

*На правах рукописи*

**Зацерклянный Олег Владимирович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА  
ПРЕЦИЗИОННОГО ПЛОТНОМЕРА  
ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ НА ОСНОВЕ КАМЕРТОННОГО  
ВИБРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Специальность: 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления

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

Новочеркасск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
**Панич Анатолий Евгеньевич,**

Официальные оппоненты:

**Гулин Артур Игоревич,**  
доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология»

**Пахомов Илья Викторович,**  
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», доцент кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия»

Ведущая организация:

АО «Научно-исследовательский институт физических измерений»

Защита состоится 23 декабря 2021 г. в 10:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.064.02, на базе Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова и Южного федерального университета по адресу: 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, ауд. 149 главного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» <http://www/npi-tu.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. тех. наук, профессор

**Иванченко Александр Николаевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Измерение плотности жидкостей и газов проводится в том или ином виде практически во всех областях хозяйственной деятельности. Для этих целей применяются как лабораторные средства измерений, так и приборы, устанавливаемые непосредственно в производственных линиях и являющиеся частью систем автоматизации и управления технологическими процессами – промышленные плотномеры. Наиболее актуальным направлением в развитии промышленных плотномеров можно считать добычу, транспортировку и переработку нефти и газа. В этой области предъявляются жёсткие требования к точности и стабильности измерений в расширенном диапазоне температур, давлений и вязкостей, начиная от измерения плотности скважинных флюидов при давлении до 120 МПа и заканчивая производством нефтепродуктов при критически высоких температурах до 400 °С. Так как учёт нефти и нефтепродуктов ведётся в единицах массы, то согласно ГОСТ 8.589-2007 погрешность измерения плотности не должна превышать  $\pm 0,36 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует относительной погрешности не более  $\pm 0,055 \%$ . Из существующих промышленных плотномеров подобная точность достигнута только в устройствах, основанных на использовании механических систем со стабильными частотными характеристиками. Вибрационные плотномеры обладают высокими эксплуатационными и метрологическими характеристиками, а также не требуют определения компонентного состава жидкости и газа.

Несмотря на большое разнообразие предложенных схем и конструкций вибрационных промышленных плотномеров в России производится лишь два их вида, это Плот-3 (ЗАО «Авиатех», г. Арзамас) и плотномер 804 (ООО «Пьезоэлектрик», г. Ростов-на-Дону). Плотномер 804 обладает относительно невысокой погрешностью, а Плот-3 применяется только для незагрязнённых, неагрессивных жидкостей. Поэтому существует необходимость в разработке и производстве новых отечественных промышленных средств автоматического измерения плотности, отвечающих современным требованиям.

Одним из основных направлений совершенствования прецизионных промышленных плотномеров является создание новых вибрационных преобразователей плотности (ВПП) с высокой чувствительностью к измеряемому параметру и стабильностью в широком диапазоне температур и другого внешнего воздействия. При этом наиболее важной научно-технической задачей, требующей решения, является снижение влияния неизмеряемых параметров среды на результат измерений плотности. Её решение связано с разработкой новых моделей вибропреобразователей, совершенствованием систем возбуждения и измерения параметров колебаний на основе пьезопреобразователей из различных пьезокерамических материалов (ПКМ), а также разработкой новых систем и алгоритмов компенсации влияния температуры, вязкости, давления, скорости потока и других параметров измеряемой среды.

**Степень разработанности темы.** Теоретические и практические положения, касающиеся разработки пьезодатчиков и вторичных преобразователей информативных параметров, изложены в трудах советских и российских учёных: В.М. Шляндина, Е.А. Ломтева, Е.П. Осадчего, М.В. Богуща, В.А. Волкова, Р.Г. Джагупова, Б.В. Малова, Е.А. Мокрова, А.Е. Панича, П.П. Чуракова, зарубежных учёных: А.А. Вайвза, У. Кэди, У. Мэзона, К. Стейнем, А. Яншофа, Б. Яффе, Г. Яффе и др.

В области частотных преобразователей плотности наиболее заметными являются работы Ю.П. Жукова, в которых предлагается вариант теоретического обоснования и применения вибрационных преобразователей для контроля плотности жидкостей. Проведённый в ходе исследований анализ показал, что в литературе практически отсутствует метрологический анализ ВПП, недостаточно исследованы их статические и динамические характеристики при воздействии различных внешних факторов в условиях промышленной эксплуатации.

**Объектом исследования** являются промышленные измерители плотности жидкостей и газов, эксплуатируемые в составе систем автоматики и управления.

**Предметом исследования** являются прецизионные погружные вибрационные плотномеры жидкостей и газов.

**Цель исследования.** Теоретическое и экспериментальное исследование вибрационного преобразователя плотности и разработка на его основе промышленного плотномера для непре-

ровного автоматического прецизионного измерения плотности жидкостей и газов в расширенном диапазоне вязкостей и температур.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Анализ существующих систем возбуждения ВПП и параметров применяемых пьезообразователей для выработки требований к разработке эффективных плотномеров с расширенными техническими характеристиками.

2. Разработка модели ВПП в системе конечно-элементного анализа *ANSYS* для выбора оптимальных решений при реализации плотномера с требуемыми характеристиками.

3. Исследование характеристик ВПП при использовании различных ПКМ для обеспечения максимальной эффективности актюаторов и датчиков вибрации в средах с высокой вязкостью, а также обеспечения максимально возможного для существующих ПКМ температурного диапазона измерений плотности.

4. Исследование влияния температуры и вязкости измеряемой среды на характеристики ВПП и разработка алгоритмов автоматической компенсации дополнительных погрешностей измерения определяемых этим влиянием.

5. Исследование метрологических характеристик ВПП в различных измеряемых средах и условиях эксплуатации, в том числе чистых газах и жидкостях, а также нефти и нефтепродуктах в условиях лаборатории и при добыче, хранении, переработке и транспортировке.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы математического и численного моделирования, конечно-элементного анализа, методы приближения функций, методы теории электрических цепей, методы обработки электрических сигналов, теории погрешностей, теории колебательных процессов, численные методы компьютерного моделирования. При описании моделей использовались основные законы термодинамики, теории теплопроводности и теории электротехники. Моделирование осуществлялось в системе конечно-элементного анализа *ANSYS*.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается результатами математического анализа, компьютерным моделированием, публикациями, патентом, апробацией работы на международных и всероссийских научно-технических конференциях, а также экспериментальными исследованиями в лабораториях и на промышленных объектах.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

1. Разработана и экспериментально подтверждена модель ВПП в системе конечно-элементного анализа *ANSYS*, позволившая выявить конструктивные элементы ВПП, оказывающие критическое влияние на погрешность измерения, и выработать решения для достижения требуемых параметров точности.

2. Разработан метод калибровки вибрационного плотномера, отличающийся тем, что вместо трёх жидкостей с известной плотностью применяются две среды с известной плотностью, одной из которых может быть воздух, а другой любая жидкость. В основе метода лежит представление зависимости плотности измеряемой среды от периода колебаний камертонных ВПП полиномом второй степени с нулевым линейным членом.

3. Разработан алгоритм автоматической компенсации влияния температуры среды на погрешность измерения плотности отличающийся тем, что в качестве термокомпенсируемого параметра принимается период колебаний ВПП и калибровка влияния температуры производится в вакууме до калибровки плотномера по плотности.

4. Разработан алгоритм автоматической компенсации влияния вязкости среды на погрешность измерения плотности погружного вибрационного плотномера, позволивший увеличить максимальный предел вязкости сред, доступных для измерения до 1000 сПз.

5. Исследованы характеристики ВПП при использовании различных ПКМ, что позволило выявить современные ПКМ, обеспечивающие максимальную чувствительность актюаторов и датчиков вибрации для измерения плотности вязких жидкостей, а также обеспечить максимально возможный температурный диапазон измерений плотности. Создан ВПП с рабочей температурой 400 °С из ПКМ на основе твердых растворов висмутсодержащих соединений.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Разработана и экспериментально подтверждена модель ВПП в системе конечно-элементного анализа *ANSYS*, которая позволяет выбирать необходимые решения при проектировании погружного вибрационного плотномера с требуемыми характеристиками.

2. Выявлены конструктивные элементы ВПП, оказывающие критическое влияние на погрешность измерения погружного плотномера и выработаны решения по снижению этого влияния. Решения подтверждены патентом РФ на полезную модель.

