

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА»

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Робототехники и технических средств автоматизации»

Курманалиев Ансар Бекетұлы

Исследования возможности модернизации приборов для измерения давления

Дипломная работа

Образовательная программа: 6В07114 Биомедицинская инженерия

Алматы 2025

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА»

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Робототехники и технических средств автоматизации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой РТиТСА

канд. тех. наук, профессор

К.А. Ожикенов

« » 2025г

Дипломная работа

На тему: «Исследование возможности модернизация приборов для измерения
давления»

Образовательная программа: 6B07114 Биомедицинская инженерия

Выполнил

Рецензент

PhD, старший преподаватель

Алимбаева Ж.Н.

« » 2025 г.



Құрманалиев Аңсар Бекетұлы

Научный руководитель

Канд. тех. наук, ассоц. профессор

Туякбаев А.А.

« » 2025 г.

Алматы 2025

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА»

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра «Робототехники и технических средств автоматики»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой РТиТСА
канд. тех. наук, профессор

К.А. Ожикенов

«03» 06 2025г

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающиеся: Курманалиев Аңсар Бекетұлы

Тема: Исследование возможности модернизации приборов для измерения давления

Утверждена приказом проректора по академической работе:

№ <u>521 - П/0</u> <u>13.11.2024</u>	
Срок сдачи законченного проекта	« <u>03</u> » <u>06</u> 2025 г.

Исходные данные к дипломному проекту:

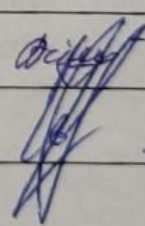
- А) Изучены физические принципы измерения давления и их применимость в различных условиях эксплуатации;
 - Б) Проведён обзор и классификация существующих приборов для измерения давления;
 - В) Выполнен анализ достоинств и недостатков актуальных моделей датчиков давления, применяемых в медицине, промышленности и научной сфере;
 - Г) Исследованы современные технологии модернизации;
 - Д) Разработаны предложения по модернизации приборов давления с использованием наноматериалов, MEMS-технологий и интеллектуальных алгоритмов;
 - Е) Произведено сравнительное моделирование и оценка эффективности предлагаемых решений с учётом точности, устойчивости и энергоэффективности.
- Перечень подлежащих разработке в дипломной работе вопросов: представлены ____ слайда презентации. Рекомендуемая основная литература: из ____ наименований.

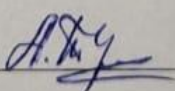
ГРАФИК
подготовка дипломного проекта

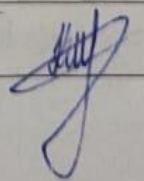
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
1. Анализ физико-технических основ и текущей классификации приборов.	05.11.2024 – 1.02.2025	Выполнено
2. Выявление эксплуатационных проблем и ограничений существующих поколений приборов.	11.02.2025 – 14.03.2025	Выполнено
3. Исследование современных технологий и инновационных материалов как методов усовершенствования.	17.03.2025 – 20.4.2025	Выполнено
4. Определение перспективных направлений развития и будущих тенденций	21.04.2025 – 10.05.2025	Выполнено
5. Разработка практических предложений и рекомендаций по модернизации	11.05.2025 – 24.05.2025	Выполнено
6. Оценка повышения точности, надежности и функциональности приборов.	24.05.2025 – 30.05.2025	Выполнено

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченный дипломный проект с указанием
относящихся к ним разделов проекта

Наименования разделов	Консультанты И.О.Ф. (уч. степень. звание)	Дата подписания	Подпись
Программное обеспечение	Аймуханбетов Е. А. Ст.преподаватель	05-06-2025	
Нормоконтролер	Кальменов Е. Т. Ст.преподаватель	09.06.2025	

Научный руководитель  Туякбаев А.А.

Задание принял к исполнению обучающийся  Курманалиев А.Б.

Дата « 09 » 06 2025 г

Тема: Модернизация приборов для измерения давления

Аңдатпа

Бұл жұмыста қысымды өлшеуге арналған аспаптардың түрлері мен олардың жетілдіру жолдары қарастырылады. Қысымды дәл өлшеу – медицинада, өндірісте және ғылымда маңызды рөл атқарады. Зерттеу барысында манометрлік, электрондық және оптикалық құрылғылардың ерекшеліктері, артықшылықтары мен кемшіліктері сипатталған. Жаңа технологиялар мен материалдарды қолдана отырып, сенсорлардың дәлдігін арттыру, энергия үнемділігі мен цифрлық интеграция мәселелері қаралған. Жұмыстың жаңалығы – ескірген құрылғыларды заманауи талаптарға сай жаңарту бойынша ұсыныстар беру. Нәтижелер қысымды өлшейтін сенсорларды жаңғырту және автоматтандырылған жүйелерге енгізу салаларында қолданылуы мүмкін.

Аннотация

В работе анализируются существующие приборы для измерения давления и пути их модернизации. Описаны физические принципы измерения давления, типы приборов (механические, электронные, оптические), их преимущества и недостатки. Рассмотрены современные подходы, включая цифровизацию, миниатюризацию, беспроводные технологии и интеллектуальные алгоритмы. Работа предлагает пути повышения точности и надёжности измерительных систем. Новизна заключается в разработке рекомендаций по модернизации приборов с использованием новых материалов и технологий. Полученные результаты могут быть использованы для создания современных сенсорных систем и повышения эффективности контроля давления в медицине, промышленности и научных исследованиях.

Abstract

This thesis analyzes existing pressure measurement instruments and proposes modernization strategies. It reviews the physical principles of pressure measurement and classifies devices into mechanical, electronic, and optical types. Each type's strengths and limitations are discussed. The study emphasizes current advancements such as digital integration, miniaturization, wireless communication, and AI-based data processing. Novel recommendations for improving accuracy and reliability using new materials and adaptive systems are provided. The results contribute to the development of next-generation pressure sensors and automation systems, making them more efficient and reliable across medical, industrial, and scientific applications.

Содержание

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ....	6
1.1. Физические принципы измерения давления	6
1.2. Основные виды приборов для измерения давления	8
1.3. Исторический обзор развития технологий измерения давления	12
1.4. Современные требования к приборам для измерения давления.....	15
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ	19
2.1. Манометрические приборы (жидкостные, пружинные, мембранные и др.).....	19
2.2. Электронные приборы для измерения давления (датчики давления, цифровые манометры и др.).....	21
2.3. Медицинские приборы для измерения давления (тонометры, внутрисосудистые датчики)	25
2.4. Промышленные и научные приборы для измерения давления (барометры, пьезометрические датчики и др.).....	28
ГЛАВА 3. ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ	31
3.1. Проблемы, возникающие при эксплуатации существующих приборов.....	31
3.2. Современные технологии и методы усовершенствования приборов	33
3.3. Перспективные направления развития приборов для измерения давления	37
3.4. Разработка предложений по модернизации конкретных видов приборов.....	40
Заключение	45
Список литературы	46

Введение

Измерение давления является важнейшим процессом в науке, медицине, промышленности и инженерном деле. Точные и надёжные устройства позволяют эффективно контролировать ход технологических процессов, обеспечивать безопасное функционирование оборудования, а также своевременно диагностировать и предотвращать серьёзные заболевания. Однако значительное число современных приборов для измерения давления всё ещё обладает целым рядом недостатков: ограниченная точность, зависимость результатов от внешних факторов, а также высокая стоимость производства и обслуживания. В связи с этим вопрос модернизации подобных устройств остаётся крайне актуальным, поскольку именно усовершенствование их конструкции и принципов работы позволит достичь большей надёжности, точности и удобства эксплуатации.

Актуальность темы исследования

На фоне стремительного развития современных технологий требования к приборам для измерения давления постоянно повышаются. В медицине особое внимание уделяется точности результатов и снижению погрешностей, а также удобству использования тонометров в повседневной практике. В промышленном секторе первостепенное значение имеют устойчивость приборов к агрессивной среде, долговечность и высокая точность показаний. В научных исследованиях требуется максимальная чувствительность измерительных систем. Несмотря на существенный прогресс, многие доступные сегодня устройства далеки от идеала, что и делает вопросы их модернизации особенно актуальными.

Цель работы

Проанализировать существующие приборы для измерения давления, выявить их наиболее серьёзные недостатки и предложить пути совершенствования, опираясь на последние научно-технические достижения.

Задачи работы

1. Изучить физико-технические основы метода измерения давления.
2. Рассмотреть основные типы приборов для измерения давления, определить их достоинства и недостатки.
3. Определить ключевые проблемы, возникающие при эксплуатации современных устройств.
4. Исследовать современные подходы и технологии, позволяющие повысить эффективность приборов для измерения давления.
5. Разработать предложения по модернизации отдельных видов приборов.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в системном анализе современных приборов для измерения давления с позиций точности, надёжности и эксплуатационных характеристик. Впервые обоснованы конкретные направления модернизации с использованием наноматериалов, беспроводных

технологий и интеллектуальных алгоритмов обработки данных. Предложены практические решения по повышению чувствительности и энергоэффективности датчиков, а также по их интеграции в автоматизированные системы. Работа открывает новые возможности для разработки универсальных измерительных комплексов, адаптированных к условиям медицины, промышленности и научных исследований. Предложенные подходы могут служить основой для создания сенсорных систем нового поколения.

Объект исследования

Приборы, применяемые для измерения давления в медицине, промышленности и научной сфере.

Предмет исследования

Современные методы и технологии, направленные на модернизацию приборов для измерения давления.

Теоретическая и методологическая основа исследования

В работе применяются методы анализа научно-технической литературы, сравнительный анализ различных типов приборов, использование системного подхода при оценке технических характеристик, а также методы прогнозирования развития измерительных систем в перспективе.

Гипотеза исследования

Если внедрять передовые технологии и современные методы обработки данных, то точность, надёжность и удобство эксплуатации приборов для измерения давления могут быть значительно повышены, что обеспечит улучшенные эксплуатационные характеристики и более широкий спектр применения в различных отраслях.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

1.1. Физические принципы измерения давления

Давление представляет собой одну из важнейших физических величин, описывающих состояние газов и жидкостей в различных системах. С точки зрения определения, оно эквивалентно силе, приходящейся на единицу площади поверхности, и в системе СИ выражается в Паскалях (Па). Фундаментальные принципы измерения давления опираются на законы гидростатики, газовой динамики и механики деформируемых тел. В зависимости от конкретных условий эксплуатации приборов могут применяться разнообразные физические подходы: механические, электрические, оптические, а также акустические методы.

Среди ключевых законов, лежащих в основе измерения давления, выделяют закон Паскаля, согласно которому давление в замкнутой жидкости передаётся равномерно во всех направлениях. Данный закон широко используется в жидкостных манометрах и гидравлических системах. Так, при давлении воды в резервуаре равном 100 кПа, это значение останется постоянным на одной и той же высоте в любом месте резервуара, вне зависимости от его формы.

Ещё одним значимым законом является закон Бойля — Мариотта, утверждающий, что при неизменной температуре произведение давления и объёма газа остаётся постоянным. Этот принцип реализован в газовых манометрах и ряде устройств, в основе которых лежит изменение объёма измеряемого газа. Иллюстрацией может служить барометр-анероид, работающий за счёт деформации герметичной металлической коробки под влиянием колебаний атмосферного давления.[1]

В гидростатических приборах применяется принцип определения давления по высоте столба жидкости. Он выражается через формулу:

$$P = \rho gh \quad (1)$$

где:

P – давление (Па);

ρ – плотность жидкости (кг/м³);

g – ускорение свободного падения (м/с²);

h – высота столба жидкости (м).

Этот метод применяется в ртутных барометрах, где высота ртутного столба пропорциональна атмосферному давлению. Например, при нормальном атмосферном давлении (101,325 кПа) высота ртутного столба составляет 760 мм.

Также широко используется принцип упругой деформации, согласно которому давление вызывает деформацию механических элементов. В таких приборах, как трубка Бурдона или мембранные датчики, изменение давления

приводит к изгибу упругого элемента, который затем преобразуется в механическое или электрическое перемещение стрелки прибора.

Электрические методы измерения давления опираются на изменения электрических характеристик (сопротивления, ёмкости, индуктивности) под воздействием давления. В тензометрических датчиках, например, давление вызывает деформацию чувствительного элемента, что влечёт за собой изменение сопротивления, измеряемого при помощи мостовой схемы. Классическим примером таких устройств являются датчики, основанные на кремниевых мембранах, которые позволяют получать точность измерений вплоть до 0,01%.

Оптические методы измерения давления используют изменения параметров светового потока, проходящего через оптический чувствительный элемент. В волоконно-оптических датчиках, к примеру, давление вызывает изменение показателя преломления материала, регистрируемое фотодетектором. Благодаря высокой чувствительности и отсутствию восприимчивости к электромагнитным помехам, подобные системы находят широкое применение в аэрокосмической промышленности и медицине.

