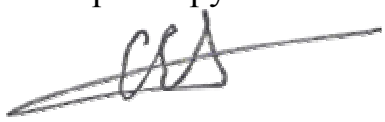
На правах рукописи



Сикора Евгений Александрович

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНАХ

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация и роботизация в машиностроении» государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

**Научный руководитель:**
доктор технических наук, профессор — Крауиньш Петр Янович

**Официальные оппоненты:**
доктор технических наук, профессор — Сердюков Сергей Владимирович

кандидат технических наук, доцент — Рудаченко Александр Валентинович

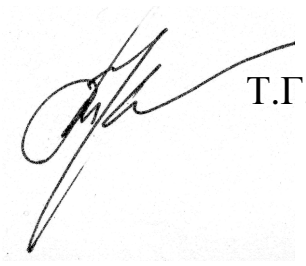
**Ведущая организация:** Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул).

Защита состоится «28» декабря 2010 г. в 14 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.01 при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30 а.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «18» ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.01, к.т.н., доцент — Т.Г. Костюченко



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы** заключается в повышении достоверности определения уровня жидкости (скважинного флюида) в нефтедобывающих и газовых скважинах с использованием устройств генерации зондирующего сигнала. В нефтяной отрасли определение уровня жидкости проводится при мониторинге нефтедобывающих скважин, оборудованных насосами различных типов (механизированный фонд скважин), гидродинамических исследованиях (ГДИС) нефтедобывающих скважин с различными способами эксплуатации – механизированной и немеханизированной добычей – и для оценки фильтрационно-емкостных свойств пластов углеводородного сырья. В газовой отрасли – для контроля уровня попутной жидкости, осевшей в затрубном пространстве.

В настоящее время одной из основных задач геолого-промысловых исследований является контроль уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяных скважин с механизированной добычей, который является ключевым параметром работы насосного оборудования. При правильной эксплуатации электроцентробежные и штанговые насосы должны быть полностью погружены в жидкость и иметь «подпор» (столб жидкости над насосом), величина которого регламентируется производителем. Фильтрационные свойства пласта не постоянны, поэтому приток жидкости из пласта постоянно изменяется. Эти изменения могут произойти достаточно быстро, приводя к перегреву электродвигателя из-за недостаточного притока жидкости из пласта и, как следствие, к срыву подачи. Согласно отраслевому регламенту контроль уровня жидкости для каждой добывающей скважины должен проводиться не реже двух раз в месяц, но на практике проводится даже чаще.

В настоящее время для определения уровня раздела «газ-жидкость» в затрубном пространстве получил широкое применение метод эхометрирования, основанный на измерении времени прохождения звуковой волны в затрубном пространстве скважины от устройства генерации зондирующего импульса до раздела «газ-жидкость» и обратно. На точность измерения уровня жидкости в затрубном пространстве скважины этим методом основное влияние оказывает сложность распознавания временного положения отражений от уровня на эхограмме. При этом на акустический сигнал воздействуют шум насоса, вибрация колонны НКТ и переотражения от неоднородностей в скважине и осложняет его распознавание. Все вышеперечисленное приводит к тому, что во многих случаях сигнал полностью маскируется шумами.

Ситуация также осложняется тем, что на сегодняшний день практически во всех нефтяных компаниях РФ активно проводится политика интенсификации добычи нефти, при этом, как правило, увеличивается депрессия на пласт в зоне скважины, а для этого снижают высоту столба жидкости над насосом. При этом расстояние от устья скважины до уровня жидкости возрастает еще более, увеличивается влияние шумов от насосного

оборудования, а, следовательно, увеличивается и диссипация энергии эхосигнала.

Таким образом, задача повышения точности определения уровня жидкости в скважинах имеет важное значение для добывающей промышленности и актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Поэтому одним из перспективных направлений повышения точности определения уровня жидкости в скважинах является разработка новых устройств генерации сигнала и методов зондирования скважины на основе формирования более точных энергетических посылок и применения более эффективных алгоритмов для оценки времени регистрации отраженных сигналов.

**Объектом исследования** является источник акустических сигналов приборов, измеряющих уровень жидкости в скважинах методом эхометрирования.

**Цель диссертационной работы:** разработка и исследование эффективности средств генерации сигналов для определения уровня жидкости в скважине при наличии высокого уровня шумов методом эхометрирования.

**Задачи исследования:**

1. Выявить достоинства и недостатки существующих средств и методов для определения уровня жидкости в скважинах.
2. Исследовать характеристики скважины как канала, в котором распространяется сигнал: спектр шумов и собственные частоты канала.
3. Разработать и исследовать эффективность алгоритмов корреляционного и спектрального прослеживания эхограмм для надежного определения временного положения информативных сигналов.
4. Разработать схемные и конструктивные решения импульсных пороховых генераторов звуковых волн для эхометрирования уровня жидкости в скважинах.
5. Разработать и исследовать математическую модель динамических процессов в пороховом генераторе звуковых волн.
6. Провести экспериментальные исследования динамических процессов в пороховом генераторе звуковых волн на испытательном стенде, имитирующем затрубное пространство скважины.
7. Разработать конструктивные решения пороховых генераторов многоимпульсных сигналов и оценить эффективность их применения с помощью математического моделирования динамики процесса.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Обоснована необходимость согласования параметров скважины и устройства генерации зондирующего сигнала для повышения точности определения уровня отражающей границы.

