

На правах рукописи

Назаров Сергей Викторович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
И МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ
ЩЕЛЕВОЙ ПЕРФОРАЦИИ**

Специальность 05.02.13 – “Машины, агрегаты и процессы”
(Нефтегазовая отрасль)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2005

Работа выполнена в Уфимском государственном нефтяном техническом университете.

Научный руководитель доктор технических наук
Ямалиев Виль Узбекович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Янтурин Альфред Шамсунович;

кандидат технических наук
Голубев Михаил Викторович.

Ведущая организация ООО «Уфимское управление буровых работ».

Защита состоится 29 июня 2005 года в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан « » мая 2005 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Закирничная М.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Важнейшей задачей нефтегазодобывающей промышленности страны на современном этапе является продление срока службы скважины с использованием различных способов восстановления проницаемости прискважинной области пласта для повышения её дебита. Одним из основных способов повышения продуктивности пласта скважины является перфорация с использованием устройств различных конструкций.

Широко применяемая в настоящее время кумулятивная перфорация не обеспечивает совершенной гидродинамической связи продуктивного пласта со скважиной. Это связано с неэффективностью срабатывания зарядов и с высокими ударными нагрузками, температурой, что приводит к разрушению крепления скважины, её преждевременному обводнению. Вторичное вскрытие пластов в кислотной среде с целью восстановления её коллекторских свойств исключает все способы перфорации, связанные с применением кабельной технологии.

Восстановить проницаемость существующих фильтрационных каналов, которые авторы предлагают путем искусственно созданного в породе призабойной зоны пласта (ПЗП) разветвленной системы трещин, которая и играет роль новой системы фильтрационных каналов. Это может быть и вырезание участка обсадной колонны в продуктивном интервале ствола скважины, и нарезание щелей заданной ориентации, и др.

В связи с этим многие исследователи обратили особое внимание на нормальный ряд гидродинамических перфораторов, которые обеспечивают “падающий” режим вскрытия обсадных колонн всех типоразмеров с сохранением достигнутого качества разобщения пластов. Исследования и применение технологии по вскрытию пласта продольной щелью большой протяженности в различных регионах Российской Федерации показали эффективность этого способа. Но и в этом способе перфорации имеются свои проблемы. Требуют усовершенствования и доработки конструкции применяемых устройств, не обеспече-

на устойчивость накатного диска в скважинных условиях, не достигается требуемая безотказность перфоратора и почти полностью отсутствует контроль за процессом щелевой гидромеханической перфорации с точки зрения применения современных информационных автоматизированных систем. Решению этих проблем и посвящена данная работа.

Цель работы – повышение работоспособности щелевого гидромеханического перфоратора путем поверхностного упрочнения накатного диска, совершенствования конструкции, технического обеспечения процесса с использованием вероятностно-статистических методов.

Основные задачи исследований

1 Выбор оптимального режима обработки и упрочняющих технологий поверхности накатного диска перфоратора на основе проведенных исследований.

2 Разработка и промышленные испытания технических устройств, способствующих проведению механической щелевой перфорации.

3 Статистические исследования колебаний осевой нагрузки и давления жидкости при изменении технического состояния щелевого перфоратора.

4 Разработка методического руководства по использованию технологии щелевой гидромеханической перфорации с усовершенствованным перфоратором.

Методы решения. При проведении исследований были использованы спектрально-корреляционный анализ, теория выбросов случайных функций, современные методы планирования экспериментов, также проводились промышленные испытания новых технических и технологических решений и их анализ.

Научная новизна

1 Установлена взаимосвязь вероятностно-статистических характеристик выбросов случайных колебаний давления жидкости за некоторый фиксированный уровень и спектра колебаний осевой нагрузки и техническим состоянием щелевого перфоратора в процессе его эксплуатации.

2 Установлены характерные частоты спектра колебаний осевой нагрузки ($\omega_1 = 0,05$ Гц; $\omega_2 = 0,5$ Гц) для различных режимов работы механического перфоратора.

3 Анализ работы звеньев щелевого перфоратора позволил установить критическое значение силы вдавливания накатного диска в тело обсадной колонны.

Основные защищаемые положения

1 Методика оценки технического состояния щелевого гидромеханического перфоратора в процессе эксплуатации с применением вероятностно-статистических методов анализа случайных колебаний параметров и автоматизированных систем контроля.

2 Использование вероятностных характеристик значений амплитуды спектральной плотности, числа выбросов за установленный уровень, коэффициента вариации случайных колебаний параметров в качестве диагностических критериев оценки технического состояния щелевого перфоратора.

3 Технические решения и способы оценки работоспособности щелевого перфоратора в процессе эксплуатации.

4 Результаты стендовых и промысловых исследований процесса щелевой механической перфорации.

Практическая ценность

1 Разработан промысловый стенд на базе учебной буровой установки в Уфимском УБР, работа которого контролируется с помощью автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса «Спектр».

2 Разработана компоновка щелевого механического перфоратора с шарнирным соединением с НКТ, работоспособность которой подтверждена промысловыми испытаниями в НГДУ «Уфанефть», ТПП «Когалымнефтегаз».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых вузов (Уфа, 1997, 1998, 2002-2004 гг.);

- II научно-технической конференции “Современные проблемы надежности” (Москва, 1997 г.);

- Международной научно-технической конференции “Проблемы нефтегазового комплекса России” (Уфа, 1998 г.);

- IV Конгрессе нефтегазопромышленников России. Секция Н “Наука и образование в нефтегазовом комплексе” (Уфа, 2003 г.);

- II Всероссийской учебно-научно-методической конференции “Передовые концепции механического образования в технических и технологических университетах по реализации государственных образовательных стандартов” (Уфа, 2004 г.);

- Всероссийской научно-технической конференции “Проектирование и эксплуатация нефтегазового оборудования: проблемы и решения” (Уфа, 2004 г.);

- XVI межотраслевой научно-практической конференции по проблемам строительства и ремонта скважин “Заканчивание и ремонт нефтегазовых скважин с полным сохранением их продуктивности” (Анапа, 2004 г.).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы изложены в 11 печатных трудах, в том числе 3 статьях, тезисах шести докладов и 2 патентах РФ.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и основных выводов. Работа изложена на 160 страницах машинописного текста, в том числе содержит 50 рисунков, 11 таблиц, список литературы из 175 наименований, 4 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, основные задачи исследований, научная новизна, основные защищаемые положения и практическая ценность.