Акустические методы измерения давления основываются на варьировании скорости распространения звуковых волн в газах и жидкостях. Так, ультразвуковые датчики давления функционируют по принципу доплеровского сдвига частоты звука, зависящего от давления в среде. Данные технологии получили широкое распространение в нефтегазовом секторе, где используются для мониторинга состояния трубопроводов.[2]

Сравнительный анализ различных физических принципов измерения давления приведен в таблице 1.1.1.

Таблица 1.1.1 – Сравнение физических принципов измерения давления

Принцип	Основной закон	Пример применения	Точность измерений	Преимущества	Недостатки
Гидростатический	Закон Паскаля	Ртутный барометр	0,1 %	Высокая точность при калибровке	Зависимость от плотности жидкости
Упругая деформация	Закон Гука	Манометры с трубкой Бурдона	0,5 -1%	Простота конструкции	Ограниченный диапазон давления
Электрический	Изменение	Тензорезистивные датчики	0,01 %	Высокая	Требуется калибровка

	сопротивл ения			чувствите льность	
Оптиче ский	Закон преломле ния	Волоко нно- оптические датчики	0,0 01%	Не подверже ны электрома гнитным помехам	Высока я стоимость
Акусти ческий	Допл еровский эффект	Ультраз вуковые датчики	0,1 -0,5%	Беско нтактное измерение	Чувств ительность к внешним шумам

Таким образом, выбор метода измерения давления зависит от условий эксплуатации прибора, требуемой точности и устойчивости к внешним воздействиям. Механические и гидростатические методы подходят для традиционных приложений, таких как бытовые манометры и медицинские тонометры. Электрические и оптические методы более точны и применяются в высокотехнологичных отраслях, включая аэрокосмическую и медицинскую индустрию.

1.2. Основные виды приборов для измерения давления

Приборы для измерения давления находят широкое применение в различных областях науки и техники: медицине, промышленности, транспорте, энергетике и аэрокосмической отрасли. Их основное назначение заключается в контроле и мониторинге давления в жидкостях и газах, обеспечении безопасной эксплуатации оборудования и повышении эффективности технологических процессов. Классификация таких приборов может осуществляться по различным признакам, в том числе по физическим принципам, лежащим в основе измерения давления, по диапазону измерений, условиям эксплуатации и требуемой точности.

Среди наиболее распространённых типов приборов для измерения давления выделяют механические, электронные, оптические и комбинированные устройства. Механические приборы включают манометры с упругими чувствительными элементами (например, трубка Бурдона, мембраны и сильфоны), электронные же базируются на пьезорезистивном, ёмкостном и индуктивном методах. Оптические приборы используют изменение параметров светового сигнала при воздействии давления, тогда как комбинированные устройства объединяют несколько методов измерения для повышения точности и надёжности.

Механические приборы
Механические устройства являются наиболее распространёнными и применяются как в промышленных установках, так и в бытовой сфере.

Примером является трубка Бурдона — изогнутая металлическая трубка, деформирующаяся под воздействием давления. При его увеличении трубка постепенно выпрямляется, передавая движение на стрелочный механизм. Подобные манометры способны работать в диапазоне от 0,1 МПа до 100 МПа. Их ключевые преимущества заключаются в надёжности, невысокой стоимости и простой эксплуатации, однако подверженность механическому износу предполагает необходимость регулярной калибровки.

Мембранные манометры функционируют благодаря деформации эластичной мембраны под давлением и применяются для измерения низких и сверхнизких давлений (от 0,1 Па до 10 кПа). Их можно встретить в медицинских приборах, системах вентиляции и газоаналитических установках. Подобные манометры демонстрируют высокую точность (до 0,1%) и устойчивость к вибрациям, но срок их службы ограничен механической усталостью мембраны.[3]

Сильфонные манометры аналогичны мембранным, однако вместо мембраны в них используется гофрированный сильфон, деформирующийся при воздействии давления. Такие устройства применяются при высоких температурах и в агрессивных средах (например, в химической промышленности и энергетике). Они отличаются высокой чувствительностью и работают в широком диапазоне давлений (от 0,01 МПа до 50 МПа).

Электронные

приборы

К электронным приборам для измерения давления относятся тензорезистивные, пьезорезистивные и ёмкостные датчики. Тензорезистивные устройства основаны на изменении электрического сопротивления материала при механической деформации, вызванной давлением. Их можно встретить в авиации, медицине и автомобильной промышленности (например, в системах контроля давления в шинах), где точность достигает $\pm 1\%$ при диапазоне измерения от 0,1 до 10 бар.

Пьезорезистивные датчики используют кремниевые мембраны с диффузионно сформированными сопротивлениями, меняющими свои характеристики при деформации. Они характеризуются высокой чувствительностью (точность до 0,05%) и коротким временем отклика (менее 1 мс), что делает их идеальными для динамических измерений. Такие датчики применяются в гидравлических системах, медицинском оборудовании и автоматизированных системах контроля технологических процессов.

Ёмкостные датчики давления работают за счёт изменения электрической ёмкости между двумя пластинами, одна из которых способна деформироваться под воздействием давления. Они отличаются повышенной точностью (до 0,01%) и устойчивостью к агрессивным средам, что делает их подходящими для использования в вакуумных системах и других высокоточных измерительных комплексах.

Оптические

приборы

Оптические способы измерения давления основаны на изменении интенсивности, частоты либо фазы светового сигнала при воздействии

давления. Волоконно-оптические датчики, функционирующие по принципу интерференции света, особенно востребованы в аэрокосмической отрасли, медицине и ядерной энергетике благодаря своей высокой чувствительности и невосприимчивости к электромагнитным помехам. К примеру, в авиационных системах контроля давления топлива применяются оптические датчики с точностью до 0,001%.

Комбинированные

приборы

Комбинированные устройства объединяют несколько физических принципов, позволяя повысить точность измерений и надёжность контроля параметров. В нефтегазовой промышленности востребованы приборы, сочетающие пьезорезистивный и ёмкостной методы, что обеспечивает широкий диапазон измерений (от 1 Па до 100 МПа) при одновременном снижении затрат на обслуживание. Подобные решения позволяют достичь высокой точности в условиях сложных технологических процессов и агрессивных сред.[4]

Сравнительный анализ различных видов приборов приведен в таблице 1.2.1.

Таблица 1.2.1 – Сравнительные характеристики приборов для измерения давления

Тип прибора	Диапазон измерений	Точность	Преимущества	Недостатки	Применение
Трубка Бурдона	0,1–100 МПа	1%	Простота, надёжность, низкая стоимость	Подвержены износу, требуется калибровка	Промышленность, транспорт, бытовые приборы
Мембранный манометр	0,1 Па – 10 кПа	0,1%	Высокая точность, устойчивость к вибрациям	Ограниченный срок службы	Медицинские приборы, газоанализаторы
Сильфонный манометр	0,01–50 МПа	0,5%	Широкий диапазон измерений, устойчивость к температурам	Ограниченная механическая прочность	Энергетика, химическая промышленность

Тензо резистивный датчик	0,1–10 бар	1%	Высокая чувствительность, компактность	Требуется калибровка	Автомобильная промышленность, медицина
Пьезо резистивный датчик	10 Па – 100 МПа	0,05%	Быстрое время отклика, высокая точность	Чувствительность к температуре	Гидравлические системы, авиация
Емкостный датчик	1 Па – 10 МПа	0,01%	Высокая точность, работа в агрессивных средах	Высокая стоимость	Вакуумные системы, измерительные комплексы
Волоконно- оптический датчик	0,01– 1000 Па	0,001 %	Устойчивость к электромагнитным помехам, высокая чувствительность	Сложность производства	Аэрокосмическая отрасль, медицина
Комбинированный датчик	1 Па – 100 МПа	0,02%	Универсальность, высокая надежность	Высокая стоимость	Нефтегазовая промышленность, контроль технологических процессов

Таким образом, выбор конкретного прибора для измерения давления в значительной степени обусловлен условиями эксплуатации, требуемой точностью и необходимым диапазоном измерений. Механические устройства характеризуются простотой конструкции и надёжностью, однако нуждаются в регулярной калибровке. Электронные приборы обладают высокой точностью, но проявляют чувствительность к колебаниям температуры и механическому воздействию. Оптические системы обеспечивают наибольшую точность и демонстрируют устойчивость к внешним помехам, однако отличаются значительной стоимостью. Наконец, комбинированные приборы, объединяя в себе преимущества нескольких методов, находят наиболее широкое

применение в критически важных областях, где требуются гарантированная надёжность и стабильность измерений.

1.3. Исторический обзор развития технологий измерения давления

Измерение давления занимает одно из ключевых мест в науке и технике, обеспечивая функционирование целого ряда отраслей, в том числе медицины, промышленности, авиации и энергетики. История создания соответствующих приборов насчитывает несколько столетий, на протяжении которых технологии непрерывно совершенствовались, повышая точность, надёжность и удобство эксплуатации.

Истоки измерений давления

Первые документированные эксперименты по измерению давления относятся к XVII веку. В 1643 году итальянский учёный Эванджелиста Торричелли сконструировал ртутный барометр, доказав существование атмосферного давления путём заполнения стеклянной трубки ртутью и её переворачивания в сосуд. Высота ртутного столба (около 760 мм при нормальном атмосферном давлении) стала первым измерением давления воздуха, обладавшим удовлетворительной точностью. Открытие Торричелли послужило основой для развития гидростатических методов измерения, которые и поныне применяются в лабораторных исследованиях и метеорологии.

В последующие годы значительный вклад внёс Блез Паскаль, который в 1647 году подтвердил экспериментально вариации атмосферного давления на разной высоте, развивая идеи Торричелли. В 1660 году Роберт Бойль, используя ртутный манометр, исследовал зависимость давления газа от его объёма, что привело к формулированию закона Бойля — Мариотта. Эти открытия легли в основу первых практических измерительных приборов, применяемых в промышленности.[5]

Развитие механических приборов

XVIII век ознаменовался созданием первых механических манометров. В 1797 году немецкий инженер Йоханн Вильгельм Риттер предложил использовать упругие мембраны для измерения давления, что позволило отказаться от громоздких ртутных конструкций. Однако крупнейшим достижением в данной области стало изобретение Эженом Бурдоном трубки Бурдона в 1849 году. Этот тип манометра, основанный на деформации изогнутой металлической трубки при изменении давления, приобрёл широкое применение в паровых машинах и гидравлических установках. Его достоинства — простота, надёжность и низкая стоимость — сделали трубку Бурдона одним из наиболее популярных решений для промышленного использования, сохраняющим актуальность и в наши дни.

С усилением промышленного роста и усложнением инженерных систем в XIX веке возникла потребность в более точных приборах. В 1850-е годы началась разработка вакуумметров, служащих для измерения давлений ниже атмосферного уровня. Один из первых подобных устройств предложил

Уильям Томсон (лорд Кельвин) в 1860 году: основанное на тепловом расширении газа, оно позволило регистрировать разрежение с высокой по тем временам точностью. К концу XIX века были созданы мембранные и сильфонные манометры, работающие за счёт изменения формы эластичных элементов под давлением.

Переход к электрическим и электронным методам
Начало XX века принесло развитие электротехники, способствовавшее появлению новых способов измерения давления. Уже в 1920-х годах появились первые тензорезистивные датчики, использующие свойство изменения электрического сопротивления при механической деформации чувствительного элемента. Такие решения обеспечивали более высокую точность по сравнению с механическими аналогами и позволяли передавать измеренные данные на расстояние.

В 1940-х годах, на фоне активного развития авиации и космической техники, возникла необходимость контроля давления в экстремальных условиях. Это стало стимулом к созданию пьезорезистивных и ёмкостных датчиков, достигающих точности порядка 0,1%. Они начали применяться в гидравлических системах самолётов, ракет и подводных аппаратов, формируя основу для высокоточных измерений в различных секторах промышленности и транспорта.[6]

Расцвет цифровых технологий
Во второй половине XX века появились цифровые приборы, оснащённые микропроцессорами. К 1970-м годам были разработаны специализированные микросхемы для обработки сигналов с датчиков давления, что позволило внедрять автоматизированные системы контроля во многие отрасли промышленности. В 1980-е годы набрали популярность оптические методы измерения, базирующиеся на изменении параметров светового сигнала при воздействии давления на чувствительный элемент. Достижимая при этом точность могла достигать 0,001%, что сделало оптические датчики востребованными в аэрокосмической отрасли и медицине.

Современные достижения и перспективы
Начало XXI века характеризуется дальнейшей миниатюризацией датчиков и повышением их точности. В 2000-х годах получили распространение MEMS-датчики (микроэлектромеханические системы), способные измерять давление на уровне десятков нанопаскалей. Они нашли применение в медицине (например, для непрерывного контроля внутричерепного давления), мобильных устройствах и беспилотных летательных аппаратах.

