

*На правах рукописи*

Паршин Владислав Михайлович

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНЫХ  
ПОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЯЗКОСТИ,  
ПЛОТНОСТИ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ  
ЖИДКОСТИ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2010

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

Научный руководитель : доктор технических наук, профессор  
Скворцов Борис Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Семкин Николай Данилович

кандидат технических наук, доцент  
Сусарев Сергей Васильевич

Ведущее предприятие : ФГУП «НИИ «Экран», г. Самара

Защита диссертации состоится 29 июня 2010 в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.215.01 при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34, корпус 3а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева»

Автореферат разослан 27 мая 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, профессор

 В.Г. Шахов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Точное дозирование компонентов в процессе смешения с оперативным контролем по определяющему показателю качества является важнейшим фактором эффективного производства высококачественных углеводородных топлив. При смешении нефтепродуктов необходимо решить задачу одновременного измерения скорости потока, а так же измерение двух важнейших показателей качества – вязкости и плотности. Для этих целей в настоящее время используются сразу несколько разнородных устройств – расходомеры, плотнометры, вискозиметры, каждое из которых требует специальной системы пробоподготовки и калибровки. Одним из решений данной проблемы является разработка прибора комплексного поточного контроля вязкости, плотности и расхода нефтепродуктов (далее по тексту - ППК).

Задача комплексного поточного измерения расхода, плотности и вязкости жидких продуктов актуальна не только на нефтеперерабатывающих предприятиях, но и на нефтебазах, ТЭЦ, в научно-исследовательских институтах. Возможно применение ППК также в пищевой промышленности и в медицине.

Ультразвуковая расходометрия жидких сред хорошо исследована и служит принципиальной основой предлагаемой работы, которая развивает данное научное направление с позиций расширения функциональных возможностей.

Работа основывается на трудах, Красильникова В.А., Кремлевского П.П., Гинзбурга В.Л., Ванштейна Л.А., Галямина А.Я., Глебовича Г.В., Викторова В.А., Наумчука А.П., Скворцова Б.В., Фукса Г.И., и учитывает разработки следующих российских и зарубежных фирм: НИИ «Экран», «Акустрон», «Сигма-S», «Взлет», «Центросоник», «Solatron», «Krone».

**Целью работы** является разработка электронно-акустических приборов и методов комплексного поточного контроля вязкости, плотности и скорости движения жидких сред.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих **основных задач**:

1. Анализ существующих методов и средств контроля вязкости, плотности и расхода нефтепродуктов.
2. Создание математической модели распространения акустических сигналов в жидкостях, движущихся по трубопроводам с позиций получения информации о требуемых показателях качества.
3. Разработка методов и алгоритмов контроля нефтепродуктов.
4. Экспериментальные и теоретические исследования законов распространения акустических сигналов в нефтепродуктах, движущихся по трубопроводам.
5. Исследование влияния климатических и технологических факторов на характеристик и электронно-акустических ППК, метрологический анализ.

6. Разработка конструкций ППК, а также электронных схем, алгоритмов и программ обработки сигналов.

**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:**

1. Создана математическая модель процесса распространения акустического импульса и формирования акустического поля в движущейся среде, связывающая физические параметры излучаемого и прошедшего через среду сигналов, с плотностью, вязкостью и скоростью движения жидкости.

2. Разработаны методы и алгоритмы измерения контролируемых параметров по характеристикам сигнала в разных точках акустического поля.

3. Получены аналитические выражения, связывающие в явном виде физические параметры прошедшего через контролируемую среду акустического импульса с плотностью, вязкостью и скоростью потока жидкости.

**Практическая ценность работы:**

1. Разработано устройство поточного контроля вязкости, плотности и расхода нефтепродуктов, осуществляющее одновременный контроль трех параметров нефтепродуктов (вязкость, плотность и расход) с помощью одного измерительного канала (2 пьезоэлектрических преобразователя) и датчика температуры, обеспечивающее достаточную для технологического процесса точность измерения указанных параметров.

2. Создан руководящий технический материал по разработке конструкций и принципиальных схем интеллектуального модуля обработки данных устройств измерения вязкости, плотности и расхода, находящихся в реальных климатических и технологических условиях и обладающих требуемыми сервисными функциями.

3. Даны рекомендации по улучшению эксплуатационных характеристик устройств измерения вязкости, плотности и расхода нефтепродуктов.

4. Создан испытательный стенд для экспериментальных исследований устройств комплексного поточного контроля вязкости, плотности и расхода нефтепродуктов.

**Реализация результатов работы.**

Созданный действующий образец устройства эксплуатируются на одном из предприятий г. Самары на опытном образце системы смешения нефтепродуктов, где используется для отладки алгоритмов управления технологическим процессом.

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 автоматики.

Автором получен грант на Областном конкурсе «Молодой ученый-2007г».

## **Основные положения, выносимые на защиту .**

1. Математическая модель распространения акустических импульсов и формирования акустического поля в жидкостях, движущихся по трубопроводам;

2. Методы и алгоритмы измерения вязкости, плотности и расхода жидкостей по характеристикам сигнала в различных точках акустического поля.