Первый раздел диссертации посвящен анализу состояния вопроса по существующим методам, техническим средствам и технологии вторичного вскрытия пластов, а именно перфорации обсадной колонны.

Отмечено, что изучением вопросов эффективного применения операций вторичного вскрытия пластов с помощью различных конструкций перфораторов занимались: С.В. Абатуров, В.С. Александров, М.О. Ашрафьян, Р.Г. Габдуллин, И.Н. Гайворонский, Э.М. Галеев, И.Г. Григорян, А.М. Дуванов, М.Л. Золин, Р.К. Ишкаев, Ю.В. Капырин, А.В. Кореняко, В.И. Лаштабега, А.В. Мальцев, Ю.А. Песляк, Н.А. Петров, С.А. Рябоконец, Н.М. Саркисов, Е.Т. Струговец, В.М. Тебякин, Л.Я. Фридляндер, С.В. Шишов, И.В. Шпуров, А.Ш. Янтурин, Р.К. Яруллин.

Проведенный анализ указывает на необходимость как разработки новых, так и совершенствования применяемых технологий и технических средств для вторичного вскрытия пластов, а именно более углубленной разработки процесса гидромеханической щелевой перфорации.

Установлено, что одной из причин ограниченного применения гидромеханической щелевой перфорации является недостаточная надежность накатного диска перфоратора, несовершенство конструктивного исполнения основных узлов и почти полное отсутствие автоматизированного контроля за процессом перфорации.

Второй раздел диссертации содержит результаты изучения напряженного состояния компоновки насосно-компрессорных труб с гидромеханическим перфоратором.

На предприятиях АНК «Башнефть» были проведены промышленные испытания компоновки, включающей: гидромеханический перфоратор типа ПЩ,

циркуляционный клапан КЦ-2, две трубы НКТ-73 и реперный патрубок, с контролем длины от центра накатного диска перфоратора до муфты реперного патрубка. В результате этих испытаний предложена технология гидромеханической щелевой перфорации, особенность которой заключается в создании пунктирных продольных щелей в обсадной колонне длиной 2-4 м и шириной 7-9 мм механическим продавливанием с помощью накатного диска с последующим размывом цементного камня и горной породы струей технической воды через гидромониторную насадку по готовой щели.

Предлагаемая технология имеет определенные преимущества по сравнению с широко применяемыми технологиями на базе кумулятивных и сверлящих перфораторов. Это возможность «щадящего» вскрытия пластов и обеспечения герметизации устья скважины стандартными устройствами, проведение перфорации без привлечения геофизиков силами бригады освоения капитального ремонта скважин, сравнительная дешевизна и простота в изготовлении, обслуживании перфоратора. Нет ограничений по глубине скважины, температуре, отклонению ствола, ускоряются операции по вызову притока, а также существует возможность провести прямую и обратную промывку, применить различные методы воздействия на ПЗП сразу же после вскрытия пласта, проводить перфорацию одновременно с исследованием скважины при подключении к нижней части перфоратора манометра-термометра типа АМТ.

Но вместе с тем проведенные исследования позволили выявить слабые места в устройстве для проведения щелевой перфорации, наметить пути конструктивного улучшения предлагаемой компоновки для вскрытия пласта.

Традиционные методы упрочнения накатных роликов перфоратора из сталей Р6М5К5МН и 17Х5ВМФ5С2 не позволили решить задачу достижения высокой твердости при сохранении прочности и пластичности. Для решения этой задачи были проведены исследования по упрочнению высокоуглеродистой подшипниковой стали ШХ-15, химический состав которой приведен в таблице 1. Для отработки различных технологий поверхностных упрочнений были

изготовлены поперечные шлифы из стали ШХ-15, которые после нанесения покрытий анализировались на растровом электронном микроскопе JSM-840.

Таблица 1 – Химический состав подшипниковой стали ШХ-15

C	Mn	Si	Cr	S	P	Ni	Cu
				%, не более			
0,95-1,05	0,20-0,40	0,17-0,37	1,3-1,65	0,020	0,027	0,300	0,250

В качестве упрочняющих технологий для образцов материала подшипниковой стали ШХ-15 использован метод катодно-ионной бомбардировки (КИБ) на лабораторной установке «Булат» и метод ионной имплантации (ИИ) на установке «Вита».

В процессе КИБ вокруг напыляемой детали, имеющей отрицательный потенциал, образуется свободное от электронов пространство и создается сильное электрическое поле между границей плазменного потока и поверхностью детали. Под воздействием электрического поля ионы распыляемого вещества ускоряются и бомбардируют поверхность детали, что обуславливает её очистку, разрушение сорбционных и окисных пленок. Одновременный подогрев детали приводит к термохимическому активированию поверхности и обеспечению последующей адгезии покрытия к напыляемой детали. Результаты исследований показали, что наиболее приемлемым в качестве покрытия оказался нитрид титана, как обладающий наибольшей теплотой образования по сравнению с молибденом и другими материалами.

Титановое покрытие многослойное, твердые слои (твердость 280-320МПа), чередуются с мягкими (твердость 80 МПа), что позволяет получить мелкозернистое покрытие, уменьшить остаточные напряжения сжатия, снизить тепловые деформации. Толщина покрытия – 10 мкм – определялась из условия, что она должна превышать глубину распространения остаточных напряжений.

Сущность метода ИИ заключается в облучении поверхности детали ионами различных элементов. Так, имплантированию ионами азота были подвергнуты образцы из подшипниковой стали №100, 226 при следующем режиме:

энергия ионов – 40 кэВ, доза облучения – 10^{17} ион/см², плотность потока 20-40 мкА/см², вакуум – $8 \cdot 10^{-4}$ Па, время облучения – 30 мин. Исследования показали, что поверхности, обработанные ИИ, не отслаиваются и не растрескиваются, образующийся на поверхности оксид повышает износостойкость по сравнению с исходными образцами примерно в 5 раз. Сравнительный анализ образцов по различным видам упрочнений, представленный в таблице 2, показал, что ионы азота более стабильно внедрились в поверхность хрома с созданием твердых карбидов. Величина износа для исследуемых деталей определялась на машине Шкода-Савина по объему лунок на ролике диаметром 70 мм. Исследуемые образцы проверены на линейный износ, определены шероховатость и коэффициент трения. Лучшие результаты имеют образцы предварительно хромированные на глубину 0,03 мм, а затем обработанные ионным имплантированием азота.

