



Ишмухаметов Булат Ханифович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ШТАНГОВОГО СКВАЖИННОГО НАСОСА
ДЛЯ ДОБЫЧИ ОБВОДНЕННОЙ НЕФТИ ИЗ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимского государственного нефтяного технического университета».

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Уразаков Камил Рахматуллович

Официальные оппоненты:

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

Костилевский Валерий Анатольевич
кандидат технических наук,
ООО "Лукойл- Западная Сибирь" /
заместитель генерального директора по
реализации газовых проектов

Ведущая организация

Татарский научно-исследовательский и
проектный институт нефти ПАО «Татнефть»
им. В.Д. Шашина (г. Бугульма).

Защита состоится 14 декабря 2018 г. в 11:30 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

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

Автореферат разослан _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Абуталипова Елена Мидхатовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Для большей части месторождений в Российской Федерации характерна поздняя стадия эксплуатации, при которой проводится комплекс технологических и геологических мероприятий для поддержания уровня добычи нефти. Для поддержания пластового давления, закачивается подтоварная вода, поэтому значительная доля скважин на данных месторождениях производит высокообводненную нефть с содержанием воды более 90%. При этом значительная часть скважин переходит в категорию малодебитных.

Стратегия разработки месторождений, направленная на интенсификацию добычи нефти, приводит к необходимости увеличения глубины спуска насосов. В таких условиях значительно возрастает перепад давления на рабочих органах насосов, что отрицательно сказывается на коэффициенте полезного действия насосов объемного принципа действия, в которых увеличиваются утечки жидкости через плунжерную пару. Утечки возрастают также с уменьшением вязкости жидкости. В отдельных случаях вязкость высокообводненной нефти может снижаться до 1 мПа·с.

Наибольшую распространённость для эксплуатации таких скважин получил способ добычи нефти с применением скважинных штанговых насосных установок (УСШН), в которых рабочие органы плунжер и цилиндр подвержены износу, что также приводит к росту утечек жидкости в процессе эксплуатации. Все это приводит к необходимости поиска решений по совершенствованию штангового насоса, которые позволят повысить подачу насоса и межремонтный период работы скважин в осложненных условиях эксплуатации.

Степень разработанности проблемы

Вопросами эксплуатации различных конструкций штанговых насосных установок в разное время занимались: Адонин А.Н., Аливердизаде К.С., Балакиров Ю.А., Валеев М.Д., Валовский В.М., Вирновский А.С., Захаров Б.С., Ивановский В.Н., Исмагилов Ф.Г., Ишмурзин А.А., Люстрицкий В.М., Максutow Р.А., Мищенко И.Т., Песляк Ю.А., Пирвердян А.М., Уразаков К.Р., и др.

Несмотря на большой вклад многих исследователей, ряд открытых вопросов,

возникающих при эксплуатации штанговых насосов в условиях добычи высокообводненной нефти, не решен. Одним из вопросов является рост утечек жидкости через плунжерную пару по мере ее износа. В работах Ишмурзина А.А., Пирвердяна А.М. консолидированы основные экспериментальные и теоретические зависимости для определения утечек жидкости через гладкие плунжерные пары. В работе Исмагилова Ф.Г. предложен способ нанесения регулярного микрорельефа на поверхность плунжера. Однако вопросы, связанные с подбором оптимальной геометрии микрорельефа на поверхности плунжера, для штанговых насосов, оставались не решенными.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы» (нефтегазовая отрасль), а именно по следующим пунктам: п.1 «Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; механизации производства в соответствии с современными требованиями внутреннего и внешнего рынка, технологии, качества, надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности» и п.6 «Исследование технологических процессов, динамики и машин, агрегатов, узлов и их взаимодействия с окружающей средой».

Цель работы

Повышение эффективности работы штанговых насосных установок в скважинах, продуцирующих высокообводненную нефть путем снижения утечек жидкости в зазоре плунжерной пары.

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

1 Анализ конструкций штанговых насосов для добычи обводненной нефти и исследований для определения утечек жидкости через плунжерную пару.

2 Численное моделирование течения жидкости через плунжерную пару с регулярным микрорельефом для определения геометрических параметров микрорельефа.

3 Разработка экспериментального стенда для исследования течения жидкости через плунжерные пары с регулярным микрорельефом.

4 Разработка мероприятий, направленных на снижение утечек жидкости через плунжерную пару штангового насоса.

Методы решения задач

Поставленные в диссертационной работе задачи решались проведением теоретических и экспериментальных исследований процессов течения жидкости через плунжерные пары. Расчетная часть выполнена с использованием современных средств вычислительной техники, метода конечных элементов, вычислительной гидродинамики и соответствующего программного обеспечения.

Научная новизна

1 Численным моделированием установлены геометрические параметры регулярного микрорельефа, выполненного кольцевыми канавками в форме прямоугольного треугольника, при которых обеспечиваются максимальные гидравлические сопротивления при турбулентном течении жидкости в зазоре плунжерной пары штангового насоса: ширина, равная десяти величинам зазора между плунжером и цилиндром; глубина, в два с половиной раза меньшая, чем ширина; расстояние между канавками должно быть не более 30 величин зазоров.

2 На основе экспериментальных данных установлена зависимость утечек жидкости от перепада давления в плунжерной паре штангового насоса с регулярным микрорельефом на поверхности плунжера, при геометрических параметрах, обеспечивающих максимальные гидравлические сопротивления при турбулентном течении жидкости.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в установлении геометрических параметров регулярного микрорельефа в форме прямоугольного треугольника, при которых обеспечиваются максимальные гидравлические сопротивления при турбулентном течении жидкости в зазоре плунжерной пары, а также в определении уравнений для расчета утечек жидкости через плунжерную пару с канавками.

Практическая значимость работы:

1 Разработаны на уровне изобретений штанговая насосная установка (патент РФ №2624939) и установка для испытания штанговых насосов (патент РФ №165265). Способ изготовления насосов с регулярным микрорельефом, нанесенным на поверхность плунжера по патенту РФ №2624939 принят к внедрению в компании ООО «Югранефтегазпроект».

2 Разработано учебно-методическое пособие «Расчет утечек жидкости через плунжерные пары», используемое в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» при проведении практических занятий по образовательным программам подготовки магистров по направлению «Технологические машины и оборудование» по дисциплине "Основы герметологии".

Положения, выносимые на защиту:

1 Зависимость коэффициента местных сопротивлений при течении жидкости в плунжерной паре с канавками от числа Рейнольдса.

2 Зависимость утечек жидкости через плунжерную пару с регулярным микрорельефом с профилем канавок в виде прямоугольного треугольника от диаметра плунжера, зазора плунжерной пары, вязкости и плотности жидкости, перепада давления на концах плунжера, числа канавок и их конфигурации.

3 Геометрические параметры регулярного микрорельефа, выполненного в форме прямоугольного треугольника, при которых обеспечиваются максимальные гидравлические сопротивления при турбулентном течении жидкости в зазоре плунжерной пары штангового насоса.

