатации.

3 Результаты стендовых исследований рабочих характеристик опытного образца и лабораторной модели УВСВ, подтверждающих эффективность

предложенного способа оптимизации конструкции подъемного узла и высокую степень согласованности расчетных и экспериментальных характеристик УВСВ.

4 Метод оценки напряженно-деформированного состояния крепи скважины, возникающего в процессе проведения ударного внутрискважинного ВСВ, который позволяет определить значение предельно допустимого ударного импульса УВСВ, обеспечивающего сохранение целостности крепи скважины

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов работы обеспечивалась применением широко апробированных, а также оригинальных методик, экспериментальных исследований, осуществленных на оборудовании, прошедшем государственную поверку. Перед построением графических зависимостей все экспериментальные данные обрабатывались с использованием подходов теории ошибок эксперимента и математической статистики.

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: III-й Международной конференции «Воздействие упругих волн на флюиды в пористых средах (EWEF – 2012)» (г. Москва, 2012 г.); конференции «Технические диалоги ОАО «Газпром» и опорных вузов» (г. Москва, 2014 г.); 65-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2011» (г. Москва, 2011 г.); научно-технических советах АО «Зарубежнефть», АО «Новомет- Пермь», ОАО «ОКБ БН КОННАС» (г. Москва, 2014 г.); научных семинарах кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений» и кафедры «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина (г. Москва, 2013 – 2014 гг.); заседании кафедры «Технологические машины и оборудование» УГНТУ (г. Уфа, 2016 г.); научных сессиях аспирантов РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина (г. Москва, 2012 – 2014 гг.).

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 работах, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ. Получен 1 патент РФ на изобретение.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения,

списка использованных источников, включающего 146 наименований, содержит 198 страниц машинописного текста, 71 рисунок, 31 таблицу и 2 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и основные задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору физических принципов, технических средств и методов, обеспечивающих реализацию волнового воздействия на пласт.

Рассмотрены исторические предпосылки использования технологии волнового воздействия, как метода увеличения нефтеотдачи. Представлен обзор наиболее значимых научных положений, отраженных в работах С.М.Гадиева, О.Л. Кузнецова, Э.М. Симкина, В.Н. Николаевского, В.П. Дыбленко, Р.Ф. Ганиева, Б.Ф. Симонова, Г.Г. Вахитова, В.Н. Белоненко, Г.П. Лопухова, М.Л. Сургучева, Л.Х. Ибрагимова, А.П. Крылова, А.М. Свалова, А.Я. Хавкина, М.А. Садовского, С.В. Сердюкова, А.В. Николаева, С.А. Ефимовой и др., благодаря которым детально разъясняются физические основы, и дается оценка влияния волнового излучения на процессы фильтрации флюидов в пористых средах и геомеханическое состояние пластовой системы. Применительно к виброрейсмическому воздействию на залежь рассмотрены особенности возбуждения автоколебаний и резонанса в геофизической среде. Показан высокий потенциал технологии ВСВ.

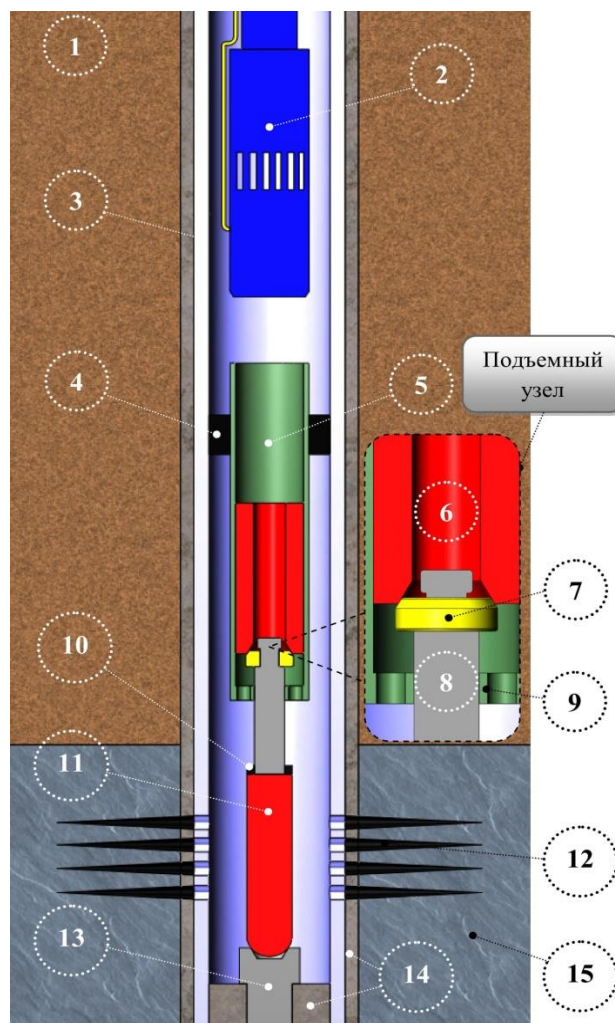
Основное внимание во главе уделено обзору методов и устройств для реализации волнового воздействия на пласт, проанализированы их области применения и результаты опытно-промышленных испытаний. Акцент сделан на группе методов виброрейсмического воздействия, рассмотрены конструкции и принцип действия технических средств, используемых для его проведения как с земной поверхности и с устья скважин, так и внутрискважинных установок, в том числе по части УВСВ, выявлены конструктивные недостатки и намечены пути ее совершенствования.

Анализ литературы по тематике, связанной с расчетом и проектированием УВСВ, показал, что до настоящего времени отсутствовали полноценная методика расчета и алгоритм проектирования УВСВ, исходя из условия проведения эффективного воздействия на пласт при сохранении целостности крепи скважины, что и указало на необходимость их разработки.

На основании выполненного аналитического обзора была определена цель и поставлены задачи диссертационного исследования.

**Вторая глава** посвящена решению задач, направленных на конструктивную оптимизацию элементов УВСВ и модернизацию компоновки внутрискважинного оборудования для ВСВ на залежь.