Таблица 2 – Результаты исследований различных видов упрочнений

Виды поверхностного упрочнения	Остаточные напряжения, кгс/мм ²	Величина износа, см ³	Линейный износ, мм	Коэффициент трения
1 Исходная поверхность	38	0,60	0,35	0,25
2 КИБ	80	0,27	0,20	0,11
3 ИИ	69	0,31	0,15	0,15
4 Хромирование	72	0,40	0,10	0,19
5 Хромирование + ИИ	90	0,06	0,02	0,09

Коррозионные механоциклические испытания, проведенные для всех изучаемых образцов, в соляном растворе показали отсутствие коррозии на образцах, подвергнутых ИИ с предварительным хромированием.

Исходя из того, что напряженное состояние обсадной трубы с длинной продольной щелью приближается к напряженному состоянию трубы, имеющей бесконечно длинный разрез вдоль образующей, правомерно воспользоваться уравнениями линейной теории оболочек.

По теории оболочек, не нарушенных перфорацией, и в пределах закона Гука, Ю.А. Песляком получены зависимости между внешними усилиями, моментами и деформацией, приведенными к срединной поверхности. Дальнейший анализ показал, что в перфорированной щелями обсадной трубе возникают

мембранные и изгибающие напряжения. Поле напряжений неравномерное, с возмущениями у вершины щелей. С учетом того, что бесконечный разрез по трубе увеличивает её податливость, с уменьшением среднего давления на контакте цементного кольца и трубы можно определить соотношение длины и ширины щели с учетом прочностных свойств коллектора. Она не должна превышать значения $L/R = 0,3...0,55$, причем 0,3 – для тонкостенных труб, а 0,55 – для толстостенных.

Рассматривая взаимодействие низа колонны НКТ с обсадной колонной при перфорации наклонно направленных скважин, можно определить прогиб НКТ и изгибающий момент, действующий на компоновку в зависимости от зенитного угла скважины. В месте соединения перфоратора с НКТ при всех значениях зенитного угла действует максимальный изгибающий момент, который увеличивает силу прижатия перфоратора к противоположной накатному диску стенке обсадной колонны. При таких условиях НКТ может деформироваться, а в сочетании с «кривизной» и «кручением» НКТ в искривленной скважине при возвратно-поступательном движении создает крутящий момент, который является дополнительной причиной неудовлетворительной надежности накатного диска перфоратора. Возникновение крутящего момента в колонне труб и штанг, в особенности для пространственно-искривленных скважин, было изучено и опубликовано в работе А.А. Ишмурзина.

Нами разработана конструкция моментомера, с помощью которого можно измерить и контролировать крутящий момент при свинчивании труб НКТ и возвратно-поступательном движении колонны НКТ при ремонтных работах в скважине (приоритет по заявке №2004123988 от 05.08.2004). Работоспособность данной конструкции моментомера была экспериментально подтверждена в процессе отработки технологии гидромеханической щелевой перфорации на промышленном стенде учебной буровой установки в Уфимском УБР.

Именно с помощью этого стенда, представленного на рисунке 1, проведены исследования по отработке усовершенствованной конструкции перфоратора в компоновке с шарнирным соединением и НКТ, а также рассмотрено приме-

нение автоматизированного контроля процесса щелевой гидромеханической перфорации, что нашло отражение в третьем разделе диссертации.

