

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«УЛЬЯНОВСКИЙ ИНСТИТУТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ  
ИМЕНИ ГЛАВНОГО МАРШАЛА АВИАЦИИ Б.П. БУГАЕВА»**

На правах рукописи



**Борисов Руслан Андреевич**

**ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ  
ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОТНО-  
СКОРОСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ  
ВОЗДУШНОГО СУДНА**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной  
техники и систем управления

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент,  
**Антонец Иван Васильевич**

Ульяновск – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 7  |
| ГЛАВА 1. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЙ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОТНО-СКОРОСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ВОЗДУШНОГО СУДНА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....                   | 15 |
| 1.1. Система управления высотно-скоростными параметрами воздушного судна.....  | 15 |
| 1.2. Критический анализ частотных датчиков давлений.....   | 19 |
| 1.3. Анализ конструктивного облика первичных преобразователей давлений.....  | 23 |
| 1.4. Определение характеристики упругого чувствительного элемента для датчика статического давления.....   | 26 |
| 1.5. Определение характеристики упругого чувствительного элемента для датчика полного давления.....  | 28 |
| 1.6. Анализ конструктивного облика вторичных измерительных преобразователей давлений.....  | 30 |
| 1.7. Методы измерений с использованием фотоэлектронных линеек.   | 33 |
| 1.8. Выводы по главе.....  | 38 |
| 1.9. Постановка задачи.....  | 39 |
| ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УПРУГОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА С УЧЕТОМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВТОРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ИЗМЕРЯЕМОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ.....       | 41 |
| 2.1. Математические зависимости между статической характеристикой упругого чувствительного элемента, порога чувствительности вторичного преобразователя и закономерностей изменения измеряемых давлений..... | 41 |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.2. Численное моделирование упруго-пластичных деформаций упругих чувствительных элементов методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS.....                       | 45        |
| 2.3. Разработка обобщенного алгоритма статического расчета упругих чувствительных элементов для датчиков статического и полного давлений.....  | 50        |
| 2.4. Сравнительная оценка результатов математического моделирования упруго-пластичных деформации методом конечно-элементного моделирования и уравнений приближенного статического расчета..... | 52        |
| 2.5. Выводы по главе.....  | 56        |
| <b>ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙКИ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЕМНИКОВ.....</b>                       | <b>58</b> |
| 3.1. Структура аппаратно-программного комплекса.....   | 58        |
| 3.2. Аппаратные средства аппаратно-программного комплекса.....   | 59        |
| 3.2.1. Датчик давления на основе линейки фотоэлектронных приемников.....   | 65        |
| 3.2.2. Блок управления и обработки данных элементов и устройств первичной информации комплекса.....  | 66        |
| 3.3. Программная часть аппаратно-программного комплекса.....   | 68        |
| 3.4. Теоретические аспекты управления и обработки данных линейек фотоэлектронных приемников.....   | 69        |
| 3.5. Разработка алгоритмов управления и обработки данных линейки фотоэлектронных приемников.....   | 73        |
| 3.5.1. Разработка алгоритмов управления и обработки данных линейки фотоэлектронных приемников с использованием в качестве генератора синхроимпульсов внешние прерывания АЦП.....               | 75        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.5.2. Разработка алгоритмов управления и обработки данных линейки фотоэлектронных приемников с использованием в качестве источников синхроимпульсов генератора широтно-импульсной модуляции..... | 79        |
| 3.5.3. Разработка алгоритмов управления и обработки данных линейки фотоэлектронных приемников без использования аналого-цифрового преобразователя.....  | 80        |
| 3.6. Разработка алгоритмов обмена данными между компонентами аппаратно-программного комплекса.....  | 81        |
| 3.7. Выводы по главе .....  | 84        |
| <b>ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>   | <b>87</b> |
| 4.1. Цель и задачи эксперимента.....  | 87        |
| 4.2. Влияние характеристик источника оптического излучения на форму выходного сигнала линейки фотоэлектронных приемников.....   | 88        |
| 4.3. Влияние режима работы многоэлементного фотоэлектронного устройства на форму выходного сигнала.....   | 91        |
| 4.4. Влияние способов определения «центра тяжести» оптического пятна с использованием центроид метода на устойчивость измерений.....  | 92        |
| 4.5. Метрологические характеристики датчиков статического и полного давлений на основе ЛФП.....   | 93        |
| 4.5.1 Оценка точности измерения перемещения жесткого центра упругого чувствительного элемента, в функции пиксельной системы координат.....  | 93        |
| 4.5.2. Определение точности измерения давления в функции пиксельной системы координат.....  | 98        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.6. Разработка рекомендаций по проектированию и разработке конструкций датчиков статического и полного давлений на основе линеек фотоэлектронных приемников.....                        | 104        |
| 4.7. Сравнительная оценка датчиков на основе оптоэлектронного преобразователя и датчиков генераторного типа.....   | 107        |
| 4.8. Выводы по главе.....  | 109        |
| <b>ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ДАТЧИКОВ СТАТИЧЕСКОГО И ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЕК ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЕМНИКОВ.....</b>   | <b>112</b> |
| 5.1. Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя.....  | 112        |
| 5.2. Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя с двухступенчатым упругим чувствительным элементом.....   | 114        |
| 5.3. Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя с магнитным усилителем деформации упругого чувствительного элемента.....                          | 115        |
| 5.4. Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя с криволинейным зеркальным усилителем деформации упругого чувствительного элемента.....           | 117        |
| 5.5. Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя с несколькими оптическими пятнами.....  | 119        |
| 5.6. Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя и упругих чувствительных элементов на базе манометрических коробок, сопряженных с мембранами..... | 123        |
| 5.7. Выводы по главе.....  | 125        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>   | <b>127</b> |

|   |     |
|---|-----|
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....  | 129 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. Статистический анализ экспериментальных данных.....               | 141 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты внедрения.....   | 177 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В. Фрагмент программного кода Си.....                                | 179 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Патенты на изобретения.....                                       | 180 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ..... | 185 |

## ВВЕДЕНИЕ

Аэрометрические датчики давления систем воздушных сигналов (СВС), как элементы системы управления высотно-скоростными параметрами воздушного судна (ВС), предназначены для преобразования в электрические сигналы, воспринимаемые полное  $P^*$ , и статическое  $P$  давления, с последующей передачей сигналов в вычислительное устройство с целью вычисления параметров движения летательного аппарата. Параметры движения воздушного судна имеют однозначное соответствие статическому и полному давлению. Датчики давления являются датчиками первичной информации для СВС, их конструкции и чувствительные элементы весьма разнообразны и во многом определяют параметры точности, а также ресурсные, геометрические и эксплуатационные характеристики СВС.

Разработкой и производством датчиков аэрометрических датчиков давлений занимаются отечественные предприятия УКБП и Восход. К перечню зарубежных компаний относятся Honeywell Corp. (США), Marconi Avionics(США), Crouzet (Франция), Vadin-Crouzet(Франция), Jaeger(Франция), а также многие другие.

Фундаментальные основы разработки и проектирования первичных измерительных преобразователей давлений (упругих чувствительных элементов) заложены Феодосьевым В.И., Пановым Д.Ю., Пономаревым С.Д. и Андреевой Л.Е.

Весомый вклад в разработку датчиков давлений внесли: Б.М. Абрамов, Г.Е. Алексеев, Р.Г. Бельфор, Е.С. Вождаев, А.Н. Петунин, Б.В. Лебедев, В.Г. Кравцов, А.К. Панкратов, Солдаткин, А.А., В.В. Солдаткин, Н.В., Чачикян, Г.И. Клюев, Н.Н. Макаров (ОАО «УКБП»), В.А. Ференец, В.М. Пороунов, (КГТУ-КАИ), Т.А. Egolf, D.F., R.V. Grau, J., Daw и другие отечественные и зарубежные специалисты и ученые.

Наибольшее распространение в качестве источников первичной информации систем воздушных сигналов, в настоящее время, получили датчики давления генераторного типа или частотные датчики, принцип действия которых основан на использовании колебаний УЧЭ выполненного в виде цилиндрического резонатора с перестраиваемой собственной частотой колебаний под действием измеряемых

давлений. Данные датчики обладают достаточно высокой функциональной надежностью и относительно высокой точностью. Однако, им присущи недостатки, связанные с нелинейным искажением характеристики преобразования давления в частоту, и погрешностями, определяемыми высокой зависимостью упругих свойств резонатора от температуры.

Датчики давления на основе оптоэлектронных преобразователей, предполагающие наличие линеек фотоэлектронных приемников (ЛФП), позволяющих осуществлять преобразование пространственного распределения светового поля в электрический сигнал, получают в последние годы широкое распространение.

Отличительной чертой, предлагаемых в работе датчиков, является наличие высокочувствительного вторичного преобразователя и упругого элемента с ограниченной амплитудой отклонений, что обеспечивает повышение точности измерения давлений и во многом исключает недостатки аналогов. Отсюда возникает необходимость теоретического исследования методов математического моделирования и экспериментальных исследований характеристик первичных и вторичных измерительных преобразователей давлений.

В связи с вышеизложенным, а также принимая во внимание, что очень большое число аварий и катастроф воздушных судов в истории авиации явились следствием неисправностей аэрометрических устройств, выбранная тема для исследований является весьма актуальной.

#### **Степень разработанности темы исследования.**

Фундаментальные основы теоретических и экспериментальных исследований первичных преобразователей давлений, заложены в работах: Феодосьева В.И. Андреевой Л.Е., Пономарева С.Д., Панова Д.Ю., Феликсона Е.И. Кроме того, этому вопросу посвящены работы: Church A. H., Almen L., Sayere M.E. Fangelmann M.G. и др. Исследованиям и разработкам датчиков давлений посвящены работы: А.Н. Петунина, Е.С. Вожаева (ФГУП «ЦАГИ»), Б.М. Абрамова, Г.Е. Бельфора, Б.В. Лебедева, В.Г. Кравцова, А.К. Панкратова, Н.В. Алексеева, Р.Г. Чачикяна, А.А. Солдаткина, В.В. Солдаткина, Н.Н. Макарова, Р.В.



Egolf, J. Grau, R.P. Smith, Daw, P.E. Sheridan и других отечественных и зарубежных специалистов и ученых.

**Цель диссертационного исследования** – разработка и исследование новых датчиков статического и полного давлений, использующих оптоэлектронные преобразователи на основе ЛФП с улучшенными метрологическими характеристиками, сниженными массогабаритными параметрами конструкции и уменьшенным собственным потреблением мощности.

Поставленная цель достигается решением следующих **задач**:

1. Разработка методики расчета УЧЭ, принципиальным отличием которой является учет технических характеристик вторичного преобразователя, в частности, порога чувствительности вторичного преобразователя, и прогиба центра мембраны как функции координаты пикселя ЛФП.

2. Разработка алгоритмов работы микроконтроллера, реализующих обработку сигналов с выхода ЛФП и обеспечивающих повышение точности измерений деформации мембран датчика давлений, использующего оптоэлектронные преобразователи.

3. Создание экспериментального стенда и проведение сравнительных исследований по определению величин прогибов мембраны, полученных аналитическим методом, с использованием программного комплекса ANSYS, и полученных в результате проведенных экспериментов.

4. Разработка методов и алгоритмов вычисления величины деформации УЧЭ при использовании процесса ветвления исходной информации, который осуществляется применением шторок с  $n$  щелями, позволяющим сформировать на ЛФП  $n$  оптических пятен, перемещающихся в функции измеряемого давления.

5. Создание экспериментальной установки для исследования метрологических характеристик датчиков статического и полного давлений на основе упругих мембран и оптоэлектронных преобразователей.

6. Осуществление экспериментальной проверки и оценки метрологических характеристик датчиков давлений на основе оптоэлектронных преобразователей.

**Методы исследований.** При выполнении работы использовались логические и эмпирические методы математического исследования на основе наблюдения и опыта, сравнения, анализа и синтеза. Синтезирующая математическая модель выполнена в интегрированной среде разработки Microsoft Visual Studio на языке программирования C++. При решении упруго-пластичных задач использовался программный комплекс ANSYS Workbench. Разработка и отладка программного обеспечения микропроцессорной техники аппаратно-программного комплекса выполнена в среде разработки Keil uVision на языке программирования «Си». Автоматизация, визуализация и статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась на базе разработанного программного обеспечения на графическом языке программирования «G» в среде LabVIEW.

**Область исследования.**

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки), а именно: п. 1 – «Разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления» и п. 2 – «Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик».

**Научная новизна диссертационной работы.**

1. Впервые получены и обоснованы рекомендации для построения конструктивных схем датчиков давлений на базе оптоэлектронных преобразователей, которые отличаются наличием высокочувствительного вторичного преобразователя и упругой мембраны с минимизированной деформацией, а также устройства управления деформациями, основанного на законах магнитного притяжения, обеспечивающих повышение точности измерения аэрометрических параметров.

2. Впервые разработаны математические модели взаимосвязей порога чувствительности вторичного преобразователя с процедурами обработки информационных данных, получаемых при деформации УЧЭ, вызванных изменением статического и полного давлений и отличающиеся тем, что в них учитывается шаг дискретизации вторичного преобразователя.

4. Предложены алгоритмы работы микроконтроллера, которые обеспечивают, при измерении линейных перемещений жестких центров мембран, обработку сигналов с выхода ЛФП при воздействии на него одного светового пятна, отличающиеся тем, что при опросе ЛФП, аналого-цифровой преобразователь совершает двойное преобразование, что обеспечивает более высокую точность измерения перемещения жесткого центра мембраны.

5. Предложены алгоритмы работы микроконтроллера, которые обеспечивают обработку сигналов с выхода ЛФП при воздействии на нее двух оптических пятен, причем процесс математической обработки полученных данных выполняется до завершения полного цикла опроса, что обеспечивает более высокую точность измерений перемещения жесткого центра мембраны, а также повышение быстродействия измерительной системы.

6. Предложены метод и алгоритм обработки исходной информации, которые осуществляются применением шторок с  $n$  щелями и дают возможность сформировать на ЛФП  $n$  оптических пятен, перемещающихся в функции измеряемого давления, что позволяет за один период опроса линейки получить  $n$  независимых значений измеряемого давления и, усредняя результат, повысить точность измерения, а также свести к минимуму влияние внешних возмущающих факторов, в частности, вибраций.

#### **Практическая значимость работы.**

1 Разработанная методика математического моделирования статической характеристики УЧЭ, учитывающая функциональные возможности вторичного преобразователя и закономерность изменения статического и полного давлений, может быть использована при оценке точностных характеристик датчиков давлений на этапах предварительного проектирования УЧЭ.

2. Разработанные алгоритмы работы микроконтроллера, обеспечивают обработку выходных сигналов ЛФП при измерении линейных перемещений жесткого центра УЧЭ и могут быть использованы при разработке аналогичных измерительных систем линейных перемещений.

3. Разработанные новые высокоточные датчики статического и полного давлений, использующие оптоэлектронные преобразователи информации на основе ЛФП в качестве вторичных преобразователей, имеют цифровой выход и подключаются к вычислительному устройству СВС без дополнительных преобразователей.

4. Разработанные метод и алгоритм использования процесса ветвления исходной информации, позволяют за один период опроса линейки получить  $n$  независимых значений измеряемого давления и, усреднив результат, повысить точность измерения, а также свести к минимуму влияние внешних возмущающих факторов, в частности, вибраций.

5. На основе проведенных исследований разработаны, обладающие высокими метрологическими характеристиками, опытные образцы датчиков статического и полного давлений, использующие в качестве первичных преобразователей упругие мембраны и ЛФП – в качестве вторичного преобразователя информации.

6. Предложенные в работе способы управления восприятием статического и полного давлений, которые позволяют повысить точность измерений за счет использования высокочувствительного вторичного преобразователя, а также изменения жесткости упругого элемента или вариации сил магнитного притяжения, могут быть использованы в широком спектре датчиков давлений.

#### **Реализация и внедрение результатов работы.**

Полученные результаты использованы при выполнении научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) ООО «МИП «МЭлКон» (г. Ульяновск). Так, полученные в процессе подготовки кандидатской диссертации результаты, были использованы при разработке приспособления для автоматических выключателей ВА50-41, А3790 и ВА50-43 регулировки и контроля

провалов между подвижными и малоподвижными контактами (договор №75 от 5 февраля 2018 г.). Научные и практические результаты исследований использовались в ООО «СТЦ» (г. Санкт-Петербург, № 113/08/01ЛИК от 16.08.2021 г.) при разработке методик и программ летных испытаний беспилотных воздушных судов, в частности, позволили осуществить предварительную оценку характеристик точности СВС.

### **Степень достоверности и апробация работы.**

Достоверность результатов диссертации определяется корректностью постановки задач, корректным применением математических методов цифровой обработки сигналов, соответствующих известным фундаментальным теоретическим представлениям, соответствием полученных теоретических результатов результатам натуральных экспериментов, проведенных на созданном автором экспериментальном стенде, а также повторяемостью результатов при многократных измерениях.

Результаты диссертации доложены, обсуждены и получили одобрение специалистов на следующих конференциях: V Международная научно-практическая конференция «Академические Жуковские чтения» (г. Воронеж, 2017 г.), XXXII Научно-практическая конференция «Потенциал современной науки» (г. Липецк, 2017 г.), VI Международная научно-практическая конференция «Академические Жуковские чтения» (г. Воронеж, 2018 г.), 22-ой Международная конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2020» (г. Москва, 2020) и VII Международном форуме «Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications – 2021»(г. Ижевск, 2021).

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

1. Методика моделирования и расчета статической характеристики УЧЭ датчиков давлений, в которой учитывается шаг дискретизации вторичного преобразователя и закономерность изменения измеряемых давлений, обеспечивает получение, при минимально необходимой деформации упругого элемента, заданной чувствительности.

2. Конструктивные схемы датчиков давлений, полученные путем интеграции оптоэлектронного вторичного измерительного преобразователя, упругих мембран, и устройств управления деформациями, основанных на законах магнитного притяжения, а также оптического отражения, обеспечивающих улучшение метрологических характеристик.

3. Алгоритм работы микроконтроллера, позволяющий, при измерении линейных перемещений жесткого центра мембраны при воздействии на ЛФП одного светового пятна, в процессе опроса ЛФП совершать аналого-цифровому преобразователю двойное преобразование, что обеспечивает более высокую точность измерений перемещения жесткого центра мембраны.

4. Алгоритм работы микроконтроллера, который, при измерении линейных перемещений жесткого центра мембран обеспечивает обработку сигналов с выхода ЛФП при воздействии на нее двух световых пятен, при этом процесс математической обработки полученных данных выполняется до завершения полного цикла опроса, что обеспечивает повышение точности измерений перемещения жесткого центра мембраны, а также быстродействия измерительной системы.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 6 статей в журналах из перечня ВАК, получено 5 патентов на изобретение, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, кроме того, получено положительное решение на выдачу патента по заявке на изобретение.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и пяти приложений. Общий объем работы 186 страниц, 109 рисунков, 33 таблицы и 112 наименований литературы.

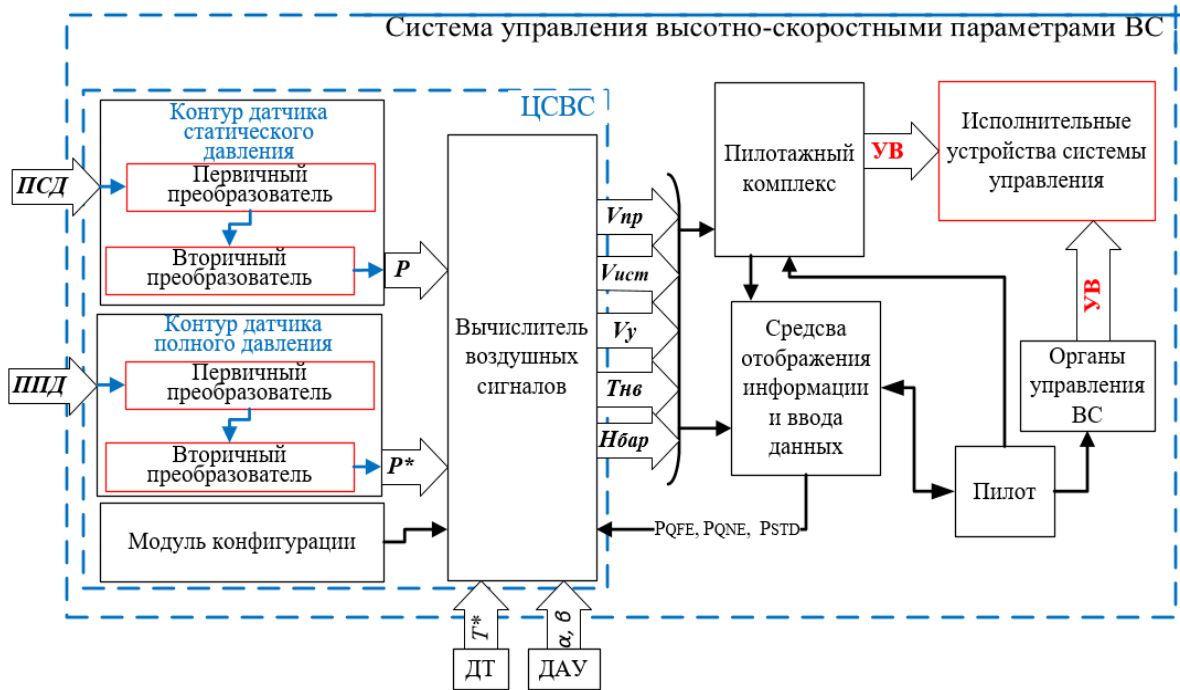
**Личный вклад автора.** Теоретические и экспериментальные исследования, включая апробацию разработанных способов и алгоритмов, проведены автором лично. Обсуждение и интерпретация экспериментальных результатов проводились совместно с соавторами, где вклад автора диссертации работы был определяющим.

# **ГЛАВА 1. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЙ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОТНО-СКОРОСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ВОЗДУШНОГО СУДНА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

## **1.1. Система управления высотно-скоростными параметрами воздушного судна**

Система управления высотно-скоростными параметрами воздушного судна представляет собой совокупность управляющих поверхностей и соответствующих устройств и механизмов, в частности, механических, гидравлических, электрических и электронно-вычислительных, обеспечивающих выбор и поддержание высоты, горизонтальной и вертикальной скоростей полета в неавтоматическом, полуавтоматическом, автоматическом и комбинированном режимах управления.

В общем случае, система управления высотно-скоростными параметрами включает систему воздушных сигналов (СВС) (рис. 1.1.), пилотажный комплекс воздушного судна, исполнительные устройства системы управления, средства отображения информации и органы управления воздушным судном с помощью которых выдается управляющее воздействие на исполнительные устройства системы управления. Кроме того, пилот осуществляет выбор режима управления высотно-скоростными параметрами с использованием органов управления пилотажного комплекса, в частности, режимы стабилизации высоты полета, стабилизации скорости полета, стабилизации вертикальной скорости полета, автоматизированный выход на заданную высоту, автоматизированный разгон или торможение до заданной скорости полета и т.д. Следует отметить, наличие режимов управления, при которых пилотажный комплекс осуществляет выработку команд директорного управления, при этом пилотажный комплекс не участвует в управлении воздушным судном (либо его участие ограничено), а лишь формирует команды для пилота.



**Рис. 1.1.** Функциональная схема системы управления высотно-скоростными параметрами ВС:  $P$  – статическое давление,  $P^*$  – полное давление,  $T^*$  – температура заторможенного потока;  $\alpha$ ,  $\beta$  – аэродинамические углы,  $V_{пр}$  – приборная скорость,  $V_{ист}$  – истинная скорость,  $V_u$  – вертикальная скорость,  $H_{бар}$  – барометрическая высота, ПСД – приемник статического давления, ППД – приемник полного давления, ДТ – датчик температуры, ДАУ – датчик аэродинамических углов, ЦСВС – цифровая система воздушных сигналов, УВ – управляющее воздействие.

Безопасное выполнение полета зависит от функциональной надежности элементов и устройств системы управления высотно-скоростными параметрами воздушного судна, в частности, работы СВС и его источников первичной информации.

В качестве источников первичных информации о высотно - скоростных параметрах воздушного судна используются датчики статического и полного давлений, включающие в себя первичные и вторичные измерительные преобразователи давлений.

Современные датчики статического и полного давлений, входят в состав СВС, предназначенной [25] для вычисления высотно-скоростных параметров полета ВС. СВС [6] состоит (рис. 1.1) из вычислителя воздушных сигналов, на входы которого подается следующая информация:  $P^*$  – полное давление,  $P$  – статическое давление,  $T^*$  – температура заторможенного потока наружного



воздуха,  $\alpha$ ,  $\beta$  - аэродинамические углы,  $P_{QFE}$ ,  $P_{QNH}$ ,  $P_{STD}$  – уровни давлений, выставляемых вручную экипажем.

Датчики полного и статического давлений являются источниками первичной информации [95] в СВС, что предопределяет существенную зависимость метрологических характеристик СВС от точности измерения статического и полного давлений (при воздействии дестабилизирующих факторов) и от сохранения заданной точности во времени.

Диапазон измерения и требования [12, 77, 84] к точности измерения высотно-скоростных параметров воздушного судна представлены в таблице 1.1.

**Таблица 1.1.** Погрешности измерений СВС современных ЛА.

| Параметр                           | Диапазон измерения    | Погрешность |                      | Порог чувствительности |
|------------------------------------|-----------------------|-------------|----------------------|------------------------|
|                                    |                       | Значение    | Диапазон             |                        |
| Абсолютная высота, м               | от минус 500 до 15240 | $\pm 4,6$   | -503                 | 0,3                    |
|                                    |                       | $\pm 6,1$   | 3048                 |                        |
|                                    |                       | $\pm 12,2$  | 9144                 |                        |
|                                    |                       | $\pm 24,4$  | 15240                |                        |
| Относительная высота, м            | от минус 500 до 15240 | $\pm 6,1$   | от минус 500 до 3048 | 0,3                    |
|                                    |                       | $\pm 12,2$  | 9144                 |                        |
|                                    |                       | $\pm 24,4$  | 15240                |                        |
| Вертикальная скорость, м/с         | $\pm 102$             | $\pm 0,15$  | $\pm 102$            | 0,07                   |
| Приборная скорость, км/ч           | от 55,5 до 832        | $\pm 9,3$   | 111                  | 0,115                  |
|                                    |                       | $\pm 3,7$   | 185                  |                        |
|                                    |                       | $\pm 1,85$  | 832                  |                        |
| Истинная скорость (воздушная) км/ч | от 185 до 1108        | $\pm 7,4$   | от 185 до 1108       | 0,115                  |

Одной из ведущих отечественных организаций, разрабатывающих СВС, является ОАО «Аэроприбор-Восход». Здесь в 90-х годах прошлого века была создана СВС типа СВС-2Ц, которая, в составе комплексов бортового радиоэлектронного оборудования, установлена [38] на самолетах Су-27, Су-33, Су-30МКИ, Су30-МКК, а также СВС-85, СВС-96 - для работы в составе самолетов

гражданской и транспортной авиации Ил-96 (Ил-96М), Ту-204 (Ту-214), Ан-70, Ту-334, Бе-200. Кроме того, успешно применяется универсальная система воздушных сигналов СВС-96, имеющая встроенную систему определения типа воздушного судна с автоматической коррекцией аэрометрических поправок. В качестве источника информации о параметрах [5] статического и полного давлений воздушного потока, используются датчики давлений генераторного типа ДДГ-1 и ДДГ-2, разработку которых осуществляет ОАО «УТЕС».

Из зарубежных конструкций СВС можно выделить GDS 74А, входящую в состав бортового радиоэлектронного комплекса GARMIN G 1000 устанавливаемого на самолеты DA-40, DA-42 и Cessna. Кроме того, разработанный аналог СВС входит в состав бортового радиоэлектронного оборудования самолетов Ан-148, Ту-204. В качестве источника информации о параметрах статического и полного давлений воздушного потока используются, как и в предыдущем случае, датчики генераторного типа (они же частотные датчики давлений).

Сравнительная оценка датчиков давлений по критериям: погрешность измерения давления, время готовности к работе и напряжение питания, представлена в таблице 1.2.

**Таблица 1.2.** Сравнительная оценка датчиков давлений СВС.

| Тип СВС<br>(наименование<br>ДДГ)       | Погрешность от<br>диапазона<br>измеряемого<br>давления, % | Время<br>готовности, с | Напряжение<br>питания, В |
|--|---|------------------------|--------------------------|
| СВС-2Ц,<br>СВС-85,<br>СВС-96<br>(ДДГ2) | 0,03 – 0,04   | не более 30            | 15 и 5                   |
| GDS 74А                                | 0,03 – 0,08   | не более 120           | 15                       |

Разрабатываемое в настоящее время бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО) современных ВС предъявляет более жесткие требования к техническим характеристикам составляющих элементов СВС и, в частности, к техническим характеристикам датчиков первичной информации. К стандартным

требованиям относятся: высокая надежность, точность измерений, динамическая устойчивость, минимальное энергопотребление, малые габариты и масса. К требованиям современных систем добавляются наличие цифровых интерфейсов межмодульного информационного взаимодействия и высокое быстродействие.

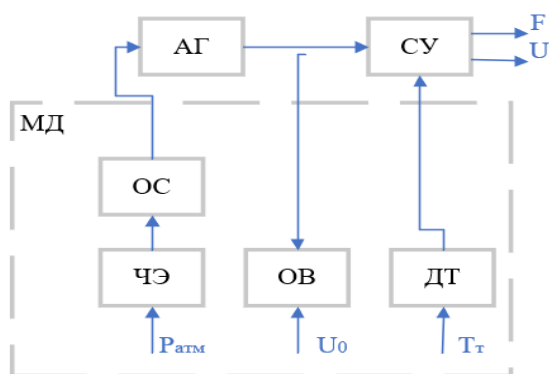
Следует отметить и быстрые темпы развития интегрированных систем резервных приборов (ИСРП), вытесняющих резервную группу аналоговых индикаторов высотно-скоростных параметров [43]. Особенностью ИСРП является интеграция в единый блок датчиков первичной информации, вычислителя, индикатора и автономного источника питания, обеспечивающего автономную работу ИСРП [43] (ИСРП-2, ИСРП-26, ИСРП-35, ИСРП-50 производства ПАО «АНПП «Темп-Авиа», г. Арзамас) на временном интервале не менее 30 минут, при отказе основной группы приборов и систем. Это, в свою очередь, требует от датчиков первичной информации, в частности, от датчиков статического и полного давления, обеспечения компактности и малого потребления электроэнергии.

## **1.2. Критический анализ частотных датчиков давлений**

Проведенный нами анализ, эксплуатируемых в настоящее время в составе СВС датчиков давлений, позволил установить, что датчики давления генераторного типа на основе частотного метода преобразования информации, являются одними из самых распространённых в авиации.

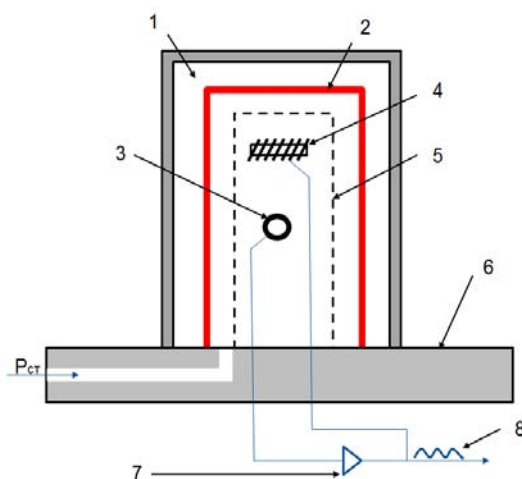
Частотные преобразователи, используемые на борту ВС, осуществляют преобразование колебаний УЧЭ (цилиндрического резонатора) в частоту следования импульсов. Данный метод преобразования информации обладает относительно высокой помехоустойчивостью. Полное и статическое давления в цифровых СВС измеряется генераторными или частотными датчиками давлений (рис. 1.2.).

В работе [45] представлено описание принципа действия датчиков основанных на использовании колебаний УЧЭ (механического резонатора) частота колебаний которого изменяется под действием измеряемых давлений.



**Рис. 1.2.** Структурная схема модуля давления частотного датчика:  
 АГ – автогенератор, ДТ – датчик температуры  $T_T$ , МД – модуль давления,  
 ОВ – обмотка возбуждения, ОС – обмотка обратной связи,  
 СУ – согласующее устройство, ЧЭ – чувствительный элемент.

УЧЭ представляет собой тонкостенный цилиндрический резонатор, заваренный в корпус (рис. 1.3.) [83].



**Рис. 1.3.** Принципиальная схема датчика давлений генераторного типа:  
 1 – опорный давление (вакуум), 2 – УЧЭ (резонатор), 3 – обмотка съёма сигнала,  
 4 – обмотка возбуждения, 5 – элементы системы самовозбуждения,  
 6 – корпус, 7 – усилитель, 8 – выходной сигнал.

Опорное давление (или вакуум) образован между внутренней стенкой корпуса и внешней стенкой УЧЭ(резонатора). Изменение давления во внутренней полости УЧЭ (резонатора) способствует изменению его жёсткости и, следовательно, изменению собственной частоты колебаний  $f$ :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2Eb\delta^3}{ml^3} \left[ 1 + \left( \frac{b}{\delta} \right)^2 \left( \frac{P}{E} \right)^2 * 15 * 10^{-3} \right]}, \quad (1.1)$$

где  $E$  – модуль упругости материала, из которого изготовлен цилиндр,  $m$  – его приведенная масса,  $\delta$  – толщина стенки цилиндра,  $l$  – высота цилиндра,  $b$  – диаметр цилиндра,  $P$  – давление.

Возбуждение и поддержание колебаний УЧЭ (резонатора) обеспечивается с помощью двух электромагнитных обмоток возбуждения. Схема автогенератора с обратной связью обеспечивает колебания УЧЭ (резонатора) на частоте собственного резонанса. Для учета зависимости свойств УЧЭ от температуры в схеме датчика установлен датчик температуры.

На входы вычислителя поступают сигналы с датчика давлений в виде частоты следования импульсов напряжения  $f$ , пропорциональных измеряемому давлению, а также сигнал от датчика температуры в виде напряжения постоянного тока.

Вычислитель осуществляет управление и обработку сигналов всех элементов и устройств канала измерения статического давления и реализует алгоритмы вычисления текущей высоты  $H_{отн}$ ,  $H_{абс}$ ,  $H_{эш}$ . Кроме того, вычислитель обеспечивает автоматическую корректировку аэрометрических поправок сигналов  $H_{абс}$  и  $H_{отн}$ . На выходе вычислителя цифровые сигналы, используемые для передачи сведений о высотно-скоростные параметры в системы управления, сигнализации и индикации экипажу.

Технологический процесс изготовления резонатора состоит из ряда специальных операций на уникальном оборудовании, которым владеют немногие фирмы. Приведенная выше формула (1.1) для расчета собственных колебаний резонатора является приближенной, а на практике используют эмпирические выражения.

С середины прошлого века датчиками статического и полного давлений занимается английская фирма Солатрон (Solatron), которая в настоящее время разработала и производит указанные датчики для СВС военных и гражданских самолетов.

Однако, частотные датчики имеют ряд существенных недостатков, из которых выделим температурную погрешность, нелинейные искажения и

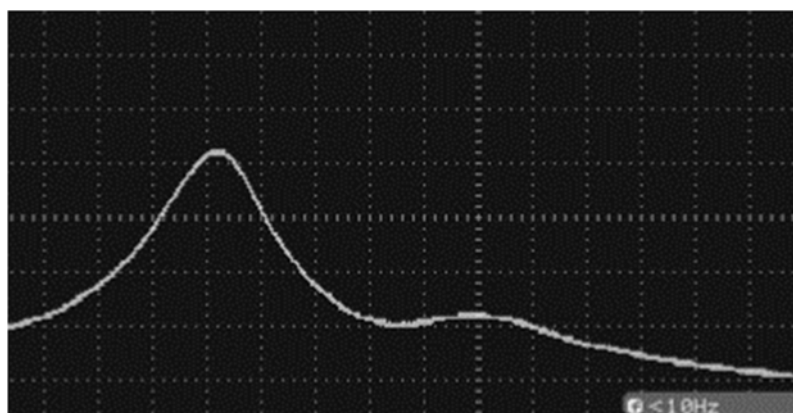
относительно высокое энергопотребление.

Датчики давлений генераторного типа или частотные имеют существенные погрешности, вызванные изменением температуры, и составляют до 7% от измеряемого диапазона давлений.

Для учета и компенсации температурных погрешностей датчиков давлений генераторного типа используются поправки, значения которых вычисляются в зависимости от температуры УЧЭ измеренной датчиком температуры.

Кроме того, рассматриваемым датчикам присущи недостатки, связанные с «перескоком частоты». Подобное явление проявляется при переходе через критические значения(точки) давлений, сопровождающихся скачкообразным изменением выходного сигнала по давлению.

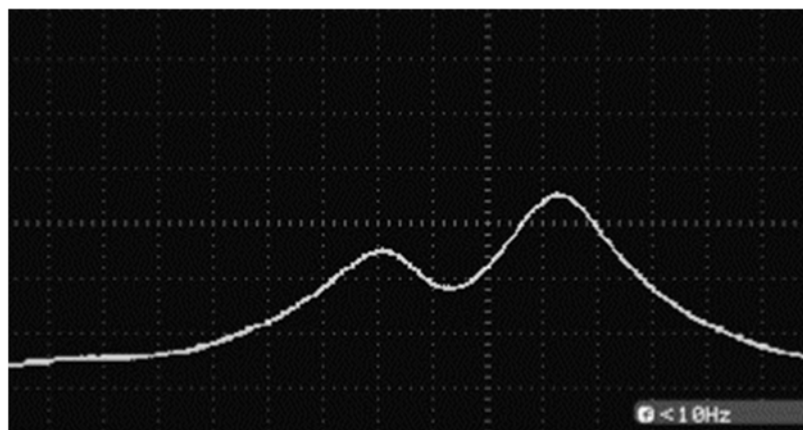
Автоколебательная система изменяет частоту колебаний с частоты, соответствующей первому максимуму на частоту, соответствующую второму максимуму (рис. 1.4. и рис. 1.5.) [12], при переходе через точку перескока.



*Рис. 1.4. АЧХ преобразователя давления ниже точки перескока частоты [12].*

Погрешность измерений при проявлении «перекоса частоты» может достигать значений в несколько процентов.

Следует выделить проблемы, связанные с разработкой и производством УЧЭ в виде цилиндрических резонаторов, в частности, из-за малых значений толщины стенки резонаторов (20 мкм), определение толщины резонаторов контактным методом практически невозможно. Кроме того, требуется совершенствовать технологию вытяжки УЧЭ и методы контроля их геометрических параметров.



*Рис. 1.5. АЧХ преобразователя давления выше точки перескока частоты [12].*

Существенными недостатками обладает и технология изготовления УЧЭ в виде цилиндрических резонаторов, в частности, их брак в процессе производства составляет около 70%.

Ввиду популярности датчиков давлений, основанных на частотном методе преобразования информации, ведутся исследования и разработки, направленные на модернизацию и улучшение данного метода [11, 37, 61, 62, 78].

### **1.3. Анализ конструктивного облика первичных преобразователей давлений**

Наряду с УЧЭ, выполненных в форме цилиндрических резонаторов, существует достаточной большой класс УЧЭ на основе плоских или гофрированных мембран.

Фундаментальные основы разработки и проведения исследований мембранных УЧЭ заложены Феодосьевым В.И. [85], Пановым Д.Ю. [60], Феликсоным И.Е. [86], Андреевой Л.Е. [2, 3, 4], кроме того, исследованиям в данной области посвящено большое количество работ зарубежных авторов [96, 97, 99, 104, 106].

Гофрированные мембранные УЧЭ получили наибольшее распространение [54], так как способны получать значительный упругий прогиб под действием давления в пределах упругих свойств.

Наиболее распространенные геометрические профили гофрированных мембран представлены на рис. 1.6.

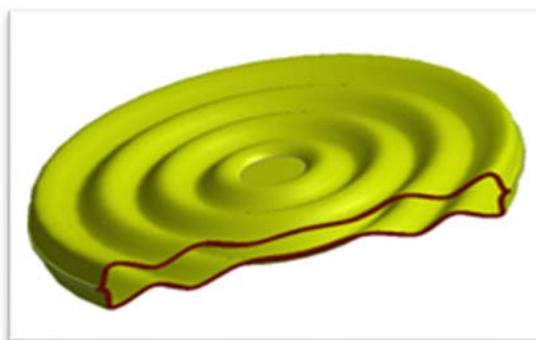


а) б) в)

**Рис. 1.6.** Гофрированные мембраны:

*а – синусоидальная, б – пальчатая, в – трапецевидальная.*

В приборостроении применяются одиночные мембраны, мембранные коробки (рис.1.7), которые, в свою очередь, могут соединяться в блоки.



**Рис. 1.7.** Мембранная коробка.

Датчики давления на основе мембранных УЧЭ менее чувствительны к вибрациям и пульсациям измеряемой среды, применимы, при соответствующей защите мембраны, для измерения давления агрессивных сред.

В работах [8, 29, 30, 56] выполнен достаточно подробный обзор марок и свойств материалов, применяемых для изготовления в УЧЭ.

Для изготовления мембранных УЧЭ преимущественно используются дисперсионно-твердеющие сплавы, обладающие низкими значениями упругих несовершенств. Кроме того, они обладают независимостью их модуля упругости от температуры окружающей среды и, после воздействия вибрации, высокими упругими и прочностными свойствами, высокой релаксационной стойкостью. К этим сплавам относятся [53, 94] бериллиевые бронзы БрБ2, БрБНТ 1,9 и БрБНТ 1,7,



превосходящие многие высококачественные стали по прочности и упругим свойствам.

Гистерезис [48, 49, 91, 109, 107] упругих элементов из бериллиевой бронзы относительно мал по сравнению с другими материалами, которые используются в качестве УЧЭ датчиков давления, и составляет примерно 0,4–1%

Основную долю значимых недостатков применения мембранных УЧЭ в составе датчиков полного и статического давлений можно разделить на две группы.

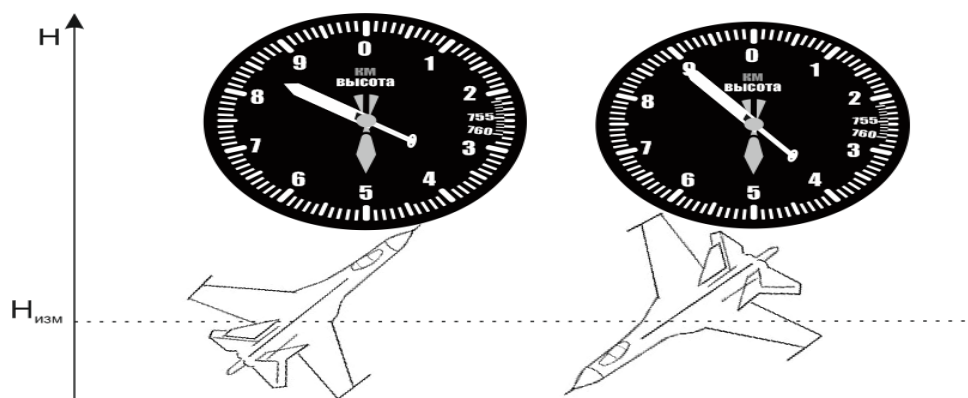
Первая группа недостатков, связанная с контактным воздействием УЧЭ и вторичного преобразователя давления: трение между элементами УЧЭ и вторичного преобразователя, измерительное усилие на УЧЭ со стороны элементов вторичного преобразователя. Кроме того, к данной группе можно отнести и размер жёсткого центра мембранного УЧЭ.

Вторая группа недостатков, связанная с величиной эквивалентных напряжений: остаточные деформации, упругое последствие, упругий гистерезис, усталостное разрушение УЧЭ.

Вышеперечисленные недостатки проявляются следующим образом: в виде отклонения относительно установленного нулевого значения; гистерезисных явлений; разрушений мест контактного воздействия между первичным и вторичным измерительными преобразователями давлений. Разрушение мест контактно взаимодействия между преобразователями особенно остро проявляется при применении датчиков УЧЭ на основе структур «кремний на сапфире».

Влияние гистерезисных явлений может вызвать искажение в показаниях барометрических высотомеров [19, 21]. Так, при относительно быстром наборе и снижении ВС показания приборов на одной и той же высоте могут оказаться разными (рис. 1.8.).

И первая и вторая группы недостатков связана в большей степени с конструктивным исполнением и функциональными возможностями вторичного преобразователя давлений.



*Рис. 1.8. Проявление гистерезисных явлений.*

Первая группа недостатков устраняется применением бесконтактных методов преобразования деформации УЧЭ в аналоговый или цифровой сигнал.

Вторая группа недостатков может быть решена не только за счет специальных технологических операции при изготовлении УЧЭ, но и минимизацией эквивалентных напряжений за счет применения высокочувствительных вторичных преобразователей давлений.

Нелинейность статической характеристики мембранных УЧЭ (в отличие от сильфонов, трубчатых пружин) предопределила их массовое применение в качестве первичных измерительных преобразователей давлений в составе механических и электрических приборов для индикации высотно-скоростных параметров экипажу ВС. Обусловлено это тем, что закономерность изменения статического и полного давлений в зависимости от высотно-скоростных параметров ВС носит нелинейный характер. При этом нелинейность характеристики мембранных УЧЭ и нелинейность изменения градиента измеряемых давлений по высоте строго противоположны, что позволяет получить близкий к линейному выходному сигналу датчика.

#### **1.4. Определение характеристики упругого чувствительного элемента для датчика статического давления**

Эффективность работы УЧЭ датчиков статического давления во многом определяется реализованной статической характеристикой [23], в предлагаемом

варианте – ПЗС-линейной на выходе при нелинейном изменении давления на входе.

Определение значения перепада давлений, необходимого для осуществления деформации в заданных пределах УЧЭ для датчика статического давления, по известной закономерности изменения давления  $P_H$  по высоте полета:

$$P_H = P_0 \left( 1 - \frac{\tau H}{T_0} \right)^{\frac{1}{\tau R}}. \quad (1.2)$$

где,  $P_0$  – давление на нулевой высоте,  $T_0$  – температура на нулевой высоте,  $\tau$  – температурный градиент,  $R$  – газовая постоянная,  $H$  – текущая высота.

Максимальный прогиб мембраны  $\omega_{0max}$  достигается при  $H_{min}$ , минимальный –  $\omega_{0min}$  при  $H_{max}$ . Предполагая, что характеристика упругого чувствительного элемента линейна по высоте, получено уравнение прямой, проходящей через две точки с координатами  $(\omega_{0max}, H_{min})$  и  $(\omega_{0min}, H_{max})$ :

$$H = \frac{(\omega_0 - \omega_{0max})(H_{max} - H_{min})}{\omega_{min} - \omega_{0max}} + H_{min}, \quad (1.3)$$

где,  $\omega_0$  – прогиб упругого чувствительного элемента на высоте  $H$ . Упругий элемент деформируется за счет перепада давлений  $\Delta P$ :

$$\Delta P = P_H - P_{\text{вак}}. \quad (1.4)$$

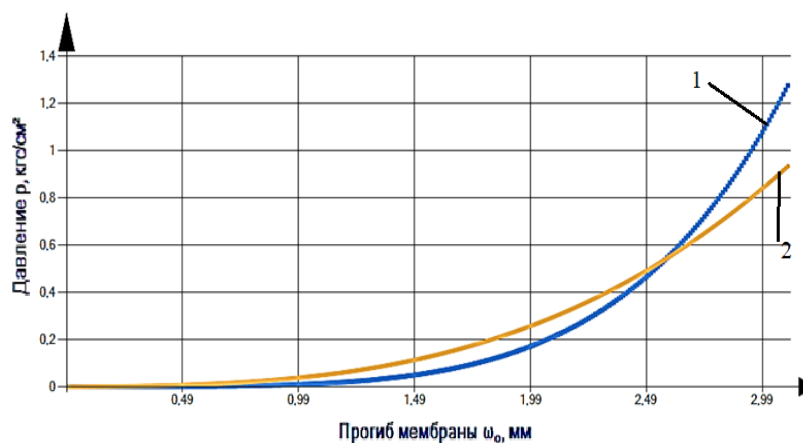
где,  $P_{\text{вак}}$  – опорное давление или давление вакуума.

Преобразовав (1.2) и (1.3) в (1.4), получено значение перепада давлений, необходимого для осуществления деформации в заданных пределах упругого чувствительного элемента для датчика статического давления:

$$\Delta P = P_0 \left( 1 - \frac{\tau \left( \frac{(\omega_0 - \omega_{0max})(H_{max} - H_{min})}{\omega_{min} - \omega_{0max}} + H_{min} \right)}{T_0} \right)^{\frac{1}{\tau R}} - P_{\text{вак}}, \quad (1.5)$$

Максимальное значение деформации мембраны  $\omega_{0max}$  определяются как геометрическими размерами упругого чувствительного элемента, так и техническими возможностями вторичного преобразователя.

На рис. 1.9 представлена потребная характеристика мембранного УЧЭ элемента, полученная на основании вышеизложенного метода. Методика расчета характеристики мембранного УЧЭ подробно изложена в работе [4].



*Рис. 1.9. Статическая характеристика мембранного УЧЭ для датчика статического давления: 1 – потребная, 2 – расчетная.*

Таким образом, представленные выше характеристики позволяют обосновать определение потребной характеристики УЧЭ датчика статического давления, обеспечивающей линейризацию выходного сигнала датчика.