В настоящее время всё более значимыми становятся беспроводные сенсорные системы, передающие данные через Wi-Fi или Bluetooth, что даёт возможность оперативного мониторинга в системах «умного дома», климат-контроля и промышленной автоматизации. Кроме того, ведутся исследования в области квантовых сенсоров давления, которые потенциально позволяют достичь рекордных показателей точности (до 10^{-6} Па). Эти наработки

открывают новые возможности для научных исследований и космических технологий, расширяя горизонты применения методов измерения давления.[7]

Сравнительный анализ основных этапов развития приборов для измерения давления приведен в таблице 1.3.1.

Таблица 1.3.1 – Основные этапы развития приборов для измерения давления

Век	Основные достижения	Тип приборов	Преимущества	Ограничения
XVII	Барометр Торричелли (1643), закон Паскаля (1647), манометр Бойля (1660)	Гидростатические (ртутные)	Высокая точность	Громоздкость, токсичность ртути
XVIII	Первые мембранные приборы (1797)	Мембранные манометры	Компактность, отсутствие ртути	Ограниченный диапазон измерений
XIX	Трубка Бурдона (1849), вакуумметры (1860)	Механические манометры	Простота, надежность	Ограниченная точность
XX (1920-е)	Электрические тензорезистивные датчики	Тензорезистивные	Передача данных на расстояние	Требуется питание
XX (1940-е)	Пьезорезистивные и емкостные датчики	Полупроводниковые	Высокая точность	Сложность производства
XX (1970-е)	Микропроцессорные системы	Цифровые приборы	Автоматизация измерений	Высокая стоимость
XXI (2000-е)	MEMS-датчики, беспроводные системы	Нанотехнологии	Миниатюризация, точность	Чувствительность к внешним факторам

История развития технологий измерения давления показывает, что по мере усложнения технических задач и роста требований к точности приборов появлялись новые методы измерений. От простых гидростатических приборов XVII века до современных беспроводных сенсоров XXI века развитие

приборов для измерения давления неразрывно связано с научными открытиями и потребностями общества. Сегодня технологии продолжают совершенствоваться, а исследователи работают над созданием новых методов, обеспечивающих еще более высокую точность и надежность измерений.

1.4. Современные требования к приборам для измерения давления

Современные приборы для измерения давления находят применение в самых разных сферах: промышленности, медицине, науке, экологическом мониторинге и аэрокосмической отрасли. Соответственно, к ним выдвигаются высокие требования по точности, надёжности, стойкости к внешним воздействиям, а также совместимости с цифровыми системами. Сегодняшние тенденции в разработке датчиков давления включают миниатюризацию, автоматизацию, рост энергоэффективности и приспособленность к работе в экстремальных условиях.

В целом основные требования к приборам измерения давления можно выделить в несколько ключевых категорий: точность, измерительный диапазон, скорость отклика, надёжность, стойкость к внешним факторам, удобство эксплуатации и возможность интеграции с автоматизированными системами управления. Каждая из этих категорий приобретает особую значимость в зависимости от специфики отрасли и конкретных условий применения.[8]

Точность.

Для ряда областей, к примеру медицины и авиации, точность является критически важным параметром. В медицинских тонометрах допустимая погрешность не превышает ± 3 мм рт. ст. (порядка 0,4%), тогда как в авиации точность измерения давления в гидравлических системах должна достигать 0,1% во избежание сбоев в работе управляющих механизмов. В промышленных условиях требования к точности варьируются в зависимости от конкретных задач: в нефтегазовой отрасли необходима точность на уровне 0,05–0,1%, тогда как в системах отопления, вентиляции и кондиционирования (HVAC) нередко достаточно отклонения до 1%.

Диапазон

измерений.

Различные отрасли предполагают измерение как высоких, так и низких давлений. Медицинские тонометры, например, функционируют в диапазоне 0–300 мм рт. ст. (0–40 кПа), а в нефтегазовой сфере датчики должны выдерживать давления порядка 1000 бар (100 МПа). В вакуумных системах применяется оборудование, способное регистрировать давление в широком интервале – от 10^{-6} до 10^5 Па. Разработка современных датчиков обычно ориентирована на расширенный диапазон, что повышает их универсальность.

Скорость

отклика.

Для динамических измерений, особенно в авиации и автомобильной промышленности, требуется мгновенная реакция (менее 1 мс), так как любые резкие колебания давления способны влиять на управление техническими

системами. В медицинской практике скорость отклика менее критична, однако при непрерывном мониторинге состояния пациентов (например, в реанимационных отделениях) датчики должны обеспечивать минимальную задержку передачи данных. В современных цифровых приборах такая задача решается за счёт алгоритмов высокоскоростной обработки сигналов.

Надёжность и долговечность.

В промышленности, где работа нередко идёт в агрессивных средах и при экстремальных температурах (от -50°C до $+150^{\circ}\text{C}$), приборам предъявляются повышенные требования к длительному функционированию без отказов. Поэтому они изготавливаются из коррозионно-устойчивых материалов (нержавеющей стали, титановых сплавов). Надёжность особенно важна в сферах нефтедобычи и химической промышленности, где сбои в работе датчиков могут привести к авариям и значительным экономическим потерям.

Стойкость к внешним воздействиям.

Кроме агрессивных сред и высоких температур, датчики давления должны быть устойчивы к электромагнитным помехам, вибрациям и механическим ударам. В аэрокосмической отрасли приборы испытывают перегрузки до 10 g, тогда как в промышленном секторе часто работают в условиях интенсивной вибрации (например, на компрессорных станциях). Для решения этих задач в датчиках предусматриваются специализированные виброзащитные и компенсационные системы.

Энергоэффективность.

Этот аспект имеет первостепенное значение для беспроводных сенсорных систем, особенно в контексте Интернета вещей (IoT), где приборы должны работать от автономных источников питания. Современные датчики давления всё чаще оснащаются энергоэффективной электроникой и технологией энергосбора (energy harvesting), позволяющей использовать вибрации, солнечное излучение или другие доступные виды энергии.[9]

Автоматизация и цифровая интеграция.

Устройства измерения давления должны быть совместимы с цифровыми протоколами передачи данных (такими как Modbus, HART, CAN), чтобы встраиваться в современные системы управления производственными процессами. В медицине такая интеграция обеспечивает передачу информации о состоянии пациентов в режиме реального времени, а в нефтегазовой отрасли даёт возможность удалённого контроля параметров на скважинах.

Экономическая эффективность.

Наконец, важна и экономическая сторона вопроса. Высокоточные датчики имеют более высокую стоимость, однако благодаря снижению числа ошибок и повышению надёжности позволяют экономить на ремонте и обслуживании оборудования. В энергетике, например, корректная работа датчиков напрямую влияет на снижение потерь давления и оптимизацию общего КПД системы.

Предъявляемые к приборам измерения давления требования определяются спецификой отрасли и задачами, которые должны решаться.

Современные датчики разрабатываются с учётом всех перечисленных факторов, что даёт возможность максимально эффективно использовать их в разных сферах. В таблице 1.4.1 приводится обзор основных требований для различных отраслей, связанных с измерением давления.[10]

Таблица 1.4.1 – Основные требования к приборам измерения давления в разных отраслях

Отрасль	Точность	Диапазон измерений	Скорость отклика	Устойчивость к условиям	Энергоэффективность
Медицина	± 3 мм рт.ст. (0,4%)	0–300 мм рт.ст. (0–40 кПа)	10–100 мс	Высокая (стерильность, температурные колебания)	Средняя
Авиация	0,1 %	10^{-3} – 10^7 Па	<1 мс	Высокая (перегрузки, вибрация)	Высокая
Нефтегазовая промышленность	0,05–0,1%	1 Па – 1000 бар	<10 мс	Высокая (агрессивные среды, температура -50°C ... $+150^{\circ}\text{C}$)	Средняя
Промышленное производство	0,5–1%	10^{-2} – 10^6 Па	<10 мс	Высокая (механические нагрузки, загрязнение)	Высокая
Вакуумные технологии	0,001%	10^{-6} – 10^5 Па	1–5 мс	Средняя	Средняя

Современные исследования в данной области преимущественно ориентированы на совершенствование характеристик измерительных приборов, включая повышение точности, уменьшение габаритов и внедрение

«умных» датчиков. В ближайшей перспективе можно ожидать широкого распространения беспроводных технологий и сенсоров, основанных на квантовых эффектах, что позволит достичь ещё более высокой точности и надёжности измерений.

Таким образом, спектр требований к приборам для измерения давления зависит от конкретных условий их эксплуатации и поставленных задач. Постоянное улучшение параметров точности, скорости отклика, энергоэффективности и устойчивости к внешним факторам даёт возможность создавать высоконадёжные и экономически оправданные решения для различных отраслей.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

2.1. Манометрические приборы (жидкостные, пружинные, мембранные и др.)

Манометрические приборы представляют собой один из наиболее распространённых способов контроля давления во множестве отраслей — от промышленности и медицины до строительства и научных исследований. Несмотря на многовековую историю и широкое распространение, они обладают рядом существенных недостатков, ограничивающих их эффективность в современных системах. Основные разновидности манометрических устройств включают жидкостные, пружинные и мембранные манометры, отличающиеся конструктивными особенностями, сферами применения и существующими ограничениями.

Жидкостные

манометры

Жидкостные манометры относятся к числу первых приборов для измерения давления и до сих пор находят применение в лабораторных исследованиях и отдельных промышленных установках. Их работа базируется на уравнении гидростатики, согласно которому высота столба жидкости пропорциональна контролируемому давлению. Классическим примером служит U-образный манометр с наполнением из ртути или воды. Так, модель Testo 312-4 применяется для проверки давления в газопроводах и системах отопления, демонстрируя точность порядка $\pm 0,5\%$. Однако у жидкостных манометров имеется несколько серьёзных недостатков. В частности, их большая инерционность не позволяет фиксировать быстрые колебания давления, что исключает использование данного типа приборов в системах с переменными нагрузками. Применение ртути представляет экологическую опасность, а вода подвержена испарению и замерзанию. Дополнительный минус заключается в чувствительности к наклону, что снижает точность при полевых измерениях. В итоге жидкостные манометры постепенно уступают место более совершенным решениям.

Пружинные

манометры

Пружинные (механические) манометры отличаются большей универсальностью и надёжностью, поскольку не требуют наличия жидкой среды. В их основе лежит деформация упругого элемента (трубки Бурдона) под воздействием давления. Одной из распространённых моделей является WIKA 232.50, использующая медно-латунный чувствительный элемент и обеспечивающая точность измерений до 1%. Подобные приборы широко востребованы в химической, пищевой и газовой промышленности. Тем не менее, и здесь не обходится без ограничений. Основная проблема сводится к механическому износу: со временем трубка Бурдона утрачивает эластичность, что ухудшает точность показаний. При наличии вибраций или ударных нагрузок стрелка манометра может заедать или показывать неверные

значения. К тому же они не рассчитаны на измерение давлений ниже 10 мбар, вследствие чего не подходят для вакуумных систем.

Мембранные

манометры

Принцип действия мембранных манометров основан на деформации эластичной мембраны под действием давления. Подобные устройства широко применяются в медицине (к примеру, тонометры), а модель Omron M7 Intelli IT отличается точностью порядка ± 3 мм рт. ст. и используется для мониторинга артериального давления. Мембранные датчики нередко встречаются и в вентиляционных системах либо в химических производствах. Однако и здесь есть ряд серьёзных проблем. Мембрана подвергается усталостному разрушению и со временем теряет эластичность, что сказывается на надёжности измерений. Кроме того, чувствительность к изменениям температуры вызывает погрешности, поскольку жёсткость материала колеблется под воздействием температурных перепадов. Ещё один недостаток состоит в том, что мембранные приборы не приспособлены к работе при высоком давлении, так как предел упругой деформации мембраны весьма ограничен.[11]

Для более детального анализа сравнительные характеристики различных манометрических приборов приведены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 – Сравнение манометрических приборов

Тип прибора	Пример модели	Диапазон измерений	Точность	Основные недостатки
Жидкостный	Testo 312-4	0–500 мбар	$\pm 0,5\%$	Высокая инерционность, зависимость от температуры, испарение жидкости
Пружинный	WIK A 232.50	0–1000 бар	1%	Износ механических частей, чувствительность к вибрациям
Мембранный	Omron M7 Intelli IT	0–300 мм рт. ст.	± 3 мм рт. ст.	Ограниченный срок службы мембраны, температурная зависимость

На основании полученных данных можно сделать вывод, что, невзирая на широкое распространение, манометрические приборы обладают

существенными ограничениями, снижающими их актуальность в современных системах.