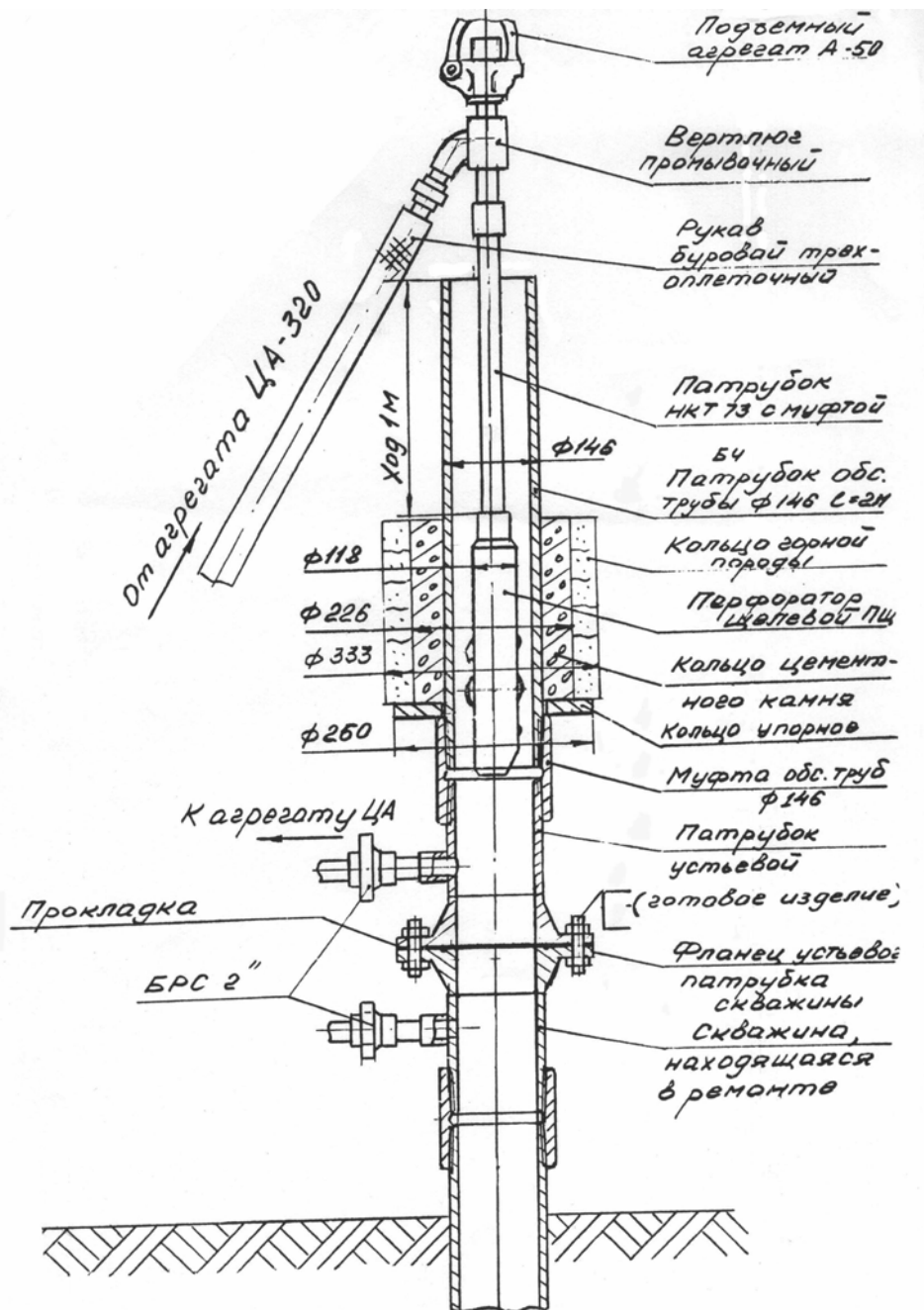


Рисунок 1 – Стенд для отработки техники и технологии гидромеханической щелевой перфорации

Стенд сконструирован на базе учебной буровой установки БУ-2500ЭУ и включает: цементируочный агрегат ЦА-320, промывочный вертулюг ВП50х160, буровые рукава высокого давления (20 МПа), противовыбросовое устьевое оборудование, комплект специальных подгоночных и монтажных патрубков, испытываемую обсадную трубу \varnothing 146 мм, кольца цементного камня, усовер-

шенствованный перфоратор с диаметром корпуса $\varnothing 120$ мм, патрубков длиной 2 м.

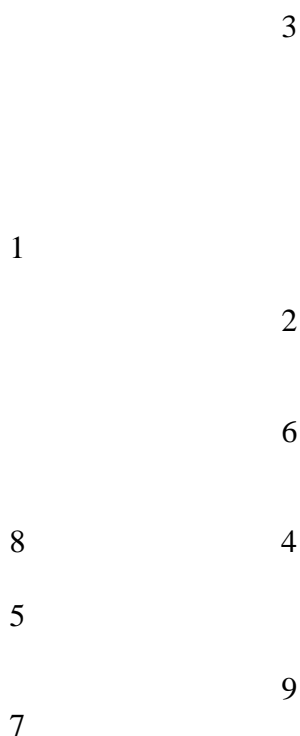


Рисунок 2 – Щелевой перфоратор в компоновке с шарниром и НКТ

Компоновка, включающая щелевой перфоратор, шарнирное соединение и НКТ, была разработана в результате аналитических расчетов и конструкторско-патентного поиска (рисунок 2). Она состоит из корпуса 8, соединенного с дополнительным гидроцилиндром 1, внутри которого имеет свободу перемещения подпружиненный поршень-толкатель 2, с посадочным местом под сбрасываемый с поверхности шарик. Гидроцилиндр при помощи резьбы соединен с шарниром 3, который обеспечивает связь перфоратора с колонной НКТ. Шарнир позволяет разгрузить перфоратор и накатный диск 7 от нежелательных, изгибающих и крутящих моментов. Внутри отфрезерованного паза корпуса на оси смонтирован рычаг 4, верхним концом взаимодействующий с поршнем-

толкателем, а в его средней части между роликами 9 перемещается накатный диск 7. Кроме того, под поршнем-толкателем просверлено несколько радиальных отверстий, через которые в процессе работы осуществляется подача рабочей жидкости на гидромониторную насадку 5, ориентированную на рабочую зону формообразующей поверхности накатного ролика. Корпус перфоратора снабжен опорными роликами, которые позволяют ему свободно перемещаться в наклонно направленной скважине.

После спуска перфоратора на НКТ производят промывку скважины через сквозной канал в поршне-толкателе и отверстие в рычаге 4. Поршень-толкатель за счет создаваемого над ним перепада давления перемещается вниз, преодолевая сопротивление пружины. Рычаг через ролики 9 поворачивается относительно оси и прижимает накатный диск к стенке обсадной колонны, т.е. осуществляется механическое вдавливание. А возвратно-поступательное перемещение НКТ способствует прорезанию накатным диском сквозной щели. Причем давление в системе повышается ступенчато, границы интервала перфорации обозначаются «затяжками» и «посадками» по индикатору веса.

Сигналом об окончании образования щелевого канала является понижение давления в НКТ и появление циркуляции за счет выдвигания накатного диска в крайнее положение. После завершения перфорации заданного интервала давление снижается до нуля и за счет пружины сжатия поршень-толкатель перемещается в исходное положение. Одновременно, за счет контакта с роликом 9, происходит и возврат накатного диска. Далее устройство поднимается на следующий интервал перфорации и операция повторяется. После выполнения всех запланированных интервалов перфорации в НКТ сбрасывают шарик большего диаметра, что открывает промывочные отверстия циркуляционного клапана, через которые возможна прямая и обратная промывки, осуществление вызова притока и т.д.

Кроме испытаний компоновки с шарнирным соединением на промышленном стенде, компоновка прошла успешную апробацию на скважинах НГДУ «Уфанефть» и ТПП «Когалымнефтегаз». Эти испытания показали надежность шар-

нирного соединения, в особенности в наклонно направленных скважинах, где удалось компенсировать действие изгибающих и крутящих моментов.