3. Аналитические выражения, связывающие в явном виде физические параметры прошедшего через контролируемую среду акустического импульса плотностью, вязкостью и скоростью потока нефтепродуктов.

**Апробация работы.** Результаты работы представлялись на следующих научно-технических конференциях: «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», г. Самара, 2006г.; «Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ-2007», г. Астрахань, 2007г.; «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», г. Самара, 2007г.

**Публикации.** По результатам исследований и разработок опубликовано 11 печатных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 патента на полезную модель, 3 тезиса докладов.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Основное содержание работы изложено на 181 страницах текста, в 59 рисунках, 12 таблицах, 4 приложениях. Список литературы включает в себя 148 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, выносимые на защиту, указана научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** дан обзор известных методов измерения вязкости, плотности и расхода нефтепродуктов, приведены их достоинства и недостатки. Выполнена классификация рассмотренных методов. Сформулированы требования к современным ППК. В результате проведенного анализа выбран ультразвуковой электронно-акустический метод измерения, на основе которого создаются устройства поточного контроля вязкости, плотности и расхода нефтепродуктов, отвечающие сформулированным требованиям.

Рассмотрены принципы построения ППК и предложены оригинальные структурные схемы. На рисунке 1 представлена базовая схема прибора измерения заявленных параметров движущейся жидкости (патент на полезную модель №5 6597), на основе которой строятся защищаемые методы измерений.

В отличие от известных схем измерений, в данном методе предлагается вместе с контролем времени прохождения импульса от излучателя до приемника оценивать коэффициент затухания импульса и его спектральную плотность, что дает возможность кроме скорости одновременно контролировать плотность и вязкость жидкости.

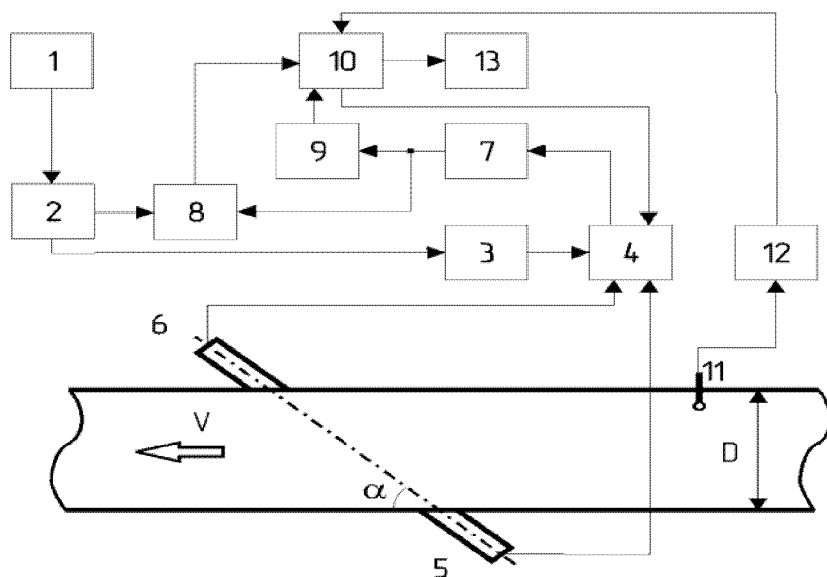


Рисунок 1 – Структурная схема прибора измерения расхода и показателей качества нефтепродуктов: 1-генератор, 2-делитель частоты, 3-формирователь зондирующих и импульсов, 4-управляемый коммутатор, 5,6-пьезоэлектрические преобразователи, 7-усилитель, 8-фазовый детектор, 9-устройство измерения коэффициента поглощения звука, 10- вычислительное устройство, 11 - датчик температуры, 12 -нормирующий усилитель, 13 -индикаторное устройство

В вычислительном устройстве по определенным в диссертации формулам по времени задержки импульса и коэффициенту затухания происходит вычисление скорости  $v$ , плотности  $\rho$  и вязкости жидкости  $\eta$ , что, позволяет определять массовый расход жидкости. Как направление развития данного метода предложено измерение параметров прошедшего через среду сигнала одновременно в различных точках акустического поля, что позволит повысить точность измерений и надежность устройства. Для реализации указанной идеи проведены исследования, позволяющие детально изучить физические процессы преобразования сигнала, определить различные алгоритмы измерений.

**Во второй главе** определены цели и задачи математического моделирования физических процессов, протекающих в контролируемой среде. Построена математическая модель распространения акустического импульса в жидких движущихся средах, связывающая контролируемые параметры с характеристиками акустического поля, созданного зондирующим сигналом.