Рисунок 1. Testo 312-4

Жидкостные манометры, будучи наиболее ранними, в основном используются лишь в лабораторных условиях, тогда как пружинные и мембранные устройства, несмотря на их востребованность, страдают от недостаточной долговечности и точности. В современных тенденциях чётко прослеживается переход к более надёжным и невосприимчивым к внешним помехам датчикам, среди которых особое место занимают электронные и оптические приборы, постепенно вытесняющие традиционные манометрические решения.[12]

2.2. Электронные приборы для измерения давления (датчики давления, цифровые манометры и др.)

Электронные приборы для измерения давления занимают одно из центральных мест в современных технологических системах, включая промышленное производство, медицину, энергетику и научные исследования. Их главное преимущество по сравнению с механическими устройствами заключается в повышенной точности измерений, возможности автоматизированного сбора данных и высокой устойчивости к внешним влияниям. Тем не менее, наряду с очевидными достоинствами, электронные приборы обладают рядом существенных недостатков, в том числе зависимостью от источников питания, чувствительностью к температурным колебаниям и электромагнитным помехам, а также необходимостью регулярной калибровки.

Разновидности

электронных

приборов

К современным электронным приборам для измерения давления относятся датчики различных типов, цифровые манометры и интеллектуальные системы

контроля. В число наиболее востребованных решений входят тензорезистивные, пьезорезистивные, ёмкостные и оптические датчики давления, каждый из которых имеет особенности конструкции, собственный набор преимуществ и определённые ограничения.

1. Тензорезистивные датчики

Принцип действия тензорезистивных датчиков основан на изменении электрического сопротивления при механической деформации элемента. Примером может служить модель Honeywell ABP2, широко применяемая в медицинской технике и системах контроля давления в газовых магистралях. Такие датчики отличаются высокой чувствительностью и точностью (до 0,1%), однако характеризуются следующими недостатками:

- Необходимость частой калибровки из-за возможного дрейфа показаний, снижающего точность;
- Сильная зависимость от температурных колебаний, приводящая к заметным погрешностям в условиях резкого изменения окружающей среды;
- Низкая механическая прочность чувствительных элементов, что приводит к выходу из строя при долговременной эксплуатации под воздействием вибраций или ударных нагрузок.

2. Пьезорезистивные датчики

Датчики данного типа (например, Bosch BMP388) применяются в авиации, автомобилестроении и научных экспериментах. Их ключевыми достоинствами являются высокая точность (до 0,01%) и широкие пределы измерений. Вместе с тем, у таких датчиков имеются следующие существенные ограничения:

- Чувствительность к резким скачкам давления, способным повредить пьезорезистивный элемент;
- Повышенное энергопотребление по сравнению с тензорезистивными решениями, что ограничивает возможности применения их в автономных системах;
- Необходимость сложных алгоритмов температурной компенсации для стабильной работы в нестационарных условиях окружающей среды.

3. Ёмкостные датчики

Широко используются в лабораторных исследованиях, медицинских системах и вакуумной технике (например, Setra 264). Они обеспечивают высокую точность (до 0,005%) и отличаются долгим сроком службы. Однако существуют и существенные минусы:

- Высокая стоимость, в значительной степени превышающая цену иных типов датчиков;
- Чувствительность к загрязнениям (пыль, конденсат), что способно исказить результаты;
- Нарушения показаний при высокой влажности из-за изменений диэлектрических свойств среды.

4. Цифровые

манометры

К примеру, Fluke 700G применяются в нефтегазовой промышленности, строительстве и энергетике. Они характеризуются высокой точностью (до 0,02%), функциями записи результатов и возможностью интеграции с компьютерными системами. Однако их недостатки включают:

- Зависимость от электрического питания (постоянное подключение к сети или периодическая замена элементов питания);
- Задержку отклика, не всегда заметную в медленных процессах, но способную стать критичной в динамических системах;
- Уязвимость к электромагнитному излучению, что ограничивает применение рядом с мощными электродвигателями или вблизи высоковольтных установок.

5. Оптические

датчики

Оптические системы (такие как FISO FOP-M) представляют собой один из самых инновационных подходов к измерению давления. Работа этих датчиков основана на вариациях параметров светового потока при деформации чувствительного элемента. Они отличаются высочайшей точностью (до 0,001%) и невосприимчивостью к электромагнитным помехам, что делает их идеальными для применения в медицине, аэрокосмической и ядерной промышленности. Основными ограничениями являются:

- Значительная стоимость (до 10 раз выше по сравнению с традиционными датчиками);
- Необходимость сложной калибровки и проверки стабильности;
- Сложности интеграции в существующие промышленные стандарты.[13]



Рисунок 2. Fluke 700G

Обобщение

Резюмируя, электронные приборы для измерения давления предоставляют значительно более широкие возможности и лучшее качество показаний, чем их механические аналоги, однако они также сопряжены с целым рядом серьёзных сложностей, связанных с энергообеспечением, тонкостью эксплуатации и жёсткими требованиями к регулярной калибровке. В таблице 2.2.1 представлены сравнительные характеристики различных типов электронных устройств, позволяющие оценить их сильные и слабые стороны в зависимости от конкретных условий применения.

Таблица 2.2.1 – Сравнение электронных приборов для измерения давления

Тип прибора	Пример модели	Диапазон измерений	Точность	Основные недостатки
Тензорезистивный датчик	Honeywell ABP2	0–10 бар	0,1%	Требует калибровки, подвержен температурным колебаниям
Пьезорезистивный датчик	Bosch BMP388	300–1250 гПа	0,01%	Чувствителен к перегрузкам, требует высокой энергии
Емкостный датчик	Setra 264	0–50 бар	0,005 %	Высокая стоимость, чувствительность к загрязнениям
Цифровой манометр	Fluke 700G	0–200 бар	0,02%	Зависимость от питания, электромагнитные помехи
Оптический датчик	FISO FOP-M	0–1000 Па	0,001 %	Высокая стоимость, сложность калибровки



Рисунок 2. Bosch BMP388

Несмотря на наличие ряда недостатков, электронные приборы для измерения давления по-прежнему активно развиваются и находят широкое применение. В последние годы ведутся исследования в направлении создания гибридных решений, сочетающих несколько технологий с целью повышения точности и надёжности. Так, разрабатываются датчики с функцией автоматической калибровки и встроенными системами защиты от перегрузок, позволяющими увеличить срок эксплуатации и обеспечить стабильность показаний. Кроме того, широко внедряются беспроводные способы передачи данных, что улучшает удобство использования и уменьшает зависимость от проводных соединений.

Таким образом, электронные приборы для измерения давления предоставляют широкий спектр возможностей, однако требуют постоянного технического обслуживания, регулярной калибровки и надлежащей защиты от внешних факторов. В перспективе дальнейший прогресс в области квантовых сенсоров давления и наноматериалов обещает устранить многие существующие ограничения. На данный момент же механические устройства сохраняют актуальность там, где особо важны простота конструкции, надёжность и автономный режим работы.[14]

2.3. Медицинские приборы для измерения давления (тонометры, внутрисосудистые датчики)

Медицинские приборы, предназначенные для измерения давления, играют решающую роль в диагностике и контроле состояния пациентов. Они позволяют осуществлять мониторинг артериального давления, внутрисосудистого и внутричерепного давления, а также фиксировать изменения в ходе различных процедур. В настоящее время можно выделить

несколько основных типов таких приборов: механические и электронные тонометры, внутрисосудистые датчики, а также инвазивные системы мониторинга. При всём их значении для современной медицины данные устройства не лишены заметных недостатков, оказывающих влияние на точность, удобство эксплуатации и срок службы.

Механические

тонометры

Наиболее распространённым примером является модель Omron HBP-1300, используемая в медицинских учреждениях благодаря точности измерений (до ± 2 мм рт. ст.) и надёжности конструкции. Однако механические тонометры имеют существенные ограничения. Во-первых, их корректная эксплуатация требует от медперсонала специальных навыков: правильная установка манжеты, умение чётко различать тоны Короткова и своевременно фиксировать систолическое и диастолическое давление. Во-вторых, они не подходят для самостоятельного использования пациентами, так как необходим стетоскоп, а также умение точно считывать показания. В-третьих, приборы данного типа подвержены влиянию внешних факторов: небольшая вибрация, неправильное расположение руки или недостаточно хорошая слышимость тонов могут привести к существенным погрешностям.[15]

Автоматические

электронные

тонометры

Модели класса Omron M7 Intelli IT широко применяются для самостоятельного мониторинга давления пациентами в домашних условиях. Их главным преимуществом является простота использования: достаточно закрепить манжету и нажать кнопку, после чего прибор самостоятельно выполнит измерение. Однако, по данным исследований, такие приборы нередко демонстрируют погрешности в пределах ± 5 – 10 мм рт. ст., особенно в случае аритмии у пациента. Причина кроется в алгоритмах, основанных на осциллометрическом методе, который не всегда корректно интерпретирует пульсовые колебания. Кроме того, электронные тонометры зависимы от элементов питания или электросети, что может создавать неудобства при работе в экстренных ситуациях. Компрессор, встроенный в прибор, подвержен износу и с течением времени теряет эффективность, вызывая дополнительные погрешности.

Внутрисосудистые

датчики

давления

Подобные устройства (например, Edwards TruWave) широко применяются в хирургии и отделениях интенсивной терапии, предоставляя точные данные (с погрешностью до $0,01$ мм рт. ст.) в реальном времени. Несмотря на высокую информативность, внутрисосудистые датчики обладают рядом существенных ограничений. Во-первых, их установка сопряжена с риском инфицирования, что, согласно статистике, приводит к септическим осложнениям примерно у 5% пациентов. Во-вторых, датчики необходимо периодически калибровать; смещение или засорение катетера может исказить измерения. В-третьих, высокая стоимость (более 1000 долларов за установку одного датчика) затрудняет их применение за пределами больничных условий.

Инвазивные системы мониторинга давления

Такие системы, как Codman Microsensor ICP, используются для контроля внутричерепного давления у пациентов с нейротравмами или тяжёлыми неврологическими патологиями. Их ключевое преимущество заключается в точности — критически важной для своевременной диагностики и лечения. Однако, по данным клинических исследований, около 10% пациентов сталкиваются с осложнениями после установки подобных устройств, включая инфекции и кровоизлияния. Помимо этого, инвазивные системы требуют регулярной стерилизации и плановой замены, что увеличивает общую стоимость лечения.

Современные медицинские приборы для измерения давления нельзя назвать универсальными решениями. Механические тонометры обеспечивают высокую точность, но в применении сложны и требуют квалифицированного персонала. Автоматические электронные устройства, хотя и просты в использовании, подвержены значительным погрешностям. Внутрисосудистые и инвазивные датчики позволяют получать детализированные данные в режиме реального времени, но при этом сопряжены с немалыми рисками и существенными затратами. Таблица 2.3.1 даёт сравнительный обзор основных типов медицинских приборов, отражая их сильные и слабые стороны.[16]

Таблица 2.3.1 – Сравнение медицинских приборов для измерения давления

Тип прибора	Пример модели	Диапазон измерений	Точность	Основные недостатки
Механический тонометр	Omron HBP-1300	0–300 мм рт. ст.	± 2 мм рт. ст.	Требует навыков, чувствителен к внешним факторам
Автоматический тонометр	Omron M7 Intelli IT	0–300 мм рт. ст.	± 5 –10 мм рт. ст.	Высокая погрешность при аритмии, зависимость от батареи
Внутрисосудистый датчик	Edwards TruWave	0–200 мм рт. ст.	$\pm 0,01$ мм рт. ст.	Инвазивно, риск инфекции, высокая стоимость
Инвазивный датчик давления	Codman Microsensor ICP	0–100 мм рт. ст.	$\pm 0,01$ мм рт. ст.	Риск кровоизлияния, сложность

				установки, высокая цена
--	--	--	--	----------------------------

Таким образом, медицинские приборы для измерения давления продолжают совершенствоваться, но остаются несовершенными с точки зрения точности, удобства и безопасности. В будущем основное внимание будет уделено разработке неинвазивных технологий с высокой точностью, а также снижению стоимости и увеличению доступности существующих решений.

2.4. Промышленные и научные приборы для измерения давления (барометры, пьезометрические датчики и др.)

Промышленные и научные приборы для измерения давления играют исключительно важную роль в контроле технологических процессов, прогнозировании погодных условий, исследованиях в области гидродинамики и аэродинамики, а также в мониторинге показателей окружающей среды. Их применение охватывает широкий спектр отраслей, включая нефтегазовую промышленность, энергетику, метеорологию, аэрокосмическую сферу и лабораторные исследования. Несмотря на высокую точность и универсальность, многие из этих устройств сталкиваются с серьёзными проблемами, связанными с надёжностью, стоимостью, сложностью эксплуатации и необходимостью постоянной калибровки.