### 1.5. Определение характеристики упругого чувствительного элемента для датчика полного давления

Аналогично [9], определение значения перепада давлений, необходимого для осуществления деформации в заданных пределах упругого чувствительного элемента для датчика полного давления, осуществляется по известной закономерности изменения давления  $P^*$  от скорости полета:

$$P^* = P_H + \frac{\rho c^2}{2}, \quad (1.6)$$

где  $P_H$  - статическое давление,  $c$  - текущая скорость,  $\rho$  - плотность воздуха.

Очевидно, что полное давление с увеличением скорости увеличивается, при этом максимальный прогиб мембраны  $\omega_{0max}$  достигается при  $c_{max}$ , а минимальный прогиб  $\omega_{0min}$  при  $c_{min}$ . Предполагая, что характеристика упругого чувствительного элемента линейна по скорости, получено уравнение прямой, проходящей через две точки с координатами  $(\omega_{0max}, c_{max})$  и  $(\omega_{0min}, c_{min})$ .

$$c = \frac{(\omega_0 - \omega_{0max})(c_{min} - c_{max})}{\omega_{min} - \omega_{0max}} + c_{max}, \quad (1.7)$$

где  $\omega_0$  – прогиб упругого чувствительного элемента при скорости  $c$ .

Упругий чувствительный элемент деформирует за счет образовавшегося перепада давлений  $\Delta P$ :

$$\Delta P = P^* - P_{оп}, \quad (1.8)$$

где  $P_{оп}$  – опорное давление.

Для измерения полного давления в качестве опорного давления аэрометрических устройств используется статическое давление  $P_H$ , поэтому выражение (1.8) принимает вид:

$$\Delta P = P^* - P_H, \quad (1.9)$$

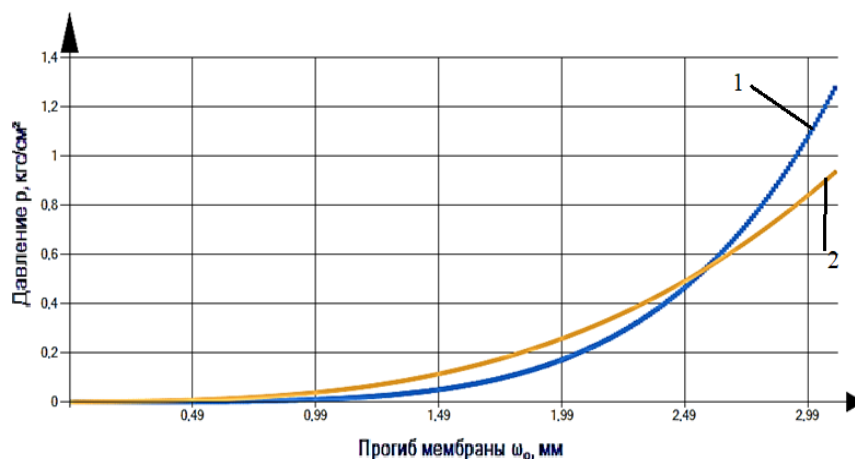
Преобразовав (1.6), (1.7) и (1.8) в (1.9), получено значение перепада давлений, необходимого для осуществления деформации в заданных пределах упругого чувствительного элемента для датчика полного давления:

$$\Delta P = \frac{\rho \left( \frac{(\omega_0 - \omega_{0max})(c_{min} - c_{max})}{\omega_{min} - \omega_{0max}} + c_{max} \right)^2}{2}. \quad (1.10)$$

Таким образом, представленные расчеты позволяют определять характеристики упругого элемента датчика полного давления, отталкиваясь от чувствительности вторичного датчика.

На рис. 1.10 представлена потребная характеристика мембранного УЧЭ элемента, полученная на основании вышеизложенного метода. Методика расчета характеристики мембранного УЧЭ подробно изложена в работе [4].

Таким образом, представленные выше характеристики позволяют обосновать определение потребной характеристики УЧЭ датчика полного давления, обеспечивающей линеаризацию выходного сигнала датчика.



*Рис. 1.10. Статическая характеристика мембранного УЧЭ для датчика статического давления: 1 – потребная, 2 – расчетная.*

### **1.6. Анализ конструктивного облика вторичных измерительных преобразователей давлений**

Перечень методов [13, 14, 26, 52, 59, 80, 87, 50, 55, 32, 108], обеспечивающих преобразование информации от первичных измерительных преобразователей давлений, включает в себя преобразователи: механические, трансформаторные [1], тензометрические [15, 42, 57], пьезорезисторные [74, 75, 89, 110], емкостные [33], индукционные, ионизационные, оптические и резонансные (частотные) [79].

На рисунке 1.11. представлены обобщенные результаты проведенного анализа, в частности, основные достоинства и недостатки изложенных методов.

Исходя из выбранной концепции, далее рассматриваются возможные варианты реализации вторичных преобразователей давлений на основе бесконтактного съема сигнала от первичного измерительного преобразователя давлений.

Как упоминалось ранее, частотный метод (резонансный) преобразования информации получил наибольшее распространение в составе датчиков давлений, используемых в современных СВС. Основные недостатки данных датчиков представлены выше. Однако, следует добавить ввиду того, что для измерения частоты колебаний резонатора используется индуктивный или емкостной методы,

частотному методу присущи и недостатки указанных методов.

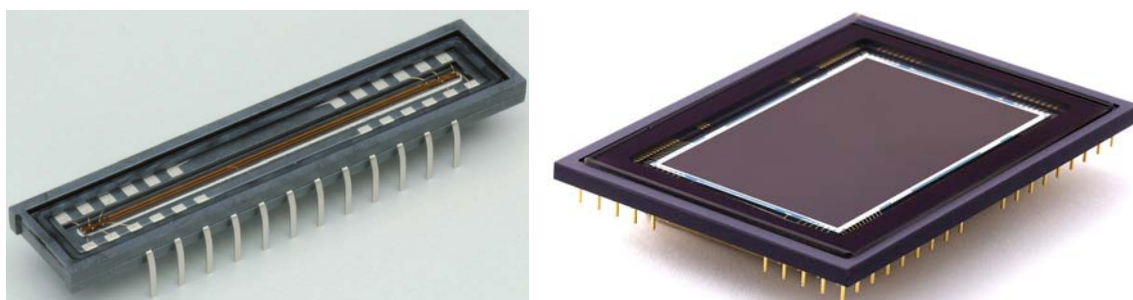
| Достоинства   | Тензометрический (КНС-преобразователи)            | Недостатки   |
|---|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Высокая степень защиты от агрессивной среды</li> <li>2. Высокий предел рабочей температуры</li> <li>3. Налажено серийное производство</li> <li>4. Низкая стоимость</li> </ol>   |   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Неустраняемая нестабильность градуировочной характеристики</li> <li>2. Высокие гистерезисные эффекты от давления и температуры</li> <li>3. Низкая устойчивость при воздействии ударных нагрузок и вибраций</li> </ol>  |
| Достоинства   | Пьезорезистивный (на монокристаллическом кремнии) | Недостатки   |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Высокая стабильность характеристик</li> <li>2. Устойчивость к ударным нагрузкам и вибрациям</li> <li>3. Низкие гистерезисные эффекты</li> <li>4. Высокая точность</li> <li>5. Низкая цена</li> <li>6. Возможность измерять давление раз личных агрессивных средств</li> </ol> |   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ограничение по температуре (до 150°C)</li> </ol>   |
| Достоинства   | Емкостной   | Недостатки   |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Высокая точность</li> <li>2. Высокая стабильность характеристик</li> <li>3. Возможность измерять низкий вакуум</li> <li>4. Простота конструкции</li> </ol>  |   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Зачастую, нелинейная зависимость емкости от приложенного давления</li> <li>2. Необходимо дополнительное оборудование или электрическая схема для преобразования емкостной зависимости в один из стандартных выходных сигналов</li> </ol>   |
| Достоинства   | Резонансный                                       | Недостатки   |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Высокая стабильность характеристик</li> <li>2. Высокая точность измерения давления</li> </ol>   |   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. При измерении давления агрессивных сред необходимо защитить чувствительный элемент, что приводит к потере точности измерения</li> <li>2. Высокая цена</li> <li>3. Длительное время отклика</li> <li>4. Индивидуальная характеристика преобразования давления в электрический сигнал</li> </ol> |
| Достоинства   | Индукционный                                      | Недостатки   |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Возможность измерять дифференциальные давления с высокой точностью</li> <li>2. Незначительное влияние температуры на точность измерения</li> </ol>  |   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сильное влияние магнитного поля</li> <li>2. Чувствительность к вибрациям и ударам</li> </ol>   |
| Достоинства   | Ионизационный                                     | Недостатки   |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Возможность измерение высокого вакуума</li> <li>2. Высокая точность</li> <li>3. Стабильность выходных параметров</li> </ol>   |   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Нельзя использовать подобные приборы при высоком давлении (низкий вакуум является порогом)</li> <li>2. Нелинейная зависимость выходного сигнала от приложенного давления</li> <li>3. Высокая хрупкость</li> <li>4. Необходимо сочетать с другими датчиками давления</li> </ol>                 |

*Рис. 1.11. Достоинства и недостатки методов преобразования информации.*

На современном этапе развитии современной микропроцессорной и вычислительной техники появляется возможность применения высокотехнологичных решений, в частности, получающий в последние годы широкое распространение, оптоэлектронные преобразователи на основе многоэлементных фотоэлектронных приемников.

Конструктивно, устройства на базе фотоэлектронных приемников [88] выполнены следующим образом, в линейках фотоэлектронных приемников (ЛФП) отдельные фоточувствительные элементы (пиксели) расположены вдоль одной

координаты (рис. 1.12а), а в матрицах фотоэлектронных приёмников (МФП) пиксели равномерно заполняют прямоугольное поле (рис. 1.12б).



а) б)  
**Рис. 1.12.** Фотоприемные устройства:  
 а – ЛФП, б – МФП.

Принцип работы данных устройств заключается в формировании внутри каждого пикселя электрического сигнала, пропорционального поглощенной им оптической энергии.

Достигается это благодаря фоточувствительному р-п переходу (как и в обычном фотодиоде), через который происходит разряд конденсатора фотоприемного элемента. Чем интенсивнее будет оптическая мощность, попадающая на пиксель, тем больше будет ток, протекающий по фотодиоду, и тем быстрее будет разряжаться конденсатор. В конце цикла измерения происходит считывание остаточного заряда конденсаторов пикселей. При последовательном опросе пикселей на выходе ЛФП (или МФП) будет формироваться электрический сигнал, у которого изменение амплитуды во времени отображает распределение оптической мощности в пространстве фотоприемного устройства.

Устройства, на базе фотоэлектронных приемников нашли достаточно широкий спектр применения как средство измерения. Их используют для определения углового положения источника излучения[51], в спектрометрии[44, 31, 81, 82, 105], при определении положения объектов[101, 102] и т.д. Ведутся работы[16, 40, 41, 46, 47, 76, 90, 100] по улучшению алгоритмов управления и обработки сигналов данных устройств.

К основному недостатку данного метода относят необходимость интеграции микроконтроллера в состав датчика давлений для управления и обработки



выходного сигнала фотоэлектронного устройства. Данный недостаток, в свою очередь, является и преимуществом данного метода, так как взаимодействие между компонентами бортового радиоэлектронного оборудования современных ВС реализовано посредством цифровых протоколов информационного взаимодействия.

Таким образом, датчики статического и полного давлений, реализованные на базе УЧЭ и ПЗС-линеек, обладают высокими метрологическими характеристиками, малым собственным потреблением мощности, малыми габаритами и массой.

Сказанное, предопределяет перспективность разработки и совершенствования датчиков давления на основе ПЗС-линеек в направлении повышения точности и улучшения эксплуатационных характеристик.

### **1.7. Методы измерений с использованием фотоэлектронных линеек**

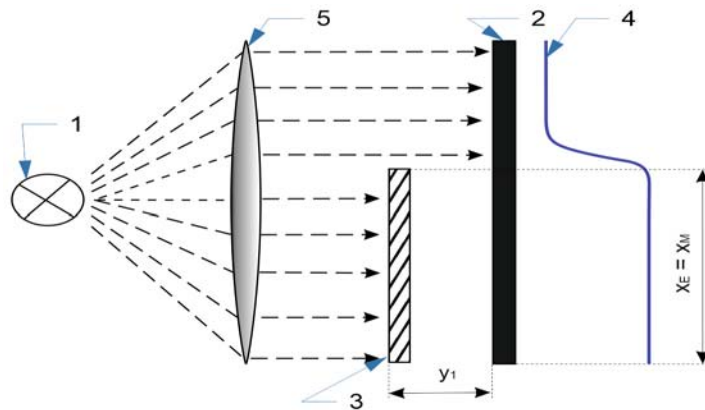
В работе [102] представлены методы определения положения объекта с использованием ЛФП и МФП. Данные методы позволяют определить положение объекта по проецируемой тени.

Метод ограничен габаритными размерами ЛФП и для его реализации необходима опорная точка для отчета и, как правило, это первый рабочий пиксель ЛФП.

Установлено влияние положения источника оптического излучения на соотношение между положением края измеряемого объекта и положением края в профиле освещенности на ЛФП.

Первый метод подразумевает использование источника оптического излучения с параллельным распространением лучей. Подобное достигается либо использованием коллимирующей линзы (рис. 1.13), либо размещением источника оптического излучения на теоретически бесконечном расстоянии от ЛФП. В этом случае положение кромки объекта и его проекция на ЛФП перпендикулярны

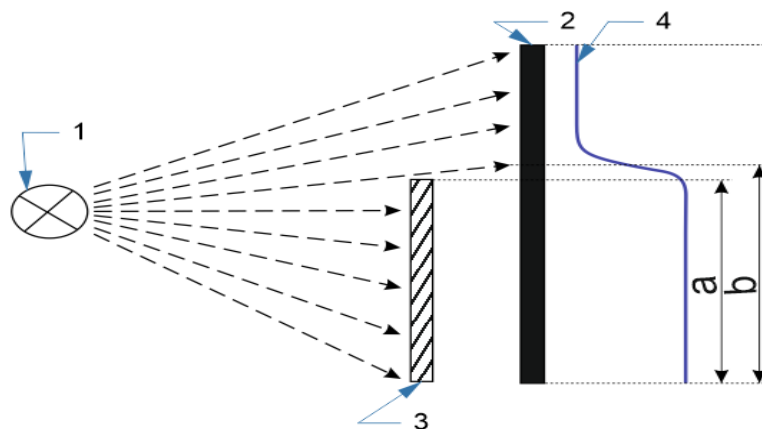
вектору оптического луча.



**Рис. 1.13.** Измерение положения кромки с помощью источника параллельных лучей: 1 – источник оптического излучения, 2 – ЛФП, 3 – объект, 4 – освещенность, 5 – спрямляющая линза.

Второй метод вводит, для упрощения измерений, точечный источник оптического излучения, располагаемый на конечном расстоянии от ЛФП.

Подобное расположение источника оптического излучения приводит к усложнению алгоритмов обработки результатов измерений, в результате смещения между краем объекта и краем профиля освещенности ЛФП (рис. 1.14).



**Рис. 1.14.** Принцип измерения с помощью тени, проецируемой на ЛФП: 1 – источник оптического излучения, 2 – ЛФП, 3 – объект, 4 – освещенность,  $a$  – положение объекта,  $b$  – положение тени.

В первом методе представлен алгоритм расчета положения объекта по интенсивности оптического излучения с применением коллимирующей линзы. Так как, кромки объекта и его проекция на ЛФП перпендикулярны вектору оптического луча, положение края в профиле освещенности ( $x_M$ ) в этом случае равно положению края измеряемого объекта ( $x_E$ ):

$$x_E = x_M, \quad (1.11)$$

Интенсивность оптического излучения на ЛФП определяется по формуле:

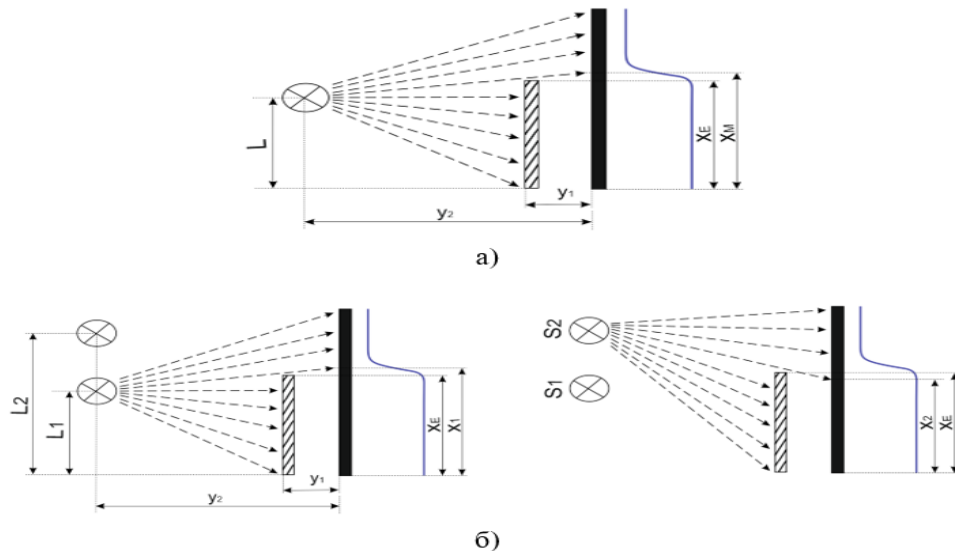
$$I = \left| \frac{I_0}{2} C \left( -\sqrt{\frac{2}{\lambda y_1}} x \right) - i S \left( -\sqrt{\frac{2}{\lambda y_1}} x \right) + \frac{1}{2} (1-i) \right|^2, \quad (1.12)$$

где  $\lambda$  – длина волны оптического излучения;  $y_1$ -расстояние между измеряемым объектом и ЛФП;  $C(\alpha)$  и  $S(\alpha)$  - интегралы Френеля.

Анализ выражения (1.12) показывает, что интенсивность оптического излучения в положении края измеряемого объекта ( $x = 0$ ) равна  $0.25I_0$ .

Сравнительный анализ выходного сигнала ЛФП с пороговым уровнем, установленным на 25 %, позволяет определить положение края кромки объекта.

Во втором методе применяется точечный источник оптического излучения, который располагается на конечном расстоянии от измеряемого объекта. Положение края кромки объекта отличается от края в профиле освещенности ЛФП, что в свою очередь вызовет расхождение оптических лучей, излучаемых источником оптического излучения (рис.1.15).



**Рис. 1.15.** *Позиции измерения при использовании точечного оптического излучения: а – один источник оптического излучения, б – два источника оптического излучения.*

Расчетное значение положения края измеряемого объекта  $x_E$ , в этом случае, определяется в зависимости от положения источника оптического излучения  $L$ ,

положения края в профиле освещенности  $x_M$ , расстояния от ЛФП до измеряемого объекта  $y_1$ , расстояния от ЛФП до источника оптического излучения  $y_2$ .

$$x_E = \frac{y_1}{y_2}(L - x_M) + x_M. \quad (1.13)$$

Для реализации данного метода необходимо установить фактическое значение расстояния от ЛФП до измеряемого объекта  $y_1$  что и является его недостатком.

Применение дополнительного источника оптического излучения устраняет вышеуказанный недостаток.

Реализация алгоритма для определения положения кромки объекта с использованием двух точечных источника оптических излучений состоит из двух чередующихся циклов. При смене каждого цикла задействуется только один источник оптического излучения и положение края измеряемого объекта определяется:

$$x_E = \frac{L_2 x_1 - L_2 x_2}{L_2 - L_1 + x_1 - x_2}. \quad (1.14)$$

Очевидно, что в данной интерпретации метода определения края измеряемого объекта исключена необходимость учета расстояния от измеряемого объекта до ЛФП, но не исключено его влияние на точность измерения. Увеличение этого расстояния приводит к возрастанию погрешностей измерений в следствии увеличении ширины края в профиле освещенности ЛФП.

Таким образом, предложенные в работе [102] методы обеспечивают бесконтактное измерение положение объекта использованием ЛФП. Каждый из представленных методов называется «теневым».

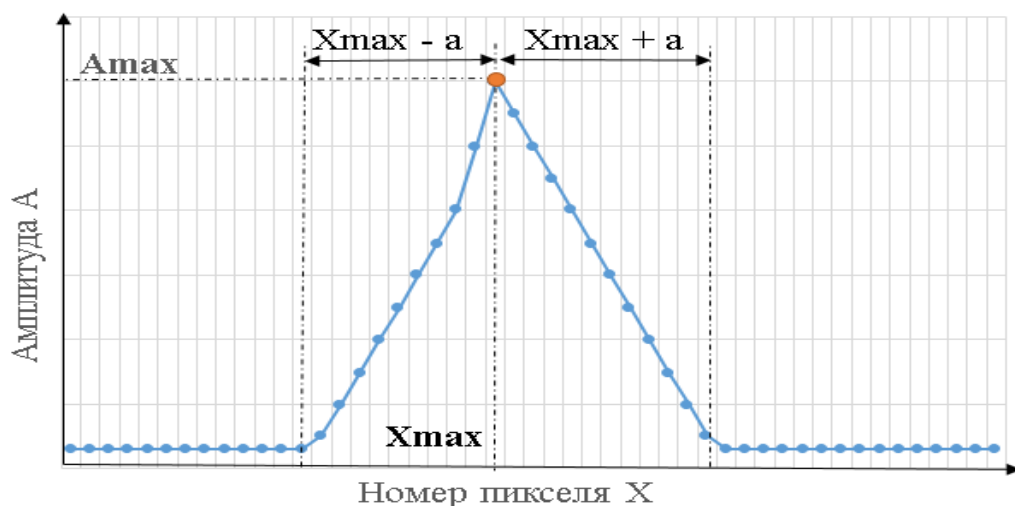
Первый метод, за счет использования коллимированного луча обеспечивает более точное определение положение края измеряемого объекта, но требует наличия коллимирующей линзы.

Второй метод позволяет осуществить использование более простой конструкции, но усложняет алгоритм определения положения края измеряемого объекта.

Во всех случаях диапазон измеряемых перемещений ограничен длиной ПЗС-датчика. При использовании точечного источника света, освещение ПЗС-линейки осуществляется неравномерно, что приводит к дифракции света и, как следствие, к низкой точности определения величины смещения объекта. Наконец, при воздействии вибраций и ударов, погрешность измерений будет достигать десятков процентов.

Указанных недостатков можно избежать при использовании известного метода вычисления координат светового пятна, проецируемого на поверхность ЛФП при использовании так называемого центроид - метода [27].

На первом этапе вычислений определяются номера пикселя ЛФП  $X_{max}$ , амплитуда сигнала в котором соответствует локальному максимуму  $A_{max}$  в пределах светового пятна на фоточувствительной поверхности ЛФП (рис. 1.16).



**Рис. 1.16.** Распределение амплитуды напряжения по пиксел елям ЛФП в пределах светового пятна.

Затем выделяется область из  $a$  пикселей до и  $a$  пикселей после максимума.

Далее для данной области осуществляется вычисление центра тяжести оптического пятна  $C$ , выраженное в номере пикселя, по формуле:

$$C = \frac{\sum_{i=X_{max}-a}^{X_{max}+a} (A_i \times i)}{\sum_{i=X_{max}-a}^{X_{max}+a} (A_i)}, \quad (1.15)$$

где  $A_i$  — амплитуда сигнала с  $i$ -го пикселя в окрестностях пятна,  $X_{max}$  — номер пикселя, амплитуда с которого в пределах пятна максимальна.

Количество пикселей  $a$  выбирается таким образом, чтобы охватить все пиксели вокруг локального максимума, амплитуда сигнала с которых заметно превышает начальный (темновой) уровень.

### 1.8. Выводы по главе

Анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы о конструктивных особенностях, метрологических характеристиках, методах разработки и проектирования упругих чувствительных элементов, методах разработки и проектирования вторичных преобразователей датчиков давлений, как элементов систем воздушных сигналов, позволил сделать следующие выводы:

1. Современный конструктивный облик датчиков статического и полного давлений не удовлетворяет в полной мере потребности в высокоточных, энергоемких и малогабаритных датчиках давлений, особенно в стремительно развивающихся цифровых системах воздушных сигналов, интегрированных систем резервных приборов и беспилотных летательных аппаратов с ограниченной энерговооруженностью.

2. Установлены основные факторы, влияющие на погрешности измерений с использованием упругих чувствительных элементов, в частности, контактное воздействие первичного и вторичного преобразователей давлений, точность преобразования информации сигнала от первичного преобразователя вторичным.

3. На сегодняшний день отсутствуют методики расчета упругого чувствительного элемента датчиков статического и полного давлений, которые бы учитывали закономерность изменения давления по высоте (для датчиков статического давления) и по скорости (для датчиков полного давления), увязывая их с функциональными возможностями вторичного преобразователя на базе ПЗС-линеек

4. С учетом опыта интеграции известных устройств на базе фотоэлектронных приемников в измерительную технику, конструктивный облик вторичных преобразователей давлений может быть расширен за счет

использования оптоэлектронного преобразователя, обладающего высокой чувствительностью, малым энергопотреблением, малыми габаритами и массой.

### 1.9. Постановка задачи

Целью данной работы является разработка и исследование новых датчиков статического и полного давлений, использующих оптоэлектронные преобразователи на основе ЛФП с улучшенными метрологическими характеристиками, сниженными массогабаритными параметрами конструкции и уменьшенным собственным потреблением мощности.

Поставленная цель достигается решением следующих **задач**:

1. Разработка методики расчета УЧЭ, принципиальным отличием которой является учет технических характеристик вторичного преобразователя, в частности, порога чувствительности вторичного преобразователя и прогиба центра мембраны в функции координаты пикселя ЛФП.

2. Проектирование и разработка программы управления микроконтроллером, позволяющей осуществлять обработку сигналов с выхода ЛФП и существенно повысить точность измерений деформации мембран датчика давлений, использующего оптоэлектронные преобразователи.

3. Создание экспериментального стенда и проведение сравнительных исследований по определению величин прогибов мембраны, полученных аналитическим методом, с использованием программного комплекса ANSYS, и полученных в результате проведенных экспериментов.

4. Получение метода и алгоритма использования процесса ветвления исходной информации, который осуществляется применением шторок с  $n$  щелями, позволяющим сформировать на ЛФП  $n$  оптических пятен, перемещающихся в функции измеряемого давления.

5. Разработка экспериментальной установки для исследования метрологических характеристик датчиков статического и полного давлений на основе упругих мембран и оптоэлектронных преобразователей.

6. Экспериментальная проверка и оценка метрологических характеристик датчиков давлений на основе оптоэлектронных преобразователей.



## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УПРУГОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА С УЧЕТОМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВТОРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ИЗМЕРЯЕМОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ

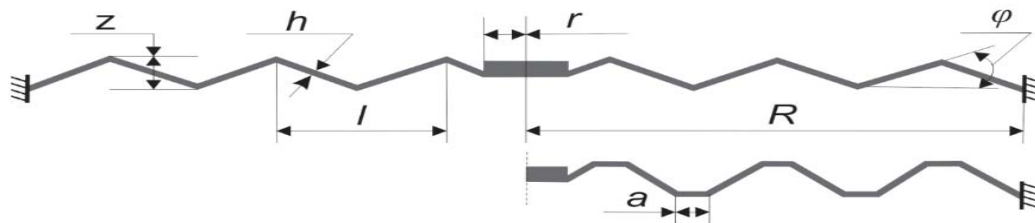
### 2.1. Математические зависимости между статической характеристикой упругого чувствительного элемента, порога чувствительности вторичного преобразователя и закономерностей изменения измеряемых давлений

Фундаментальные основы по расчету статических характеристик УЧЭ выполненных в виде плоских и гофрированных мембран, были заложены Д.Ю. Пановым [60] и В.И. Федосьевым [83, 84] почти 72 года назад. Уравнения больших статических прогибов мембраны с очень пологой синусоидальной гофрировкой, предложенные Д.Ю. Панова, позволили получить статическую характеристику мембраны. Однако, результаты решения уравнений давали значительное расхождение от реальных прогибов.

Значительный вклад в развитие методов статического расчета УЧЭ выполненных в виде гофрированных мембран внесла Л.Е. Андреева. В ее работах [2, 3, 4, 68] определена методика статического расчета УЧЭ в виде мембран с гофрировкой произвольной формы и глубины. Основное расчетное выражение [10]:

$$\frac{pR^4}{Eh^4} = \eta a \frac{\omega_0}{h} + \xi b \frac{\omega_0^3}{h^3}, \quad (2.1)$$

где,  $p$  – давление при заданном прогибе центра мембраны,  $R$  – радиус мембраны (рис. 2.1),  $\omega_0$  – прогиб центра мембраны,  $E$  – модуль упругости первого рода,  $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от формы профиля мембраны и природы материала,  $\eta$  и  $\xi$  – коэффициенты, зависящие от формы профиля и радиуса жёсткого центра.



**Рис.2.1.** Геометрические размеры мембраны:  $R$  – рабочий радиус мембраны,  $r$  – радиус жесткого центра,  $h$  – толщина мембраны,  $z$  – глубина гофры,  $l$  – длина волны гофры,  $\varphi$  – угол наклона волны,  $a$  – ширина трапеции (для трапециевидального профиля мембраны).

Ниже приведено обоснование алгоритма, который позволяет осуществить, с учетом технических характеристик вторичного преобразователя, расчет основных конструктивных параметров мембранных УЧЭ практически во всем диапазоне их типоразмеров.

Для учета технических характеристик вторичного преобразователя зададимся порогом чувствительности вторичного преобразователя  $S$  в мм, а прогиб центра мембраны представим, как:

$$\omega_{0i} = Si, \quad (2.2)$$

где,  $i$  – шаг измерения т.е. целочисленные значения от 1 до  $i_{\max} \approx \omega_{0\max} / S$ .

Под порогом чувствительности датчика понимается минимальное значение прогиба жесткого центра мембраны регистрируемого при обработке сигнала с ЛФП.

Преобразуя выражения (2.1) и (2.2), получим:

$$P_i = \left( \eta a \frac{Si}{h} + \xi b \frac{(Si)^3}{h^3} \right) \frac{Eh^4}{R^4}, \quad (2.3)$$

где,  $P_i$  – измеренное давление на  $i$  – шаге измерения.

Значение высоты  $H$ , при заданном значении статического давления  $P$ , определяется по формуле:

$$H = \left( 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\tau R} \right) \frac{T_0}{\tau}, \quad (2.4)$$

где,  $P_0$  – давление на опорной высоте в Па,  $T_0$  – температура на нулевой высоте в К,  $\tau$  – температурный градиент в  $^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ,  $R$  – газовая постоянная в  $\text{м}^3/\text{C}$ ,  $H$  – высота в м.

Преобразуя выражения (2.3) и (2.4), получим:

$$H_i = \left( 1 - \left( \frac{\left( \eta a \frac{Si}{h} + \xi b \frac{(Si)^3}{h^3} \right) \frac{Eh^4}{R^4}}{P_0} \right)^{\tau R} \right) \frac{T_0}{\tau}, \quad (2.5)$$

где,  $H_i$  – измеренное значение высоты на  $i$  – шаге измерения.

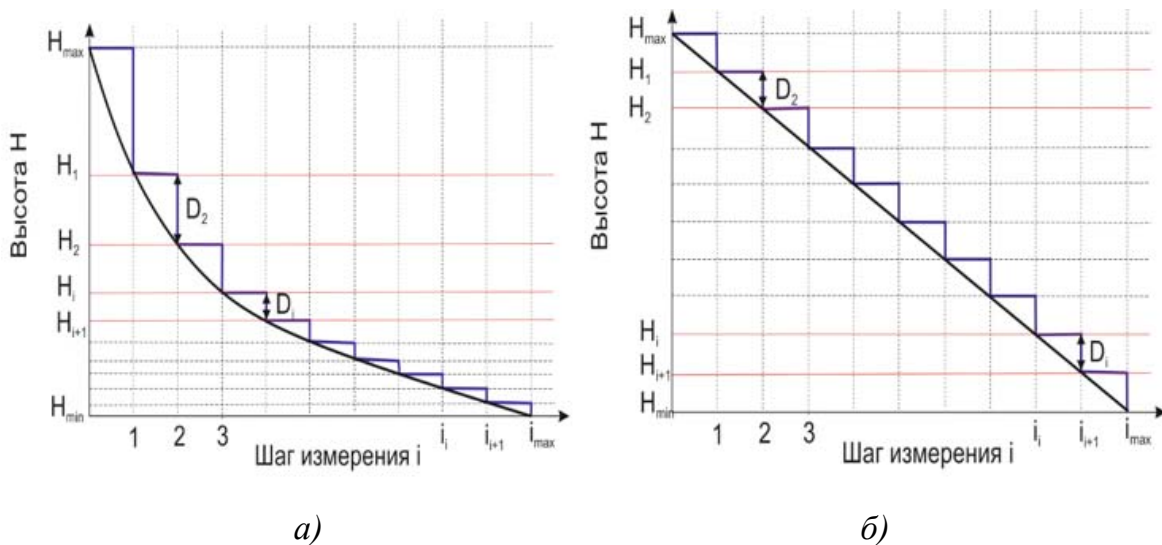
Для оценки погрешности измерения датчика давления введем понятие дискретность измерения  $D_{Hi}$ , на  $i$  шаге измерения:

$$D_{Hi} = H_{i+1} - H_i. \quad (2.6)$$

Именно этот параметр в дальнейшем будет использоваться как опорный параметр для оценки погрешности измерения датчика давления на стадии разработки упругого чувствительного элемента.

Закономерность изменения  $D_{Hi}$ , в рабочем диапазоне высот зависит от характеристики упругого чувствительного элемента.

Если характеристика упругого чувствительного элемента близка к линейной по давлению (рис. 2.2а), то дискретность  $D_{Hi}$  с увеличением высоты значительно увеличивается что приводит к снижению точности измерения. Если же характеристика упругого чувствительного элемента линейна по высоте (рис.2.2б), то  $D_{Hi} = const$ .



**Рис. 2.2.** Характеристика упругого чувствительного элемента:

а – линейная по давлению, б – линейная по высоте.

Меняя геометрические размеры упругого чувствительного элемента можно получить такие его характеристики, которые обеспечат заданную точность измерения высоты в соответствии с требованиями приложения 8 к Нормам летной годности самолетов НЛГС-3. В случае применения высокочувствительных вторичных преобразователей, каковыми являются оптоэлектронные устройства, появляется возможность увеличить толщину упругого чувствительного элемента, что положительно скажется на его долговечности и динамической устойчивости, а также позволит избежать упругих последствий.

Анализ выражений (2.5) и (2.6) показывает, что на величину дискретности оказывают влияние геометрические размеры упругого чувствительного элемента, его профиль и материал, а также значение порога чувствительности вторичного преобразователя. Чем меньше порог чувствительности вторичного преобразователя, при прочих равных условиях, тем меньше величина дискретности и, соответственно, выше точность измерения.

Аналогичным образом определим дискретность измерения для датчика скорости.

Известно, что:

$$P^* = P + \frac{\rho c^2}{2}, \quad (2.7)$$

где  $P^*$  – полное давление,  $P$  – статическое давление,  $\rho$  – плотность воздуха, тогда

$$c = \sqrt{\frac{2(P^* - P)}{\rho}}, \quad (2.8)$$

Так как, в предлагаемом датчике, для измерения статического и полного давлений в качестве опорного давления используется вакуум, то упругий чувствительный элемент имеет начальное нагруженное состояние, т.е. мембрана прогнута на величину  $\omega_{0cm}$  под действием статического давления  $P$ . Тогда, преобразуя выражения (2.3) и (2.8), получим:

$$c_i = \sqrt{\frac{2 \left( \left( \eta a \frac{(\omega_{0cm} + Si)}{h} + \xi b \frac{(\omega_{0cm} + Si)^3}{h^3} \right) \frac{Eh^4}{R^4} - P \right)}{\rho}}, \quad (2.9)$$

и

$$P_{дин i} = \frac{\rho c_i^2}{2}, \quad (2.10)$$

где,  $P_{дин i}$  – динамическое давление при скорости  $c_i$ .

$$P_i^* = P + \frac{\rho c_i^2}{2}, \quad (2.11)$$

где,  $P_i^*$  – полное давление при скорости  $c_i$ .

Дискретность измерений  $Dc_i$  при скорости  $c_i$ :

$$D_{ci} = c_{i+1} - c_i. \quad (2.12)$$

Предложенная методика позволяет производить расчет статических характеристик датчиков полного и статического давлений для мембран с произвольной гофрировкой и с учетом технических характеристик вторичного преобразователя при различных значениях и закономерностях изменения измеряемой физической величины.

Далее следует [22] рассчитать максимальное напряжение  $\sigma_{max}$  при максимальной рабочей нагрузке и коэффициент запаса прочности  $k$ .

## **2.2. Численное моделирование упруго-пластичных деформаций упругих чувствительных элементов методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS**

Очень быстрое развитие вычислительной техники привело к тому, что те методики, которые требовали трудоемких и длительных математических расчетов стали не актуальны и не так точны по сравнению с тем, что позволяют САЕ-системы инженерного анализа.

Известные САЕ-системы инженерного анализа [18], такие как ANSYS, ABAQUS, I-DEAS, COSMOS, NASTRAN, позволяют выполнить качественное моделирование упруго-пластичных деформаций, возникающих при внешнем воздействии. Указанные системы позволяют также представлять отклик системы в виде деформации и распределения напряжений.

Использование таких программ ускоряет работу конструкторских бюро и сокращает время разработки, снижает стоимость изделий и повышает качество создаваемых упругих чувствительных элементов.

Одним из самых распространенных таких комплексов, на сегодняшний день, является программа ANSYS, использующая метод конечных элементов.

Данный метод широко используется для решения сложных задач по определению упругопластических деформаций, не имеющих прямого аналитического решения.

Основные этапы конечно-элементного моделирования [111, 112]:

1. Постановка задачи (выбор математической модели).
2. Разработка (или импорт) геометрической модели исследуемого геометрического объекта.
3. Выбор или задание свойств материалов.
4. Создание конечно-элементной модели (создание сетки).
5. Задание граничных условий.
6. Задание контактных условий.
7. Определение выходных данных результатов решения.
8. Решение.
9. Анализ результатов решения.

Крайне важным этапом в проектировании УЧЭ является расчет максимального напряжения  $\sigma_{max}$  при максимальной рабочей нагрузке и коэффициент запаса прочности  $k$ . Именно эти показатели отражают способность упругого чувствительного элемента сохранять свою работоспособность во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок.

Для определения максимальных напряжений  $\sigma_{max}$  и коэффициентов запаса прочности  $k$  в программном комплексе ANSYS Design Modeler разработаны модели упругих чувствительных элементов, геометрические размеры которых представлены в таблице 2.1.

Для учета нелинейной зависимости между напряжением и деформацией использовалось уравнение Ромберга-Осгуда:

**Таблица 2.1. Материал и геометрические размеры УЧЭ.**

| № УЧЭ | Материал УЧЭ     | Профиль УЧЭ     | R, мм | h, мм | H, мм | n, шт. |
|-------|------------------|-----------------|-------|-------|-------|--------|
| 1     | Бронза БрБНТ 1.9 | Трапецеидальный | 35,98 | 0,13  | 1,088 | 4      |
| 2     | Бронза БрБ2      | Синусоидальный  | 25    | 0,22  | 0,75  | 3      |
| 3     | Бронза БрБ2      | Синусоидальный  | 23,25 | 0,145 | 0,26  | 6      |
| 4     | Бронза БрБНТ 1.9 | Синусоидальный  | 24,75 | 0,135 | 0,4   | 12     |
| 5     | Бронза БрБ2      | Пильчатый       | 27,74 | 0,15  | 0,54  | 5      |
| 6     | Бронза БрБ2      | Синусоидальный  | 24,92 | 0,13  | 0,42  | 8      |

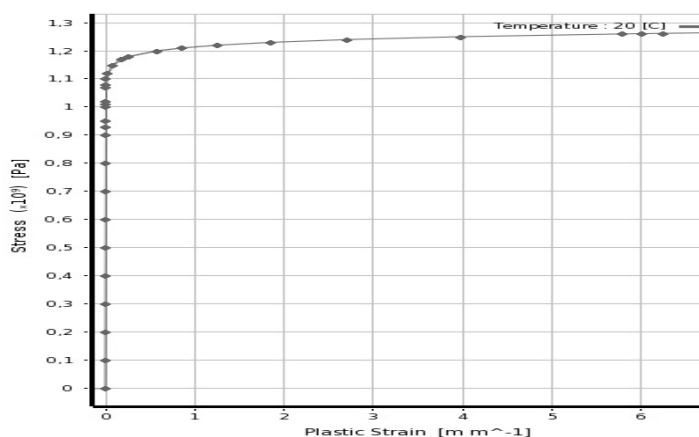
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n, \quad (2.13)$$

где  $\varepsilon$  – деформация,  $\sigma$  – напряжение,  $E$  – модуль упругости первого рода,  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести, а  $n$  выражается как:

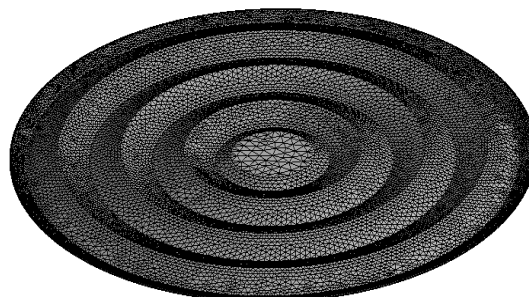
$$n = \ln \left( \frac{\delta - \frac{\sigma_{пц}}{E}}{0,002} \right) / \ln \left( \frac{\sigma_{пц}}{\sigma_{0,2}} \right), \quad (2.14)$$

где  $\delta$  – относительное удлинение после разрыва,  $\sigma_{пц}$  – предел пропорциональности.

Кривая деформирования бронзы БрБ2 представлена на рис. 2.3.

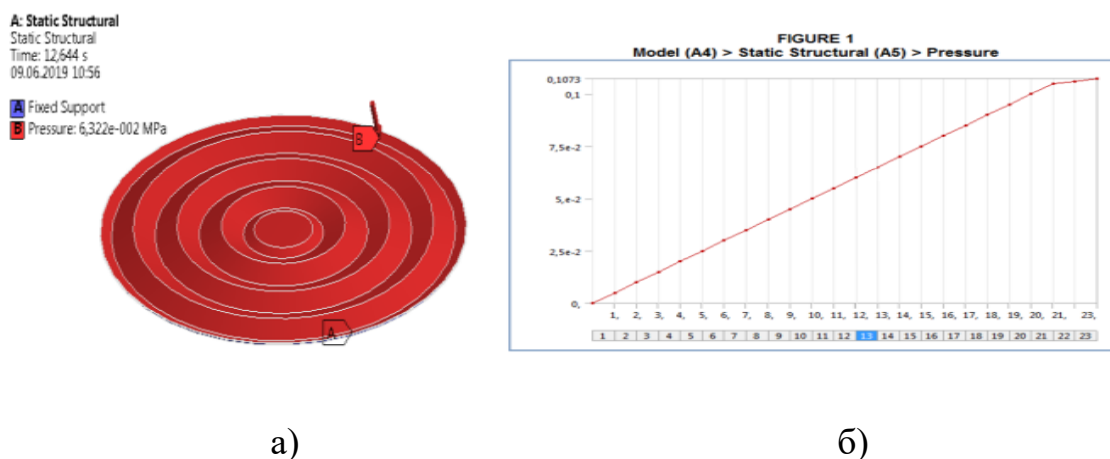
**Рис. 2.3. Кривая деформирования бронзы БрБ2.**

Далее следует передача геометрических моделей в модуль ANSYS Mechanical и создание сеточной модели (рис. 2.4).



**Рис. 2.4.** Конечно-элементная модель.

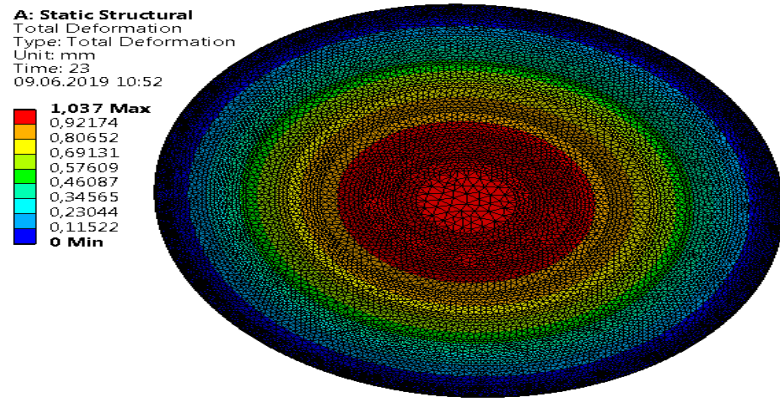
Задание граничных условий: жесткая заделка (Fixed Support) по краям гофрированной мембраны (ось Z), сверху (ось Y) действует равномерно распределенное давление (Pressure) величиной 0,107 МПа (для датчика статического давления) (рис. 2.5а) и 0,131 МПа (для датчика полного давления) с шагом приложения нагрузки 0,005 МПа (рис. 2.5б).



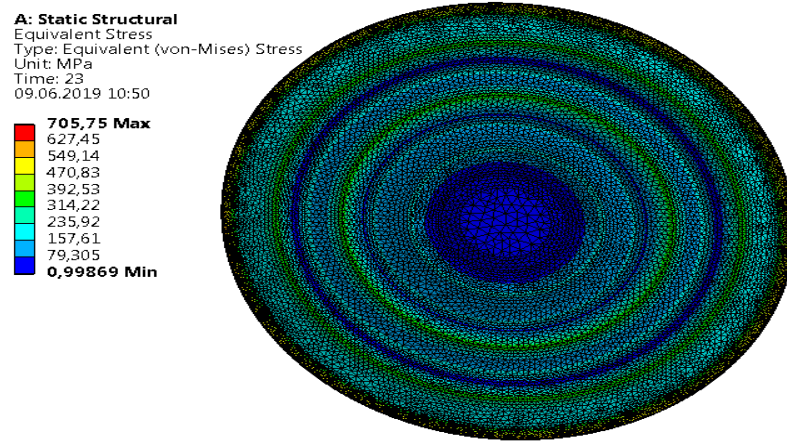
**Рис. 2.5.** Граничные условия: а - жесткая заделка (Fixed Support) по краям гофрированной мембраны (ось Z), сверху (ось Y) действует равномерно распределенное давление (Pressure).

Решение. В результате работы программы получены отклик системы в виде полей деформации (рис. 2.6а), распределения напряжений (рис. 2.6б), а также получены значения коэффициентов запаса прочности (рис. 2.6в).

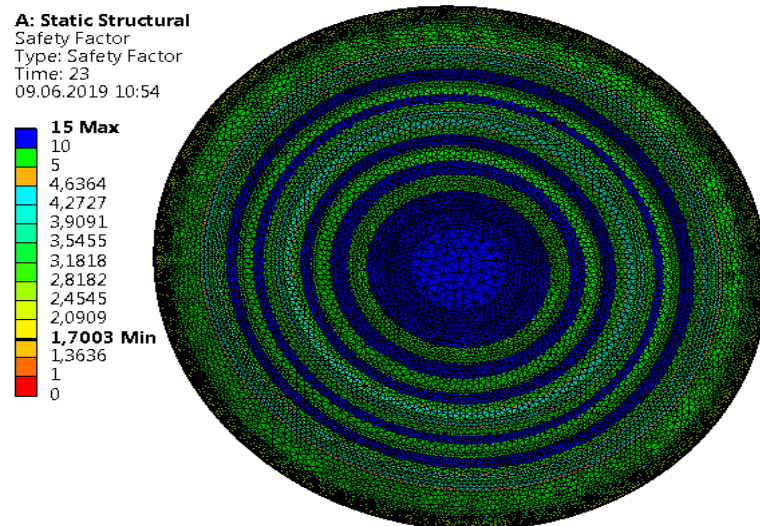




a)



б)



в)

*Рис. 2.6. Результат решения: а – распределение полей деформации, б – распределение полей эквивалентных напряжений, в – распределение полей с коэффициентом запаса прочности.*

### 2.3. Разработка обобщенного алгоритма статического расчета упругих чувствительных элементов для датчиков статического и полного давлений

На рис. 2.7 графический интерфейс пользователя программы [72], разработанной на языке программирования C++[69], реализующий алгоритм расчета УЧЭ.

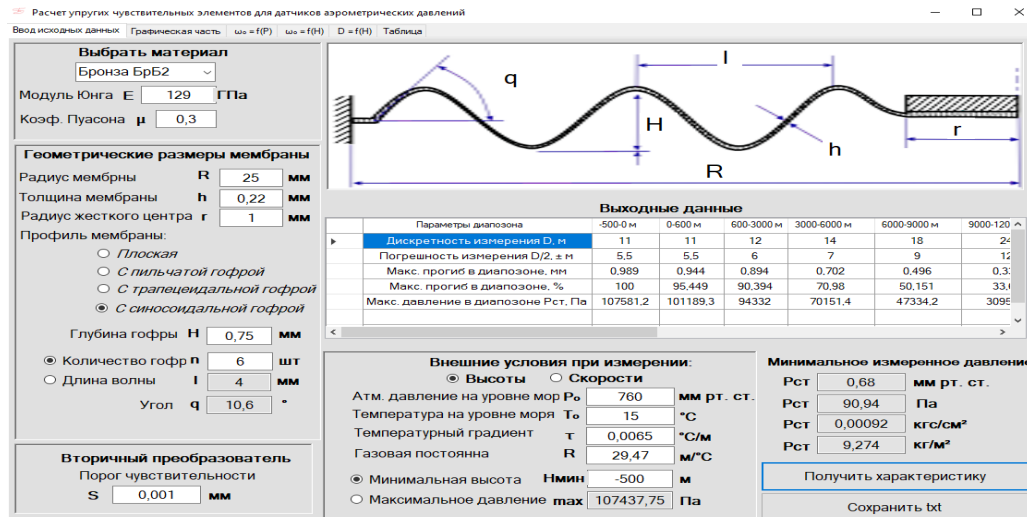


Рис. 2.7. Графический интерфейс пользователя программы – ввод исходных данных.