4 Конструкция усовершенствованного штангового насоса, обеспечивающая защиту скважинного насоса от мехпримесей путем применения фильтра со сниженной скоростью восходящего потока жидкости и конструкцией плунжера позволяющей снизить величину утечек жидкости в плунжерной паре насоса турбулизацией потока, создаваемой специальной формой канавок.

5 Метод снижения утечек откачиваемой продукции через плунжерную пару штангового насоса за счет нанесения на поверхность плунжера кольцевых канавок,

выполненных в форме прямоугольного треугольника и увеличивающих гидравлические сопротивления течению жидкости.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивалась применением широко апробированных, а также оригинальных методов и методик расчетов различных параметров, экспериментальных исследований, осуществленных на оборудовании, прошедшем государственную поверку.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на: международной научно-технической конференции АГНИ (г. Альметьевск, 2015 г.); международной научно-технической конференции, посвященной памяти А.Х. Мирзаджанзаде УГНТУ (г. Уфа, 2016 г.); 69-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 2018 г.); 14-й международной научно-практической конференции «Роль математики в становлении специалиста» (г. Уфа, 2018 г.); международной научно-технической конференции «Современные технологии в нефтегазовом деле - 2018» УГНТУ (г. Октябрьский, 2018 г.).

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликованы 12 печатных работ, в том числе три статьи в рецензируемом научном журнале, рекомендованном ВАК Минобрнауки РФ, 2 патента на изобретение и одна монография.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 116 наименований, содержит 103 страницы машинописного текста, включающего 43 рисунка, 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность результатов.

В **первой главе** проведен анализ конструкций штанговых насосов для добычи обводненной нефти и исследований течения жидкости в зазорах плунжерных пар. Основными факторами, определяющими величину утечки откачиваемой жидкости через зазор, являются перепад давления на торцах

плунжера, и величина зазора. Перепад давления на торцах плунжера увеличивается с ростом глубины подвески насоса и с уменьшением давления на приеме насоса, что характерно для глубоких малодебитных скважин, или скважин с низким коэффициентом продуктивности. Величина зазора погружного штангового насоса подбирается с учетом перепада давления на торцах плунжера. Кроме того, на утечки жидкости влияют вязкость откачиваемой жидкости, диаметр плунжера и длина плунжера. Рост вязкости откачиваемой жидкости увеличивает гидравлические сопротивления, как в зазоре плунжерной пары (что уменьшает величину утечек), так и в подъемных трубах, поэтому с увеличением вязкости растет и перепад давления жидкости на торцах плунжера, что в свою очередь приводит к некоторому увеличению величины утечек. При варьировании диаметра и длины плунжера насоса, величина утечек изменяется в пределах одного порядка. Тем не менее, в скважинах с большим перепадом давления, устанавливают плунжеры малых диаметров и увеличенной длиной.

С ростом перепада давления и уменьшением вязкости жидкости, необходимо уменьшать зазор между плунжером и цилиндром, однако величина зазора ограничена возможностью заклинивания плунжера в цилиндре, в связи с чем были разработаны конструкции насосов с различными уплотнительными элементами на поверхности плунжера. Анализ эксплуатации таких насосов показывает, что уплотнительные элементы быстро изнашиваются, поэтому широкого распространения такие насосы не получили. Наиболее перспективным для снижения утечек является обработка поверхности плунжера микрорельефом, который обеспечивает турбулизацию потока жидкости и рост гидравлических сопротивлений.

Во **второй главе** проведено численное моделирование течения жидкости через гладкую плунжерную пару и с регулярным микрорельефом в форме канавок.

Целью исследования было определение соотношения геометрических параметров сечения канавки, при котором создавалось максимальное гидравлическое сопротивление при турбулентном режиме течения жидкости. Для численного моделирования переходного течения и турбулентного использовалась модель *SST* (Shear Stress Transport-модель переноса сдвиговых напряжений).

Задача решена в осесимметричном виде. Моделирование течения жидкости

производилось в осевом сечении плунжерной пары. Количество элементов расчетной сетки составляло от 100000 до 1000000 элементов. Элементы использовались гексаэдрической формы. Толщина первого пристеночного слоя была задана величиной 0,0005 мм.

В ходе анализа различных конфигураций канавок установлено, что наибольшие гидравлические сопротивления возникают в канавках в форме прямоугольного треугольника.

Расчетная схема моделирования представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 - Расчетная схема моделирования течения жидкости в зазоре плунжерной пары с канавкой

На входе в канавку задавалась скорость течения $V_{вх}$, на выходе давление $P_{вых}$. В результате расчета определялся перепад давления через канавку. Для плунжерных пар одного диаметра, варьировалась высота канавки H и ширина канавки L . Вязкость задавалась величиной 0,001 Па·с, плотность 1000 кг/м³. Число Рейнольдса для численных экспериментов для каждой величины зазора, при постоянном значении вязкости, варьировалось путем изменения заданной скорости потока жидкости на входе в зазор плунжерной пары.

На рисунке 2 показаны полученные зависимости отношения ширины канавки к величине зазора радиального зазора (0,05 мм), на коэффициент местных сопротивлений. По рисунку видно, что наибольшие сопротивления возникают в канавке с соотношением ее ширины к глубине равным 2,5. Аналогичные графики получаются и при других величинах зазоров (расчеты выполнялись для зазоров от 0,025 до 0,15 мм).

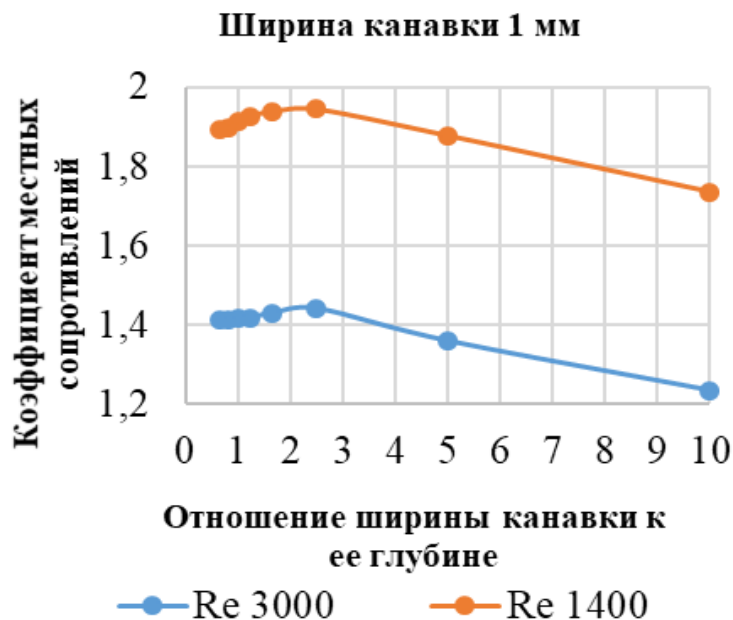


Рисунок 2 - Графики зависимостей коэффициентов местных гидравлических сопротивлений от значения отношения ширины канавки к ее глубине ($\delta=0,1$ мм)

Для определения ширины канавки, при течении через которую будут возникать максимальные гидравлические сопротивления, была поставлена серия экспериментов для плунжеров с глубиной канавки равной $L/2,5$ для различных значений ширины канавки L . Результаты экспериментов представлены на рисунке 3. С увеличением отношения ширины канавки к величине радиального зазора наблюдается сначала рост, а затем стабилизация коэффициента местных сопротивлений.