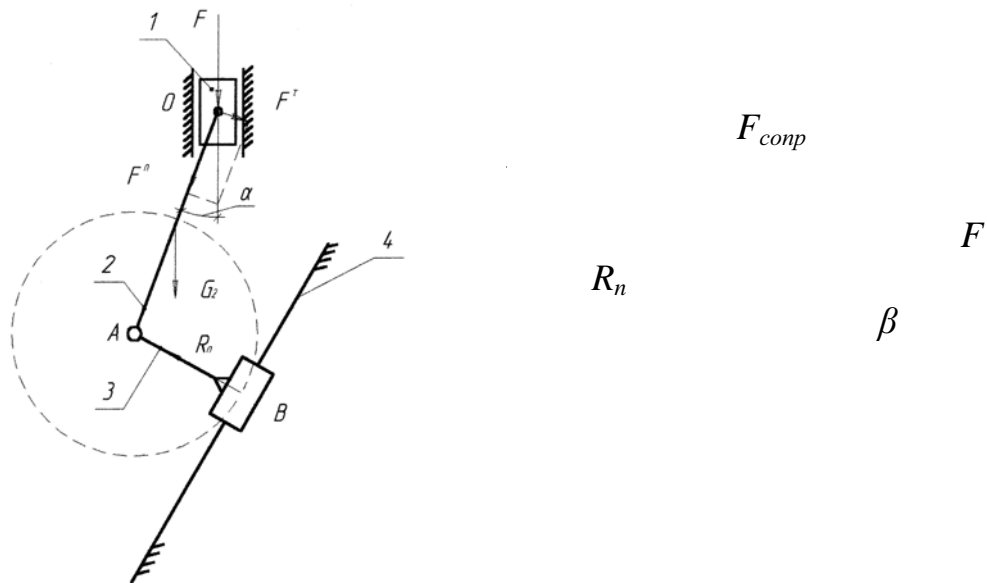


Рисунок 3 – Кинематическая схема и силовой треугольник работы звеньев перфоратора

При механическом вдавливании накатного диска в тело обсадной колонны в плоскости контакта первоначально проявляются напряжение сжатия, а затем напряжение среза, которые можно определить по формулам:

$$\sigma_{разр} = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot j}{\pi \cdot (1 - \mu^2) \cdot l}}; \quad \tau_{разр} = 0,5 \cdot \sigma_{разр}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости, МПа;

μ – коэффициент Пуассона, $\mu = 0,24 \dots 0,28$;

l – предполагаемая длина щели;

j – постоянная материала.

Исходя из условия прочности на срез можно определить силу вдавливания накатного диска в тело обсадной колонны. Расчетное давление, которое необходимо приложить к поршню для получения силы вдавливания накатного диска, определяется путем анализа работы звеньев перфоратора.

Кинематическая схема (рисунок 3) представляет собой четырехзвенный механизм второго класса, второго вида.

Для определения силы вдавливания (реакции R_n) запишем:

$$1) \sum m_A (\text{звено } 2) = 0, \quad F^r \cdot AO + F \cdot AO \cdot \sin \alpha = 0.$$

С учетом того, что массы звеньев незначительны, $G_2 = 0$, $F_{u2} = 0$, $M_{u2} = 0$, $F^c = F \cdot \sin \alpha$, $F^n = F \cdot \cos \alpha$, где G_2 – масса второго звена; F_{u2} – сила инерции; M_{u2} – момент инерции.

$$2) \Sigma F \text{ (звено 2 и 3)} = 0, \bar{F} + \bar{R}_n = 0.$$

Из силового треугольника $R_n = P_{\text{вдавл}} = F \cdot \sin \beta$ находим силу F , которую необходимо приложить к поршню, а зная площадь поршня, можно определить предполагаемое расчетное давление. С учетом возможности вращения накатного диска и его режущей поверхности можно отметить, что происходит не статическое вдавливание, а накатывание щели и действительное давление будет меньше расчетного.

Важный момент при перфорации – это устойчивость обсадных труб, что связано с возрастанием напряжений в трубах нарушенного коллектора. Исследования показали (рисунок 4), что критическое давление потери устойчивости можно определить по формуле:

$$P = P_0 \left(1 - \frac{3}{\pi} \cdot N \cdot \frac{d}{R} \cdot \frac{l}{g} \cdot \frac{1}{2} \right), \quad (2)$$

где P_0 – допускаемое давление потери устойчивости трубы;

N – число симметричных рядов щелей;

d – ширина щели ($d = 0,01$ м);

R – радиус срединной поверхности ($R = 0,068$ м);

l – длина щели;

g – расстояние между щелями по образующей.

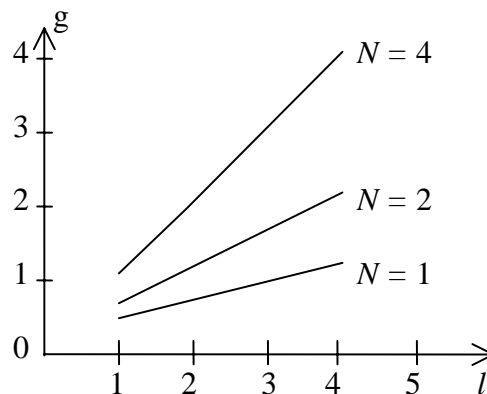


Рисунок 4 – Устойчивость перфорированных труб в зависимости от числа рядов щелей

Чтобы сохранялась устойчивость перфорированных труб, для $N = 4$ необходимо соблюдение условия $l/g = 4,1$; для $N = 2$ $l/g = 2,14$; для $N = 1$ $l/g = 1,07$.

Для автоматизированного контроля за работой станда, представленного на рисунке 1, и оценки работоспособности накатного диска перфоратора разработан измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) «Спектр», принцип действия которого основан на измерении колебаний давления рабочей жидкости на устьевом патрубке НКТ ($d = 73$ мм) с интервалом дискретности $\Delta t = 1 \dots 30$ с, с усреднением каждого измерения по 512 точкам, с последующей математической обработкой полученного временного ряда. В зависимости от целей исследований используются различные методы обработки временных рядов. Нами использован классический способ – спектральное разложение сигнала с отражением полученных результатов на дисплее и принтере. В качестве первичного преобразователя использован датчик давления типа Д-16Б, а ИВК соединен с гидравлической линией станда посредством кабельной связи.

Конструктивно приборный интерфейс ИВК «Спектр» выполнен в виде двух блоков. В одном находятся измерительный усилитель и источник стабильного тока, а в другом – аналого-цифровой преобразователь и устройство сопряжения для его запуска. На станде с помощью ИВК «Спектр» были проведены исследования по контролю за продолжительностью механической накатки одного метра щели по длине создаваемой щели за один спуск перфоратора и по отработке технологии создания щелевых каналов накатным диском. В качестве диагностического параметра использована амплитуда спектра колебаний давления. На рисунке 5 в качестве примера показаны спектры колебаний давления при накатке щелевого канала перфоратором, соответствующие ступенчатому повышению давления жидкости, причем на каждой ступени изменения давления делается два цикла спускоподъемных операций (СПО) компоновки.