3. Предложен метод калибровки вибрационного плотномера по двум средам с известной плотностью, который позволяет снизить трудоёмкость калибровки в заводских условиях и проводить определение коэффициентов преобразования периода колебаний в значение плотности непосредственно на месте эксплуатации;

4. Разработанные алгоритмы компенсации влияния неинформативных параметров контролируемой среды (температуры и вязкости) и применение новых ПКМ позволили снизить погрешность измерений в два раза в диапазоне температур от минус 70 до 85 °С и увеличить верхнюю границу диапазона температур измеряемых сред с 280 °С до 400 °С. При этом увеличен максимальный предел вязкости сред доступных для измерения плотномером до 1000 сПз.

5. Основные результаты и выводы диссертационного исследования использованы при разработке серийных образцов вибрационных плотномеров нефти и других жидкостей.

Создан отечественный плотномер на уровне лучших зарубежных образцов, который прошёл испытания на утверждение типа во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» и получил требуемые сертификаты на применение в жёстких условиях промышленной эксплуатации.

### **На защиту выносятся:**

1. Модель ВПП в системе конечно-элементного анализа *ANSYS*, позволившая выявить конструктивные элементы ВПП, оказывающие критическое влияние на погрешность измерения и выработанные решения для достижения требуемых параметров точности.

2. Метод калибровки вибрационного плотномера, отличающийся тем, что вместо трёх жидкостей с известной плотностью применяются две среды с известной плотностью, одной из которых может быть воздух, а другой любая жидкость с известной плотностью.

3. Алгоритм автоматической компенсации влияния температуры среды на погрешность измерения плотности погружного вибрационного плотномера, отличающийся тем, что в качестве термокомпенсируемого параметра принимается период колебаний ВПП, а калибровка влияния температуры производится в вакууме до калибровки плотномера по плотности.

4. Алгоритм автоматической компенсации влияния вязкости среды на погрешность измерения плотности погружного вибрационного плотномера, позволивший увеличить максимальный предел вязкости сред доступных для измерения до 1000 сПз.

5. Результаты исследования характеристик ВПП при использовании различных ПКМ, позволившие выявить современные ПКМ, обеспечивающие максимальную чувствительность актюаторов и датчиков вибрации для измерения плотности вязких жидкостей, а также обеспечить максимально возможный температурный диапазон измерений плотности.

### **Апробация работы**

1. Международная научно-практическая конференция «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий». – 1 – 10 октября 2011 г. Россия, г. Сочи.

2. Всероссийская научно-технической конференции «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения» – 10 – 15 сентября 2012 г. Россия, г. Ростов-на-Дону.

3. Международная молодёжная научная конференция «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения» – 23 – 27 сентября 2013 г. Россия, г. Анапа.

4. XVII-я Всероссийская научно-техническая конференция «Метрологическое обеспечение учёта энергетических ресурсов» // ФГУП «ВНИИМС». – 31 мая – 5 июня 2015 г. Россия, г. Сочи.

5. Третий всесоюзный конгресс по сенсорному приборостроению «Сенсорное слияние-2021» - 27-28 мая 2021 г. Россия, г. Санкт-Петербург, Кронштадт.

### Использование результатов исследования

1. Разработан преобразователь плотности и вязкости ППВ-6,3.У1-В, не уступающий по техническому уровню зарубежным аналогам. Преобразователь прошёл испытания на утверждение типа во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», получил требуемые сертификаты на применение в жёстких условиях промышленной эксплуатации и допущен к применению на объектах ПАО «Транснефть».

2. Разработанные алгоритмы, методы и решения используются при производстве и эксплуатации вибрационного плотномера 804 (ООО «Пьезоэлектрик», г. Ростов-на-Дону).

3. Разработан массовый расходомер жидкости ЭРМАСС.НТ, включающий расходомер ЭРВИП.НТ и прецизионный вибрационный плотномер жидкости. Расходомер прошёл испытания и успешно применяется в системах учёта нефти на месторождениях АО «Самотлорнефтегаз», ОАО «Ульяновскнефть» и ООО «Иркутская Нефтяная Компания».

4. Разработанные алгоритмы, метод и модель использованы при проектировании опытных образцов датчиков плотности, входящих в состав системы управления и индикации топлива для семейства самолётов SSJ-NEW (Филиал «Региональные самолёты» ПАО «Корпорация «Иркут») и МС-21 (ПАО «Корпорация «Иркут»).

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 10 работ, 5 из которых в журналах из перечня ВАК, получен 1 патент РФ на полезную модель.

**Область исследования.** Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления:

П.2. Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик.

П.4. Разработка научных подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих надёжность, контроль и диагностику функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 142 наименования и 5 приложений. Основная часть работы изложена на 145 листах машинописного текста. Работа содержит 55 рисунков и 22 таблицы.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована практическая и научная актуальности диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, теоретическая и практическая значимость, а также научная новизна работы.

В **первой главе** даётся обзор существующих конструкций первичных преобразователей промышленных вибрационных плотномеров жидкостей и газов, применяемых в системах автоматизации и управления, приведена их классификация.

Частота колебаний механического резонатора зависит от массы колеблющихся частей и их жёсткости. При изменении плотности среды, окружающей резонатор, происходит изменение частоты его колебаний, так как при этом изменяется присоединённая масса колеблющихся частей. Поэтому в вибрационных плотномерах плотность жидкости или газа определяется по резонансной частоте вибропреобразователя, взаимодействующего с измеряемой средой.

В таблице 1 представлены характеристики наиболее применяемых вибрационных плотномеров производства ведущих стран мира. Наилучшие показатели погрешности измерений наблюдаются у проточных плотномеров на основе трубчатых ВПП, в то же время, наибольшая универсальность и широта температурного диапазона наблюдаются у погружных ВПП камертонного типа.

Анализ существующих ВПП позволил определить основные векторы развития, заключающиеся в совершенствовании как самого ВПП, так и системы возбуждения колебаний с целью повышения чувствительности к плотности среды, добротности, помехоустойчивости, автоматической компенсации дополнительных погрешностей.

Таблица 1 – Характеристики вибрационных плотномеров

Производитель	Изм. элемент	Диап. показаний, кг/м <sup>3</sup>	Диапазон измерений, кг/м <sup>3</sup>	Погреш-ть, кг/м <sup>3</sup>	Темпер. диапазон, °С	Макс. давление, МПа
Thermo M. Ltd. (США)	Двойная трубка	0÷3000	0,01÷1800	±0,01 (газы) ±0,2; ±0,3	минус 50 ÷ 110	7,2
MobreyLTD. (Англия)	Трубка	0÷3000	300÷1100	±0,15 (жидкости)	минус 50 ÷ 110	15
CDM Micro Motion Inc., (США)	Две U-образных трубки	0÷3000	300÷1300	±0,1 (жидкости)	минус 50 ÷ 204	15
MobreyLTD (Англия)	Камертон	0÷3000	600÷1250	±1,0	минус 50 ÷ 200	20,7
LiquiphantMD density (Г.)	Камертон	450÷2000	450÷2000	±2,0	минус 50 ÷ 70	2,5
Плот-3 (Россия)	Цилиндр	420÷1600	420÷1600	±0,3	минус 60 ÷ 150	6,3
804 (Россия)	Камертон	0÷2000	0÷160 620÷1630	±0,5; ±1,0	минус 70 ÷ 80	16

Малая погрешность метода (до  $\pm 0,1$  кг/м<sup>3</sup>), индифферентность к типу и составу измеряемой среды, широкий диапазон температур и давлений, отсутствие движущихся частей, а также лёгкая автоматизация процесса измерений и встраиваемость в техпроцесс определяют перспективность разработки плотномеров жидкостей и газов на основе ВПП в виде камертона.

Во **второй главе** рассматривается система возбуждения колебаний ВПП и измерения их параметров, таких как амплитуда, частота и фаза. Выбор системы возбуждения определяется особенностями преобразователя и требованиями к параметрам плотномера в целом.

Механизм возбуждения колебаний ВПП можно представить как пьезоактюатор с предварительным механическим напряжением переменной жёсткостью и массой камертона. Важной особенностью пьезоактюаторов является обратимость и возможность создания датчика перемещения мембраны на основе части пьезоэлементов актюатора. Такие датчики обладают высокой чувствительностью к измеряемому параметру, широким диапазоном рабочих температур и давлений.

Анализ основных электрофизических параметров ПКМ позволяет сделать однозначный вывод о том, что повышение их рабочей температуры неизбежно связано со снижением пьезоактивности и диэлектрической проницаемости. Это означает потерю амплитуды перемещения, динамической силы актюатора и сигнала обратной связи вибродатчика. Поэтому в работе проведён подбор и разделение ПКМ, исходя из температурных диапазонов эксплуатации. По температуре рабочей среды наблюдаемые потребности можно разделить на пять диапазонов:

- 1) минус 196 ÷ 70 °С – экстремально низкие температуры. Измерение плотности сжиженных газов (например, СПГ);
- 2) минус 70 ÷ 85 °С – промышленный диапазон температур с учётом северных территорий;
- 3) минус 40 ÷ 150 °С – повышенные температуры в техпроцессах атомной энергетики и нефтяных скважинах;
- 4) 20 ÷ 260 °С – повышенные температуры в техпроцессе химических производств;
- 5) 1 ÷ 400 °С и выше – экстремально высокие температуры в химической промышленности и авиакосмической технике.