Кроме того, программа позволяет осуществлять графическую доводку (рис. 2.8) характеристик мембранных УЧЭ вариацией исходными данными.

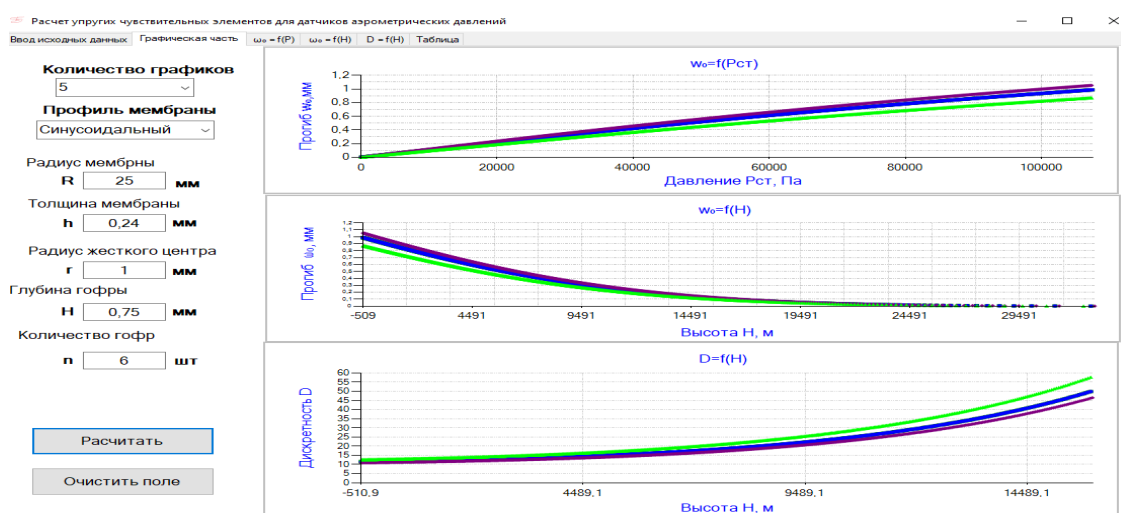


Рис. 2.8. Графический интерфейс пользователя программы – графическая доводка.

Обобщенный алгоритм расчета выглядит следующим образом:

1. Ввод исходных данных.

1.1. Материал и размеры.

1.1.1. Материал УЧЭ:  $E$ ,  $\mu$  (коэффициент Пуассона).

1.1.2. Геометрические размеры и профиль УЧЭ:  $R$ ,  $h$ ,  $r_0$ ,  $z$ , количество гофр  $n$ .

1.2. Порог чувствительности вторичного преобразователя  $S$ .

1.2. Выбор расчетной схемы.

2.2.1. Датчик статического давления.

2.2.2. Датчик полного давления.

1.3. Внешние условия при измерении:

3.1. Если выбран п. 2.2.1., ввод  $P_0$ ,  $R$ ,  $T_0$ ,  $\tau$ ,  $H_{min}$  или  $P_{max}$ .

3.2. Если выбран п. 2.2.2., ввод  $P_0$ ,  $\rho$ ,  $c_{max}$  или  $P_{дин max}$ .

4. Решение.

4.1. Вычисление коэффициентов:  $k1$ ,  $k2$ ,  $\alpha$ ,  $a$ ,  $b$  [68, с.258],  $\eta$ ,  $\xi$  [4, с. 292].

4.2. Если выбран п. 2.2.1., вычисление с сохранением значений  $P_i$ ,  $\omega_{0i}$ ,  $H_i$  и  $D_{Hi}$  в массиве данных при  $i$  от 1 до  $i_{max} = \omega_{0max} / S$  где,  $\omega_{0max} = f(P_{max})$ .

4.3. Если выбран п. 2.2.2., вычисление с сохранением значений  $P_i$ ,  $\omega_{0i}$ ,  $c_i$  и  $D_{ci}$  в массиве данных при  $i$  от 1 до  $i_{max} = \omega_{max} / S$  где,  $\omega_{max} = f(P_{дин max})$ .

5. Выходные данные.

5.1. Получение графических зависимости:

5.1.1. Если выбран п. 2.1.  $\omega_0 = f(P)$ ,  $\omega_0 = f(H)$ ,  $D_H = f(H)$ .

5.1.2. Если выбран п. 4.2.  $\omega_0 = f(P_{дин})$ ,  $\omega_0 = f(c)$ ,  $D_c = f(c)$ .

5. 2. Вывод значений в таблицу (рис. 2.9), содержащей:

5.2.1. Если выбран п. 4.1.:  $i$ ,  $P_i$ ,  $\omega_{0i}$ ,  $H_i$ ,  $D_{Hi}$ .

5.2.2. Если выбран п. 4.2.:  $i$ ,  $P_i$ ,  $\omega_{0i}$ ,  $c_i$ ,  $D_{ci}$ .

6. Анализ полученных результатов.

6.1. Если  $D_{Hi}$  ( $D_{ci}$ ) не обеспечивает требуемую точность измерения (в соответствии с требованиями НЛГС-3), то переход к п. 2.

## 7. Сохранение результатов в текстовый файл.

Расчет упругих чувствительных элементов для датчиков аэрометрических давлений

| Ввод исходных данных | Графическая часть   | $\omega_a = f(P)$ | $\omega_a = f(H)$ | $D = f(H)$           | Таблица            |
|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------|
| №                    | Давление<br>Рст, Па | Прогиб<br>w, мм   | Высота<br>H, м    | Дискретность<br>D, м | Точность<br>D/2, м |
| 1                    | 105,52              | 0,001             | 32417,465         | 1688,341             | 844,17             |
| 2                    | 211,04              | 0,002             | 30729,123         | 1096,672             | 548,336            |
| 3                    | 316,56              | 0,003             | 29632,45          | 831,409              | 415,704            |
| 4                    | 422,08              | 0,004             | 28801,04          | 677,196              | 338,596            |
| 5                    | 527,6               | 0,005             | 28123,844         | 575,208              | 287,604            |
| 6                    | 633,13              | 0,006             | 27548,636         | 502,255              | 251,127            |
| 7                    | 738,65              | 0,007             | 27046,381         | 447,226              | 223,613            |
| 8                    | 844,18              | 0,008             | 26599,154         | 404,092              | 202,046            |
| 9                    | 949,7               | 0,009             | 26195,061         | 369,283              | 184,641            |
| 10                   | 1055,23             | 0,01              | 25825,778         | 340,542              | 170,271            |
| 11                   | 1160,76             | 0,011             | 25485,235         | 316,37               | 158,185            |
| 12                   | 1266,29             | 0,012             | 25168,865         | 295,729              | 147,864            |
| 13                   | 1371,82             | 0,013             | 24873,136         | 277,877              | 138,938            |
| 14                   | 1477,35             | 0,014             | 24595,258         | 262,271              | 131,135            |
| 15                   | 1582,89             | 0,015             | 24332,986         | 248,499              | 124,249            |
| 16                   | 1688,43             | 0,016             | 24084,487         | 236,248              | 118,124            |
| 17                   | 1793,97             | 0,017             | 23848,238         | 225,271              | 112,635            |
| 18                   | 1899,51             | 0,018             | 23622,967         | 215,374              | 107,687            |
| 19                   | 2005,06             | 0,019             | 23407,593         | 206,4                | 103,2              |
| 20                   | 2110,6              | 0,02              | 23201,192         | 198,222              | 99,111             |
| 21                   | 2216,15             | 0,021             | 23002,97          | 190,736              | 95,368             |
| 22                   | 2321,71             | 0,022             | 22812,233         | 183,855              | 91,927             |
| 23                   | 2427,26             | 0,023             | 22628,378         | 177,506              | 88,753             |
| 24                   | 2532,82             | 0,024             | 22450,872         | 171,628              | 85,814             |
| 25                   | 2638,38             | 0,025             | 22279,244         | 166,168              | 83,084             |
| 26                   | 2743,95             | 0,026             | 22113,075         | 161,083              | 80,541             |

*Рис. 2.9. Графический интерфейс пользователя программы – вывод результатов в табличном виде.*

Далее следует расчет максимальных напряжений  $\sigma_{max}$  при максимальной рабочей нагрузке и коэффициента запаса прочности  $k$  [10]. Проверка условия обеспечения оптимальных рабочих напряжений  $\sigma_{max} \leq [\sigma_{0,005}]$  и коэффициента запаса прочности  $k > [k]$  ( $[k]$  – нормативный коэффициент запаса прочности) методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Если  $\sigma_{max} \geq [\sigma_{0,005}]$  или  $k < [k]$ , переход к п. 1.1. алгоритма.

Нормативный коэффициент запаса прочности  $[k]$  назначается на основании имеющегося опыта эксплуатации упругих чувствительных элементов. В изделиях общего машиностроения применяют  $[k] = 1,3 - 2,2$ .

### 2.4. Сравнительная оценка результатов математического моделирования упруго-пластичных деформаций методом конечно-элементного моделирования и уравнений приближенного статического расчета

При расчетах упругих чувствительных элементов для датчика статического давления рассматривался диапазон высот от минуса 500 м до 20000 м. Значение порога чувствительности датчика принимали  $S = 0,001$ .

В таблице 2.2 представлены значения дискретности измерения по высотам, а также минимальное измеренное давление  $P_l$  и максимальный прогиб мембраны

$\omega_{0max}$ . Из таблицы видно, что УЧЭ № 2 и № 5, при данной дискретности измерения, обеспечивают требуемую точность измерения, соответствующую требованиям

**Таблица 2.2. Дискретность измерения по высотам**

| № УЧЭ | Дискретность измерения по диапазонам высот |          |             |              |              |               |                |                | Минимальное измеренное давление $P_I$ , Па | Максимальный прогиб жесткого центра $\omega_{0max}$ , мм |
|-------|--|----------|-------------|--------------|--------------|---------------|----------------|----------------|--|--|
|       | -500-0 м.                                  | 0-600 м. | 600-3000 м. | 3000-6000 м. | 6000-9000 м. | 9000-12000 м. | 12000-15000 м. | 15000-20000 м. |  |  |
| 2     | 10   | 10       | 12          | 14           | 18           | 24            | 35             | 62             | 66,48                                      | 1,024  |
| 3     | 18   | 18       | 18          | 19           | 19           | 19            | 20             | 22             | 16,83                                      | 1,245  |
| 5     | 9  | 9        | 9           | 9            | 9            | 10            | 11             | 16             | 20,53                                      | 2,085  |

НЛГС-3.

При расчетах упругих чувствительных элементов для датчика полного давления рассматривался диапазон скоростей от 0 до 800 км/час. Значение порога чувствительности датчика принимали  $S = 0,001$ .

В таблице 2.3 представлены значения дискретности измерения по скоростям

**Таблица 2.3. Дискретность измерения воздушной скорости**

| № УЧЭ | Дискретность измерения воздушной скорости |     |     |         |      |      |         |      |         |      |      |      |      |
|-------|---|-----|-----|---------|------|------|---------|------|---------|------|------|------|------|
|       | 50  | 80  | 100 | 150-200 | 250  | 300  | 350-450 | 500  | 550-600 | 650  | 700  | 750  | 800  |
| 1     | 7,4                                       | 4,8 | 3,8 | 2       | 1,62 | 1,36 | 1,17    | 0,87 | 0,73    | 0,69 | 0,65 | 0,62 | 0,59 |
| 4     | 25  | 16  | 13  | 7,6     | 6    | 5    | 3,6     | 3,2  | 2,8     | 2,7  | 2,5  | 2,4  | 2,3  |
| 6     | 22  | 17  | 12  | 6       | 5,6  | 4,7  | 4,1     | 3,5  | 2,6     | 2,47 | 2,33 | 2,2  | 2,1  |

полета.

Разрабатываемые УЧЭ и их лучшие образцы имеют погрешность не более 0,01 – 0,02 % от диапазона измерения статического и полного давлений.

Точность датчиков статического и полного давлений должна обеспечивать высокую точность определения высотно-скоростных параметров ВС в соответствии с международными требованиями.

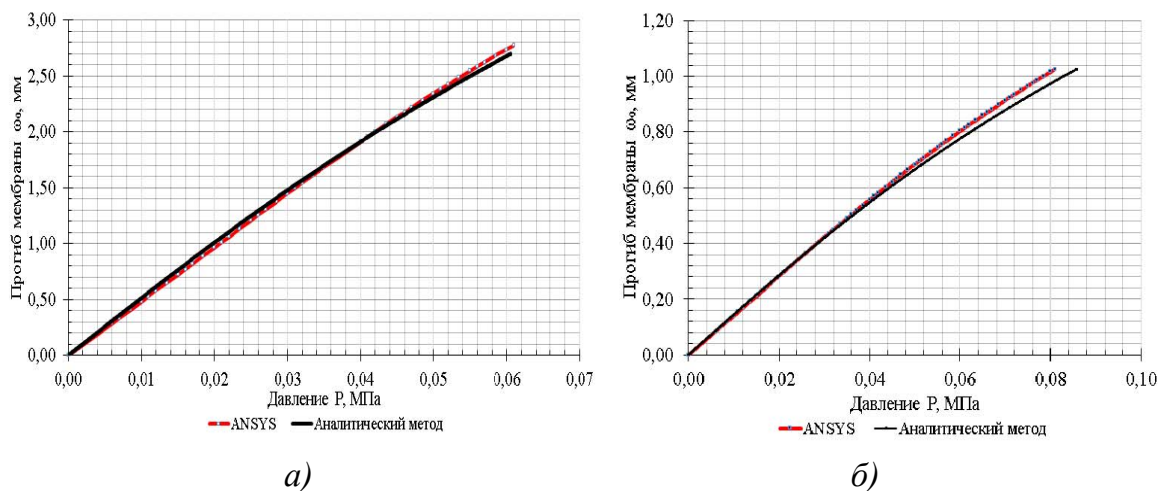
Такая высокая точность к датчикам предъявляется в связи с необходимостью вычислений параметров движения на уровне, который соответствует международным требованиям.

В таблице 2.4 представлены результаты решения упруго-пластичных задач методом конечных элементов.

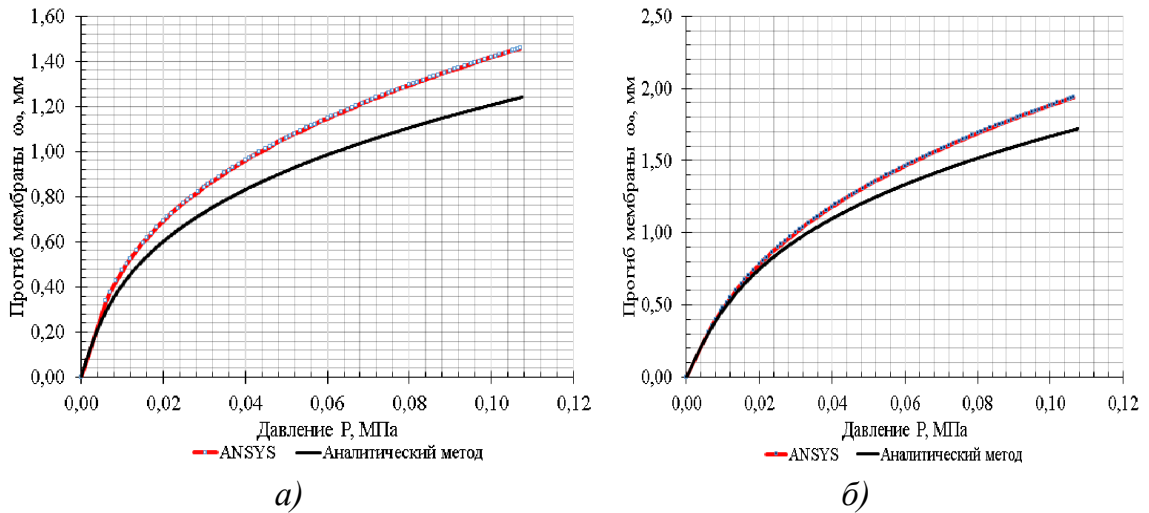
**Таблица 2.4. Результаты решения методом конечных элементов**

| № УЧЭ | Total deformation ( $\omega_{0max}$ , мм) | Equivalent stress (эквивалентное напряжение), МПа | Safety factor (коэффициент запаса прочности) |
|-------|---|---|--|
| 1     | 4,7407                                    | 1185,2  | 1,01   |
| 2     | 1,037                                     | 705,75  | 1,7  |
| 3     | 1,58                                      | 614,52  | 1,95   |
| 4     | 2,16                                      | 716,12  | 1,68   |
| 5     | 1,364                                     | 544   | 2,2  |
| 6     | 1,676                                     | 790,36  | 1,52   |

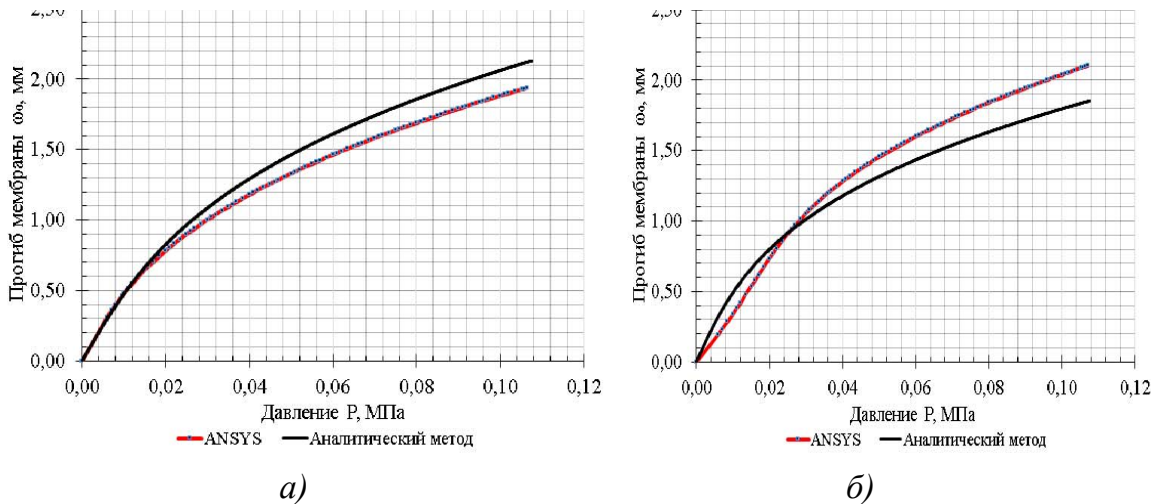
Достоверность результатов численного моделирования аналитическим методом, разработанным автором, подтверждается результатами численного моделирования методом конечно-элементного моделирования. На рис. 2.10 – 2.12 представлены сравнительные результаты вычислений прогибов мембраны с использованием программного комплекса ANSYS и полученных аналитическим методом.



**Рис. 2.10. Результаты моделирования статической УЧЭ: а – УЧЭ № 1, б – УЧЭ № 2.**



**Рис. 2.11.** Результаты моделирования статической характеристики УЧЭ: а – УЧЭ № 3, б – УЧЭ № 4.



**Рис. 2.12.** Результаты моделирования статической характеристики упругих чувствительных элементов: а – УЧЭ № 5, б – УЧЭ № 6.

Расхождение результатов численного моделирования статической характеристики УЧЭ методом конечных элементов и аналитическим методом, составляет - не более 9 %.

## 2.5. Выводы по главе

Выполнен анализ существующих методик численного моделирования статических характеристик УЧЭ датчиков давлений, по результатам которого установлено, что существующие методики расчета УЧЭ не учитывают закономерность изменения статического и полного давлений в зависимости от высоты и скорости полета воздушного судна, кроме того, не учитываются функциональные возможности вторичного преобразователя.

Разработаны математические зависимости, обеспечивающие расчет УЧЭ с учетом:

- закономерности изменения давления по высоте полета воздушного судна,
- закономерности изменения давления по скорости полета воздушного судна,
- функциональных возможностей вторичного преобразователя давлений, в частности, для предварительной оценки характеристик точности датчиков давлений на этапе проектирования УЧЭ, в качестве критерия предложен параметр - порог чувствительности вторичного преобразователя.

Разработан обобщённый алгоритм расчета УЧЭ на основе полученных математических зависимостей и конечно - элементного моделирования упруго-пластичных деформаций с использованием программного комплекса ANSYS, обеспечивающий учет потребных характеристик точности разрабатываемых датчиков давлений и прочностных характеристик УЧЭ по критериям эквивалентного напряжения и коэффициента запаса прочности.

На основе обобщённого алгоритма разработана программа для ЭВМ на языке программирования C++, обеспечивающая:

- расчет статических характеристик УЧЭ,
- комплексную оценку характеристик точности датчика давлений с учетом закономерности изменения измеряемых давлений и порога чувствительности вторичного преобразователя для различных образцов мембранных УЧЭ,
- графическую доводку характеристик УЧЭ и характеристик точности датчика давления в целом.



Проведена сравнительная оценка результатов численного моделирования статических характеристик УЧЭ, полученных аналитическим методом и методом конечно - элементного моделирования, установлено, что расхождение в определении прогиба жесткого центра мембраны не превышает 15 %.

Таким образом, впервые разработаны математические модели взаимосвязей информационных элементов с процедурами обработки данных, получаемых при деформации УЧЭ и вызванных изменением статического и полного давлений, отличающиеся тем, что в них учитывается порог чувствительности (или шаг дискретизации) вторичного преобразователя.

Разработанная методика математического моделирования статической характеристики УЧЭ, учитывающая функциональные возможности вторичного преобразователя и закономерность изменения статического и полного давлений, может быть использована при оценке характеристик точности датчиков давлений на этапах предварительного проектирования УЧЭ.

### **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙКИ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЕМНИКОВ**

#### **3.1. Структура аппаратно-программного комплекса**

На современном этапе развития элементов и устройств вычислительной техники и систем управления при проведении научных экспериментов возникает потребность в автоматизированных экспериментальных установках. Эта потребность возникает не только при создании нового оборудования, но и при модернизации уже имеющегося. И в первом, и во втором случаях эксперимент не может считаться актуализированным, если процессы измерения и первичной обработки экспериментальных данных не автоматизированы. На рынке достаточно большое количество автоматизированных систем, целевое назначение которых - управление механическими и электрическими составляющими автоматизированных установок, сбор и обработка данных.

Однако предлагаемые решения по своим функциональным возможностям избыточны и имеют высокую стоимость и, как правило, нацелены на промышленное применение. Кроме того, учитывая специфику проведения научных экспериментов, особенно, когда это касается оригинальных решений, целесообразна разработка целевых автоматизированных систем управления и обработки экспериментальных данных, что позволит обеспечить высокую степень интеграции исследуемого объекта и автоматизированной системы.

К процедуре разработки автоматизированных систем и АПК предъявляются разные требования стандартов - автоматизированные системы разрабатываются по ГОСТ 34 и ГОСТ 19[34, 35], АПК - по ГОСТ 2 и ГОСТ 19.

В рамках данной работы, автором разработан целевой аппаратно-программный комплекс (далее – АПК) включающий набор аппаратных и программных средств, обеспечивающих автоматизацию процесса

экспериментальных исследований датчика давлений на основе линейки фотоэлектронных приемников.

Структурная схема разработанного АПК представлена на рис. 3.1.



*Рис. 3.1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса.*

Выделим основные этапы разработки АПК:

1. Выбор аппаратных частей и разработка логики работы программной части АПК для встраиваемых систем, обеспечивающих:

- генерацию управляющих импульсов для линейки фотоэлектронных приемников,
- оцифровку выходного сигнала линейки фотоэлектронных приемников,
- обработку цифрового сигнала, поступающего от цифрового микрометра,
- оцифровку выходного сигнала тензометрического датчика давлений,
- взаимодействие между вычислительными устройствами блока управления и обработки данных,
- обмен данными между блоком управления и персональным компьютером (ПК).

2. Разработка логики работы программной части АПК для ПК, обеспечивающей сбор, обработку и визуализацию контролируемых параметров, а также ввод и передачу в блок управления и обработки данных значений измеряемых параметров.

### **3.2. Аппаратные средства аппаратно-программного комплекса**

АПК, в общем случае, включает в себя электронные и механические части вычислительных устройств, входящих в состав системы, без учета программного обеспечения.

АПК классифицируют как внутренние и внешние устройства. Согласование между отдельными узлами и блоками выполняется аппаратными интерфейсами. Аппаратные интерфейсы разрабатываются в соответствии с требованиями действующих стандартов.

Далее рассмотрим более подробно аппаратные части целевого АПК (рис 3.1).

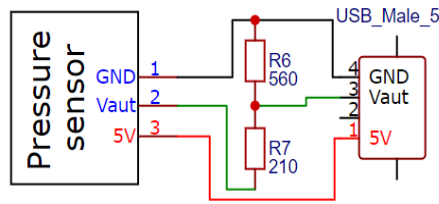
Исследуемым объектом является составная часть целевого АПК, датчик давления на основе ЛФП, более подробно его конструктивные особенности описано в подразделе 3.2.1.

Тензометрический датчик давления является аппаратной частью АПК и используется для оценки характеристик точности датчика давления на основе ЛФП, по параметру давления. Характеристики пьезоэлектрического датчика давлений и их значения представлены в таблице 3.1

*Таблица 3.1. Характеристики пьезоэлектрического датчика давлений*

| <b>Характеристики</b>         | <b>Значения</b>    |
|-------------------------------|--------------------|
| Тип датчика                   | Пьезоэлектрический |
| Напряжение питания            | 5 В                |
| Диапазон измеряемого давления | 0-103,42 кПа       |
| Выходное напряжение           | 0 – 4,5В           |
| Точность датчика              | 0,1 -1%            |

Из таблицы 3.1 видно, что выходное напряжение датчика давления лежит в пределах 0 – 4,5 В. В настоящий момент большинство микросхем, в частности и микросхема STM32, питаются напряжением в пределах от 1,8 до 3,3 В, соответственно и опорное напряжение аналого-цифрового преобразователя лежит в тех же пределах. В связи с этим, возникает задача согласования выходного напряжения пьезоэлектрического датчика давления с максимально допустимым входным напряжением микроконтроллера. Для решения этой задачи применен делитель напряжения на резисторах, электрическая схема которого представлена рис. 3.2.



*Рис. 3.2. Электрическая схема подключения датчика давления.*

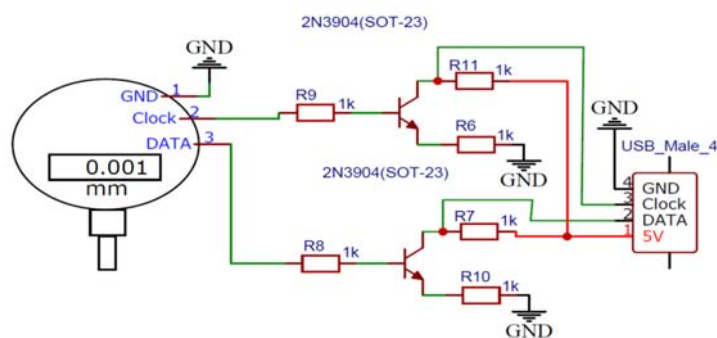
Следующим аппаратным компонентом АПК является цифровой микрометр, который служит для оценки характеристик точности перемещения геометрического центра УЧЭ датчика давления на основе ЛФП.

Характеристики микрометра представлены в таблице 3.2.

*Таблица 3.2. Характеристики микрометра*

| Характеристики              | Значения         |
|-----------------------------|------------------|
| Пределы измерений           | 0-12,7 мм        |
| Шаг микрометра              | 0,001 мм         |
| Питание                     | 1 x батарея SR44 |
| Измерительное сопротивление | < 1,5 Н          |

На логических выходах микрометра (рис. 3.3) Clock и DATA значения напряжений не превышают 1,25 – 1,3 В, поэтому для согласования логических выводов микроконтроллера разработана схема усилителя на транзисторах.



*Рис. 3.3. Электрическая схема подключения микрометра.*

Для управления перепадом давлений в составе аппаратной части АПК имеется пневматическая система. Функционально система включает в себя блок питания, электроприводной насос, электромагнитный клапан и релейный модуль. Управление системой осуществляет блок управления и обработки данных.

Структурная схема пневматической системы представлена на рис. 3.4.

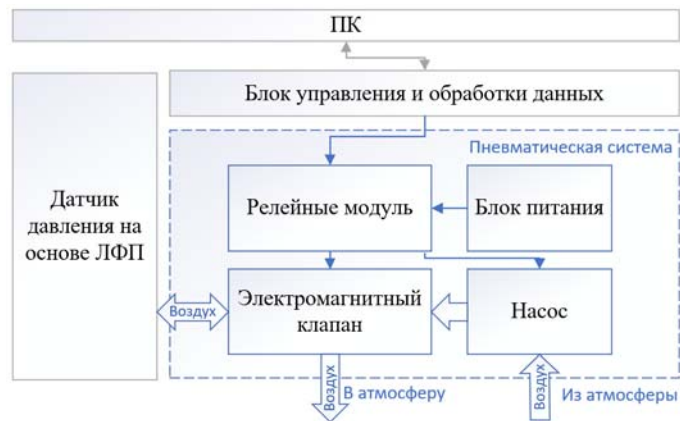


Рис. 3.4. Структурная схема пневматической системы.

Электрическая схема соединения элементов пневматической системы представлена на рис. 3.5, характеристики приведены в таблице 3.3.

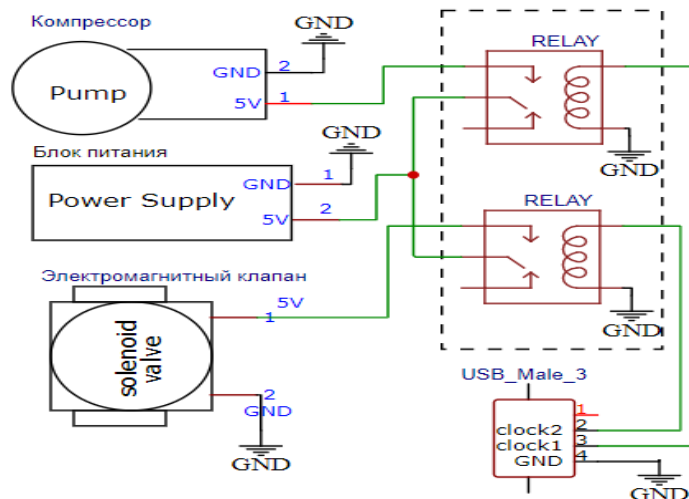
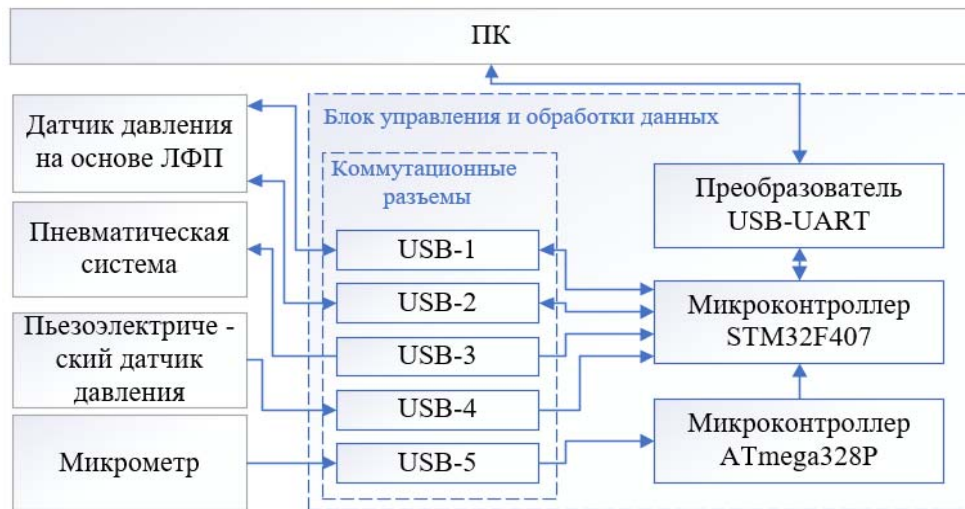


Рис. 3.5. Электрическая схема пневматической системы.

Таблица 3.3. Характеристики пневматической системы

| Характеристики                                      | Значения    |
|---|-------------|
| Напряжение питания электроприводного насоса         | 5 В         |
| Напряжение питания электромагнитного клапана        | 5 В         |
| Напряжение питания блока питания                    | 220 В       |
| Напряжение на выходе из блока питания               | 5 В         |
| Максимальная частота вращения электропривода насоса | 5300 об/мин |
| Нагнетаемое давление                                | 100 кПа     |

Ключевой составной частью АПК является блок управления и обработки данных. Его структурная схема представлена на рисунке 3.6.



*Рис. 3.6. Структурная схема блока управления и обработки данных.*

Технические данные микроконтроллера STM32F4 представлены в таблице 3.4.

*Таблица 3.4. Характеристики микроконтроллера STM32F407VE*

| Характеристики            | Значения   |
|---------------------------|--|
| Серия (Ядро)              | stm32 f4 (ARM Cortex-M4)                           |
| Ширина шины данных        | 32 бит   |
| Тактовая частота          | 168 МГц  |
| Количество входов/выходов | 82   |
| Объем памяти программ     | 1 (1m x 8) МБайт                                   |
| Тип памяти программ       | flash  |
| Объем RAM                 | 192k x 8   |
| Наличие АЦП/ЦАП           | АЦП 16x12b/ЦАП 2x12b                               |
| Встроенные интерфейсы     | CAN, ETH, I2C, IRDA, LIN, SPI, UART, USBOTG        |
| Встроенная периферия      | BROWN-OUTDETECT/RESET, DMA, I2S, LCD, POR, PWM, WD |
| Напряжение питания        | 1.8 – 3.6 В  |
| Рабочая температура       | минус 40 – 85 град.                                |
| Корпус                    | LQFP-100 (14 x 14)                                 |

Более детально о конструктивных особенностях блока управления и обработки данных описано в подразделе 3.2.2.

Крайней частью АПК является ПК обеспечивающий сбор, обработку и визуализацию контролируемых параметров, а также ввод и передачу в блок

управления и обработки данных значений изменяемых параметров. Требования к ПК как аппаратной части АПК сформированы из условия поддержки среды разработки LabVIEW и представлены в таблице 3.5.

**Таблица 3.5. Требования к ПК**

| <b>Операционная система</b> | <b>Версия</b>   | <b>Примечание</b>   |
|-----------------------------|---|---|
| Windows                     | XP, VISTA, 7, 8, 10.  | 64-битная версия LabVIEW доступна только для 64-битных версий Windows Vista и 7. 64-битная версия Windows XP не поддерживается. |
| Linux                       | Red Hat Enterprise Linux WS3, Mandrake Linux/Mandriva 10.0, SuSE Linux 9.1. | Ядра Linux версий 2.2.x, 2.4.x и 2.6.x архитектуры Intel x86, GNU C Library (glibc) Version 2.2.4 или более поздней версии.     |

Технические данные микроконтроллера ATmega328P представлены в таблице 3.6.

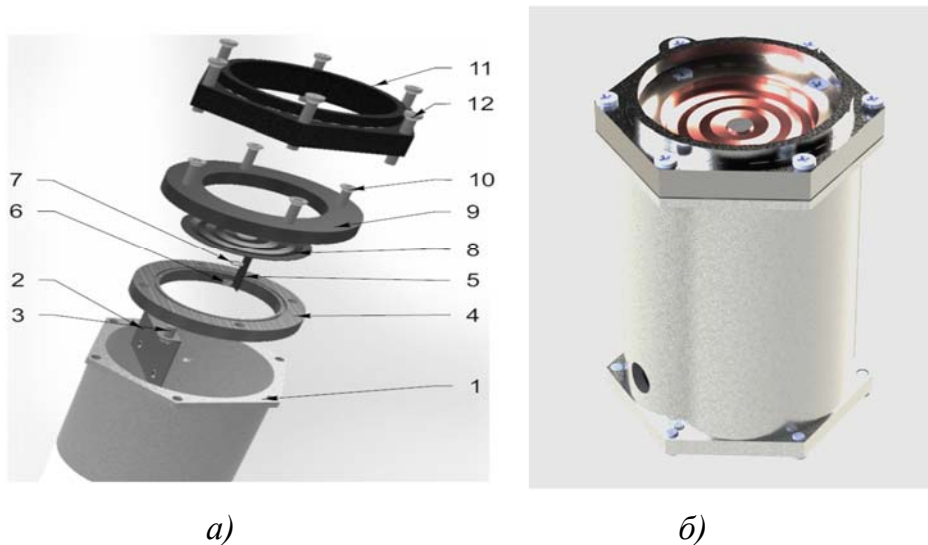
**Таблица 3.6. Характеристики микроконтроллера ATmega328P**

| <b>Характеристики</b>     | <b>Значения</b>                      |
|---------------------------|--------------------------------------|
| Серия(ядро)               | AVR ATmega                           |
| Ширина шины данных        | 8 Бит                                |
| Тактовая частота          | 20 МГц                               |
| Количество входов/выходов | 23                                   |
| Объем памяти программ     | 32 кБайт(16k x 16)                   |
| Тип памяти программ       | flash                                |
| Объем EEPROM              | 1k x 8                               |
| Объем RAM                 | 2k x 8                               |
| Наличие АЦП/ЦАП           | АЦП 6x10b                            |
| Встроенные интерфейсы     | I2C, SPI, UART                       |
| Встроенная периферия      | BROWN-OUTDETECT/RESET, POR, PWM, WDT |
| Напряжение питания        | 1,8 – 5,5 в                          |
| Рабочая температура       | минус 40 – 85 град.                  |
| Корпус                    | dip-28 (0.300 inch)                  |



### 3.2.1. Датчик давления на основе линейки фотоэлектронных приемников

Разработан и изготовлен датчик (рис.3.7а), который состоит из корпуса 1, нижнего 4 и верхнего 9 стяжных колец, которые обеспечивают фиксацию мембраны 8 с помощью стяжных винтов 10. К нижней части мембраны с помощью гайки фиксируется шторка с прорезями 5, верхняя крышка датчика 12 крепится к верхнему фланцу корпуса 1 винтами 12, обеспечивая фиксацию в корпусе мембраны (рис. 3.7.).



**Рис. 3.7.** Конструкция датчика давлений на основе ЛФП:

*а – 3D сборочный макет, б – макет датчика в сборе.*

*1 – корпус датчика, 2 – кронштейн крепления электронной платы линейки фотоэлектронных приемников, 3 – винт крепления кронштейна, 4 – нижнее стяжное кольцо 5 – шторка с прорезями, 6 – гайка крепления шторки, 7 – шайба, 8 – мембрана, 9 – верхнее стяжное кольцо мембраны, 10 – стяжной винт, 11 - верхняя крышка датчика, 12 – винт крепления крышки.*

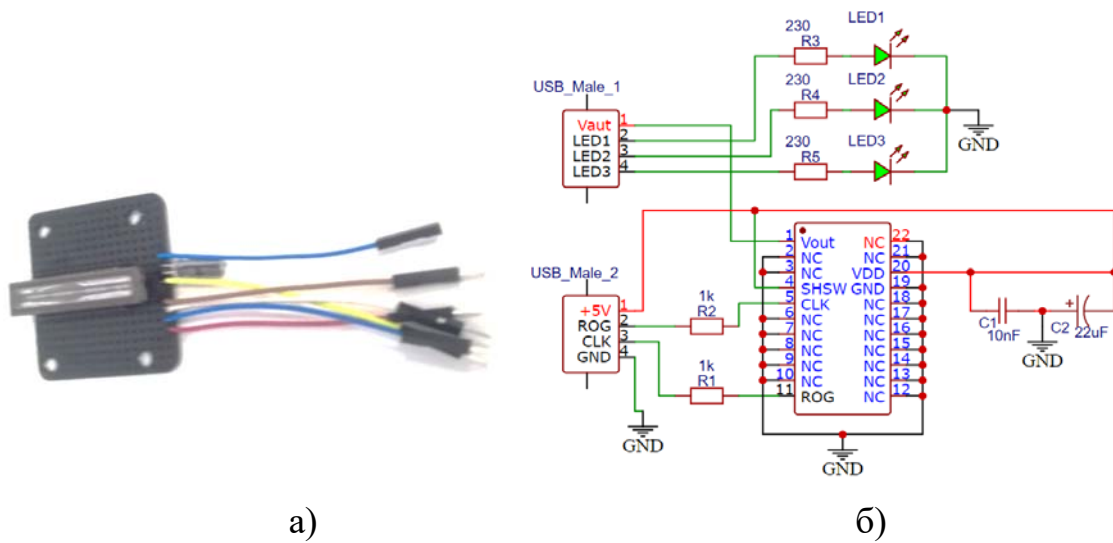
К нижнему фланцу датчика с помощью винтов крепится нижняя крышка датчика.

Кроме того, в нижней части датчика имеются два отверстия для установки пьезоэлектрического датчика давления и штуцера пневматической системы.

На кронштейне 2 закреплена электронная плата (рис 3.8а) ЛФП типа ПЛХ554В.

Электронная плата установлена симметрично прорезям на шторке, обеспечивая формирование оптических пятен на ЛФП от источников оптического

излучения (светодиодов) [93, 98], расположенных на противоположной части корпуса по отношению к электронной плате ЛФП.



а) б)  
**Рис. 3.8.** Электрическая схема датчика:  
 а – плата, б – электрическая схема датчика.

На рисунке 3.9 представлено фото датчика давления в сборе.



**Рис. 3.9.** Фото датчика.

### 3.2.2. Блок управления и обработки данных элементов и устройств первичной информации комплекса

В составе блока управления и обработки данных используются микроконтроллеры STM32F407VET6 и ATmega328P, предназначенные для работы в качестве встроенных систем, обеспечивающих автоматизацию процессов сбора и обработки данных в составе АПК.

Функционально, микроконтроллер STM32F407VET6 в составе АПК обеспечивает:

- формирование управляющих электрических импульсов для ЛФП типа ILX 554В,
- оцифровку выходного сигнала ЛФП типа ILX 554В,
- оцифровку выходного сигнала пьезоэлектрического датчика давлений,
- формирование управляющих электрических импульсов для элементов пневматической системы,
- обработку выходного цифрового сигнала микроконтроллера ATmega328P,
- математическую обработку сигналов и обмен данными с ПК.

Назначение микроконтроллера ATmega328P, как элемента АПК, преобразование протокола DIGITAL PROTOCOL в протокол RS232.

Электрическая схема блока управления и обработки данных представлена на рис. 3.10.

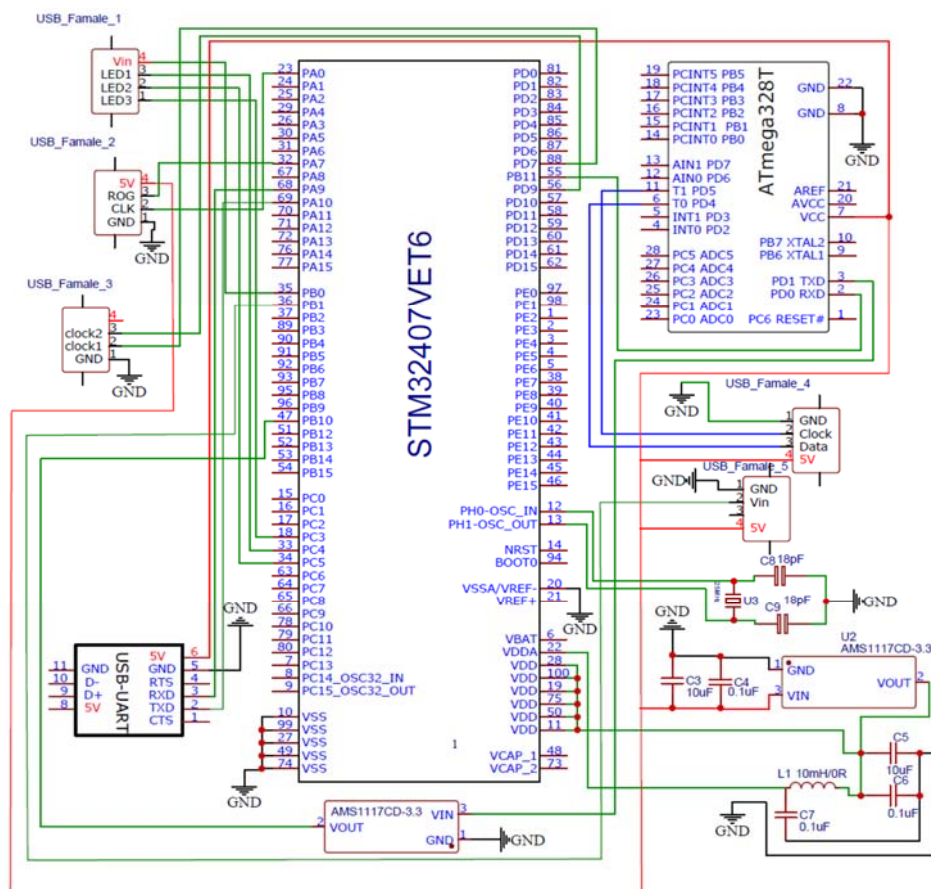


Рис.3.10. Электрическая схема блока управления и обработки данных

Для подключения к блоку управления и обработки данных аппаратных компонентов АПК и ПК в его составе имеется узел коммутации, состоящий из пяти USB разъёмов.

### 3.3. Программная часть аппаратно-программного комплекса

Программная часть целевого АПК представляет собой комплекс обрабатывающих и интерпретирующих данных, собранных аппаратной частью.

Программная часть включает в себя:

а) программное обеспечение блока управления и обработки данных:

- программное обеспечение для микроконтроллера STM32F4,
- программное обеспечение для микроконтроллера ATmega328P,

б) программное обеспечение для персонального компьютера.

Принцип работы блока программного обеспечения тесно связан с архитектурой АПК.

При разработке программной части АПК использовалась интегрированная среда разработки Keil uVision 5, среды программирования Arduino IDE и среда LabVIEW 2016.

Принципиальная схема взаимодействия программного обеспечения АПК представлена на рис. 3.11.

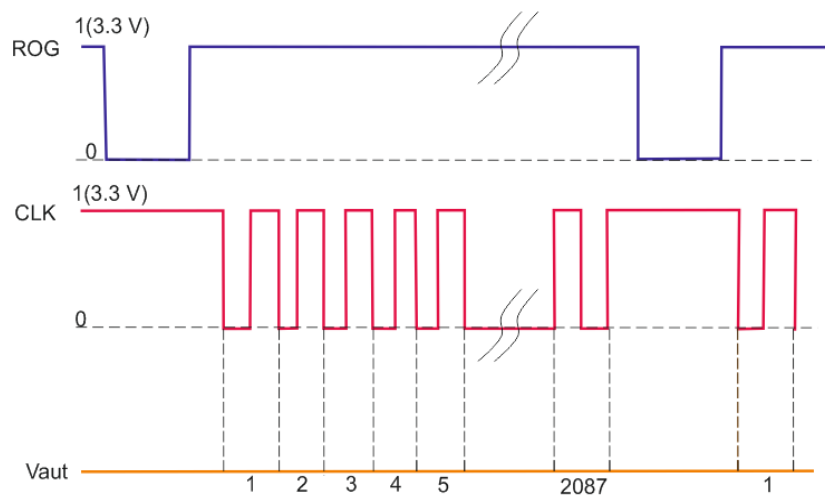


*Рис. 3.11. Структурная схема взаимодействия программного обеспечения АПК.*

### 3.4. Теоретические аспекты управления и обработки данных линеек фотоэлектронных приемников

При проведении эксперимента с датчиком давления на базе оптоэлектронного преобразователя, используется ЛФП типа ILX544В и микроконтроллер STM32F4.

На рис. 3.12 представлена схема управления ЛФП типа ILX544В.



**Рис. 3.12.** Схема управления ЛФП типа ILX544В.

В соответствии со схемой, каждому импульсу считывания CLK соответствует сигнал с одного пикселя, поступающего на выход ILX544В. Перед началом каждого цикла опроса ЛФП формируется импульс сброса ROG [19]. Между двумя импульсами ROG должно быть такое количество импульсов CLK которое обеспечивает считывание всех рабочих и технических пикселей.

В результате воздействия оптических пятен на поверхность ЛФП, на его выходе происходит изменение амплитуды напряжения во времени.

Структура выходного сигнала  $V_{out}$  представлена на рис. 3.13.

Автором разработаны различные способы вычисления значений давлений при использовании сигналов на выходе ЛФП.

**В первом способе** [66] вычисления координат светового пятна можно использовать так называемый центроид метод, который обеспечивает вычисление значения координаты «центра тяжести изображения» светового пятна. Алгоритм, реализующий данные вычисления, может быть реализован следующим образом.