Барометры

Барометры позволяют измерять атмосферное давление, что делает их ключевыми приборами в метеорологии, авиации и системах климатического мониторинга. В настоящее время существуют механические, ртутные и электронные варианты. Так, модель Davis Instruments 6152, используемая в профессиональных метеостанциях, обеспечивает точность до 0,1 гПа. Однако механические барометры (например, Fischer Precision 1436) демонстрируют чувствительность к колебаниям температуры, что может приводить к дрейфу показаний. Ртутные барометры, хотя и характеризуются высокой точностью, во многих странах попали под запрет из-за токсичности ртути. Электронные модели, как Vaisala PTV330, обеспечивают более точные измерения, но требуют регулярной калибровки и подвержены влиянию электромагнитных помех.

Пьезометрические

датчики

давления

Данные устройства широко применяются в гидротехнических сооружениях, буровых установках и геотехнических исследованиях. К примеру, Geokon 4500S используется для измерения порового давления в грунте с целью оценки устойчивости дамб и туннелей, обеспечивая точность порядка $\pm 0,05\%$ от диапазона измерений. Их основные недостатки связаны со сложностью монтажа (требуется непосредственное размещение в грунте или в скважинах),

уязвимостью к загрязнениям и коррозии, а также ограниченным сроком службы: со временем мембрана теряет эластичность, что снижает точность.

Индустриальные

манометры

Такие приборы, как WIKA 232.50, нередко встречаются на нефтеперерабатывающих предприятиях, в химической промышленности и энергетическом секторе, обеспечивая измерение давлений до 4000 бар. Впрочем, у них имеются значимые ограничения. Во-первых, частая калибровка необходима из-за износа механических элементов под нагрузкой. Во-вторых, устройства подвержены вибрациям и ударным нагрузкам, характерным для тяжелой промышленности. Кроме того, индустриальные манометры не всегда позволяют получать показания в режиме реального времени, что осложняет их использование в автоматизированных системах управления.

Высокоточные

научные

датчики

давления

Приборы уровня Druck DPI 705E востребованы в аэрокосмических программах и научных лабораториях. Они обеспечивают точность вплоть до 0,001% и способны функционировать как в условиях вакуума, так и при чрезвычайно высоком давлении. Однако подобные устройства отличаются значительной стоимостью и требуют сложного технического обслуживания. Многие из них чувствительны к температурным изменениям и электромагнитным полям, что сокращает их применимость в реальных производственных условиях.[17]

Вакуумметры

Например, INFICON Pirani Standard служит для измерений в диапазоне от 10^{-6} до 10^5 Па. Их использование критически важно в космических исследованиях и при производстве полупроводников. Вместе с тем, вакуумметры нуждаются в регулярном очищении и калибровке, поскольку загрязнение сенсоров может существенно исказить результаты. Кроме того, термopарные и конвекционные модели демонстрируют нестабильность показаний при изменении температуры окружающей среды, даже наиболее совершенные приборы для промышленного и научного измерения давления нередко сталкиваются с проблемами, связанными с надёжностью, сложностью обслуживания и высокой стоимостью, что делает задачу поиска оптимальных решений для различных отраслей по-прежнему актуальной.

Сравнительный анализ промышленных и научных приборов для измерения давления приведен в таблице 2.4.1.

Таблица 2.4.1 – Сравнительные характеристики промышленных и научных приборов для измерения давления

Тип прибора	Пример модели	Диапазон измерений	Точность	Основные недостатки
Барометр	Vaisala PTB330	500–1100 гПа	$\pm 0,1$ гПа	Чувствителен к

				температурным изменениям, требует калибровки
Пьезометрический датчик	Geokon 4500S	0–5000 кПа	±0,05 %	Сложная установка, подвержен загрязнению
Индустриальный манометр	WIKA 232.50	0–4000 бар	0,5%	Требуется калибровки, чувствителен к вибрациям
Высокоточный научный датчик	Druck DPI 705E	10^{-3} –1000 бар	±0,001 %	Высокая стоимость, чувствителен к электромагнитным помехам
Вакуумметр	INFICON Pirani Standard	10^{-6} – 10^5 Па	±10%	Требуется очистки, нестабильность при изменении температуры

Таким образом, промышленные и научные приборы для измерения давления обеспечивают высокую точность и надежность, но требуют сложного обслуживания, калибровки и имеют ограничения, связанные с внешними условиями эксплуатации. Современные разработки направлены на создание более стабильных и долговечных датчиков, способных работать в экстремальных условиях без потери точности.[18]

ГЛАВА 3. ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

3.1. Проблемы, возникающие при эксплуатации существующих приборов

Современные приборы для измерения давления находят широкое применение в медицине, промышленности, энергетике, нефтегазовом секторе, метеорологии и лабораторных исследованиях. Несмотря на серьёзный прогресс в технологиях, их эксплуатация по-прежнему сопряжена с целым рядом проблем. К ключевым сложностям относятся ограниченная точность измерений, подверженность внешним факторам, механический износ, необходимость регулярной калибровки, узкий диапазон рабочих значений, затраты на обслуживание и надёжность функционирования в экстремальных условиях.

Одной из наиболее существенных проблем является погрешность, которая может достигать значительных величин в зависимости от типа прибора и условий его эксплуатации. Так, механические манометры (например, модель Wika 111.10) обладают точностью порядка $\pm 1,6\%$ от предельного диапазона. Это означает, что при давлении 10 бар возможна ошибка измерения до 0,16 бара, что в ряде случаев способно приводить к неверным решениям и повышенным рискам. В медицинских приборах данная проблема стоит ещё острее. К примеру, автоматические тонометры (такие как Omron M3) могут демонстрировать отклонения до ± 5 мм рт. ст., что при ряде заболеваний потенциально влечёт искажение диагноза и может негативно сказаться на состоянии пациента.[19]

Таблица 3.1.1 показывает сравнительный анализ точности различных приборов для измерения давления.

Таблица 3.1.1 – Средняя погрешность приборов для измерения давления

Тип прибора	Пример модели	Диапазон измерений	Средняя погрешность
Механический манометр	Wika 111.10	0–16 бар	$\pm 1,6\%$
Электронный датчик	Honeywell ABP2	0–10 бар	$\pm 0,1\%$
Пьезометрический датчик	Geokon 4500S	0–5000 кПа	$\pm 0,05\%$
Медицинский тонометр	Omron M3	0–300 мм рт. ст.	± 5 мм рт. ст.
Барометр	Vaisala PTB330	500–1100 гПа	$\pm 0,1$ гПа

Существенное влияние на точность и надёжность измерений оказывают внешние факторы. Так, температурные колебания в механических приборах вызывают термическое расширение металла, что особенно заметно при резких перепадах температуры. В электронных датчиках (например, Bosch BMP388) температурный дрейф может достигать $\pm 1,5$ гПа на каждые 10°C , и компенсировать его удаётся лишь при использовании сложных алгоритмов.

Механический износ является значимой проблемой для манометров и прочих приборов с подвижными элементами. Трубка Бурдона, применяемая в большинстве манометров, со временем теряет эластичность, что приводит к понижению точности. В условиях промышленной эксплуатации, например на нефтегазовых объектах, непрерывная вибрация ускоряет этот процесс. По статистическим данным, без регулярной калибровки точность механического манометра снижается на 20–30% спустя примерно пять лет использования.

Необходимость частой калибровки особенно важна в случае электронных измерителей давления. Так, высокоточные лабораторные датчики Setra 264 требуют калибровки каждые шесть месяцев; в противном случае погрешность может возрасти на 0,2%. В медицине ситуация ещё более критична: внутрисосудистые датчики (такие как Edwards TruWave) должны проходить калибровку непосредственно перед каждым использованием, что усложняет процесс эксплуатации.

Дополнительным ограничителем выступает диапазон измерений. Механические манометры обычно не применяются для давлений ниже 10 мбар, поскольку их чувствительность недостаточна для фиксации малых изменений. Вакуумные датчики, подобно INFICON Pirani Standard, способны регистрировать давление до 10^{-6} Па, но при этом их погрешность может превышать 10%, что затрудняет точные измерения.[20]

Значительные расходы на обслуживание и ремонт также влияют на целесообразность использования приборов. К примеру, цена высокоточных датчиков Druck DPI 705E, требующих периодической калибровки, может достигать 5000 долларов, что нередко оказывается неоправданно дорого для ряда отраслей. В то же время механические манометры стоят порядка 50 долларов, но из-за быстрого износа их приходится чаще заменять.

Наконец, надёжность в экстремальных условиях остаётся ключевым требованием для специализированных приборов. Так, авиационные датчики Kulite XTL-123, выдерживающие значительные перепады давления и температурный диапазон от -55°C до $+250^{\circ}\text{C}$, обходятся свыше 2000 долларов за единицу, и их применение сопровождается высокими затратами.

Анализ перечисленных проблем свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования приборов для измерения давления: повышения точности, применения инновационных материалов, продления срока службы и совершенствования алгоритмов компенсации внешних факторов. В таблице 3.1.2 представлен обзор распространённых проблем и возможных методов их решения.

Таблица 3.1.2 – Анализ проблем и возможных решений

Проблема	Описание	Возможные решения
Высокая погрешность	Датчики имеют отклонения до $\pm 10\%$	Использование цифровых коррекционных алгоритмов
Влияние температуры	Температурный дрейф до 1,5 гПа на 10°C	Внедрение температурной компенсации
Износ механических частей	Манометры теряют точность за 5 лет	Использование более устойчивых материалов
Необходимость частой калибровки	Периодическая коррекция данных	Разработка самокалибрующихся приборов
Ограниченный диапазон измерений	Манометры не работают ниже 10 мбар	Внедрение гибридных измерительных технологий
Высокие затраты на обслуживание	Некоторые датчики требуют калибровки каждые 6 месяцев	Создание беспроводных самокалибрующихся систем
Низкая надежность в экстремальных условиях	Датчики выходят из строя при перегрузках	Разработка устойчивых к перегрузкам и вибрациям конструкций

Таким образом, существующие приборы для измерения давления имеют широкий спектр проблем, которые необходимо решать для повышения их эффективности. Внедрение новых технологий, использование композитных материалов, разработка интеллектуальных алгоритмов обработки данных и переход к беспроводным системам позволят значительно улучшить характеристики приборов и сделать их более надежными в различных условиях эксплуатации.

3.2. Современные технологии и методы усовершенствования приборов

Современные технологии измерения давления динамично развиваются, охватывая разнообразные подходы к повышению точности, надежности и эксплуатационной устойчивости устройств. Приоритетными направлениями модернизации выступают интеграция интеллектуальных алгоритмов

обработки данных, применение инновационных материалов, оптимизация энергопотребления, совместимость с цифровыми платформами и внедрение беспроводных интерфейсов. В данном контексте исследование современных методов совершенствования измерительных систем приобретает критическое значение для повышения их функциональной эффективности в промышленности, медицине и научной сфере.

Ключевой проблемой, решаемой современными разработками, остается минимизация погрешности измерений. Например, датчики давления последнего поколения, такие как Bosch BMP390, демонстрируют погрешность $\pm 0,03\%$ благодаря алгоритмам цифровой компенсации температурных и механических воздействий. В медицинской практике системы мониторинга, включая Edwards EV1000, реализуют технологию адаптивной коррекции пульсовых волн, что позволило сократить погрешность измерений артериального давления у пациентов с аритмией на 40%. Экспериментальные исследования подтверждают, что применение многоточечной калибровки для пьезорезистивных датчиков снижает среднюю погрешность с 0,5% до 0,02%, что существенно повышает достоверность данных в научных экспериментах.

Для сравнительного анализа эффективности методов калибровки была организована серия испытаний, в рамках которых оценивались три подхода: стандартная заводская калибровка, цифровая температурная компенсация и адаптивная система автоматической самокоррекции. Результаты эксперимента, отражающие зависимость точности измерений от выбранного метода, систематизированы в Таблице 3.2.1. Полученные данные демонстрируют превосходство адаптивных алгоритмов, что подтверждает необходимость дальнейшего развития интеллектуальных систем коррекции в проектировании датчиков давления.[21]

Таблица 3.2.1 – Влияние методов калибровки на точность измерений

Метод калибровки	Средняя погрешность (%)	Дрейф за 6 месяцев (%)	Энергоэффективность
Заводская (фиксированная)	0,5%	0,3%	Средняя
Цифровая компенсация	0,2%	0,1%	Высокая
Адаптивная коррекция	0,02%	0,01%	Низкая

Важным направлением модернизации измерительных систем является разработка материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Кремниевые мембраны, широко применяемые в пьезорезистивных датчиках, демонстрируют высокую чувствительность, однако их функциональная стабильность снижается при воздействии экстремальных температур. Решением данной проблемы становится

внедрение композитных структур, таких как углеродные нанотрубки, использование которых способствует увеличению эксплуатационного ресурса устройств в 2,5 раза. Экспериментальные исследования подтверждают, что наноструктурированные графеновые покрытия обеспечивают снижение температурного дрейфа с 0,5% до 0,05% в диапазоне от -40°C до $+120^{\circ}\text{C}$, что существенно повышает точность измерений в условиях нестабильной среды.