Предварительно рассмотрен состав УВСВ новой конструкции (рисунок 1) и приведено подробное описание принципа ее работы.



1 – горный массив; 2 – ЭЦН; 3 – эксплуатационная колонна; 4 – пакер; 5 – корпус подъемного узла; 6 – плунжер; 7 – клапан; 8 – шток; 9 – центратор-ограничитель; 10 – манжета; 11 – ударник; 12 – перфорационные отверстия; 13 – наковальня; 14 – цементный камень; 15 – продуктивный пласт.

Рисунок 1 – Принципиальная схема УВСВ новой конструкции



Погружной насос 2 откачивает продукцию, поступающую из пласта 15. В начальный момент времени плунжер боится на клапан 7 так, что отверстие в плунжере является полностью перекрытым. Пакер 4 разобьёт область скважины под плунжером от области над плунжером, вследствие чего при работе насоса создается перепад давлений под и над клапаном. При достижении достаточной величины перепада давления подъемный узел, представляющий собой соединение клапана и плунжера, поднимается вверх, увлекая за собой ударник 11, соединённый с клапаном посредством штока 8.

При достижении подъемным узлом крайнего верхнего положения ударник в сборе (ударник 11– манжета 10 – шток 8 – клапан 7) упирается манжетой в центратор-ограничитель 9. Через отверстия в центраторе-ограничителе поток скважинной продукции продолжает движение, оказывая давление на торцевую кольцевую поверхность плунжера, тем самым стремясь раскрыть подъемный узел. Под действием силы инерции, возникающей вследствие резкой остановки движения ударника в сборе, а также перепада давления, происходит раскрытие соединения плунжера и клапана и падение ударника в сборе на наковальню 13.

Плунжер под действием собственного веса также падает вниз, вслед за ударником в сборе. Скважинная продукция при этом, проходя сквозь плунжер, поступает на прием насоса. После нанесения удара ударником по наковальне, плунжер падает на клапан, в результате чего отверстие в нем полностью перекрывается, и система возвращается в исходное состояние. Таким образом, реализуется замкнутый цикл работы УВСВ. Повторяющиеся удары генерируют в продуктивном пласте низкочастотные упругие волны, благотворно влияющие на процессы нефтеизвлечения.

В предыдущих исполнениях УВСВ центратор штока располагался на нем (штоке) посредством скользящей посадки, при этом центрирование осуществлялось по наиболее ответственной внутренней поверхности корпуса подъемного узла, что является существенным недостатком данной конструкции центратора. В этом случае при работе УВСВ имеет место непосредственный механический контакт боковой поверхности центратора и внутренней поверхности корпуса подъемного узла, приводящий к ее ускоренному износу, в особенности, при наличии механических примесей в составе скважинной продукции.

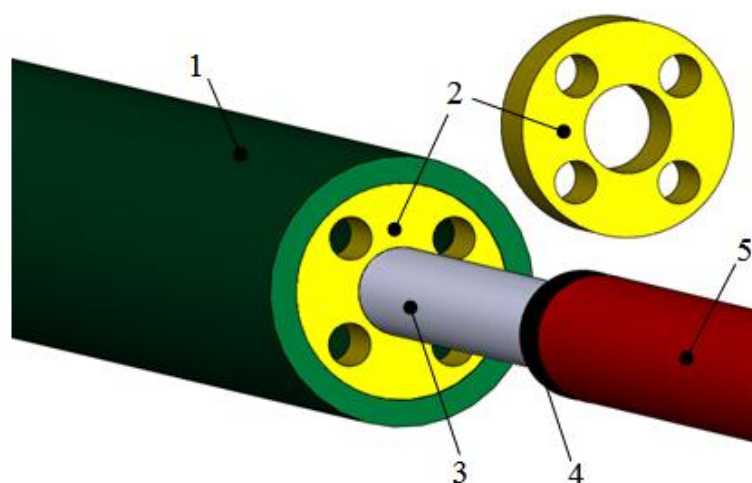
В рамках диссертационного исследования разработана новая конструкция стационарного центриатора штока, выполняющего также и функцию ограничителя подъема ударника выше проектной отметки, применение которого позволяет снизить износ внутренней поверхности корпуса подъемного узла при работе УВСВ по сравнению с вариантом применения центриатора предыдущей модификации.

Так, стационарный-центриатор ограничитель (рисунок 2) располагается внутри корпуса подъемного узла посредством резьбового соединения и осуществляет центрирование штока по его боковой поверхности, в результате чего исключается скольжение центриатора штока по внутренней поверхности корпуса подъемного узла и устраняется один из факторов, приводящих к ее износу.

В процессе работы УВСВ помимо ударов, наносимых ударником по наковальне, также имеют место удары в результате падения плунжера на клапан. Данное воздействие способно оказывать негативное влияние на несущую способность штока, приводя с течением времени к его усталостному разрушению, что и имело место быть при проведении ОПИ предыдущей модификации УВСВ в Татарстане.

Для решения проблемы неудовлетворительной долговечности штока в диссертационной работе предложены два подхода:

– использование гидравлического демпфера в составе ударника в сборе, позволяющего минимизировать передачу ударных нагрузок со стороны плунжера на шток;



1 – корпус подъемного узла; 2 – центриатор-ограничитель; 3 – шток; 4 – манжета; 5 – ударник

Рисунок 2 – Конструкция УВСВ со стационарным центриатором-ограничителем

– определение геометрических параметров ударника в сборе, при которых обеспечивается работа штока без накопления пластических деформаций, приводящих к его усталостному разрушению, для широкого спектра условий эксплуатации.

С точки зрения более полного использования потребляемой мощности УВСВ включение гидравлического демпфера в состав ударника в сборе не является оптимальным решением. Так, при ударной посадке массивного плунжера на клапан, ударник в сборе может служить волноводом и передавать воздействие плунжера на пласт, за счет чего будет максимально полно использоваться потребляемая мощность УВСВ, преобразуемая в дальнейшем в энергию сейсмических волн. С этой точки зрения второй подход является более предпочтительным.