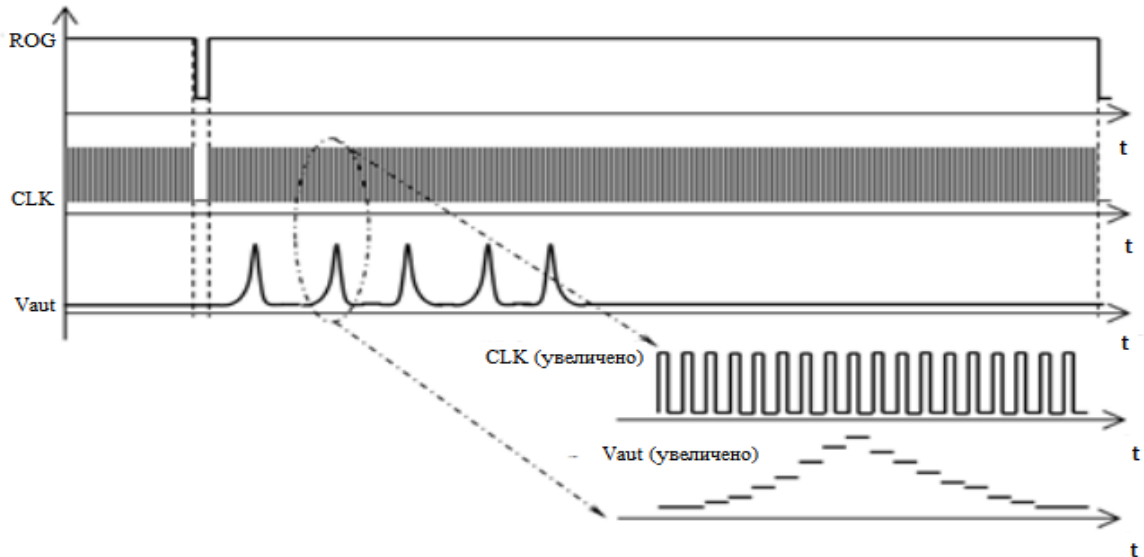


Рис. 3.13. Структура выходного сигнала ЛФП.

Вначале определяются номера  $n$  пикселей  $N_{\max\_n}$ , амплитуда сигнала с которых соответствует локальным максимумам в пределах каждого из  $n$  световых пятен на фоточувствительной поверхности ЛФП. Затем выделяется область из  $M/2$  пикселей до и  $M/2$  пикселей после максимума. И для данной области осуществляется вычисление координаты максимума сигнала, выраженное в номере пикселя, по формуле:

$$MAX_n = \frac{\sum_{i=N_{\max\_n}-\frac{M}{2}}^{N_{\max\_n}+\frac{M}{2}} (A_i \times i)}{\sum_{i=N_{\max\_n}-\frac{M}{2}}^{N_{\max\_n}+\frac{M}{2}} (A_i)}, \quad (3.1)$$

где  $MAX_n$  – координата максимума  $n$ -го светового пятна на оптической линейке,  $A_i$  – амплитуда сигнала с  $i$ -го пикселя в окрестностях  $n$ -го пятна,  $N_{\max\_n}$  – номер пикселя, амплитуда с которого в пределах  $n$ -го пятна максимальна. Количество пикселей  $M/2$  выбирается таким образом, чтобы охватить все пиксели вокруг локального максимума, амплитуда сигнала с которых заметно превышает начальный (темновой) уровень.

Таким образом, в результате вычислений в памяти микроконтроллера будет содержаться  $n$  значений  $MAX_n$ , соответствующих исходному значению координат световых пятен. При изменении статического ( $P$ ) давления мембрана анероидного чувствительного элемента деформируются, в результате чего происходит

перемещение всех световых пятен, пропорциональное изменению давления. Вычисление по формуле (3.1) новых значений координат световых пятен позволяет определить изменение давления по величине смещения мембраны относительно исходного значения:

$$\Delta P_n(t) = k_n \times (MAX_n(t) - MAX_n(0)), \quad (3.2)$$

где  $\Delta P_n(t)$  – текущее значение изменения давления, определенное смещением  $n$ -го пятна,  $MAX_n(t)$  – координата максимума  $n$ -го светового пятна на ЛФП в текущий момент времени  $t$ ,  $MAX_n(0)$  – исходное значение координаты  $n$ -го светового пятна,  $k_n$  – калибровочный коэффициент, связывающий координаты  $n$ -го пятна, выраженный в пикселях, с изменением статического давления. С учетом того, что расстояние между шторкой и ЛФП намного меньше, чем расстояние между шторкой и источником излучения, значения калибровочных коэффициентов  $k_n$  для всех  $n$  световых пятен в первом приближении можно считать равными. Для повышения точности измерения смещения мембраны предлагается усреднять результаты измерения изменения давления, полученные для всех  $n$  пятен:

$$\Delta P(t) = \frac{\sum_n Pcm_n(t)}{n}. \quad (3.3)$$

**Второй способ** отличается тем, что выполняется определение координат оптического пятна по заданному значению амплитуды сигнала. Алгоритм, реализующий данные вычисления, организован следующим образом. Вначале определяется номер пикселя  $N1\_n$ , амплитуда сигнала которого близка к заданному значению по фронту сигнала и, аналогично, номер пикселя  $N2\_n$  на спаде сигнала. Данные вычисления производятся для всех  $n$  световых пятен. Центральный пиксель светового пятна определяется:

$$N_{aver} = (N1\_n + N2\_n)/2, \quad (3.4)$$

Затем выделяется область из  $M/2$  пикселей до и  $M/2$  пикселей после  $N_{aver}$ . Преобразовав выражение (11) получили:

$$MAX_n = \frac{\sum_{i=N_{aver\_n}-\frac{M}{2}}^{N_{aver\_n}+\frac{M}{2}} M(A_i \times i)}{\sum_{i=NN_{aver\_n}-\frac{M}{2}}^{N_{aver\_n}+\frac{M}{2}} M(A_i)}, \quad (3.5)$$

где  $N_{aver\_n}$  – номер центрального пикселя  $n$ -го светового пятна.

**В третьем способе** вычисления координат светового пятна можно использовать измерение смещения пятен по отношению к первому пикселю ЛФП.

Алгоритм, реализующий данные вычисления, может быть реализован следующим образом. Вначале определяются номера  $n$  пикселей  $N_{max\_n}$ , амплитуда сигнала с которых соответствует локальным максимумам в пределах каждого из  $n$  световых пятен на фоточувствительной поверхности ЛФП. Далее, при вычислении новых значений,  $N_{max\_n}$  позволяет определить изменение давления по величине смещения мембраны относительно исходного значения:

$$\Delta P_n(t) = k_n \times (N_{max\_n}(t) - N_{max\_n}(0)), \quad (3.6)$$

где  $\Delta P_n(t)$  – текущее значение измеряемого давления, определенное смещению  $n$ -го пятна,  $N_{max\_n}(t)$  – координата максимума  $n$ -го светового пятна на ЛФП в текущий момент времени  $t$ ,  $N_{max\_n}(0)$  – исходное значение координаты  $n$ -го светового пятна,  $k_n$  – калибровочный коэффициент, связывающий координаты  $n$ -го пятна, выраженный в пикселях, с изменением статического или полного давлений.

**Четвертый способ**, отличается тем, что определяется номер пикселя  $N\_n$ , амплитуда сигнала которого близка к заданному значению по фронту (или на спаде) сигнала.

Данные вычисления производятся для всех  $n$  световых пятен.

Далее, вычисление новых значений  $N\_n$  позволяет определить изменение давления по величине смещения мембраны относительно исходного значения:

$$\Delta P_n(t) = k_n \times (N\_n(t) - N\_n(0)), \quad (3.7)$$

где  $\Delta P_n(t)$  – текущее значение измеряемого давления, соответствующее смещению  $n$ -го пятна,  $N\_n(t)$  – координата максимума  $n$ -го светового пятна на ЛФП в текущий момент времени  $t$ ,  $N\_n(0)$  – исходное значение координаты  $n$ -го светового пятна,  $k_n$  – калибровочный коэффициент, связывающий координаты  $n$ -го пятна, выраженный в пикселях, с изменением статического или полного давлений.



**В пятом способе** вычисления координат светового пятна можно использовать временное смещение  $T_n$  от начала опроса ЛФП до  $n$ -го оптического пятна.

Далее, вычисление новых значений,  $T_n$  позволяет определить изменение давления по величине временного смещения относительно исходного значения:

$$\Delta P_n(i) = k_n \times (T_n(i) - T_n(0)), \quad (3.8)$$

где  $\Delta P_n(i)$  – текущее значение измеряемого давления, определенное временным смещением  $n$ -го пятна,  $T_n(i)$  – временное смещение до  $n$ -го светового пятна на ЛФП в текущем цикле  $i$ ,  $T_n(0)$  исходное временное смещение до  $n$ -го светового пятна,  $k_n$  – калибровочный коэффициент, связывающий координаты  $n$ -го пятна, выраженный в пикселях, с изменением статического и полного давлений.

### **3.5. Разработка алгоритмов управления и обработки данных линейки фотоэлектронных приемников**

Задача по управлению и обработке данных ЛФП возложена на микроконтроллер STM32F4 и его программное обеспечение.

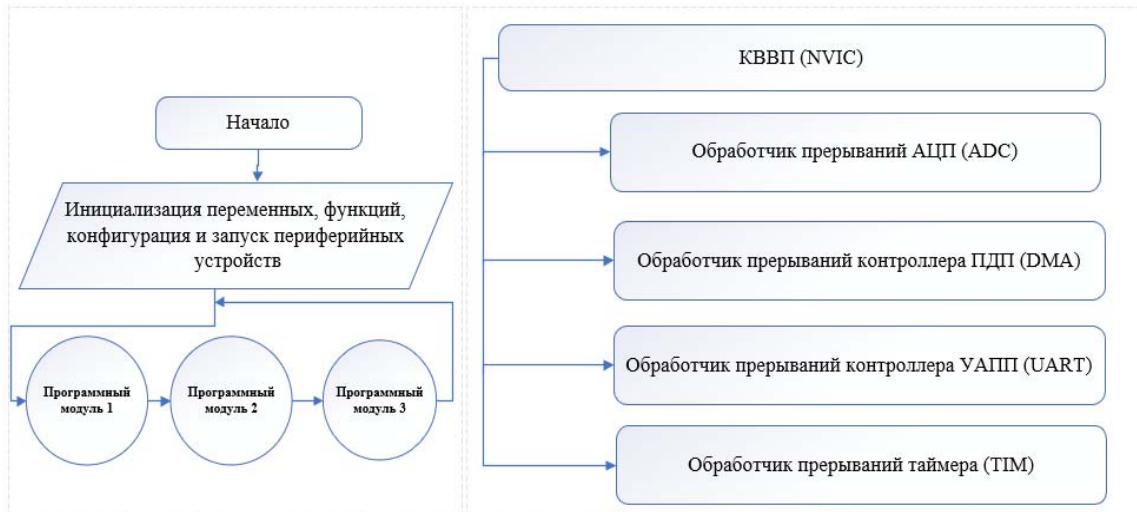
Исходя из принципа действия ЛФП, при реализации алгоритма управления и обработки данных решены две задачи: формирование управляющих импульсов и обработка данных [24].

Важной задачей при разработке алгоритмов управления и обработки сигнала, поступающего с ЛФП, является синхронизация импульсов CLK и преобразований АЦП. Именно точность синхронизации будет определять точность и повторяемость эксперимента.

Далее рассмотрим различные варианты осуществления этой задачи.

Принцип реализации программного обеспечения микроконтроллера STM32F4 представлен в виде упрощенной блок – схемы на рисунке 3.14.

На рис. 3.14а представлена блок-схема логики работы арифметически-логического устройства (далее – АЛУ) микроконтроллера. Условно выделено три программных модуля, каждый из которых выполняет свою функцию.



а)

б)

**Рис. 3.14.** Принцип реализации программного обеспечения микроконтроллера STM32F4

*а – логика работы АЛУ, б – активные прерывания*

Программный модуль 1 выполняет обработку данных, полученных после оцифровки сигнала с ЛФП.

Программный модуль 2 выполняет запуск преобразования аналогового сигнала с пьезоэлектрического датчика давления в цифровой код с сохранением его значений.

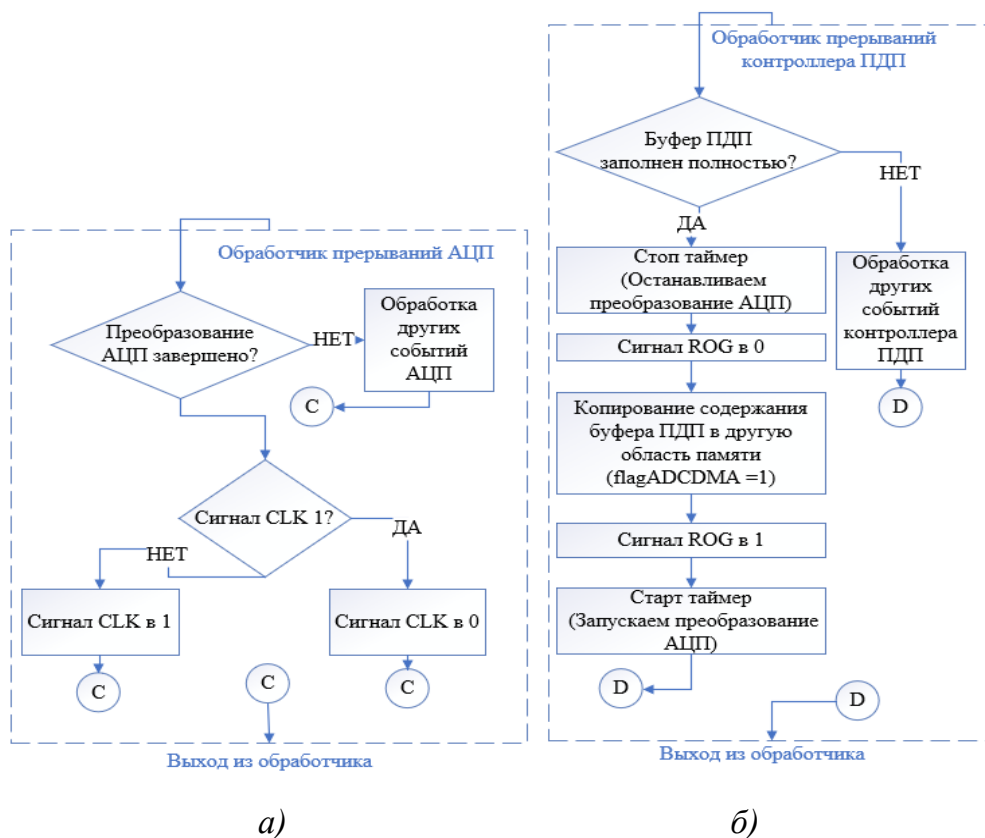
Программный модуль 3 осуществляет передачу данных на ПК с использованием контроллера универсального асинхронного приёмопередатчика (далее – УАПП) с использованием контроллера прямого доступа к памяти (далее – ПДП).

На рисунке 3.14б представлен перечень задействованных событий контроллера вложенных векторных прерываний (далее – КВВП). При этом, в зависимости от применяемого алгоритма управления и обработки аналогового сигнала ЛФП, некоторый из них могут не использоваться. По этой же причине изменяется программный модуль 1, в то время как программные модули 2 и 3 остаются неизменными.

Далее представлены различные варианты алгоритмов управления и обработки аналогового сигнала ЛФП.

### 3.5.1. Разработка алгоритмов управления и обработки данных линейки фотоэлектронных приемников с использованием в качестве генератора синхроимпульсов внешние прерывания АЦП

В первом алгоритме для формирования синхроимпульсов CLK используются прерывания АЦП (рис. 3.15а), а для импульсов ROG прерывания DMA (рис. 3.15б). Очередное преобразование АЦП начинается по триггеру от таймера сохранения оцифрованных значений сигнала в массиве данных с использованием контролера ПДП [71].



**Рис. 3.15.** Активные прерывания:

а – обработчик прерываний АЦП, б – обработчик прерываний ПДП.

При возникновении прерывания ПДП, по заполнению всего буфера, данные копируются в другую область памяти, так как при последующем цикле опроса ЛФП идет перезапись буфера ПДП [39].

Логика работы АЛУ представлена в виде упрощенной блок-схемы на рис. 3.16.

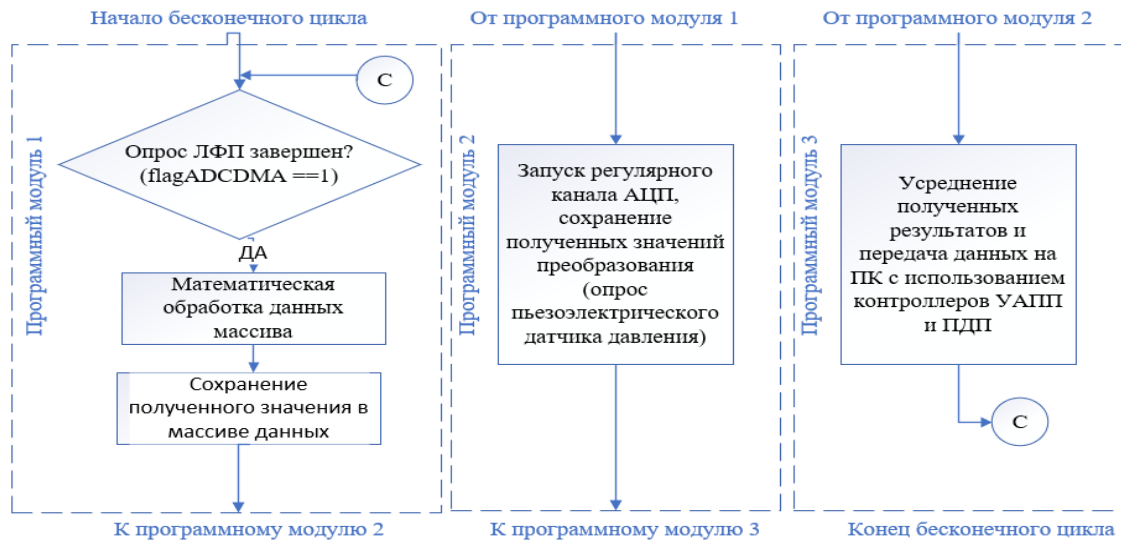


Рис. 3.16. Блок-схемы логики работы АЛУ с усреднением выборок.

Для повышения точности измерений, осуществляемых с использованием ЛФП целесообразно выполнять усреднение выборок. С этой целью результаты математической обработки сохраняются в массиве данных, размерность которого соответствуют заданному количеству усреднений.

Кроме этого, ожидается повышение точности измерений, которое достигается за счет того, что при опросе ЛФП, АЦП совершает двойное преобразование.

**Во втором алгоритме**, при использовании нескольких оптических пятен, для повышения эффективности работы АЛУ, целесообразно использовать и обработчик прерывания по заполнению половины буфера ПДП [73]. В этом случае логика работы обработчиков прерывания ПДП выглядит следующим образом (рис. 3.17).

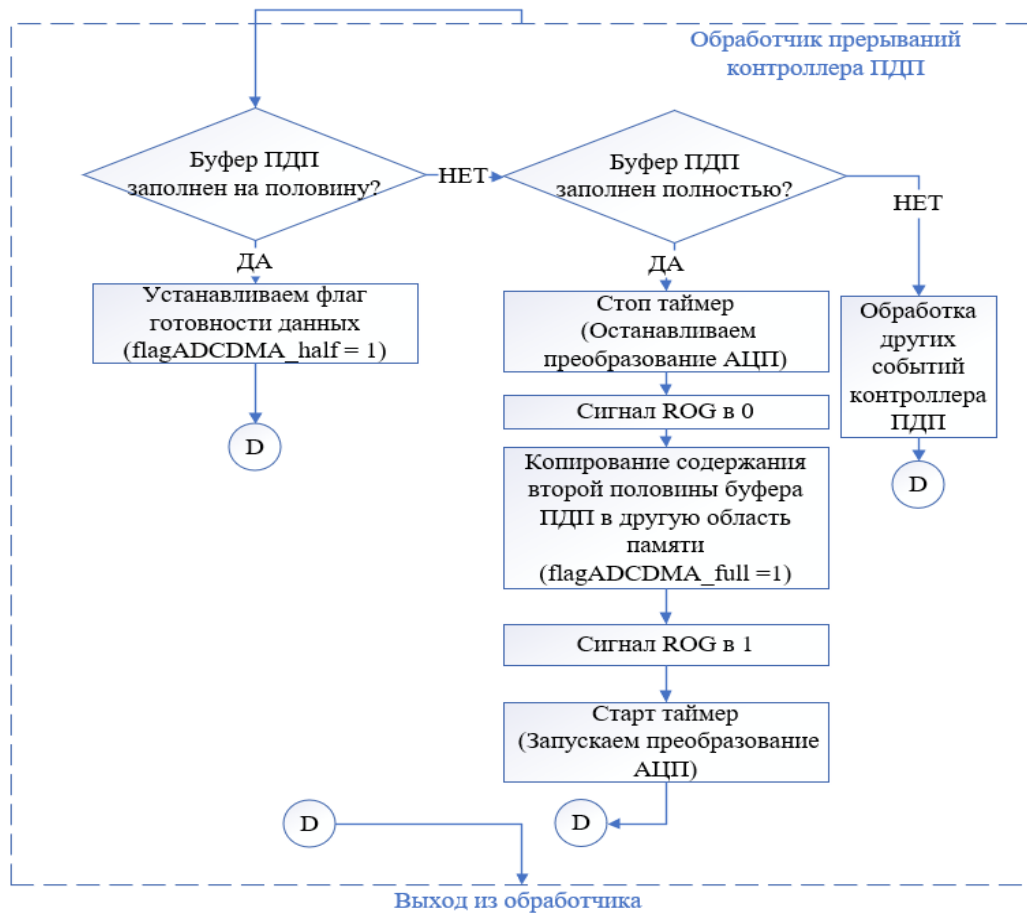


Рис. 3.17. Обработчик прерываний ПДП.

Задача программного модуля 1, в этом случае, состоит в отслеживании «флагов» готовности данных. Его логика работы представлена на рис 3.18.

При реализации данного алгоритма, оптические пятна в процессе перемещения по поверхности ЛФП не должны оказаться одновременно на первой и второй половине ЛФП. Конструктивно можно добиться того, чтобы перемещение оптических пятен происходило только на своей половине ЛФП, либо при обработке первой половины буфера ПДП выполнять проверку на пересечении оптическим пятном середины ЛФП, и в случае пересечения, копировать недостающие данные из буфера DMA при условии, что данные обновлены.

Данные алгоритмы позволяют получить высокую степень синхронизации импульсов CLK и преобразований АЦП.

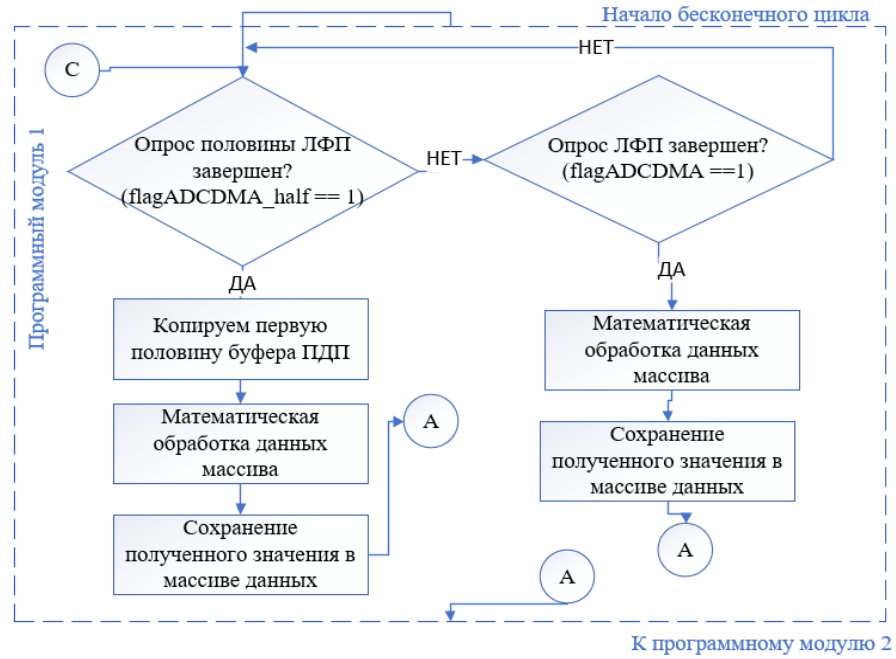


Рис. 3.18. Блок-схема работу АЛУ

В третьем алгоритме учитываются начальные положения оптических пятен, за счет использования «счётчиков» преобразований АЦП в его обработчике прерываний.

При этом отсутствуют ограничения на расположение оптических пятен по поверхности ЛФП. Логика работы обработчика прерываний АЦП и ПДП (DMA) будет выглядеть следующим образом (рис. 3.19).

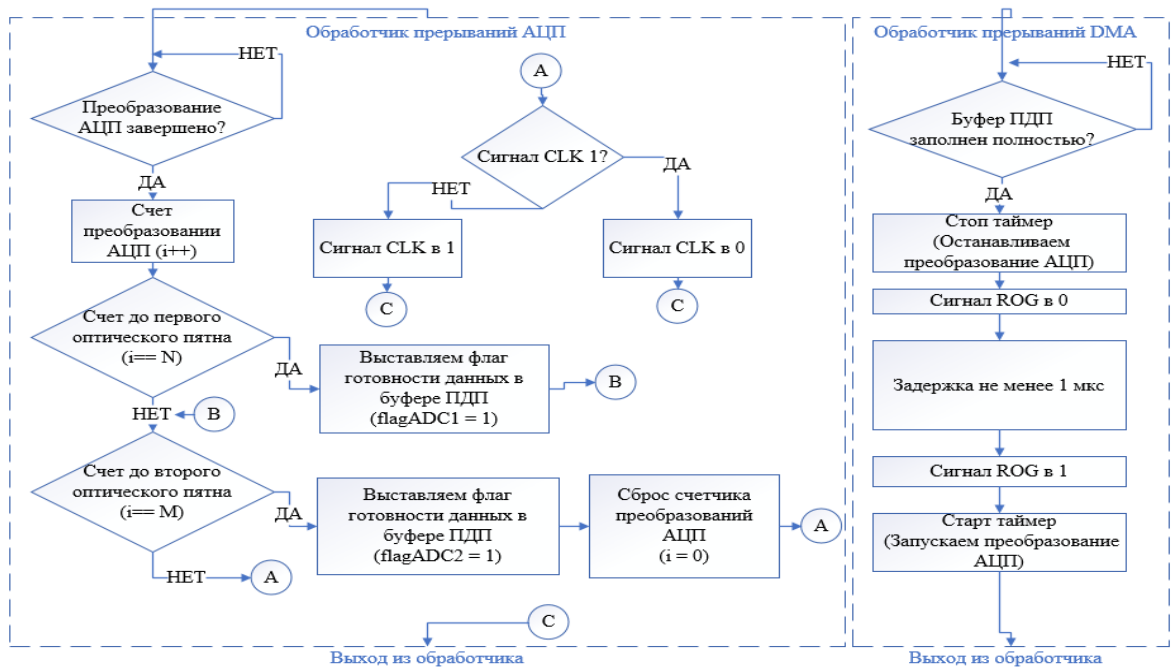


Рис. 3.19. Обработчик прерываний АЦП и ПДП(DMA):  
 а – обработка прерывания АЦП, б – обработка прерывания ПДП(DMA).

Недостатком данного алгоритма является увеличение времени обработки прерываний, что в свою очередь накладывает ограничения на время формирования импульса CLK.

### 3.5.2. Разработка алгоритмов управления и обработки данных линейки фотоэлектронных приемников с использованием в качестве источников синхроимпульсов генератора широтно-импульсной модуляции

В рассмотренных ранее алгоритмах использование множественных прерываний АЦП снижает эффективность работы АЛУ и накладывает ограничения на время формирования импульса CLK.

Оптимально использование в качестве источника импульсов CLK генератора широтно-импульсной модуляции. В этом случае нет необходимости использовать прерывания АЦП, достаточно лишь синхронизировать старт таймера, выполняющего запуск очередного преобразования АЦП и таймера, генерирующего ШИМ. В этом случае обработчик прерываний ПДП будет выглядеть иначе (рис. 3.20).

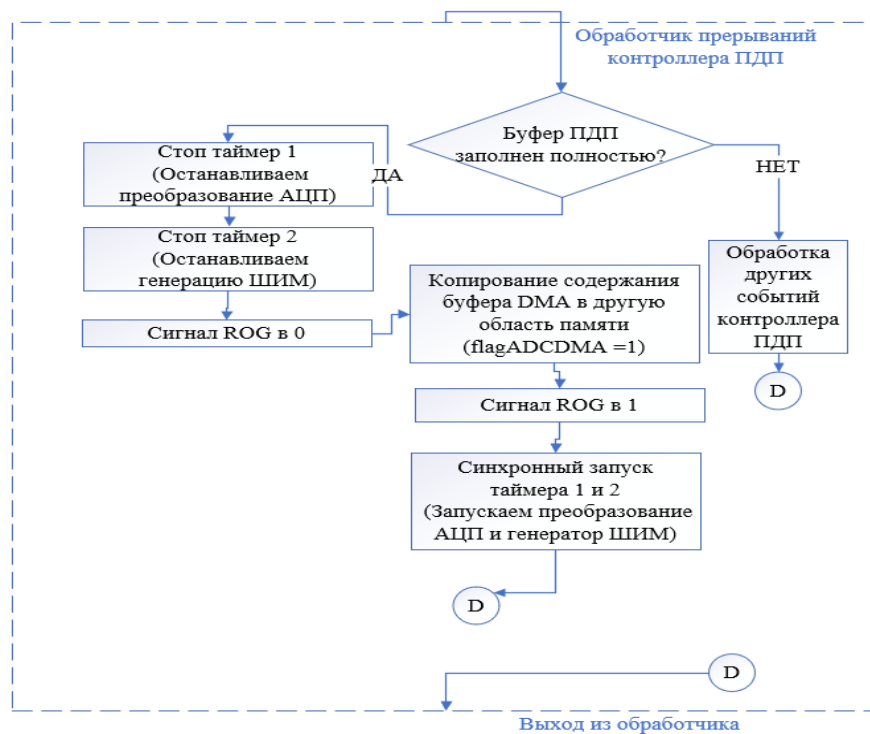


Рис. 3.20. Обработчик прерываний ПДП.

Достоинством данного алгоритма является отсутствие многократных прерываний от внешних событий АЦП. Любое прерывание останавливает основной цикл АЛУ и запускает программу обработчика прерываний. Это, в свою очередь, негативно сказывается на эффективности использования функциональных возможностей АЛУ.

### **3.5.3. Разработка алгоритмов управления и обработки данных линейки фотоэлектронных приемников без использования аналого-цифрового преобразователя**

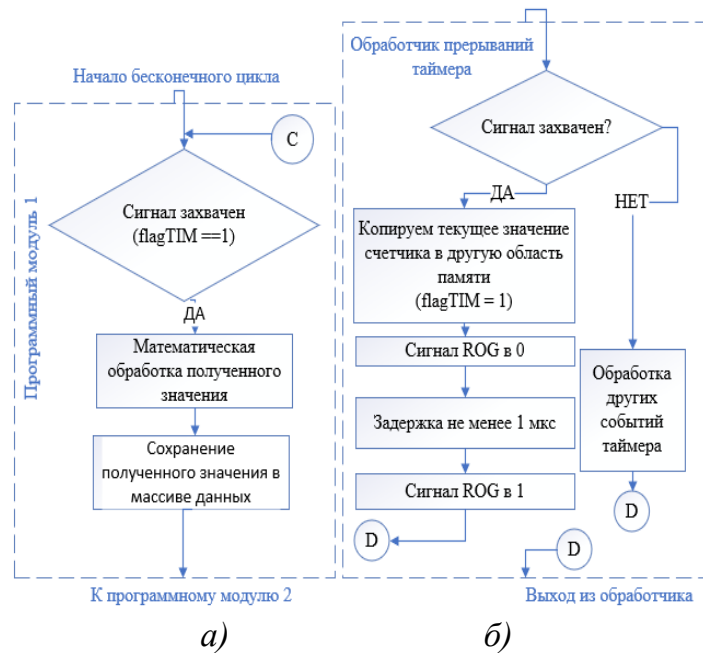
Физическая сущность данного алгоритма заключается в том, что при смещении оптического пятна по поверхности ЛФП происходит временное смещение амплитуды напряжения по отношению к моменту времени начала цикла опроса ЛФП. Если зафиксировать временное смещение от начала цикла опроса ЛФП до амплитуды захвата, его изменение, по отношению к пред идущему циклу опроса, будет соответствовать смещению оптического пятна.

В данном алгоритме для формирования импульсов CLK используется генератор ШИМ (на базе таймера 1), а для импульсов ROG прерывания таймера 2.

Для повышения точности измерений в этом случае необходимо выполнить синхронизацию работы таймера 1, обеспечивающего генерацию ШИМ и таймера 2, обеспечивающего захват заданного значения амплитуды напряжения. Обработчики прерываний таймера 2 и программный модуль 1 будут выглядеть следующим образом (рис. 3.21).

Данный алгоритм позволяет в значительной степени повысить быстродействие измерительной системы и возможно применения микросхем, не оборудованных АЦП и ПДП.

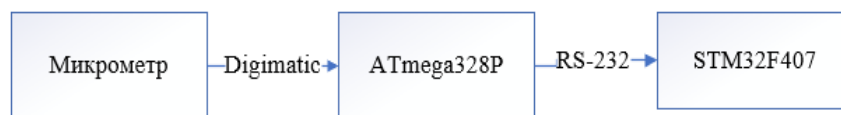




**Рис. 3.21.** АЛУ и обработчик прерываний таймера:  
 А – логика работы АЛУ, б – обработчик прерывания таймера 2.

### 3.6. Разработка алгоритмов обмена данными между компонентами аппаратно-программного комплекса

В состав аппаратно-программного комплекса включен микроконтроллер ATmega328P, обеспечивающий синхронизацию данных между микрометром и микроконтроллером STM32F4. Его задача - преобразовать цифровой протокол DIGITAL PROTOCOL в протокол RS-232. Схема взаимодействия программного обеспечения устройства представлена на рис. 3.22.



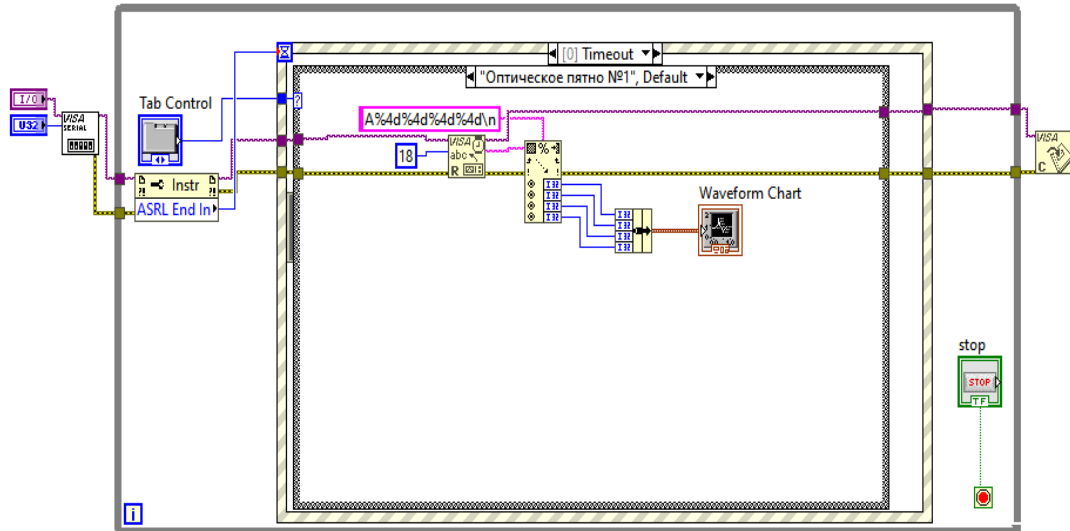
**Рис. 3.22.** Схема взаимодействия программного обеспечения

Взаимодействие аппаратных компонентов с ПК реализовано с использованием контроллера УАПП.

Программная часть ПК разработана в графической среде программирования LabVIEW [17, 28]. Данный программный комплекс позволяет проектировать системы автоматического управления в достаточно короткие сроки. Система

проектирования LabVIEW является кроссплатформенной и может функционировать на ПК с различными операционными системам.

Графический код терминала на языке программирования G, реализующий фильтрацию данных, представлен в виде структуры (Case Structure) (рис. 3.23),

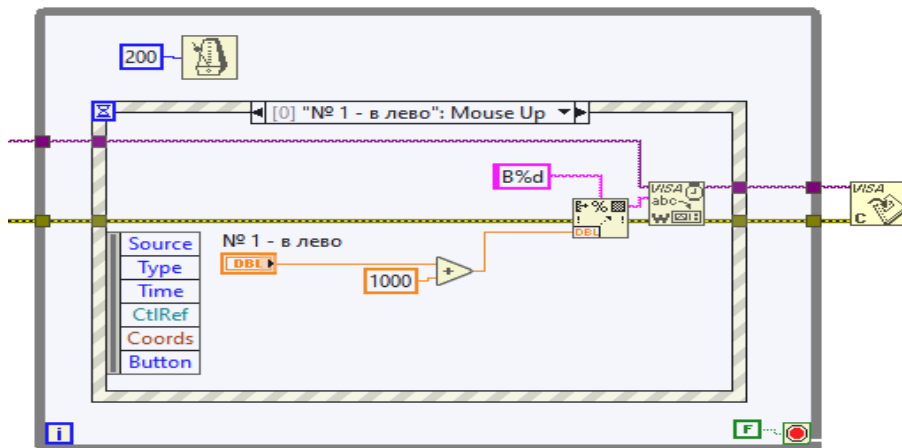


*Рис. 3.23. Блок-схема - терминал фильтрации и визуализации входных данных.*

каждый терминал структуры выполняет обработку конкретного пакета данных.

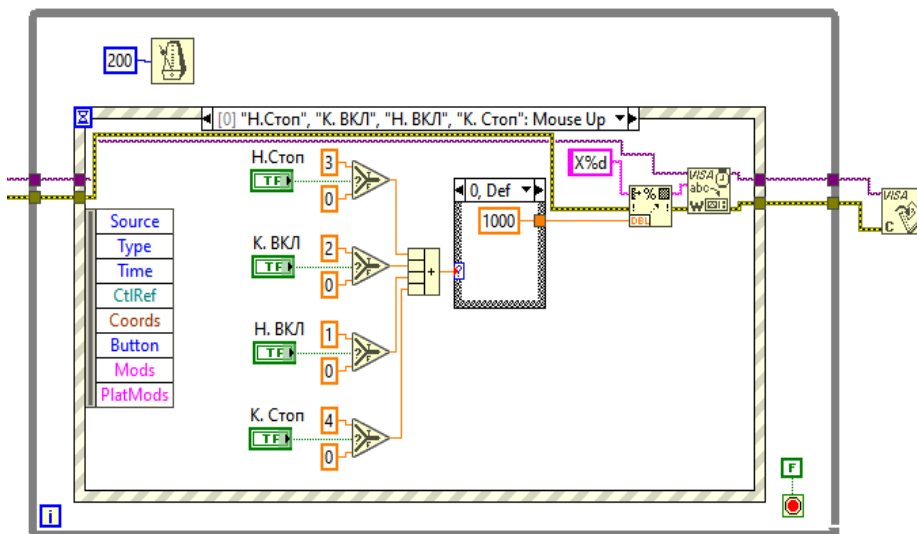
Для запроса требуемого пакета данных и корректировки изменяемых параметров в памяти микроконтроллера STM32F4, разработаны отдельные терминалы, что позволяет в процессе проведения исследований вносить новые наименования изменяемых параметров не редактируя структуру основного программного кода.

Блок-схема терминала, обеспечивающая изменение заданного значения количества пикселей, выделяемых для определения центра тяжести оптического пятна, представлена на рисунке 3.24.



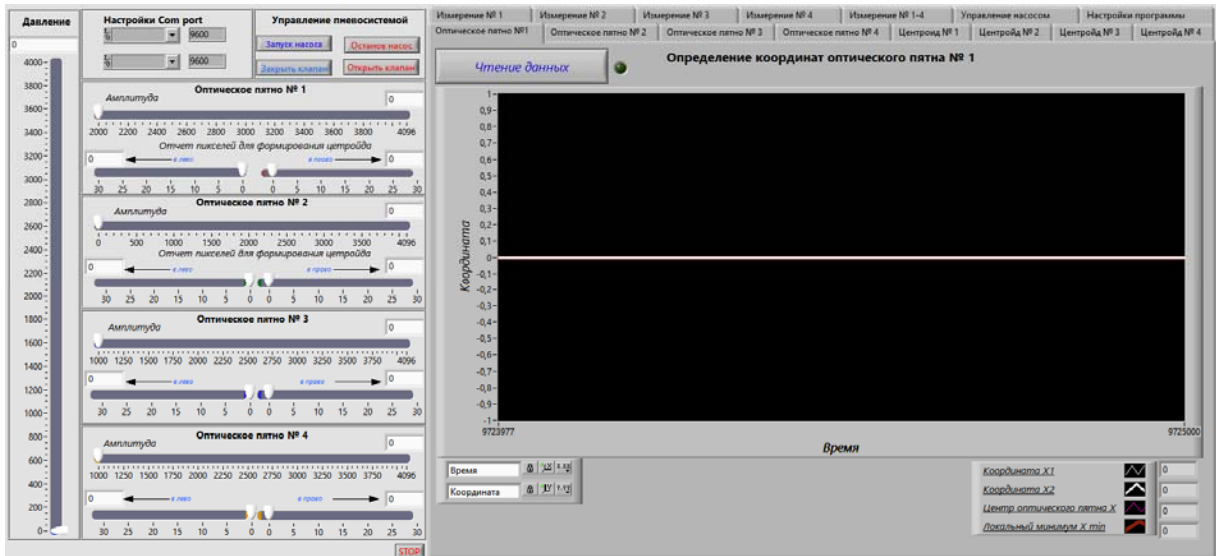
*Рис. 3.24. Блок-схема терминала для изменения заданного значения количества пикселей (слева от центра пятна) для определения центра тяжести оптического пятна.*

На рис. 3.25 представлена блок-схема программы управления электроприводным насосом и электромагнитным клапаном.



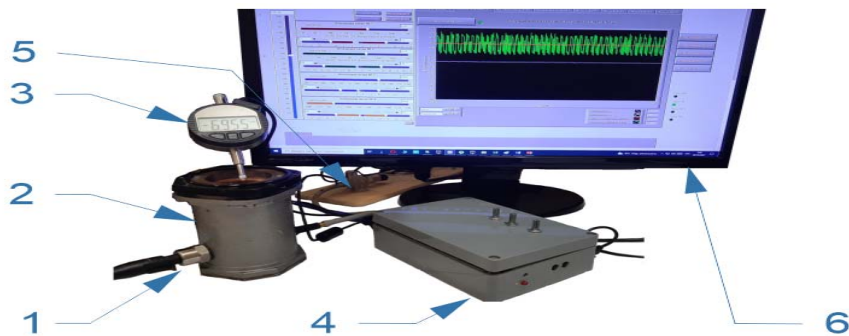
*Рис. 3.25. Блок-схема терминала управления насосом и электромагнитным клапаном*

Для управления программным обеспечением и аппаратным оснащением АПК разработан интерфейс пользователя (рис. 3.26).



а) б)  
**Рис. 3.26.** Графический интерфейс пользователя:  
 а – блок заданных значений, б – блок индикации.

Фото АПК представлено на рис. 3.27.



**Рис. 3.27.** Фото АПК:  
 1 – пьезоэлектрический датчик давления,  
 2 – датчик давления на основе ЛФП,  
 3 – микрометр, 4 – блок управления и обработки данных, 5 – пневматическая система, 6 –  
 монитор (графический интерфейс пользователя).

### 3.7. Выводы по главе

Таким образом, третья глава диссертации посвящена разработке экспериментальной установки в виде АПК, включающей набор аппаратных и программных средств, обеспечивающих автоматизацию процесса экспериментальных исследований датчика давлений на основе ЛФП.

В ходе работы решения следующие задачи:

- выполнен подбор аппаратных компонентов,
- реализованы схемотехнические решения, обеспечивающие согласование аналоговых и цифровых логических уровней между аппаратными компонентами АПК и их коммутацию,
- разработана конструкция датчика давлений на основе ЛФП,
- разработаны способы вычисления координат светового пятна,
- разработаны алгоритмы для управления и обработки данными ЛФП с использованием в качестве генератора синхроимпульсов внешние прерывания АЦП,
- разработан алгоритм управления и обработки ЛФП с использованием в качестве источников синхроимпульсов генератора ШИМ,
- разработан алгоритм управления и обработки ЛФП приемников без использования АЦП,
- разработан алгоритм, реализующий обмен данными между аппаратными компонентами АПК.
- разработан оригинальный датчик давлений, использующий процесс ветвления исходной информации, который осуществляется применением шторок с  $n$  щелями, позволяющим сформировать на ЛФП  $n$  оптических пятен, перемещающихся в функции измеряемого давления; на базе которого предложены:
  - математические модели и алгоритмы управления микроконтроллером, обеспечивающие, при измерении линейных перемещений жесткого центра мембран, обработку сигналов с выхода ЛФП при воздействии на нее двух оптических пятен и отличающиеся тем, что процесс математической обработки полученных данных выполняется до завершения полного цикла опроса, что обеспечивает повышение точности измерений перемещения жесткого центра мембраны, а также повышение быстродействия измерительной системы.
  - математические модели и алгоритмы управления микроконтроллером, обеспечивающие, при измерении линейных перемещений жесткого центра мембран, обработку сигналов с выхода ЛФП при воздействии на нее двух оптических пятен и отличающиеся тем, что процесс математической обработки

полученных данных выполняется до завершения полного цикла опроса, что обеспечивает повышение точности измерений перемещения жесткого центра мембраны, а также повышение быстродействия измерительной системы

Практической значимостью разработанных методов и алгоритмов управления микроконтроллером, обеспечивающих обработку выходных сигналов ЛФП при измерении линейных перемещений жесткого центра упругого чувствительного элемента, может явиться возможность их использования в аналогичных измерительных системах линейных перемещений.

## ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 4.1. Цель и задачи эксперимента

Научный эксперимент, проводимый автором, нацелен на реализацию комплекса мероприятий, направленных на подтверждение или опровержение тех или иных теоретических предпосылок и ранее обнаруженных закономерностей или следственно-причинных связей между взаимодействующими структурами, в части касающейся датчиков давлений на основе ЛФП.

Целью экспериментальных исследований является подтверждение работоспособности, разработанного автором датчика статического и полного давлений на базе УЧЭ и ЛФП, оценка характеристик точности указанного датчика, а также оценка степени влияния внутренних и внешних возмущений на точность измерения давлений.

Исходя из конструктивных особенностей экспериментального датчика давления и АПК в целом, достижение поставленной цели осуществляется решением следующих задач:

1. Определение влияния характеристик источника оптического излучения на форму выходного сигнала ЛФП.
2. Выявление оптимальных режимов работы ЛФП для их использования в качестве вторичных преобразователей в датчиках давлений, в частности, с использованием или без использования электронного затвора.
3. Установление влияния на точность измерения давления используемой методики вычисления «центра тяжести» оптического пятна.
4. Оценка метрологических характеристик датчиков статического и полного давлений на основе ЛФП.
5. Сравнительная оценка метрологических характеристик датчиков статического и полного давлений.
6. Разработка, на основе полученных экспериментальных данных, рекомендаций по проектированию и разработке конструкций датчиков давлений на основе ЛФП.

#### **4.2. Влияние характеристик источника оптического излучения на форму выходного сигнала линейки фотоэлектронных приемников**

В качестве источника излучения в АПК используется светодиод. Далее, не погружаясь в параметры оптического излучения в его широком понимании как науки «Оптика», нас будет интересовать всего лишь один параметр – световой поток. Именно световой поток как физическая величина, характеризующая количество «световой» мощности в соответствующем потоке излучения, оказывает наибольшее влияние, при прочих равных условиях, на форму выходного ЛФП.

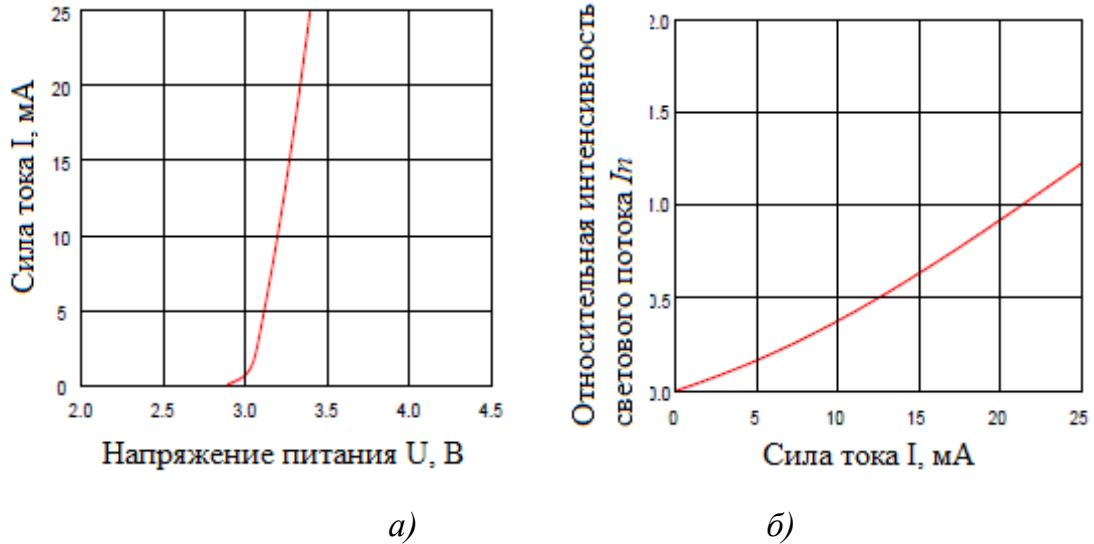
Проведение данного эксперимента обусловлено тем, что для измерений, с использованием оптоэлектронного преобразователя, необходимо на выходе ЛФП иметь такую форму сигнала, которая бы обеспечивала вычисление центроид фигур (оптических пятен), образованных изменением амплитуды напряжения в результате воздействия на них светового потока через прорези шторки, соединенной с жестким центром упругого элемента.