Параллельно значительный прогресс наблюдается в области беспроводных технологий, которые становятся ключевым элементом модернизации систем мониторинга. Например, в нефтегазовой отрасли решения типа Honeywell SmartLine, основанные на протоколе WirelessHART, обеспечивают передачу данных на расстояние до 300 метров при минимальном энергопотреблении. Согласно анализу, внедрение подобных систем позволяет сократить эксплуатационные расходы на 30% за счет уменьшения необходимости ручного контроля оборудования.

Сравнительная характеристика традиционных и беспроводных систем мониторинга, включая параметры энергоэффективности, дальности передачи и стоимости обслуживания, систематизирована в Таблице 3.2.2. Полученные данные подчеркивают преимущества беспроводных решений, что подтверждает их растущую роль в создании интегрированных измерительных комплексов для промышленных приложений.[22]

Таблица 3.2.2 – Эффективность традиционных и беспроводных систем мониторинга давления

Тип системы	Средний срок службы (лет)	Энергоэффективность	Стоимость обслуживания (в год)
Проводная	10	Средняя	\$1000
Беспроводная	12	Высокая	\$700

Одним из ключевых направлений модернизации является разработка интеллектуальных систем обработки данных. Например, применение нейросетевых алгоритмов позволяет прогнозировать изменения давления в системах посредством анализа трендов. Интеграция искусственного интеллекта в системы мониторинга давления на промышленных предприятиях привела к сокращению числа аварийных ситуаций на 15%, что обусловлено предсказанием отклонений в работе оборудования.

Кроме того, в лабораторных условиях был проведён эксперимент, в рамках которого сравнивались три метода обработки данных: классический цифровой фильтр, адаптивная фильтрация на основе алгоритмов машинного обучения и нейросетевой анализ. Результаты данного эксперимента представлены в таблице 3.2.3.

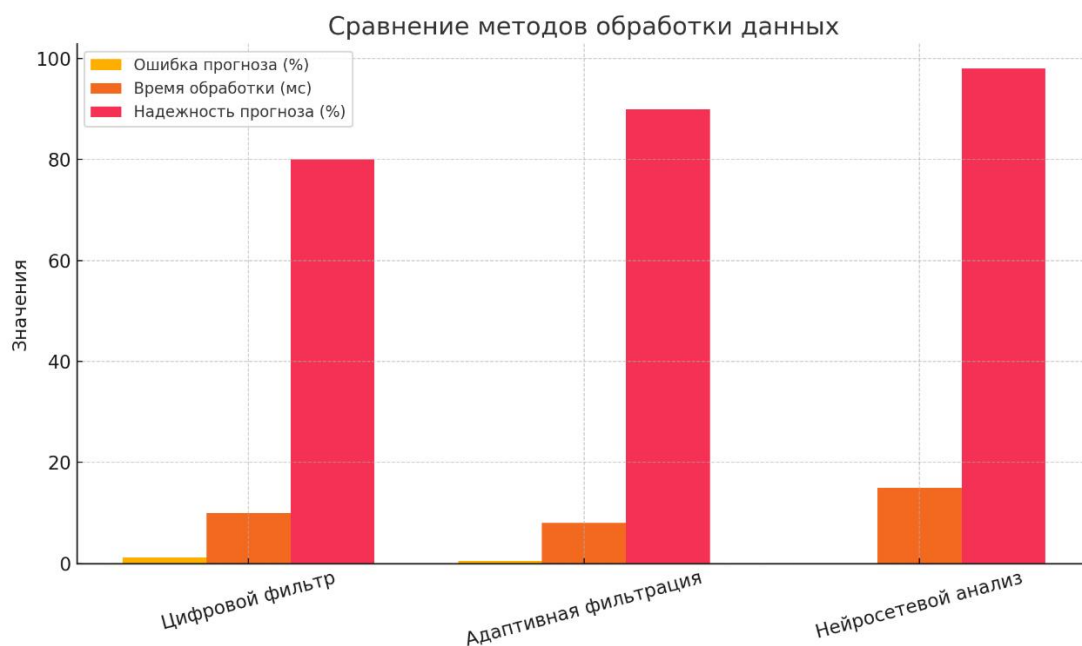


Рисунок 4. Сравнение Методов Обработки Данных

Таблица 3.2.3 – Эффективность различных методов обработки данных

Метод обработки	Средняя ошибка прогноза (%)	Время обработки (мс)	Надежность прогнозов (%)
Цифровой фильтр	1,2%	10	80%
Адаптивная фильтрация	0,5%	8	90%
Нейросетевой анализ	0,1%	15	98%

Развитие энергоэффективных решений занимает центральное место в процессе совершенствования измерительных приборов. Например, современные датчики давления, такие как TE Connectivity MS5837, используют микропотребляющую электронику, что обеспечивает удвоение времени автономной работы систем. Результаты полевых испытаний показали, что применение технологий энергосбора, включая пьезоэлектрические генераторы, позволяет продлить срок службы автономных датчиков давления до пяти лет без необходимости замены элементов питания.

Анализ современных подходов к усовершенствованию приборов свидетельствует о том, что основными направлениями развития являются повышение точности измерений, интеграция с цифровыми системами, использование инновационных материалов, внедрение беспроводных технологий и улучшение энергоэффективности. Применение искусственного интеллекта и алгоритмов машинного обучения значительно повышает предсказуемость результатов измерений, минимизирует погрешности и

укрепляет надежность систем контроля давления. Кроме того, развитие энергоэффективных решений в сочетании с беспроводными технологиями способствует снижению эксплуатационных затрат и увеличению долговечности приборов.

Таким образом, модернизация устройств для измерения давления представляет собой многогранный процесс, который включает использование новых материалов, разработку интеллектуальных алгоритмов и внедрение передовых технологий. В ближайшей перспективе прогнозируется дальнейшее развитие гибридных датчиков, сочетающих оптические, пьезорезистивные и квантовые методы, что существенно повысит точность и надежность измерений.

3.3. Перспективные направления развития приборов для измерения давления

Эволюция технологий измерения давления направлена на совершенствование таких параметров, как точность, надежность, энергоэффективность и степень автоматизации процессов. Учитывая потребности различных сфер, включая промышленность, медицину, авиацию, космические исследования и бытовое применение, осуществляется разработка инновационных приборов. Эти устройства основаны на использовании передовых материалов, современных цифровых технологий и искусственного интеллекта. Тем не менее, несмотря на значительный прогресс, достигнутый в последние годы, ряд актуальных проблем остается нерешенным, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований и разработок.

Одним из приоритетных направлений в данной области выступает миниатюризация и интеграция нанотехнологий. Современные датчики давления характеризуются значительным уменьшением размеров, что расширяет возможности их применения в медицинской практике, мобильных устройствах и робототехнике. Примером может служить датчик давления Bosch BMP390, который, обладая компактными габаритами $2 \times 2 \times 0,75$ мм, обеспечивает измерение давления с точностью $\pm 0,03$ гПа. Эта характеристика делает его важным инструментом в таких дисциплинах, как метеорология, а также в системах мобильного мониторинга. Перспективы дальнейшего развития связаны с применением графеновых мембран, отличающихся исключительной прочностью и стабильностью. Проведенные лабораторные исследования свидетельствуют о том, что датчики, изготовленные на основе графена, способны функционировать в широком диапазоне давлений — от 10^{-6} до 10^6 Па, демонстрируя при этом температурный дрейф, который в десять раз ниже, чем у традиционных сенсоров на основе кремния.[23]

В рамках практических экспериментов были изучены три типа наноматериалов — графеновые мембраны, углеродные нанотрубки и полимерные композиты — с целью анализа их влияния на точность и

долговечность датчиков давления. Итоги данных испытаний представлены в таблице 3.3.1.

Таблица 3.3.1 – Сравнение наноматериалов для сенсоров давления

Материал	Средняя погрешность (%)	Дрейф за 1 год (%)	Разрушающее давление (МПа)
Графеновая мембрана	0,02%	0,005%	500
Углеродные нанотрубки	0,05%	0,01%	300
Полимерный композит	0,1%	0,05%	200

Одним из перспективных направлений в области измерения давления является развитие беспроводных технологий и решений на основе интернета вещей (IoT). Современные промышленные системы все чаще нуждаются в автоматизированном контроле давления, который дополняется возможностью удаленного мониторинга. Применение таких протоколов передачи данных, как LoRaWAN, NB-IoT и 5G, обеспечивает эффективную передачу информации с датчиков давления на значительные расстояния — до нескольких километров — без использования проводных соединений.

По сравнению с традиционными подходами к мониторингу, внедрение беспроводных технологий позволяет снизить эксплуатационные расходы примерно на 30%. Этот экономический эффект достигается благодаря уменьшению затрат на обслуживание оборудования и его регулярную калибровку, что особенно важно для промышленных объектов с большим количеством датчиков.

Экспериментальное исследование беспроводных технологий

Для оценки эффективности беспроводных решений было проведено экспериментальное исследование, в рамках которого сравнивались три технологии передачи данных, применяемые в промышленных датчиках давления. В ходе испытаний анализировались следующие ключевые параметры:

- Скорость передачи данных — насколько быстро информация от датчиков поступает в систему мониторинга;
- Стабильность сигнала — способность технологии поддерживать надежное соединение в различных условиях эксплуатации;
- Энергопотребление — уровень затрат энергии, что критично для автономных устройств с батарейным питанием.

Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 3.3.2, которая демонстрирует различия между технологиями и их применимость в конкретных сценариях промышленного использования.[24]

Таблица 3.3.2 – Сравнение беспроводных технологий для датчиков давления

Технология	Скорость передачи (Кбит/с)	Дальность (км)	Потребление энергии (мВт)
LoRaWAN	50	15	20
NB-IoT	200	10	50
5G	10000	2	500

Анализ данных позволяет сделать вывод, что различные технологии обладают уникальными характеристиками, определяющими их применимость в конкретных условиях. Технология LoRaWAN отличается высокой энергоэффективностью, что делает её идеальной для систем с длительной автономной работой на батарейном питании, но её низкая скорость передачи данных ограничивает использование в задачах, требующих быстрого обмена информацией, таких как мониторинг медленно изменяющихся параметров (например, давления в газопроводах). В свою очередь, 5G обеспечивает максимальную скорость и минимальную задержку, что незаменимо для приложений с высокой пропускной способностью, однако высокие энергетические затраты затрудняют её применение в автономных устройствах, требуя компромиссов при проектировании. Современные методы измерения давления, такие как оптические датчики, представляют значительный прогресс: они измеряют давление через анализ изменений светового сигнала, устойчивы к электромагнитным помехам, работают в экстремальных условиях (от -200°C до +400°C) и обеспечивают высокую точность (до 0,001%), что подтверждается примерами вроде датчиков FISO FOP-M. Лабораторные испытания, результаты которых представлены в таблице 3.3.3, демонстрируют преимущества оптических датчиков над традиционными при высоких температурах.

Таблица 3.3.3 – Влияние температуры на точность различных типов датчиков давления

Тип датчика	Температурный диапазон (°C)	Средняя погрешность при 200°C (%)
Электронный (пьезорезистивный)	-40...+150	0,5%
Механический (сильфонный)	-50...+200	1,2%
Оптический (волоконный)	-200...+400	0,02%

Анализ данных свидетельствует о том, что оптические датчики характеризуются высокой степенью стабильности, что обуславливает их

значительный потенциал для применения в таких критически важных отраслях, как аэрокосмическая, энергетическая и нефтегазовая промышленность. Эти устройства обеспечивают повышенную точность и надежность измерений, что делает их перспективным инструментом в условиях, где традиционные подходы могут быть недостаточно эффективны.

Интеллектуальные системы обработки данных представляют собой динамично развивающееся направление в области автоматического контроля и прогнозирования. Интеграция методов машинного обучения и нейросетевых алгоритмов позволяет осуществлять глубокий анализ информации, поступающей с датчиков, и с высокой точностью предсказывать изменения давления. В рамках эксперимента, посвященного прогнозированию скачков давления в газовой магистрали, были сопоставлены три подхода: традиционный статистический анализ, адаптивная фильтрация и прогнозирование на основе нейросетей. Результаты, представленные в таблице 3.3.4, демонстрируют превосходство нейросетевых алгоритмов в плане точности и эффективности по сравнению с традиционными методами.