На основе анализа акустического поля, получены уравнения, связывающие исследуемые параметры среды – скорость потока  $v$  (объемный расход  $G_V$ ), плотность  $\rho$  и вязкость  $\eta$  жидкости с параметрами сигнала, прошедшего на приемник: время распространения  $\Delta t$ , амплитуда (коэффициент затухания  $\alpha_A$ ) и форма (спектральный состав  $S(j\omega)$ ) прошедшего на приемник импульса. При анализе акустического поля принято допущение, что излучатель и приемник являются точечным и находятся на диаметрально противоположных образующих трубы, при этом рассматривается только максимальное направление

диаграммы направленности, а приемником фиксируется момент первого прихода импульса (рис.2).

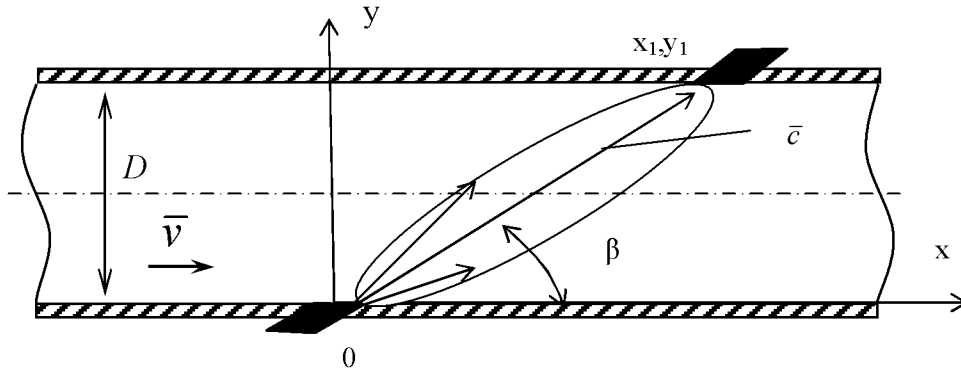


Рисунок 2. Иллюстрация к математической модели

Влияние диаграммы направленности излучателя в работе оценивается. Последующие отражения не фиксируются. Каждый последующий импульс посылается после того, как предыдущие акустические процессы затухнут. Это соответствует реальной процедуре измерений и позволяет ограничиться двумерным распределением акустического поля.

Показано, что если в какой-то, принятой за начало координат, точке движущейся со скоростью  $\vec{v} = \vec{i}v_x + \vec{j}v_y$  жидкости, создается одиночный на-

правленный зондирующий импульс  $\vec{p}(0,t) = \vec{i}p_x(0,t) + \vec{j}p_y(0,t)$ , (1)

с амплитудным спектром  $\vec{S}(0, j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{p}(0,t)e^{-j\omega t} dt = F[\vec{p}(0,t)]$  (2)

и скоростью распространения:

$$\vec{c} = \vec{i}c_x + \vec{j}c_y, \quad c_x = c \cdot \cos \beta, \quad c_y = c \cdot \sin \beta, \quad c = \sqrt{c_x^2 + c_y^2}, \quad (3)$$

то сигнал в произвольной точке  $\vec{r} = \vec{i}x + \vec{j}y$  созданного им акустического поля определяется по формуле:

$$\vec{p}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{p}(0, \xi) e^{j[\omega(t-\xi) - \vec{k}(\omega) \cdot \vec{r}]} d\xi d\omega, \quad (4)$$

$$\text{где, } \vec{k}(\omega) = \frac{\omega(\vec{c} + \vec{v})}{|\vec{c} + \vec{v}|^2} \left(1 - j \frac{2\omega\eta}{3\rho c^2}\right) = \vec{k}_1(\omega) + j\vec{k}_2(\omega) \quad (5)$$

волновой вектор,  $\vec{k}(\omega) \cdot \vec{r} = xk_x(\omega) + yk_y(\omega)$  - скалярное произведение векторов,  $c$  - фазовая скорость распространения звука в неподвижной среде, связанная с плотностью эмпирической зависимостью:  $c \approx K_c \rho$ , где  $K_c$  - коэффициент связи между плотностью и скоростью звука, который для диапазона плотностей  $\rho = 0,8 - 0,95$ , присущей большинству нефтепродуктов, равен  $K_c = 1654$ . В приведенных выражениях следует отличать  $j$ , как мнимую единицу комплексного числа и  $\vec{j}$ , как орт системы координат. В выражении (5) дейст-

вительная часть определяет скорость распространения сигнала, мнимая часть – коэффициент затухания и искажение формы импульса.

Показано, что искажение формы сигнала наблюдается только на частотах выше  $10^{10}$  Гц.

Комплексный амплитудный спектр сигнала в произвольных точках акустического поля, созданного зондирующим импульсом в контролируемой среде определяется с помощью прямого преобразования Фурье:

$$S(x, y, j\omega) = F[p(x, y, t)]. \quad (6)$$

Спектральная плотность является высокоинформативным параметром, содержащим в себе информацию о контролируемой среде. Формулы (1) – (6) в совокупности определяют обобщенную математическую модель, так как связывают между собой звуковое давление, создаваемое возбуждающим импульсом заданной направленности и формы в начале координат  $p(0,0,t)$  со звуковым давлением в каждой точке акустического поля контролируемой среды  $p(x,y,t)$ . Они определяют параметры импульса в пространстве и во времени и связывают между собой заявленные искомые величины – скорость потока  $v$ , плотность  $\rho$  и вязкость  $\eta$  среды с параметрами возбуждающего и прошедшего через среду импульсов.