В первом и втором температурном диапазоне основным ориентиром для выбора материала актюатора является пьезомодуль, в нашем случае это  $d_{33}$ :

$$\Delta l = N \cdot d_{33} E \cdot l, \quad (1)$$

где  $\Delta l$  – удлинение, м;  $N$  – количество активных слоёв в актюаторе;  $E$  – напряженность электрического поля, В;  $l$  – длина пьезоактюатора, м.

Исходя из близости технологических возможностей при изготовлении пьезоэлементов из существующих ПКМ, основной выигрыш можно получить выбором материала с максимальным пьезомодулем  $d_{33}$ . Для температурного диапазона до 85 °С можно рекомендовать материал ЦТС-ЦННФ. Он также имеет максимальное значение энергетического показателя

$$K_w = d_{33}^2 / \epsilon_{33}, \quad (2)$$

поэтому подходит и для чувствительных элементов датчиков обратной связи при регистрации электрического заряда на выходе. При регистрации электрического напряжения наилучшим вариантом можно считать ПКМ ЦТС-19П и ЦТС-36; они также имеют высокий показатель  $K_w$ .

Для температурного диапазона до 150 °С наилучшими материалами для актюаторов можно признать ЦТС-19М, ЦТС-19М1. Эти материалы обладают высокой точкой Кюри и при этом достаточно высоким пьезомодулем  $d_{33}$  – от 300 до 425 пКл/Н. Их также можно применять и для датчиков вибрации с выходным сигналом в виде заряда.

Для ЦТС предельными температурами для работы с выходным сигналом по напряжению принято считать значения 250 ÷ 280 °С. Наибольшая эффективность в этом диапазоне наблюдается у преобразователей из ЦТС-36. Менее эффективны, но применимы ЦТС-21 и ЦТС-Б.

Для температур выше 280 °С отсутствуют ПКМ, приемлемые для получения выходного напряжения и возможна работа только с зарядовым сигналом. Для работы в этой области температур разработаны и применяются составы на основе твёрдых растворов высокотемпературных висмутсодержащих соединений типа НТВ-2. Среди них следует отметить серийно выпускаемые в НКТБ «Пьезоприбор» НТВ-2 и ТНВ-2. Материалы имеют пьезомодуль  $d_{33}$  на уровне 10 ÷ 27 пКл/Н, поэтому для получения достаточных амплитуд колебаний вибропреобразователя требуется применение на порядок больших напряжений раскочки, чем при применении ПКМ типа ЦТС.

При измерении механических колебаний предельно малого уровня первостепенную роль играет порог чувствительности пьезоэлектрического датчика, определяемый отношением заряда или напряжения, приведённого к входу согласующего усилителя. Принимая во внимание энергетический характер возникающих шумов, при выборе ПКМ для таких датчиков целесообразно ориентироваться на энергетический показатель  $K_w$ , характеризующий относительную энергию пьезоэлемента пьезоэлектрических датчиков механических величин.

В соответствии с изложенными выше критериями параметров вибрационных плотномеров и ПКМ для проведения испытаний ВПП выбраны материалы, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний ПКМ

Температура эксплуатации ПДМВ	Тип преобразователя				$K/K_{19}$
	Пьезоактюатор		Пьезодатчик		
	ПКМ	$T_{max}, ^\circ C$	ПКМ	$T_{max}, ^\circ C$	
-70 ÷ 85°С	ЦТС-Р	100	ЦТС-19П	150	3,9
-40 ÷ 150°С	ЦТС-19М	150	ЦТС-19П	150	2,0
20 ÷ 260°С	ЦТС-36	260	ЦТС-36	260	1,2
1 ÷ 400°С	НТВ-2	400	НТВ-2	400	0,093

В ходе испытаний на вибропреобразователь необходимо последовательно устанавливать одинаковые по геометрии пьезоэлементы из различных ПКМ. Поэтому основным критерием при выборе конструкции ВПП была простота сборки и разборки пьезопреобразователя. В наилучшей степени этому критерию соответствует конструкция вибрационного сигнализатора уровня СУ-802, разработанного в НКТБ «Пьезоприбор», г. Ростов-на-Дону, ОКР «Интроскопия». Оценка эффективности применяемых пьезоматериалов для пары актюатор/датчик проводилась сравнением выходных сигналов испытуемых ВПП с выходным сигналом базового варианта, измеренными при температуре 20 °С.

В качестве базового варианта ВПП принято исполнение, в котором ПКМ ЦТС-19 применялся и для актюатора и для датчика. Одновременно был применён материал ЦТС-Р разработки НКТБ «Пьезоприбор». Результаты испытаний приведены на рисунке 1. Оценка эффективности применения различных ПКМ ( $K/K_{19}$ ) приведена в таблице 2.



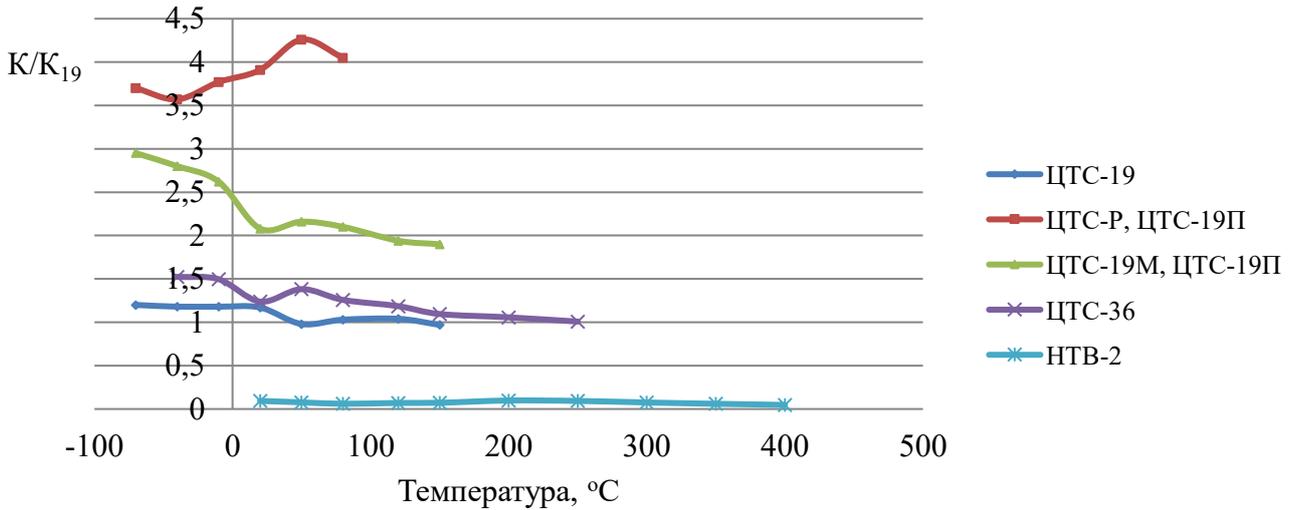


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента преобразования ВПП от температуры

Наибольший эффект наблюдается в промышленном диапазоне температур от минус 70 до 85 °С, где применение ПКМ с высоким пьезомодулем  $d_{33}$  для актюаторов и высоким пьезоэлектрическим коэффициентом  $g_{33}$  для датчиков обеспечивает четырёхкратное увеличение эффективности в сравнении с базовым исполнением вибропреобразователя. Эти же принципы позволили существенно увеличить эффективность работы ВПП в диапазоне температур до 150 °С и получить эффективное решение для температур до 260 °С. Так в диапазоне температур до 150 °С амплитуда полезного сигнала увеличена в два раза за счёт применения улучшенных составов на базе ПКМ ЦТС-19. В тоже время применение пьезокерамики ЦТС-36 расширило температурный диапазон применения плотномеров и сигнализаторов уровня до 260 °С без потери эффективности работы ВПП.

В ходе выполнения работы впервые получены результаты измерений характеристик ВПП с применением ПКМ на основе твердых растворов висмутсодержащих соединений при температуре 400 °С. Это открывает новые возможности разработки и изготовления промышленных плотномеров для экстремально высоких температур.