Особенностью применения ЛФП является их высокая чувствительность, поэтому при достаточно высокой «мощности» светового потока наступает эффект растекания избыточного заряда от освещенных областей ПЗС-линейки на соседние участки. Подобное явление называется «блюмингом» (от англ. blooming – размывание). В результате наступает момент, когда линейка «слепнет» а сигнал на выходе демонстрирует уровень «теневого» значения.

В качестве источника оптического излучения используются светодиоды ARL-3214, его характеристики представлены на рисунке 4.1.

Из рис. 4.1б видно, что интенсивность светового потока имеет логарифмическую зависимость от тока, потребляемого светодиодом.



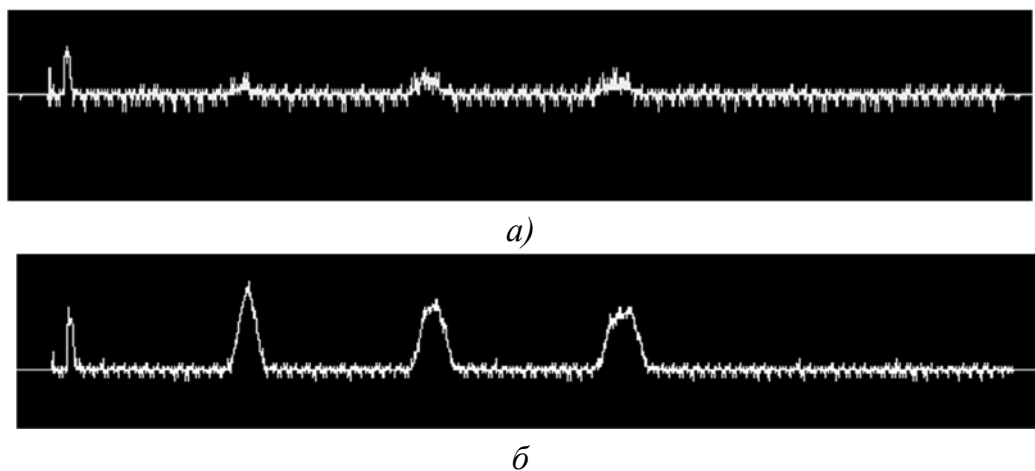


**Рис. 4.1.** Характеристики светодиода ARL-3214:

*а* – вольт-амперная характеристика, *б* – зависимость относительной интенсивности светового потока от потребляемого тока.

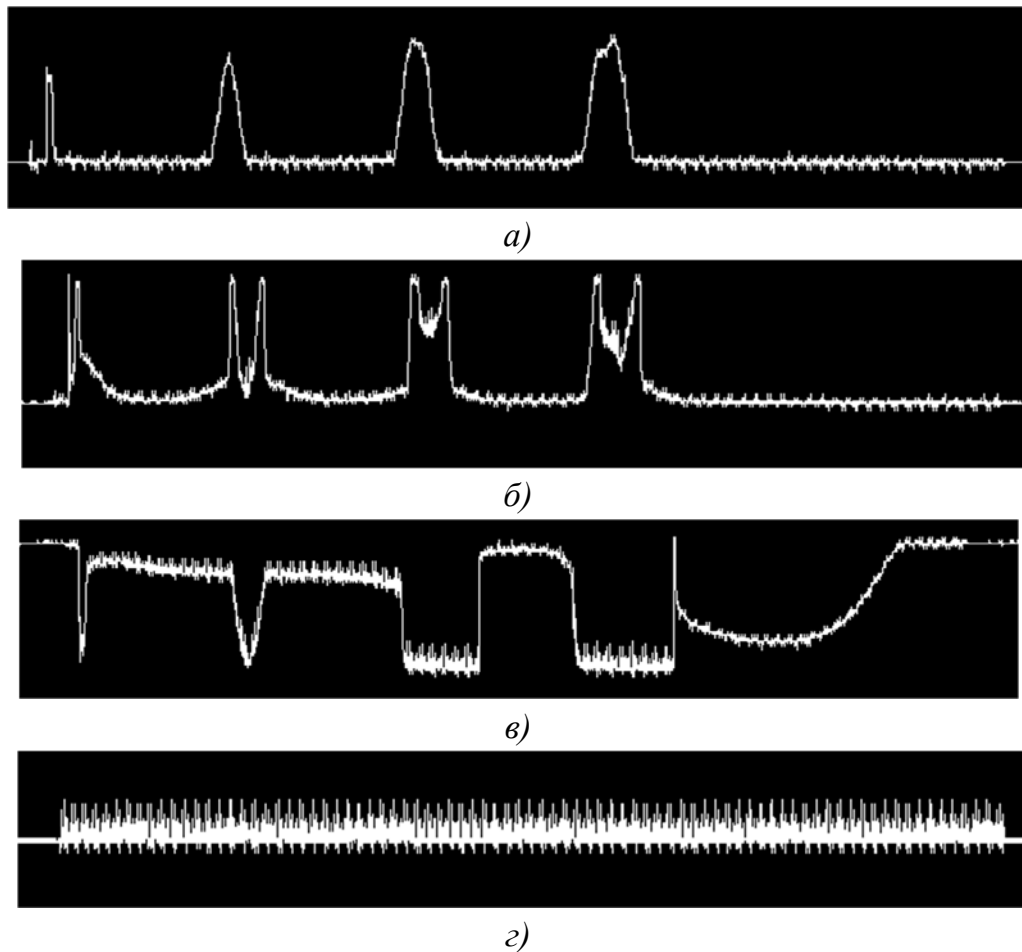
Суть эксперимента заключается в следующем. С использованием переменных токоограничивающих резисторов осуществляется изменение параметров питающей сети светодиодов и при помощи осциллографа контролируется форма выходного сигнала ЛФП, при этом фиксируется значение силы тока, потребляемого светодиодом.

Влияние величины потребляемого тока на форму выходного сигнала ЛФП типа PLX554В, представлены на рисунках 4.2 и 4.3.



**Рис. 4.2.** Влияние потребляемого тока на форму выходного сигнала:

*а* –  $I = 0,04$  мА, *б* –  $I = 0,08$  мА.



**Рис. 4.3.** Влияние потребляемого тока на форму выходного сигнала:  
 $a - I = 0,10 \text{ мА}$ ,  $б - I = 0,13 \text{ мА}$ ,  $в - I = 0,16 \text{ мА}$ ,  $г - I = 0,17$ .

Из рисунков видно, что с увеличением потребляемого тока светодиода происходит искажение оптического пятна, которое происходит в результате растекания избыточных зарядов от освещенных областей ПЗС-линейки.

Таким образом, при работе ЛФП в качестве вторичных измерительных преобразователей датчиков статического и полного давлений, необходимо организовать питание сети светодиодов в таком диапазоне его параметров (силы тока и напряжения), чтобы исключить уменьшение размера оптических пятен до размеров, затрудняющих их определение или наступления эффекта «блуминг».

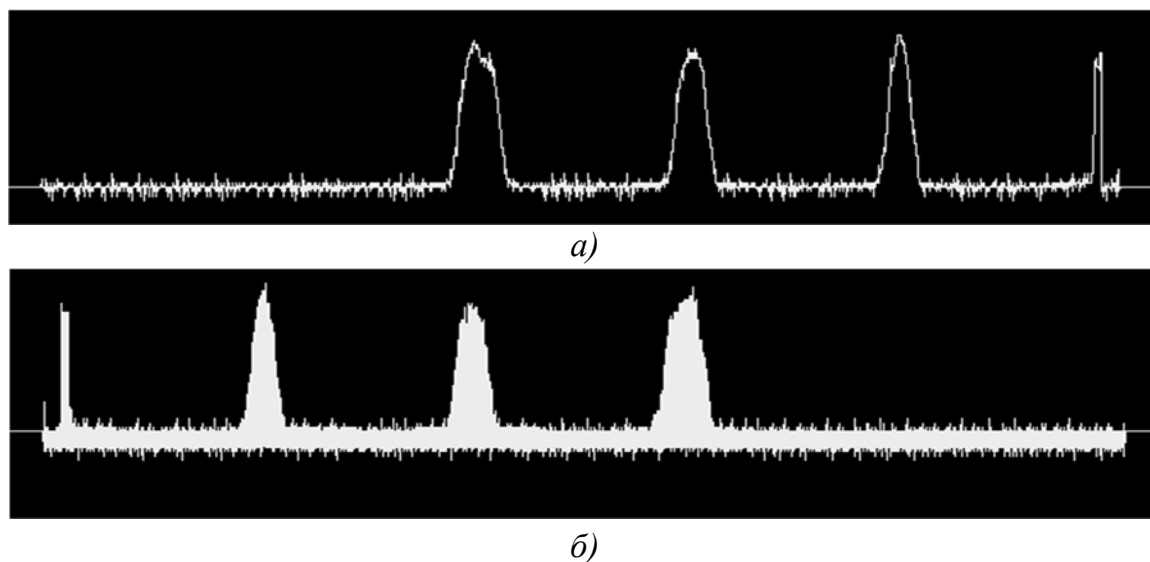
### 4.3. Влияние режима работы многоэлементного фотоэлектронного устройства на форму выходного сигнала

Большинство современных ЛФП типа ПЗС-линеек имеет как минимум два режима работы, с использованием или без использования электронного затвора.

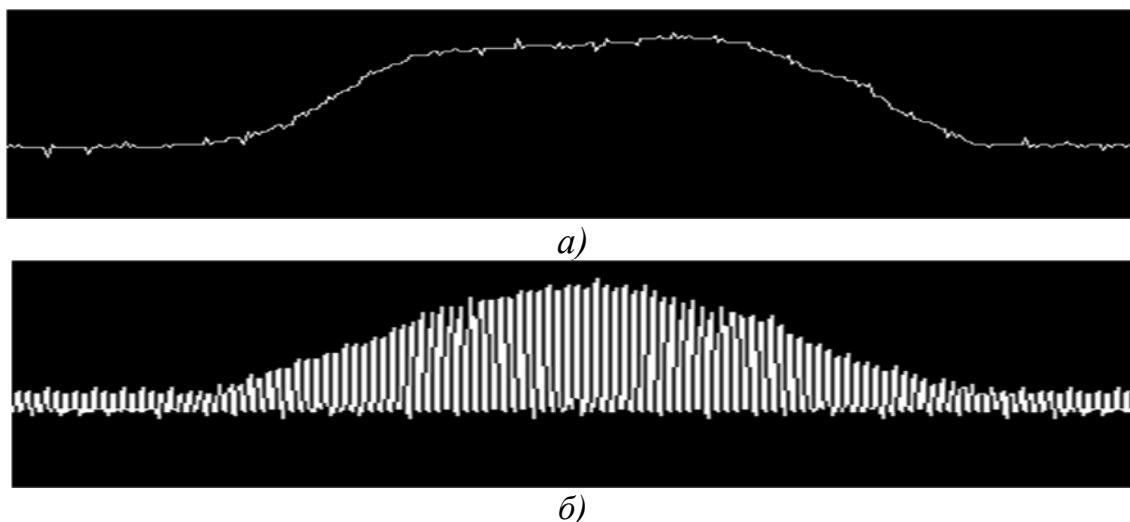
В зависимости от целевого применения этих устройств может использоваться тот или иной режим.

Суть эксперимента заключается в следующем. Определение при помощи осциллографа характера выходного сигнала ЛФП в зависимости от режима работы. Потребность в подобном эксперименте обусловлена тем, что для определения центров тяжести оптических пятен, образованных изменением амплитуды напряжения, в результате воздействия на них светового потока через прорезы шторки, смещение которой осуществляется в функции давления, необходимо определить режим с минимальным значением величины шума выходного сигнала ЛФП.

На рис. 4.4 и 4.5 представлены формы сигналов в зависимости от режима работы ЛФП типа ILX554В.



*Рис.4.4. Влияние режима работы ЛФП на форму выходного сигнала:  
а – форма выходного сигнала без электронного затвора, б – форма  
выходного сигнала с электронным затвором.*



*Рис. 4.5. Влияние режима работы ЛФП на геометрическую форму оптического пятна: а – оптическое пятно без электронного затвора, б – оптическое пятно с электронным затвором.*

Таким образом, из рисунков 4.4 и 4.5 видно, что низкочастотные колебания напряжения, возникающие при использовании электронного затвора, искажают форму выходного сигнала ЛФП и затрудняют процесс измерений.

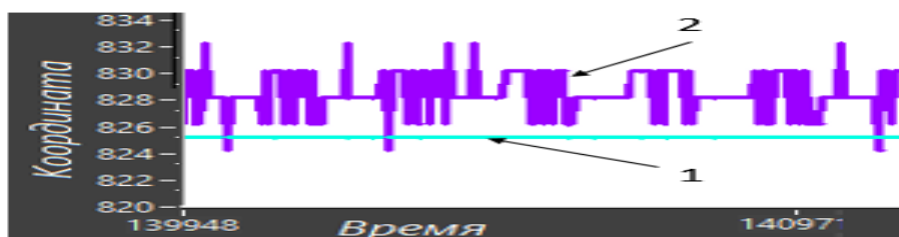
#### **4.4. Влияние способов определения «центра тяжести» оптического пятна с использованием центроид метода на устойчивость измерений**

При определении центра тяжести оптического пятна  $MAX_n$  с использованием методик (3.1) и (3.5), для выделения фигур, образованных изменением амплитуды напряжения ЛФП, в результате воздействия на них светового потока через прорези шторки, используются локальный максимум амплитуды напряжения  $N_{max}$  в районе оптического пятна и геометрический центр  $N_{aver}$ , соответственно.

Суть эксперимента заключается в следующем. С использованием АПК определялся характер изменения локального максимума и геометрического центра оптического пятна.

Потребность в подобном эксперименте обусловлена тем, что для точного определения центров тяжести оптических пятен необходимы устойчивые значения этих параметров.

На рисунке 4.6 представлены результаты вычислений локального максимума и геометрического центра оптического пятна.



*Рис. 4.6. Определение локального максимума светового пятна и центра оптического пятна: 1 – центр оптического пятна, 2 – локальный максимум.*

Из рисунка видно, что центр оптического пятна 1 более стабилен, чем локальный максимум 2, что обеспечивает более точное определение  $MAX_n$ .

#### **4.5. Метрологические характеристики датчиков статического и полного давлений на основе ЛФП**

##### **4.5.1 Оценка точности измерения перемещения жесткого центра упругого чувствительного элемента, в функции пиксельной системы координат**

Следующий этап экспериментальных исследований является наиболее важным в работе, именно оценка метрологических характеристик датчиков позволяет оценить характеристик их точности.

В качестве критерия, для оценки параметров характеристик точности разрабатываемых датчиков давлений, определена точность измерения положения геометрического центра УЧЭ. Выбор обусловлен тем, что данный параметр не зависит ни от геометрических размеров, ни формы УЧЭ, но в свою очередь, позволяет оценить точность любого датчика давлений в целом использованием методики, предложенной во второй главе.

Методика измерения положения жесткого геометрического центра упругого чувствительного элемента заключается в следующем. С использованием программного интерфейса пользователя, кратковременно, включается электроприводной насос. За счет образовавшегося перепада давлений, мембрана прогибается, и перемещающаяся шторка смещает оптические пятна по поверхности ЛФП. После фиксации мембраны в новом положении выполняется

математическая обработка результатов измерений и сохранение значений для последующей статистической обработки.

Применив вышеизложенный способ (3.2), перемещение жесткого центра мембраны  $\omega_0$  выражается как:

$$\omega_0 = k_x(MAX_n(t) - MAX_n(0)), \quad (0.1)$$

$MAX_n(t)$  – координата максимума  $n$ -го светового пятна на оптической линейке в текущий момент времени  $t$ ,  $MAX_n(0)$  – исходное значение координаты  $n$ -го светового пятна,  $k_x$  – коэффициент, значение которого зависит от геометрических размеров пикселей ЛФП и их взаимного расположения в линейке.

Так, для ЛФП типа ILX554B с размерами пикселя 14x56 мкм коэффициент  $k_x = 0,007$ . Значение коэффициента  $k_x$  установлено экспериментально, путем многократных измерений и дальнейшего усреднения результатов измерений положения жесткого центра мембраны, с использованием микрометра, и выраженное как:

$$k_x = \frac{\omega_m(t)}{MAX_n(t) - MAX_n(0)}, \quad (4.2)$$

где  $\omega_m$  – показания микрометра в текущий момент времени  $t$ .

В качестве выборки, при обработке результатов эксперимента, принимались значения величин деформации жесткого центра мембраны  $\omega_0$ .

Значения координат прогиба мембраны вычислялись сразу же после того, как были произведены оцифровка и математическая обработка половины опрошенных пикселей ЛФП. За измеренное значение  $x$ , принимался сигнал, переданный через интерфейс USART на ПК, выраженный как:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{0i}}{n}, \quad (4.3)$$

где  $\omega_{0i}$  – значение  $i$ -той выборки,  $n$  – количество выборок в измерении.

Параметры экспериментов по измерению положения жесткого центра мембраны, представлены в таблице 4.1.

Особенность эксперимента № 1 является максимальная частота измерений, достигаемая за счет применения двух оптических пятен, при этом результат

**Таблица 4.1.** Параметры экспериментов по определению положения жесткого центра мембраны

| № эксперимента | Частота измерений, Гц | Количество оптических пятен | Количество выборок в измерении $n$ (кратность усреднения) |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|---|
| 1              | 400                   | 1 и 2                       | 1   |
| 2              | 200                   | 1                           | 1   |
| 3              | 200                   | 2                           | 1   |
| 4              | 100                   | 1                           | 2   |
| 5              | 100                   | 2                           | 2   |
| 6              | 66                    | 1                           | 3   |
| 7              | 66                    | 2                           | 3   |
| 8              | 50                    | 1                           | 4   |
| 9              | 50                    | 2                           | 4   |

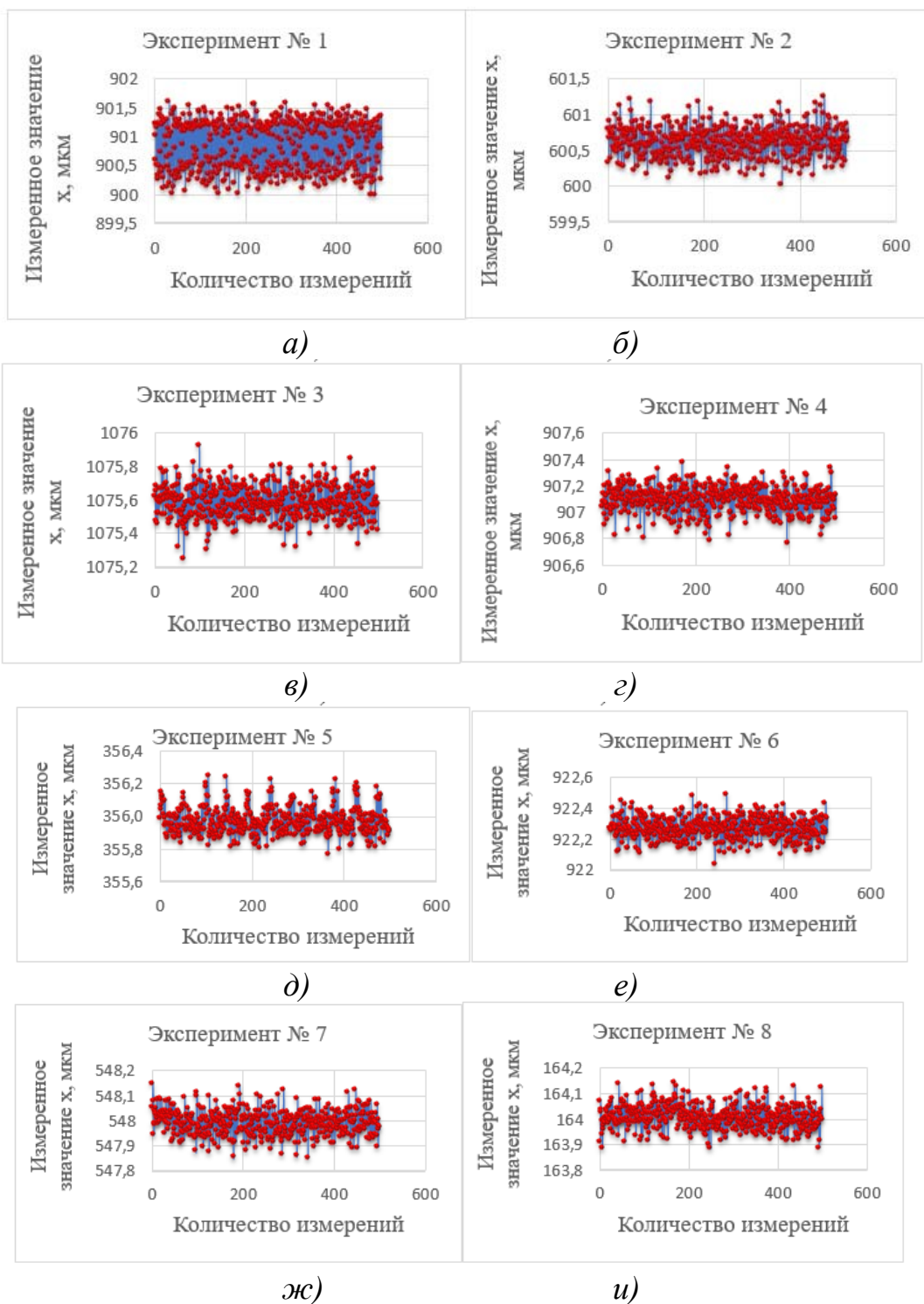
измерения от первого оптического пятна получен до окончания опроса ЛФП, реализованного на основе алгоритма, представленного в главе 3.

Далее последовательность  $m$  значений  $x_1, x_2 \dots x_m$ , полученных в результате эксперимента, мы будем рассматривать как совокупность значений, распределенных независимых случайных величин, представляющих собой  $m$  экземпляров одного и того же признака  $X$ . Статистический анализ выполнен с использованием интерфейса пользователя АПК в соответствии с рекомендациями действующих стандартов [23].

Подробно, результаты статистического анализа представлены в приложении А.

Для подтверждения статистической устойчивости результатов измерений выполнена проверка принадлежности их к нормальному закону распределения. Так как значение  $m > 50$ , для проверки использован критерий  $\chi^2$  К. Пирсона.

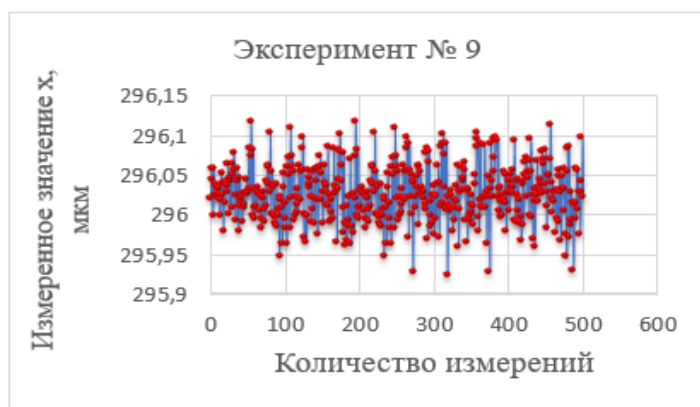
На рисунок 4.8 и 4.9 представлены результаты измерений, а на рисунке 4.10 - гистограмма по оценке плотности распределения вероятности результатов эксперимента № 8.



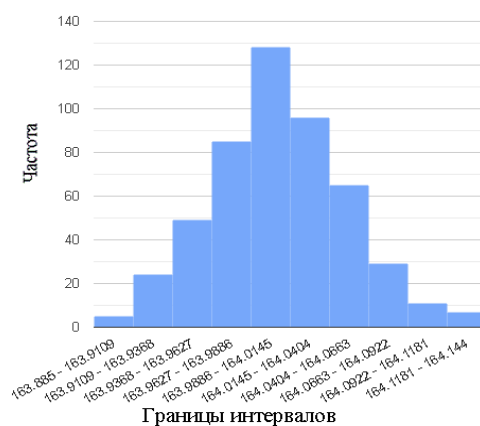
**Рис. 4.8.** Результаты измерений:

а – эксперимент № 1, б – эксперимент № 2, в – эксперимент № 3, г – эксперимент № 4, д – эксперимент № 5, е – эксперимент № 6, ж – эксперимент № 7, и – эксперимент № 8.





**Рис. 4.9.** Результаты измерений эксперимента № 9.



**Рис. 4.10.** Гистограмма плотности вероятности результатов измерений эксперимента № 8.

Значения абсолютной погрешности и среднеквадратического отклонения результатов измерений представлены в таблице 4.2.

**Таблица. 4.2.** Погрешности измерений положения жесткого центра мембраны

| Наименование  | № эксперимента |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|   | 1              | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
| Абсолютная погрешность $\pm\Delta x$ , мкм          | 1,054          | 0,633  | 0,278  | 0,337  | 0,155  | 0,327  | 0,137  | 0,238  | 0,100  |
| Среднеквадратическое отклонение $\pm\Delta x$ , мкм | 0,4200         | 0,2100 | 0,0710 | 0,1000 | 0,0495 | 0,0990 | 0,0450 | 0,0820 | 0,0340 |

В результате анализа полученных данных принимается нулевая гипотеза о нормальном распределении для всех девяти экспериментов. Следовательно, полученным результатам можно доверять.

#### 4.5.2. Определение точности измерения давления в функции пиксельной системы координат

Методика измерения давления заключается в следующем.

С использованием программного интерфейса пользователя, кратковременно, включается электрический насос, за счет образовавшегося перепада давлений мембрана прогибается, в то же время, перемещение шторки смещает оптические пятна по поверхности ЛФП. После фиксации мембраны в новом положении выполняется математическая обработка результатов измерения давления и сохранение значений для последующей статистической обработки.

Эксперимент проводился с использованием УЧЭ радиусом 25 мм, толщиной 0,22 мм, глубиной гофры 0,75 мм, радиусом жесткого центра 5 мм, пильчатого профиля с 3 гофрами из бериллиевой бронзы БрБ2 с использованием двух оптических пятен и четырехкратным усреднением выборок.

Аналогично (4.2), давление  $P$  определяется как:

$$P = k_p (MAX_n(t) - MAX_n(0)), \quad (4.5)$$

где  $k_p$  – коэффициент, полученное как:

$$k_p = \frac{P_p(t)}{(MAX_n(t) - MAX_n(0))}, \quad (4.6)$$

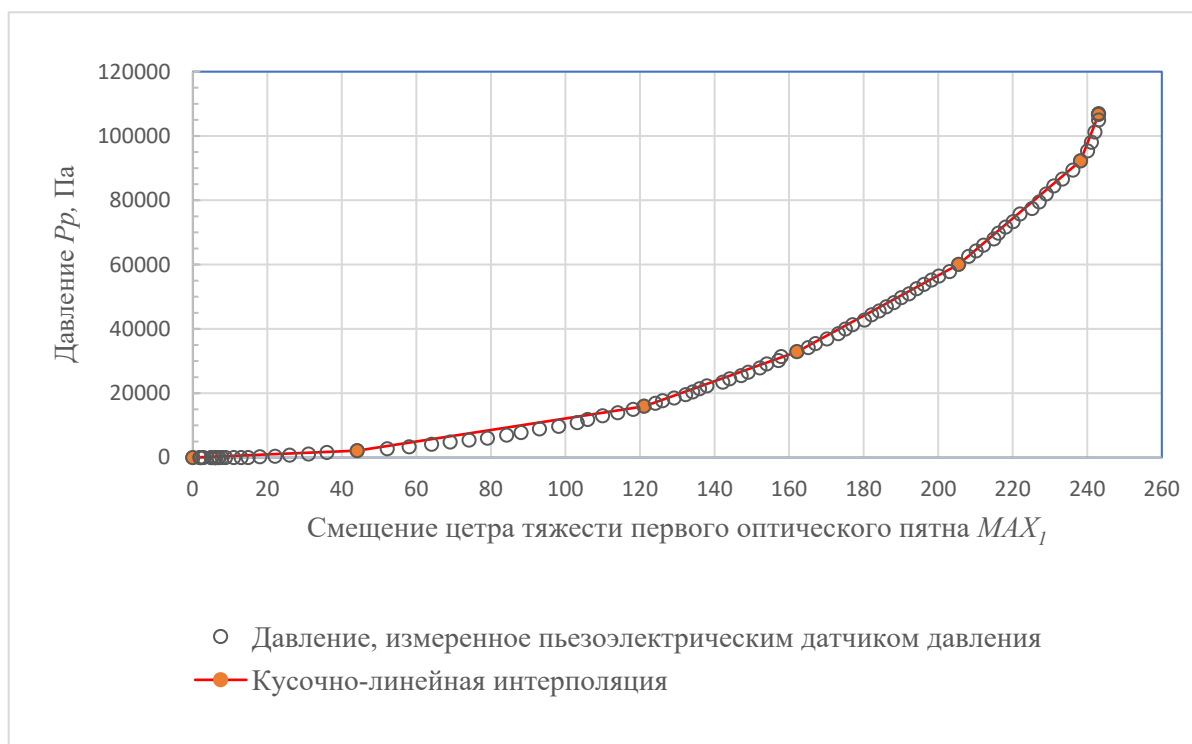
где  $P_p(t)$  – значение давления, полученное от пьезоэлектрического датчика давлений из состава АПК, в текущий момент времени  $t$ .

Смещение центра тяжести  $n$ -го оптического пятна  $\Delta MAX_n$  относительно начального положения вычисляется по формуле:

$$\Delta MAX_n = MAX_n(t) - MAX_n(0). \quad (4.7)$$

Очевидно, ввиду нелинейной зависимости прогиба жесткого центра мембраны от давления, значение коэффициента  $k_p$  в каждый момент времени  $t$  имеет различные значения.

Далее экспериментально, с использованием АПК, получим зависимость  $P_p(\Delta MAX_n)$  (рис. 4.12).



**Рис. 4.12.** Смещение центра тяжести первого оптического пятна.

Преобразовав выражения (4.5), (4.6) и (4.7) получим:

$$P = P_p(\Delta MAX_n). \quad (4.8)$$

Применив метод кусочно-линейной интерполяции, давление  $P$  выражается как:

$$P = \begin{cases} 47,99\Delta MAX_n, & 0 \leq \Delta MAX_n < 44,1; \\ 179,64\Delta MAX_n - 5806,12, & 44,1 \leq \Delta MAX_n < 121,1; \\ 413,35\Delta MAX_n - 34110,65, & 121,1 \leq \Delta MAX_n < 162,1; \\ 625,72\Delta MAX_n - 68540,15, & 162,1 \leq \Delta MAX_n < 205,5; \\ 984,81\Delta MAX_n - 142328,4, & 205,5 \leq \Delta MAX_n < 238,2; \\ 2976,98\Delta MAX_n - 616875,68, & 238,2 \leq \Delta MAX_n. \end{cases} \quad (4.9)$$

В качестве выборки, при обработке результатов эксперимента, принимались значения величин давления  $P$ .

Значение давления вычислялись сразу же после того, как были произведены оцифровка и математическая обработка половины опрошенных пикселей ЛФП, за измеренное значение  $P_{изм}$  принимался сигнал, переданный через интерфейс USART на ПК, выраженное как:

$$P_{изм} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}, \quad (4.10)$$

где  $P_i$  – значение  $i$ -той выборки,  $n$  – количество выборок в измерении.

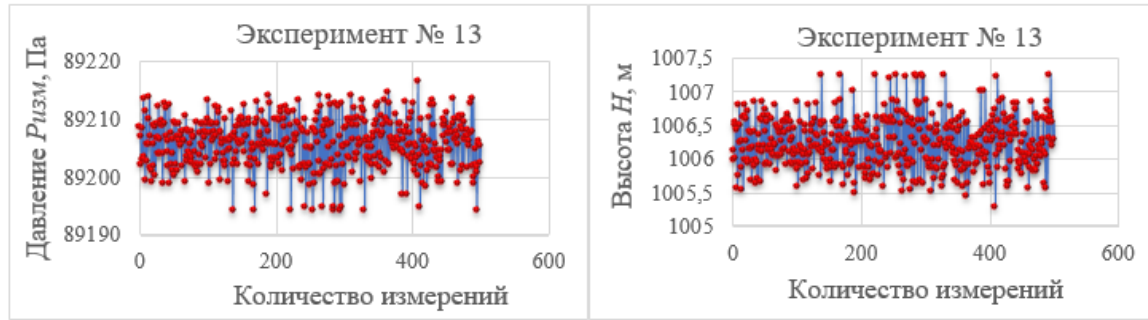
Кроме того, вычисляется эквивалентное значение высоты  $H$  по методике (2.4).

В качестве контрольных точек эксперимента задаются значения, высот относительно которых осуществляется оценка погрешностей измерений давления и эквивалентной высоты. Перечень контрольных точек представлен в таблице 4.3.

**Таблица 4.3. Параметры эксперимента**

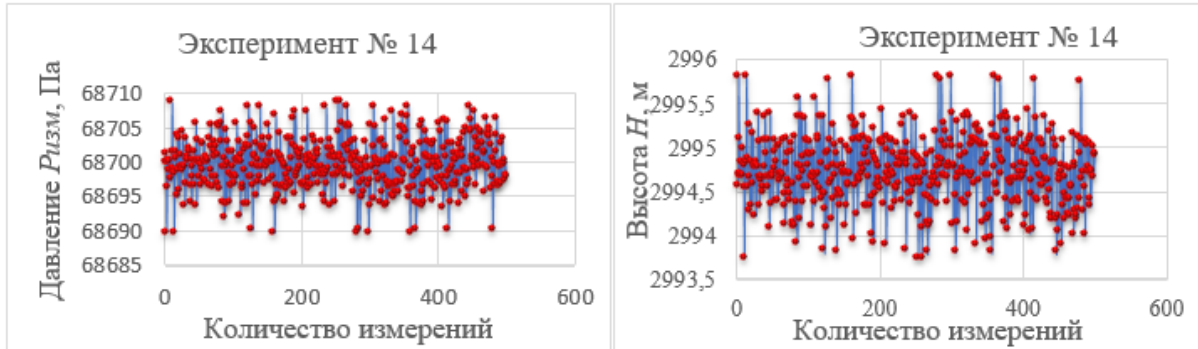
| Наименование     | № эксперимента |    |     |      |      |      |       |       |       |
|------------------|----------------|----|-----|------|------|------|-------|-------|-------|
|                  | 10             | 11 | 12  | 13   | 14   | 15   | 16    | 17    | 18    |
| Значение $H$ , м | -500           | 0  | 500 | 1000 | 3000 | 6000 | 12000 | 15000 | 20000 |

На рисунках 4.13 – 4.15. представлены результаты измерений.



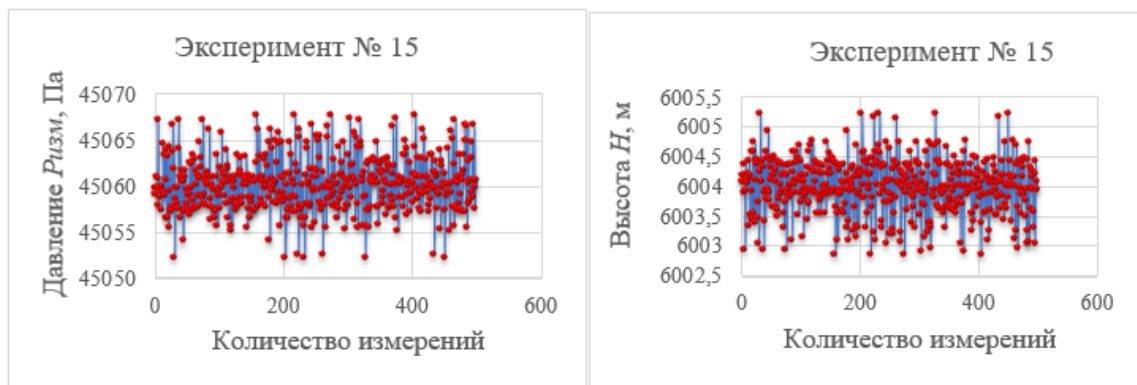
а)

б)



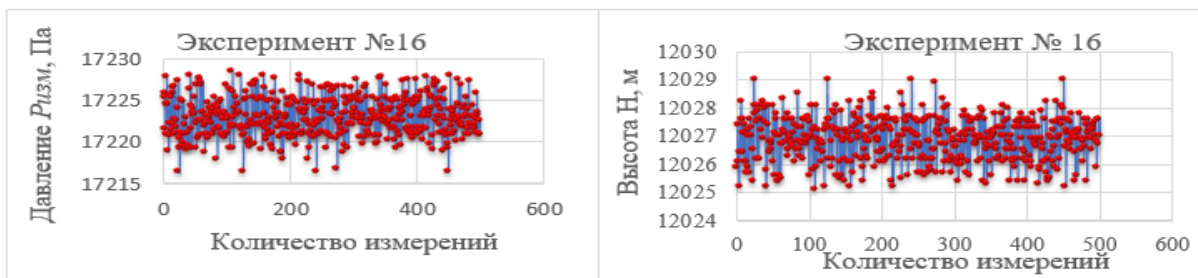
в)

г)



д)

е)

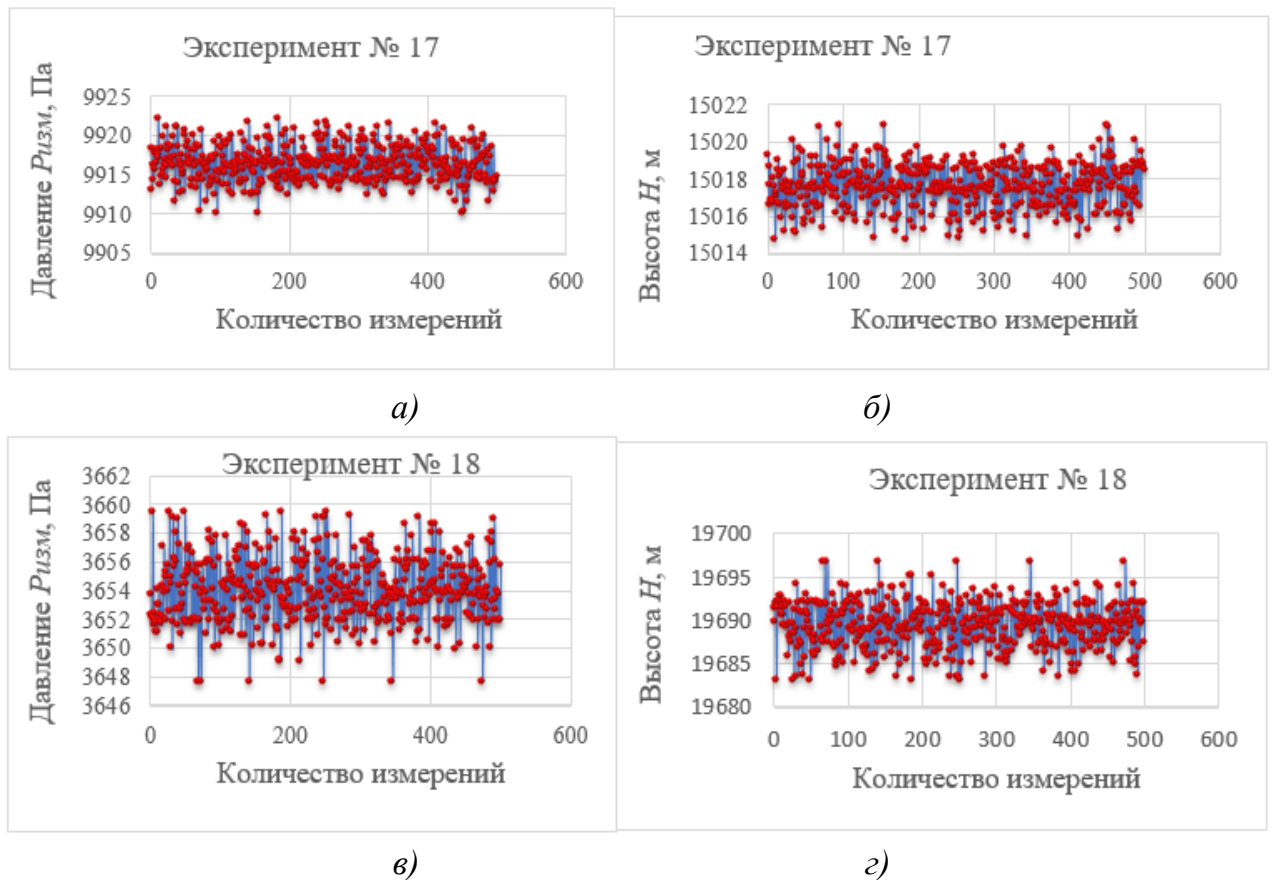


ж)

и)

**Рис. 4.14.** Результаты измерения:

а, в, д, ж – измеренные значения давления для экспериментов № 13, 14, 15, 16,  
 б, г, е, и – измеренные значения эквивалентной высоты для экспериментов №  
 13, 14, 15, 16.



**Рис. 4.15.** Результаты измерения:

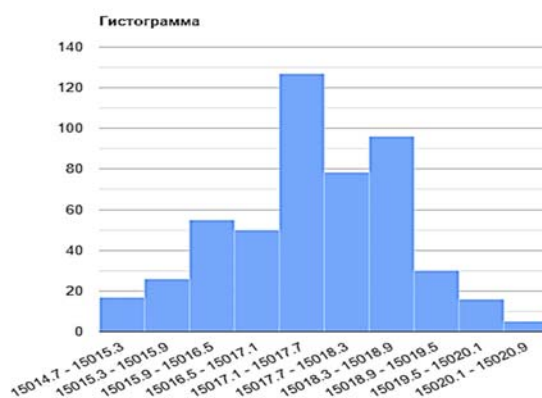
*а, в – измеренные значения давления для экспериментов № 17 и 18,  
б, г – измеренные значения эквивалентной высоты для экспериментов № 17 и 18.*

Далее последовательность  $m$  значений  $P_{изм_1}, P_{изм_2} \dots P_{изм_m}$ , полученных в результате эксперимента, мы будем рассматривать как совокупность значений распределенных независимых случайных величин, представляющих собой  $m$  экземпляров одного и того же признака  $X$ . Статистический анализ выполнен с использованием интерфейса пользователя АПК.

Подробно, результаты статистического анализа представлены в приложении А.

Для подтверждения статистической устойчивости результатов измерений выполнена проверка принадлежности их к нормальному закону распределения. Так как значение  $m > 50$ , для проверки использован критерий  $\chi^2$  К. Пирсона.

На рисунке 4.17. представлена гистограмма плотности вероятности результатов измерения давления в эксперименте № 17.



**Рис. 4.17.** Гистограмма плотности вероятности результатов измерений давления в эксперименте № 17.

Значения абсолютной погрешности и среднеквадратического отклонения результатов измерений давления и эквивалентной высоты представлены в таблице 4.4.

**Таблица 4.4.** Результаты измерения давления и эквивалентной высоты

| Параметр                      |   | Значение |        |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|---|----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Для высоты $H$                | Значение $H$ , м                                | -500     | 0      | 500   | 1000  | 3000  | 6000  | 12000 | 15000 | 20000 |
|                               | Абсолютная погрешность $\pm\Delta H$ , м        | 0,97     | 0,98   | 1,00  | 1,01  | 1,08  | 1,22  | 2,11  | 3,27  | 7,38  |
|                               | Среднеквадратическое отклонение $S_H$ , м       | 0,379    | 0,367  | 0,370 | 0,366 | 0,397 | 0,449 | 0,789 | 1,156 | 2,590 |
| Для давления $P$              | Значение $P_{изм}$ , Па                         | 107438   | 101325 | 95496 | 89941 | 70269 | 47404 | 19481 | 11713 | 4411  |
|                               | Абсолютная погрешность $\pm\Delta P_{изм}$ , Па | 13,14    | 12,49  | 11,98 | 11,64 | 10,02 | 7,99  | 6,486 | 6,28  | 6,32  |
|                               | Среднеквадратическое отклонение $S_P$ , Па      | 5,08     | 4,82   | 4,37  | 4,14  | 3,65  | 2,90  | 2,355 | 2,26  | 2,52  |
| Прогиб мембраны $\omega$ , мм |   | 1,260    | 1,215  | 1,165 | 1,115 | 0,92  | 0,66  | 0,268 | 0,15  | 0,05  |

В результате анализа полученных данных принимается нулевая гипотеза о нормальном распределении для всех экспериментов. Следовательно, полученным результатам можно доверять.

#### **4.6. Разработка рекомендаций по проектированию и разработке конструкций датчиков статического и полного давлений на основе линеек фотоэлектронных приемников**

Обобщённый анализ полученных результатов позволяет выработать рекомендации по проектированию и разработке конструкции датчиков давлений на основе линеек фотоэлектронных приемников, в частности:

1. Анализ результатов, полученных в первой главе диссертационной работы, установлена целесообразность применения ЛФП в качестве вторичных измерительных преобразователей давлений.

2. Проектирование УЧЭ может осуществляться по обобщённому алгоритму расчета представленный в второй главе работы, обеспечивающего учет функциональных возможностей ЛФП, а также закономерность изменения измеряемых давлений. При этом, геометрические размеры, профиль и материал для изготовления УЧЭ выбирается из условий, обеспечивающих минимально возможную деформации УЧЭ при заданной точности измерений давления.

3. Исходя из результатов, полученных в третьей главе данной работы, можно выделить следующие положения:

а) конструктивное исполнение вторичного преобразователя давлений должно включать:

– шторку с прорезями, прикрепленную к жесткому центру УЧЭ, обеспечивающего формирование оптических пятен на поверхности ЛФП, при этом, количество прорезей ограничивается лишь размерами ЛФП и ходом жесткого центра УЧЭ.

– источник оптического излучения, расположенный противоположно ЛФП, при этом между ними должна перемещаться шторка с прорезями. Возможно применение нескольких источников оптического излучения с целью повышения надежности датчика в целом.

б) целесообразна установка микроконтроллера в конструкцию датчика давлений, обеспечивающего управление и обработку сигналов ЛФП.



г) выбор типа ЭВМ осуществляется исходя из реализуемых алгоритмов, в частности, одним из предложенных автором:

– алгоритмы управления и обработки данных линейки фотоэлектронных приемников с использованием в качестве генератора синхроимпульсов внешние прерывания АЦП в соответствии с п. 3.5.1,

– алгоритмы управления и обработки данных линейки фотоэлектронных приемников с использованием в качестве источников синхроимпульсов генератора широтно-импульсной модуляции в соответствии с п. 3.5.2,

– алгоритмы управления и обработки данных линейки фотоэлектронных приемников без использования аналого-цифрового преобразователя в соответствии с п. 3.5.3.

в) при разработке программного обеспечения для ЭВМ в составе датчика давления на основе ЛФП могут использоваться математические зависимости, устанавливающие взаимосвязь между смещением центра тяжести оптического пятна и измеряемым давлением (3.2), (3.7) и (3.8).

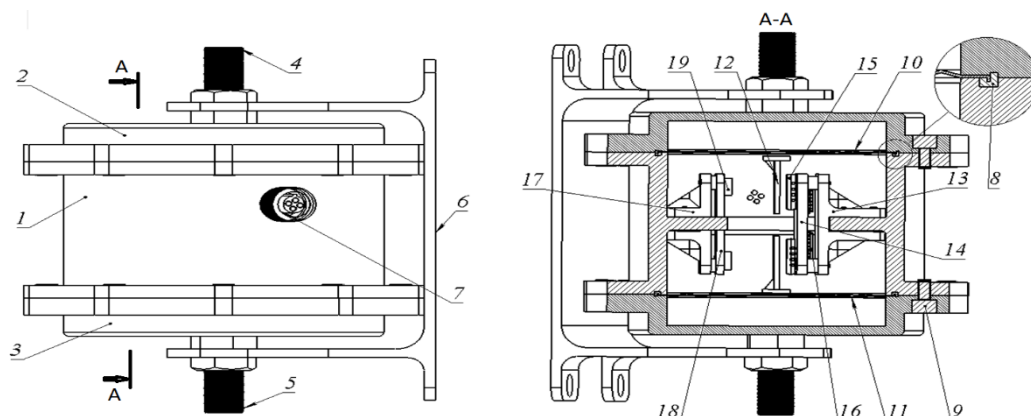
4. По результатам экспериментальных исследований, отраженных в третьей главе диссертационной работы, целесообразно:

– организовать питание сети светодиодов в таком диапазоне его параметров (силы тока и напряжения) чтобы исключить уменьшение размера оптических пятен до размеров, затрудняющих их определение и наступления эффекта «блюминг».

– для минимизации низкочастотные колебания выходного сигнала ЛФП, исключить применение электронного затвора ЛФП.

На основе выше изложенных рекомендаций разработана конструкция датчика статического и полного давлений на основе ЛФП [7, 10].

На рисунке 4.17 представлен чертеж датчика.

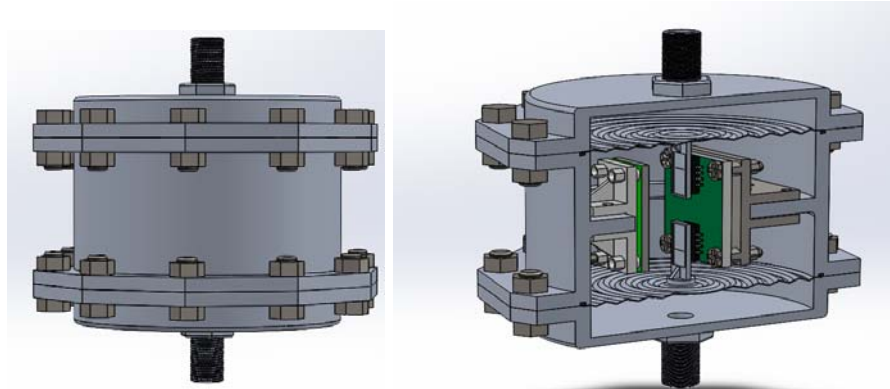


**Рис. 4.17.** Датчик статического и полного давлений на основе ЛФП:  
 1 – корпус, 2,3 – верхняя и нижняя крышки корпуса, соответственно, 4, 5 – штуцер для подвода полного и статического давления, соответственно, 6 – крепежный элемент, 7 – штепсельный разъем, 8 – уплотнительное кольцо, 9 – винт крепления нижней крышки, 10, 11 – верхняя и нижняя мембраны, соответственно, 12 – шторка с прорезями, 13 – электронный модуль, 14 – электронная плата ЛФП, 15 – ЛФП, 16 – ЭВМ(микроконтроллер), 17 – кронштейн крепления электронной платы светодиодов, 18 – электронная плата светодиодов, 19 – светодиод.