Как видно из рисунка 5, в начале внедрения накатного диска перфоратора в тело обсадной колонны спектр колебаний давления узкополосный, значения амплитуды колебаний $A = 0,35 \div 0,57$ МПа при частоте $f = 0,04 - 0,08$ Гц, а при завершении перфорации значение амплитуды стабилизируется: $A = 0,23$ МПа

при частоте $f \geq 0,1$ Гц. Проведенные исследования показали, что амплитуду спектра колебаний давления жидкости в низкочастотном диапазоне частот $f \leq 0,2$ Гц можно использовать в качестве диагностического критерия для определения момента завершения механического продавливания тела обсадной колонны.

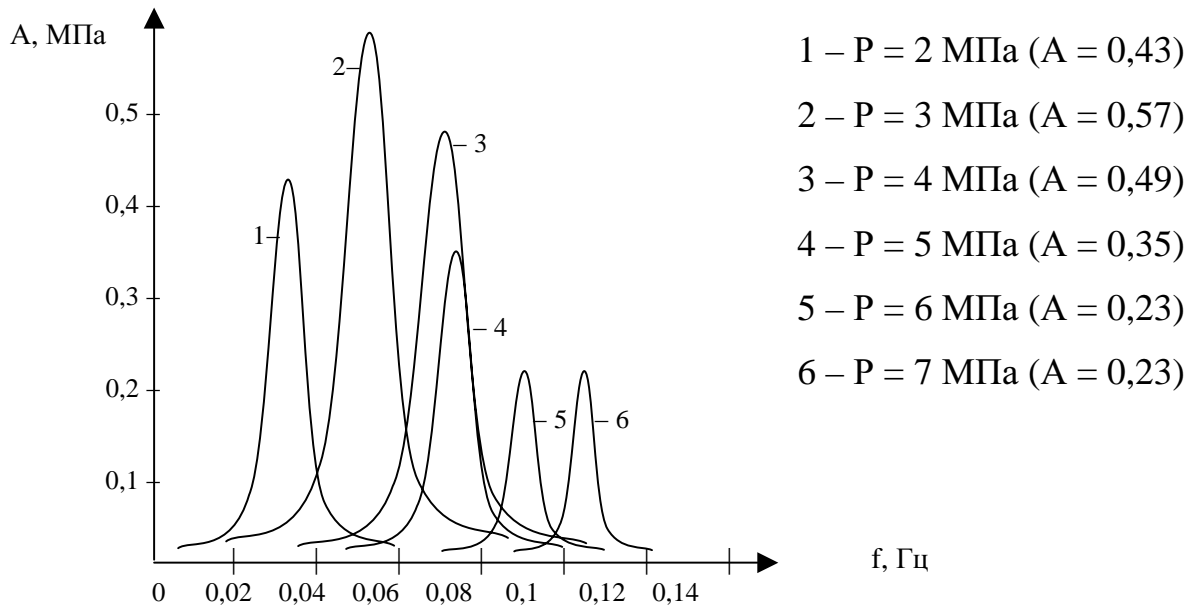
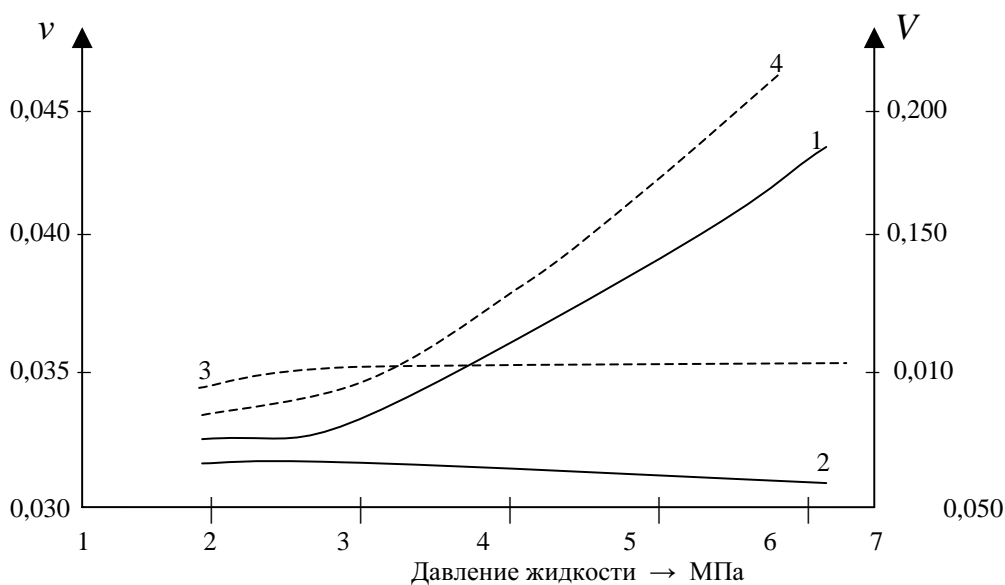


Рисунок 5 – Изменения спектра колебаний давления при создании щелевых каналов

Для получения более достоверной оценки технического состояния перфоратора в процессе эксплуатации рассмотрим пример, когда в качестве дополнительных диагностических критериев используются выбросы и коэффициент вариации случайных колебаний (рисунок 6). В этом случае первичный преобразователь давления ИВК «Спектр» подключается к гидравлическому индикатору веса и анализируются измеренные случайные колебания. Число выбросов за некоторый фиксированный уровень определяется путем аппроксимации выбранной корреляционной функции и нахождением средней частоты и степени затухания функции по методу наименьших квадратов.