**Третья глава** посвящена теоретическому исследованию ВПП камертонного типа, погруженного в измеряемую среду. Целью исследования является построение адекватной модели ВПП для дальнейшего исследования поведения в различных средах и условиях эксплуатации.

Частота собственных колебаний механического резонатора определяется из известного соотношения:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (3)$$

где  $k$  и  $m$  – жесткость и масса резонатора.

При учете влияния внешней среды к массе резонатора добавляется некоторая присоединенная масса, определяемая плотностью ( $\rho$ ) и объемом ( $V$ ) вовлеченного в колебания вещества

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m + \frac{\rho}{3}}}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что плотность измеряемой среды связана простым соотношением с резонансной частотой колебаний и может вычисляться по формуле:

$$\rho = a\tau^2 + b, \quad (5)$$

где  $a$  и  $b$  – некоторые конструктивные коэффициенты, определяемые при калибровке, а  $\tau$  – период колебаний на резонансной частоте.

В качестве исходной модели для моделирования выбрана конструкция вибрационного сигнализатора уровня СУ-802. При проведении экспериментальных исследований базовой конструкции были выявлен ряд недостатков устройства-прототипа, основным из которых является относительно невысокая точность измерения плотности. Для выявления причин и мето-

дов улучшения характеристик устройства проведено моделирование в системе конечно-элементного анализа ANSYS.

Уравнение движения имеет вид:

$$\partial \sigma_{ij} / \partial x_j = \rho \ddot{u}_i + \alpha \rho \dot{u}_i, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность среды;  $\sigma$  – тензор напряжений;  $u$  – вектор смещений.

В случае изотропной среды при изотермических условиях используется обобщенный закон Гука:

$$\sigma_{ik} = E/(1 + \nu) [(\varepsilon_{ik} + \beta \varepsilon_{ik}) + \nu/(1 - 2\nu)(\varepsilon_{ll} + \beta \varepsilon_{ll})\delta_{ik}], \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{ik} = 1/2(\partial u_i / \partial x_k + \partial u_k / \partial x_i)$  – тензор деформаций;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости электрического поля; величины  $\alpha$  и  $\beta$  вводятся для описания затухания в твердых средах по Рэлею (фактически, вязкоупругие потери).

Для изотропного материала тепловое расширение происходит одинаково по всем направлениям, поэтому дополнительные температурные деформации имеют вид:

$$\varepsilon_{ik}^T = \alpha^T (T - T_0) \delta_{ik}, \quad (8)$$

где  $T_0$  – начальная температура,  $\alpha^T$  – коэффициент теплового расширения.

Для расчета девиации частоты рассматривалась задача о взаимодействии резонатора с жидкостью. На графике рисунка 2, приведены результаты расчетов девиации частоты в зависимости от плотности жидкости для модели камертона из стали и из титана с размерами прототипа. Сопоставив полученные результаты с формулами зависимости собственной частоты камертона от плотности жидкости (3, 4, 5), получаем, что при надлежащем подборе коэффициентов  $K$ ,  $a$  и  $b$ , расчеты методом конечных элементов дают для рассматриваемой нами модели зависимости частоты от плотности жидкости совпадение с большой степенью точности: отклонения не превышают 0,003 %. Этот результат даёт возможность использовать формулу (5) для преобразования периода колебаний ВПП в значение плотности среды и предложить метод калибровки вибрационного плотномера, отличающийся тем, что вместо трёх жидкостей с известной плотностью применяются две среды с известной плотностью, одной из которых может быть воздух, а другой – любая жидкость с известной плотностью. Применение двух калибровочных сред приводит к снижению трудоёмкости при определении коэффициентов полинома, а также даёт возможность проводить калибровку плотномера непосредственно в местах эксплуатации без снятия с объекта. На этой основе принято решение о применении соотношения (5) для дальнейших экспериментальных исследований ВПП.

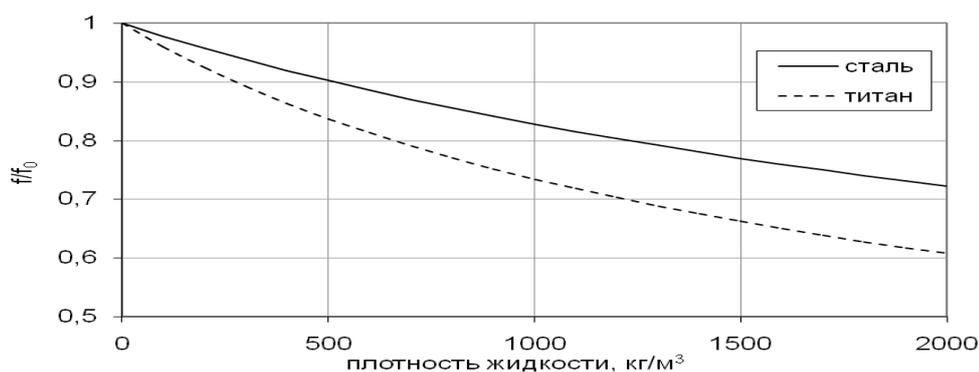


Рисунок 2 – Девиация резонансной частоты камертона в зависимости от плотности жидкости

Для оценки влияния температурных изменений констант материалов на собственную частоту первой гармоники датчика, был проведён расчет её изменения при заданных малых изменениях этих констант. Вначале вычислялась собственная частота ненагруженного датчика. Затем поочередно задавались вариации каждой из констант материалов, составляющих датчик, т.е., упругих констант металлов и диэлектриков, упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических констант пьезоактивных материалов. Эти вариации задавались в размере 1 % от абсолютной величины соответствующей константы. Вычислялись соответствующие собственные частоты и изменения собственных частот, вызванные каждой из вариаций. Результаты вычислений приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Влияние вариаций параметров материалов на собственную частоту камертона

		сталь			титан		
		$f_l$	$\Delta f_l$	$\Delta f_l/f_l$	$f_l$	$\Delta f_l$	$\Delta f_l/f_l$
		Гц	Гц на 1%	%	Гц	Гц на 1%	%
Исходные частоты		1059,365			1036,04479		
Варьируемые параметры	Металл						
	$E$	1064,490	5,12536	0,48381	1041,07802	5,03323	0,48581
	$\nu$	1059,861	0,49585	0,04681	1036,45735	0,41256	0,03982
	Пьезокерамика						
	$C_{11}$	1059,40720	0,04195	0,00396	1036,08569	0,04090	0,00395
	$C_{12}$	1059,36990	0,00465	0,00044	1036,04705	0,00226	0,00022
	$C_{13}$	1059,27662	-0,08863	-0,00837	1035,96863	-0,07616	-0,00735
	$C_{33}$	1059,49743	0,13218	0,01248	1036,15289	0,10810	0,01043
	$C_{44}$	1059,39898	0,03373	0,00318	1036,07352	0,02873	0,00277
	$e_{31}$	1059,36558	0,00033	0,00003	1036,04505	0,00026	0,00003
	$e_{33}$	1059,36697	0,00172	0,00016	1036,04614	0,00135	0,00013
	$e_{15}$	1059,36730	0,00205	0,00019	1036,04654	0,00175	0,00017
	$\varepsilon_{11}$	1059,36460	-0,00065	-0,00006	1036,04425	-0,00054	-0,00005
	$\varepsilon_{33}$	1059,36386	-0,00139	-0,00013	1036,04365	-0,00114	-0,00011
	Диэлектрик						
$E$	1059,39446	0,02921	0,00276	1036,07019	0,02540	0,00245	
$\nu$	1059,36803	0,00278	0,00026	1036,04662	0,00183	0,00018	

Из таблицы можно видеть, изменения каких констант материалов оказывают наибольшее влияние на собственную частоту камертона. Очевидно, что наиболее значимым параметром влияющим на частоту, является упругий модуль металла  $E$ : увеличение модуля Юнга стали на 1 % вызывает повышение собственной частоты камертона на 0,484 %, а для датчика из титанового сплава частота возрастает на 0,486 %. Вторым по значимости параметром является коэффициент Пуассона  $\nu$ , но роль его изменений на порядок меньше. Роль изменений упругого модуля  $C_{33}$  пьезокерамики вчетверо меньше: соответственно 0,012 % и 0,010 %. Затем идут упругие модули  $C_{13}$  (0,008 % и 0,007 %),  $C_{11}$  (0,004 %),  $C_{44}$  (0,003 %). Модуль Юнга диэлектрика дает вклад около 0,002 %. Вклады пьезоэлектрических  $e_{ij}$  и диэлектрических констант пьезоматериала  $\varepsilon_{ij}$  не превышают 0,0002 %.