Корпус датчика 1 выполнен в виде цилиндра, причем герметизация его отверстий по периметру осуществляется с помощью крышек 2 и 3. В центрах крышек также герметично закреплены штуцера 4 и 5 для подвода статического и полного давлений, выполняющие, кроме того, функцию крепежных элементов стоек основания 6, имеющего крепежные отверстия. На боковой стенке корпуса установлен штепсельный разъем 7 для коммутации элементов вторичного преобразователя с внешними устройствами. Корпус 1 датчика имеет кольцевой прилив, повышающий жесткость конструкции и одновременно являющийся базовой поверхностью для установки элементов вторичного преобразователя давлений. Кроме того, корпус с двух сторон имеет фланцы крепления, технологические канавки и уплотнительные кольца 8 для фиксации упругих элементов 10 и 11 при герметизации корпуса крышками с помощью стяжных винтов 9. В полости, образованной в корпусе между упругими мембранами, создается вакуум. К геометрическим центрам мембран жестко крепятся шторки 12 с прорезями. Между шторками, симметрично, установлены - с одной стороны,

закрепленный на кронштейне 13 электронный модуль 14, основными элементами которого являются ЛФП 15 и микроконтроллер 16, а с другой, закрепленная на кронштейне 17, плата 18, включающая в себя источники излучения 19 и элементы стабилизации и коммутации.

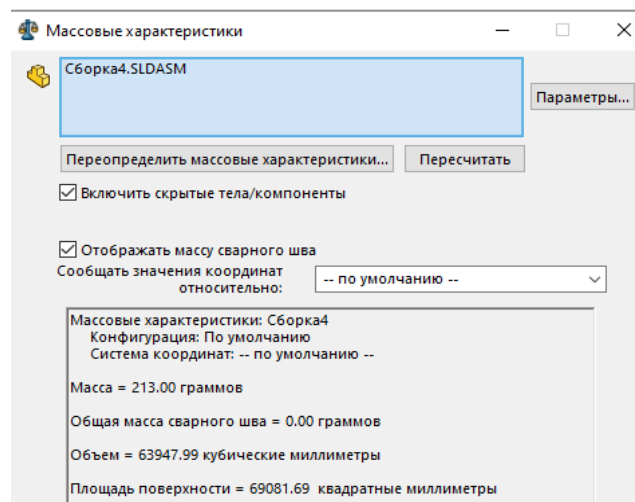
На рисунке 4.18 представлен трехмерный макет разработанного датчика.



*Рис. 4.18. Трехмерный цифровой прототип датчика давлений на основе ЛФП*

#### 4.7. Сравнительная оценка датчиков на основе оптоэлектронного преобразователя и датчиков генераторного типа

На базе разработанного трехмерного цифрового прототипа датчика давлений на основе ЛФП с использованием программного комплекса Solidworks выполнена оценка его массовых характеристик. Результаты расчетов представлены на рисунке 4.19.



*Рис. 4.19. Результат определения массовых характеристик датчика*

Кроме того, определена потребляемая мощность датчика давлений на основе ЛФП (таблица 4.5).

*Таблица 4.5. Потребляемая мощность электронных компонентов датчика давлений на основе ЛФП*

| <b>Компонент вторичного преобразователя</b> | <b>U, В</b>  | <b>I, мА</b> | <b>P, мВт</b>  |
|---|--------------|--------------|----------------|
| Источник оптического излучения              | 2,6          | 0,08         | 0,208          |
| ЛФП типа ILX554В                            | 3,3          | 45           | 148,5          |
| Микроконтроллер STM32F4                     | 3,3          | 40           | 132            |
|   | <b>Сумма</b> |              | <b>280,708</b> |

В таблице 4.6. представлена сравнительная оценка результатов экспериментальных данных с метрологическими характеристиками датчиков давлений типа ДДГ входящих в состав серийно выпускаемых СВС (СВС-2Ц-У2, СВС-96).

*Таблица 4.6. Сравнительная оценка*

| <b>Параметр</b>                  | <b>ДДГ из состава СВС (СВС-2Ц-У2, СВС-96)</b> | <b>Датчик давления на основе ЛФП</b> | <b>Улучшение, %</b> |
|----------------------------------|---|--------------------------------------|---------------------|
| Интервал передачи данных, с      | 0,31  | 0,25                                 | 19                  |
| Снижение питающего напряжения, В | 15  | 3,3                                  | 78                  |
| Снижение энергопотребления, мВт  | 1000  | 280,708                              | 72                  |
| Погрешность измерений, Па        | 32  | 13,14                                | 59                  |
| Время готовности, с              | 30  | 1                                    | 96                  |
| Снижение массы, гр               | 400   | 213                                  | 46,75               |

#### 4.8. Выводы по главе

В четвертой главе диссертационной работы выполнена экспериментальная проверка и оценка метрологических характеристик датчиков давлений, использующих оптоэлектронный преобразователь, а также определено влияние внутренних и внешних возмущений на точность измерений.

В ходе работы решены следующие задачи:

– установлен характер влияния интенсивности светового потока на форму выходного сигнала ЛФП, в частности, при увеличении интенсивности светового потока возникает вероятность наступления эффекта «блюминг» как следствие отсутствие возможности проведения измерений. Для каждой модели ЛФП и источника оптического излучения значения интенсивности светового потока, при которых возникает подобный эффект различны, поэтому при разработке необходимо обеспечить допустимый его предел.

– выявлено влияние режима работы ЛФП на форму его выходного сигнала, в частности, использование электронного затвора, способствует увеличению шумов электрического сигнала проявляющиеся как низкочастотные колебания напряжения что в значительной степени усложняет процесс измерений.

– установлено влияние способов определения центра тяжести оптического пятна, в частности, ввиду не устойчивого значения локального максимума светового пятна, целесообразно использование геометрического центра оптического пятна.

– получены значения эмпирических коэффициентов обеспечивающих выполнение измерений положения жесткого центра УЧЭ с использованием ЛФП.

– получены интерполирующие функции, устанавливающие взаимосвязь между характеристикой УЧЭ элемента и центром тяжести оптического пятна, обеспечивающие измерение давлений с использованием датчика давлений на основе ЛФП.

В качестве критерия, для оценки параметров характеристик точности разрабатываемых датчиков давлений, определена точность измерения положения геометрического центра УЧЭ

– осуществлён выбор критерия, для оценки характеристик точности разрабатываемых датчиков давлений на основе ЛФП, в частности, в качестве критерия определена точность измерения положения геометрического центра УЧЭ. Выбор обусловлен тем, что данный параметр не зависит ни от геометрических размеров, ни формы УЧЭ, но в свою очередь, позволял оценивать точность любого датчика давлений в целом с использованием методики, предложенной во второй главе.

– проведены эксперименты по измерению положения жесткого центра УЧЭ, давления и эквивалентной высоты. Кроме того, выполнена статистическая обработка полученных данных и установлены основные показатели погрешности измерений, в частности, абсолютная погрешность и среднеквадратическое отклонение. Установлено, что приведенная погрешность измерения положения геометрического центра при частоте измерений 50 Гц составляет не более 0,008% к максимальному прогибу УЧЭ.

– для подтверждения статистической устойчивости результатов измерений выполнена проверка принадлежности их к нормальному закону распределения по критерию  $\chi^2$  К. Пирсона и по результатам анализа полученных данных принимается нулевая гипотеза о нормальном распределении для всех экспериментов.

– на основе полученных результатов разработаны рекомендации для проектирования и разработки конструкций датчиков давлений на основе ЛФП.

– выполнена сравнительная оценка метрологических характеристик предлагаемого датчика давлений, по результатам экспериментальных данных, с метрологическими характеристиками датчиков давлений типа ДДГ, входящих в состав серийно выпускаемых СВС, при этом установлено, что использование датчиков давлений на основе ЛФП: на 20 % уменьшает интервал передачи данных между датчиком и сопрягаемым оборудованием, на 22 % снижает электропотребление, на 41 % увеличивает характеристики точности, на 3% уменьшает время готовности и на 50% снижает массогабаритные параметры датчиков давлений.

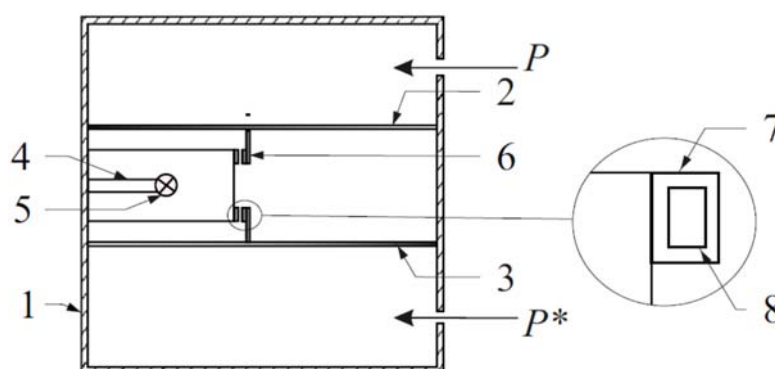
- установлено, что высокое быстродействие и высокая точность линеек фотоэлектронных приемников позволяет получить высокие метрологические характеристики датчиков давлений за счет усреднения результатов измерений при сохранении потребной частоты измерений.

## ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ДАТЧИКОВ СТАТИЧЕСКОГО И ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЕК ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЕМНИКОВ

### 5.1. Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя

Для решения задач, обеспечивающих повышение точности измерений статического и полного давлений, снижение электропотребления, снижение массогабаритных параметров, расширение функциональных возможностей источников первичной и вторичной информации и повышение динамической устойчивости датчиков давлений, разработаны варианты конструкций датчиков давлений на основе оптоэлектронного преобразователя.

Первая конструкция датчика статического и полного давлений, использующего оптоэлектронный преобразователь [63], представлена на рис. 5.1.



**Рис.5.1.** Датчик давления, использующий оптоэлектронный преобразователь:

1 – корпус с двумя отверстиями, 2 и 3 – мембраны, 4 - стойка,  
5 - источник излучения, 6 – ЛФП, 7 – шторка, 8 – прорези

Конструкция датчика содержит корпус 1 с двумя отверстиями, соответственно для измерения статического ( $P$ ) и полного ( $P^*$ ) давлений, причем отверстия расположены выше и ниже зазора, образованного мембранами 2 и 3. Мембраны 2 и 3 анероидного чувствительного элемента герметично по периметру прикреплены к корпусу и разнесены по высоте, образуя зазор, из которого выкачан воздух. Внутри безвоздушного зазора к стойке 4 прикреплен источник излучения 5 и две шторки 7 с прорезями 8. Две ЛФП 6 крепятся соответственно к верхней и



нижней мембранам 2 и 3, причем указанные ЛФП обращены к соответствующим прорезам шторок 7.

Работа датчика осуществляется следующим образом. В исходном состоянии мембраны 2 и 3 УЧЭ занимают определенное положение. Оптическая энергия от источника излучения 5 через прорезы 8 шторок 7 попадает, в виде оптических пятен, на ЛФП 6, которые прикреплены к верхней и нижней мембранам 2 и 3.

В ЛФП 6 отдельные фоточувствительные элементы (пиксели) расположены вдоль одной координаты. Принцип работы данных устройств заключается в формировании внутри каждого пикселя электрического сигнала, пропорционального поглощенной им оптической энергии. Достигается это благодаря фоточувствительному р-п переходу (как и в обычном фотодиоде), через который происходит разряд конденсатора оптического элемента. Чем больше будет оптическая мощность, попадающая на пиксель, тем больше будет ток фотодиода и, следовательно, тем быстрее будет разряжаться конденсатор. В конце цикла измерения происходит считывание остаточного заряда конденсаторов пикселей.

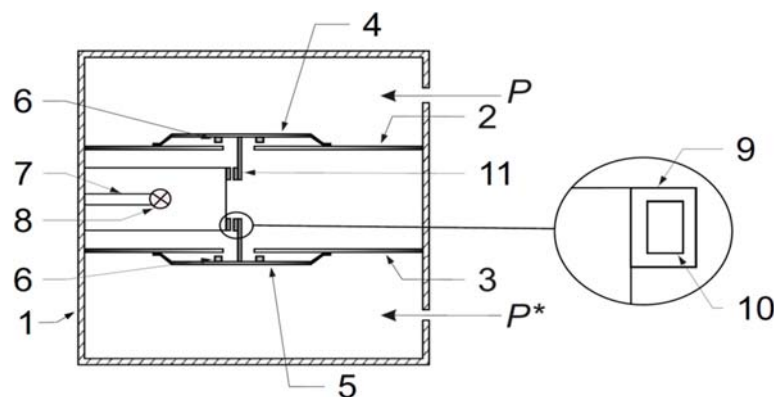
При изменении статического ( $P$ ) и (или) полного ( $P^*$ ) давлений, мембраны 2 и 3 деформируются, при этом ЛФП 6, прикрепленные к верхней и нижней мембранам 2 и 3 смещаются, вызывая смещения на них оптических пятен от источника излучения 5 через прорезы 8 шторок 7. При последовательном опросе пикселей на выходе ЛФП будет формироваться электрический сигнал, у которого изменение амплитуды во времени отображает распределение оптической мощности в пространстве ЛФП. Иными словами, на выходе ЛФП будут формироваться цифровые сигналы, пропорциональные соответственно статическому и полному давлению.

Предлагаемая конструкция датчика давлений лишена недостатков аналогов приведенных в первой главе данной работы, в частности, высокая чувствительность ЛФП требует минимальной деформации упругого элемента, что позволит избавиться от целого ряда погрешностей: остаточной деформации, нелинейности, упругих несовершенств материала, температурных колебаний, от воздействия линейных ускорений, от воздействия вибраций, от изменения свойств

материала с течением времени и т.п. Бесконтактный съём информации и работа информационной системы в условиях вакуума значительно повысят эффективность процессов измерения. Отметим также значительное уменьшение энергопотребления.

## 5.2. Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя с двухступенчатым упругим чувствительным элементом

Вторая конструкция датчика статического и полного давлений, использующего оптоэлектронный преобразователь с двухступенчатым УЧЭ [64], представлена на рис. 5.2.



**Рис. 5.2.** Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя с двухступенчатым УЧЭ: 1 – корпус с двумя отверстиями, 2 и 3 – мембраны второй ступени, 4, 5 – мембраны первой ступени, 6 – кольцевые упоры, 7 – стойка, 8 – источник излучения, 9 – шторка, 10 – прорезь, 11 – ЛФП.

Датчик содержит корпус 1 с двумя отверстиями, соответственно для измерения статического ( $P$ ) и полного ( $P^*$ ) давлений. Основные мембраны 2 и 3 разнесены по высоте и герметично по периметру прикреплены к корпусу, образуя зазор, из которого выкачан воздух. Отверстия для измерения статического и полного давлений размещены выше и ниже зазора. В геометрических центрах мембран 2 и 3 выполнены отверстия, которые с внешних сторон мембран, по отношению к зазору, перекрываются дополнительными верхней 4 и нижней 5 мембранами, герметично по периметру прикрепленными к внешним сторонам основных мембран и имеющих кольцевые упоры 6. Дополнительные мембраны 4 и

5 имеют меньшую, по сравнению с основными 2 и 3 жесткость, а, следовательно, большую чувствительность. Внутри безвоздушного зазора к стойке 7 прикреплены источник излучения 8, а также верхняя и нижняя шторки 9 с прорезями 10. Две ЛФП 11 крепятся к верхней 4 и нижней 5 дополнительным мембранам.

При изменении статического ( $P$ ) и (или) полного ( $P^*$ ) давлений мембраны 2, 3, 4 и 5 УЧЭ деформируются, при этом ЛФП 11, прикрепленные к верхней 4 и нижней 5 дополнительных мембран, смещаются, вызывая перемещения на них оптических пятен от источника излучения 8 через прорези 10 шторок. Дополнительные мембраны 4 и 5, имеющие большую чувствительность, начинают смещаться уже при давлениях, которые не воспринимаются основными мембранами 2 и 3, а последние начнут интенсивно смещаться лишь после того как кольцевые упоры 6 дополнительных мембран 4 и 5 упрутся во внешние поверхности основных мембран 2 и 3.

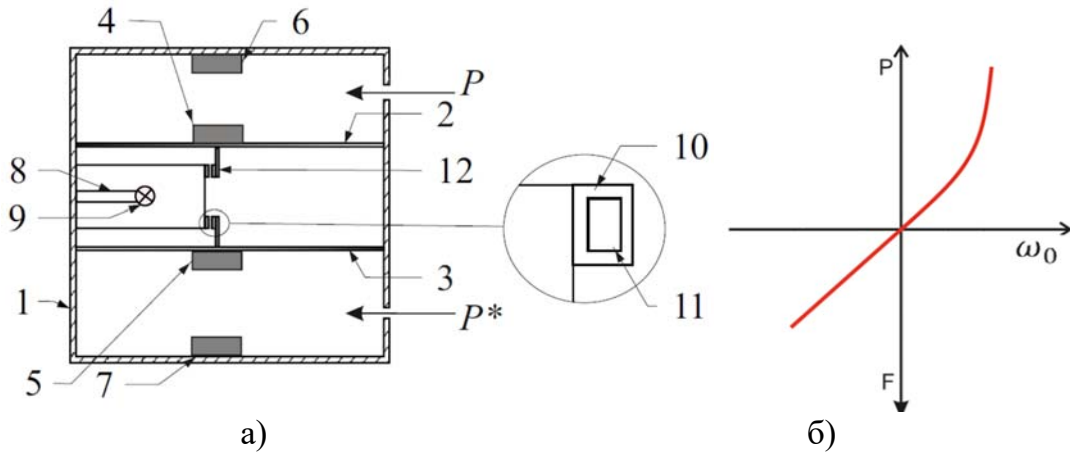
Предлагаемая конструкция датчика позволяет значительно повысить точность измерения нелинейно изменяющегося давления (статического и полного), а также повысить чувствительность датчиков давления во всем диапазоне измеряемых давлений.

### **5.3. Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя с магнитным усилителем деформации упругого чувствительного элемента**

Третья конструкция датчика статического и полного давлений, использующего оптоэлектронный преобразователь с магнитным усилителем деформации УЧЭ [65], представлена на рис. 5.3.

Датчик содержит корпус 1 с двумя отверстиями, соответственно для измерения статического ( $P$ ) и полного ( $P^*$ ) давлений. Мембраны 2 и 3 разнесены по высоте и герметично по периметру прикреплены к корпусу, образуя зазор, из которого выкачан воздух. Отверстия для измерения статического и полного давлений размещены выше и ниже зазора. В геометрических центрах мембран 2 и 3 установлены ферромагниты 4 и 5, напротив которых с зазорами, на внутренней

поверхности корпуса установлены магниты 6 и 7. Внутри безвоздушного зазора к стойке 8 прикреплены источник излучения 9, а также верхняя и нижняя шторки 10 с прорезями 11. Две ЛФП 12 крепятся к верхней 2 и нижней 3 мембранам.



**Рис. 5.3.** Датчик статического и полного давлений на оптоэлектронного преобразователя с магнитным усилителем деформации УЧЭ: а – конструкция датчика, б – характеристика первичного измерительного преобразователя давлений,

1 – корпус с двумя отверстиями, 2 и 3 – мембраны, 4 и 5 – ферромагниты, 6 и 7 – магниты, 8 – стойка, 9 – источник излучения, 10 – шторка, 11 – прорезь, 12 – ЛФП.

Работа датчика осуществляется следующим образом. В исходном состоянии мембраны 2 и 3 занимают определенное положение, определяемое предельными значениями их рабочих деформаций на сжатие и растяжение при изменениях статического и полного давлений. Это состояние достигается при равенстве упругих сил мембран, а также сил притяжения между магнитами 6, 7 и ферромагнитами 4, 5. Сила притяжения между магнитами 6, 7 и ферромагнитами 4, 5, при заданной характеристике магнитов и ферромагнитов, зависит от расстояния между ними.

При изменениях статического ( $P$ ) и (или) полного ( $P^*$ ) давлений, мембраны 2 и 3 деформируются на величину, определяемую значениями соответствующих давления и изменяющейся силы притяжения между соответствующими магнитами 6, 7 и ферромагнитами 4, 5. По мере уменьшения статического ( $P$ ) и (или) полного ( $P^*$ ) давлений мембраны 2 и 3 работают на растяжение, уменьшая зазор и увеличивая силы притяжения между магнитами 6, 7 и ферромагнитами 4, 5,

обеспечивая равную, во всем диапазоне измерений, чувствительность мембран к изменению давлений.

По мере увеличения статического ( $P$ ) и (или) полного ( $P^*$ ) давлений мембраны 2 и 3 уменьшают значение деформации как за счет возрастающих давлений, так и ослабевающей силы притяжения между магнитами 6, 7 и ферромагнитами 4, 5, также обеспечивая равную чувствительность мембран к изменению давлений. После прохождения заданного исходного положения, мембраны 2 и 3 начинают сжиматься, при этом значения сил притяжения между магнитами и ферромагнитами оказывают значительно меньшее влияние, и мембраны прогибаются в основном за счет возрастающих статического ( $P$ ) и (или) полного ( $P^*$ ) давлений.

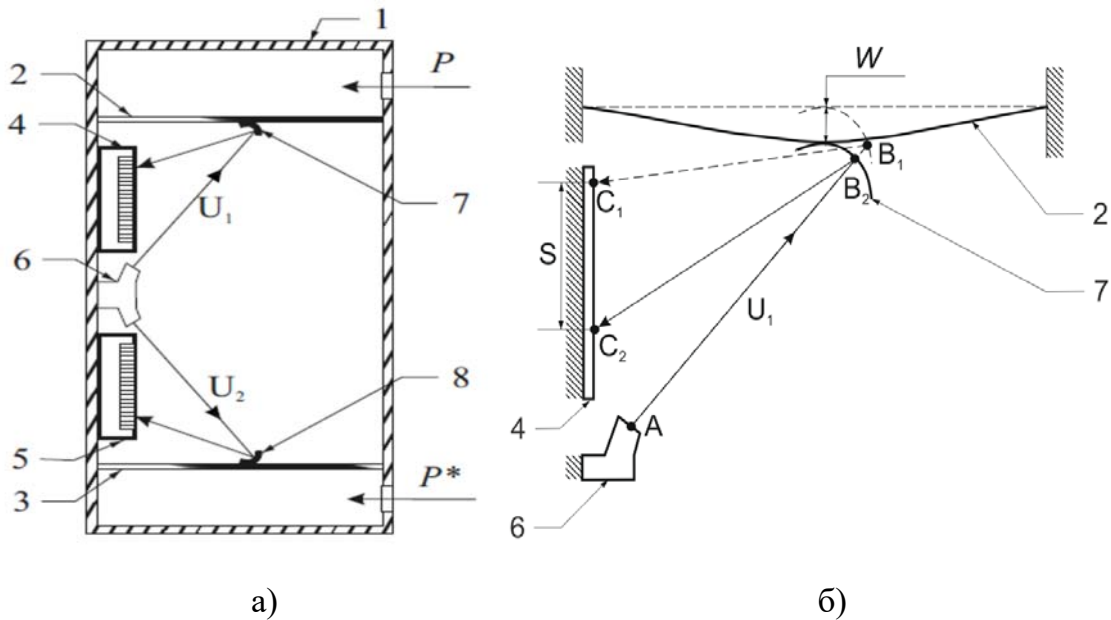
Введение в конструкцию датчика статического и полного давлений постоянных магнитов, взаимодействующих с ферромагнитными элементами, позволит линеаризовать зависимость деформаций мембран от воспринимаемых давлений. В результате произойдет повышение чувствительности и точности измерения давления и по высоте, и по скорости полета воздушного судна, а также расширятся функциональные возможности упругого чувствительного элемента.

#### **5.4. Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя с криволинейным зеркальным усилителем деформации упругого чувствительного элемента**

Четвертая конструкция датчика статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя выполнена с использованием криволинейного зеркального усилителя деформации УЧЭ [67].

Датчик содержит корпус 1 (рис. 5.4а) с двумя отверстиями, соответственно для измерения статического ( $P$ ) и полного ( $P^*$ ) давлений, причем отверстия расположены выше и ниже зазора, образованного мембранами 2 и 3. Мембраны 2 и 3 анероидного чувствительного элемента разнесены по высоте и герметично по периметру прикреплены к корпусу, образуя зазор, из которого выкачан воздух. Внутри безвоздушного зазора, к боковой стенке корпуса 1, жестко прикреплено

устройство для формирования оптического луча 6, выше и ниже устройства 6, к той же боковой стенке корпуса 1 установлены две фотоприемные линейки 4 и 5 а также в геометрических центрах верхней 2 и нижней 3 мембран установлены отражатели оптических излучений 7 и 8.



**Рис. 5.4.** Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя с криволинейным зеркальным усилителем деформации УЧЭ: а – конструкция датчика, б – принцип работы, 1 – корпус с двумя отверстиями, 2 и 3 – мембраны, 4, 5 – ЛФП, 5 - источник излучения, 6 – устройство для формирования оптических лучей, 7, 8 – отражатели оптических излучений.

Работа устройства при измерении статического давления ( $P$ ) осуществляется следующим образом. В исходном состоянии мембрана 2 (рис. 5.4б) анероидного чувствительного элемента занимает определенное положение. Оптический луч  $U_1$  сформированный устройством 7 и отраженный от отражателя 8 на угол  $AB_1C_1$  попадает на ЛФП 4. При этом формируется оптическое пятно на фоточувствительной поверхности ЛФП размером в несколько элементов (пикселей).

Изменение статического давления ( $P$ ), способствует перемещению геометрического центра мембраны 2 с отражателем оптического излучения 8 на величину  $w$ , тем самым изменяя направление луча  $U_1$  на угол  $AB_2C_2$ . Изменение направления луча  $U_1$  с угла  $AB_1C_1$  на угол  $AB_2C_2$  способствует смещению

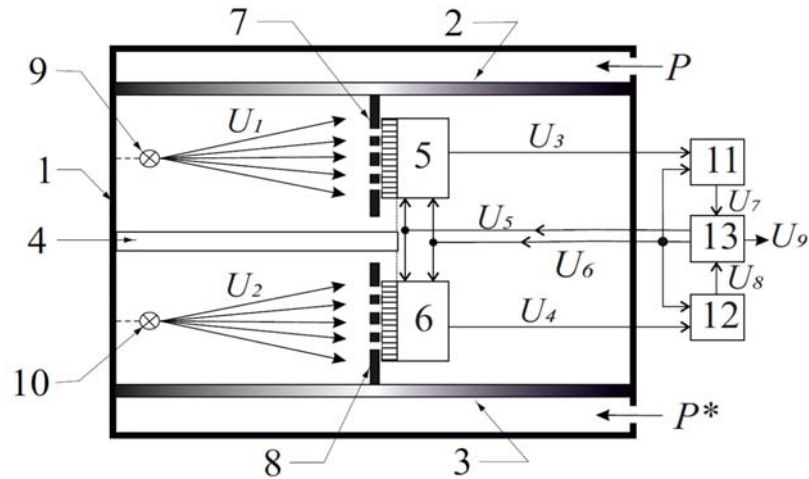
оптического пятна по фоточувствительной поверхности ЛФП 5 на величину  $S$ . Величина смещения оптического пятна  $S$ , при прочих равных условиях, определяется разностью между углами  $AB_1C_1$  и  $AB_2C_2$  которая в свою очередь зависит от кривизны отражателя 7. Чем больше разность между углами  $AB_1C_1$  и  $AB_2C_2$  тем больше смещение оптического пятна  $S$  по отношению к прогибу геометрического центра мембраны  $w$ .

В то же время, при последовательном опросе пикселей на выходе ЛФП будет формироваться электрический сигнал, у которого изменение амплитуды во времени отображает распределение оптической мощности в пространстве ЛФП от воздействия на него оптического пятна. Иными словами, на выходе ЛФП будут формироваться электрические сигналы, пропорциональные статическому давлению.

Предлагаемое устройство работоспособно при существенно меньших значениях деформации упругого элемента вследствие применения криволинейного отражателя и высокочувствительного оптического устройства, что позволит избавиться от целого ряда погрешностей: остаточной деформации, нелинейности, упругих несовершенств материала, температурных колебаний, от воздействия линейных ускорений, от воздействия вибраций, от изменения свойств материала с течением времени и т.п. Отсутствие в геометрических центрах мембран дополнительных элементов (шторок, излучателей и оптических линеек), улучшает динамические свойства датчика.

### **5.5. Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя с несколькими оптическими пятнами**

Пятая конструкция датчика статического и полного давлений разработана также на базе оптоэлектронного преобразователя [66]. Однако, в ней используются  $n$  оптических пятен, которые перемещаются по ЛФП в функции измеряемого давления (рис. 5.5).



**Рис. 5.5.** Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя с  $n$  количеством оптических пятен:  
 1 – корпус с двумя отверстиями, 2 и 3 – мембраны, 4 – стойка,  
 5 и 6 – ЛФП, 7 и 8 – шторки с прорезями (щелями), 9 и 10 – источники излучения, 11 и 12 аналогово-цифровой преобразователь, 13 – микроконтроллер

Датчик содержит корпус 1 с двумя отверстиями, соответственно для измерения статического ( $P$ ) и полного ( $P^*$ ) давлений, причем отверстия расположены выше и ниже зазора, образованного мембранами 2 и 3. Мембраны 2 и 3 анероидного чувствительного элемента разнесены по высоте, образуя зазор, из которого выкачан воздух, и герметично по периметру прикреплены к корпусу. Внутри безвоздушного зазора, симметрично относительно мембран 2 и 3 расположена стойка 4, жестко закрепленная на боковой стенке корпуса 1. Сверху и снизу относительно стойки 4 к боковой стенке корпуса 1 жестко закреплены источники оптического излучения 9 и 10. Напротив источников излучения 9 и 10 расположены ЛФП 5 и 6, жестко закрепленные на стойке 4. Жесткие центры верхней 2 и нижней 3 мембран оснащены шторками (7 и 8 соответственно), обе шторки выполнены с  $n$  - щелями. При этом шторка 7 расположена перед фоточувствительной областью ЛФП 5, шторка 8 расположена перед фоточувствительной областью ЛФП 6, а фоточувствительные области ЛФП расположены вдоль направления перемещения шторок при изменении измеряемых давлений. Выход ЛФП 5 соединен с входом АЦП 11, а выход ЛФП 6 – со входом АЦП 12. Выходы АЦП 11 и АЦП 12 соединены с первым и вторым входами



микроконтроллера 13, первый и второй управляющие выходы которого соединены с двумя входами управления обоих ЛФП, а второй управляющий вход также соединен с входами управления обоих АЦП.

Работа устройства при измерении статического давления осуществляется следующим образом. В исходном состоянии мембрана 2 анероидного чувствительного элемента занимает определенное положение. Оптическое излучение  $U_1$  от источника 9 падает на шторку 7. Прошедшее через  $n$  щелей в шторке 7 излучение формирует на фоточувствительной поверхности ЛФП 5  $n$  световых пятен размером в несколько элементов (пикселей) ЛФП. ЛФП 5 работает таким образом, что преобразует пространственное распределение падающей на ее поверхность оптической мощности в периодический изменяющийся во времени электрический сигнал  $U_3$ . Это обеспечивается подачей на ЛФП 5 управляющих сигналов  $U_5$ ,  $U_6$  от микроконтроллера. Управляющий сигнал  $U_5$  задает период последовательного опроса всех элементов ЛФП, а сигнал  $U_6$  задает период опроса каждого отдельного элемента (пикселя) ЛФП. Амплитуда электрического сигнала  $U_3$  на выходе ЛФП 5 в каждый момент времени пропорциональна оптической мощности, падающей на опрашиваемый в данный момент пиксель. В результате на выходе ЛФП 5 формируется периодический электрический сигнал  $U_3$ , в котором пространственному распределению оптической мощности в пределах фоточувствительной поверхности ЛФП 5 ставится в соответствие распределение во времени амплитуды электрического сигнала в пределах периода сигнала  $U_3$ . Амплитуды сигналов с  $n$  пикселей, на которые попадает излучение, прошедшее через  $n$  щелей в шторке 7, будут иметь локальные максимумы.

Выходной сигнал  $U_3$  ЛФП 5 поступает на АЦП 11, осуществляющий преобразование амплитуды сигнала с каждого пикселя ЛФП в соответствующий амплитуде цифровой код. Для синхронизации моментов выборки АЦП с работой ЛФП на управляющий вход АЦП подается сигнал  $U_6$ . Массив значений амплитуд сигналов с пикселей ЛФП с выхода АЦП 11 в виде сигнала  $U_7$  поступает на вход микроконтроллера 13. Программное обеспечение микроконтроллера обрабатывает

массив данных, полученных за один период сигнала  $U_5$ . Задача обработки – вычислить значения координат  $n$  световых пятен на поверхности ЛФП.

Вычисляемые в режиме реального времени значения статического и полного давления позволяют вычислить все основные аэрометрические параметры. Для этого необходимо дополнительно ввести в микроконтроллер информацию о температуре воздуха и давление на уровне земли. Вычисленные в микроконтроллере значения аэрометрических параметров в виде сигнала  $U_9$  могут быть выведены на внешнее индикаторное устройство.

Максимальное количество световых пятен, используемых для повышения точности измерения смещения мембран, ограничено следующими требованиями:

- соседние световые пятна не должны накладываться друг на друга;
- перемещение шторки не должно приводить к выходу световых пятен за пределы фоточувствительной области ЛФП.

Фоточувствительная область современных ЛФП содержит 1000 и более пикселей. Если принять, что диапазон перемещения мембраны составляет половину длины фоточувствительной области, а изображение каждого светового пятна занимает около 20 пикселей.

Конструктивное и функциональное исполнение предлагаемого датчика, обеспечивает:

1) применение шторок с  $n$  щелями позволяющее сформировать на ЛФП  $n$  световых пятен, перемещающихся пропорционально изменению измеряемого давления. Благодаря этому за один период опроса ЛФП удастся получить  $n$  независимых значений измеряемого давления и, усреднив результат, повысить точность измерения примерно в  $\sqrt{n}$  раз;

2) улучшает динамические свойства датчика за счет отсутствия на шторках 7 и 8 дополнительных элементов (излучателей и ЛФП);

Внешние механические воздействия на датчик могут привести к смещениям оптических линеек 5 и 6 относительно шторок 7 и 8. В связи с тем, что оптические линейки крепятся на общей стойке 4, подобные смещения будут

приводить к синфазным изменениям в измеренных значениях статического и полного давления. Синхронный режим работы оптических линеек (благодаря использованию общих управляющих сигналов  $U_5$  и  $U_6$  от микроконтроллера) позволяет обнаружить подобные синфазные составляющие в выходных сигналах и программно минимизировать их влияние на точность измерения давлений.

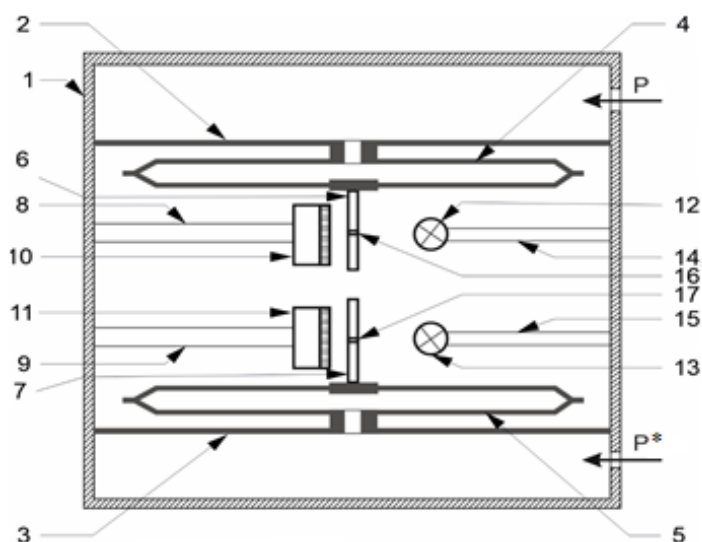
Функционирование устройства осуществляется с использованием известных средств измерения и передачи электрических сигналов: аналого-цифровых преобразователей (АЦП), микроконтроллера и компьютера, выполняющего функцию устройства регистрации давлений.

#### **5.6. Датчик статического и полного давлений на основе оптоэлектронного преобразователя и упругих чувствительных элементов на базе манометрических коробок, сопряженных с мембранами**

Шестая конструкция датчика статического и полного давлений на основе оптоэлектронных преобразователей информации и УЧЭ разработана на базе манометрических коробок, сопряженных с мембранами.

Датчик давления, содержит корпус 1 (рис. 5.6) с двумя отверстиями, соответственно для измерения статического ( $P$ ) и полного ( $P^*$ ) давлений. Мембраны 2 и 3 упругого чувствительного элемента (анероидной коробки) разнесены по высоте и герметично по периметру прикреплены к корпусу, образуя зазор, из которого выкачан воздух.

В геометрических (жестких) центрах мембран 2 и 3 выполнены отверстия, которые с внутренних сторон мембран, по отношению к зазору, совпадают с отверстиями дополнительных верхней 4 и нижней 5 манометрических коробок, которые герметично по периметру жестких центров, имеющих отверстия, прикреплены к внутренним сторонам жестких центров основных мембран. Дополнительные манометрические коробки имеют меньшую, по сравнению с мембранами, жесткость, а, следовательно, большую чувствительность.



**Рис. 5.6.** Датчик статического и полного давлений на оптоэлектронного преобразователя с  $n$  количеством оптических пятен:

1 – корпус с двумя отверстиями, 2 и 3 – мембраны, 4 и 5 – манометрические коробки, 6 и 7 – шторки, 8 и 9 – стойки, 10 и 11 – ЛФП, 12 и 13 – источники излучения, 14 и 15 – стойки, 16 и 17 – прорези.

Внутри безвоздушного зазора к стойкам 8 и 9 прикреплены две ЛФП 10 и 11. Два источника излучений 12 и 13 установлены на стойках, соответственно 14 и 15. К внешним сторонам жестких центров, без отверстий, дополнительных мембранных коробок 4 и 5, прикреплены шторки 6 и 7 с прорезями соответственно 16 и 17. Световые потоки от источников излучения, проходя через соответствующие прорези шторок, попадают на активные поверхности оптических линеек.

Работа датчика осуществляется следующим образом. В исходном состоянии основные мембраны 2 и 3 и дополнительные мембранные коробки 4 и 5 УЧЭ занимают определенное положение. Оптическая энергия от источников излучения 12 и 13 через прорези 16 и 17 шторок 6 и 7 попадает в виде оптических пятен на активные поверхности оптических линеек 10 и 11.

При изменении статического ( $P$ ) и (или) полного ( $P^*$ ) давлений мембраны 2, 3, а также манометрические коробки 4 и 5 деформируются, при этом шторки 6 и 7, прикрепленные к мембранным коробкам, смещаются, вызывая перемещения оптических пятен, сформированных источниками излучения и прорезями шторок, по активным поверхностям ЛФП.

Суммарное перемещение мембранных коробок, имеющих максимально высокую чувствительность, и основных мембран, имеющих относительно низкую чувствительность, позволяет с заданной точностью осуществить измерение давления при нелинейном характере его изменения. При последовательном опросе пикселей на выходе ЛФП будет формироваться электрический сигнал, у которого изменение амплитуды во времени отображает распределение оптической мощности в пространстве ЛФП. Иными словами, на выходе ЛФП будут формироваться цифровые сигналы пропорциональные соответственно статическому и полному давлению.

Предлагаемый датчик за счет введения манометрических коробок позволяет значительно повысить точность измерения нелинейно изменяющегося давления (статического и полного) во всем диапазоне его измерения. Предлагаемый датчик имеет высокую устойчивость к вибрациям. Кроме того, крепление манометрических коробок к упругим мембранам осуществляется по жестким центрам, при этом их упругие характеристики практически не меняются, а технологический процесс крепления значительно упрощается.

### **5.7. Выводы по главе**

На основе проведенных исследований, в пятой главе диссертационной работы разработаны конструктивные схемы датчиков давлений на базе оптоэлектронного преобразователя, полученные путем интеграции высокочувствительного вторичного преобразователя и упругих мембран, и устройств управления деформациями, основанных на законах магнитного притяжения и обеспечивающих повышение точности измерения давлений.

В ходе работы решены задачи, обеспечивающие повышение точности измерений статического и полного давлений, снижение электропотребления, снижение массогабаритных параметров, расширение функциональных возможностей источников первичной и вторичной информации и повышение динамической устойчивости датчиков давлений, за счет того, что в датчики давлений:

Разработанные датчики статического и полного давлений, использующие оптоэлектронные преобразователи на основе ЛФП в качестве вторичных преобразователей, позволили напрямую связать цифровой выход последних с вычислительным устройством СВС.

Предложенные в работе способы управления восприятием статического и полного давлений, которые позволяют повысить точность измерений за счет использования высокочувствительного вторичного преобразователя, а также изменения жесткости упругого элемента или вариации сил магнитного притяжения, могут быть использованы в широком спектре датчиков давления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате решения поставленных задач диссертационного исследования достигнута цель работы. В ходе исследований:

1. Разработан высокоточный датчик статического и полного давлений, использующий оптоэлектронный преобразователь на основе ЛФП в качестве вторичных преобразователей, что позволило минимизировать амплитуду деформаций УЧЭ, а бесконтактный способ съема информации и работа информационной системы в условиях вакуума позволили повысить эффективность процедур измерения давлений.

2. Разработана методика расчета УЧЭ, принципиальным отличием которой является учет технических характеристик вторичного преобразователя, в частности, порога чувствительности вторичного преобразователя и прогиба центра мембраны в функции координаты пикселя ЛФП. Кроме того, разработан алгоритм и программа на языке программирования C/C++, реализующие алгоритм расчета УЧЭ.

3. Для измерения значений деформаций УЧЭ (мембран) датчика давлений была разработана программа управления микроконтроллерами семейства STM32F4. Использование данной программы позволило существенно повысить точность вычислений деформации мембран датчика давлений, использующих оптоэлектронные преобразователи, за счет того, что при опросе одного пикселя ЛФП аналого-цифровой преобразователь совершает двойное преобразование.

4. Сравнительные результаты определения прогибов мембраны, полученные аналитическим методом, с использованием программного комплекса ANSYS и экспериментальные данные показали, что погрешность определения прогиба жесткого центра мембраны, полученных аналитическим и экспериментальным методами не превышает 15%, что следует признать удовлетворительным. Сравнительная погрешность результатов силового расчета с использованием программного комплекса ANSYS и известными экспериментальными данными не превысила 9 %.

5. Разработана методика вычисления положения жесткого центра упругой мембраны, использующая процесс ветвления исходной информации путем применения шторок с  $n$  щелями, что позволяет сформировать на ЛФП  $n$  оптических пятен, перемещающихся в функции измеряемого давления. Благодаря этому, за один период опроса линейки удастся получить  $n$  независимых значений измеряемого давления и, усреднив результат, повысить точность измерения, а также свести к минимуму влияние внешних возмущающих факторов, в частности, вибраций.

6. Разработан аппаратно-программный комплекс, включающий алгоритмы управления и обработки данными и экспериментальную конструкцию датчика давлений, использующего оптоэлектронный преобразователь на базе ЛФП типа LX554B. Предложены алгоритмы и разработаны программы управления микроконтроллером, которые обеспечивают, при измерении линейных перемещений жесткого центра мембран, обработку сигналов с выхода ЛФП при воздействии на него одного и двух оптических пятен.

7. Определены метрологические характеристики датчиков давлений, причем в качестве критериального параметра для оценки характеристик точности разработанных датчиков давлений использована точность измерения положения геометрического центра УЧЭ. Установлено, что повышение точности измерений достигается как за счет усреднения результатов измерений, так и за счет использования двух оптических пятен. Приведенная погрешность измерения положения геометрического центра при частоте измерений 50 Гц составляет не более 0,008% к максимальному прогибу УЧЭ.

8. Разработана гамма новых датчиков статического и полного давлений с цифровым выходным сигналом и с уменьшенной погрешностью в широком диапазоне измеряемых давлений, на базе комплексного использования конструктивных и схемотехнических решений определения параметров УЧЭ с учетом технических характеристик вторичного преобразователя, ветвления исходной информации, а также новых алгоритмов ее преобразования.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абдулаев, И.М. К определению характеристики трансформаторных преобразователей соленоидного типа / И.М. Абдулаев, В.С. Адыгезалов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика научно-технический и производственный журнал. –2002 . –№ 2 . –С. 48-50.
2. Андреева, Л.Е. Расчет гофрированных мембран/ Л.Е. Андреева // Расчеты на прочность в машиностроении. – 1955. – С. 55-67.
3. Андреева, Л.Е. Расчет характеристик гофрированных мембран / Л.Е. Андреева // Приборостроение. –1956. –№ 3. –С. 11-17.
4. Андреева, Л.Е. Упругие элементы приборов / Л.Е. Андреева. – М: Машиностроение, 1980. –230 с.
5. Антонец, Е.В. Авиационные приборы и пилотажно-навигационные комплексы: учеб. пособие. В 2 ч. / сост. Е.В. Антонец, В.И. Смирнов, Г.А. Федосеева. – Ч. 1. – Ульяновск: УВАУ ГА. -2007. - 119 с.
6. Антонец, Е.В. Приборное оборудование воздушных судов и его летная эксплуатация: учебное пособие / Е. В. Антонец, В. И. Кочергин, Г. А. Федосеева. –Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2014. –62 с.
7. Антонец, И.В. Датчик статического и полного давления на основе линейки фотоэлектронных приемников / И. В. Антонец, Р. А. Борисов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, – № 3. – С. 222-227.
8. Антонец, И.В. Методы расчета и моделирования упругих элементов : учебное пособие / И. В. Антонец, А. П. Терешенок. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – 121 с.
9. Антонец, И.В. Определенные характеристики упругого чувствительного элемента для аэрометрического датчика полного давления (тезисы) // И.В. Антонец, Р.А. Борисов / Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества : сб. тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 95-летию гражданской авиации России 16-17 мая 2018 г. – М. : ИД Академии Жуковского. –2018. – С. 215.
10. Антонец, И.В. Разработка весоизмерительных устройств,

определяющих остаточную деформацию упругого чувствительного элемента/ И.В. Антонец В.А. Борсоев, Р.А. Борисов, С.М. Степанов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2018. – №21. – С. 11-21.

11. Алексеенков, А.Е. Генераторные датчики с улучшенными характеристиками в системах управления: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Алексеенков Андрей Евгеньевич. – Курск, 1999. –19 с.

12. Алмазов, В.В. Оценка характеристик аэрометрических систем / В.В. Алмазов, Н.Н. Макаров, М.Ю. Сорокин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. –Т. 19. – № 1(2). –С.385-390.

13. Алейников, А.Ф. Датчики (перспективные направления развития): учеб. пособие / А. Ф. Алейников, В. А. Гридчин, М. П. Цапенко. – Новосибирск: НГТУ. 2001. –176 с.

14. Аш, Ж. Датчики измерительных систем: пер. с франц.: в 2 т. / Ж Аш. –М.: Мир, 1992. – 424 с.

15. Белозубов, Е.М. Перспективные тонкоплёночные тензорезисторные датчики давления для ракетной и авиационной техники / Е.М. Белозубов // Измерительная техника. – 2004.– №5.– С. 37-41.

16. Билиженко, И.В. Формирования диаграмм направленности оптико-электронных извещателей на основе многоэлементных приемников ИК-излучения / И.В. Билиженко, В.В. Волхонский, П.А. Воробьев и др. // Известия вузов. Приборостроение. – 2017. – т. 60. – № 1. – С. 96-99.

17. Блюм, П. LabVIEW: стиль программирования / П. Блюм. Пер. с англ. Подред. Михеева П. – М.: ДМК Пресс, 2007 – 400 с.

18. Борисов, Р.А. Актуализация методики статического расчета упругих чувствительных элементов аэрометрических устройств / Р.А. Борисов // "Проблемы и современные направления развития образования в области аэронавигации" Всероссийская педагогическая научная конференция – Сызрань: ВУНЦ ВВС "ВВА". – 2017. – С. 12-14.

19. Борисов, Р.А. Алгоритм управления микроконтроллером Stm32f4, обеспечивающий измерение деформации чувствительных элементов

аэрометрических датчиков давлений, использующих оптические преобразователи / Р.А. Борисов, И.В. Антонец // Актуальные проблемы и перспективы развития авиации: сб. матер. III междунар. науч.-практ. конф. 22-23 мая 2019 г. - Минск : БГАА, 2019.- С. 123-125.

20. Борисов, Р.А. Анализ факторов, влияющих на величину упругого гистерезиса упругих чувствительных элементов аэрометрических устройств / Р.А. Борисов // "Проблемы и современные направления развития образования в области аэронавигации" Всероссийская педагогическая научная конференция – Сызрань: ВУНЦ ВВС "ВВА". – 2017. – С. 15-16.

21. Борисов, Р.А. Гистерезис упругих чувствительных элементов аэрометрических устройств / Борисов Р.А. // Актуальные проблемы и перспективные направления развития комплексов авиационного оборудования: сб. науч. ст. по материалам V международной науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения» 22-23 ноября 2017 г. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. – С. 14-16.