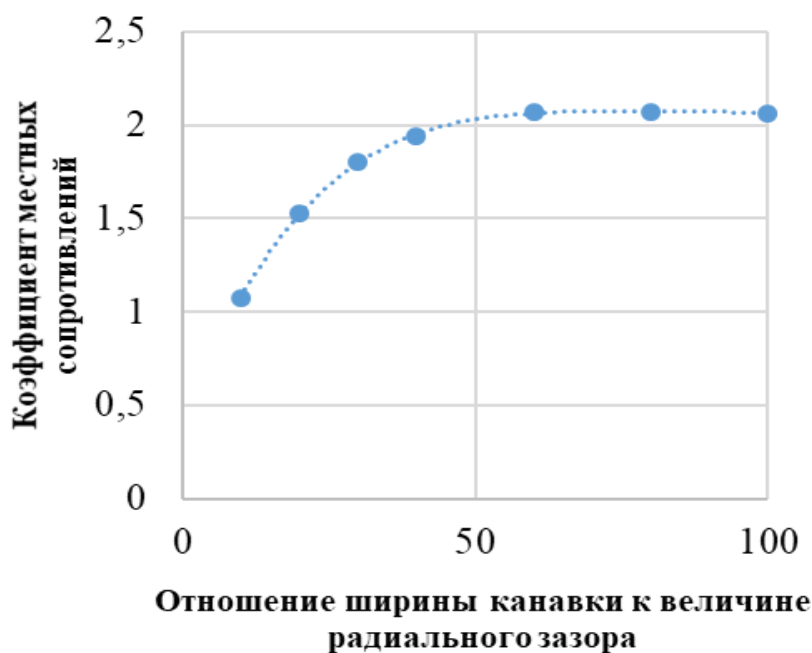


Рисунок 3 - Зависимость коэффициента местных сопротивлений от отношения ширины канавки к величине радиального зазора ($\delta=0,05$ мм)

Для нахождения соотношения размеров канавки, при течении через которую будут возникать максимальные гидравлические сопротивления, необходимо учитывать рост сопротивлений течению жидкости и перепада давления в гладкой части плунжера при увеличении его длины. Согласно уравнению Дарси-Вейсбаха, перепад давления прямо пропорционально длине плунжерной пары. На рисунке 4 показан график, на котором сопоставлялись значения перепадов давления в гладкой плунжерной паре и в паре с канавкой. Длина гладкого плунжера в каждом изменении соответствовала длине плунжерной пары с канавкой.

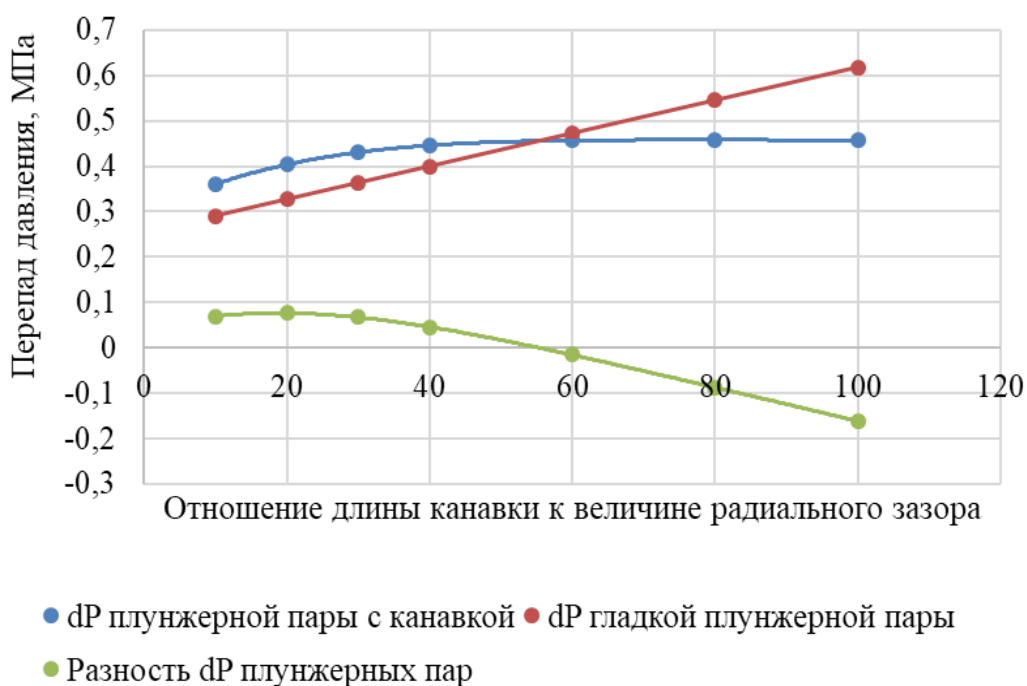


Рисунок 4 - Сопоставление перепада давления, возникающего в гладкой плунжерной паре и в паре с канавкой, при одинаковых их длинах ($\delta=0,1$ мм)

По рисунку 4 видно, что величиной отношения ширины канавки к радиальному зазору, при течении через которую будут возникать максимальные гидравлические сопротивления, является $20 (\delta/2) \pm 10 (\delta/2)$. При этом следует учесть, что при меньшей ширине канавки, увеличивается возможное количество точек для нанесения канавок на плунжере.

Профиль скорости течения жидкости в канавке изображен на рисунках 5 и 6.

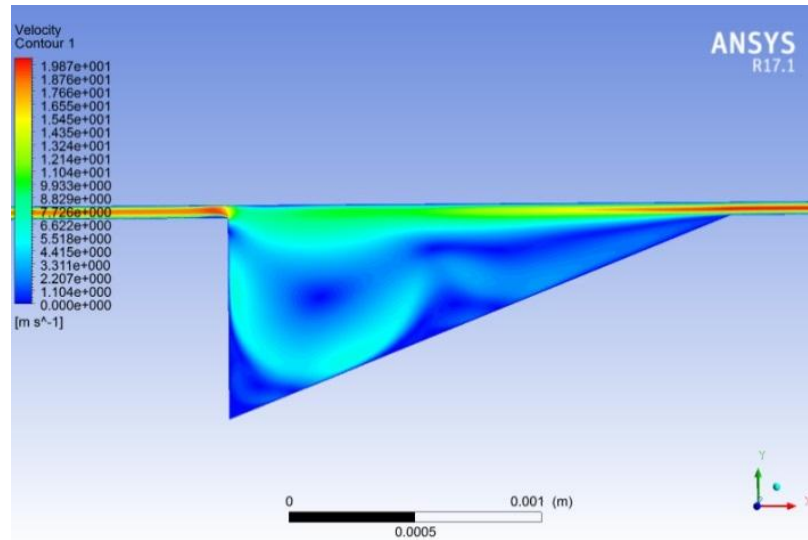


Рисунок 5 - Профиль скорости течения жидкости в канавке

На рисунке 5 видны завихрения, образующиеся при течении жидкости через канавку, а также замедление и расширение струи жидкости сформированной, течением в зазоре плунжерной пары.