Расчеты также показали наличие существенного градиента температур внутри конструкции при наличии разности температур внешней и измеряемой среды. Изменение частоты от воздействия температуры в поддиапазоне от минус 40 до 60 °С, приведённое к девиации частоты и выраженное в единицах измерения плотности, достигает 1 кг/м<sup>3</sup> на 1 °С. Для достижения общей погрешности измерения плотности  $\pm 0,3$  кг/м<sup>3</sup> в приведенном выше диапазоне температур необходимо, чтобы влияние температуры на результат измерений не превышало  $\pm 0,1$  кг/м<sup>3</sup> в любой точке диапазона. Наиболее распространённым способом снижения температурной погрешности измерения является способ термокомпенсации, основанный на вычитании из вычисленного значения плотности некоторой его части, приходящейся на температурную составляющую. При цифровом способе термокомпенсации все влияющие параметры измеряются, оцифровываются, а затем производится вычисление конечного результата по заданному алгоритму.

Исходя из главной роли модуля упругости металла в изменении частоты колебаний, можно предложить алгоритм термокомпенсации ВПП, не требующий проведение калибровки в жидкостях и газах во всём диапазоне температур. Температурные изменения резонансной частоты, вызванные изменением модуля Юнга, можно фиксировать при нулевой плотности измеряемой среды, поэтому предлагается проводить измерения периода резонансных колебаний в вакууме. Это

даёт возможность существенно изменить алгоритм калибровки и расчёта коэффициентов термокомпенсации, а именно, проводить калибровку по температуре до калибровки по плотности. Период колебаний представляется как зависящая от температуры переменная в удобном для вычисления виде

$$\tau_T = \tau \times \sum_{i=0}^N K_{\tau i} T^i, \quad (9)$$

где  $\tau$  – измеренный период колебаний ВПП,  $\tau_T$  – термокомпенсированный период,  $K_{\tau i}$  – коэффициенты полинома. Блок-схемы алгоритмов калибровки в диапазоне температур (а) и термокомпенсации (б) приведены на рисунке 3.

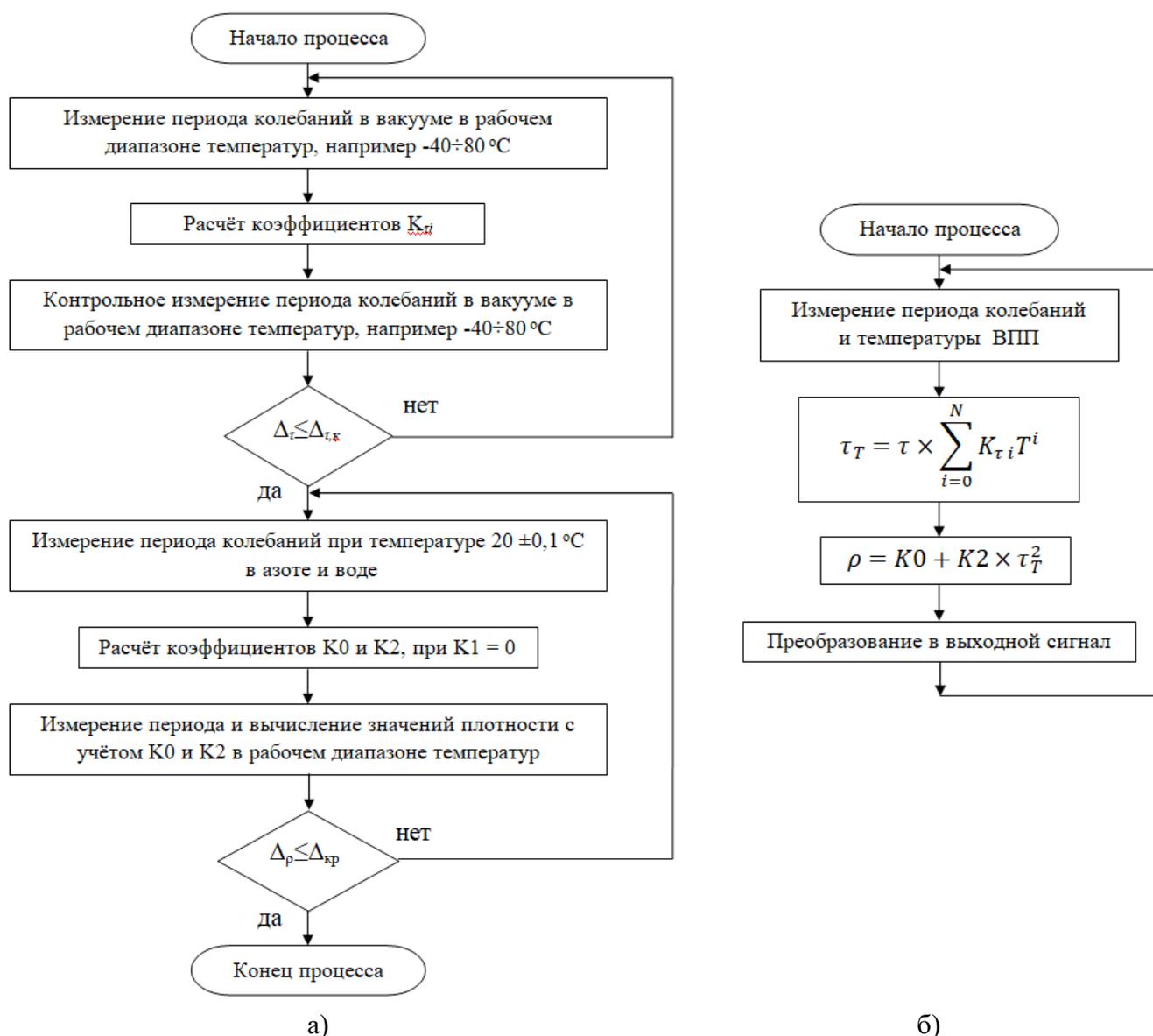


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритмы термокалибровки (а) и термокомпенсации (б) ВПП

В процессе термокалибровки ВПП монтируется в специальный сосуд, из которого выкачивается воздух. Далее вся конструкция устанавливается в климатическую камеру, где проходит весь цикл испытаний в требуемом диапазоне температур. Измерения периода колебаний и температуры проводятся через каждые 10 °C, эти точки состояний формируют зависимость изменения периода колебаний от температуры. По измеренным значениям определяют коэффициенты полинома (9), которые заносятся в постоянную память прибора, после чего проводятся контрольные операции и измерения для подтверждения корректности проведённых расчётов и процедур записи. Одним из

главных преимуществ алгоритма является существенное расширение диапазона температур термокалибровки, которые ограничены только термостойкостью ВПП, сосуда и линий связи.

С целью снижения погрешности измерений плотномера и повышения эффективности преобразования разработана следующая модель (рисунок 4, а). ВПП имеет металлический цилиндрический корпус 1, закрытый снизу мембраной 2, соединенной с двумя симметричными штангами (лопастями) 3, образующими вместе с мембраной вибратор типа камертона. На стержне 4 из пьезоэлектрических элементов 5 собраны актюатор и датчик вибрации. Внутри корпуса установлен платиновый термометр 7.

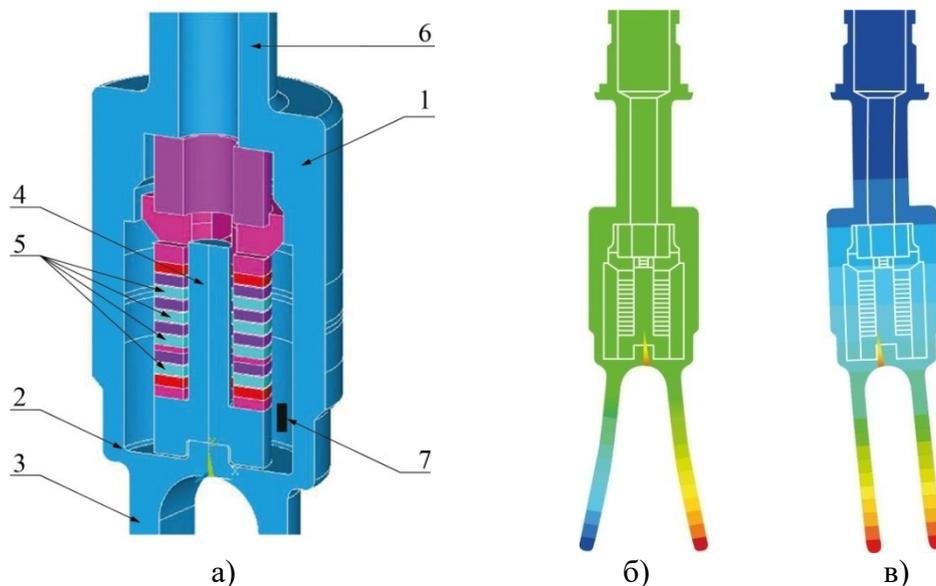


Рисунок 4 – Модель (а) и моды колебаний ВПП (б и в)

Для снижения погрешности измерения плотности среды модель дополнена металлической трубкой 6, расположенной между корпусом и штуцером, диаметр которой существенно меньше диаметра корпуса. Эта трубка-буфер – обеспечивает механическую развязку вибратора с корпусом резервуара (трубопровода) и снижает влияние посторонних механических возмущений на колебания вибратора. Кроме того, удаление вибратора от корпуса резервуара обеспечивает близость температуры вибратора к температуре измеряемой среды.