На основе разработанной теории проведен расчет для импульса прямоугольной формы длительностью 10 мкс и того же импульса с заполненного частотой 2 МГц при конкретных геометрических размерах трубопровода. Результаты расчета представлены на рисунке 3.

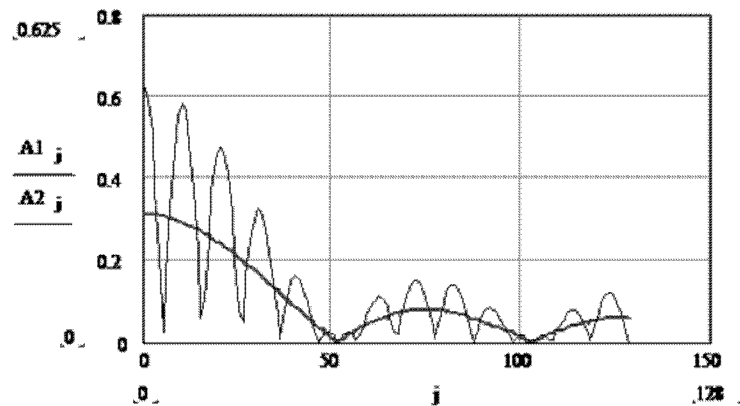


Рисунок 3. Спектры излученного и детектированного прямоугольных импульсов:  $A1$  – зондирующий импульс,  $A2$  – спектр группы излученного и детектированного.

Если рассматривать зондирующий и прошедший через среду импульс как общий сигнал с задержкой на время  $t_1$ , то в спектральной характеристике такого сигнала появляется частотная составляющая, пропорциональная времени пролета импульса между излучателем и приемником (рис. 3). Таким образом, в спектральной плотности прошедшего через среду импульса, рассмотренного совместно с зондирующим сигналом содержится информация о всех исследуемых характеристиках среды.

Исследованы акустические характеристики жидких углеводородных сред, которые позволили впервые получить формулы взаимосвязи коэффициента



акустического затухания  $\alpha_A$  и плотности среды  $\rho$ , в частности для широкого спектра нефтепродуктов от бензинов до мазутов получено:

$$\alpha_A = 0.403 \cdot 10^{-3} C_\eta \frac{\omega^2 ((0,3684 \rho + \sqrt{0,1358 \rho^2 + 0,2948 \rho + 1})^2 - 1)}{\rho^5 ((0,3684 \rho + \sqrt{0,1358 \rho^2 + 0,2948 \rho + 1})^2 + 2)} \quad (7)$$

где  $C_\eta$  - коэффициент, для разных топлив определяемый экспериментально.

На основе разработанной математической модели предложены следующие методы измерений.

*Время-импульсный способ измерения с контролем затухания и использованием формы прошедшего через среду импульса.* Данный способ является развитием известного метода, основанного на последовательной фиксации времени прохождения акустическим импульсом известного расстояния с составляющей вектора скорости звука по потоку и против потока жидкости. Сущность развития заключается в том, что при формировании одиночного направленного возбуждающего импульса  $P_1(t)$  по направлению и против направления потока, акустическое давление  $P_2(t)$  в точке с координатами  $(x, y)$  расположенной на диаметрально противоположной поверхности трубы, определяется по формуле, впервые полученной автором на основе выше изложенной теории:

$$P_2(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S_1(\omega) e^{-\alpha_A} e^{i\omega t} d\omega = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S_1(\omega) e^{-\frac{2\eta\omega^2 \sqrt{x^2+y^2}}{3\rho c^2 c-v\cos\alpha}} e^{i\omega t} d\omega, \quad (8)$$

где  $S_1(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} P_1(t) e^{-i\omega t} dt$ ,  $\beta$  - угол между линией, соединяющей центры датчиков и осью трубы.

Новизна этой формулы заключается в том, что она позволяет определить не только время прихода импульса в точку с заданной координатой, но и позволяет вычислить форму прошедшего через среду сигнала. Знание формы принятого импульса позволяет более точно измерять время его пролета между излучателем и приемником. В известных методах фактом прихода импульса считается момент достижения его амплитуды определенного уровня, задаваемым компаратором. Это справедливо если амплитуда и форма посланного и принимаемого импульсов одинакова. В предложенном методе впервые в задачах измерения скорости течения жидкости для измерения времени пролета импульса использовано понятие «задержки сигнала по Гильберту», под которой понимают положение максимума функции задержки, определяемой из спектральной плотности сигнала по следующему алгоритму:

1. При помощи преобразования Гильберта находится фазовый спектр минимально-фазовой части сигнала в точке  $(x, y)$ :

$$\varphi(x, y, \omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln |S_p(x, y, \theta)|}{\omega - \theta} d\theta \quad (9)$$