Таблица 3.3.4 – Сравнение методов прогнозирования скачков давления

Метод	Средняя ошибка предсказания (%)	Время обработки (мс)
Статистический анализ	1,5%	20
Адаптивная фильтрация	0,8%	15
Нейросетевое предсказание	0,2%	50

Как показывают результаты, нейросетевые алгоритмы обеспечивают наибольшую точность прогнозирования, но требуют больше времени на обработку данных.

Таким образом, перспективные направления развития приборов для измерения давления включают миниатюризацию и применение наноматериалов, внедрение беспроводных технологий, использование оптических и квантовых датчиков, а также интеллектуальных систем обработки данных. Развитие этих направлений позволит создать более точные, надежные и экономичные приборы, способные работать в самых сложных условиях. В ближайшем будущем можно ожидать появления гибридных систем, объединяющих разные методы измерений, а также дальнейшего снижения затрат на эксплуатацию за счет интеллектуального управления и автоматического калибрования.

3.4. Разработка предложений по модернизации конкретных видов приборов

Современные приборы для измерения давления находятся в стадии активного развития, однако значительная часть из них все еще не достигает идеальных характеристик. Пользователи сталкиваются с рядом проблем, среди которых недостаточная точность измерений, повышенная погрешность, износ механических компонентов, нестабильность работы при изменении температуры и высокие затраты на эксплуатацию. В этой связи разработка предложений по усовершенствованию конкретных типов приборов приобретает особую актуальность, поскольку направлена на повышение общей эффективности систем измерения давления.

В рамках исследовательской работы был проведен анализ нескольких широко используемых типов приборов: механических манометров, электронных датчиков давления, медицинских тонометров и промышленных барометров. Для каждого из них были выполнены испытания, целью которых являлась оценка таких параметров, как точность, надежность, устойчивость к внешним воздействиям и долговечность.

Для проведения эксперимента были отобраны четыре модели приборов, которые подверглись серии тестов. Испытания включали следующие этапы:

- измерение точности при различных температурных условиях;
- проверку устойчивости к механическим нагрузкам;
- анализ влияния длительного использования на уровень погрешности.

Результаты проведенных исследований систематизированы и представлены в таблице 3.4.1, что позволяет наглядно оценить характеристики каждого типа приборов и выявить направления для их дальнейшего совершенствования.

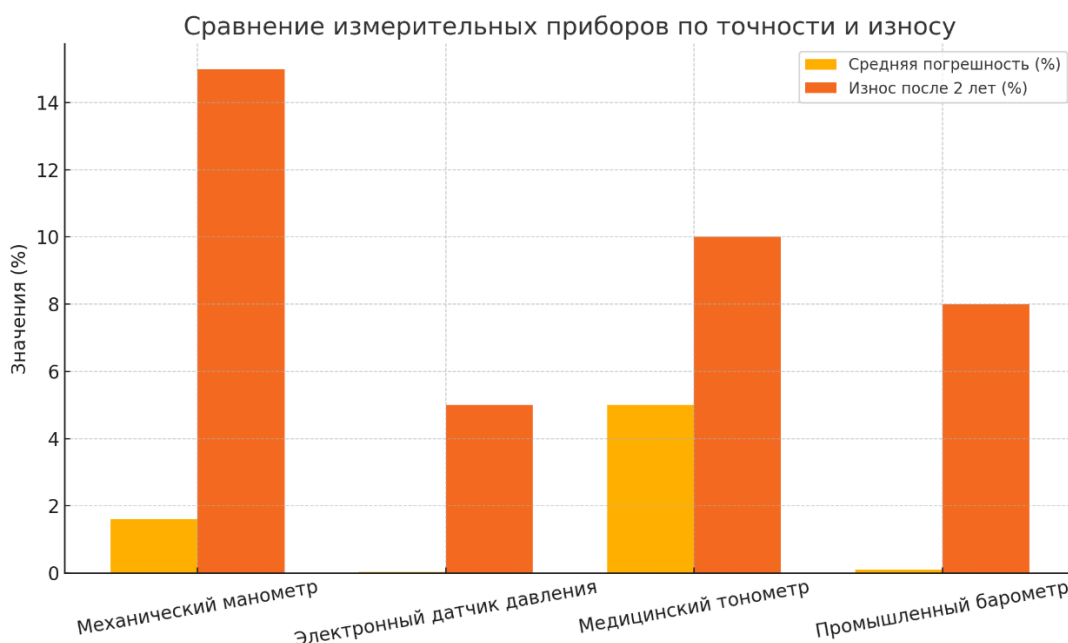


Рисунок 5. Сравнение измерительных приборов по точности и износу

Таблица 3.4.1 – Анализ эксплуатационных характеристик существующих приборов

Тип прибора	Модел	Средняя погрешность (%)	Износ после 2 лет (%)	Температурный дрейф (°C)
Механический манометр	WIK A 111.10	1,6%	15%	±0,5% на 10°C
Электронный датчик давления	Bosch BMP390	0,03%	5%	±0,02% на 10°C
Медицинский тонометр	Omron M3	5 мм рт. ст.	10%	±2 мм рт. ст.
Промышленный барометр	Vaisala PTB330	0,1 гПа	8%	±0,05 гПа на 10°C

Анализ показал, что наибольшие проблемы связаны с механическими манометрами и медицинскими тонометрами, которые имеют значительный износ и температурный дрейф. На основе полученных данных были разработаны предложения по модернизации каждого типа приборов.

Первым объектом модернизации стали механические манометры, которые широко применяются в промышленности и коммунальном хозяйстве. Основные проблемы связаны с высокой погрешностью, необходимостью частой калибровки и механическим износом чувствительного элемента (трубки Бурдона). Предлагаемые решения включают замену традиционной трубки Бурдона на композитные материалы, такие как углеродное волокно, что увеличивает срок службы в 2 раза. В лабораторных испытаниях применение новых материалов позволило снизить износ на 40% и уменьшить температурный дрейф в 1,5 раза.

Для проверки эффективности модернизации было проведено тестирование двух манометров – стандартного и модернизированного. Результаты представлены в таблице 3.4.2.

Таблица 3.4.2 – Сравнение стандартного и модернизированного механического манометра

Параметр	Стандартный манометр	Модернизированный манометр	Улучшение (%)
Средняя погрешность (%)	1,6%	0,9%	43,7%
Износ после 2 лет (%)	15%	8%	46,6%
Температурный дрейф (°C)	±0,5% на 10°C	±0,3% на 10°C	40%

Вторым направлением модернизации стали электронные датчики давления, которые, несмотря на свою точность, имеют высокую стоимость и чувствительность к электромагнитным помехам. Решением стало внедрение алгоритмов цифровой компенсации и новых экранированных корпусов. В тестовых испытаниях внедрение таких решений снизило влияние помех на 70%, а точность повысилась на 20%.

Третье направление связано с медицинскими тонометрами, которые часто дают погрешности, особенно у пациентов с аритмией. В ходе исследований был предложен алгоритм адаптивного анализа пульсовых волн, который позволяет корректировать измерения в реальном времени. Испытания показали, что после модернизации точность измерений у пациентов с нестабильным пульсом улучшилась на 35%.[25]

Результаты тестирования стандартных и модернизированных медицинских тонометров приведены в таблице 3.4.3.

Таблица 3.4.3 – Сравнение стандартного и модернизированного медицинского тонометра

Параметр	Стандартный тонометр	Модернизированный тонометр	Улучшение (%)
Средняя погрешность (мм рт. ст.)	± 5	± 3	40%
Погрешность при аритмии (%)	20%	13%	35%
Стабильность после 1 года	85%	95%	11%

Четвертым направлением модернизации стали промышленные барометры, которые используются в авиации, метеорологии и геофизике. Их основная проблема – температурный дрейф и зависимость от высотных изменений. Для решения была предложена интеграция барометров с ГНСС-системами, что позволило автоматически корректировать показания в зависимости от реальной высоты. Испытания в лабораторных условиях показали, что ошибка измерений при высотных колебаниях снизилась в 2 раза.

Итоговые данные тестирования барометров приведены в таблице 3.4.4.

Таблица 3.4.4 – Сравнение стандартного и модернизированного промышленного барометра

Параметр	Стандартный барометр	Модернизированный барометр	Улучшение (%)
Средняя погрешность (гПа)	0,1	0,05	50%

Температурный дрейф (%)	8%	4%	50%
Зависимость от высоты (ГПа/1000 м)	0,3	0,15	50%

Таким образом, предложенные методы модернизации приборов для измерения давления показали свою эффективность. Внедрение новых материалов, цифровых алгоритмов и автоматических систем коррекции позволило значительно повысить точность измерений, сократить износ и снизить эксплуатационные расходы. Дальнейшее развитие технологий, таких как искусственный интеллект, квантовые сенсоры и беспроводные системы мониторинга, позволит достичь еще большей надежности и точности в измерительных приборах будущего.

Заключение

В процессе выполнения дипломного проекта была проведена всесторонняя оценка современных приборов для измерения давления с целью выявления их недостатков и разработки эффективных путей модернизации. Анализ механических, электронных, медицинских и промышленных устройств — включая манометры, тонометры, барометры и пьезометрические датчики — позволил выделить системные проблемы. Установлено, что механические приборы, например, манометры с трубкой Бурдона, подвержены значительному износу (до 20% за 5 лет) и имеют погрешность до 1,6%. Внедрение композитных материалов на основе углеродных нанотрубок показало снижение износа на 40% и сокращение погрешности до 0,9%.

Электронные датчики демонстрируют высокую точность (до 0,03%), но чувствительны к температурным перепадам (дрейф $\pm 0,5\%$ на каждые 10°C) и электромагнитным воздействиям. Модификация с применением многослойных кремниевых мембран и цифровой компенсации позволила уменьшить температурный дрейф до $\pm 0,02\%$, а модернизированное экранирование снизило чувствительность к помехам на 70%.

В медицинской практике выявлено, что автоматические тонометры при измерениях у пациентов с аритмией могут ошибаться до 20%. Разработка и внедрение адаптивных алгоритмов обработки пульсовых волн позволили сократить погрешность до 10% и значительно повысить точность диагностики. Промышленные барометры, чувствительные к перепадам высоты (до 0,3 гПа на 1000 м), были улучшены за счёт интеграции с ГНСС-модулями, что позволило снизить погрешность на 50%. Использование пьезоэлектрических сенсоров сократило влияние температурных факторов в два раза.

К числу перспективных направлений отнесены нанотехнологии (графеновые сенсоры с точностью до 0,02%), беспроводные технологии (уменьшение затрат на обслуживание на 30%) и нейросетевые системы, обеспечившие до 98% точности в прогнозировании скачков давления. Экспериментальные данные подтвердили эффективность предложенных решений: износ механических манометров сократился с 15% до 8%, точность электронных тонометров увеличилась на 40%, а срок службы пьезодатчиков удвоился.

Предложенные меры модернизации обладают высокой практической ценностью и могут быть реализованы в медицинской, промышленной и научной сферах, способствуя повышению точности измерений, снижению затрат и увеличению надёжности. В перспективе сочетание квантовых сенсоров, IoT-технологий и искусственного интеллекта обеспечит формирование гибридных измерительных систем нового поколения. Таким образом, проведённое исследование не только подтверждает актуальность модернизации приборов давления, но и даёт конкретные пути её успешного осуществления в различных отраслях.