На рисунках 4, б и в показаны низкочастотные моды собственных колебаний. Основная мода (рисунок 4, б) – симметричные камертонные колебания со встречными (противофазными) колебаниями лопастей. Наряду с ней, механическими вибрациями может возбуждаться мода с асимметричными (синфазными) колебаниями лопастей, представленная на рисунке 4, в. Расчет показывает, что если длину буфера свести к нулю, то частоты этих двух мод оказываются близки друг к другу, что недопустимо, поскольку это вносит искажения в резонансную кривую.

На частотной характеристике виброчувствительности  $K_a(f)$  модель без буфера (рисунок 5) имеет широкий двойной пик, поскольку частота синфазных колебаний оказывается очень близка к основной моде. Сравнение с частотной характеристикой виброчувствительности реальной модели показывает, что буфер снижает виброчувствительность на порядок. Дополнительный пик виброчувствительности, соответствующий основной моде смещается при этом до 0,8887 кГц и оказывается вдали от области рабочих частот плотномера. На рисунке 5, б представлен ряд расчетных частотных характеристик виброчувствительности  $K_a(f)$ , полученных при различных величинах длины буфера  $L_b$ , где с увеличением  $L_b$  частота дополнительного пика понижается, а амплитуда возрастает, оставаясь, однако, намного меньше, чем амплитуда  $K_a$  без буфера.

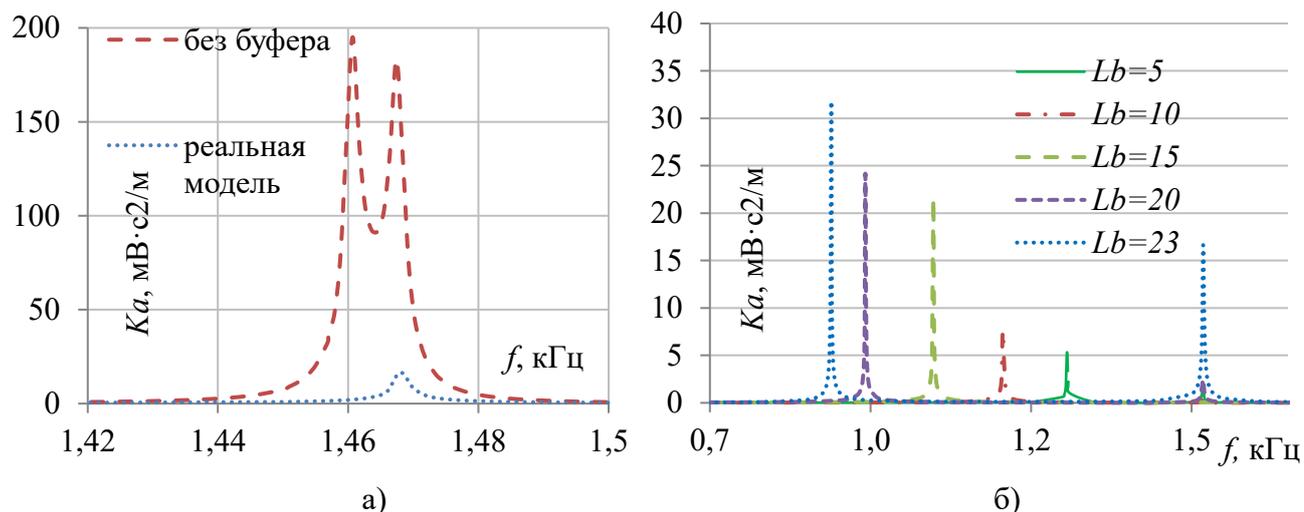


Рисунок 5 – Расчетные частотные характеристики виброчувствительности без буфера (а) и с различными длинами буфера (б)

Буфер играет и другую важную роль – термической развязки плотномера с наружной температурой. При точных измерениях частот необходимо учитывать поправки, обусловленные зависимостью упругих констант металла от температуры. Температура в теле датчика распределена неоднородно (рисунок 6), поскольку температура  $T_0$  измеряемой среды в трубопроводе может весьма существенно отличаться от температуры  $T_1$  вне трубопровода. Для резонансной частоты камертонных колебаний определяющую роль играет именно температура лопастей. Поэтому датчик температуры, помещаемый внутри корпуса плотномера, должен располагаться по возможности близко к лопастям.

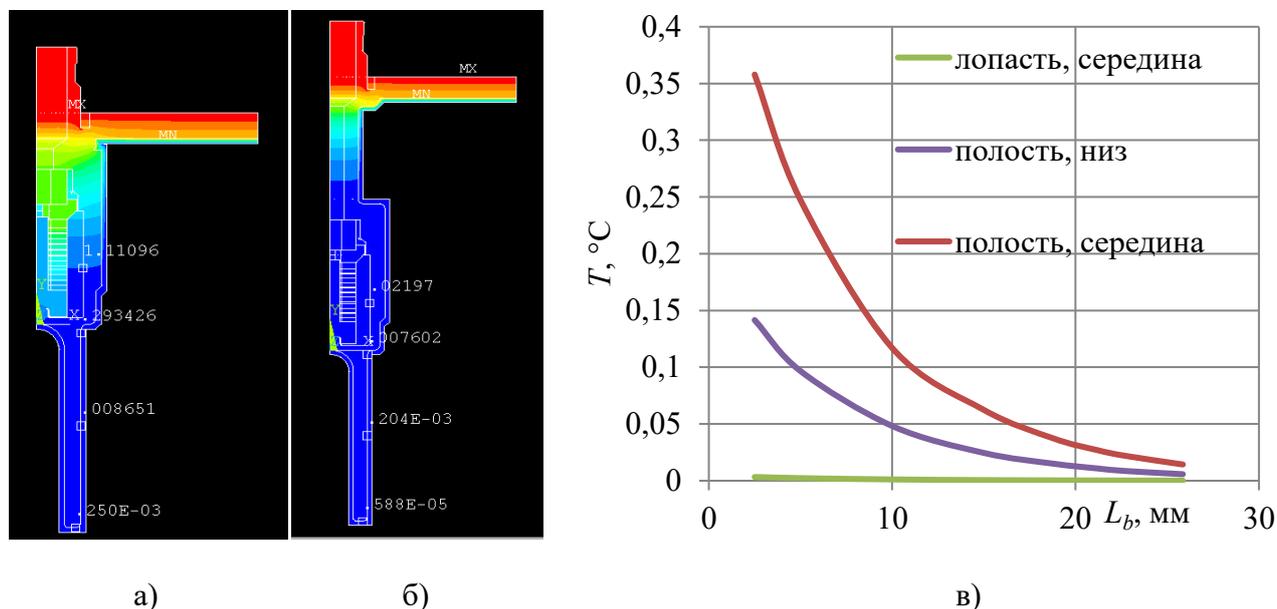


Рисунок 6 – Расчетные картины распределения температур в теле ВПП:  
а – модель плотномера без буфера; б – с буфером длиной 23 мм; в – зависимости температур лопастей, мембраны и стенки корпуса от длины буфера

Исследование распределения температур в теле датчика методом конечных элементов позволяет оценить степень соответствия температуры, измеряемой датчиком, температуре лопастей. На рисунке 6 представлены расчетные картины распределения температур в теле плотномера при  $\Delta T = T_1 - T_0$  равном  $20^\circ\text{C}$ , наглядно иллюстрирующие роль буфера в приближении температуры внутри полости плотномера к температуре лопастей. Как видно из рисунка 6, б, длинный буфер «берет на себя» основной перепад температур и обеспечивает близость измеряемой температуры к

температуре лопастей. На рисунке 6, в представлении расчетные зависимости температур середины лопасти, стенки корпуса у дна полости и стенки корпуса посередине полости от длины буфера  $L_b$ . Как видно из рисунка, длинный буфер (25 мм) обеспечивает на порядок лучшее приближение температур, чем короткий. Это также подтверждают роль трубки-буфера – как механического виброизолятора и как термоизолятора, обеспечивающего достижение поставленной цели – существенного снижения погрешности измерения плотности жидкости.