В начале работы перфоратора изменение числа выбросов колебаний давления незначительно, с небольшим скачком при $P = 3$ МПа, резко увеличивается в момент завершения перфорации у работоспособного агрегата и снижается у перфоратора с изношенным накатным диском. Также следует отметить изменение другого критерия – коэффициента вариации для различного техническо-

го состояния перфоратора. В начале работы перфоратора коэффициент вариации увеличивается и начинает существенно расти при изношенном накатном диске и почти не меняется до завершения механического продавливания ($P = 3-7$ МПа) для работоспособного перфоратора. Таким образом, число выбросов случайных колебаний можно использовать в качестве диагностического критерия при работе щелевого механического перфоратора, а именно: для оптимальной осевой нагрузки, соответствующей весу компоновки на подъем и спуск, нанесению меток на поверхность НКТ, определяют максимальное и минимальное число выбросов, которое поддерживается в процессе работы перфоратора, и как только число выбросов выходит за установленные границы, это служит сигналом об окончании механического продавливания тела обсадной трубы накатным диском перфоратора.



1, 3 – работоспособный перфоратор; 2, 4 – изношенный перфоратор;
 ———— – число выбросов; - - - - - коэффициент вариации

Рисунок 6 – Выбросы случайных колебаний давления v и изменение коэффициента вариации V в зависимости от технического состояния перфоратора

В процессе промысловых испытаний компоновки шарнирного соединения и щелевого перфоратора, представленного на рисунке 2, были получены диаграммы индикатора веса, которые затем обрабатывались в лабораторных условиях с применением метода Фурье в рамках пакета “Statistica-5” и “Excel”.

Случайные колебания осевой нагрузки $P(t)$ при накатывании диска по щели НКТ можно считать стационарными, так как при относительно постоянной

скорости передвижения перфоратора воздействие перфорированного участка щели на накатный диск будет одинаковым в любой момент времени. Полученные диаграммы расшифровывались с приведенной частотой колебаний осевой нагрузки: $w_{np} = w/90$, где $w = 2\pi/T$; T – период одного ряда интервала работы перфоратора.

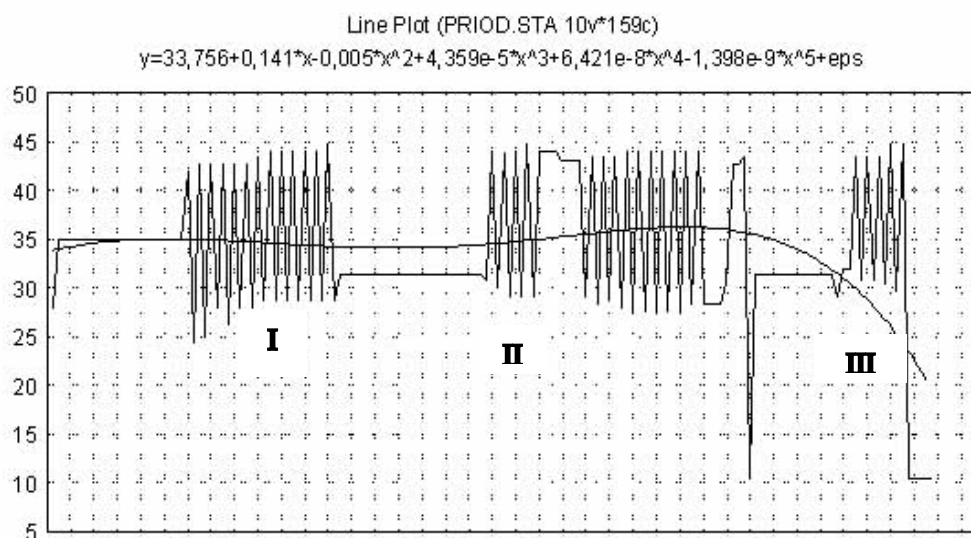


Рисунок 7 – Сплайновое представление колебаний осевой нагрузки по трем интервалам работы перфоратора

На рисунке 7 показаны сплайновые представления зависимости $P(w_{np})$ по трем интервалам работы перфоратора и полиномиальный тренд $P = 33,756 + 0,141\omega_{np} - 0,005\omega_{np}^2$, ограниченный первыми тремя значимыми членами.

Как видно из рисунка 7, на интервале III происходит падение полиномиальной линии, что свидетельствует о резком снижении эффективности работы перфоратора. Были построены полиномиальные тренды по каждому циклу работы перфоратора в отдельности, определены эффективные осевые нагрузки по каждому интервалу. Меньшие значения осевой нагрузки на интервале I и III по сравнению с эффективной работой перфоратора на интервале II объясняются приработкой накатного диска и его износом, соответственно. Спектральный анализ полученных диаграмм индикатора веса осуществлен с помощью метода Хэмминга, что позволило определить преобладающие частоты, проявляющиеся в неявном виде для исследуемого процесса. Невысокий период в начальных ин-

тервалах перфорации указывает на нормальные условия накатки щели, её прорезание, т.е. резко возрастает сопротивление из-за увеличения контакта диска с прорезанной щелью, и на интервале II можно увидеть наиболее оптимальные условия, характеризующие минимальные повреждения накатного диска, причем $w_{np} = 0,45-0,50$ Гц. На рисунке 8 показан пример работы щелевого перфоратора, у которого произошла поломка накатного диска, что отразилось на спектре колебаний осевой нагрузки и превалирующей частоте процесса ($w_{np} = 0,05$ Гц). Таким образом, контролируя превалирующую частоту колебаний осевой нагрузки в процессе эксплуатации щелевого перфоратора, можно прогнозировать его работоспособность, и, самое главное, не допускать аварийную ситуацию.

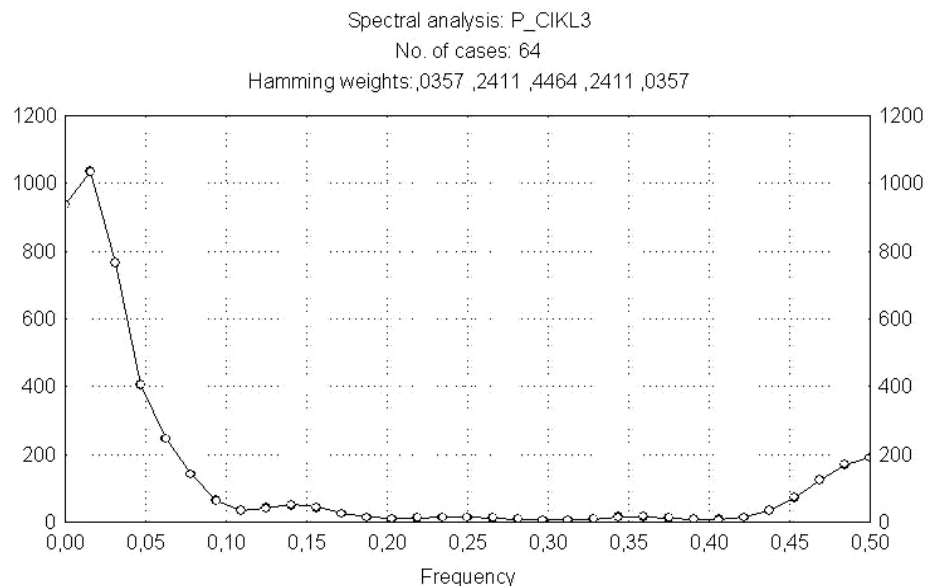


Рисунок 8 – Пример изменения спектра колебаний осевой нагрузки на интервале III работы перфоратора