2. Находится спектр минимально-фазовой части сигнала:

$$S_{MIN}(x, y, j\omega) = |S_p(x, y, \omega)| [\cos \varphi(\omega) + j \sin \varphi(\omega)] \quad (10)$$

3. Находится спектр максимально-фазовой части сигнала:

$$M(x, y, j\omega) = \frac{S_p(x, y, j\omega)}{S_{MIN}(x, y, j\omega)} . \quad (11)$$

4. С помощью обратного преобразования Фурье определяется функция задержки:  $m(t) = F^{-1}[M(x, y, j\omega)]$ . (12)

5. Определяется время  $t_m$ , при котором функция задержки максимальна, что и определяет время пролета акустического импульса между излучателем и приемником:  $\Delta t = t_m$ .

После детектирования импульсов, прошедших по потоку и против него вычисление искомым параметров происходит по формулам

$$v = \frac{c^{-l}/t_1}{\cos\alpha} = \frac{(x_1^2 + y_1^2)(t_1 - t_2)}{2y_1 t_1 t_2} \quad (13)$$

$$\rho = \frac{K_\beta}{c^2} = \frac{4t_1^2 t_2^2 K_\beta}{(x_1^2 + y_1^2)(t_1 + t_2)^2} , \quad (14)$$

$$\eta = \frac{3\rho^2 c^3 \alpha_A}{2\omega_0^2} = -\frac{3K_\beta^2}{2c^2 \omega_0^2 t_1} \ln \frac{P_1}{P_2} = -\frac{6t_1 t_2^2 K_\beta^2}{\omega_0^2} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (15)$$

где  $K_\beta$  - коэффициент, определяемый в процессе калибровки,  $t_1, t_2$  - время пролета сигнала по потоку и против него, определяемые по алгоритму, описываемому формулами (9) – (12).

Метод, основанный на калибровке состоит в том, что зависимости  $v = f_1(\Delta t, \alpha)$ ,  $\rho = f_3(\Delta t, \alpha)$ , определяются экспериментально при определенной температуре  $\theta_0$ , путем пропускания через датчик устройства эталонных жидкостей с известной плотностью  $\rho_i$  с разными фиксированными скоростями  $v_k$  и измеряются соответствующие им время пролета импульса и коэффициент затухания ( $\Delta t_{k,i}$  и  $\alpha_{k,i}$ ). Составляется таблица соответствия параметров скорости и плотности жидкости  $(v_k, \rho_i) \rightarrow (\Delta t_{k,i}, \alpha_{k,i})$ , которая запоминается в ПЗУ контроллера.

Если в процессе измерений получаются какие-то конкретные значения  $(\Delta t_x, \alpha_x)$ , то контроллер отыскивает в своей памяти ближайшие к этим параметрам значения  $(V_k, \rho_i)$  и относительно этих значений вычисляет искомые параметры по формулам:

$$v_x = V_k + \frac{V_{k+1} - V_k}{\Delta t_k - \Delta t_{k+1}} (\Delta t_k - \Delta t_x), \quad \rho_x = \rho_i + \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\alpha_i - \alpha_{i+1}} (\alpha_i - \alpha_x), \quad \eta_x = \frac{3\alpha_x \rho_x c^2}{2\omega^2}. \quad (16)$$

Если измерения происходят при температурах, отличных от температуры калибровки, то значения плотности и вязкости корректируются. Рассмотренные методы и алгоритмы позволяют расширить функциональные возможности устройств по сравнению с существующими аналогами.

**В третьей главе** рассмотрены метрологические характеристики ППК, основные и дополнительные погрешности. Проведен метрологический анализ формул (13), (14) и (15).

Абсолютная погрешность измерений скорости потока определяются как сумма частных производных по параметрам, выраженная в конечных приращениях:

$$\Delta v = \sqrt{\left(\frac{\Delta y(t_2-t_1)}{t_1 t_2}\right)^2 \left(1 - \frac{(x_1^2+y_1^2)}{2y_1^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_1(x_1^2+y_1^2)}{2y_1 t_1 t_2}\right)^2 \left(1 + \frac{(t_2-t_1)}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_2(x_1^2+y_1^2)}{2y_1 t_1 t_2}\right)^2 \left(1 - \frac{(t_2-t_1)}{t_2}\right)^2} \quad (17)$$

Таким образом, основная погрешность расходомера определяется погрешностью фиксации разности времени прохождения ультразвуковых импульсов по потоку и против потока. Абсолютная погрешность измерений плотности  $\Delta\rho$  определится как сумма частных производных по параметрам, выраженная в конечных приращениях:

$$\Delta\rho = \frac{4t_1 t_2 K_\beta}{(x_1^2+y_1^2)(t_2+t_1)} \sqrt{\frac{8\Delta y_1^2 t_1^2 t_2^2 y_1^2}{(x_1^2+y_1^2)^2 (t_2+t_1)^2} + \Delta t_1^2 t_1^2 \left(1 - \frac{t_2}{(t_2+t_1)}\right)^2 + \Delta t_2^2 t_2^2 \left(1 - \frac{t_1}{(t_2+t_1)}\right)^2} \quad (18)$$