На рисунке 6 изображен участок с внезапным сужением потока жидкости на выходе из канавки, на котором изображены возмущения, возникающие при преодолении данного местного сопротивления. Течение жидкости через плунжерную пару с канавкой в форме прямоугольного треугольника характеризуется формированием следующих гидравлических сопротивлений: расширение потока жидкости с одновременным его торможением; образование вихрей в полости канавки; внезапное сужение потока жидкости; отрыв потока жидкости от поверхности плунжера.

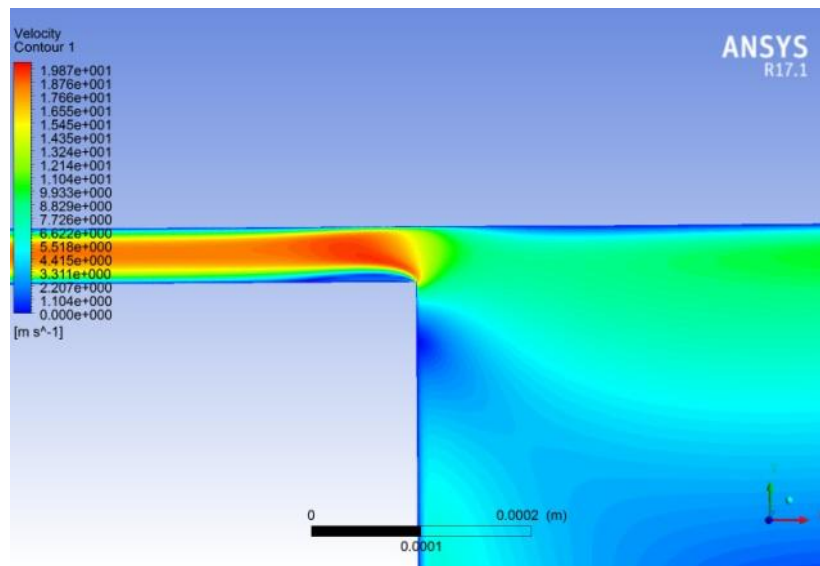


Рисунок 6 - Участок с внезапным сужением потока жидкости

Полученные опытные данные для плунжерных пар с радиальным зазором величиной 0,05 мм, были сопоставлены с величинами для различных групп посадки. Отклонения от представленных графиков минимальны.

Для оценки влияния расстояния между канавками, на гидравлические сопротивления течению жидкости в зазоре плунжерной пары была разработана расчетная схема, изображенная на рисунке 7.

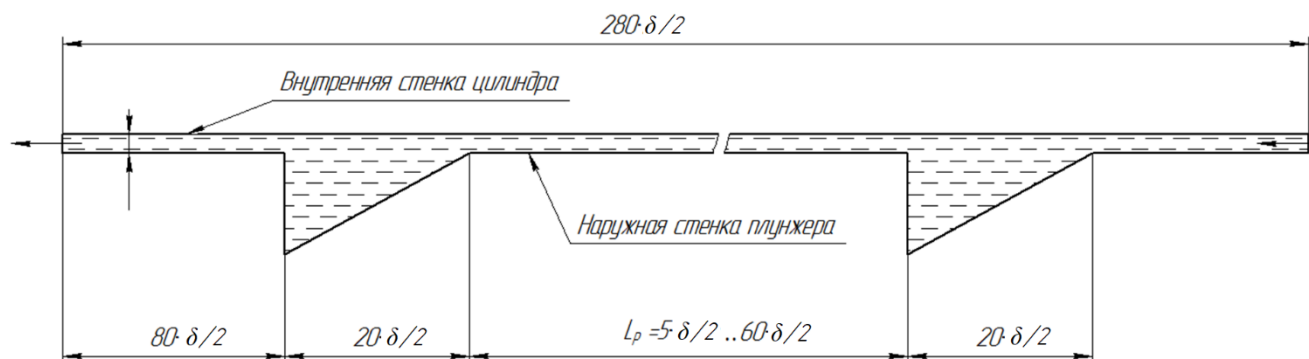


Рисунок 7 – Расчетная схема модели течения жидкости через плунжерную пару с двумя канавками

Результаты расчета для числа Рейнольдса, равного 1400, приведены на рисунке 8 (при числах Рейнольдса, характерных для течения в плунжерных парах штангового насоса при турбулентном течении, зависимости аналогичные). При увеличении расстояния между канавками, наблюдается незначительный рост гидравлических сопротивлений. Это вероятно связано с тем, что канавки турбулизируют поток на ограниченном пространстве, поэтому при перекрытии этих областей соседними канавками, суммарный эффект, влияющий на гидравлическое сопротивление, снижается.

Однако поскольку разница значений гидравлических сопротивлений при расстоянии $5 \cdot (\delta/2)$ и $60 \cdot (\delta/2)$ составляет не более 5%, то для максимального увеличения гидравлических сопротивлений в зазоре плунжерной пары, рекомендуется максимизировать число канавок на плунжере.

Результатами численных экспериментов вычислительной гидродинамики, установлена зависимость коэффициента гидравлических сопротивлений от числа Рейнольдса для канавки, создающей максимальные гидравлические сопротивления, шириной $L = 10 \cdot \delta$ и глубиной $H = L/2,5$ (Рисунок 8).