2. Изучены спектральные характеристики скважины и установлены частотные «области прозрачности» с минимальной энергией шумов, генерация сигнала в которых позволяет повысить точность и надежность эхометрирования.
3. Разработана математическая модель динамических процессов в пороховом генераторе звуковых волн для эхометрирования уровня жидкости в скважинах.
4. Уточнены и дополнены алгоритмы корреляционного и спектрального прослеживания эхограмм для надежного определения временного положения информативных сигналов.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов и выводов обеспечивается корректным применением современных численных методов решения задач динамики и теории колебаний с общепринятыми допущениями, многочисленными экспериментальными исследованиями, устойчивой воспроизводимостью результатов и сопоставлением результатов, полученных разными методами. Справедливость выводов об эффективности пороховых источников для эхометрирования подтверждена статистическим моделированием и опытно-методической обработкой реальных эхограмм.

**Практическая значимость** заключается в разработке конструктивных решений и практических рекомендаций для построения пороховых импульсных источников и методов прослеживания эхограмм для определения уровня жидкости в скважинах, где традиционные методы моноимпульсного зондирования оказываются не эффективными.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования характеристик скважины как акустического канала, в котором распространяется зондирующий сигнал. Закономерности динамических процессов излучения и распространения возмущения, которые позволяют определить основные параметры и характеристики генераторов.
2. Математическая модель динамических процессов в пороховом генераторе звуковых волн для эхометрирования уровня жидкости в скважинах.
3. Результаты сравнительных экспериментальных исследований и математического моделирования порохового генератора.
4. Схемные и конструктивные решения пороховых генераторов с регулированием частоты излучения.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XIV и XV Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2008 и 2009 гг.), IV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы

машиностроения» (г. Томск, 2008 г.), Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2009 г.)

**Публикации.** Полученные результаты достаточно полно изложены в 7 научных работах: 2 статьи в журналах центральной печати, 4 статьи в сборниках трудов конференций, 1 патент на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Ее содержание изложено на 129 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков и 9 таблиц. Библиографический справочник содержит 131 наименование.

**Личный вклад.** Предложены способы повышения точности эхометрирования на базе корреляционного и спектрального анализа, которые реализованы в модернизированном алгоритме определения временного положения отраженных сигналов на эхограммах. Разработан и исследован одноимпульсный взрывной источник, проведены его сравнительные испытания и разработана математическая модель. Рассмотрено формирование многоимпульсного зондирующего сигнала для эхометрирования скважин и оценена перспективность их использования, выбрана огибающая амплитуды зондирующего СВИП-сигнала, предложены конструкционные схемы источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, приведено описание содержания работы и выносимых на защиту основных положений, отражена научная новизна полученных результатов и их практическая значимость.

**В первом разделе** выполнен обзор и проведен системный анализ существующих клапанных генераторов. Рассмотрены возможные подходы совершенствования динамических характеристик акустических источников для повышения точности определения уровня жидкости в скважине методами одно- и многоимпульсного эхометрирования.

Отмечена важность оперативного и достоверного контроля уровня газ-жидкость методом эхометрирования при эксплуатации добывающих механизированных скважин, т. к. в результате проведения исследований определяются величина «подпора» (столба жидкости) над насосной установкой и забойное давление, получаемое при пересчете из величины уровня жидкости и устьевого давления в скважине.

Сфокусировано внимание на распространении акустического зондирующего сигнала при эхометрировании по затрубному пространству скважины – специфическому акустическому каналу, характеризующемуся шумами оборудования, вибрацией колонны НКТ, переотражениями от неоднородностей, наличием столба пены на переходе «газ-жидкость».

Рассмотрены способы определения временного положения отражений от уровня жидкости на эхограммах, работающие только во временной области и не использующие возможности корреляционного и спектрального анализа для увеличения точности измерения параметров сигнала на регистрируемых эхограммах за счет повышения отношения «сигнал / шум» и устойчивого выделения сигнала на фоне помех. Определены основные факторы, снижающие точность эхометрирования: зашумление зондирующего сигнала при излучении, низкое отношение «сигнал / шум».

Эффективность решения задач в эхолокации зависит от применяемых источников, которые характеризуются способом возбуждения сигнала, геометрическими и энергетическими параметрами, выходной величиной (сигналом). Поэтому были рассмотрены клапанные импульсные источники сигналов и проведен поиск готовых решений и подходов для создания альтернативных источников, позволяющих генерировать в скважину точный незашумленный сигнал. В результате показана возможность применения для создания бесклапанного источника монтажных патронов с нормированной энергией зарядов со специальным стволом-камерой.