Абсолютная погрешность измерений вязкости  $\Delta\eta$  определится как сумма частных производных по параметрам, выраженная в конечных приращениях:

$$\Delta\eta = \frac{6K_\beta^2 t_1^2 t_2^2}{\omega_0^2} \sqrt{\frac{\Delta P_2^2 t_2^2}{P_2^2} + \frac{4\Delta\omega_0^2}{\omega_0^2} t_2^2 \ln^2 \frac{P_1}{P_2} + 4\Delta t_2^2 \ln^2 \frac{P_1}{P_2} + \Delta t_1^2 t_2^2 \ln^2 \frac{P_1}{P_2}} \quad (19)$$

На рисунке 4 приведена зависимость относительной погрешности измерения вязкости от погрешностей измерения времени прохождения импульса сквозь исследуемую среду и его амплитуды.

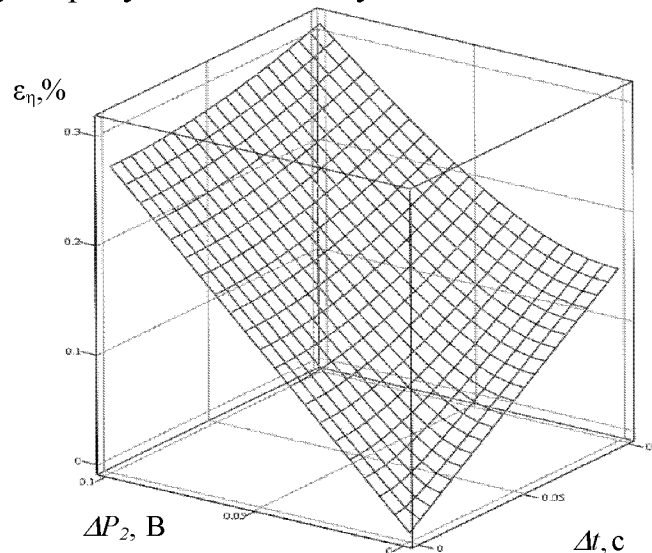


Рисунок 4. Зависимость относительной погрешности измерения вязкости от погрешностей измерения времени прохождения импульса сквозь исследуемую среду и его амплитуды

Сформулированы требования к электронной схеме обработки по точности измерения временных интервалов и коэффициента затухания ультразвука. Для обеспечения относительных погрешностей измерения вязкости  $\delta\eta = 0.5\%$ , плотности  $\delta\rho = \pm 0.5\%$  и скорости  $\delta v = \pm 0.1\%$ , достаточно фиксировать время прохождения импульса сквозь жидкость с точностью до 0.1 мкс, а его амплитуду – с точностью 0.1 В, что при современном уровне развития микроэлектроники не вызывает затруднений.

Рассмотрены основные источники дополнительных погрешностей ППК: влияние температуры; изменение скорости ультразвука в измеряемом веществе.

ве; паразитные акустические сигналы; асимметрия электронно-акустических каналов; погрешности, вносимые электронной схемой.

Исследования влияния температуры на результаты измерения проводились экспериментально на стенде. В неподвижной среде проводились измерения времени пролета импульсом фиксированного расстояния и коэффициент затухания в зависимости от температуры. Получены следующие зависимости скорости звука и коэффициента поглощения от температуры:

$$V_{\theta} = V_{20} - k_V(\theta - 20), \quad \alpha_A^{\theta} = \alpha_A^{20} - k_{\alpha}(\theta - 20), \quad (20)$$

где  $V_{20}$ ,  $\alpha_A^{20}$  - скорость звука и коэффициент затухания при температуре  $\theta=20^{\circ}\text{C}$ .;  $k_V, k_{\alpha}$  - соответствующие температурные коэффициенты, которые для жидкостей с плотностью  $\rho = 0,65 - 1,0$  соответственно равны  $k_V = 4,35$ ,  $k_{\alpha} = 0,038$ . Эти данные позволяют скорректировать алгоритм измерения по методу с калибровкой следующим образом. Измеренные значения коэффициента затухания  $\alpha_x$  и времени пролета импульсом контролируемой среды  $\Delta t_x$  приводятся к температуре калибровки  $\theta_0$  по формулам:

$$\alpha_x = \alpha_x^{\theta} + k_{\alpha}(\theta - \theta_0), \quad \Delta t_x = \Delta t_x^{\theta} \left[ 1 + \frac{k_V(\theta - \theta_0)}{V_{20}} \right] \quad (21)$$

После приведения к температуре калибровки искомые параметры определяются по формулам (16). Если необходимо знать значения плотности и вязкости при текущих температурах, то они пересчитываются по известным формулам температурного дрейфа.

Применение разработанных автором алгоритмов измерения параметров распространения ультразвуковых импульсов позволяет достичь на практике следующих значений относительной погрешности измерений: массовый расход  $\pm 0,15\%$ , Плотность  $\pm 0,55\%$ , динамическая вязкость  $\pm 1,7\%$ .