22. Борисов, Р.А. Методология разработки датчика статического и полного давлений на базе упругих чувствительных элементов и оптических линеек / Р. А. Борисов, И. В. Антонец, А. В. Кротов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2021. – № 1 (134). – С. 33-50.

23. Борисов, Р.А. Метод определения величины прогиба упругого чувствительного элемента, измеряющего статическое давление / Р.А. Борисов, И.В. Антонец // История, современность, перспективы развития: сборник материалов II международной заочной научно-практической конференции БГАА. г. (Минск, 9-10 ноября 2017 г.). – 2017. – С. 120-122.

24. Борисов, Р.А. Разработка и исследование новых методов и алгоритмов преобразования информации датчика статического и полного давлений на базе линеек фотоэлектронных элементов. /Р.А. Борисов, И.В. Антонец, А.В. Кротов, Э.Ю. Алексеев //22-я Международная конференция "Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2020", М. – 2020. – С. 508-513.

25. Борисов Р.А. Система измерения статического и полного давлений,

использующая ветвление исходной информации на входе вторичного преобразователя / Р.А. Борисов, И.В. Антонец, А.А Черторийский, А.В. Кротов // Изв. Вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 9. – С. 813-822.

26. Бриндли, К. Измерительные преобразователи: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.

27. Веснин В.Л. Метод гауссовской аппроксимации пика спектра отражения волоконнооптического брэгговского датчика / В.Л. Веснин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2003. – Т. 5. – № 1. – С.156-164.

28. Васильев, А.С. Основы программирования в средеLabVIEW / А.С. Васильев, О.Ю. Лашманов. – СПб: Университет ИТМО, 2015 – 82 с.

29. Водопьянов, В.И. Исследование демпфирующих свойств материалов / В. И. Водопьянов, А. А. Белов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2001. –18 с.

30. Вопросы прочности упругих элементов машин / под ред. А. А. Коновалова. – Ижевск : Удмуртия, 1978. –149 с.

31. Воронин, А. А., Герасимов В. А., Кострин Д. К. Модернизация приборов и методики спектральной идентификации пород древесины / А. А. Воронин, В.А. Герасимов, Д.К. Кострин // Биотехносфера. –2013. –Т. 57. – № 3. – С. 16-20.

32. Годунов, В.А. Современные датчики физических величин для авионики / В.А. Годунов, П.Б. Рожков, Д.В. Степанов // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 6. – С. 13-18.

33. Горбунов, С.Ф. Малогабаритный цифровой ёмкостный датчик давления / С. Ф. Горбунов, В. Н. Новиков, Б. В. Цыпин // Информационно-измерительная техника : межвуз. сб. науч. тр. Пенза : Изд-во Пенз. гос. Унта. – 2008. – Вып. 32. – С. 153-159.

34. ГОСТ 19.101-77 Единая система программной документации. Виды программ и программных документов. – М.: Стандартинформ, 2010.

35. ГОСТ 34.602-89 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание

автоматизированной системы. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 11 с.

36. Громков, Н.В. Анализ и синтез измерительных преобразователей с частотным выходным сигналом для информационно-измерительных и управляющих систем: дис. ... д-ра тех. наук: 05.11.16 / Громков Николай Валентинович. – Пенза, 2010. – 409 с.

37. Громков, Н.В. Интегрирующие развёртывающие преобразователи параметров датчиков систем измерения, контроля и управления: монография – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, -2009. – 244 с

38. Демин, А. «Аэроприбор-Восход»: 60 лет в строю/А. Демин // ВПК. – 2004. – № 48(65).

39. Джозеф, Ю. Ядро Cortex-M3 компании ARM. Полное руководство / Джозеф Ю ; пер. с англ. А. В. Евстифеева. – М. : Додэка-XXI, 2012. – 552 с.

40. Зверева, Е.Н. Анализ точности определения временного положения сигнала для систем с многоэлементными фотоприемниками / Е.Н. Зверева, Е.Г. Лебедько // Изв. вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 7. – С. 555 - 560.

41. Зверева, Е.Н. Потери информации при преобразовании поля в оптическом тракте оптико-электронного прибора с многоэлементными приемниками / Е.Н. Зверева, Е.Г. Лебедько, Ф.Х. Тунг // Изв. вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56. – № 11. – С. 7 - 10.

42. Игнатьева, Е.В. Влияние конструкции мембраны на параметры выходной характеристики кремниевого тензопреобразователя давления / Е.В. Игнатьева, Ю.А. Михайлов, В.В. Панков // Датчики и системы.– 2009.– № 6, – С. 51-54.

43. Ильясов, С.П. Система резервных приборов высокоманевренного пилотируемого аэродинамического летательного аппарата / С.П. Ильясов, А.В. Корнилов, В.В. Лосев // Труды МАИ. – 2017. – № 92. – С 21.

44. Кострин, Д.К. Интерференция в поверхностном слое и метрологические параметры спектрометров с ПЗС-фотоприемниками / Д.К. Кострин, А.А. Ухов // Датчики и системы. – 2013. – № 5. – С. 13-15.

45. Коновалов, Р.С. Цифровые методы и алгоритмы повышения точности

вторичных преобразователей параметрических датчиков давления: дис. ... канд. тех. наук : 05.13.05 / Коновалов Роман Станиславович. – Саратов, 2015. – 125 с.

46. Кострин Д.К. Исследование линейности светосигнальной характеристики ПЗС фотоприемника / Д.К. Кострин // Петербургский журнал электроники. – 2008. – № 2-3. – С. 86-91.

47. Кострин, Д.К. Метод контроля пространственного распределения световых и цветовых характеристик излучения светодиодов/ Д.К. Кострин, А.А. Ухов // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 2. – С. 65-67.

48. Красносельский, М.А. Системы с гистерезисом / М.А. Красносельский, А.В. Покровский. – М.: Наука, 1983. – 271 с.

49. Лебедев, А.Б. Амплитудно-зависимый дефект модуля упругости в основных моделях дислокационного гистерезиса/ А.Б. Лебедев // Физика. твердого. тела. – 1999. – Т. 41. – Вып. 7. – С. 1214-1222.

50. Лебедев, Д.В. О выборе физических принципов измерения давления / Д.В. Лебедев // Датчики и системы. – 2007. – № 6, – С. 25-27.

51. Лебедев, Е.Г. Высокоточное определение углового положения точечного источника излучения с ПЗС-линейками/ Е. Г. Лебедев, Е. Н. Зверева, Ву Тунг Нгуен. // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – № 3. – С. 398-404.

52. Левшина, Е.С. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи) / Е.С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

53. Липин, А.В. Разработка технических средств защиты трубопроводов систем автоматики и контроля от волновых процессов и их влияние на окружающую среду : дис. ... канд. тех. наук: 05.14.16 / Липин Александр Викторович. – М., 2000. – 131 с.

54. Литвин Ф.Л. Справочник конструктора точного приборостроения / Ф.Л. Литвин. – М: Машиностроение, 1964. – 460 с.

55. Мартяшин А.И. Преобразователи информации для систем контроля и измерения / А. И. Мартяшин, Э. К. Шахов, В. М. Шляндин. – М: Энергия, 1976. –

392 с.

56. Мишанин, А. Полупроводниковые чувствительные элементы датчиков давлений на основе наноструктурированного поликристаллического кремния / А. Мишанин, А. Родионов, С. Козин, И. Баринов // Компоненты и технологии. – 2009. – № 9. – С. 29-32.

57. Мокров, Е.А. Совершенствование тензорезисторных тонкопленочных датчиков давления / Е. А. Мокров, Д. В. Лебедев, В. П. Базаев, Е. В. Ефремов, И. А. Семина. П. А. Колчин // Мир измерений. – 2008. – № 4. – С. 41-46.

58. Мокров Е.А. Состояние, проблемы и пути развития датчикоостроения на 2006 -2015 г.г. // Электронные компоненты.– 2003. – № 3. – С. 64-71.

59. Мокров Е.А. Интегральные датчики. Состояние разработок и производство. Направления развития, объёмы рынка // Датчики и системы. – 2000. – №1. – С. 28-30.

60. Панов Д.Ю. О больших прогибах круглых мембран со слабым гофром/Д.Ю. Панов // Прикладная механика и математика. – 1941. – Т. 5. – № 2. – 1941. – С. 303-318.

61. Патент РФ 123143. Частотный датчик давления / Белов В.П, Винокуров Л.Н., Гаврилов В.М., Кожевников В.И., Кузнецов И.А., Макаров Н.Н., Сорокин М.Ю. МПК G01L 11/00, опубл. 20.12.2012 г., бюл. № 35.

62. Патент РФ № 2432556. Датчик давления с виброустойчивой нано- и микроэлектромеханической системой / Белозубов Е.М., Белозубова Н.Е., Васильев В.А. МПК G 01 L9/04, В 82 В 1/00, опубл. 27.10.2011 г., бюл. № 30.

63. Патент РФ 2653596. Датчик аэрометрических давлений / Антонец И.В., Горшков Г.М., Борисов Р.А. МПК G01L 7/00 (2006.01), опубл. 11.05.2018, бюл. №14.

64. Патент РФ 2684683. Датчик аэрометрических давлений / Антонец И.В., Борисов Р.А., Горшков Г.М., Черторийский А. А. МПК G01L 7/08 (2006.01), G01L 11/02 (2006.01), опубл. 11.04.2019, бюл. №11.

65. Патент РФ 2702808. Датчик аэрометрических давлений/ Антонец И.В., Борисов Р.А., Горшков Г.М. МПК G01L 7/08 (2006.01), G01L 11/02 (2006.01),

опубл. 11.09.2019, бил. № 29.

66. Патент РФ 2712777. Датчик аэрометрических давлений/ Антонец И.В., Борисов Р.А., Черторийский А. А. МПК G01L 7/02 (2006.01), G01L 11/02 (2006.01), опубл. 31.01.2020, бюл. № 4.

67. Патент РФ. 2736736. Датчик аэрометрических давлений/ Антонец И.В., Борисов Р.А., Горшков Г.М., Шайхутдинов Б.Р. G01L 11/02 (2006.01), опубл. 19.11.2020, бюл. № 32.

68. Пономарев С.Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С.Д. Пономарев, Л.Е. Андреева. – М., Машиностроение, 1980. – 236 с.

69. Пышкин, Е.В. Структуры данных и алгоритмы:реализация на C/C++ / Е.В. Пышкин – СПб.: ФТК СПбГПУ, 2009. – 200 с.

70. Пятин, Ю.М. Проектирование элементов измерительных приборов / Ю.М. Пятин. – М.: Высшая школа, 1977. – 303 с.

71. Свидетельство № 2019612079 Российская Федерация. Свидетельств об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа управления микроконтроллерами семейства STM32F4, обеспечивающая измерение линейных перемещений чувствительных элементов датчиков, использующих оптические преобразователи / Борисов Р.А., Антонец И.В.; заявитель и патентообладатель Борисов Р.А. - № 2018660953; заявл. 03.10.2019; опубл. 11.02.2019.

72. Свидетельство № 2019663045 Российская Федерация. Свидетельств об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета упругих чувствительных элементов датчиков аэрометрических давлений / Борисов Р.А., Антонец И.В.; заявители и патентообладатели Борисов Р.А., Антонец И.В. - № 2019619234; заявл. 18.07.2019; опубл. 09.10.2019.

73. Свидетельство № 2021611914 Российская Федерация. Свидетельств об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа управления микроконтроллерами семейства STM32F4, обеспечивающая измерение линейных перемещений чувствительных элементов датчиков, использующих линейки фотоэлектронных приемников/ Борисов Р.А., Антонец И.В.; заявитель и патентообладатель Борисов Р.А. - № 2021611007; заявл. 19.01.2021; опубл.



08.02.2021.

74. Симчук, А.А. Оптимизация конструкции пьезоэлектрических датчиков динамического давления / А.А. Симчук // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. Спецвыпуск «Метрология». – 2011. – № 53. – С. 16-19.

75. Симчук, А.А. Расчетное моделирование конструкции пьезоэлектрических датчиков динамического давления / А.А. Симчук // Тезисы докладов 19-й всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, 6-8 сентября 2011. С. 410-412.

76. Соломатин, В.А. Дискретизация пространства в оптико-электронных системах с мозаичным угловым полем./ В.А. Соломатин // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – № 5. – С. 57-61.

77. Сорокин, М. Ю. Исследование конструкции монокристаллического упругогоэлемента частотного датчика давления / М. Ю. Сорокин, В. А. Тихоненков // Научно-технический калейдоскоп. – 2004 – № 2 – С. 67-75.

78. Тихоненков, В.А. Способ компенсации мультипликативной температурной погрешности датчика с вибрирующим элементом / В. А. Тихоненков, М. Ю. Сорокин // Вестник УлГТУ. – 2007. – №5. – С. 43-45.

79. Ткалич, В.Л. Упругие чувствительные элементы систем управления (Принципы построения, анализа математическое моделирование) / В.Л.Ткалич – СПб: ЛИТМО, 1994. – 359 с.

80. Топильский, В.Б. Микроэлектронные измерительные преобразователи : учебное пособие. 2-е изд.-е изд. / В.Б. Топильский. – М.: БИНОМ. Лаборатория знания, 2013. – 493 с.

81. Ухов, А.А. Оптимизация системы регистрации многоканального оптического спектрометра / А.А. Ухов, Д.К. Кострин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – № 4. – С. 8-12.

82. Ухов, А.А. Адаптивная фильтрация шумов оптических линейчатых спектров / А.А. Ухов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. – № 10. – С. 10-14

83. Федосеева, Г.А. Концепция усовершенствования приборных средств

обеспечения RVSM в целях повышения безопасности полета / Г.А. Федосеева // Научный вестник УВАУ ГА(И). – 2011. – № 3. – С. 82-85.

84. Федосеева, Г.А. Приборное оборудование самолета М-101Т и его летная эксплуатация: учеб. пособие / Г.А. Федосеева – 2-е изд., перераб. – Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2011. – 160 с.

85. Феодосьев, В.И. Упругие элементы точного приборостроения / В.И. Феодосьев. – М: Оборонгиз, 1949. – 284 с.

86. Феликсон, И.Е. Упругие элементы приборов / И.Е. Феликсон. – М: Машиностроение, 1977. – 311 с.

87. Фрайден, Д. Современные датчики. Справочник: пер. с англ. М.: Техносфера. -2005. -592 с.

88. Черторийский, А.А. Оптические приемно-передающие устройства: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Оптические устройства в радиотехнике» для студентов, обучающихся на базовой кафедре РОН по направлениям 21020062 «Проектирование и технология электронных средств» и 21030062 «Радиотехника», специализация «опто- и наноэлектроника», дневная форма обучения / сост. А. А. Черторийский. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 34 с.

89. Шарапов, В.М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006. – 628 с.

90. Шеповалова О.В. Совершенствование конструкции и технологии изготовления фотоэлектрических преобразователей на основе кремния / Шеповалова О.В. – М.:, 2006. – 150 с.

91. Шерстобитов, И.И. Влияние конструкционного гистерезиса на точность мембранных приборов: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.00.00 / Шерстобитов Иван Иванович. – Рига, 1964. – 112 с.

92. Шипунов, А.В. Определение динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков давления: сравнительный анализ методов / А.В. Шипунов // Приборы и системы управления. – 1999. – № 7. – С. 35-37.

93. Шуберт, Ф. Светодиоды / Ф. Шуберт. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

94. Явленский, К.Н. Справочник конструктора точного приборостроения / К.Н. Явленский, Б.Л. Тимофеев. – Л., Машиностроение, 1989. – 792 с.
95. Auersvald, J. Aerometric system for general aviation / J. Auersvald, K. Draxler // Intern. Conf. on Military Technologies (ICMT). Brno, Czech Republic. – 2015. – P. 1-6.
96. Barber, J.R. Elasticity, Second Edition / J.R. Barber. – Kluwer: Kluwer Academic Publishers, 2004. – 431 pp.
97. Ciarlet, P.G. An introduction to differential geometry with applications to elasticity / P.G. Ciarlet. – Springer, 2005. – 211 pp.
98. Covington E.J. Diffusion-limited evaporation in a temperature gradient and application to gas-filled incandescent lamps / E. J. Covington, G.H. Ingold // J. Ilium. Eng. Soc. – 1975. – Vol. 55. – . P. 198-203.
99. Elbestawi M.A. Force Measurement / M.A. Elbestawi // Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. – 1999. – P. 600-615.
100. Dereniak, E. L. Optical radiation detectors / E. L. Dereniak, D.G. Crow. – NY: Wiley, 1984. – 320 p.
101. Fischer, J. Simple Device for Small Dimension Measurement Using CCD Sensor / J. Fischer, V. Haasz, T. Radil // 12th IMEKO TC4 International Symposium. – 2002. – P. 433-437.
102. Fischer J. Simple methods of edge position measurement using shadow projected on CCD sensor / J. Fischer, T. Radil // Measurement science review. – 2003, – Vol. 3. – No. 3. P. 37-40.
103. Gong, X. The investigation on the nonlinearity of plasticine-like magnetorheological material under oscillatory shear rheometry / X. Gong, Ya. Xu, A.H. S. Xuan, C. Guo, L. Zong // Journal of Rheology. – 2012. – Vol. 56. – No. 6. – P. 1375–1391.
104. Elbestawi, M.A. Force measurement / M.A. Elbestawi // In The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook; Webster, J.G., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA. – 1999. – P. 23.1-23.17.
105. Hyneczek J. Spectral Analysis of Reset Noise Observed in CCD Charge-

Detection Circuits / J. Hynecek // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1990. – Vol. 37. – No. 3. – P. 640-647.

106. Lee. Analytical solutions of sensitivity for pressure microsensors / Lee, Shih-Chin Gong and Chengkuo / Lee // IEEE SENSORS JOURNAL. – 2001. – Vol. 1. – No. 4. –.pp. 340-344.

107. Nyce, D.S. Linear position sensors: theory and application / D.S. Nyce, // John Wiley & Sons Inc. – 2004. – P. 179.

108. Prudenziati M. Handbook of Sensors and Actuators Thick Film Sensors (vol. 1) / M. Prudenziati. – University of Modena:ELSEVER, 1994.

109. Rieger, M.O. A model for hysteresis in mechanics using local minimizers of Young measures / M.O. Rieger // Progress in nonlinear differential equations and their applications. – 2005. – Vol. 63. – P. 403-414.

110. Zhang, Y.H. A novel pressure Microsensor with 30- $\mu\text{m}$ -thick diaphragm and meander-shaped piezoresistors partially distributed on high-stress bulk silicon region / Yan-Hong Zhang, Chen Yang, Zhao-Hua Zhang, Hui-Wang Lin, Li-Tian Liu, Tian-Ling Ren // IEEE SENSORS JOURNAL. – 2007. – Vol. 7. – No. 22. – P. 1742-1748.

111. ANSYS Structural Analysis Guide: ANSYS Release 9.0 [Электронный ресурс] URL: <http://www.ansys.com> (дата обращения: 01.07.2019).

112. ANSYS Tutorials - the University of Alberta Mechanical Engineering department [Электронный ресурс] URL: <http://www.mece.ualberta.ca/Tutorials/ansys/index.html> (дата обращения: 20.02.2020).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

### Статистический анализ экспериментальных данных

#### А.1. Эксперимент № 1

Эксперимент по измерению положения жесткого центра мембраны с использованием одного оптического пятна без усреднения выборок (рис. А.1.1).

Результаты статистического обработки экспериментальных данных

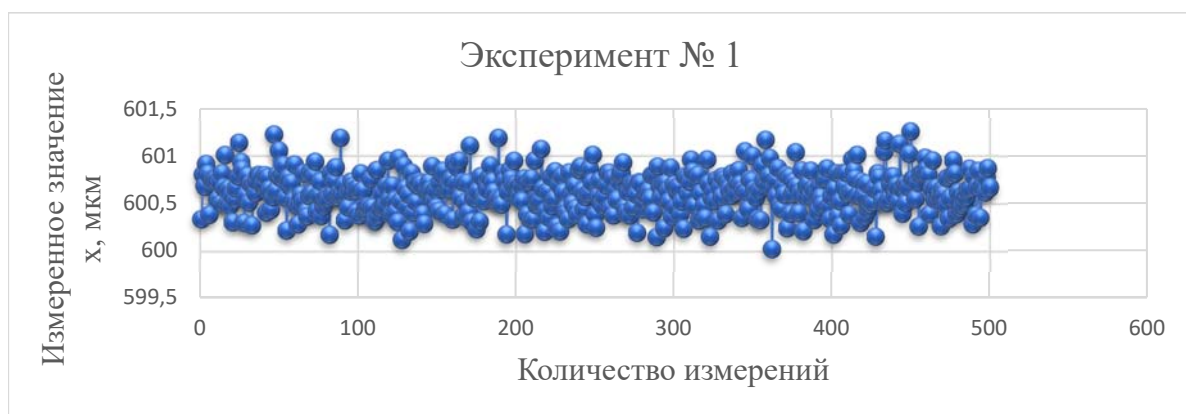


Рис. А.1.1. Результат измерений

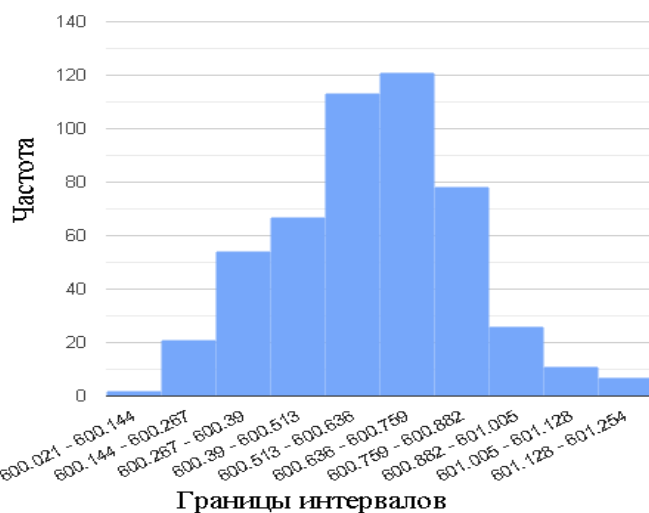
представлены в таблицах А.1.1.

Таблица А.1.1.

| №        | Наименование   | Значение                      |
|----------|--|-------------------------------|
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>                           |                               |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе $m$ , шт.      | 500                           |
| 1.2      | Минимальное значение $x_{min}$ , мкм                     | 600,021                       |
| 1.3      | Максимальное значение $x_{max}$ , мкм                    | 601,254                       |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса $n$ , шт. | 10                            |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , мкм                               | 0,123                         |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>                   |                               |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя) $\bar{x}$ , мкм  | 600,621                       |
| 2.2      | Мода $M_o$ , мкм   | 600,655                       |
| 2.3      | Медиана $M_e$ , мкм                                      | 600,628                       |
| 2.4      | Квартили: $Q_1, Q_2, Q_3$ мкм                            | 600,478<br>600,628<br>600,756 |

| №        | Наименование  | Значение           |
|----------|---|--------------------|
| 2.5      | Децили: $D1, D9$ мкм  | 600,329<br>600,873 |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>                                  |                    |
| 3.1      | Размах вариации $R$ , мкм                                   | 1,233              |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , мкм                       | 0,169              |
| 3.3      | Дисперсия $D$ , мкм <sup>2</sup>                            | 0,0439             |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , мкм <sup>2</sup>       | 0,044              |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мкм              | 0,21               |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , мкм           | 0,21               |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>                       |                    |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %     | 99,98              |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$                      | 0,0281             |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$         | -0,16              |
| 4.4      | Экссесса $E_x$  | -0,0716            |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$ | 0,755              |

На рисунке А.1.2. представлена гистограмма.



**Рис. А.1.2. Гистограмма**

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений отличается от среднего значения равного 600,621 в среднем на 0,21. Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало

отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

Вывод: Полученным результатам можно доверять.

## А.2. Эксперимент №2

Эксперимент по измерению положения жесткого центра мембраны с использованием одного оптического пятна с двукратным усреднением выборок (рис. А.2.1).

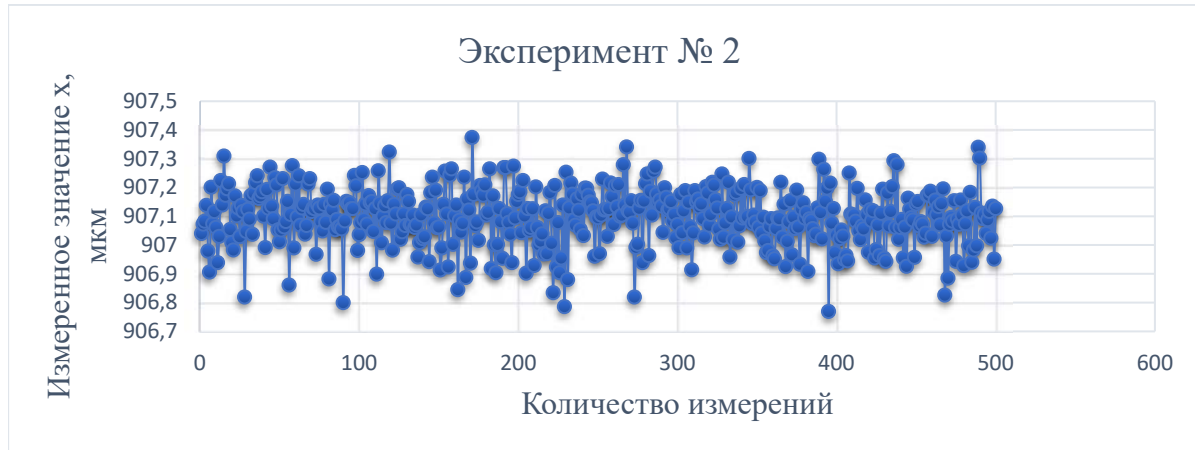


Рис. А.2.1. Результат измерений

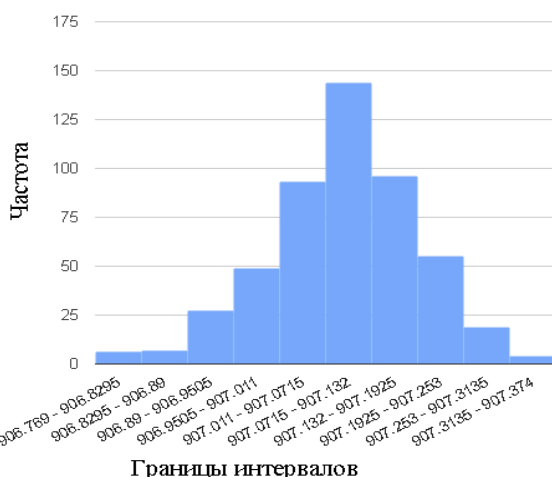
Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.2.1.

Таблица А.2.1.

| №        | Наименование   | Значение                  |
|----------|--|---------------------------|
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>                           |                           |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе $m$ , шт.      | 500                       |
| 1.2      | Минимальное значение $x_{min}$ , мкм                     | 906,769                   |
| 1.3      | Максимальное значение $x_{max}$ , мкм                    | 907,374                   |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса $n$ , шт. | 10                        |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , мкм                               | 0,0605                    |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>                   |                           |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя) $\bar{x}$ , мкм  | 907,1                     |
| 2.2      | Мода $M_0$ , мкм   | 907,1                     |
| 2.3      | Медиана $Me$ , мкм                                       | 907,1                     |
| 2.4      | Квартили: $Q_1, Q_2, Q_3$ , мкм                          | 907,03<br>907,1<br>907,16 |
| 2.5      | Децили: $D_1, D_9$ , мкм                                 | 906,96<br>907,22          |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>                               |                           |

| №        | Наименование  | Значение |
|----------|---|----------|
| 3.1      | Размах вариации $R$ , мкм                                   | 0,605    |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , мкм                       | 0,0754   |
| 3.3      | Дисперсия $D$ , мкм <sup>2</sup>                            | 0,00981  |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , мкм <sup>2</sup>       | 0,00983  |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мкм              | 0,099    |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , мкм           | 0,0991   |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>                       |          |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %     | 99,99    |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$                      | -0,318   |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$         | -0,0716  |
| 4.4      | Экссесса $E_x$  | 0,28     |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$ | 0,755    |

На рисунке А.2.2. представлена гистограмма.



**Рис. А.2.2. Гистограмма**

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений отличается от среднего значения равного 907,1 в среднем на 0,099.

Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что

свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

Вывод: Полученным результатам можно доверять.



### А.3. Эксперимент № 3

Эксперимент по измерению положения жесткого центра мембраны с использованием одного оптического пятна с трехкратным усреднением выборок (рис. А.3.1).

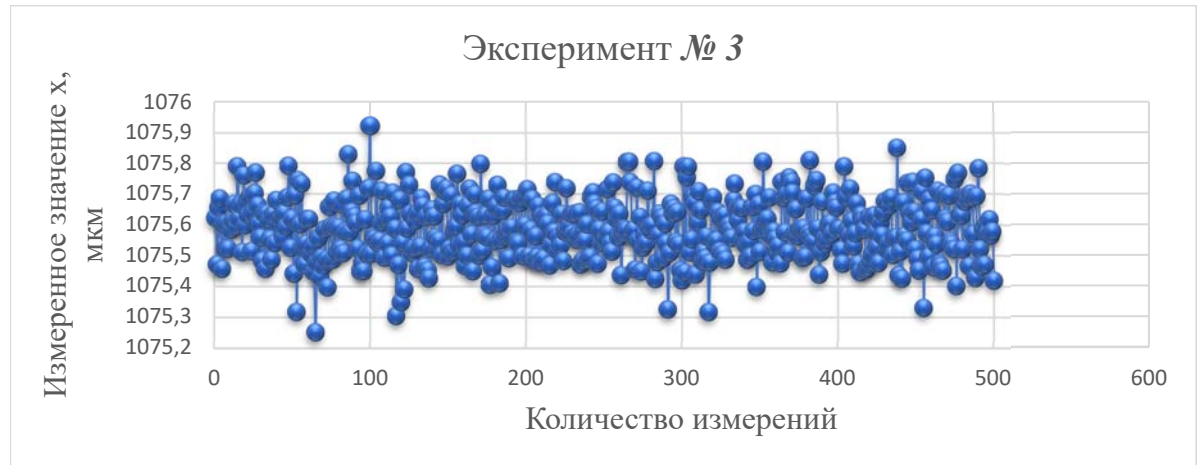


Рис. А.3.1. Результат измерений

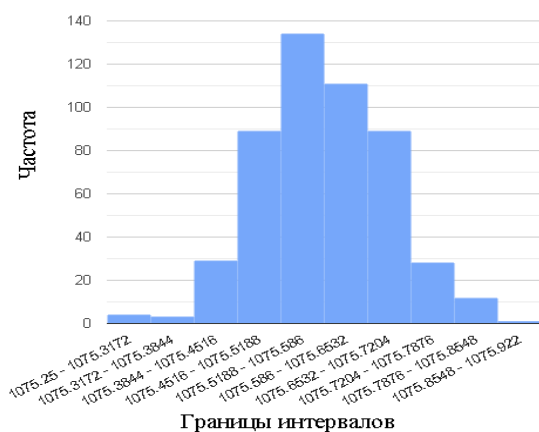
Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.3.1.

Таблица А.3.1.

| №        | Наименование   | Значение                      |
|----------|--|-------------------------------|
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>                           |                               |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе $m$ , шт.      | 500                           |
| 1.2      | Минимальное значение $x_{min}$ , мкм                     | 1075,25                       |
| 1.3      | Максимальное значение $x_{max}$ , мкм                    | 1075,922                      |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса $n$ , шт. | 10                            |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , мкм                               | 0,0672                        |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>                   |                               |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя) $\bar{x}$ , мкм  | 1075,59                       |
| 2.2      | Мода $M_0$ , мкм   | 1075,56                       |
| 2.3      | Медиана $Me$ , мкм                                       | 1075,58                       |
| 2.4      | Квартили: $Q1, Q2, Q3$ , мкм                             | 1075,52<br>1075,58<br>1075,66 |
| 2.5      | Децили: $D1, D9$ , мкм                                   | 1075,46<br>1075,71            |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>                               |                               |
| 3.1      | Размах вариации $R$ , мкм                                | 0,672                         |

| №        | Наименование  | Значение |
|----------|---|----------|
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , мкм                       | 0,0816   |
| 3.3      | Дисперсия $D$ , мкм <sup>2</sup>                            | 0,00996  |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , мкм <sup>2</sup>       | 0,00998  |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мкм              | 0,00998  |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , мкм           | 0,0998   |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>                       |          |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %     | 99,99    |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$                      | 0,0412   |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$         | 0,23     |
| 4.4      | Эксцесса $E_x$  | 0,0585   |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$ | 0,0775   |

На рисунке А.3.2. представлена гистограмма.



**Рис. А.3.2. Гистограмма**

Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

Вывод: Полученным результатам можно доверять.

#### А.4. Эксперимент № 4

Эксперимент по измерению положения жесткого центра мембраны с использованием одного оптического пятна с четырехкратным усреднением выборок (рис. А.4.1).

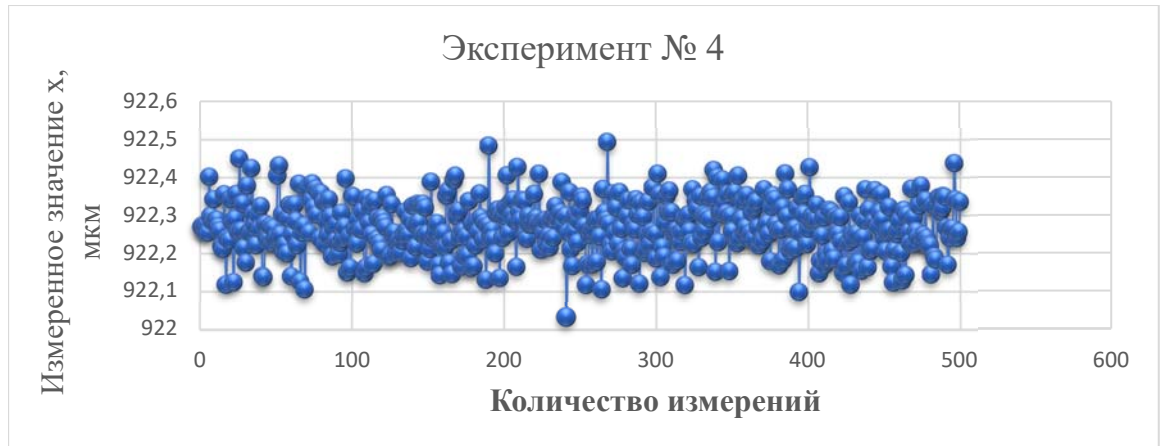


Рис. А.4.1. Результат измерений

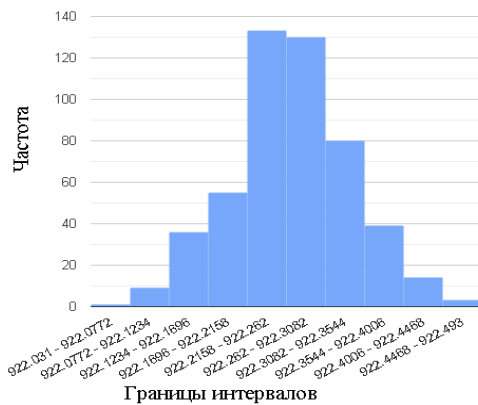
Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.4.1.

Таблица А.4.1.

| №        | Наименование   | Значение                      |
|----------|--|-------------------------------|
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>                           |                               |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе $m$ , шт.      | 500                           |
| 1.2      | Минимальное значение $x_{min}$ , мкм                     | 922,031                       |
| 1.3      | Максимальное значение $x_{max}$ , мкм                    | 922,439                       |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса $n$ , шт. | 10                            |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , мкм                               | 0,0462                        |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>                   |                               |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя) $\bar{x}$ , мкм  | 922,268                       |
| 2.2      | Мода $M_0$ , мкм   | 922,26                        |
| 2.3      | Медиана $Me$ , мкм                                       | 922,268                       |
| 2.4      | Квартили: $Q_1, Q_2, Q_3$ , мкм                          | 922,224<br>922,268<br>922,315 |
| 2.5      | Децили: $D_1, D_9$ , мкм                                 | 922,173<br>922,362            |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>                               |                               |
| 3.1      | Размах вариации $R$ , мкм                                | 0,462                         |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , мкм                    | 0,0569                        |

| №        | Наименование  | Значение |
|----------|---|----------|
| 3.3      | Дисперсия $D$ , мкм <sup>2</sup>                            | 0,00509  |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , мкм <sup>2</sup>       | 0,0051   |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мкм              | 0,0713   |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , мкм           | 0,0714   |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>                       |          |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %     | 100      |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$                      | 0,014    |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$         | 0,11     |
| 4.4      | Экссесса $E_x$  | 0,0186   |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$ | 0,755    |

На рисунке А.4.2. представлена гистограмма.



**Рис. А.4.2. Гистограмма**

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений отличается от среднего значения равного 922,268 в среднем на 0,0713.

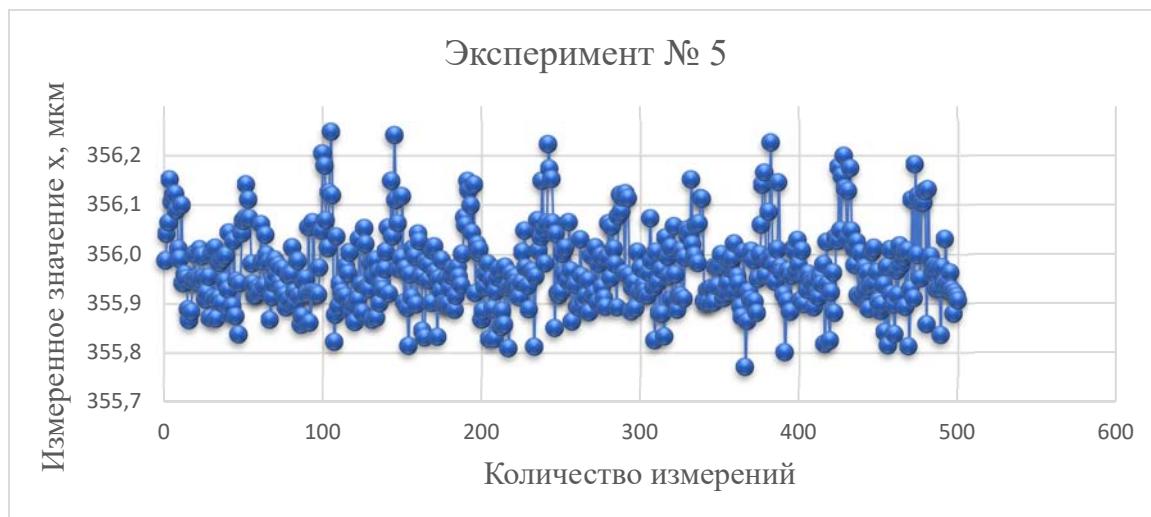
Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

**Вывод:** Полученным результатам можно доверять.

### А.5. Эксперимент № 5

Эксперимент по измерению положения жесткого центра мембраны с использованием двух оптических пятен без усреднения выборок (рис. А.5.1).



*Рис. А.5.1. Результат измерений*

Результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.5.1.

**Таблица А.5.1.**

| №        | Наименование   | Значение                   |
|----------|--|----------------------------|
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>                           |                            |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе $m$ , шт.      | 500                        |
| 1.2      | Минимальное значение $x_{min}$ , мкм                     | 355,771                    |
| 1.3      | Максимальное значение $x_{max}$ , мкм                    | 356,248                    |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стёрджесса $n$ , шт. | 10                         |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , мкм                               | 0,0477                     |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>                   |                            |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя) $\bar{x}$ , мкм  | 355,97                     |
| 2.2      | Мода $Mo$ , мкм  | 355,94                     |
| 2.3      | Медиана $Me$ , мкм                                       | 355,96                     |
| 2.4      | Квартили: $Q1, Q2, Q3$ , мкм                             | 355,92<br>355,96<br>356,01 |
| 2.5      | Децили: $D1, D9$ , мкм                                   | 355,88<br>265,09           |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>                               |                            |
| 3.1      | Размах вариации $R$ , мкм                                | 0.477                      |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , мкм                    | 0,0639                     |

| №        | Наименование  | Значение |
|----------|---|----------|
| 3.3      | Дисперсия $D$ , мкм <sup>2</sup>                            | 0,00669  |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , мкм <sup>2</sup>       | 0,00671  |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мкм              | 0,0818   |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , мкм           | 0,0819   |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>                       |          |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %     | 99,99    |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$                      | 0,691    |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$         | 0,32     |
| 4.4      | Экссесса $E_x$  | 0,46     |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$ | 0,755    |

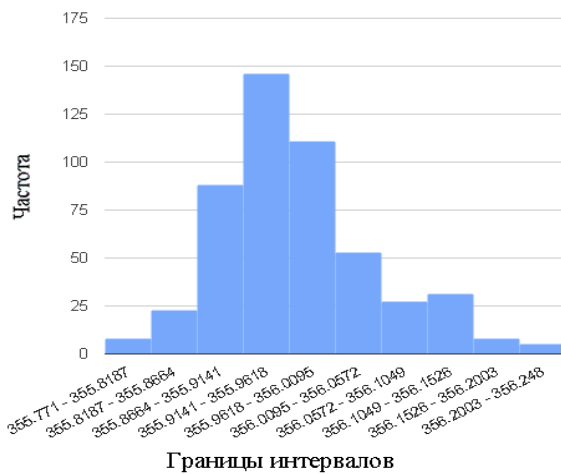


Рис. А.5.2 Гистограмма

На рисунке А.5.2. представлена гистограмма.

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений отличается от среднего значения равного 355,97 в среднем на 0,0818.

Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс

мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

Вывод: Полученным результатам можно доверять.

### А.6. Эксперимент № 6

Эксперимент по измерению положения жесткого центра мембраны с использованием двух оптических пятен с двукратным усреднением выборок (рис. А.6.1).

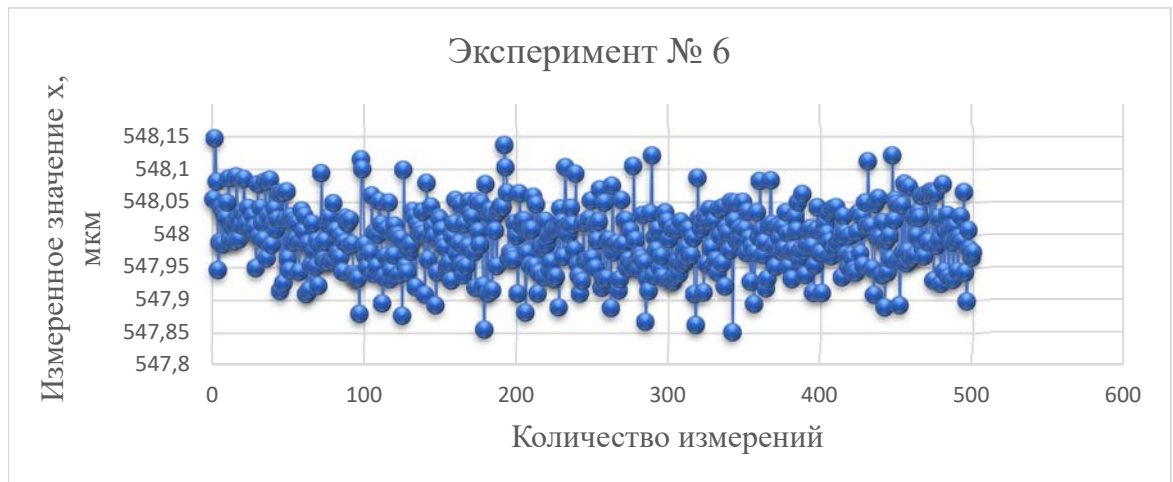


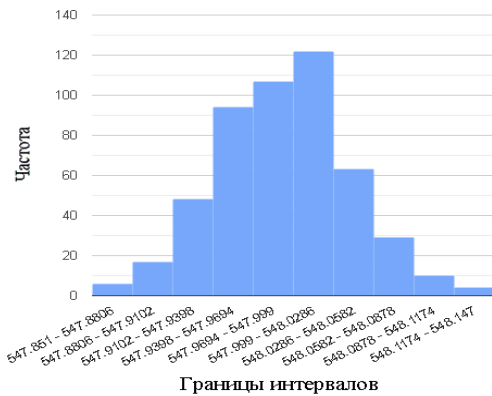
Рис. А.6.1. Результат измерений

Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.6.1.

Таблица А.6.1.

| №        | Наименование   | Значение                   |
|----------|--|----------------------------|
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>                           |                            |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе $m$ , шт.      | 500                        |
| 1.2      | Минимальное значение $x_{min}$ , мкм                     | 547,851                    |
| 1.3      | Максимальное значение $x_{max}$ , мкм                    | 584,147                    |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса $n$ , шт. | 10                         |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , мкм                               | 0,0296                     |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>                   |                            |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя) $\bar{x}$ , мкм  | 547,99                     |
| 2.2      | Мода $M_0$ , мкм   | 548,01                     |
| 2.3      | Медиана $Me$ , мкм                                       | 547,99                     |
| 2.4      | Квартили: $Q1, Q2, Q3$ , мкм                             | 547,96<br>547,96<br>548,02 |
| 2.5      | Децили: $D1, D9$ , мкм                                   | 547,93<br>548,05           |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>                               |                            |
| 3.1      | Размах вариации $R$ , мкм                                | 0,296                      |

| №        | Наименование  | Значение |
|----------|---|----------|
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , мкм                       | 0,0397   |
| 3.3      | Дисперсия $D$ , мкм <sup>2</sup>                            | 0,00245  |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , мкм <sup>2</sup>       | 0,00245  |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мкм              | 0,0495   |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , мкм           | 0,0495   |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>                       |          |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %     | 99,99    |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$                      | 0,0558   |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$         | -0,26    |
| 4.4      | Экссеса $E_x$   | -0,0221  |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$ | 0,0293   |



**Рис. А.6.2. Гистограмма**

На рисунке А.6.2. представлена гистограмма.

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений отличается от среднего значения равного 547,99 в среднем на 0,0495.

Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

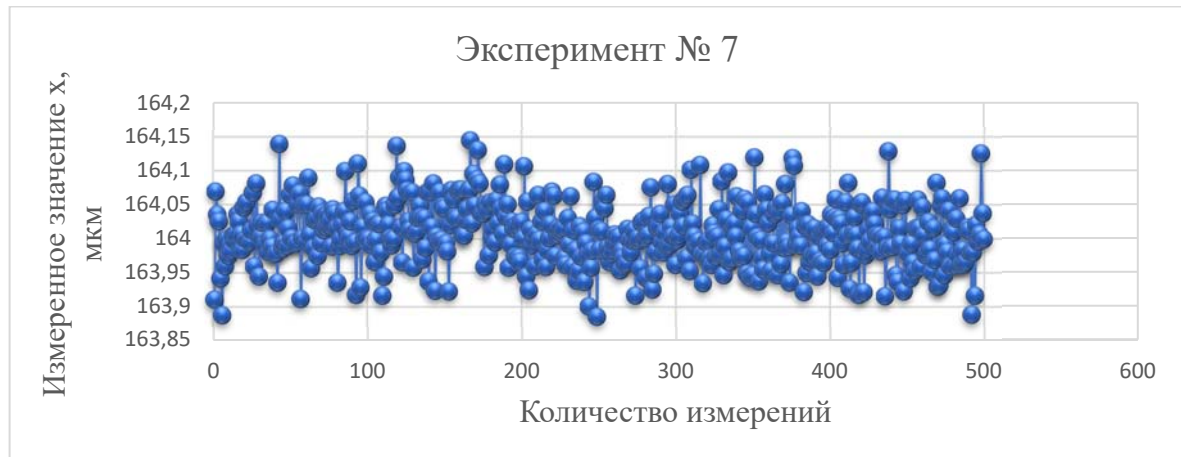
Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

Вывод: Полученным результатам можно доверять.



### А.7. Эксперимент № 7

Эксперимент по измерению положения жесткого центра мембраны с использованием двух оптических пятен с трехкратным усреднением выборок (рис. А.7.1).



*Рис. А.7.1. Результат измерений*

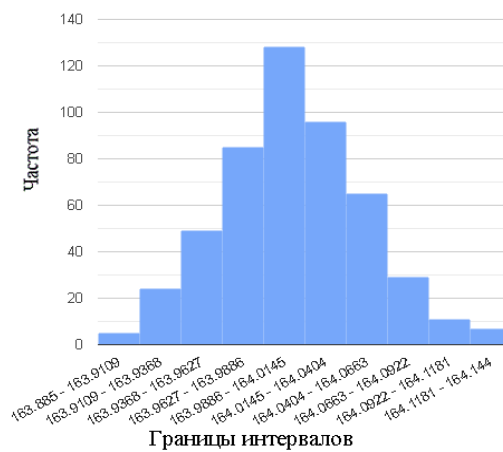
Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.7.1.