Для выделения на фоне помех сигналы таких источников должны характеризоваться максимальным соотношением «сигнал / шум». Этого можно добиться путем увеличения длительности импульса или применением сложных многоимпульсных (многопатронных) сигналов.

В результате проведенного анализа сформулированы задачи исследования акустических источников.

**Во втором разделе** проведена обработка накопленных экспериментальных данных по стандартной аппаратуре.

Исследованы временные и спектральные характеристики зондирующего и отраженного акустических сигналов, скважинных шумов. Установлено, что низкая точность определения (невозможность определения) уровня жидкости методом эхометрирования обусловлена низкой точностью и большой зашумленностью излучаемого зондирующего сигнала, а также его реверберацией и рассеиванием в скважине. Основные переотражения сигнала в скважине происходят от муфт НКТ, частота возникновения которых на пути сигнала кратна 15…20 Гц. При этом полоса частот, в которой сосредоточена основная энергия зондирующего сигнала, составляет 10…15 Гц.

Изучены спектральные характеристики скважины и установлены частотные «области прозрачности» – 150…220, 270…400 Гц – с минимальной энергией шумов (рис. 1), генерация сигнала в которых позволяет повысить точность эхометрирования. Исходя из этого, можно сделать вывод об излучении зондирующего сигнала клапанными источниками на одних частотах с шумами.

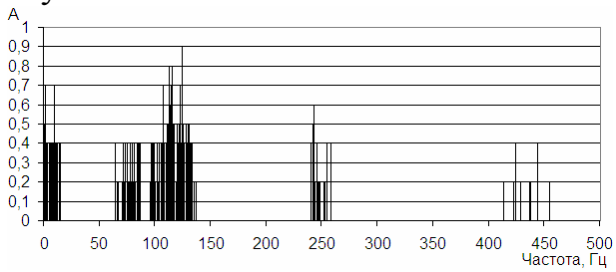



Рис. 1. Статистически накопленный спектр шумов скважин

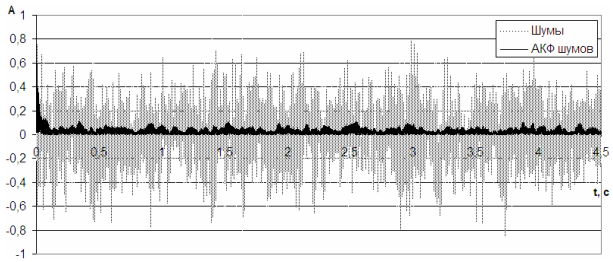



Рис. 2. Автокорреляционные функции шумов скважины

Анализ автокорреляционной функции шумов (рис. 2) показал, что шумы носят случайных характер и не обладают периодичностью, поэтому не могут дать при обработке эхограммы ложных отражений.

Для оценки потенциала существующих уровнемеров модернизирован алгоритм определения временного положения отраженных сигналов на эхограммах с использованием разработанных способов повышения точности на базе корреляционного и спектрального анализа (рис. 3). Примененный «оконный» способ предложен исходя из того, что стандартный корреляционный анализ позволяет определить степень сходства двух сигналов между собой, но в случае эхометрирования зондирующий и отраженный сигналы регистрируются на одной эхограмме, поэтому предложено попарно анализировать участки эхограмм, разнесенные во временной области и охватываемые «окнами» с шириной $N$, равной длительности зондирующего сигнала.

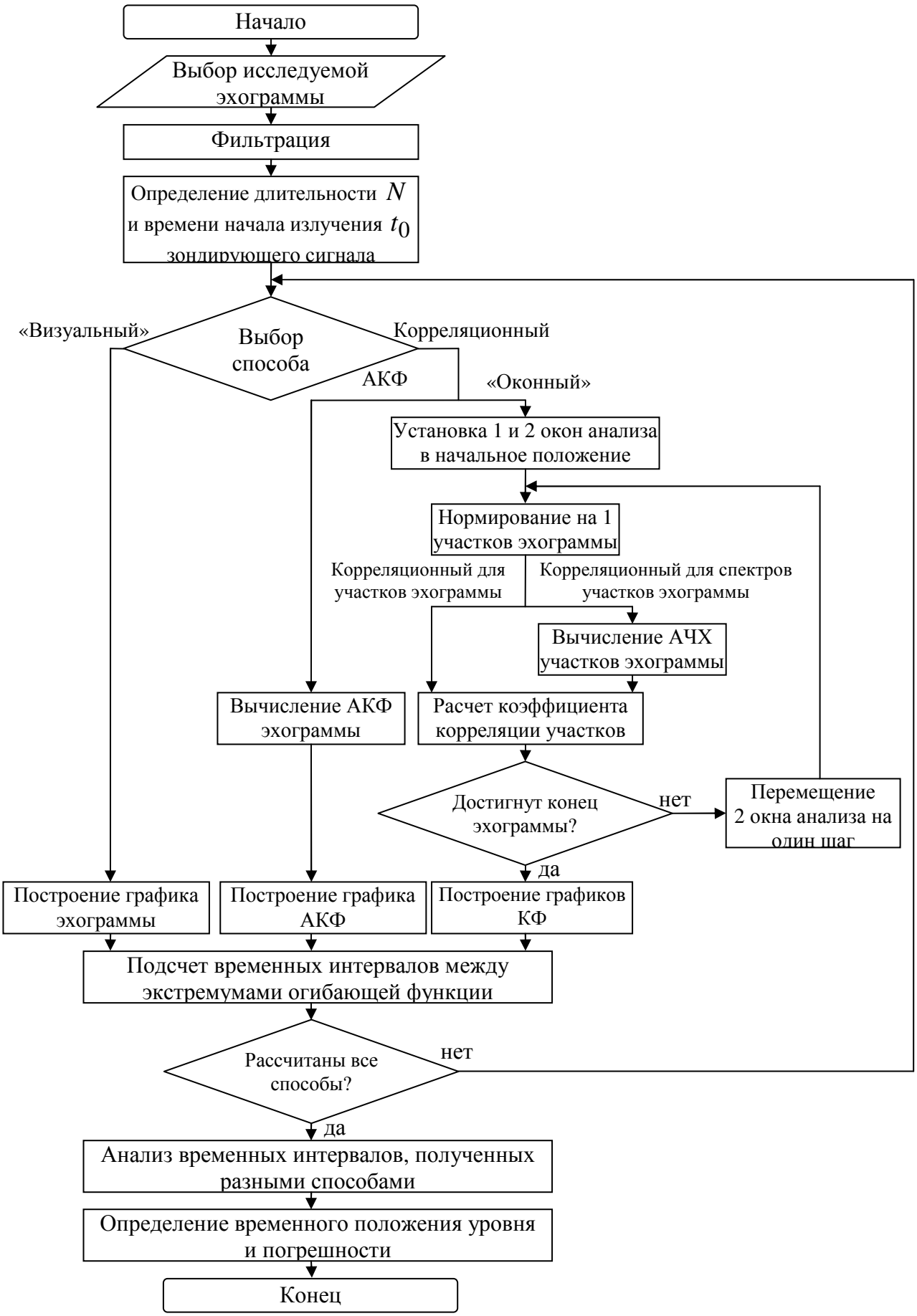



Рис. 3. Структурная схема алгоритма определения временного положения уровня

Проведенные исследования на эхограммах модернизированного алгоритма показали, что точность полученных оценок временного положения уровня высока даже при отношениях «сигнал / шум» близких к единице, и его применение дает положительный результат на проблемных скважинах. При этом данный алгоритм обработки можно применять как на эхограммах, полученных при одиночном зондирующем сигнале, так и при многоимпульсном зондировании. Проверено, что в случае одноимпульсного зондирования обеспечивается стабильный уровень точности определения раздела «газ-жидкость» 10…25 м.

**Третий раздел** посвящен разработке и исследованию одноимпульсного взрывного источника акустического сигнала для эхометрирования.

Анализ существующих клапанных уровнемеров, условий эхометрирования и требований к точности определения уровня жидкости в скважине показал, что наиболее целесообразным методом улучшения технологических характеристик систем эхометрирования является создание и подробное теоретическое и экспериментальное исследование новой конструкции импульсного акустического источника сигналов с положительным передним фронтом, использующего энергию пороховых газов. Поэтому в ходе выполнения работы была разработана принципиальная схема и конструкция порохового источника (рис. 4).

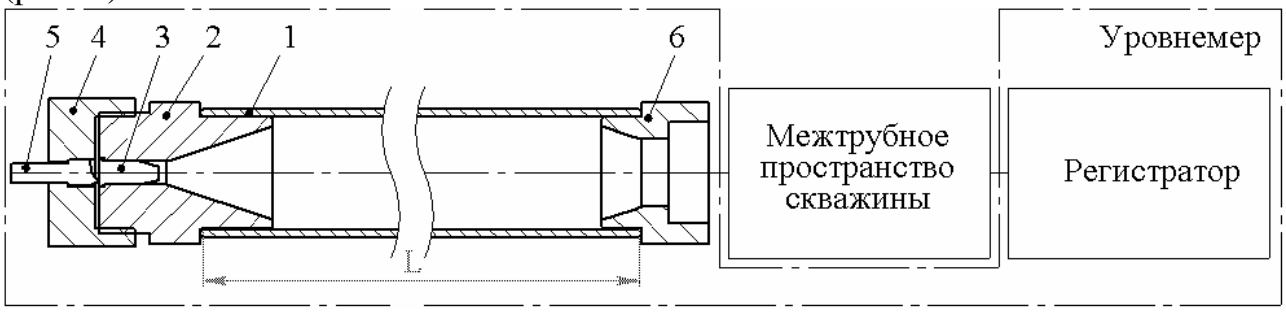



Рис. 4. Конструктивная схема порохового источника акустического сигнала: 1) ствол-камера; 2) патронник; 3) патрон; 4) прижим; 5) боёк; 6) муфта присоединительная

В ходе работы проведены сравнительные испытания функциональных возможностей источников – порохового бесклапанного и клапанного – на экспериментальной установке (рис. 5), имитирующей затрубное пространство скважины, в которой зондирующий сигнал имеет возможность многократно отражаться от закупоренного конца трубы. Для регистрации эхограмм (рис. 6) использовалось стандартное измерительное оборудование, входящее в состав уровнемера марки «СУДОС». Полученные эхограммы позволили оценить длительность, форму сигналов и диапазоны частот, присущих излученному и отраженному сигналам, и показали принципиальную возможность применения порохового источника на скважинах.

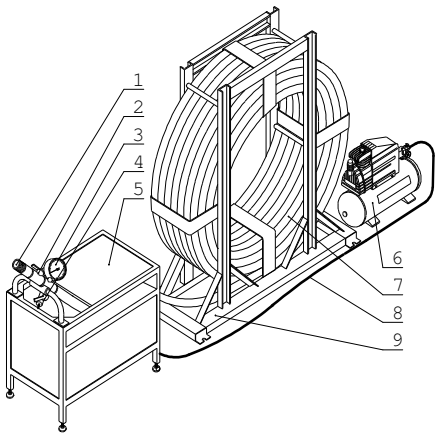



Рис. 5. Схема испытательного стенда уровнемеров: 1) присоединительный патрубок; 2) шаровой кран отсечения волновода; 3) манометр; 4) шаровой кран отсечения компрессора; 5) рабочий стол; 6) компрессор; 7) звуковой канал постоянного сечения, закупоренный с одного конца; 8) соединительный шланг подачи давления; 9) рама крепления волновода

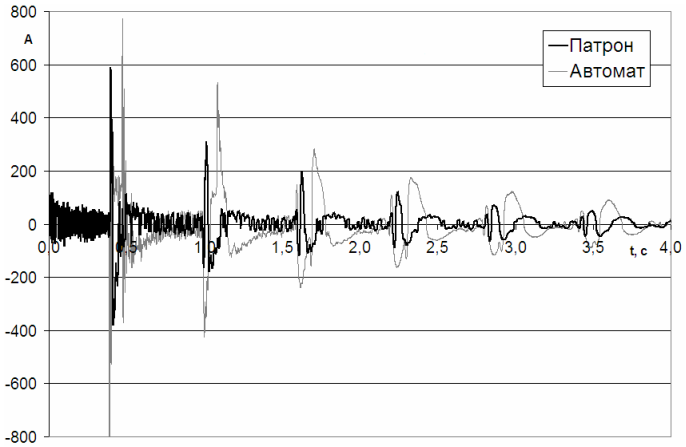



Рис. 6. Эхограммы, полученные на испытательном стенде при давлении 3 атм

Сравнительный анализ показал, что сигнал порохового источника обладает большей информативностью и компактностью по сравнению с сигналом от автоматического клапана. Поэтому использование пороховых источников позволяет в 2 раза снизить ошибку определения уровня раздела газ-жидкость.

Для изучения динамики порохового источника была построена его математическая модель с сосредоточенными параметрами:

$$Q(t) = \mu \cdot S_{отв} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_г}} \cdot \sqrt{P_{ист}(t) - P_y(t)}$$

$$P_y(t) = P_0 + \frac{\beta_y \cdot \int Q(t) \cdot dt}{S_{скв} \cdot c \cdot t} \quad ,$$

$$P_{ист}(t) = \begin{cases} P^*_{ист}(t_{пик}) \cdot e^{\lambda(t - t_{пик})} + P_0, & при \;\; 0 \le t \le t_{пик} \\ P^*_{ист}(t_{пик}) + P_0 - \dfrac{\beta_{ист} \cdot \int Q(t) \cdot dt}{V_{ист}}, & при \;\; t_{пик} \le t \end{cases}$$

описывающая физические процессы формирования импульса (рис. 7).

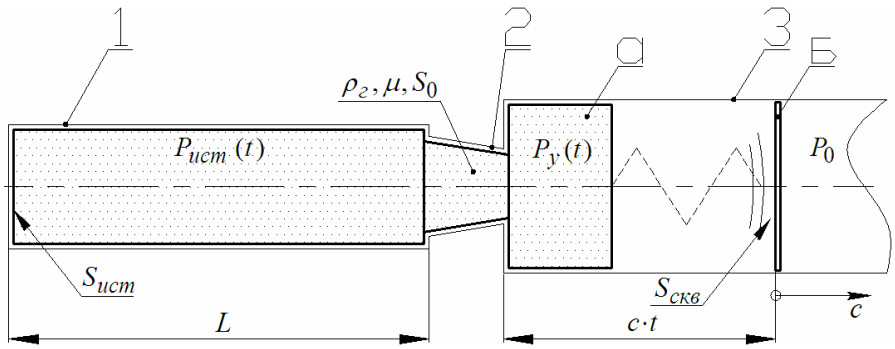
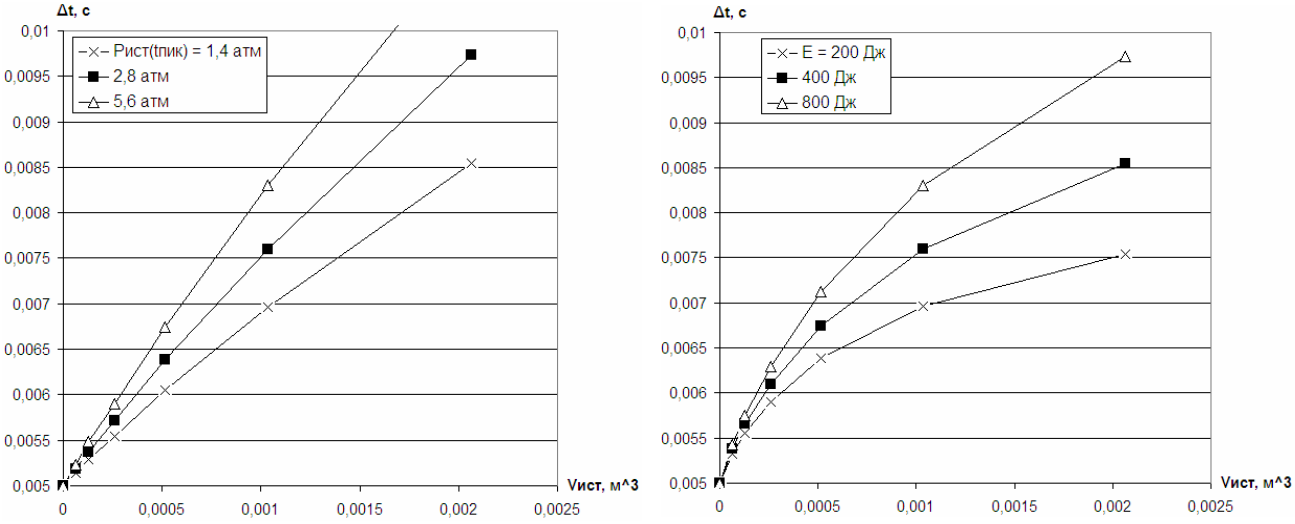



Рис. 7. Процесс истечения пороховых газов через отверстие: 1) ствол-камера; 2) конически-сходящееся отверстие муфты; 3) канал-скважина; а) порция пороховых газов; б) фронт звуковой волны

В результате исследования математической модели была показана ее адекватность реальным процессам и установлены основные параметры, влияющие на процесс формирования сигнала и длительность импульса $\Delta t'$: энергия порохового заряда $E$; объем ствола-камеры $V_{ист}$; площадь поперечного сечения отверстия истечения газа $S_{отв}$ (рис. 8, 9).




а б

Рис. 8. Зависимость длительности переднего фронта сигнала $\Delta t'$ от объема ствола-камеры источника $V_{ист}$

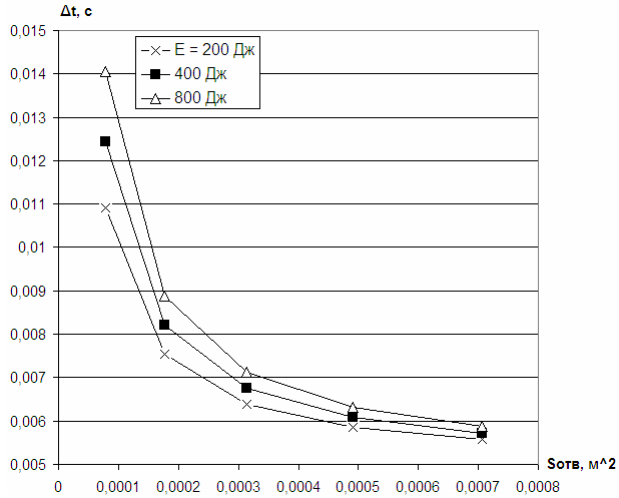



Рис. 9. Зависимость длительности переднего фронта сигнала $\Delta t'$ от площади поперечного сечения отверстия $S_{отв}$

При эхометрировании скважин необходимо стремиться к получению более компактного и мощного импульса, который характеризуется широкополосностью и обеспечивает необходимое соотношение «сигнал / шум».

**В четвертом разделе** рассмотрено модельное исследование эхометрирования скважин на основе многоимпульсных зондирующих сигналов, применение которых позволяет добиться существенного увеличения отношения «сигнал / шум» на эхограммах.

Формирование многоимпульсного зондирующего сигнала базируется на выборе схемного решения источника с оптимальной огибающей амплитуды зондирующего СВИП-сигнала. В качестве вариантов принципиальных схем преложены и рассмотрены источники двух типов: «свисток» и «диск» (рис. 9, 10), способных генерировать СВИП-сигнал с выбранной синусоидальной огибающей.

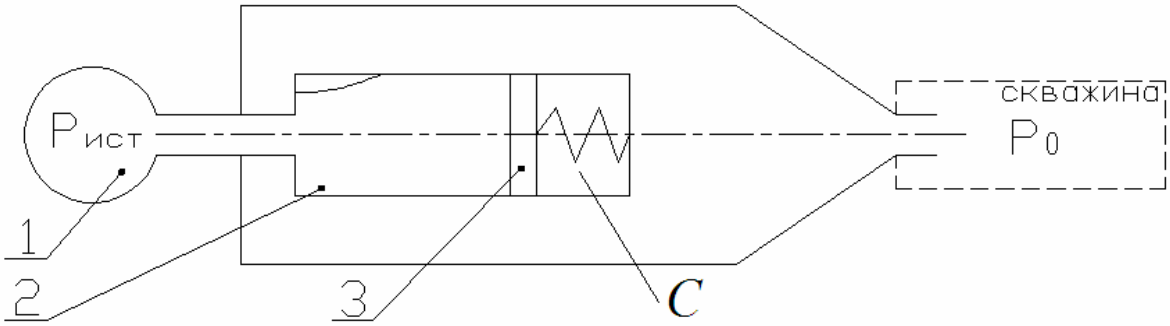
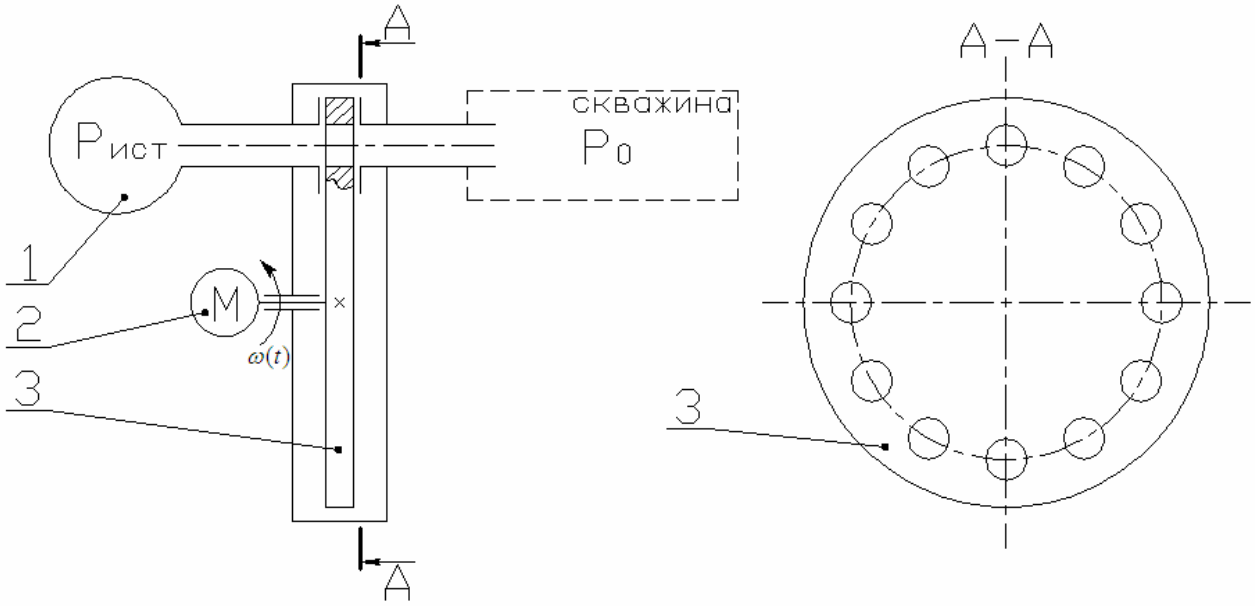



Рис. 9. Конструктивная схема источника сигналов типа «свисток»:
1) полость; 2) свисток; 3) стенка-поршень; С – жесткость пружины




б

Рис. 9. Конструктивная схема источника сигналов типа «диск»:
1) полость; 2) двигатель с частотой вращения $\omega(t)$; 3) диск с отверстиями

Благодаря модельной генерация эхограммы с многоимпульсным зондирующим сигналом удалось оценить точностные характеристики метода, его стабильность работы при высоком уровне шумов.

Рекомендуется использовать многоимпульсное эхометрирование для локации уровня жидкости в скважинах:

1. При проведении долговременных технологических операций, связанных с многократным измерением уровня жидкости. Например, при выводе скважины на режим, во время которого у операторов нет времени на проведение многократных повторных измерений и кропотливого исследования эхограммы и нет возможности увеличить отношение «сигнал / шум», воздействуя на объект исследования (отключая нефтедобывающую установку, увеличивая устьевое давление, перекрывая патрубок между межтрубным пространством и выкидной линией и пр.).

2. При проведении гидродинамических исследований, связанных с многократным измерением уровня жидкости, таких как регистрация кривых падения и восстановления уровня. В этом случае контроль уровня жидкости в межтрубном пространстве скважины производится по четко установленной программе, при этом крайне важно выполнять измерения в строго определенное время. Во время проведения таких долговременных исследований отношение «сигнал / шум» может меняться.

Эффективность применения многоимпульсного зондирования падает при малых уровнях жидкости: чем ближе уровень жидкости к устью скважины, тем мене эффективным становится многоимпульсная локация уровня жидкости. Это связано с тем, что для нормальной работы алгоритмов отраженный сигнал не должен накладываться на зондирующий импульс на эхограмме, то есть длина зондирующего сигнала должна быть меньше двойного времени его распространения от устья до уровня жидкости.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Генерация сигналов с длиной волны равной или кратной длине НКТ – с частотами близкими к 17, 34, 51 Гц и т.д. – приводит к появлению «посторонних» низкоамплитудных отражений на эхограмме, снижается точность эхометрирования.
2. Существующие уровнемеры с клапанными источниками генерируют зашумленный зондирующий сигнал без осуществления контроля за его выходными характеристиками. Повышение точности вычисления временного положения уровня требует излучения сигнала по определенному закону, учитывающему характеристики затрубного пространства скважины – специфического акустического канала, для которого выявлены частотные «области прозрачности» с минимальной энергией шумов 150…220, 270…400 Гц.
3. Модернизация алгоритма определения временного положения отражений с использованием корреляционного и спектрального анализа позволила добиться стабильного уровня точности определения раздела «газ-жидкость» 10…25 м.
4. Показана принципиальная возможность применения для генерации зондирующего сигнала монтажных патронов с нормированной энергией зарядов. Применение предложенного порохового источника позволило увеличить эффективность метода эхометрирования и в 2 раза снизить ошибку определения временного положения уровня, в 7 раз повысить информативность сигнала и в 2 раза сократить его длительности.
5. Составленная математическая модель порохового источника с сосредоточенными параметрами адекватно описывает процесс формирования звукового сигнала и подходит для проведения различных исследований. Основными параметрами, влияющими на процесс формирования сигнала и длительность импульса, являются энергия порохового заряда $E$, объем ствола-камеры $V_{ист}$ и площадь поперечного сечения отверстия истечения газа $S_{отв}$.
6. Увеличение длительности зондирующего сигнала без изменения его формы повышает отношение «сигнал / шум», но снижает точность распознавания отклика. В этом случае необходимо генерировать СВИП-сигналы с синусоидальной огибающей. Такие сигналы обеспечивают наилучшее выделение полезной информации на фоне принятых помех, потому что обладают наиболее компактной АКФ, при этом компактность возрастает с увеличением базы сигнала.
7. Предложены конструктивные решения многоимпульсных (многопатронных) источников двух типов: «свисток» и «диск», способных генерировать СВИП-сигналы сложной формы и с синусоидальной огибающей.

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ


1. Пат. на изобр. 2359107 РФ. МПК E21B37/00. Устройство для очистки скважины / П.Я. Крауиньш, С.А. Смайлов. Д.П. Крауиньш, К.А. Кувшинов, Е.А. Сикора. Заявлено 07.12.2007; Опубл. 20.06.2009, Бюл. №17. – 8 с.: ил.
2. Сикора Е.А. Моделирование динамики вибро-импульсного источника сигналов // “Современные техника и технологии”: Труды XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2008. – Т. 1. – С. 311-313.
3. Сикора Е.А., Крауиньш П.Я. Вибро-импульсный источник сигналов для наземной неразрушающей сейсморазведки. Корреляционные свойства излучаемых сигналов // “Современные проблемы машиностроения”: Труды IV Международной научно-технической конференции. – Томск, 2008. – С. 450-454.
4. Сикора Е.А. Повышение точности измерения уровня жидкости (скважинного флюида) в нефтедобывающих скважинах методом эхометрирования // “Современные техника и технологии”: Труды XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2009. – Т. 1. – С. 332-334.
5. Сикора Е.А. Алгоритмы повышения точности определения уровня скважинного флюида методом эхометрирования // “Наука. Технологии. Инновации”: Труды Всероссийской научной конференции молодых ученых. – Новосибирск, 2009. – Ч. 1. – С. 138-140.
6. Сикора Е.А. Алгоритмы повышения точности определения уровня скважинного флюида методом эхометрирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – Т. 89. – № 4-2. – С. 157-163.
7. Сикора Е.А. Экспериментальные характеристики порохового генератора акустических сигналов для эхометрирования скважин // Известия ТПУ. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 82-86.
8. Сикора Е.А., Крауиньш П.Я. Многоимпульсные источники сигналов для эхометрирования нефтяных скважин // “Современные проблемы машиностроения”: Труды V Международной научно-технической конференции. – Томск, 2010. – С. 492-496.