**Четвёртая глава** посвящена экспериментальным исследованиям работы ВПП в жидкостях и газах различной плотности, вязкости и температуры, а также описанию плотномера, разработанного на основе предложенного ВПП.

Для проверки возможности применения (5) проведены измерения периода колебаний ВПП в средах с плотностями от 1 до 1000 кг/м<sup>3</sup>. Результаты измерений при коэффициентах  $a = 0,003249$  и  $b = -2082,17$  приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Погрешность измерения плотности жидкостей и воздуха при 20 °С

Наименование среды	$\rho_э$ , кг/м <sup>3</sup>	$\nu$ , м/с	$\eta$ , сПз	$\tau$ , мкс	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Delta$ , кг/м <sup>3</sup>
Воздух	1,12	343	0,0181	800,757	1,10	0,02
Нефрас	688,54	1170	0,65	923,471	688,54	0,02
Спирт	810,60	1177	1,197	943,602	810,65	0,05
ГСО	851,00	1225	10,25	950,165	851,04	0,04
ПМС-5	917,00	931	4,977	960,785	916,97	0,03
ПМС-10	932,50	975	8,904	963,277	932,55	0,05
Вода	998,23	1483	1,0019	973,709	998,18	0,05

Не наблюдается влияния скорости звука в среде  $\nu$  и вязкости  $\eta$  на результаты измерений. Наибольшее отклонение значений плотности вычисленной по (5) от значений, полученных при измерении лабораторным плотномером  $\rho_э$ , не превышает  $\pm 0,1$  кг/м<sup>3</sup>, что соответствует погрешности лабораторного плотномера.

В соответствии с предложенным выше алгоритмом проведена термокомпенсация экспериментальных образцов ВПП. Измерения проводились при температурах минус 50, 30, 10, плюс 10, 40, 60 и 80 °С. Возбуждение ВПП осуществляется от генератора синусоидальных колебаний. Контроль сигналов возбуждения и ответного напряжения осуществлялся при помощи осциллографа и частотомера. По результатам измерений рассчитаны калибровочные коэффициенты полинома (9), представленные в таблице 5.

Таблица 5 – Термокалибровочные коэффициенты экспериментальных ВПП

Коэффициенты	ВПП № 001	ВПП № 002	ВПП № 003
$K_{\tau 0}$	1	1	1
$K_{\tau 1}$	-2,12363E-4	-3,84220E-4	-4,38981E-6
$K_{\tau 2}$	0	0	1,75404E-7
$K_{\tau 3}$	0	0	-1,28357E-9

Проверка рассчитанных коэффициентов проводилась на жидкостях-компараторах при температурах 10, 30 и 40 °С. Выбранный диапазон температур обусловлен техническими характеристиками лабораторного плотномера, который использовался в качестве эталонного средства измерений. Результаты измерений экспериментального образца № 1 из стали 12X18H10T, приведены в таблице 6. Как видно из представленных данных, предложенный алгоритм термокомпенсации снизил дополнительную погрешность измерения более чем в 10 раз.

Таблица 6 – Температурная погрешность измерения плотности ВПП № 001

Наименование среды	$T$ , °C	$\rho_{э}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\tau$ , мкс	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Delta$ , кг/м <sup>3</sup>	$\tau_T$ , мкс	$\rho_T$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Delta_T$ , кг/м <sup>3</sup>
Воздух	10	1,2	951,844	-4,1	-5,3	953,865	1,4	0,1
	20	1,2	953,816	1,2	0,0	953,816	1,2	0,0
	30	1,2	955,818	6,6	5,5	953,788	1,2	0,0
	40	1,1	957,880	12,2	11,1	953,811	1,2	0,1
Нефрас	10	698,6	1181,523	690,3	-8,3	1184,032	698,7	0,1
	20	689,9	1181,443	690,0	0,1	1181,443	690,0	0,1
	30	681,4	1181,507	690,2	8,8	1178,998	681,8	0,4
	40	672,3	1181,274	689,4	17,1	1176,257	672,7	0,4
Спирт	10	826,2	1218,817	817,1	-9,1	1221,406	826,1	-0,1
	20	817,7	1218,955	817,6	-0,1	1218,955	817,6	-0,1
	30	808,7	1219,032	817,9	9,2	1216,443	808,9	0,2
	40	799,6	1218,763	816,9	17,3	1213,587	799,1	-0,5
ПМС - 10	20	932,6	1251,744	932,4	-0,2	1251,744	932,4	-0,2
	30	922,8	1251,518	931,6	8,9	1248,861	922,2	-0,6
	40	914,4	1251,893	932,9	18,6	1246,576	914,1	-0,3
Вода	10	999,7	1267,925	990,2	-9,6	1270,617	999,9	0,1
	20	998,2	1270,145	998,2	-0,1	1270,145	998,2	-0,1
	30	995,7	1272,136	1005,3	9,7	1269,435	995,6	0,0
	40	992,2	1273,823	1011,4	19,2	1268,413	991,9	-0,3

Существенным параметром жидкости, влияющим на определение резонансной частоты ВПП, является вязкость. Потери энергии колебаний ВПП в вязкой жидкости приводят к существенной деформации АЧХ и значительному уменьшению (до двух порядков) отношения сигнал/шум. Для практического определения влияния вязкости на погрешность плотномера проведены испытания в жидкостях с номинальными значениями вязкости равномерно распределёнными в диапазоне от 1 до 1000 сПз. Для выделения вязкости, как единственного влияющего параметра, измерения проводились при температуре  $(20 \pm 0,02)$  °C. Кроме периода колебаний фиксировалась амплитуда ответного сигнала и добротность вибропреобразователя. В таблице 7 приведены измеренные значения в измеряемых средах с вязкостью от 1 до 1000 сПз.

Таблица 7 – Параметры колебаний ВПП и значения измеренной плотности

Наименование среды	$\eta$ , сПз	$\rho_{э}$ , кг/м <sup>3</sup>	$Q$	$V$ , мВ	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Delta$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{\eta T}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Delta_{\eta T}$ , кг/м <sup>3</sup>
Воздух	0,02	1,12	2517,0	2530	1,10	0,0	1,10	0,0
Вода	1,00	998,2	488,5	1818	998,2	0,0	998,2	0,0
ПМС-5	4,98	917,0	241,7	927	916,9	0,1	916,9	-0,1
ПМС-20	19,31	951,9	131,9	514	951,9	0,0	951,8	-0,1
ПМС-50	52,69	963,2	79,7	323	963,3	0,1	963,2	0,1
Масло И-20	62,23	832,5	73,2	298	832,6	0,1	832,6	0,1
ПМС-100	98,261	967,6	58,1	243	967,7	0,1	967,7	0,1
ПМС-150	152,25	969,6	46,7	203	969,7	0,1	969,7	0,1
ПМС-200	202,39	970,6	40,5	180	970,8	0,2	970,8	0,2
ПМС-500	508,35	973,1	25,5	115	973,8	0,7	973,2	0,1
ПМС-1000	1012,53	975,2	18,1	87	978,0	2,8	975,3	0,1



Полученные данные дают возможность предложить алгоритм калибровки и расчёта коэффициентов компенсации влияния вязкости на результаты измерения плотности, основанный на измеренных значениях амплитуды выходного сигнала. Влияние вязкости на результат измерения плотности в общем случае имеет нелинейный характер и в некотором диапазоне может быть аппроксимировано полиномом третьего порядка. Поэтому коррекция результатов измерения плотности от вязкости может быть реализована в виде:

$$\rho_{\eta T} = \rho_T + \rho_T \sum_{i=0}^4 \frac{K_{\eta i}}{K_V^i}, \quad (10)$$

где  $K_{\eta i}$  – калибровочные коэффициенты по вязкости,  $K_V$  – отношение напряжения ответного сигнала к напряжению возбуждающего сигнала.

Определение калибровочных коэффициентов по вязкости проводится по результатам измерения амплитуды напряжения выходного сигнала в жидкостях с различной вязкостью. Рассчитанные коэффициенты записываются в постоянную память плотномера. Алгоритм калибровки ВПП по вязкости становится частью общего алгоритма калибровки плотномера, которая включает получение информации о изменении периода и амплитуды колебаний ВПП от температуры, определение значений коэффициентов преобразования периода колебаний в значение плотности и измерении отклонений значений плотности, вызванных влиянием вязкости. Результаты применения алгоритма компенсации погрешности зависящей от вязкости среды представлены в таблице 7, как  $\rho_{\eta T}$  и  $\Delta_{\eta T}$ . Как видно из приведённых значений, применение алгоритма позволило на порядок снизить погрешность измерения плотности в диапазоне до 1000 сПз.