**Таблица А.7.1.**

| №        | Наименование   | Значение                      |
|----------|--|-------------------------------|
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>                           |                               |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе $m$ , шт.      | 500                           |
| 1.2      | Минимальное значение $x_{min}$ , мкм                     | 163,885                       |
| 1.3      | Максимальное значение $x_{max}$ , мкм                    | 164,144                       |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стёрджесса $n$ , шт. | 10                            |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , мкм                               | 0,0259                        |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>                   |                               |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя) $\bar{x}$ , мкм  | 164,008                       |
| 2.2      | Мода $M_0$ , мкм   | 164,003                       |
| 2.3      | Медиана $Me$ , мкм                                       | 164,006                       |
| 2.4      | Квартили: $Q1, Q2, Q3$ , мкм                             | 163,977<br>164,006<br>164,037 |
| 2.5      | Децили: $D1, D9$ , мкм                                   | 163,948<br>164,065            |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>                               |                               |
| 3.1      | Размах вариации $R$ , мкм                                | 0,259                         |

| №        | Наименование  | Значение |
|----------|---|----------|
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , мкм                       | 0,0356   |
| 3.3      | Дисперсия $D$ , мкм <sup>2</sup>                            | 0,00204  |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , мкм <sup>2</sup>       | 0,00204  |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мкм              | 0,0451   |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , мкм           | 0,0452   |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>                       |          |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %     | 99,98    |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$                      | 0,174    |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$         | 0,0933   |
| 4.4      | Эксцесса $E_x$  | 0,00394  |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$ | 0,755    |

На рисунке А.7.2. представлена гистограмма.



**Рис. А.7.2. Гистограмма**

нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

Вывод: Полученным результатам можно доверять.

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений отличается от среднего значения равному 164,008 в среднем на 0,0451.

Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от

### А.8. Эксперимент № 8

Эксперимент по измерению положения жесткого центра мембраны с использованием двух оптических пятен с четырехкратным усреднением выборок (рис. А.8.1).

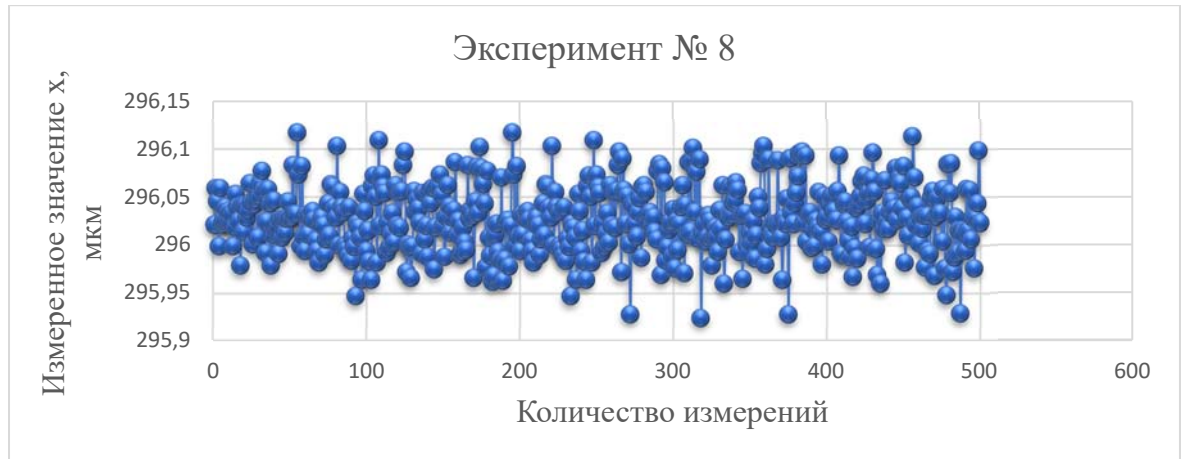


Рис. А.8.1. Результат измерений

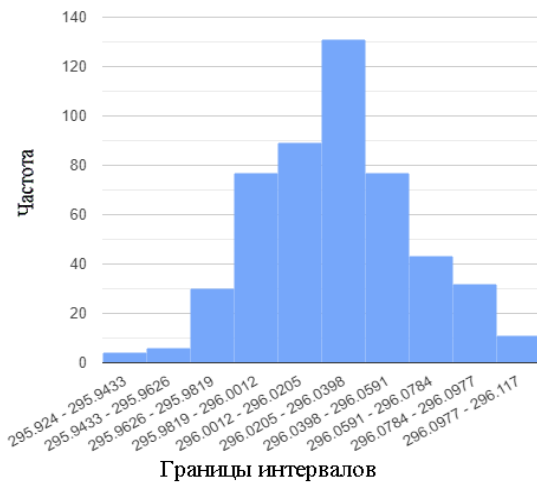
Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.8.1.

Таблица А.8.1.

| №        | Наименование   | Значение                      |
|----------|--|-------------------------------|
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>                           |                               |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе $m$ , шт.      | 500                           |
| 1.2      | Минимальное значение $x_{min}$ , мкм                     | 295,924                       |
| 1.3      | Максимальное значение $x_{max}$ , мкм                    | 296,117                       |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса $n$ , шт. | 10                            |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , мкм                               | 0,0193                        |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>                   |                               |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя) $\bar{x}$ , мкм  | 296,027                       |
| 2.2      | Мода $M_0$ , мкм   | 296,029                       |
| 2.3      | Медиана $Me$ , мкм                                       | 296,027                       |
| 2.4      | Квартили: $Q_1, Q_2, Q_3$ , мкм                          | 296,003<br>296,027<br>296,049 |
| 2.5      | Децили: $D_1, D_9$ , мкм                                 | 295,984<br>296,075            |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>                               |                               |
| 3.1      | Размах вариации $R$ , мкм                                | 0,193                         |

| №        | Наименование  | Значение |
|----------|---|----------|
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , мкм                       | 0,0268   |
| 3.3      | Дисперсия $D$ , мкм <sup>2</sup>                            | 0,00117  |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , мкм <sup>2</sup>       | 0,00117  |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мкм              | 0,0341   |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , мкм           | 0,0352   |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>                       |          |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %     | 99,99    |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$                      | 0,103    |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$         | -0,0483  |
| 4.4      | Экссеса $E_x$   | -0,16    |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$ | 0,755    |

На рисунке А.8.2. представлена гистограмма.



**Рис. А.8.2. Гистограмма**

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений отличается от среднего значения равного 296,027 в среднем на 0,0341.

Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс

мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна. Вывод: Полученным результатам можно доверять.

### А.9. Эксперимент № 9

Эксперимент по измерению положения жесткого центра мембраны с использованием двух оптических пятен без усреднения выборок при чем математическая обработка результатов начинается сразу же после опроса первой половины ЛФП (рис. А.9.1).

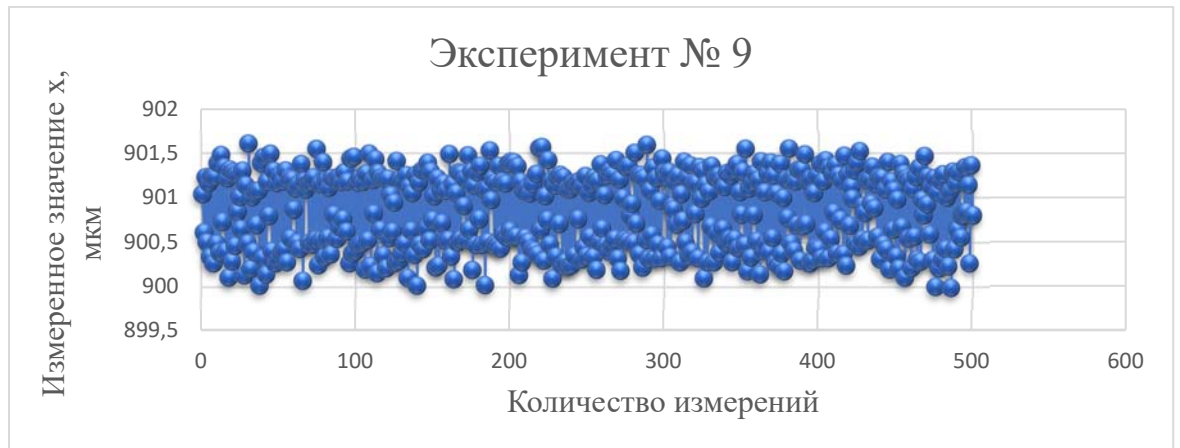


Рис. А.9.1. Результат измерений

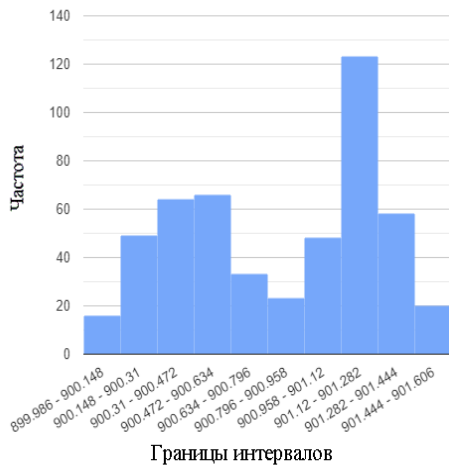
Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.9.1.

Таблица А.9.1.

| №        | Наименование   | Значение                   |
|----------|--|----------------------------|
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>                           |                            |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе $m$ , шт.      | 500                        |
| 1.2      | Минимальное значение $x_{min}$ , мкм                     | 899,986                    |
| 1.3      | Максимальное значение $x_{max}$ , мкм                    | 901,603                    |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса $n$ , шт. | 10                         |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , мкм                               | 0,162                      |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>                   |                            |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя) $\bar{x}$ , мкм  | 900,85                     |
| 2.2      | Мода $M_o$ , мкм   | 901,21                     |
| 2.3      | Медиана $M_e$ , мкм                                      | 900,95                     |
| 2.4      | Квартили: $Q_1, Q_2, Q_3$ , мкм                          | 900,46<br>900,95<br>901,22 |
| 2.5      | Децили: $D_1, D_9$ , мкм                                 | 900,26                     |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>                               |                            |
| 3.1      | Размах вариации $R$ , мкм                                | 1,620                      |

| №        | Наименование  | Значение |
|----------|---|----------|
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , мкм                       | 0,39     |
| 3.3      | Дисперсия $D$ , мкм <sup>2</sup>                            | 0,18     |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , мкм <sup>2</sup>       | 0,18     |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мкм              | 0,424    |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , мкм           | 0,424    |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>                       |          |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %     | 99,95    |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$                      | -0,201   |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$         | -0,84    |
| 4.4      | Эксцесса $E_x$  | -1,34    |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$ | 0,755    |

На рисунке А.9.2. представлена гистограмма.



**Рис. А.9.2. Гистограмма**

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений отличается от среднего значения равного 900,85 в среднем на 0,424.

Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от

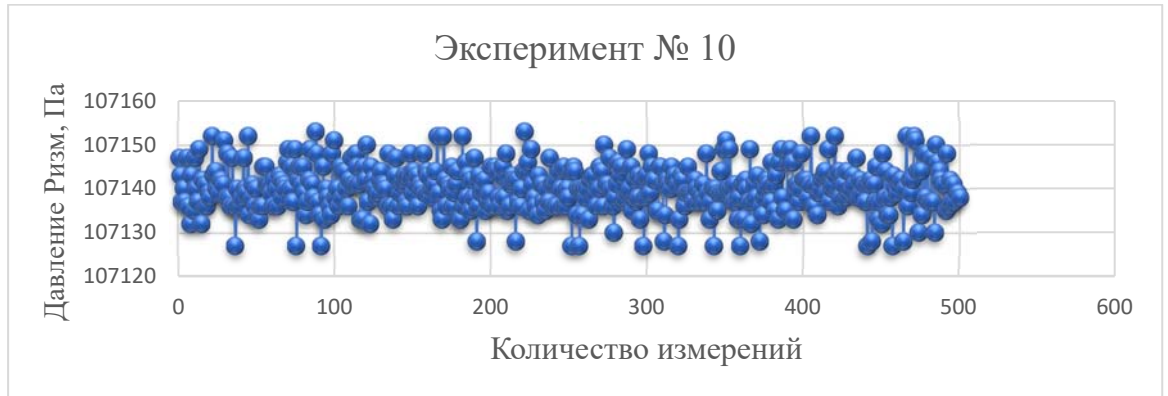
нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

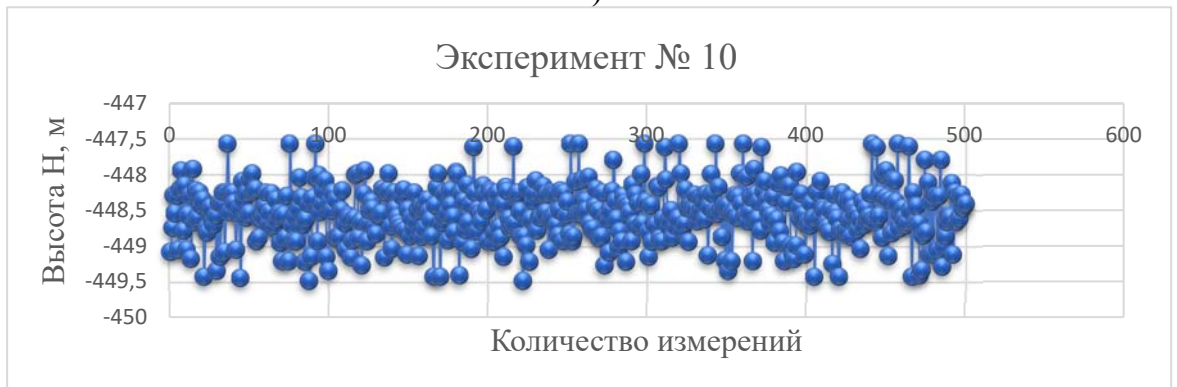
**Вывод:** Полученным результатам можно доверять.

### А.10. Эксперимент № 10

Эксперимент по измерению давления (рис. А.10а) и эквивалентной высоты (рис.А.10б) на отметке минус 500 метров.



а)



б)

**Рис. А.10.1. Результат измерений:**  
а – давление, б – эквивалентная высота

Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.10.1.

**Таблица А.10.1.**

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>P<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>  |                                    |                    |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе<br><i>t</i> , шт.                       | 500                                | 500                |
| 1.2      | Минимальное значение <i>P<sub>измmin</sub></i> , Па   <i>H<sub>min</sub></i> , м  | 107127                             | -449,482           |
| 1.3      | Максимальное значение <i>P<sub>измmax</sub></i> , Па   <i>H<sub>max</sub></i> , м | 107153                             | -447,569           |

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>R<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса <i>n</i> , шт.                             | 10                                 | 10                 |
| 1.5      | Ширина интервала <i>h</i> , Па   м  | 3                                  | 0,191              |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>  |                                    |                    |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя)<br>$\overline{P}_{изм}$ , Па   $\overline{H}$ , м | 107140,734                         | -448,54            |
| 2.2      | Мода <i>Mo</i> , Па   м   | 107139,911                         | -448,59            |
| 2.3      | Медиана <i>Me</i> , Па   м  | 107140,489                         | -448,54            |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>  |                                    |                    |
| 3.1      | Размах вариации <i>R</i> , Па   м   | 30                                 | 1,913              |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение <i>d</i> , Па   м   | 3,872                              | 0,3                |
| 3.3      | Дисперсия <i>D</i> , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>                                     | 25,811                             | 0,143              |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии <i>S</i> <sup>2</sup> , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>     | 25,863                             | 0,144              |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>               | 5,08                               | 0,379              |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения <i>s</i> , Па   м                                 | 5,086                              | 0,379              |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>   |                                    |                    |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации <i>K<sub>q</sub></i> , %                    | 100                                | 100,05             |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии <i>A<sub>s</sub></i>                                     | 0,129                              | -0,0546            |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона <i>A<sub>sp</sub></i>                          | 0,16                               | 0,11               |
| 4.4      | Эксцесса <i>E<sub>x</sub></i>   | 0,15                               | -0,0775            |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса <i>S<sub>E<sub>x</sub></sub></i>        | 0,755                              | 0,755              |

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений давления отличается от среднего значения равного 107140,734 в среднем на 5,08 и эквивалентная высота от минус 448,54 в среднем на 0.379.

Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

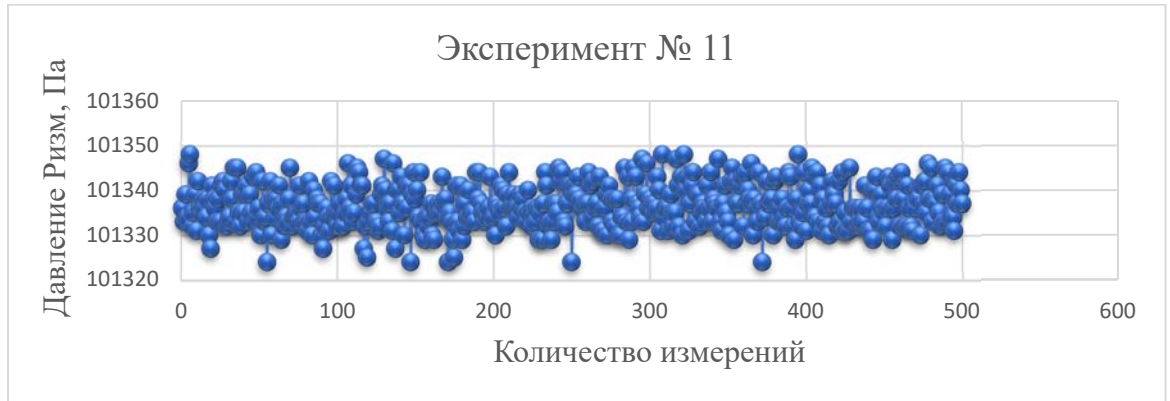
Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

Вывод: Полученным результатам можно доверять.

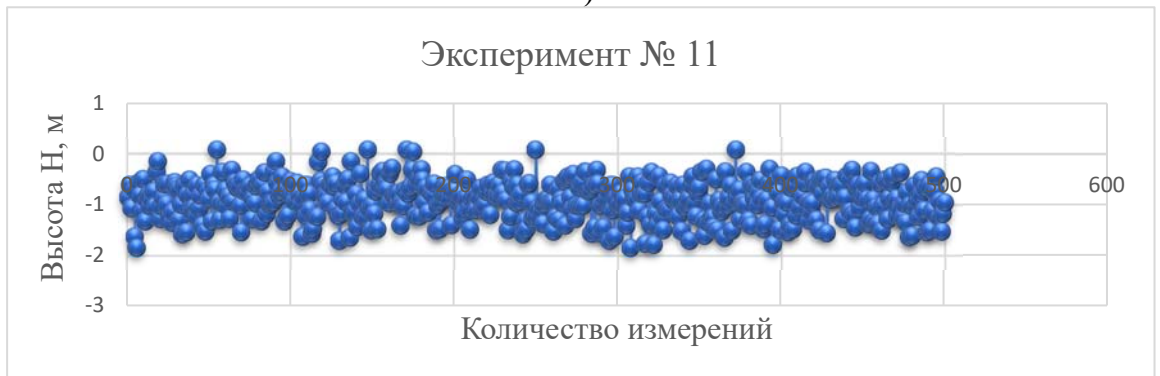


### А.11. Эксперимент № 11

Эксперимент по измерению давления (рис. А.11а) и эквивалентной высоты (рис.А.11б) на отметке 0 метров.



а)



б)

**Рис. А.11.1. Результат измерений:**  
а – давление, б – эквивалентная высота

Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.11.1.

**Таблица А.11.1.**

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>P<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>  |                                    |                    |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе<br><i>t</i> , шт.                       | 500                                | 500                |
| 1.2      | Минимальное значение <i>P<sub>измmin</sub></i> , Па   <i>H<sub>min</sub></i> , м  | 101324                             | 1,85313            |
| 1.3      | Максимальное значение <i>P<sub>измmax</sub></i> , Па   <i>H<sub>max</sub></i> , м | 101348                             | 0,0735484          |

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>R<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса <i>n</i> , шт.                             | 10                                 | 10                 |
| 1.5      | Ширина интервала <i>h</i> , Па   м  | 2                                  | 0,1926678          |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>  |                                    |                    |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя)<br>$\overline{P}_{изм}$ , Па   $\overline{H}$ , м | 101337                             | -0,90944           |
| 2.2      | Мода <i>Mo</i> , Па   м   | 101337                             | -0,67699           |
| 2.3      | Медиана <i>Me</i> , Па   м  | 101337                             | -0,87775           |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>  |                                    |                    |
| 3.1      | Размах вариации <i>R</i> , Па   м   | 24                                 | 1,9266784          |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение <i>d</i> , Па   м   | 4                                  | 0,30219            |
| 3.3      | Дисперсия <i>D</i> , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>                                     | 23,231                             | 0,135              |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии <i>S</i> <sup>2</sup> , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>     | 23,278                             | 0,135              |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>               | 4,82                               | 0,367              |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения <i>s</i> , Па   м                                 | 4,825                              | 0,368              |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>   |                                    |                    |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации <i>K<sub>q</sub></i> , %                    | 100                                | 132,34             |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии <i>A<sub>s</sub></i>                                     | 0,129                              | -0,225             |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона <i>A<sub>sp</sub></i>                          | 0,0612                             | -0,63              |
| 4.4      | Экссесса <i>E<sub>x</sub></i>   | -0,55                              | -0,45              |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса <i>S<sub>E<sub>x</sub></sub></i>        | 0,755                              | 0,755              |

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений давления отличается от среднего значения равного 101337 в среднем на 5,08 и эквивалентная высота от минус 0.90944 в среднем на 0.367.

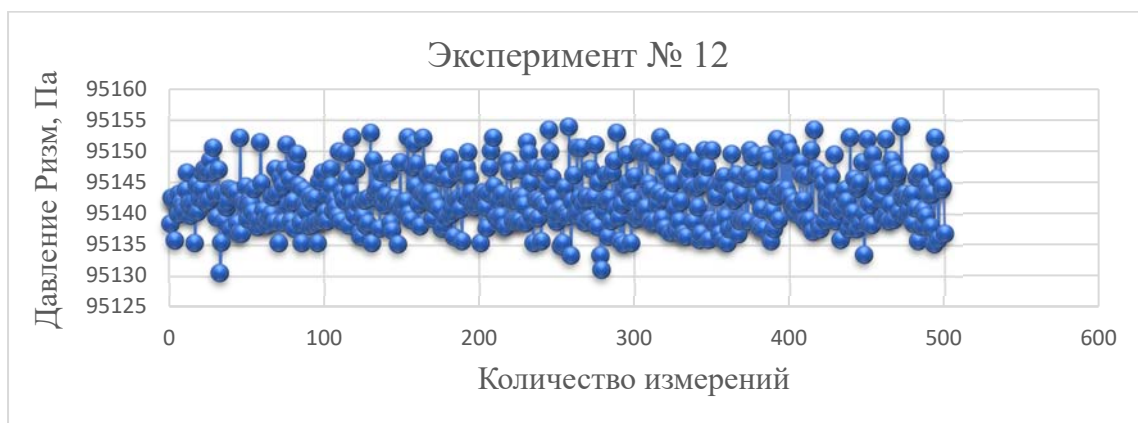
Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

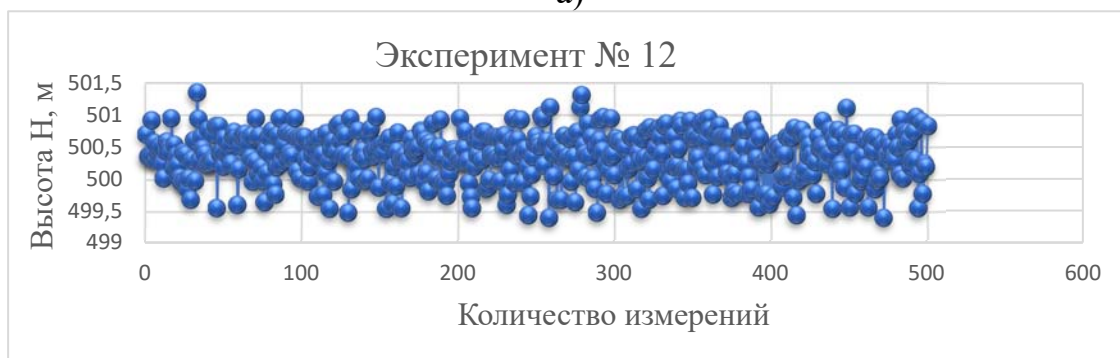
Вывод: Полученным результатам можно доверять.

### А.12. Эксперимент № 12

Эксперимент по измерению давления (рис. А.12а) и эквивалентной высоты (рис.А.12б) на отметке 500 метров.



а)



б)

**Рис. А.12.1. Результат измерений:**  
а – давление, б – эквивалентная высота

Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.12.1.

**Таблица А.12.1.**

| №        | Наименование  | Значение                |                    |
|----------|---|-------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>Ризм</i> | Высота<br><i>Н</i> |
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>                              |                         |                    |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе<br><i>t</i> , шт. | 500                     | 500                |
| 1.2      | Минимальное значение $R_{изм\min}$ , Па   $H_{\min}$ , м    | 95153,9                 | 499,404            |
| 1.3      | Максимальное значение $R_{изм\max}$ , Па   $H_{\max}$ , м   | 95130,5                 | 501,347            |

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>R<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса <i>n</i> , шт.                             | 10                                 | 10                 |
| 1.5      | Ширина интервала <i>h</i> , Па   м  | 2,3                                | 0,194              |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>  |                                    |                    |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя)<br>$\overline{P}_{изм}$ , Па   $\overline{H}$ , м | 95142,5                            | 500,35             |
| 2.2      | Мода <i>Mo</i> , Па   м   | 95139,3                            | 500,57             |
| 2.3      | Медиана <i>Me</i> , Па   м  | 95143,1                            | 500,39             |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>  |                                    |                    |
| 3.1      | Размах вариации <i>R</i> , Па   м   | 23,3999                            | 1,943              |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение <i>d</i> , Па   м   | 3,6                                | 0,3                |
| 3.3      | Дисперсия <i>D</i> , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>                                     | 19,094                             | 0,137              |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии <i>S</i> <sup>2</sup> , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>     | 19,132                             | 0,137              |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>               | 4,37                               | 0,37               |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения <i>s</i> , Па   м                                 | 4,37                               | 0,37               |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>   |                                    |                    |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации <i>K<sub>q</sub></i> , %                    | 100                                | 99,94              |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии <i>A<sub>s</sub></i>                                     | 0,463                              | -0,429             |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона <i>A<sub>sp</sub></i>                          | 0,74                               | -0,61              |
| 4.4      | Экссесса <i>E<sub>x</sub></i>   | -0,35                              | -0,41              |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса <i>S<sub>E<sub>x</sub></sub></i>        | 0,755                              | 0,755              |

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений давления отличается от среднего значения равного 95142,5 в среднем на 4,37 и эквивалентная высота от 500,35 в среднем на 0,37.

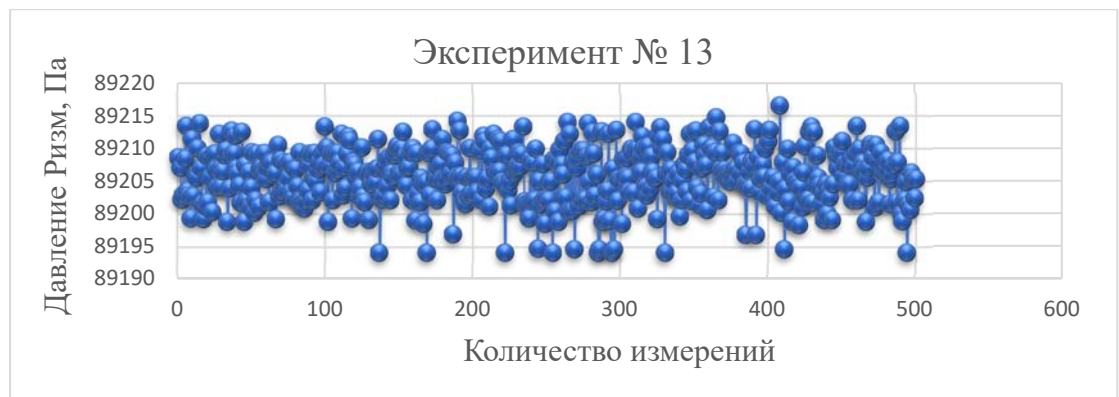
Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

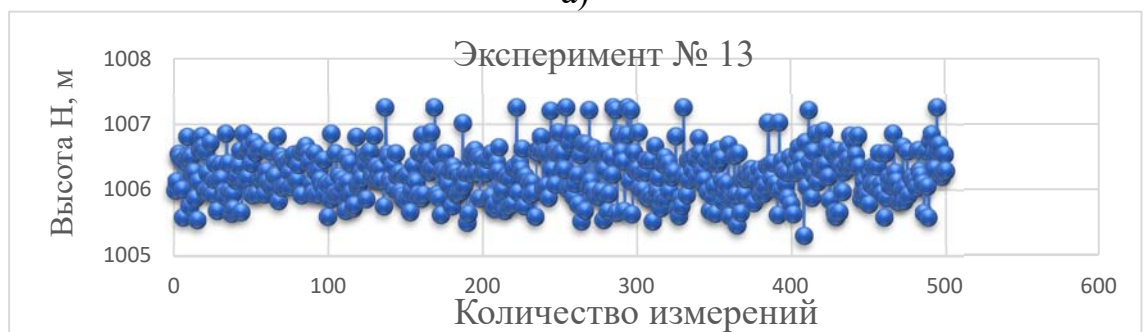
Вывод: Полученным результатам можно доверять.

### А.13. Эксперимент № 13

Эксперимент по измерению давления (рис. А.13а) и эквивалентной высоты (рис.А.13б) на отметке 1000 метров.



а)



б)

**Рис. А.13.1.** Результат измерений:  
а – давление, б – эквивалентная высота

Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.13.1.

**Таблица А.13.1.**

| №        | Наименование  | Значение                |                    |
|----------|---|-------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>Ризм</i> | Высота<br><i>Н</i> |
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>                            |                         |                    |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе <i>m</i> , шт.  | 500                     | 500                |
| 1.2      | Минимальное значение $R_{изм\min}$ , Па   $H_{\min}$ , м  | 89194,1                 | 1005,29            |
| 1.3      | Максимальное значение $R_{изм\max}$ , Па   $H_{\max}$ , м | 89216,5                 | 1007,25            |

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>R<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса <i>n</i> , шт.                             | 10                                 | 10                 |
| 1.5      | Ширина интервала <i>h</i> , Па   м  | 2,2                                | 0,2                |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>  |                                    |                    |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя)<br>$\overline{P}_{изм}$ , Па   $\overline{H}$ , м | 89205,8                            | 1006,23            |
| 2.2      | Мода <i>Mo</i> , Па   м   | 89206,7                            | 1006,15            |
| 2.3      | Медиана <i>Me</i> , Па   м  | 89206                              | 1006,21            |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>  |                                    |                    |
| 3.1      | Размах вариации <i>R</i> , Па   м   | 22,399                             | 2                  |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение <i>d</i> , Па   м   | 3,3                                | 0,29               |
| 3.3      | Дисперсия <i>D</i> , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>                                     | 17,132                             | 0,134              |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии <i>S</i> <sup>2</sup> , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>     | 17,167                             | 0,134              |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>               | 4,139                              | 0,366              |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения <i>s</i> , Па   м                                 | 4,143                              | 0,366              |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>   |                                    |                    |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации <i>K<sub>q</sub></i> , %                    | 100                                | 99,98              |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии <i>A<sub>s</sub></i>                                     | -0,202                             | 0,273              |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона <i>A<sub>sp</sub></i>                          | -0,22                              | 0,21               |
| 4.4      | Эксцесса <i>E<sub>x</sub></i>   | -0,21                              | -0,15              |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса <i>S<sub>E<sub>x</sub></sub></i>        | 0,755                              | 0,755              |

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений давления отличается от среднего значения равного 89205,8 в среднем на 4,139 и эквивалентная высота от 1006,23 в среднем на 0,366.

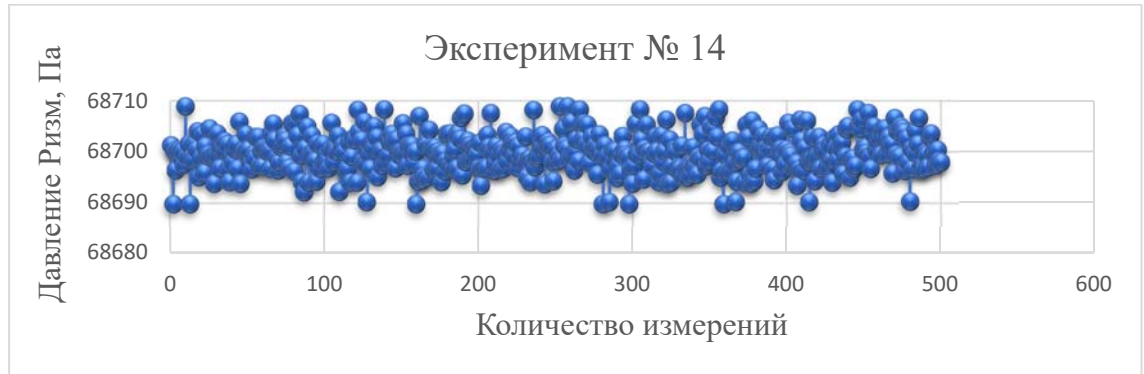
Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

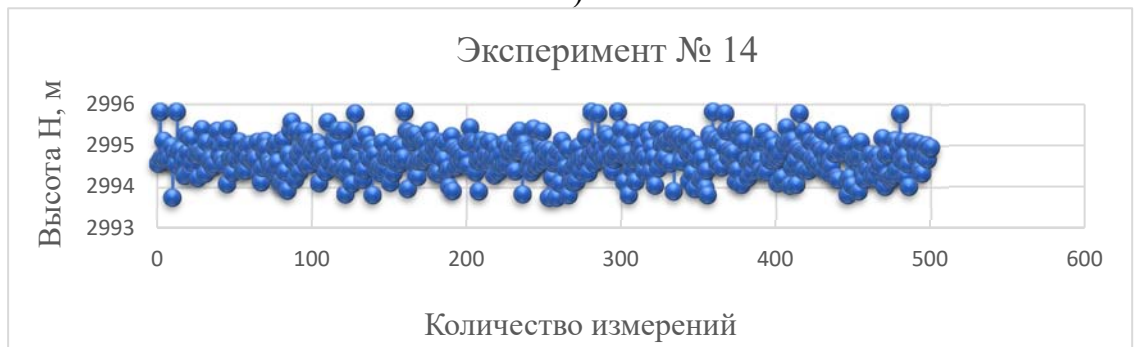
Вывод: Полученным результатам можно доверять.

### А.14. Эксперимент № 14

Эксперимент по измерению давления (рис. А.14а) и эквивалентной высоты (рис.А.14б) на отметке 3000 метров.



а)



б)

**Рис. А.14.1. Результат измерений:**  
а – давление, б – эквивалентная высота

Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.14.1.

**Таблица А.14.1.**

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>P<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>  |                                    |                    |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе <i>m</i> , шт.                          | 500                                | 500                |
| 1.2      | Минимальное значение <i>P<sub>измmin</sub></i> , Па   <i>H<sub>min</sub></i> , м  | 68689,7                            | 2993,75            |
| 1.3      | Максимальное значение <i>P<sub>измmax</sub></i> , Па   <i>H<sub>max</sub></i> , м | 68708,8                            | 2995,81            |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стёрджесса <i>n</i> , шт.                     | 10                                 | 10                 |

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>R<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , Па   м   | 1,9                                | 0,21               |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>  |                                    |                    |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя)<br>$\overline{P}_{изм}$ , Па   $\overline{H}$ , м | 68699,8                            | 2994,74            |
| 2.2      | Мода $M_o$ , Па   м   | 68700,1                            | 2994,69            |
| 2.3      | Медиана $M_e$ , Па   м  | 68699,8                            | 2994,73            |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>  |                                    |                    |
| 3.1      | Размах вариации $R$ , Па   м  | 19                                 | 2,1                |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , Па   м  | 2,9                                | 0,31               |
| 3.3      | Дисперсия $D$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>  | 13,352                             | 0,157              |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>                     | 13,379                             | 0,157              |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>               | 3,654                              | 0,369              |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , Па   м                                      | 3,658                              | 0,397              |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>   |                                    |                    |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %                                   | 100                                | 99,99              |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$  | 0,0234                             | -0,000331          |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$                                       | -0,0969                            | 0,11               |
| 4.4      | Экссесса $E_x$  | -0,13                              | -0,11              |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$                               | 0,755                              | 0,755              |

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений давления отличается от среднего значения равного 68699,8 в среднем на 3,654 и эквивалентная высота от 2994,74 в среднем на 0,396.

Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

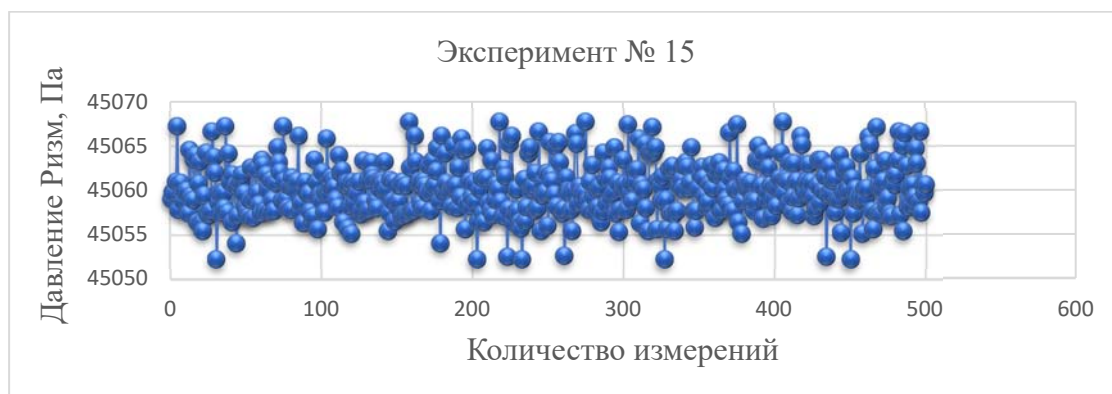
Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

Вывод: Полученным результатам можно доверять.

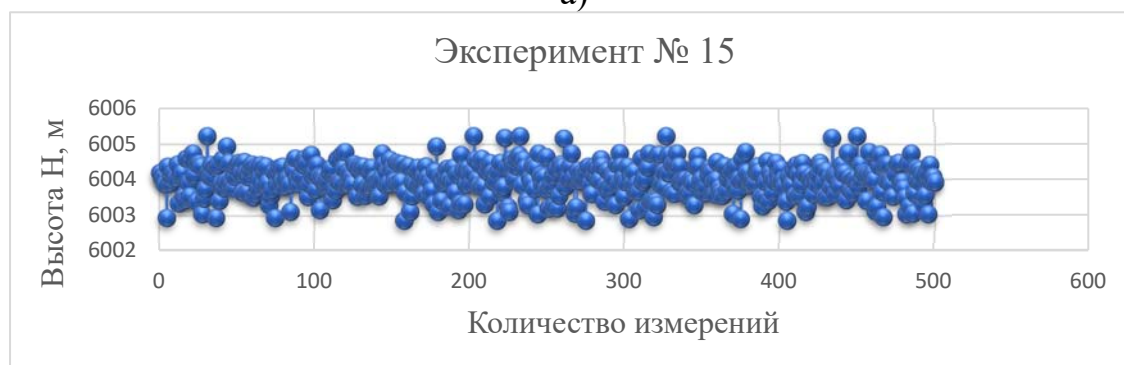


### А.15. Эксперимент № 15

Эксперимент по измерению давления (рис. А.15а) и эквивалентной высоты (рис.А.15б) на отметке 6000 метров.



а)



б)

**Рис. А.15.1. Результат измерений:**  
а – давление, б – эквивалентная высота

Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.15.1.

**Таблица А.15.1.**

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>P<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>  |                                    |                    |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе <i>m</i> , шт.                          | 500                                | 500                |
| 1.2      | Минимальное значение <i>P<sub>измmin</sub></i> , Па   <i>H<sub>min</sub></i> , м  | 45052,2                            | 6002,85            |
| 1.3      | Максимальное значение <i>P<sub>измmax</sub></i> , Па   <i>H<sub>max</sub></i> , м | 45067,7                            | 6005,85            |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса <i>n</i> , шт.                     | 10                                 | 10                 |

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>R<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| 1.5      | Ширина интервала <i>h</i> , Па   м  | 1,6                                | 0,24               |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>  |                                    |                    |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя)<br>$\overline{P}_{изм}$ , Па   $\overline{H}$ , м | 45060,3                            | 6004               |
| 2.2      | Мода <i>Mo</i> , Па   м   | 45060,3                            | 6003,97            |
| 2.3      | Медиана <i>Me</i> , Па   м  | 45060,1                            | 6004,02            |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>  |                                    |                    |
| 3.1      | Размах вариации <i>R</i> , Па   м   | 15,999                             | 2,399              |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение <i>d</i> , Па   м   | 2,3                                | 0,35               |
| 3.3      | Дисперсия <i>D</i> , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>                                     | 8,387                              | 0,202              |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии <i>S</i> <sup>2</sup> , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>     | 8,404                              | 0,202              |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>               | 2,896                              | 0,449              |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения <i>s</i> , Па   м                                 | 2,899                              | 0,45               |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>   |                                    |                    |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации <i>K<sub>q</sub></i> , %                    | 100                                | 100                |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии <i>A<sub>s</sub></i>                                     | 0,31                               | -0,261             |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона <i>A<sub>sp</sub></i>                          | -0,0152                            | 0,0651             |
| 4.4      | Экссесса <i>E<sub>x</sub></i>   | 0,17                               | -0,0318            |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса <i>S<sub>E<sub>x</sub></sub></i>        | 0,755                              | 0,755              |

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений давления отличается от среднего значения равного 45060.3 в среднем на 2.896 и эквивалентная высота от 6004 в среднем на 0.449.

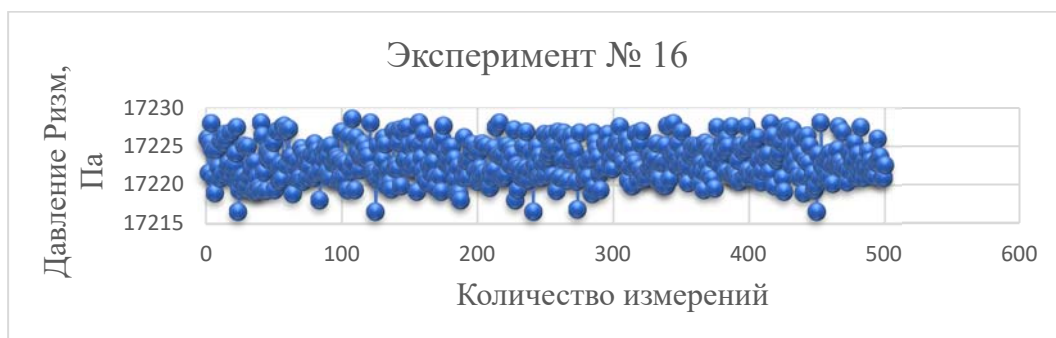
Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

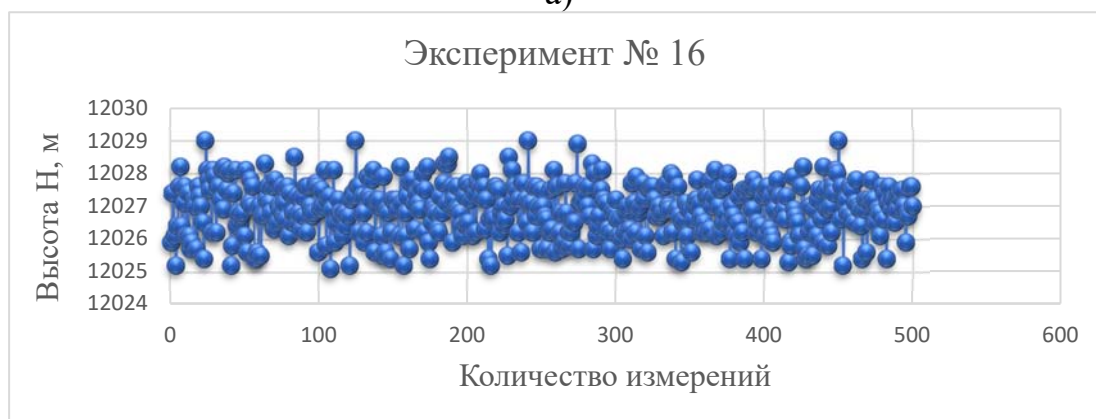
Вывод: Полученным результатам можно доверять.

### А.16. Эксперимент № 16

Эксперимент по измерению давления (рис. А.16а) и эквивалентной высоты (рис.А.16б) на отметке 12000 метров.



а)



б)

**Рис. А.16.1.** Результат измерений:  
а – давление, б – эквивалентная высота

Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.16.1.

**Таблица А.16.1.**

| №        | Наименование   | Значение                            |                    |
|----------|--|-------------------------------------|--------------------|
|          |  | Давление<br><i>P</i> <sub>изм</sub> | Высота<br><i>H</i> |
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>   |                                     |                    |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе <i>m</i> , шт.                                       | 500                                 | 500                |
| 1.2      | Минимальное значение <i>P</i> <sub>изм<sub>min</sub></sub> , Па   <i>H</i> <sub>min</sub> , м  | 17216,5                             | 12025,1            |
| 1.3      | Максимальное значение <i>P</i> <sub>изм<sub>max</sub></sub> , Па   <i>H</i> <sub>max</sub> , м | 17228,5                             | 12029              |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса <i>n</i> , шт.                                  | 10                                  | 10                 |

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>R<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , Па   м   | 1,2                                | 0,4                |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>  |                                    |                    |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя)<br>$\overline{P}_{изм}$ , Па   $\overline{H}$ , м | 17223                              | 12026,9            |
| 2.2      | Мода $M_o$ , Па   м   | 17222,6                            | 12027              |
| 2.3      | Медиана $M_e$ , Па   м  | 17222,8                            | 12027              |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>  |                                    |                    |
| 3.1      | Размах вариации $R$ , Па   м  | 12                                 | 3,999              |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , Па   м  | 1,9                                | 0,6                |
| 3.3      | Дисперсия $D$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>  | 5,546                              | 0,623              |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>                     | 5,557                              | 0,624              |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>               | 2,355                              | 0,789              |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , Па   м                                      | 2,357                              | 0,79               |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>   |                                    |                    |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %                                   | 99,99                              | 99,99              |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$  | 0,196                              | -0,159             |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$                                       | 0,16                               | -0,0628            |
| 4.4      | Экссесса $E_x$  | -0,47                              | -0,52              |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$                               | 0,755                              | 0,755              |

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений давления отличается от среднего значения равного 17223 в среднем на 2,355 и эквивалентная высота от 12026,9 в среднем на 0,789.

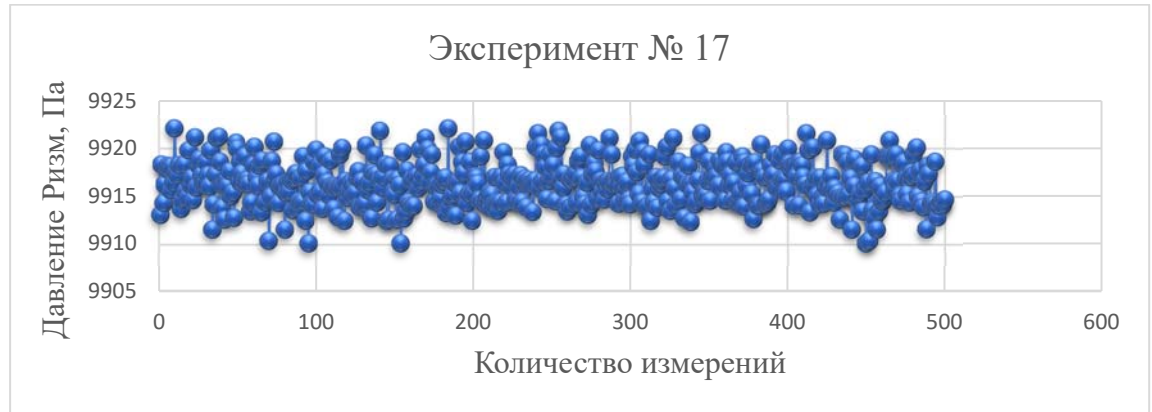
Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

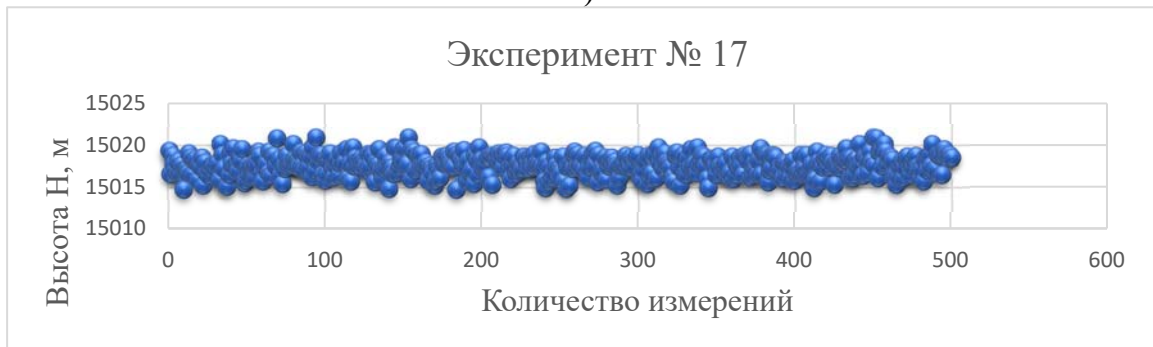
Вывод: Полученным результатам можно доверять.

### А.17. Эксперимент № 17

Эксперимент по измерению давления (рис. А.17а) и эквивалентной высоты (рис.А.17б) на отметке 15000 метров.



а)



б)

**Рис. А.17.1. Результат измерений:**  
а – давление, б – эквивалентная высота

Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.17.1.

**Таблица А.17.1.**

| №        | Наименование   | Значение                            |                    |
|----------|--|-------------------------------------|--------------------|
|          |  | Давление<br><i>P</i> <sub>изм</sub> | