

На правах рукописи

БОРМИНСКИЙ СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ПОРТАТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОННО-АКУСТИЧЕСКИЕ
УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ
ЖИДКИХ СРЕД**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2006

Работа выполнена на кафедре электротехники Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Скворцов Б.В.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Семкин Н.Д.


Кандидат технических наук, доцент Куляс М.О.

Ведущее предприятие – НИИ «Экран», г. Самара.

Защита диссертации состоится 27.10.2006 в 12 часов на заседании диссертационного совета Д212.215.05 при Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34, корпус 3а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного аэрокосмического университета

Автореферат разослан 26 сентября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор технических наук, профессор  А.А. Калентьев

Актуальность работы. В настоящее время многие предприятия и организации работают с жидкими веществами – это нефтяные и пищевые промышленные предприятия, тепловые сети и другие организации, оказывающие услуги по хранению и переработке жидких веществ. На таких производствах остро стоит вопрос о точном измерении уровня жидкости в резервуаре и передача этой информации вычислительной системе. Классический способ измерения уровня метроштоком имеет высокую погрешность, низкую оперативность, требует контакта с измеряемой жидкостью, не обеспечивает условий безопасности при работе с углеводородами, ядовитыми и агрессивными жидкостями. Актуальным является использование переносных приборов измерения уровня, особенно при измерениях на большом количестве объектов – в таких случаях использование стационарной аппаратуры неудобно и экономически невыгодно. Существующие переносные радиоэлектронные уровнемеры не обладают требуемой точностью.

Задача измерения уровня жидкости является актуальной не только на территории промышленных предприятий. Стремление нефтегазовых добывающих компаний точно учитывать запасы нефти и газа в подземных хранилищах заставляет искать новые высокоточные приборные методы измерения уровня в глубоких скважинах. Данные задачи остаются также нерешенными в области природопользования, где точное и оперативное измерение уровня жидкости в водоёмах позволяет контролировать и прогнозировать экологическую ситуацию.

Перспективным направлением в разработке приборов измерения уровня следует признать низкочастотную акустику. Развитие электронной элементной базы и сигнальной микропроцессорной техники создают широкие возможности для создания высокоточных приборов оперативного контроля уровня жидкости с использованием новых информационных технологий.

Целью работы является повышение точности портативных бесконтактных электронно-акустических устройств измерения уровня жидкости (УИУЖ).

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих основных задач:

1. Создание и исследование математической модели, учитывающей геометрические, технологические и климатические факторы.

2. Исследование температурных и климатических характеристик электронно-акустических УИУЖ, а также погрешностей измерения.

3. Разработка и исследование методов повышения точности и методов коррекции дополнительных погрешностей.

4. Разработка конструкций УИУЖ, а также электронных схем, алгоритмов и программ обработки сигналов, повышения их точности и стабильности.

5. Изготовление и испытание опытных образцов электронно-акустических УИУЖ, внесения прибора в госреестр средств измерений.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались методы дифференциального, интегрального и операционного исчислений, теория погрешностей, физика акустических процессов. При проведении моделирования на ЭВМ использовался математический пакет Mathcad, для расчёта параметров принципиальных схем использовался пакет Orcad.

Научная новизна работы заключается:

1. В исследовании акустических процессов, протекающих в реальных волноводах, применяемых в УИУЖ.

2. В анализе полного акустического сопротивления волновода при наличии реперных отражателей.

3. В создании новой методики измерения глубины скважины с учётом изменения температуры по её глубине.

Практическую ценность работы составляют:

1. Схемы и конструкции электронно-акустических приборов измерения уровня жидкости.

2. Методика проектирования устройств измерения уровня, находящихся в реальных климатических условиях и обладающих требуемыми сервисными функциями.

3. Методики и программы метрологических испытаний, аттестации и поверки приборов.

4. Созданные действующие образцы приборов измерения уровня жидкости и установка для экспериментальных исследований.

5. Методики расчета конструктивных параметров и погрешностей, рекомендации по улучшению эксплуатационных характеристик устройств измерения уровня.

Созданные действующие образцы приборов реально эксплуатируются и приносят экономический эффект.

Реализация результатов работы. Разработан прибор измерения уровня «Питон», который прошёл Государственную метрологическую аттестацию и внесен в Государственный реестр средств измерений под №29726-05, сертификат №21272/1 от 10.08.05. В настоящий момент внедрено 16 приборов на предприятиях России, Украины, Монголии, Франции. Результаты работы используются также в учебном процессе СГАУ при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также при чтении лекций по курсам, связанным с датчиками и элементами автоматике.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель, учитывающая не только геометрические параметры волновода, но и параметры излучателя, климатические условия измерений.

2. Методика измерения уровня при использовании реперных отражателей, позволяющая повысить точность измерений.

3. Алгоритмы волноводно-акустических измерений уровня жидкости при использовании волновода с реперными отражателями, без отражателей и в скважинах.

4. Методы повышения помехоустойчивости измерений.

Апробация работы. Результаты работы представлялись на следующих научно технических конференциях: международной научно-технической конференции «Энергетика и энергосбережение», г. Самара, 2005; на международной научно-технической конференции «Энергетика и энергосбережение», г. Саранск, 2006; на всемирном аэрокосмическом салоне «МАКС», г. Жуковский, 2005г.; на конференциях «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», г. Самара, 2005, 2006гг; «Российские инновации и российский капитал» г. Москва, 2006; на международной научно-технической конференции «Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий» г. Сочи, 2004 г; на выставках «Ярмарка инновационных технологий» 2005, 2006гг; «Энергетика 2006» г. Самара; «Двигатели 2006» ВВЦ г. Москва, 2006.

Публикации. По результатам исследований и разработок опубликовано 11 печатных работ, в том числе получено четыре свидетельства на полезную модель.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Основное содержание работы изложено на 145 страницах текста, в 76 рисунках, 9 таблицах. Список литературы включает в себя 92 наименования, приложения размещены на 49 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, изложены цель и задачи исследований, дана характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор существующим методам измерения уровня жидкости, приведены их достоинства и недостатки. Рассмотрены гидростатические, пневматические, поплавковые, весовые, вибрационные, кондуктометрические, емкостные, электромагнитные, оптические, радиоизотопные и акустические УИУЖ. В результате анализа достоинств и недостатков, а также цен конечных устройств, выбран низкочастотный электронно-акустический метод измерения, на основе которого можно создавать недорогие высокоточные переносные приборы измерения уровня жидкости.

В основу работы положено явление отражения акустического импульса от границы сред с последующим измерением времени его прохождения в полости трубы, коррекцией по температуре и другим климатическим факторам. В акустических устройствах измерения уровня жидкости затруднительно создание узкой диаграммы направленности излучателя, поэтому на результат измерения оказывают влияние волны на поверхности

жидкости, а также различные объекты, расположенные внутри бака: перемешиватели, скобы. Решают данную проблему установкой внутри бака волновода, уровень жидкости в котором соответствует уровню жидкости в баке.

Расстояние до границы сред L определяется по формуле:

$$L = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1)$$

где c - скорость звука; t – время распространения акустического импульса в прямом и обратном направлениях.

Скорость распространения акустических сигналов непостоянна, зависит от многих факторов: температуры, вязкости, плотности, химического состава, поэтому применение описанного метода дает погрешности до 5%. Измеряя температуру и влажность, можно уменьшить погрешность, однако эти параметры могут различаться по длине волновода. Для повышения точности предлагается измерять реальную скорость распространения звука, установив в волновод реперные отражатели O (рисунок 1). Введение реперных отражателей, расположенных на известном расстоянии от прибора, позволяет вычислять скорость звука на любых участках между двумя реперами. Таким образом, измерив реальную скорость звука в конце волновода между отражателями O_{n-1} и O_n и проводя измерения времени относительно последнего незатопленного отражателя O_n , можно повысить точность измерения. При этом расстояние до границы сред L может быть определено как:

$$L = L(O_n) + \frac{(L(O_n) - L(O_{n-1})) \cdot (t(L) - t(O_n))}{t(O_n) - t(O_{n-1})} \quad (2)$$

где $t(O_i)$ – время прохождения звуковой волны от излучателя до отражателя O_i и обратно до приёмника; $t(L)$ – время прохождения звуковой волны от излучателя границы сред и обратно до приёмника; $L(O_i)$ – расстояние от прибора до отражателя O_i

Применение реперных отражателей в волноводе позволяет повысить точность, в том числе при измерении уровня нагретых жидкостей.

Одной из задач улучшения характеристик УИУЖ является повышение помехоустойчивости прибора.

Для измерения L (рисунок 2) в большом диапазоне длин может потребоваться динамическое изменение чувствительности приёмника 5, так как мощность отражения от близкорасположенного препятствия, шероховатости, накипи может быть больше, чем от границы сред 4. Зависимость мощности принимаемого сигнала P , отражённого от границы сред 4, от пройденного расстояния, имеет экспоненциальный вид (показана на рис.2-б жирной линией).

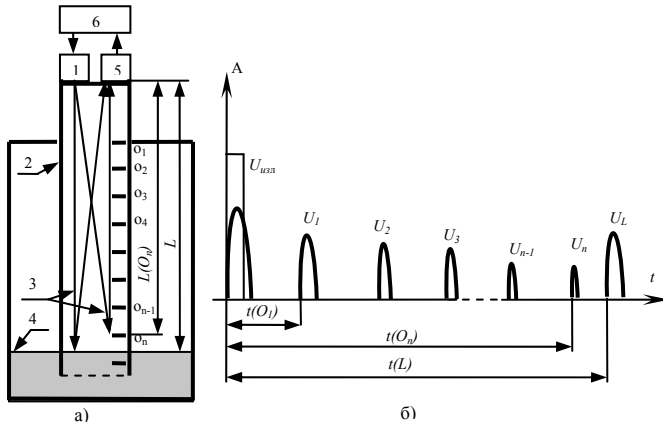


Рисунок 1. а) Схема устройства с реперными отражателями: 1 – излучатель; 2 – волновод; 3- акустическая волна; 4 – граница сред; 5 – приёмник; 6 – устройство обработки и формирования сигналов. б) Диаграмма принимаемых импульсов: $U_{изл}$ – излучаемый импульс; $U_1...U_n$ – принимаемые сигналы от вспомогательных отражателей; U_L – принимаемый сигнал от границы сред.

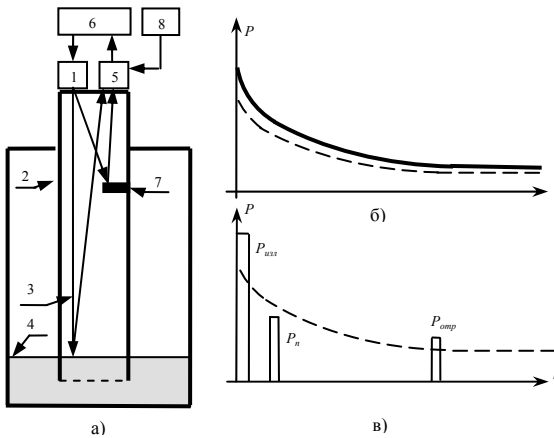


Рисунок 2. а) Схема устройства с изменяемой чувствительностью приёмника: 1 – излучатель; 2 – волновод; 3- акустическая волна; 4 – граница сред; 5 – приёмник; 6 – устройство обработки и формирования сигналов; 7 - препятствие, вызывающее ложное отражение; 8 – блок управления чувствительностью; б) Зависимость мощности принимаемого сигнала от изменения расстояния L . Пунктиром показан уровень, необходимый для регистрации отражения; в) Мощность принимаемых импульсов: $P_{изл}$ – мощность излучаемого импульса; P_n – мощность сигнала, отражённого от препятствия; $P_{отр}$ – мощность сигнала, отраженного от границы сред

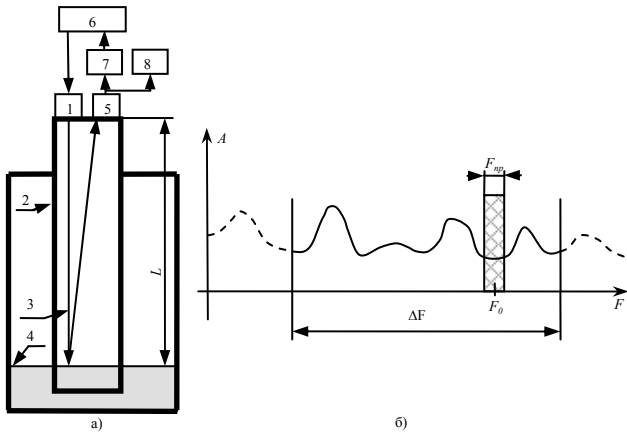


Рисунок 3. а) Схема устройства с фильтром и анализатором спектральной плотности: 1 – излучатель; 2 – волновод; 3- акустическая волна; 4 – граница сред; 5 – приёмник; 6 – устройство обработки и формирования сигналов; 7 – устройство фильтрации; 8 – анализатор спектральной плотности; б) Спектральная плотность шума, измеренная в трубе $D=110\text{мм}$ $L=3\text{м}$ при наличии сильных промышленных помех: ΔF - рабочая полоса прибора, F_0 – частота полосового фильтра; F_{np} – полоса пропускания фильтра

Если производить изменение уровня регистрации сигналов, как показано пунктиром на рисунке 2-б, то можно избежать ошибочной регистрации при отражении от ложных препятствий 7. Отражение от препятствия 7 (P_n на рисунке 2-в) не вызывает ложной регистрации, так как в момент прихода импульса уровень, необходимый для регистрации слишком высок, однако чуть позже меньший по уровню полезный сигнал P_{omr} будет принят.

Повысить помехоустойчивость также можно установкой анализатора спектральной плотности энергии и перестраиваемого полосового фильтра между приёмником и устройством обработки (рис 3-а). В предлагаемом устройстве процесс измерения выглядит следующим образом: перед излучением зондирующего сигнала анализатор спектральной плотности 8 принимает шумы с акустического приёмника 5 и выбирает частоту в диапазоне рабочих частот прибора, на которой шумы минимальны. Далее на выбранной частоте происходит излучение зондирующего импульса, который, отразившись от границы сред 4, и принимается приёмником 5. Устройство фильтрации 7 представляет собой полосовой фильтр, который также настраивается на выбранную анализатором спектра частоту. Принятый сигнал обрабатывается устройством фильтрации 6, после чего в блоке 6 происходит вычисление уровня жидкости.

Предложенные на рисунках 1,2,3 схемы, улучшающие характеристики электронно-акустических устройств измерения уровня жидкости, не исчерпывают весь комплекс проблем, связанных с их конструированием. Для

реализации указанных схем необходимо провести исследования, позволяющие изучить физические процессы, протекающие при измерениях.

На основании изложенного материала сформулированы задачи дальнейших исследований.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы синтеза электронно-акустических УИУЖ, приведена общая математическая модель процесса измерения, сформулирован способ измерения уровня жидкости для измерений с реперными отражателями, без них, а также способ измерения уровня в скважинах.

Для импульсных измерений, принятых за основу в данной работе, расстояние до границы сред определяется по времени прохождения акустического импульса в прямом и обратном направлениях, которое зависит от многих факторов и в общем случае может быть описано формулой:

$$t = \frac{2L}{c} F(\Phi, M, A, I, H, O), \quad (3)$$

где F - обобщенная функция, зависящая от следующих параметров:

Φ - форма (искривленность по длине в пространстве),

M - материал трубы,

A - атмосферные климатические условия (температура, давление, влажность, газовый состав),

I - характеристики акустического импульса.

H - диаграмма направленности излучателя.

O - отражатели

Проведен анализ влияния геометрических параметров и материала волновода, а также формы импульсов и параметров излучателя на скорость распространения акустических сигналов. На основе использования понятий удельного $\sigma_A = \rho c$ и полного $Z_0 = \sigma_A L/d$ акустических сопротивлений трубы определены коэффициенты влияния формы, материалов, импульса и направленности излучателя на скорость распространения сигналов. В ожидаемых предельных случаях данные коэффициенты имеют следующие диапазоны изменений: $0,995 < K_\Phi < 1$; $1 < K_M < 1,3$; $1 < K_I < 1,4$; $1 < K_H < 1,002$.

Для измерений с реперными отражателями получена методика определения полного акустического сопротивления, основанная на теории комформных отображений. Для расчёта сопротивления области между реперными отражателями (рисунок 4-б) производится отображение точек 1-4 по формулам (4), чтобы они оказались вершинами прямоугольника (рис. 4-в).

$$z_1 = sn\left(\frac{z}{C}, k\right); z_2 = z_1 - \frac{x_{11} + x_{14}}{2}; z_3 = \frac{\beta(z_2 + c\alpha^2)}{\alpha(z_2 + 1)};$$

$$z_4 = C_4 \int_0^{z_3} \frac{dz_3}{\sqrt{(1-z_3^2)\left(1 - \frac{1}{\beta^2} z_3^2\right)}} \quad (4)$$

где C – постоянная, определяемая размерами прямоугольника; κ – модуль эллиптической функции sn , определяемый сторонами прямоугольника; α, β – коэффициенты преобразования.

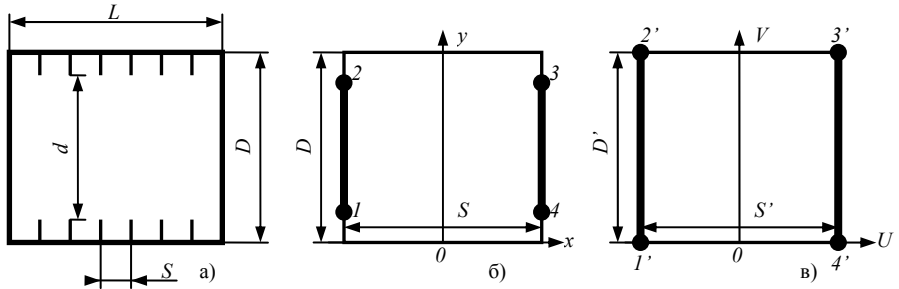


Рисунок 4. а) Волновод с реперными отражателями; б) Область между соседними отражателями; в) Комфортное отображение, переводящее точки 1-4 в угловые

Вычисление сопротивления области, показанной на рисунке 4-в не представляет сложностей. Следует отметить, что при малом количестве отражателей для повышения точности расчётов крайние элементы необходимо рассматривать отдельно, поскольку расположение точек 1-4 отличается от показанного на рисунке 4-б.

С помощью программы Mathcad были получены графики зависимости коэффициента влияния отражателей K_O от их размера и количества.

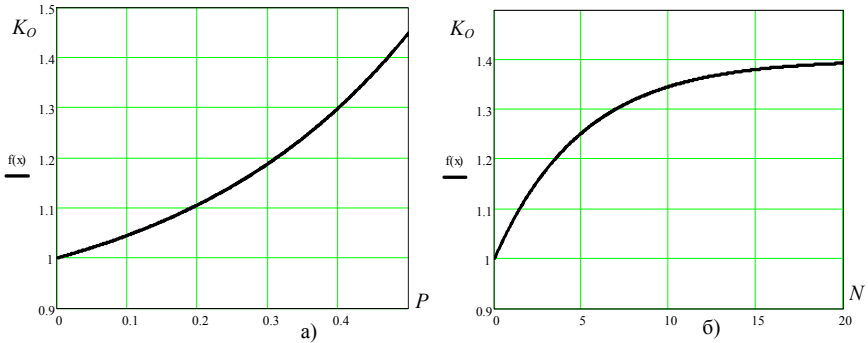


Рисунок 5. а) Зависимость коэффициента K_O от относительных размеров отражателей; б) Зависимость K_O от числа установленных отражателей.

С учётом того, что изменение коэффициентов K_Φ , K_M , K_{II} , K_H , K_O волновода, установленного в баке в процессе эксплуатации малозначительно, их влияние на результаты измерения целесообразно компенсировать с помощью процедуры калибровки УИУЖ. В таком случае, для измерения уровня одним портативным прибором на нескольких объектах необходимо

запоминать калибровочные коэффициенты отдельно для каждого объекта. Учитывать атмосферные условия можно либо с применением различного рода компенсаций, либо измеряя реальную скорость звука на известном расстоянии, например, применяя реперные отражатели (рисунок 1).

Если реперный отражатель находится в непосредственной близости от границы сред, т.е. выполняется условие $L(O_n) < L < L(O_n) + g \frac{\lambda}{2}$, где g – количество излучаемых периодов сигнала, отражения от границы сред и отражателя сложатся, что приведет к увеличению погрешности измерения. Учитывая сложение сигналов, выведена формула для определения уровня жидкости:

$$L = L(O_{n-1}) + \frac{c}{2} (t'(L) - t(O_{n-1})) + \frac{1}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{p \sin(\frac{\omega}{c}(L - L(O_n)))}{1 + p \cos(\frac{\omega}{c}(L - L(O_n)))} \quad (5)$$

где $t'(L)$ – время суммарного отражения от границы и отражателя;

p – коэффициент, являющийся отношением амплитуды отражения от реперного отражателя к амплитуде отражения от границы сред;

ω – частота излучаемого сигнала.

Решение уравнения (5) возможно только численными методами, что усложняет алгоритмы устройства, поэтому в некоторых случаях применение (5) оказывается нецелесообразным. В работе вычисляется погрешность, возникающая при игнорировании сложения волн от отражателя и границы сред:

$$\Delta L = \frac{c}{2\omega} \operatorname{arctg} \left(\frac{p}{\sqrt{1-p^2}} \right) \quad (6)$$

В частности, при использовании частоты $f=1\text{кГц}$ и $p=0.1$ максимальная ошибка из-за игнорирования сложения составляет 2.6мм, что соответствует экспериментальным данным.

Основой для практического применения являются разработанные автором алгоритмы для трёх случаев измерения уровня жидкости.

В первом случае рассмотрен алгоритм измерения в системах без реперных отражателей. В частности описано применение способов для улучшения помехозащищённости, а также порядок обработки результатов с применением термостабилизации.

Во втором случае рассмотрено измерение уровня жидкости в скважинах. С учётом полученной автором зависимости температуры от глубины скважины, выводится формула:

$$L = 10.0335 \sqrt{273.2 + T_{CPR} + \eta L + (T_{CPC} - T_{CPR}) e^{-aL}} \quad (7)$$

где T_{CPR} , T_{CPC} – среднегодовая и среднесуточная температуры (в $^{\circ}\text{C}$);

η , a – коэффициенты, зависящие от грунта и расположения скважины.

В третьем случае рассмотрен алгоритм измерения в случае с установленными реперными отражателями с учётом воздействия помех. В

частности, для повышения помехоустойчивости отделение реперных отражений от помех предложено осуществлять по условию:

$$\frac{c_i}{c_{i+1}} < k \frac{L(O_{i+1}) + L(O_{i-1}) - O_i}{2} > \frac{c_{i+1}}{c_i} \quad (8)$$

где c_i – скорость звука на интервале $O_{i-1} - O_i$ (рисунок 1); k – коэффициент, определяющий максимальное относительное отклонение c_i и c_{i+1} друг от друга на единицу расстояния.

В третьей главе рассмотрены метрологические характеристики УИУЖ, основные и дополнительные погрешности. Поскольку разрабатываемый прибор должен проводить измерения как с установленными реперными отражателями, так и без них, в главе анализируются формулы (1), (2) и (5). Учитывая специфику исследуемого прибора, под нормальными условиями понимается воздушная среда с постоянными и равномерно распределенными параметрами плотности, влажности и давления, в которой скорость распространения акустической волны строго постоянна и равна 331,45 м/с. Тогда абсолютная погрешность измерений ΔL по формуле (1) целиком определяется погрешностью фиксации времени распространения импульса Δt в прямом и обратном направлениях и определяется по формуле: $\Delta L = 0,5c\Delta t$. Таким образом, даже для достижения точности $\Delta L = 1$ мм необходимо измерять временной интервал с абсолютной погрешностью $\Delta t = 6$ мкс. Электронная схема с такими параметрами легко реализуется стандартной схемотехникой.

Для метода, использующего формулу (2), выведена максимальная основная погрешность: $\Delta L = 2c\Delta t$. Несмотря на то, что ΔL в четыре раза больше, чем для формулы (1), способ с дополнительными отражателями имеет ряд важнейших преимуществ: отсутствует в явной форме зависимость от главного дестабилизирующего параметра – скорости звука; измеряемое прибором время присутствует как в числителе, так и в знаменателе, а следовательно, любой дрейф тактовой частоты времяопределяющей цепи УИУЖ будет скомпенсирован, что упрощает разработку и настройку прибора.

Погрешность измерения по формуле (2) также зависит от точности расположения реперных отражателей. В работе выведена зависимость погрешности измерений ΔL от погрешности расположения отражателей $\Delta L_{отр}$:

$$\Delta L_{отр} \leq \Delta L \leq 3\Delta L_{отр} \quad (9)$$

Метрологический анализ формулы (5) был проведён численными методами в программе MathCad. На рисунке 6-а и 6-б приведены графики зависимости максимальной абсолютной погрешности от смещения реперных отражателей и точности фиксации времени соответственно.

При измерениях без реперных отражателей важнейшим фактором, определяющим дополнительную погрешность прибора, является зависимость скорости распространения звука от различных климатических и физических факторов.

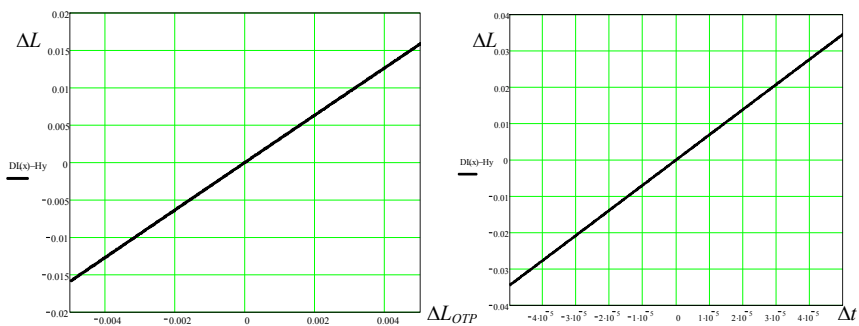


Рисунок 6. а) Зависимость абс. погрешности от точности расположения реперов; б) Зависимость абс. погрешности от точности фиксации времени

К таким факторам относятся: температура и влажность среды, давление, плотность, примеси посторонних газов, влияние внешнего акустического шума, грязь и посторонние предметы в трубах, нестабильность параметров источника питания и электронных компонентов схемы. Дополнительная погрешность формулы (1) определяется: $\Delta L = 0,5\Delta c t$, где Δc - суммарное изменение скорости звука в воздухе от различных факторов. Относительная погрешность определится: $\varepsilon = \frac{\Delta c}{c_0}$. Зависимость скорости звука от

температуры имеет вид: $c = 20.067\sqrt{\theta}$, где θ - абсолютная температура в $^{\circ}\text{K}$, что в диапазоне 240–320 $^{\circ}\text{K}$ приводит к относительной погрешности 4.2%.

Обобщающим фактором, влияющим на скорость звука в среде, является коэффициент поглощения. Модуль групповой скорости в зависимости от коэффициента поглощения для низких частот (до 10 кГц) запишется:

$$c_{ГР} = \frac{c_0}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \quad (10)$$

где $c_0 = 404$ м/с. – соответствует групповой скорости звука при гипотетическом условии отсутствия затухания в воздухе. Это значение вычислено из предположения того, что коэффициент поглощения воздуха при скорости 331,45 м/с равен 0,697. Погрешность, вызванная изменением коэффициента поглощения воздуха, проиллюстрирована на рис. 7. Так как коэффициент поглощения достаточно просто измеряется и является комплексным параметром, отражающим все свойства среды (температуру, влажность, давление, вязкость и теплопроводность), то корректирование результатов измерения по параметру поглощения следует признать перспективным.

Влияние различных факторов, составляющих дополнительную погрешность приведены в таблице 1.

Общая относительная дополнительная погрешность определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{доп}} = \sqrt{\varepsilon_T^2 + \varepsilon_{\text{ВЛ}}^2 + \varepsilon_D^2 + \varepsilon_{\text{СО}}^2} \quad (11)$$

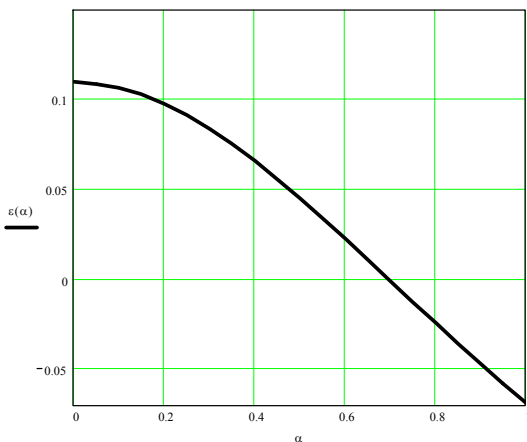


Рисунок 7. Зависимость относительной погрешности измерений от изменения коэффициента поглощения воздуха.

Таблица 1

№	Факторы	Макс. отн. погр-ть в ожид. условиях эксплуатации, (%)	Обознач	Диапазон
1	Температура	4,2	ε_T	240 – 320 град К
2	Влажность	2,0	$\varepsilon_{\text{ВЛ}}$	40 – 100 %
3	Давление	0,07	ε_D	700 – 800 тор.
4	Примесь CO_2	0,06	$\varepsilon_{\text{СО}}$	0,03 – 0,06 % объема
5	Поглощение	4,5	$\varepsilon_{\text{П}}$	0,4 – 1,0
6	Шумы	Сбой показаний		Случайная

Максимальная дополнительная погрешность в ожидаемых условиях эксплуатации, вычисленная по формуле (11) составит $\varepsilon_{\text{доп.макс}} = 5\%$. Поэтому дополнительные погрешности требуют корректирования.

В четвертой главе рассмотрены особенности построения УИУЖ, в частности конструктивно-технологические и схмотехнические вопросы, сформулированы требования и обоснован выбор элементной базы УИУЖ, кроме заданных метрологических параметров, обладающих также необходимыми сервисными функциями. С использованием отечественных и зарубежных источников, а также сети Internet дан обзор по акустическим излучателям, приемникам, преобразователям, элементам автономного питания, индикаторам, электронным компонентам схемы, в том числе однокристалльным микро-ЭВМ.

Обзор электронных компонентов показал, что для различных вариантов построения УИУЖ возможно применение различных по мощности контроллеров. При разработке приборов, работающих на основе формулы (1), можно использовать простые однокристальные микроконтроллеры семейства ATmega или подобные. Для приборов, работающих с реперными отражателями, предлагается использовать более мощные процессоры, в частности ADuC841 со встроенным 420кГц 12 разрядным АЦП. Также является актуальным использование сигнальных процессоров TMS320C28, имеющих производительность 150MIPS при низком энергопотреблении.

В качестве индикаторов для исследуемых приборов, с учетом обеспечения широкого температурного диапазона, механической прочности, низкого потребления, низкой цены, а также простоты программирования предлагается использовать двухстрочный символьный ЖКИ с встроенным контроллером PC1202A. Однако, учитывая современные тенденции развития электроники, перспективным является применение цветных графических дисплеев, например PD035VX2.

Подробно рассмотрена схемотехника УИУЖ, обобщенная структурная схема которых представлена на рисунке 8.

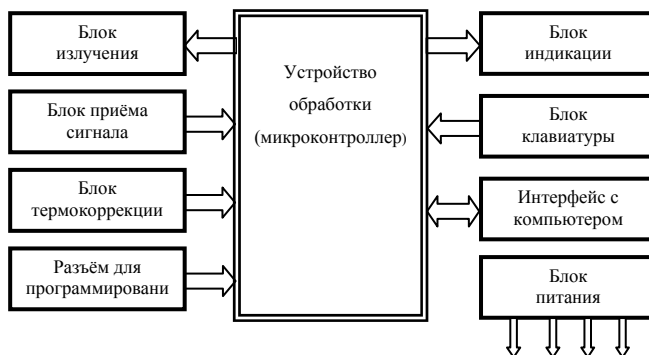


Рисунок 8. Обобщенная структурная схема УИУЖ

Для проведения практических исследований распространения звука в волноводах сделана специальная переносная акустическая установка, позволяющая измерять расстояние до границы сред до 500м, а также стенд, с помощью которого возможно проводить испытания уровнемеров.

Особенностью установки является портативность, высокая чувствительность и выходная мощность на излучатель до 100Вт, что позволяет проводить измерения уровня в глубоких скважинах. Работает установка совместно с компьютером «ноутбук». Установка представляет собой приёмник, излучатель, блок усилителей, подключаемых к специализированной звуковой плате.

Рассмотрены три апробированных варианта принципиальных схем портативных электронно-акустических приборов для измерения уровня.

Первый вариант использует в основе измерения формулу (1) с использованием термокомпенсации. Вторая схема является модернизацией первой и позволяет применять алгоритмы измерения с реперными отражателями. Третья схема построена на основе микроконтроллера ADuC841 с внешним ОЗУ на 512 кбайт, что позволяет записать весь принятый сигнал и применять сложные алгоритмы, описанные в главе 2.

В заключение главы описываются алгоритмы для микроконтроллера, поясняются особенности и различия кода программы между тремя версиями приборов. В приложении приведен полный текст программы на языке ассемблера.

В пятой главе приведено описание экспериментальных исследований и практического использования созданной установки, а также приборов измерения уровня жидкости.

Измерения проводились в скважинах на станции подземного хранения газа, в результате чего был собран ценный материал для анализа. В работе приводятся несколько записанных сигналов, проведен их анализ, вычисляется уровень жидкости, приводится зависимость затухания волны в скважине от частоты. Пример одного из записанных сигналов приведен на рисунке 9.

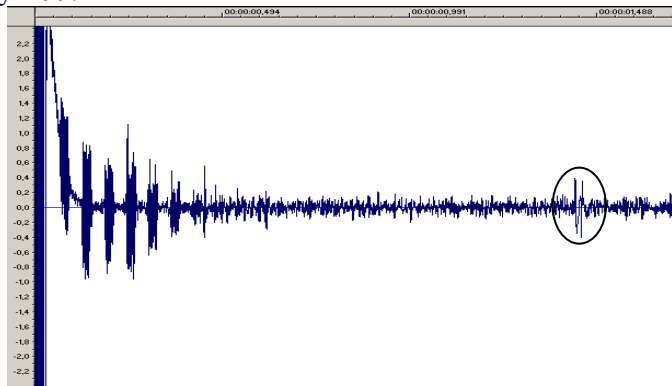


Рисунок 9. Принимаемый сигнал (эхограмма) в скважине при излучении 10 периодов синусоиды 500Гц. Овалом обведено отражение от границы сред.

Для разработанных приборов приводится программа испытания вместе с протоколами испытаний, которая проводилась в рамках сертификации и утверждении типа в Госреестре средств измерения РФ. При волноводно-акустических измерениях максимальная относительная погрешность приборов составила менее 0.05% при расстоянии до границы сред 10м. Диапазон волноводных измерений составил 0.5-90м, при измерении в баке без волновода – 0.5-16м. Технические характеристики прибора приведены ниже:

Диапазон измерения.....от 0,5 до 16 м
 Внутренний диаметр волноводаот 20 до 160 мм

Основная погрешность, не более.....	0,05%
Индикация.....	ЖКИ, 24знак.
Напряжение питания.....	2.8-6В
Потребляемый ток.....	20мА (4.5В)
Источник питания.....	3 элемента 343
Диапазон рабочих температур.....	от-30 до +40 ⁰ С
Исполнение.....	портативное
Габаритные размеры, не более	85x85x330 мм.
Масса прибора, не более.....	1,1кг.