**В четвертой главе** рассмотрены особенности построения ППК, в частности конструктивно-технологические и схемотехнические вопросы, сформулированы требования и обоснован выбор элементной базы. Кроме достижения заданных метрологических параметров, решалась задача обеспечения необходимых сервисных функций. Сделан обзор пьезоэлектрических преобразователей, индикаторам, электронным компонентам схемы, в том числе однокристалльным микро-ЭВМ.

В качестве микроконтроллера был выбран 8-разрядный микроконтроллер Atmel ATmega 8535-16JL, обладающий следующими характеристиками: 8 Кб ЭСПЗУ; 512 байт ОЗУ; 512 байт EEPROM; тактовая частота 16 МГц; 32 программируемые линии ввода-вывода, 8-ми канальный 10-ти разрядный АЦП, один 16-ти разрядный и два 8-ми разрядных счетчика.

Подробно рассмотрены структурная, функциональная и принципиальная схема ППК. Выполнены расчеты всех элементов принципиальной схемы.

Описаны методы калибровки разработанного ППК. Приведен алгоритм работы микроконтроллера, пояснены особенности кода программы.

**В пятой главе** приведено описание экспериментальных исследований и практического использования созданной установки, а также устройства контроля вязкости, плотности и расхода нефтепродуктов.

Для проведения экспериментальных исследований была создан испытательный стенд (рис.5), позволяющий контролировать формы излученного и принятого ультразвуковых импульсов, а так же измерять вязкость, плотность и расход нефтепродуктов образцовыми приборами.

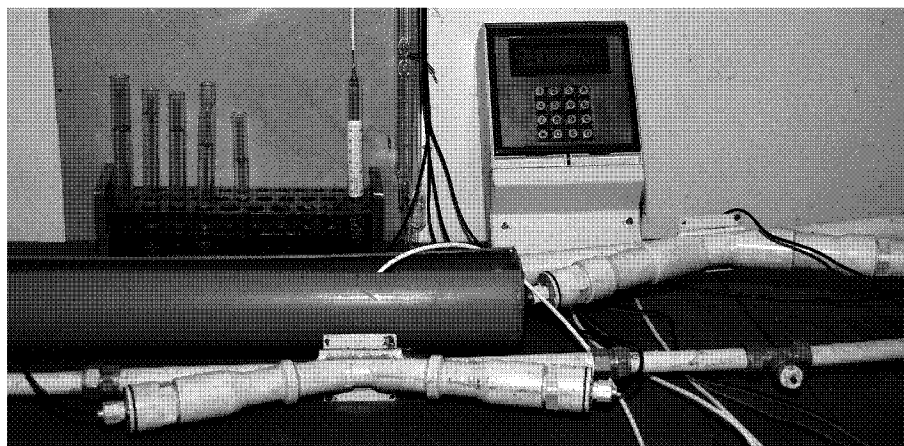


Рисунок 5. Стенд для испытаний акустических и электрофизических характеристик углеводородных топлив

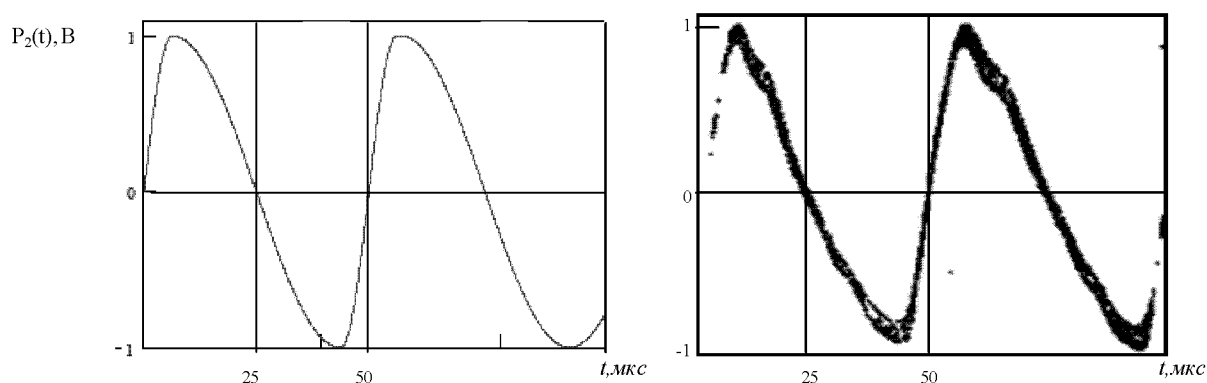


Рисунок 7. Форма прошедшего через керосин импульса на расстояние 10 см, полученная: а) расчетным способом; б) экспериментально.

Экспериментально были исследованы: зависимость уровня принятого сигнала от расстояния между датчиками, влияние вязкости и плотности жидкости на форму принятого сигнала, влияние диаграммы направленности излучающего датчика на уровень принятого сигнала, резонансные характеристики датчиков, зависимость контролируемых параметров от температуры. Были проведены измерения плотности и вязкости бензина, октана, толуола, керосина, бензола, которые подтвердили корректность основных теоретических положений работы.