Для решения поставленной в рамках второго подхода задачи было проведено численное моделирование циклического ударного нагружения ударника в сборе падающим плунжером для нескольких сценариев с различными соотношениями диаметров штока  $d_{шт}$  и ударника  $d_{уд}$  в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS Workbench при прочих параметрах УВСВ, близких к максимально возможным в скважинных условиях (таблица 1). В качестве материала контактирующих элементов задавалась сталь 40Х.

Расчетный процесс разбивался на 2 этапа: определение напряженно-деформированного состояния (НДС) штока при одном цикле нагружения в модуле расчета процессов явной динамики Autodyn; импорт данных из Autodyn в модуль расчета усталостной прочности nCode DesignLife для получения НДС штока при циклическом нагружении.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета долговечности штока

Наименование параметра	Значение
Масса плунжера, кг	500
Скорость удара плунжера, м/с	2
Длина штока, м	5
Диаметр штока, $d_{шт}$ , мм	40÷70
Диаметр ударника, $d_{уд}$ , мм	80÷100

В результате симуляции были получены эпюры распределения коэффициента запаса усталостной прочности (FOS) по телу штока при базовом числе циклов нагружения ( $10^7$ ). В таблице 2 представлены минимальные значения FOS для различных сценариев эксперимента.

На основе полученных данных можно выделить диапазон значений для соотношения диаметров штока и ударника, при которых не происходит усталостного разрушения штока для указанных параметров УВСВ:

$$\frac{d_{шт}}{d_{уд}} = 0,65 \div 0,7. \quad (1)$$

Таким образом, для увеличения долговечности штока УВСВ возможна реализация любого из предложенных подходов к оптимизации конструкции ударника в сборе, при этом второй подход является предпочтительным.

Таблица 2 – Результаты расчета FOS штока

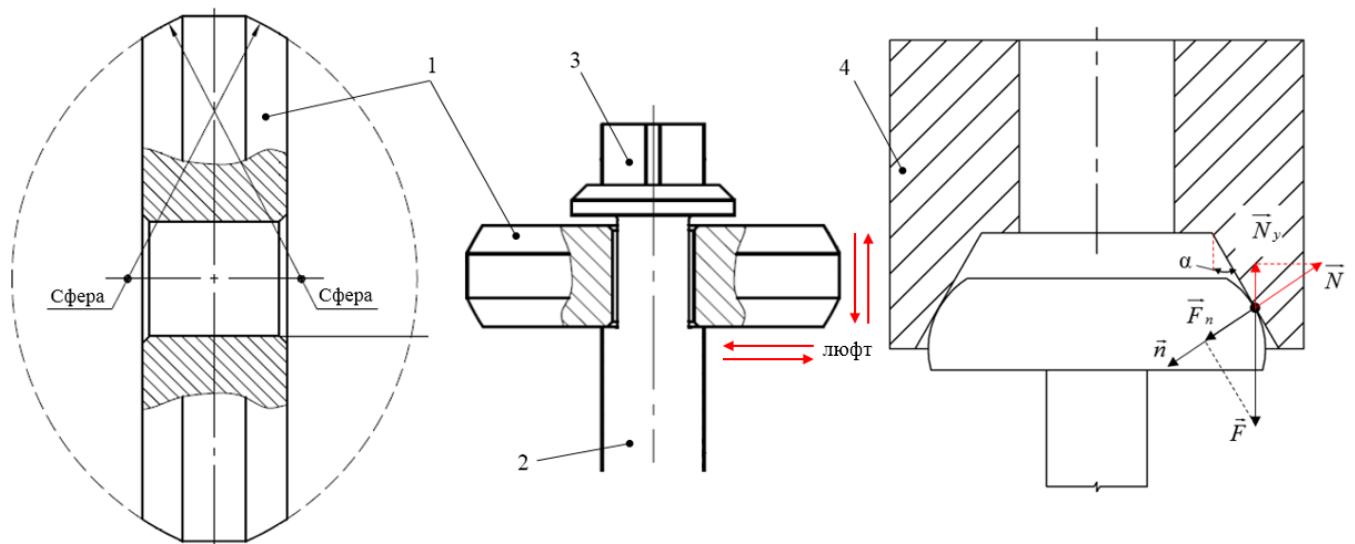
Соотношение диаметров $d_{шт}/d_{уд}$	Минимальный коэффициент запаса усталостной прочности по телу штока после $10^7$ циклов нагружения	
	$d_{уд} = 80$ мм	$d_{уд} = 100$ мм
0,5	0,72	1,1
0,6	1,0	1,6
0,7	1,4	2,2

Анализ ранее проведенных стендовых исследований предыдущих модификаций УВСВ, имевших различные массово-геометрические характеристики, показал, что для всех характерен ограниченный рабочий диапазон по расходу среды. Это обусловлено нарушением сцепления клапана и плунжера при увеличении расхода среды, с одной стороны, вследствие несоосной посадки клапана в седло, а, с другой стороны – действием инерционных сил на элементы сцепленной компоновки «ударник в сборе – плунжер», приводящим к расцеплению клапана и плунжера еще до окончания подъема компоновки до целевой высоты.

Ранее, в составе УВСВ использовался клапан с конической контактной поверхностью, жестко соединенный со штоком, что при недостаточно точной центровке оси штока относительно оси седла клапана приводило к периодическому нарушению сцепления элементов подъемного узла при работе УВСВ. Это особенно

характерно для работы установки в области высоких расходов среды в силу существенной турбулизации потока и неравномерности поля давлений вокруг ударника в сборе. При этом увеличение точности центровки ведет к нелинейному росту сил трения, действующих на ударник в сборе, что также является фактором, ограничивающим рабочий диапазон УВСВ.

Так, в диссертационной работе разработана новая конструкция подъемного узла, позволяющая минимизировать вышеуказанные негативные эффекты и, в свою очередь, расширить рабочий диапазон УВСВ. Отличительными особенностями данной конструкции являются сферическая форма контактной поверхности тарелки клапана и способ ее закрепления на штоке (рисунок 3), допускающий относительную подвижность клапана и штока, а также использование седла клапана со оптимальной (минимальной) величиной контактного угла –  $10^\circ$ . Минимизация контактного угла обусловлена необходимостью снижения величины проекции силы реакции опоры на вертикальную ось  $\vec{N}_y$  (см. рисунок 3), действующей на плунжер при его посадке на клапан, за счет чего достигается снижение эффекта «рикошета», негативно влияющего на процесс сцепления подъемного узла.



1 – тарелка клапана; 2 – шток; 3 – болт; 4 – седло клапана;  $\alpha$  – контактный угол;  
 $\vec{F}$  – сила удара при посадке плунжера на клапан;  $\vec{N}$  – сила реакции опоры.

Рисунок 3 – Эскиз клапана новой конструкции и схема его взаимодействия с седлом

С другой стороны, дальнейшее уменьшение контактного угла недопустимо, во избежание заклинивания клапана в седле в результате эффекта самоторможения, возникающего при контактном угле  $8,5^\circ - 9^\circ$  и менее (для стали). Для компенсации инерционного раскрепления также предложено использовать утяжеленный плунжер, благодаря чему, достигается увеличение силы сцепления подъемного узла.

С целью экспериментальной оценки влияния величины контактного угла и силы сцепления подъемного узла на ширину рабочего диапазона УВСВ было решено протестировать несколько исполнений подъемного узла с различными по величине контактного угла седлами клапана, а также плунжерами различной массы. Результаты данных исследований представлены в разделе, посвященном главе 4 диссертационной работы.

В заключительной части главы 2 предложен способ модернизации компоновки внутрискважинного оборудования для ВСВ на залежь путем использования в ее составе инновационной байпасной системы типа Y-tool. Данная система позволяет осуществлять безопасный спуск геофизического прибора до проектной глубины без подъема компоновки «УЭЦН – УВСВ», в результате чего открывается возможность отслеживания сейсмического отклика пласта и проведения оценки технического состояния крепи скважины в режиме реального времени, что, в свою очередь, позволяет снизить риск повреждения цементного камня и оптимизировать режим ВСВ.

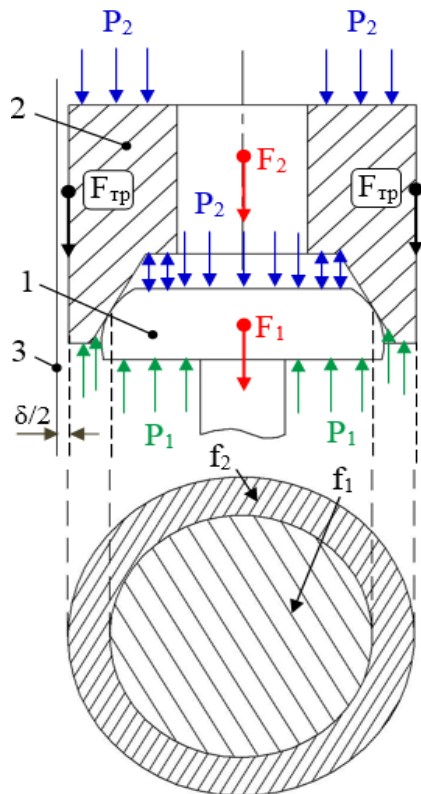
**Третья глава** посвящена разработке методики расчета и алгоритма проектирования УВСВ. Проведение анализа и последующего моделирования рабочего цикла УВСВ позволило сформулировать и определить условия, обеспечивающего совершение:

- условие сцепления клапана и плунжера перед началом подъема ударника;
- условие подъема сцепленной компоновки ударника в сборе и плунжера;
- условие отсутствия преждевременного сцепления клапана и плунжера в фазе падения ударника в сборе.

Ранее, В.С. Вербицким было получено условие сцепления подъемного узла (клапана и плунжера), однако при его выводе не была учтена сила трения в плунжерной паре, значение которой может изменяться в широких пределах, в зависимости от величины зазора между плунжером и корпусом подъемного узла.

Кроме того, до настоящего времени в литературе вовсе не были рассмотрены остальные указанные условия, что обуславливает необходимость их количественного определения.

С целью уточнения первого условия и получения второго был проведен комплексный силовой анализ механизма сцепления подъемного узла и гидродинамический расчет течения газожидкостной смеси в зазоре плунжерной пары (рисунок 4).



1 – клапан; 2 – плунжер; 3 – корпус подъемного узла

Рисунок 4 – Расчетная схема процесса сцепления подъемного узла

В результате были получены следующие выражения для условий совершения рабочего цикла УВСВ:

- условие сцепления подъемного узла (клапана и плунжера):

-

$$\frac{2f_1}{f_1 + f_2} - 1 > \frac{F_1 - F_2 - F_{mp}}{(P_1 - P_2)(f_1 + f_2)} = \frac{F_1 - F_2 - F_{mp}}{F_1 + F_2 + F_{mp}}; \quad (2)$$

- условие подъема сцепленной компоновки ударника в сборе и плунжера:

$$Q \geq Q_{\min} = \sqrt{\frac{F_1 + F_2 + F_{\text{тр}}}{(f_1 + f_2) \left[ \rho g \frac{i}{Q_{\min}^2} L_{\text{пл}} + \frac{4\rho(D-\delta)^2 D^2 + 8\rho(D-\delta)^4}{\pi^2 D^4 (D^2 - (D-\delta)^2)^2} \right]}}, \quad (3)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – веса ударника в сборе и плунжера в скважинной продукции, Н;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения в плунжерной паре, Н;  $f_1, f_2$  – площади поперечного сечения клапана и плунжера (седла) по периметру их контакта, м<sup>2</sup>;  $D$  – внутренний диаметр корпуса подъемного узла, м;  $L_{\text{пл}}$  – длина плунжера, м;  $\delta$  – диаметральный зазор между плунжером и корпусом подъемного узла, м;  $\rho$  – плотность скважинной продукции, кг/м<sup>3</sup>;  $i$  – гидравлический уклон зазора;  $Q$  – дебит скважины, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\min}$  – минимальный (пусковой) расход среды через УВСВ, м<sup>3</sup>/с;  $P_1$  и  $P_2$  – давления в областях под и над подъемным узлом, Па;  $i$  – гидравлический уклон в зазоре плунжерной пары, м/м.

Условие подъема сцепленной компоновки ударника в сборе и плунжера определяет нижнюю границу рабочего диапазона УВСВ по дебиту скважинной продукции. Фактически,  $Q_{\min}$  равен такому дебиту скважины через кольцевой зазор в плунжерной паре, который обеспечивает достаточный для подъема сцепленной компоновки перепад давления в зазоре.

Третье условие – отсутствие преждевременного сцепления клапана и плунжера в фазе падения ударника в сборе, формально может быть представлено, как превышение значения текущей ординаты нижнего торца плунжера над значением текущей ординаты верхней плоскости клапана на всем протяжении падения ударника в сборе. Проверка выполнения данного условия возможна при наличии кинематических зависимостей падения ударника в сборе и плунжера, получение которых является одной из ключевых подзадач диссертационного исследования и требует осуществления математического моделирования их движения.

Построение математических моделей процессов падения ударника в сборе и плунжера в стесненных условиях в восходящем потоке скважинной продукции базируется на проведении анализа движения указанных элементов УВСВ под действием различных сил.



В результате данного анализа были получены следующие дифференциальные уравнения движения и начальные условия:

- для ударника в сборе:

$$M_{y\delta}^{в\ сборе} \frac{d^2 y_{y\delta}}{dt^2} = M_{y\delta}^{в\ сборе} \frac{dv_{y\delta}}{dt} = F_{m.y\delta}^{в\ сборе} - T_{y\delta} - T_{ум} - \Delta P_{y\delta} S_M^{y\delta} - \Delta P_{ум} S_M^{ум} - R_{скл}; \quad (4)$$

$$\begin{cases} y'_{y\delta}(0) = v_{y\delta}(0) = 0; \\ y_{y\delta}(0) = H_x, \end{cases} \quad (5)$$

- для плунжера:

$$m_{nl} \frac{d^2 y_{nl}}{dt^2} = m_{nl} \frac{dv_{nl}}{dt} = F_{nl} - \Delta P_{nl} S_{nl} - T_{nl} - F_{mp}; \quad (6)$$

$$\begin{cases} y'_{nl}(0) = v_{nl}(0) = 0; \\ y_{nl}(0) = H_x, \end{cases} \quad (7)$$

где  $M_{y\delta}^{в\ сборе}$  и  $m_{nl}$  – массы ударника в сборе и плунжера, кг;  $F_{y\delta}^{в\ сборе}$  и  $F_{nl}$  – веса ударника в сборе и плунжера в скважинной продукции, Н;  $T_{y\delta}$ ,  $T_{ум}$  и  $T_{nl}$  – силы вязкого трения, действующие со стороны флюида на ударник, шток и плунжер соответственно, Н;  $\Delta P_{y\delta}$ ,  $\Delta P_{ум}$  и  $\Delta P_{nl}$  – перепады давления, срабатываемые на ударнике, штоке и плунжере соответственно, Па;  $S_M^{y\delta}$  и  $S_M^{ум}$  – миделевы площади сечения ударника и штока, м<sup>2</sup>;  $S_{nl}$  – площадь поперечного сечения плунжера по телу, м<sup>2</sup>;  $R_{скл}$  – сила лобового сопротивления, действующая на клапан, Н;  $v_{y\delta}$  и  $v_{nl}$  – скорости движения ударника в сборе и плунжера, м/с;  $y_{y\delta}$  и  $y_{nl}$  – текущие ординаты центра масс ударника в сборе и плунжера, м;  $H_x$  – длина рабочего хода ударника в сборе, м.

Определение выражений сил, входящих в формулы (4) и (6), было проведено для общего случая, когда скважинная продукция представляет собой газожидкостную смесь, с учетом ее структуры при различных значениях газосодержания.

Интегрирование полученных дифференциальных уравнений выполняется численно, например, методом Рунге-Кутты 4-го порядка, ввиду неявной зависимости их правых частей от скоростей движения ударника в сборе и плунжера. Результатом являются кинематические характеристики типа  $v_{y\delta, nl}(t)$  и  $y_{y\delta, nl}(t)$ ,

определяющие зависимости скоростей движения и координат центра масс ударника в сборе и плунжера от времени.

Данные характеристики позволяют количественно определить условие отсутствия преждевременного сцепления ударника в сборе и плунжера в фазе их падения в следующем виде:

$$y_{пл}^{н.н}(t) - y_{кл}^{6.н}(t) > 0, \quad (8)$$

где  $y_{пл}^{н.н}$  – ордината нижней плоскости (торца) плунжера;  $y_{кл}^{6.н}$  – ордината верхней плоскости клапана.

Также, на основе полученных кинематических характеристик рассчитывается частотная характеристика УВСВ, представляющая собой зависимость частоты совершения рабочих циклов от расхода скважинной продукции. Далее в разделе, посвященном экспериментальным исследованиям, приводится информация о верификации расчетных кинематических и частотных характеристик УВСВ на аттестованном стенде.

На основании вышеописанной методики расчета УВСВ, физических основ распространения упругих волн с учетом практических рекомендаций по достижению эффекта от ВСВ, а также метода оценки допустимого ударного импульса, разработанного в настоящей главе диссертации, было произведено построение алгоритма проектирования УВСВ под конкретные условия эксплуатации, исходя из следующего набора исходных данных:

- дебит скважины по жидкости и газу, м<sup>3</sup>/с;
- обводненность скважинной продукции, %;
- физические свойства дегазированной нефти, пластовой воды и газа при стандартных условиях, кривая разгазирования нефти;
- плотность материалов ударника, штока, клапана и плунжера, кг/м<sup>3</sup>;
- термобарические условия в интервале подвески УВСВ;
- внутренний диаметр эксплуатационной колонны, м;
- максимально допустимая величина ударного импульса, исходя из условия сохранения целостности крепи скважины, кг·м/с;

- требуемая интенсивность волнового излучения в пласте (на расстоянии  $R$  от источника), Вт/м<sup>2</sup>;
- частота рабочих циклов при заданном дебите скважины, Гц.

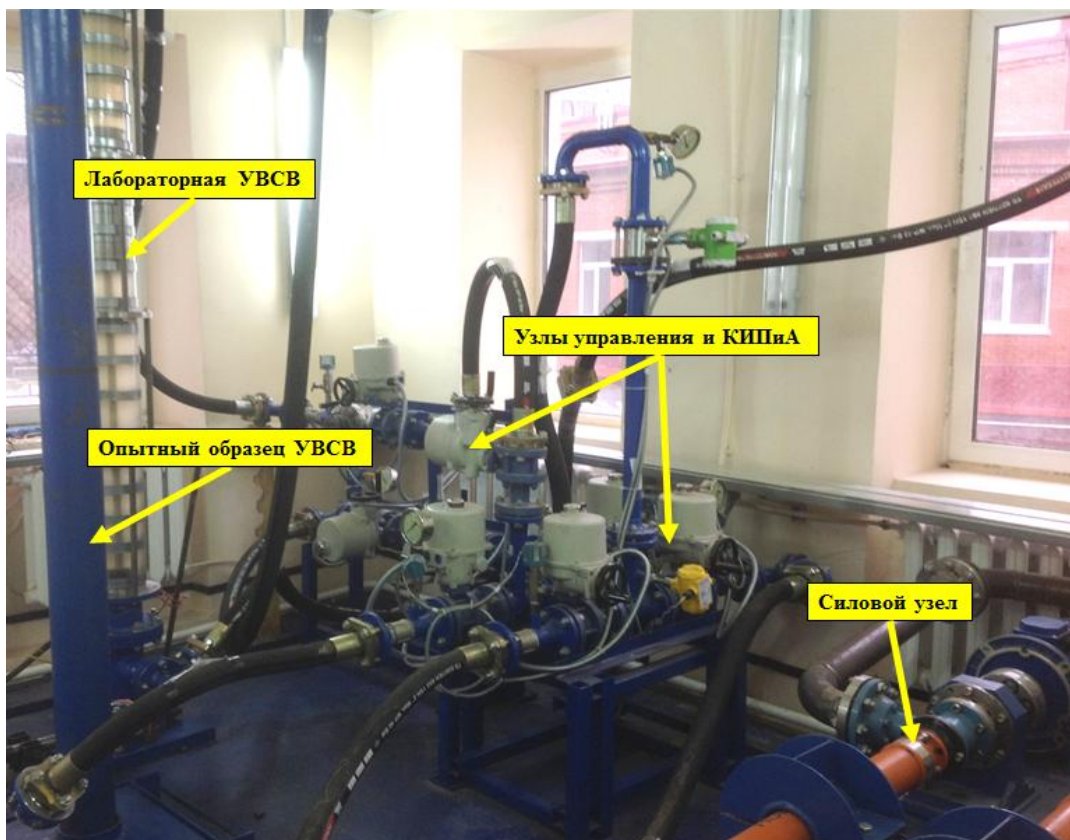
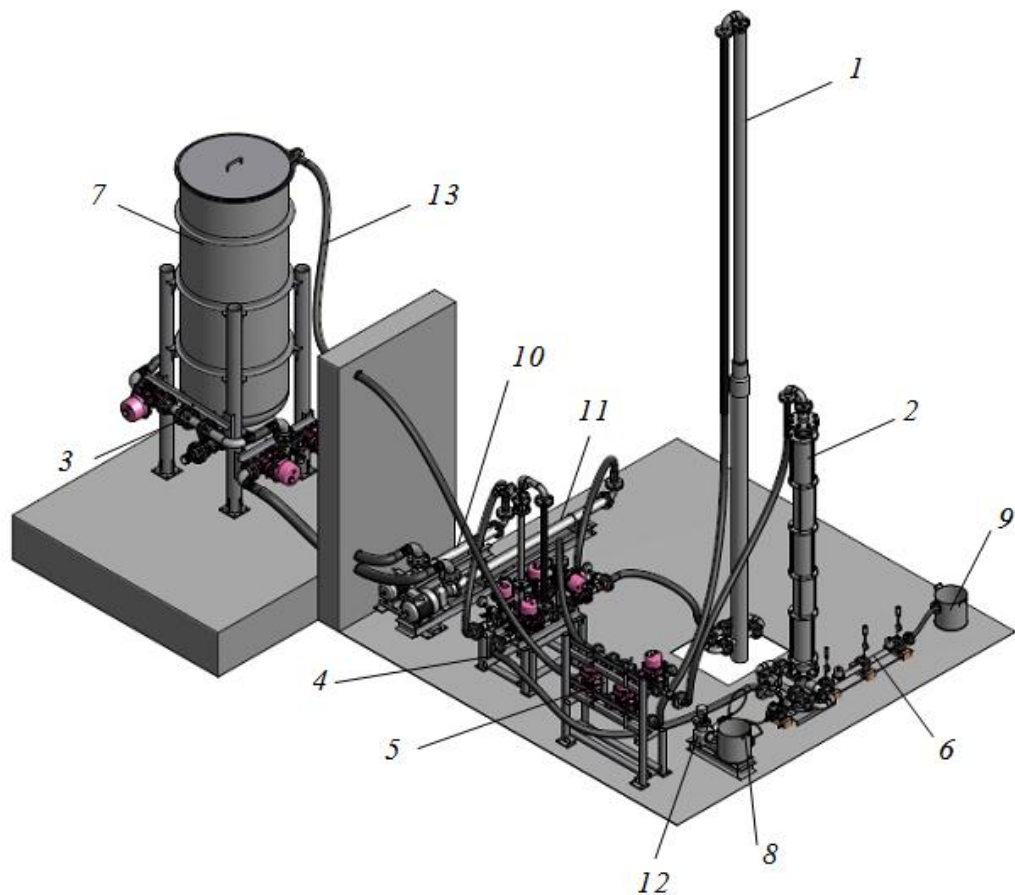
С помощью данного алгоритма для проведения экспериментальных исследований были спроектированы опытный образец и лабораторная модель УВСВ. Последняя представляет собой полнофункциональную установку, имеющую прозрачный корпус, с целью визуального наблюдения за процессами, происходящими при ее работе.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям рабочих характеристик опытного образца УВСВ (далее – ОУВСВ) и лабораторной модели УВСВ (далее – ЛУВСВ), а также оценке влияния ударного воздействия на коэффициент вытеснения нефти из образца трещиноватой карбонатной породы с гидрофобной матрицей.