Помимо вышеприведённых характеристик прибор обладает сервисными функциями: сохранение измерений в память, суммирование результатов, измерение температуры окружающей среды, возможность передачи данных в компьютер, удалённое управление при стационарной установке.

Экспериментально подтверждены основные теоретические выводы, полученные в предыдущих главах, в частности, по оценке влияния на результаты измерений относительных геометрических параметров волновода, материала, искривленности и климатических факторов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Сравнительный анализ известных и разработанных с участием автора конструкций электронных УИУЖ показал, что на современном уровне развития технологий и элементной базы перспективными являются электронно-акустические устройства, которые позволяют при прочих равных условиях минимизировать габариты и уменьшить цену.

2. Основные пути совершенствования электронных УИУЖ связаны с созданием конструкций, основанных на вычислении и анализе реальных условий распространения акустических сигналов.

3. Время распространения прямого и отраженного акустических импульсов зависит от расстояния до измеряемой границы сред, а также от геометрических параметров волновода, в частности, от формы акустического импульса, диаграммы направленности и чистоты обработки внутренней полости волновода, при этом различные частотные составляющие импульсов распространяются с разной скоростью. На процесс распространения акустических импульсов влияют такие параметры среды, как вязкость, температура, упругость, плотность, теплоемкость.

4. Полное акустическое сопротивление волновода зависит от площади, а также количества реперных отражателей. Разработанная методика позволяет рассчитывать акустическое сопротивление всей системы.

5. Основная погрешность время-импульсных приборов измерения уровня жидкости определяется суммарной погрешностью измерения временного интервала между посланным и отраженным импульсами.

6. Дополнительные погрешности УИУЖ в случае использования волновода без реперных отражателей определяются в основном

климатическими условиями: температурой, давлением, влажностью, составом газа, в котором производится измерение, и внешними акустическими шумами. Максимальная дополнительная погрешность в ожидаемых условиях эксплуатации без применения корректирующих устройств составляет 5%.

7. Применение в волноводе дополнительных реперных отражателей, а также комбинированных методов коррекции погрешности, позволяет достичь на практике относительной погрешности измерений 0,05% в диапазоне температур $-10 +40^{\circ}\text{C}$.

8. Использование разработанной методики измерения уровня жидкости с применением формулы (7) позволяет достичь относительной погрешности 0,5% при измерении уровня жидкости в скважине.

9. Созданная переносная акустическая установка позволила изучать акустические сигналы и измерять расстояние до границы сред до 500м. В ходе работ был также создан стенд для проведения испытания уровнемеров.

10. Экспериментальные испытания созданных приборов показали их высокие метрологические характеристики, удобство в эксплуатации, правильность основных теоретических положений, используемых при проектировании. Прибор прошёл государственную метрологическую аттестацию, зарегистрирован в реестре средств измерения №29726-05. В настоящее время эксплуатируется 16 приборов на предприятиях РФ, Украины, Монголии, Франции.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Борминский С.А. Скворцов Б.В. Теоретические основы волноводно – акустических методов измерения уровня жидкости // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2005. Т.8. № 4. С. 75-79.
2. Борминский С.А. Скворцов Б.В. Повышение точности электронно-акустических устройств измерения уровня жидкости // Измерительная техника. – 2006. №8. С. 53-56
3. Свидетельство на полезную модель RU № 53001. Электронно-акустическое устройство измерения уровня жидкости / Борминский С.А., Скворцов Б.В. – опубл. 27.04.2006. Бюл. № 12
4. Свидетельство на полезную модель RU № 53002. Электронно-акустическое устройство измерения уровня жидкости / Борминский С.А., Скворцов Б.В. – опубл. 27.04.2006. Бюл. № 12
5. Свидетельство на полезную модель RU № 52635. Электронно-акустическое устройство измерения уровня жидкости и длины труб / Борминский С.А., Скворцов Б.В. – опубл. 10.04.2006. Бюл. № 10
6. Свидетельство на полезную модель RU № 54312. Электронно-акустическое устройство измерения длины труб и уровни жидкости / Борминский С.А., Скворцов Б.В. – опубл. 02.06.2006. Бюл. № 17
7. Борминский С.А. Электронно-акустические методы измерения уровня жидкости // Вестник СГАУ. – 2006.
8. Борминский С.А. Способ электронно-акустического измерения уровня жидкости // Сборник конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники». – Самара, 2006.
9. Борминский С.А., Жиганов И.Ю. Алгоритмы микропроцессорных устройств в электронно-акустических измерителях уровня жидкости // Вестник СГАУ. 2006.
10. Свидетельство на полезную модель RU № 48082. Устройство для автоматического управления процессом смешения жидкостей и газов. / Борминский С.А., Пендюхов Е.П., Скворцов Б.В. – опубл. 10.09.2005. Бюл. № 25
11. Борминский С.А., Скворцов Б.В., Жиганов И.Ю. Акустические методы и алгоритмы измерения длины труб и уровня жидкости. // Материалы международной научно-технической конференции «Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий» Сочи, 2004 г.

Подписано в печать 30.06.2006. Тираж 100 экз.
Отпеч. с готовых оригинал-макетов
Типография СГАУ, г. Самара, Московское шоссе 34