Разработанный ППК применялся для контроля вязкости, плотности и расхода мазута при его сжигании в котле. Были сняты зависимости указанных показателей качества от температуры нагрева мазута различных марок.

ППК обладает следующими характеристиками:

Температура жидкости, °С.....	+5...+150
Динамический диапазон измерения скорости .....	1:150
Вязкость жидкости, сСт.....	200...500
Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup> .....	600...1500
Длина прямого участка, D .....	10
Относительные погрешности измерений:	
скорость (расход) .....	±0,15%
плотность .....	±0,55%
динамическая вязкость .....	±1,7%

ППК обладает следующими сервисными функциями: ведение архивов измеряемых параметров в энергонезависимой памяти, суммирование результатов, возможность передачи данных по интерфейсу RS-485.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель распространения акустического импульса в жидких движущихся средах, основанная на уравнениях распространения ультразвуковой волны в жидкости с диссипацией, и связывающая контролируемые параметры с характеристиками акустического поля, созданного зондирующим сигналом.

2. Предложены два метода контроля вязкости, плотности и скорости движения нефтепродуктов в трубопроводе: время-импульсный метод с контролем коэффициента поглощения и метод, основанный на калибровке. Новизна данных методов заключается в том, что по сравнению с известными методами, достаточно использование всего одного измерительного канала вместо трех.

3. Получены формулы, связывающие коэффициент акустического затухания сигнала в движущейся жидкости с ее плотностью. Формулы имеют погрешность 1% для авиационных и дизельных топлив и 5% для широкого спектра нефтепродуктов.

4. Основные погрешности измерения вязкости определяются суммарной погрешностью измерения временного интервала между посылкой и детектированием импульса по потоку и против него, погрешностью измерения уровня принятого импульса. Дополнительные погрешности ППК определяются такими факторами, как температура исследуемой жидкости, паразитные акустические сигналы; асимметрия электронно-акустических каналов. Предложенные методы компенсации погрешностей позволили разработать ППК, осуществляющий измерение вязкости в диапазоне 200...500 сСт с погрешностью ±1,7%, плотности в диапазоне 600...1500 кг/м<sup>3</sup> с погрешностью ±0,55% и скорости в диапазоне 0,1...15 м/с с погрешностью ±0,15% движущихся в трубопроводе нефтепродуктов.

**Основное содержание диссертации опубликовано в изданиях, рекомендованных ВАК :**

1. Паршин В.М., Скворцов Б.В. Теоретические основы электронно-акустических методов измерения вязкости нефтепродуктов // «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» №2, 2009 г.

2. Паршин В.М. Математические основы распространения акустических сигналов в движущихся жидкостях // «Естественные и технические науки», №6, Москва, 2008г.

**В других изданиях:**

3. Паршин В.М., Скворцов Б.В. // Проблемы использования микропроцессорных теплосчетчиков с погружными расходомерами – «Сборник трудов студентов и аспирантов РТФ СГАУ, выпуск 10», Самара – 2006г.

4. Паршин В.М., Царев Р.А. Ультразвуковой метод измерения расхода и показателей качества нефтепродуктов // «Сборник трудов студентов и аспирантов РТФ СГАУ, выпуск 11», Самара – 2007г.

5. Паршин В.М., Скворцов Б.В. Опыт применения электронно-акустических устройств измерения вязкости, плотности и расхода мазута на ТЭЦ // Информационные, измерительные и управляющие системы. Научно-технический сборник Самарского отделения Поволжского центра Метрологической академии России / Под ред. проф. В.Н. Нестерова. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2009. Вып. 4.

6. Паршин В.М. Комплексный метод поточного измерения расхода и показателей качества нефтепродуктов // Сборник конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – Самара, 2006.

7. Паршин В.М. Комплексный метод поточного измерения расхода, плотности и вязкости нефтепродуктов // Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ-2007»: материалы Всероссийской научной конференции 18-20 апреля 2007г. – Астрахань, 2007 – с. 47-50.

8. Паршин В.М., Максимов А.Г. Повышение точности электронно-акустических устройств измерения расхода нефтепродуктов. // Сборник конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – Самара, 2007.

9. Патент на полезную модель №56597 / Устройство измерения расхода и показателей качества нефтепродуктов // Паршин В.М., Скворцов Б.В.

10. Патент на полезную модель №66029 / Комплексное устройство измерения расхода, плотности и вязкости нефтепродуктов // Паршин В.М., Скворцов Б.В.

11. Патент на полезную модель №66030 / Устройство измерения расхода, плотности и вязкости нефтепродуктов // Паршин В.М., Скворцов Б.В.

Подписано в печать 21.05.2010. Тираж 100 экз.  
Отпеч. с готового оригинал-макета  
Типография СГАУ, г. Самара, Московское шоссе 34