Для практической реализации плотномера предложена блок-схема электронного преобразователя, изображенная на рисунке 7. Основными блоками схемы являются автогенератор с управляемой фазовой характеристикой и микроконтроллер, управляющий автогенератором. Автогенератор возбуждает колебания камертона на 1-й моде изгибных колебаний лопаток камертона. Усилительные блоки (►, ◄) преобразуют входной и выходной сигнал автогенератора в удобный для обработки микроконтроллером меандр. Измеряется также амплитуда сигнала с датчика вибрации. Устройство поддерживает заданный фазовый сдвиг с погрешностью не хуже  $\pm 0,1$  градуса в диапазоне частот от 500 до 2000 Гц.

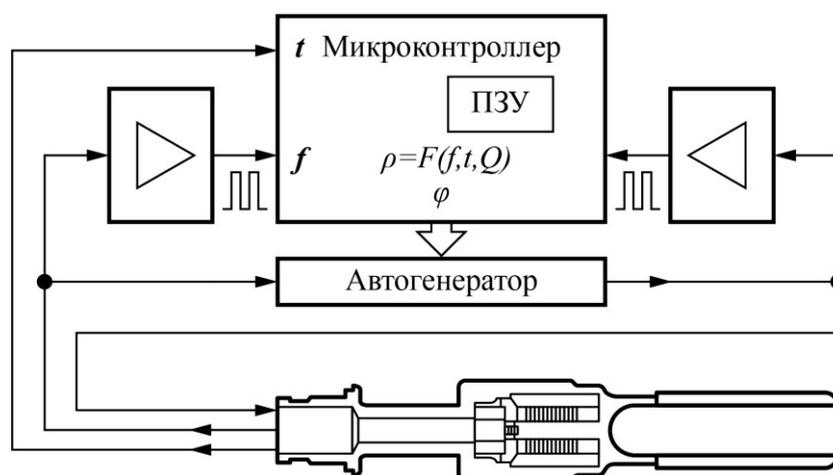


Рисунок 7 – Блок-схема электронного преобразователя плотномера

Информация о температуре ВПП поступает от платинового термометра, электрический сигнал которого оцифровывается микроконтроллером и при помощи калибровочных коэффициентов вычисляется значение в градусах Цельсия с погрешностью не хуже  $\pm 0,1$  °С. Получая данные о периоде и амплитуде колебаний и температуре ВПП, микроконтроллер проводит коррекцию по температуре и вязкости и вычисляет текущее значение плотности измеряемой среды.

### Основные результаты и выводы работы

1. Разработана и экспериментально подтверждена модель конструкции ВПП камертонного типа и проведено моделирование в системе конечно-элементного анализа *ANSYS*, которая позволяет выбирать необходимые решения при проектировании погружного вибрационного плотномера.

2. Предложен и опробован метод калибровки вибрационного плотномера по двум средам с известной плотностью, одной из которых, может быть, воздух, а другой любая жидкость с известной плотностью. Метод позволяет проводить определение коэффициентов преобразования периода колебаний в плотность измеряемой среды непосредственно на месте эксплуатации без демонтажа плотномера, при сохранении погрешности измерений не более  $\pm 0,3 \text{ кг/м}^3$ .

3. Выявлены элементы конструкции, оказывающие критическое влияние на погрешность измерения плотности при изменении температуры среды и выработаны решения, позволяющие снизить градиент температур внутри ВПП до  $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , а, следовательно, проводить эффективную термокомпенсацию периода колебаний за счёт применения дополнительного внутреннего датчика температуры.

4. Разработан алгоритм автоматической компенсации влияния температуры среды на погрешность измерения плотности, позволивший расширить диапазон температур измеряемых сред экстремально низкими и высокими значениями, а также снизить погрешность измерения плотности до  $\pm 0,3 \text{ кг/м}^3$ .

5. На основе исследований влияния плотности, вязкости и температуры среды на частотные характеристики полученного в работе ВПП разработан алгоритм автоматической компенсации влияния вязкости среды на погрешность измерения плотности, позволивший увеличить максимальный предел вязкости сред доступных для измерения до 1000 сПз.

6. Для измерения плотности различных сред установлены температурные диапазоны применения современных ПКМ, обеспечивающие максимально эффективные параметры ВПП. Создан ВПП с рабочей температурой до  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  из ПКМ на основе твердых растворов висмутсодержащих соединений.

7. В результате выполнения диссертационной работы создан отечественный плотномер, не уступающий по техническому уровню зарубежным аналогам и внедрённый в техпроцесс на ведущих предприятиях РФ. Исследования погрешности разработанного плотномера в различных жидкостях и газах в диапазоне плотностей от 1 до  $1630 \text{ кг/м}^3$  и вязкости до 1000 сПз, а также экспериментальные исследования в реальных условиях эксплуатации при добыче, хранении, переработке и транспортировке нефти подтвердили его высокие эксплуатационные характеристики.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные научные результаты диссертации отражены:

- в работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях из перечня Минобрнауки России:

1. **Зацерклянный, О.В.** Вибрационные плотномеры газов и жидкостей для продукции газоконденсатных скважин / О.В. Зацерклянный // Автоматизация, телемеханика и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 2. – С. 9–13.

2. **Зацерклянный, О.В.** Вибрационные плотномеры для вязких жидкостей / О.В. Зацерклянный, М.В. Богуш // Автоматизация, телемеханика и связь в нефтяной промышленности. – 2013. – № 3. – С. 36–39.

3. **Зацерклянный, О.В.** Моделирование вибрационного датчика плотности методом конечных элементов / О.В. Зацерклянный, О.В. Богуш, Э.М. Пикалев // Датчики и системы. – 2018. – № 10. – С. 8–14.

4. **Зацерклянный, О.В.** Пьезоэлектрические материалы для датчиков вибрации и актюаторов в устройствах измерения плотности жидкостей и газов / О.В. Зацерклянный, О.В. Панич // Датчики и системы. – 2020. – № 4. – С. 48–54.

5. **Зацерклянный, О.В.** Алгоритм температурной коррекции вибрационных плотномеров / О.В. Зацерклянный // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 6. – С. 179–189.

**- в полученных патентах РФ на изобретения:**

6. **Патент N 169441 Российская Федерация, МПК G01N 11/16 (2006.01).** Вибрационное устройство для определения параметров среды / Берман В.М., Богуш М.В., Зацерклянный О.В., Пикалев Э.М., Шатуновский О.В. – N 2016145704/28; заявл. 22.11.2016; опубл. 17.03.2017, Бюл. № 8. – 10 с.

**Публикации в других научных изданиях:**

7. **Зацерклянный, О.В.** Исследование путей расширения диапазона вязкости вибрационного плотнера / О.В. Зацерклянный // Сборник тезисов VIII Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения". Ростов-на-Дону. – 2012. – С. 44–46.

8. **Зацерклянный, О.В.** Исследование метрологических характеристик вибрационного плотнера 804 / О.В. Зацерклянный // Сборник трудов международной молодёжной научной конференции "Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения". Анапа. – 2013. – С. 43–50.

9. **Зацерклянный, О.В.** Универсальный вибрационный плотномер 804 / О.В. Зацерклянный // Нефть. Газ. Новации. – 2014. – № 12. – С. 63–67.

10. **Зацерклянный, О.В.** Вибрационный плотномер для жидких и газовых сред / О.В. Зацерклянный // ИСУП. – 2020. – № 4. – С. 48–51.

11. **Зацерклянный, О.В.** Пьезоэлектрические материалы вибрационных преобразователей плотности вязких жидкостей / О.В. Зацерклянный, А.Е. Панич // Физические основы приборостроения. – 2020. – № 3. – С. 46–51.

**Личный вклад** О.В. Зацерклянного в публикациях 2, 3, 4, 6 и 11, выполненных в соавторстве, состоит в следующем: поставлена задача исследования поведения вибрационного плотнера в вязких средах; разработаны и предложены методики проведения экспериментов; проведены практические измерения и выполнена систематизация материалов; разработаны алгоритмы компенсации влияния вязкости и модели вибропреобразователей; выполнены работы по написанию текста статей; предложена идея и основные элементы конструкции устройства, представленного в патенте.

**Зацеклянный Олег Владимирович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННОГО  
ПЛОТНОМЕРА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ  
НА ОСНОВЕ КАМЕРТОННОГО ВИБРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Автореферат

Подписано в печать 22.10.2021 г.

Формат 60×84 1/16 Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж \_\_\_\_\_ экз. Заказ № \_\_\_\_\_