Для проведения указанных исследований был создан автоматизированный стенд, являющийся частью аттестованного многофункционального стендового комплекса, который расположен в Особом конструкторском бюро бесштанговых насосов «КОННАС», г. Москва. На рисунке 5 показан его общий вид.

В рамках первой серии экспериментов определялся рабочий диапазон установок по расходу среды для пяти исполнений седла клапана с различными контактными углами в диапазоне от 30° до 10°, а также для трех исполнений плунжера ЛУВСВ, массы которых составляли 25, 30 и 40 кг соответственно.

В результате было установлено, что уменьшение величины контактного угла седла клапана с 30° до 10° привело к расширению рабочей области ОУВСВ с (40÷140) до (40÷300) м<sup>3</sup>/сут и ЛУВСВ с (35÷170) до (35÷320) м<sup>3</sup>/сут. Также было зафиксировано расширение рабочего диапазона ЛУВСВ с (25÷255) до (35÷320) м<sup>3</sup>/сут за счет увеличения массы плунжера с 25 до 40 кг при неизменной массе ударника в сборе. Таким образом, была подтверждена эффективность способов оптимизации подъемного узла, предложенных во второй главе диссертационной работы.



1 – ОУВСВ; 2 – ЛУВСВ; 3, 4, 5 – узлы управления и КИПиА; 6 – модель пласта;  
7, 8, 9 – емкости для рабочей жидкости; 10, 11 – подпорные электроцентробежные насосы  
(силовой узел); 12 – дозировочный насос; 13 – гидравлические линии связи.

Рисунок 5 – Общий вид экспериментального стенда

Вторая серия экспериментов была направлена на построение частотных характеристик ОУВСВ и ЛУВСВ с целью проведения сравнительного анализа с частотными характеристиками, полученными в результате расчета на основе разработанной методики (рисунок 6). Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных показал высокую степень сходимости (95 – 97%), что позволяет использовать на практике разработанные в предыдущей главе методику расчета и алгоритм проектирования УВСВ.

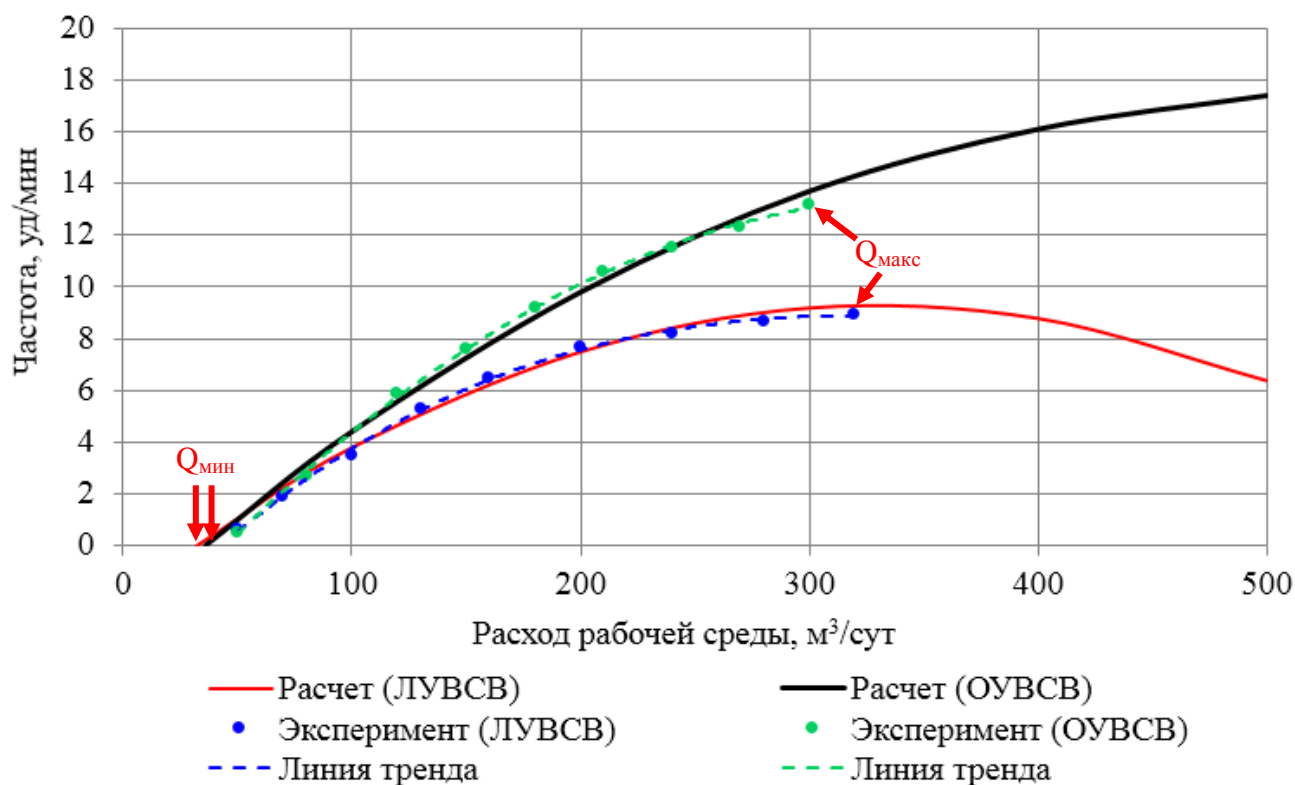


Рисунок 6 – Частотные характеристики УВСВ

В следующей серии экспериментов проводилось определение времени падения ударника в сборе и плунжера ЛУВСВ при различных значениях расхода рабочей среды с целью верификации разработанных математических моделей. Анализ результатов для случая падения ударника в сборе позволил выявить и определить неучтенную силу трения в центраторе штока, а также показал наличие высокой сходимости в случае падения плунжера. В итоге, после корректировки математической модели и пересчета времени падения ударника в сборе, максимальные относительные расхождения по ударнику и плунжеру составили менее 1% и 10,6% соответственно.