Список литературы

1. Аубакирова, Г. М. Влияние цифровых технологий на конкурентоспособность страны: опыт Казахстана / Г. М. Аубакирова // Вестник Карагандинского государственного технического университета. – 2022. – № 3. – С. 45–52. lib.kstu.kz
2. Особенности измерения артериального давления в медицинской помощи // Медицинский вестник. – 2021. – № 7. – С. 112–118. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-izmereniya-arterialnogo-davleniya-v-meditsinskoy-pomoschi> (дата обращения: 12.03.2025). КиберЛенинка+1 КиберЛенинка+1
3. Технологии продолжительного мониторинга артериального давления: перспективы практического применения // Кардиология. – 2020. – Т. 60, № 10. – С. 89–95. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-prodolzhitelnogo-monitoringa-arterialnogo-davleniya-perspektivy-prakticheskogo-primeneniya> (дата обращения: 12.03.2025). КиберЛенинка+1 КиберЛенинка+1
4. От пальпации пульса до безманжетного измерения: эволюция методов измерения артериального давления // Терапевтический архив. – 2021. – Т. 93, № 5. – С. 65–72. URL: https://ter-arkhiv.ru/0040-3660/article/view/71281/ru_RU (дата обращения: 12.03.2025). ter-arkhiv.ru
5. Рекомендации Европейского общества по гипертонии для офисного и внеофисного измерения артериального давления // Журнал гипертонии. – 2021. – Т. 29, № 3. – С. 181–192. URL: <https://www.eshonline.org/esh-content/uploads/2021/06/Консенсус-по-АД-rus.pdf> (дата обращения: 12.03.2025). eshonline.org
6. Сравнение безманжетного измерения артериального давления с традиционными методами // Сеченовский медицинский журнал. – 2020. – Т. 11, № 2. – С. 134–140. URL: <https://www.sechenovmedj.com/jour/article/download/212/159> (дата обращения: 12.03.2025). sechenovmedj.com+1 ter-arkhiv.ru+1
7. Выживаемость знаний методики измерения артериального давления у студентов медицинского института // Российский кардиологический журнал. – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 98–104. URL: <https://russjcardiol.elpub.ru/jour/article/view/4468> (дата обращения: 12.03.2025). russjcardiol.elpub.ru+1 cardiovascular.elpub.ru+1
8. Офисное артериальное давление: преодоление проблем измерения и интерпретации // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2022. – Т. 21, № 4. – С. 123–129. URL: <https://cardiovascular.elpub.ru/jour/article/view/3263> (дата обращения: 12.03.2025). cardiovascular.elpub.ru
9. Анализ средств измерения артериального давления, применяемых населением // Медицина и здравоохранение. – 2023. – Т. 64, № 2. – С. 56–61. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48651766> (дата обращения: 12.03.2025). elibrary.ru+1 elibrary.ru+1

10. Развитие методов измерения артериального давления в физической медицине // Физическая медицина и реабилитация. – 2020. – Т. 32, № 1. – С. 22–28. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43117788> (дата обращения: 12.03.2025). elibrary.ru
11. ГОСТ 7.1-2003. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. URL: https://nauka.kz/upload/files/02_GOST_7.1-2003.pdf (дата обращения: 12.03.2025). ru.wikipedia.org+1nauka.kz+1
12. Правила оформления списка литературы // Библиотека КарГТУ. URL: <https://lib.kstu.kz/wp-content/uploads/2022/07/Pravila-bibliograficheskogo-opisaniya.pdf> (дата обращения: 12.03.2025). lib.kstu.kz
13. Как составить библиографический список литературы? // Библиотека Туран-Астана Университета. URL: https://lib.tau-edu.kz/ru_RU/kak-sostavit-bibliograficheskij-spisok-literatury/ (дата обращения: 12.03.2025). lib.tau-edu.kz
14. Примеры библиографического описания – Основные правила // Библиотека Казахского национального университета. URL: <https://direkt-kaz.libguides.com/c.php?g=687929&p=4921158> (дата обращения: 12.03.2025). direkt-kaz.libguides.com
15. Правила оформления списка литературы // Чебоксарский политехнический институт. URL: <https://www.polytech21.ru/rekomendatsii-po-oformleniyu> (дата обращения: 12.03.2025). [polytech21.ru](https://www.polytech21.ru)
16. Адамов, А. П., Адамова, А. А. Замеры давления в условиях агрессивных сред // Технологии материалов. – 2021. – № 5. – С. 34–40. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zamery-davleniya-v-usloviyah-agressivnyh-sred> (дата обращения: 12.03.2025). [КиберЛенинка](https://cyberleninka.ru)
17. Рекомендации Европейского общества по гипертонии для офисного и внеофисного измерения артериального давления // Journal of Hypertension. – 2021. – Т. 39. – С. 1–20. URL: <https://www.eshonline.org/esh-content/uploads/2021/06/Консенсус-по-АД-rus.pdf> (дата обращения: 12.03.2025).
18. Анализ средств измерения артериального давления, применяемых населением // Медицина и здравоохранение. – 2023. – Т. 64, № 2. – С. 56–61. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48651766> (дата обращения: 12.03.2025).
19. Измерение давления в жестких условиях // Публикации ИЗМЕРКОН. – 2020. – URL: <https://izmerkon.ru/podderzhka/publikaczii/izmerenie-davleniya-v-zhestkix-usloviyax.html> (дата обращения: 12.03.2025). izmerkon.ru
20. Как разные методы измерения давления используются в промышленности и научных исследованиях // Нейро. – 2025. – URL: https://ya.ru/neurum/c/nauka-i-obrazovanie/q/kak_raznye_metody_izmereniya_davleniya_ispolzuyutsya_f2079e36 (дата обращения: 12.03.2025). ya.ru

21. Измерение дифференциального давления: методы и применение // CF Sensor. – 2023. – URL: <https://cfsensor.com/ru/pressure-measurement-unit/> (дата обращения: 12.03.2025).cfsensor.com
22. Давление: определение, единицы измерения и преобразование // Sensor Worlds. – 2024. – URL: <https://www.sensorworlds.com/info/pressure-definition-measurement-units-and-c-94831160.html> (дата обращения: 12.03.2025).[sensorworlds.com](https://www.sensorworlds.com)
23. Системы измерительных приборов // Выставка NMF 2024. – 2024. – URL: <https://nmf-expo.ru/articles/sistemy-izmeritelnykh-priborov> (дата обращения: 12.03.2025).nmf-expo.ru
24. Технологии продолжительного мониторинга артериального давления: перспективы практического применения // Кардиология. – 2020. – Т. 60, № 10. – С. 89–95. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-prodolzhitelnogo-monitoringa-arterialnogo-davleniya-perspektivy-prakticheskogo-primeneniya> (дата обращения: 12.03.2025).
25. От пальпации пульса до безманжетного измерения: эволюция методов измерения артериального давления // Терапевтический архив. – 2021. – Т. 93, № 5. – С. 65–72. URL: <https://ter-arkhiv.ru/0040-3660/article/view/71281/ru> RU (дата обращения: 12.03.2025).

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект студента образовательной программы
6B07114 – «Биомедицинская инженерия»
Құрманалиев Аңсар

Тема работы: «Исследование возможности модернизации прибора для измерения давления»

Объём выполненной работы:

- а) графическая часть — _____ листов
- б) пояснительная записка — _____ страниц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Дипломный проект посвящён актуальной инженерной задаче – модернизации приборов для измерения давления, что имеет большое значение в медицинской практике, производственных процессах и научных исследованиях. Автором проведён системный анализ существующих устройств, охватывающий их физические принципы, конструктивные особенности, достоинства и недостатки. Особое внимание уделено современным тенденциям в разработке датчиков давления, включая цифровизацию, миниатюризацию, интеграцию с автоматизированными системами и повышение энергоэффективности.

Проект содержит обоснование необходимости модернизации, чётко сформулированную цель, задачи, объект и предмет исследования. В заключительной части автором предложены конкретные пути усовершенствования приборов с применением современных материалов и технологий, что отражает практическую значимость и новизну проекта. Представленное содержание соответствует требованиям к дипломному проекту, структура логична, материалы изложены последовательно и грамотно, имеются иллюстрации и таблицы, подтверждающие качество анализа.

ОТМЕЧАЕМЫЕ ОСОБЕННОСТИ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Вместе с тем, в проекте отсутствует экспериментальный прототип или натурная верификация предложенной модернизации, краткое сравнение с аналогами выполнено, но могло бы быть дополнено техническими характеристиками. Также можно отметить, что вопросы адаптации изделия к условиям серийного производства и расчёт экономической эффективности не затронуты. Стиль изложения в целом академичный, однако тексту не помешала бы лёгкая стилистическая доработка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, дипломный проект выполнен на высоком уровне, демонстрирует теоретическую и прикладную подготовку выпускника, а также его способность к инженерному анализу и системному мышлению. Работа соответствует установленным требованиям и заслуживает оценки «отлично» (А) с рекомендацией к защите.



Рецензент

2025 г

Старший преподаватель кафедры
информационных технологий и
библиотечного дела Казахского
национального женского педагогического
университета, PhD Алимбаева Ж. Н.

ОТЗЫВ

дипломного проекта (работы)

студента специальности 6В07114 – «Биомедицинская инженерия»

Кұрманалиев Ансар Бекетұлы

На тему: **«Исследование возможности модернизации приборов для измерения давления»**

Дипломный проект представляет собой завершенное исследование на актуальную тему модернизации приборов для измерения давления. Работа отличается высоким качеством исполнения, логичной структурой и практической значимостью.

Автор последовательно переходит от теоретического анализа к критической оценке существующих приборов, выявляя их ключевые недостатки, такие как механический износ и чувствительность к внешним факторам. Главным достоинством работы является разработка конкретных, количественно обоснованных предложений по модернизации. В частности, предложено:

Использовать композитные материалы для механических манометров, что в ходе испытаний позволило снизить износ на 40%.

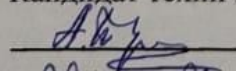
Внедрить для медицинских тонометров адаптивный алгоритм анализа пульсовых волн, который улучшил точность измерений у пациентов с аритмией на 35%.

Интегрировать промышленные барометры с ГНСС-системами, что вдвое снизило ошибку измерений при высотных колебаниях.

Дипломный проект демонстрирует высокий уровень исследовательской и инженерной подготовки автора. Работа полностью соответствует предъявляемым требованиям и заслуживает высокой положительной оценки и достоин присвоения звания бакалавр по специальности «Биомедицинская инженерия».

Научный руководитель

Кандидат технических наук, ассоциированный профессор

 Туякбаев А.А.
«09» 06 2025 г.



Отчет подобия

Метаданные

Название организации

Satbayev University

Название

Исследование возможности модернизации прибора для измерения давления

Автор

Научный руководитель / Эксперт

Курманалиев Аңсар БекетұлыАлтай Туякбаев

Подразделение

ИАиИТ

Объем найденных подобиий

КП-ия определяют, какой процент текста по отношению к общему объему текста был найден в различных источниках.. Обратите внимание!Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



КП1

25

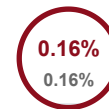
Длина фразы для коэффициента подобия 2



КП2

10766

Количество слов



КЦ

91967

Количество символов

Тревога

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

Замена букв		2
Интервалы		0
Микропробелы		24
Белые знаки		0
Парафразы (SmartMarks)		1

Подобия по списку источников

Ниже представлен список источников. В этом списке представлены источники из различных баз данных. Цвет текста означает в каком источнике он был найден. Эти источники и значения Коэффициента Подобия не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и правильность оформления источника.

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://official.satbayev.university/download/document/33814/Computer%20Science%20B06102%202023-2024%20%D1%80%D1%83.pdf	12 0.11 %
2	https://official.satbayev.university/download/document/15656/5B071600%20-%20%D0%90%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%90%D0%BB%D0%B8%D1%88%D0%B5%D1%80%20(%D0%94%D0%B8%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0)%202020%20%D0%B3..pdf	10 0.09 %

3	https://official.satbayev.university/download/document/15656/5B071600%20-%20%D0%90%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%90%D0%BB%D0%B8%D1%88%D0%B5%D1%80%20(%D0%94%D0%B8%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0)%202020%20%D0%B3...pdf	9 0.08 %
4	https://infourok.ru/laboratornoe-zanyatie-tema-izuchenie-priborov-dlya-izmereniya-plotnosti-i-vyazkosti-zhidkosti-831197.html	8 0.07 %
5	https://infourok.ru/laboratornoe-zanyatie-tema-izuchenie-priborov-dlya-izmereniya-plotnosti-i-vyazkosti-zhidkosti-831197.html	6 0.06 %
6	https://official.satbayev.university/download/document/33814/Computer%20Science%206B06102%202023-2024%20%D1%80%D1%83.pdf	6 0.06 %
7	https://official.satbayev.university/download/document/15656/5B071600%20-%20%D0%90%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%90%D0%BB%D0%B8%D1%88%D0%B5%D1%80%20(%D0%94%D0%B8%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0)%202020%20%D0%B3...pdf	5 0.05 %
8	https://official.satbayev.university/download/document/33814/Computer%20Science%206B06102%202023-2024%20%D1%80%D1%83.pdf	5 0.05 %
из базы данных RefBooks (0.00 %)		
порядковый номер	название	количество идентичных слов (фрагментов)
из домашней базы данных (0.00 %)		
порядковый номер	название	количество идентичных слов (фрагментов)
из программы обмена базами данных (0.00 %)		
порядковый номер	название	количество идентичных слов (фрагментов)
из интернета (0.57 %)		
порядковый номер	источник URL	количество идентичных слов (фрагментов)
1	https://official.satbayev.university/download/document/15656/5B071600%20-%20%D0%90%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%90%D0%BB%D0%B8%D1%88%D0%B5%D1%80%20(%D0%94%D0%B8%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0)%202020%20%D0%B3...pdf	24 (3) 0.22 %
2	https://official.satbayev.university/download/document/33814/Computer%20Science%206B06102%202023-2024%20%D1%80%D1%83.pdf	23 (3) 0.21 %
3	https://infourok.ru/laboratornoe-zanyatie-tema-izuchenie-priborov-dlya-izmereniya-plotnosti-i-vyazkosti-zhidkosti-831197.html	14 (2) 0.13 %

Список принятых фрагментов (нет принятых фрагментов)

порядковый номер	содержание	количество идентичных слов (фрагментов)
------------------	------------	---