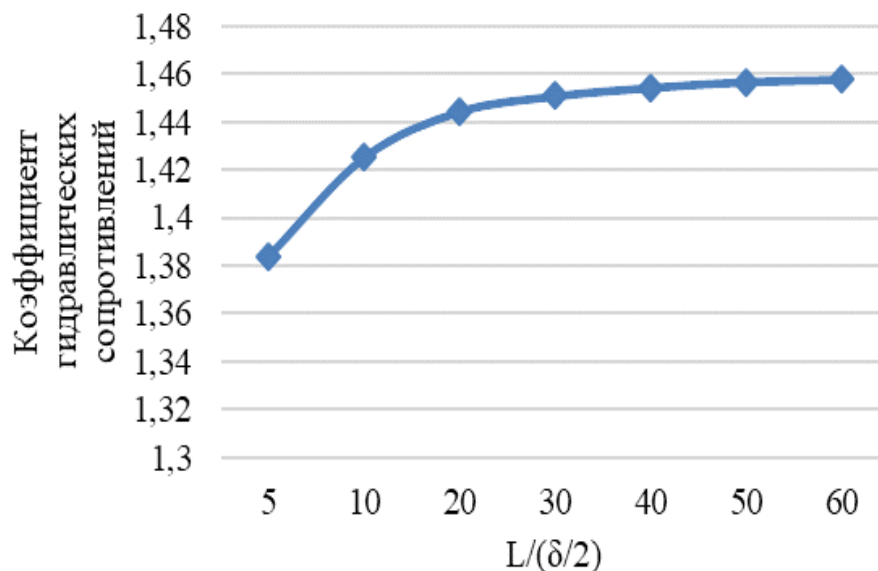
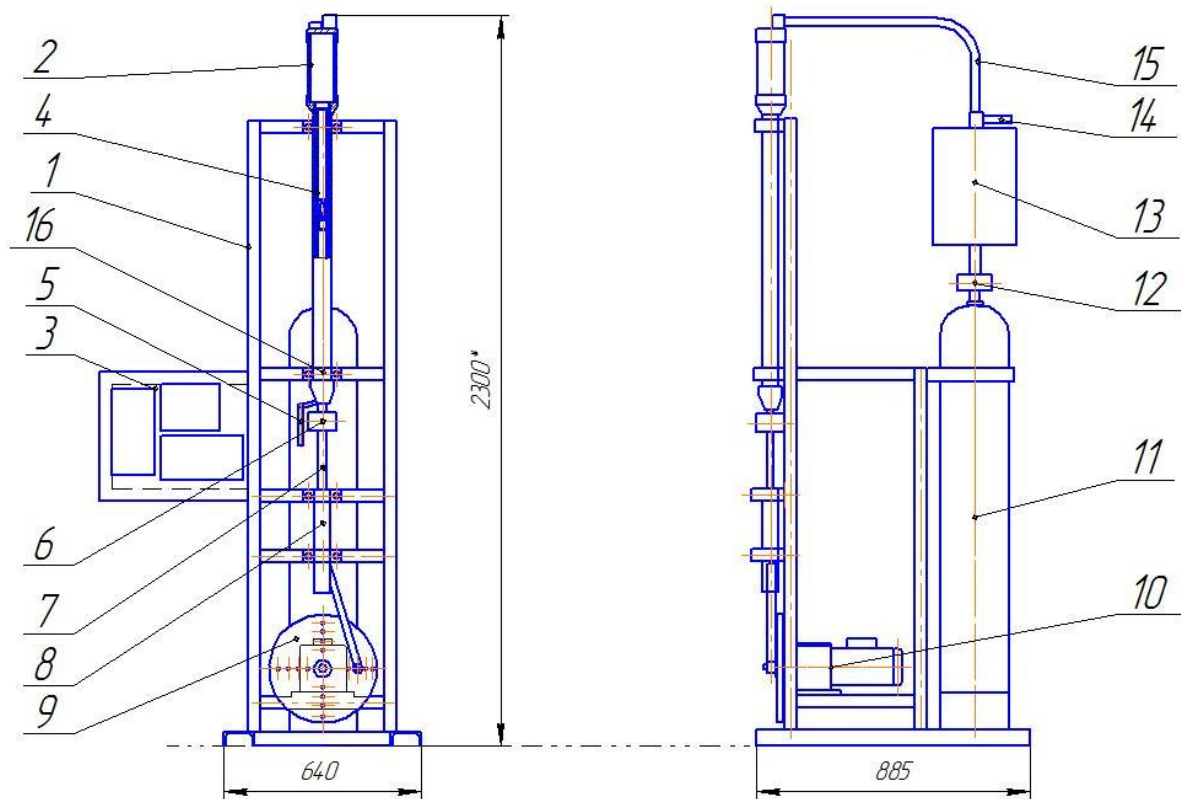


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента гидравлических сопротивлений от отношения расстояния между канавками к величине радиального зазора

В **третьей главе** представлены результаты разработки экспериментального стенда, моделирования и планирования экспериментов, статистической обработки результатов исследования течения жидкости через плунжерную пару с регулярным микрорельефом поверхности в виде канавок в форме прямоугольного треугольника. Разработанный стенд представлен на рисунке 9.

Установка для испытания штанговых насосов, содержит механизм возвратно-поступательного движения плунжера в цилиндре насоса 9, систему измерения и регистрации параметров насоса 3, в нагнетательной линии установлен газовый баллон с манометром синертным газом высокого давления 11, посредством которого создается жидкостная прослойка над плунжером, нижняя часть цилиндра насоса выполнена открытой и снабжена воронкой 5, собирающей и направляющей утечки жидкости через плунжерную пару в мерный стакан, полированный шток 7 возвратно-поступательного механизма снабжен тензодатчиком и динамографом 6, регистрирующим нагрузку в течение всего цикла работы насоса.



1 – рама, 2 – емкость для заливки жидкости, 3 – модуль управления и измерения 4 – пара цилиндр-плунжер, 5 – емкость мерная, 6 – тензодатчик, 7 – полированный шток, 8 – направляющая 9 – кривошипно-шатунный механизм, 10 – мотор-редуктор, 11 – баллон азотный, 12 – арматура высокого давления, 13 – компенсатор диафрагменный, 14 – датчик давления электронный, 15 – линия высокого давления, 16 – замок

Рисунок 9 – Внешний вид экспериментального стенда

Стенд работает следующим образом. Асинхронный двигатель 10 вращает кривошипно-шатунный приводной механизм 9 для создания возвратно-поступательного движения плунжера насоса. Одновременно баллоном с газом нагнетается масло до заданного давления в системе через распределитель потока жидкости. Масло, нагнетаемое к верхнему торцу плунжера, протекает через зазор плунжерной пары 4 и замеряется объемным способом с помощью мензурки 5. Компенсация перепадов давления масла, вызванных движением плунжера и утечками масла, обеспечивается гидроаккумулятором 13.

Плунжеры представлены на рисунке 10.



Рисунок 10 – Плунжер гладкий (слева) и с кольцевыми канавками (справа) в форме прямоугольного треугольника (ширина канавки составила 1,5 мм, глубина 0,6 мм)

В результате моделирования скважинных условий, влияющих на течение жидкости в зазоре плунжерной пары (перепад давления, вязкость и плотность жидкости, геометрические параметры плунжерной пары), были определены параметры, удовлетворяющие критериям подобия (геометрическое подобие и число Рейнольдса):

- рабочая жидкость - вода с ПАВ (вязкость 1 мПа·с);
- перепад давления от 0,3 до 1,6 МПа;
- температура окружающей среды 23 °С;
- диаметр плунжеров 44,48 мм;
- длина цилиндрической части плунжера 0,14 м;
- величина зазора, равная 0,18 мм.

Эксперименты проводились при статичном положении плунжера, для исключения влияния износа на величину утечек. Плунжеры изготовлены из одного материала и имеют незначительные отклонения размеров относительно друг друга. Результаты экспериментов приведены на рисунках 11 и 12. Для

лучшей визуализации точками обозначены среднеарифметическое значение опытных данных.

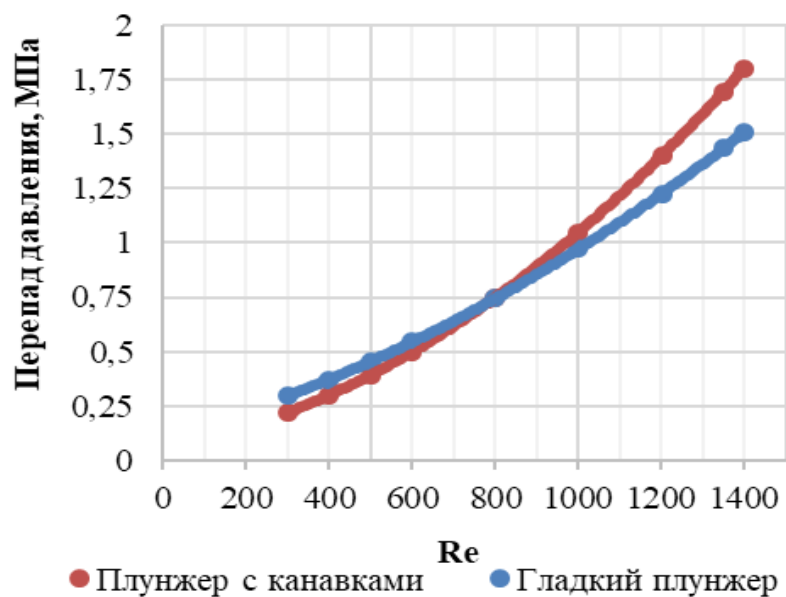


Рисунок 11 – Экспериментальная зависимость необходимого перепада давления через плунжерную пару при различных числах Рейнольдса

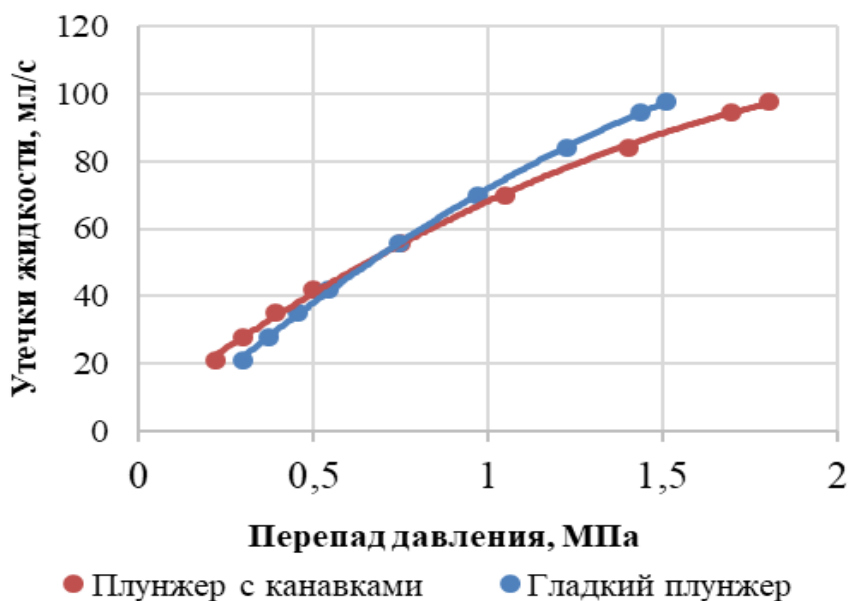


Рисунок 12 – Экспериментальная зависимость утечек жидкости от перепада давления на плунжер

По полученным данным при числах Рейнольдса меньше 800 имеет место область ламинарного течения жидкости, при котором происходит плавное обтекание канавок и минимальные гидравлические сопротивления, в результате

чего утечек через плунжерную пару с канавками несколько больше, чем через гладкую плунжерную пару. При приближении числа Рейнольдса к 800 величина утечек жидкости в гладкой плунжерной паре и в паре с канавками выравнивается. При перепаде давления более 0,7 МПа (значение числа Рейнольдса более 800), происходит турбулизация потока жидкости и рост гидравлических сопротивлений течению жидкости, в результате чего, утечек через плунжер с кольцевыми канавками становится меньше.

На рисунке 13 изображены графики зависимости коэффициента местных гидравлических сопротивлений от числа Рейнольдса.

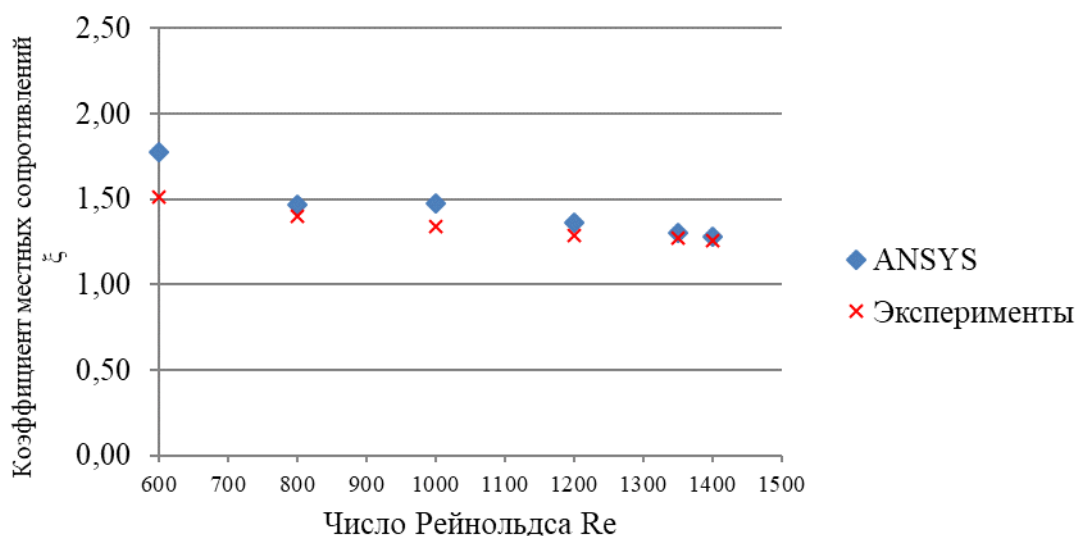


Рисунок 13 – Сравнение коэффициента местных сопротивлений полученных экспериментально и с помощью моделирования в ANSYS CFX

По рисунку 13 видно, что ANSYS несколько завышает значения при небольших числах Рейнольдса (поскольку в CFX задавалась турбулентная модель течения). Близость значений коэффициента местных сопротивлений полученных численными и натурными экспериментами позволяет сделать вывод об их удовлетворительной сходимости.

При правильном подборе зазора и длины плунжера, утечки жидкости через плунжерную пару в новом насосе будут минимальные. Рост утечек возникает в процессе износа плунжера о цилиндр насоса. Для обеспечения снижения утечек в изношенной плунжерной паре, необходимо подбирать размер канавок под величину зазора возникающем при износе. На практике наибольшая доля насосов

закупается с посадкой fit 2 (0,05...0,113 мм), поэтому для данного типоразмера насоса размеры канавки рекомендуется подбирать исходя из величины зазора 0,1-0,12 мм. Для данного типоразмера ширина канавки, при течении через которую будут возникать максимальные гидравлические сопротивления, будет равна 1,1-1,2 мм, глубина 0,44-0,48 мм, расстояние между канавками 2-2,5 мм.

Для данного типоразмера была получена зависимость коэффициентов местного сопротивления от числа Re:

$$\xi = 1,65 + 612/Re \quad (1)$$

Для гладкого плунжера был определен коэффициент Дарси:

$$\lambda = 89/Re \quad (2)$$

Подставляя уравнения 2 и 1 в уравнение Дарси-Вейсбаха, получим уравнение:

$$\Delta P = \frac{\rho v^2}{2} \left(\frac{a}{Re} \frac{l_{эф}}{D_2} + z \left(b + \frac{c}{Re} \right) \right), \quad (3)$$

где: $a = 89$ (для гладкого плунжера), $b = 1,65$ и $c = 612$ (для данной конфигурации канавок); ρ – плотность жидкости, кг/м³; v – скорость течения жидкости, м/с; $l_{эф}$ – длина гладкой части, м; D_2 – гидравлический диаметр, м; z – количество канавок.

Решая уравнение 3 получаем зависимость для определения утечек жидкости через плунжерную пару с канавками:

$$Q = \frac{\pi \cdot d \cdot v}{4 \cdot b \cdot \delta \cdot z} \left(\sqrt{\left(a \cdot l_{эф} + \delta \cdot c \cdot z \right)^2 + \frac{8 \cdot b \cdot \delta^4 \cdot \Delta P \cdot z}{\rho \cdot v^2}} - a \cdot l_{эф} + \delta \cdot c \cdot z \right), \quad (4)$$

где: v – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; d – диаметр плунжера, м; δ – зазор (разность диаметра плунжера и цилиндра), м.

Для насоса 25-175-RHBM-10-4-3 при перепаде давления 20 МПа, утечки жидкости (воды) через плунжерную пару при зазоре равном 0,12 мм составят для

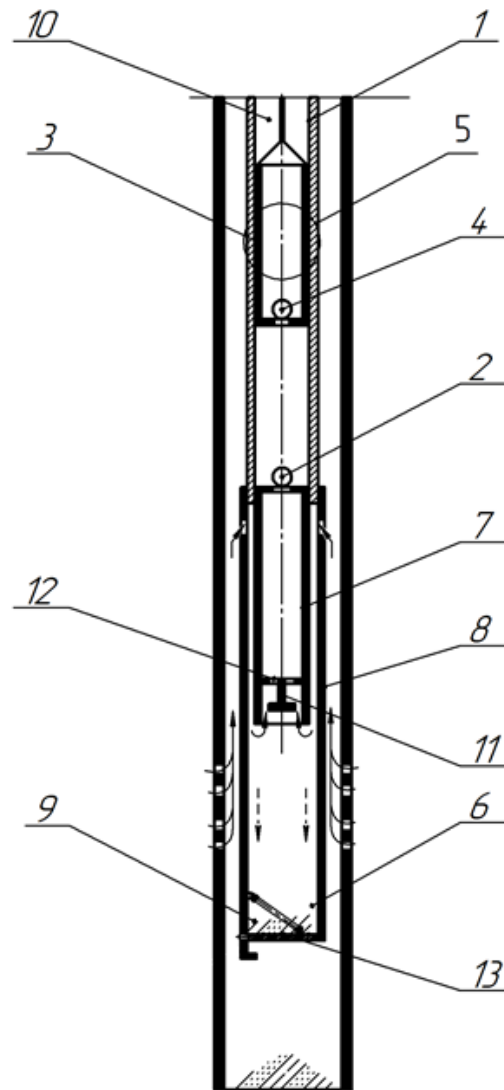
гладкого плунжера $8,87 \text{ м}^3/\text{сут}$, для плунжера с канавками $6,48 \text{ м}^3/\text{сут}$. Величина утечек уменьшилась на 37%.

В четвертой главе представлены результаты совершенствования конструкции штангового насоса и рекомендуемые размеры канавок регулярного микрорельефа для стандартных групп посадок плунжера в цилиндре. По результату разработки новой конструкции получен патент на изобретение.

Данная конструкция позволяет снизить величину утечек жидкости в плунжерной паре насоса турбулизацией потока, создаваемой специальной формой канавок. Кроме того, в предложенной конструкции штангового скважинного насоса обеспечивается защита скважинного насоса от мехпримесей путем применения фильтра со сниженной скоростью восходящего потока жидкости, достигаемым увеличением площади поперечного сечения внутренней трубы фильтра по сравнению с площадью поперечного сечения кольцевого пространства фильтра.

На рисунке 14 представлена схема скважинного насоса.

Работа скважинного штангового насоса осуществляется следующим образом. При ходе плунжера 3 вверх всасывающий клапан 2 открывается, нагнетательный клапан 4 закрывается, полость цилиндра 1 под плунжером 3 заполняется нефтью, проходящей через фильтр 6. Причем, происходит улучшение фильтрации за счет снижения восходящего потока нефти, достигаемого увеличением площади поперечного сечения внутренней трубы 7 фильтра 6 по сравнению с площадью поперечного сечения кольцевого пространства фильтра 6, образованного наружным диаметром внутренней трубы 7 и внутренним диаметром наружной концентрично установленной трубы 8. В процессе отсеивания мехпримесей происходит их отражение от круглого диска 11, установленного на кронштейне, что дополнительно защищает рабочие органы насоса и позволяет мехпримесям осаждаться в емкости 9 предварительного накопления, при заполнении которой, открывается клапан 13 и происходит сброс упомянутых мехпримесей. Плунжер 3 движется вниз, всасывающий клапан 2 закрывается, нагнетательный клапан 4 открывается и нефть из пространства под плунжером 3 попадает в насосно-компрессорные трубы (на схеме не обозначены), соединенные с цилиндром 1.



1 – цилиндр насоса; 2 – всасывающий клапан; 3 – плунжер насоса; 4 – нагнетательный клапан; 5 – нанесенные на плунжер канавки; 6 - фильтр механических примесей в виде концентрично установленных труб 7 и 8; 9 - емкость предварительного накопления механических примесей; 10 – выкид насоса; 11 – круглый диск; 12 - кронштейн; 13 – клапан.

Рисунок 14 - Схема скважинного насоса

На рисунке 15 представлены канавки поверхности плунжера скважинного насоса. Поскольку режущая кромка резца, наносящего микрорельеф на поверхность плунжера имеет некоторый радиус скругления, то вместо микрорельефа в форме прямоугольного треугольника получается профиль с скругленным углом или усеченная наклонной плоскостью парабола.

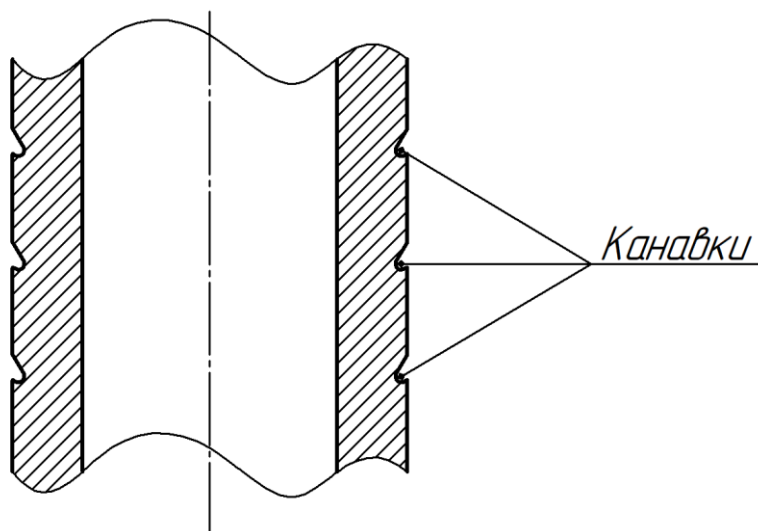


Рисунок 15 – Схема расположения канавок на плунжере

Канавки позволяют снизить утечки в плунжерной паре цилиндра насоса турбулизацией потока. Кроме того, в канавках постоянно удерживается смазка, что позволяет избежать «сухого трения» в плунжерной паре и интенсивного износа. Таким образом, осуществляется защита скважинного насоса от мехпримесей и снижение утечек в плунжерной паре турбулизацией потока перекачиваемой нефти, тем самым достигается повышение долговечности и производительности насоса.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1 Показано, что противоречивый характер влияния размера зазора в плунжерной паре на величину утечек и межремонтный период их работы из-за частых отказов, вызванных заклиниванием указанных пар, до сих пор, не позволил создать специальные насосы для глубоких и обводнившихся скважин.

2 Проведено численное моделирование процесса течения жидкости через плунжерную пару с регулярным микрорельефом и установлены геометрические параметры канавок, при которых возникают максимальные гидравлические сопротивления: ширина равная десяти величинам зазора между плунжером и цилиндром, глубина в два с половиной раза меньшая, чем ширина, расстояние между канавками должно быть не более 30 величин зазоров. Полученные данные были сопоставлены с экспериментальными исследованиями и показали удовлетворительную сходимость.

3 Разработан лабораторный стенд и проведены экспериментальные исследования течения жидкости через плунжерные пары с регулярным микрорельефом в виде прямоугольного треугольника. Получены зависимости для определения местных гидравлических сопротивлений в канавках регулярного микрорельефа. Установлена зависимость для определения величины утечек жидкости в плунжерной паре для штанговых насосов с регулярным микрорельефом на поверхности плунжера.

4 Предложена конструкция штангового скважинного насоса для добычи обводненной нефти в состав, которой входит плунжер с нанесенными на его поверхность канавками, имеющими в поперечном разрезе форму усеченной наклонной плоскостью параболы, ось симметрии которой образует острый угол с осью плунжера в направлении к выкиду насоса.

5 Предложены рекомендуемые размеры канавок регулярного микрорельефа в форме прямоугольного треугольника, для различных групп стандартных посадок плунжера в цилиндре штангового насоса.

Содержание работы опубликовано в научных трудах, в том числе:

- в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, выпускаемых в РФ, в соответствии с требованиями ВАК Минобразования и науки РФ:

1. Бахтизин Р.Н. Утечки жидкости в штанговом насосе с регулярным микрорельефом на поверхности плунжера / Бахтизин Р.Н., Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Ишмухаметов Б.Х. // Нефтегазовое дело. - 2016. - Т. 14. - №4. - С. 33-39.

2. Уразаков К.Р. Экспериментальные исследования влияния конфигурации регулярного микрорельефа поверхности плунжера на подачу штангового насоса / Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Ишмухаметов Б.Х. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2018. - № 3. - С. 23-25.

3. Бахтизин Р.Н. Влияние конфигурации регулярного микрорельефа на поверхности плунжера на величину зоны турбулентного потока жидкости / Бахтизин Р.Н., Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Ишмухаметов Б.Х. // Журнал «Нефтегазовое дело». - 2018. - Т. 16, №2 - С. 44 -51.

- в патентах:

4. Патент на полезную модель №165265. Установка для испытания штанговых насосов / Уразаков К.Р., Бахтизин Р.Н., Ишмухаметов Б.Х., Исмагилов С.Ф. - опубликовано 10.10.2016. - бюл. № 28.

5. Патент на изобретение №2624939. Скважинный штанговый насос / Уразаков К.Р., Бахтизин Р.Н., Латыпов Б.М., Ишмухаметов Б.Х. - опубликовано 11.07.2017. - бюл. № 20.

- в монографии

6. Бахтизин Р.Н. Добыча нефти штанговыми установками в осложненных условиях / Монография // Бахтизин Р.Н., Уразаков К.Р., Топольников А.С., Азизов А.М., Комков А.Г., Ишмухаметов Б.Х. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – 172 с.

Материалы, опубликованные в других изданиях:

7. Бахтизин Р.Н. Влияние формы регулярного микрорельефа поверхности плунжера на утечки в штанговом скважинном насосе / Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Ишмухаметов Б.Х., Нарбутовских А.Ю. // Нефтяное хозяйство. - 2017. - № 4. - С. 113-116.

8. Уразаков К.Р. Регулярный микрорельеф на поверхности плунжера / Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Ишмухаметов Б.Х. // Материалы международной научно-технической конференции. АГНИ, г. Альметьевск. - 2015. - С. 41-45.

9. Латыпов Б.М. Фильтрация жидкости в зазоре плунжерной пары при техногенной турбулизации потока / Латыпов Б.М., Ишмухаметов Б.Х. // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной памяти А.Х. Мирзаджанзаде. - УГНТУ, г. Уфа. - 2016. - С. 31-33.

10. Ишмухаметов Б.Х. Скважинный штанговый насос для добычи обводненной нефти / East European Scientific Journal, Warsaw, #2 (30) 2018. - С. 46 - 49.

11. Ишмухаметов Б.Х. Скважинный штанговый насос для добычи вязкой нефти / Материалы международной научно-технической конференции «Современные технологии в нефтегазовом деле - 2018». - УГНТУ, г. Октябрьский. - 2018. - С. 54-57.

12. Ишмухаметов Б.Х. Моделирование течения жидкости в зазоре плунжерной пары / Материалы международной научно-практической конференции «Роль математики в становлении специалиста». - УГНТУ, г. Уфа. - 2018. - С. 88-92.