Стендовые и промысловые испытания компоновки щелевого гидромеханического перфоратора с шарнирным соединением и НКТ позволили нам сформулировать основные требования и методику его дальнейшего применения. Методика применения щелевого перфоратора включает: подготовительные мероприятия (перечислены комплект оборудования и технических средств, их техническое состояние); подготовку к работе и спуск перфоратора в скважину со скоростью не более 1 м/с (последовательность операций по сбору компоновки низа колонны, включающей перфоратор + две трубы НКТ-73 стандартной

длины + патрубков с реперной муфтой, в журнал заносятся расстояния от торца муфты до оси накатного диска, размеры от торца муфты до резьбовых частей труб, патрубков и оси накатного диска) с таким расчетом, чтобы муфта реперного патрубка установилась напротив или ниже подошвы нижнего интервала перфорации; привязку перфоратора к интервалу перфорации и подготовительные работы перед перфорацией (сборка компоновки верхней части колонны и её обвязка, демонтаж устьевого патрубка, монтаж герметизирующего устройства в муфту обсадной колонны и его обвязка со сливной линией цементировочного агрегата); технологию создания щелевых каналов накатным диском перфоратора; операции по размыву цементного камня и горной породы; меры безопасности при работе с перфоратором.

Основные выводы и рекомендации

1 Подобраны оптимальные режимы упрочнения поверхности накатного ролика щелевого перфоратора для стали ШХ-15 за счет имплантации ионов азота и ионно-катодной бомбардировки.

2 Сравнительный анализ различных видов упрочнений показал, что лучшие результаты по прочности, пластичности, износостойкости и коррозионной стойкости показали образцы предварительно хромированные, а затем подвергнутые ионному имплантированию.

3 Разработаны устройство для определения момента закручивания колонны НКТ и компоновка щелевого перфоратора с шарниром, которые прошли успешные стендовые и промышленные испытания.

4 Путем проведения анализа работы звеньев щелевого перфоратора определено критическое значение силы вдавливания накатного диска в тело обсадной трубы.

5 Установлены преобладающие частоты при спектральном представлении колебаний осевой нагрузки в процессе эксплуатации щелевого перфоратора, причем частота 0,05 Гц характеризует неудовлетворительный режим, а частота 0,5 Гц – нормальный режим работы накатного диска перфоратора.

6 Разработаны диагностические критерии оценки технического состояния щелевого перфоратора в процессе эксплуатации по спектральным характеристикам, числу выбросов, коэффициенту вариации измеряемых параметров: осевой нагрузки и давления жидкости.

7 Разработано методическое руководство щелевой гидромеханической перфорации с усовершенствованным перфоратором и автоматизированным контролем за процессом.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1 Беспалова О.Е., Беспалов Е.В., Назаров С.В. и др. Повышение надежности дисков, используемых в перфораторах, изготовленных по новым технологиям// Материалы 48-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа, 1997. – С.41-42.

2 Галеев Э.М., Лягов А.В., Назаров С.В. и др. Комплексная технология перфорации, бескомпрессорного освоения и исследования скважин за один спускоподъем колонн. – М.: Изд-во ГАНГ, 1997. – С.33-34.

3 Лягов А.В., Ишемгужин Е.И., Назаров С.В. и др. Повышение надежности нефтепромыслового оборудования путём упрочнения базовых узлов прогрессивными технологиями. – М.: Изд-во ГАНГ, 1997. – С.92-93.

4 Лягов А.В., Назаров С.В., Галеев Э.М. и др. Результаты стендовых испытаний щелевого перфоратора// Материалы 48-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа, 1997. – С.40-41.

5 Лягов А.В., Ямалиев В.У., Назаров С.В. и др. Вибрационный контроль технического состояния щелевого перфоратора// Материалы 48-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа, 1997. – С.39.

6 Назаров С.В., Фаткулов О.М., Лягов А.В. и др. Некоторые результаты воздействия на ПЗП имплозией, совмещенной с перфорацией// Проблемы нефтегазового комплекса России: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Уфа, 1998. – С.203.

7 Пат. №2124125 Российская Федерация. Способ регулирования оптимальной осевой нагрузки на долото при бурении скважин/ И.Е. Ишемгужин, В.У. Ямалиев, С.В. Назаров и др. – Оpubл.1998, Бюл.№36.

8 Пат. №2147669 Российская Федерация. Способ компоновки низа бурильной колонны/ И.Е. Ишемгужин, Е.И. Ишемгужин, С.В. Назаров и др. – Оpubл.2000,Бюл.№11.

9 Назаров С.В., Маряхин В.И., Есин Д.В. и др. Повышение надежности накатного ролика щелевого перфоратора// IV Конгресс нефтегазопромышленников России. Секция Н Наука и образование в нефтегазовом комплексе. – Уфа, 2003. – С.117-121.

10 Назаров С.В. Компоновка щелевого перфоратора с шарнирным соединением и результаты испытаний// Материалы 2-й Всерос. учеб.-науч.-метод. конф. – Уфа, 2004. – С.151-155.

11 Ямалиев В.У., Назаров С.В., Лягов А.В. Автоматизированный контроль процесса гидромеханической щелевой перфорации// Проектирование и эксплуатация нефтегазового оборудования: Проблемы и решения: Материалы Всерос. конф. – Уфа, 2004. – С.33-39.