Заключительным этапом экспериментальных исследований являлась оценка влияния ударного воздействия, генерируемого лабораторной моделью УВСВ, на коэффициент вытеснения нефти из образца трещиноватой карбонатной породы в условиях проведения фильтрационного эксперимента. В результате эксперимента установлено, что ударное воздействие способствовало более полному вытеснению нефти из керна, вследствие чего прирост коэффициента вытеснения составил 9,3%. При этом средняя мощность воздействия составляла 5 Вт, а частота – 8,5 уд/мин.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ:**

1 Проведена оптимизация конструкций элементов УВСВ, а именно:

– центратора, что обеспечило снижение износа внутренней поверхности корпуса подъемного узла за счет изменения способа центрирования штока. При этом новая конструкция центратора также предполагает выполнение им функции ограничителя подъема ударника в сборе, что существенно упрощает конструкцию подъемного узла УВСВ.

– подъемного узла, что обеспечило расширение рабочего диапазона УВСВ за счет уменьшения величины контактного угла седла клапана и использования тарелки клапана новой конструкции.

– ударника в сборе в двух вариантах: 1) путем использования в его составе гидравлического демпфера, позволяющего разгрузить тело штока от разрушительных напряжений; 2) путем определения диапазона для соотношения диаметров штока и ударника (0,65-0,7), обеспечивающего работу штока без накопления пластических деформаций, что позволяет эксплуатировать ударник в сборе без использования дополнительных амортизирующих устройств, снижающих энергетическую эффективность УВСВ.

2 Предложен способ модернизации компоновки внутрискважинного оборудования для ВСВ на залежь путем включения в ее состав инновационной байпасной системы типа Y-tool, позволяющей проводить геофизические исследования в работающей скважине с целью контроля технического состояния крепи скважины и оптимизации процесса ВСВ в режиме реального времени.

3 Разработана методика расчета УВСВ, позволяющая осуществить ее проектирование, исходя из условия проведения эффективного воздействия на пласт при сохранении целостности крепи скважины.

4 Проведены стендовые исследования опытного образца и лабораторной модели УВСВ, а также фильтрационный эксперимент по оценке влияния ударного воздействия, генерируемого УВСВ, на коэффициент вытеснения нефти из карбонатной породы с гидрофобной матрицей, в результате которых:

– установлено, что уменьшение величины контактного угла седла клапана с  $30^\circ$  до  $10^\circ$  приводит к расширению рабочего диапазона опытного образца УВСВ с  $40 \div 140 \text{ м}^3/\text{сут}$  до  $40 \div 300 \text{ м}^3/\text{сут}$  и лабораторной модели УВСВ с  $35 \div 170 \text{ м}^3/\text{сут}$  до  $35 \div 320 \text{ м}^3/\text{сут}$ , а также увеличение массы плунжера с 25 до 40 кг при той же массе ударника в сборе приводит к расширению рабочего диапазона лабораторной модели УВСВ с  $25 \div 255 \text{ м}^3/\text{сут}$  до  $35 \div 320 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;

– показана высокая сходимость экспериментальных частотных характеристик с расчетными (95-97%), а также верифицированы математические модели падения ударника в сборе и плунжера с максимальным расхождением измеренного и расчетного времени падения менее 1% и 10,6% соответственно.

– зафиксирован прирост коэффициента вытеснения нефти на 9,3% за счет ударного воздействия (средняя мощность – 5 Вт, частота – 8,5 уд/мин), генерируемого УВСВ.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Каракетов, А.В. Обоснование эффективности вибросейсмического воздействия на залежь / А.В. Каракетов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – №4. – С. 66-69.

2. Дроздов, А.Н. Методика расчета установки ударного внутрискважинного вибросейсмического воздействия на пласт / А.Н. Дроздов, А.В. Каракетов // Территория Нефтегаз. – 2014. – №10. – С. 40-44.

3. Каракетов, А.В. Конструктивная оптимизация установки ударного внутрискважинного вибросейсмического воздействия на пласт / А.В. Каракетов // Нефтегазовое дело. – 2017. – Т.15. – №2. – С. 45-50.

4. Каракетов, А.В. Оценка состояния крепи скважины в процессе проведения внутрискважинного вибросейсмического воздействия на пласт при одновременной

эксплуатации скважины УЭЦН / А.В. Каракетов // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2014. – №1. – С. 38-43.

5. Пат. 2515623 Рос. Федерация, МПК Е 21 В 28/00, Е 21 В 43/25. Установка для вибротсейсмического воздействия на залежь / Дроздов А.Н., Каракетов А.В.; заявитель и патентообладатель Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина. – № 2012157436/03; заявл. 27.12.2012 ; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.

6. Каракетов, А.В. Технология вибротсейсмического воздействия на пласт, осуществляемого при одновременной эксплуатации скважины УЭЦН/ А.В. Каракетов // Материалы научно-технической конференции, посвященной 20-летию создания ОАО «РИТЭК», «Молодежь и инновационное развитие РИТЭКа» (27 марта). : Сборник докладов. – М., 2012. –С. 35-42.

7. Дроздов, А.Н. Разработка технологии внутрискважинного вибротсейсмического воздействия на продуктивный пласт, осуществляемого при одновременной эксплуатации скважины установкой ЭЦН / А.Н. Дроздов, А.В. Каракетов // Материалы III Международной конференции «Воздействие упругих волн на флюиды в пористых средах (EWEF-2012)» (24 – 28 сентября): Сборник докладов. – М., 2012. – С. 124-127.

8. Каракетов, А.В. Разработка методики расчета установки вибротсейсмического воздействия на пласт при одновременной эксплуатации УЭЦН/ А.В. Каракетов // Материалы 65-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2011» (11-14 апреля). : Сборник тезисов. – М., 2011. – С. 34.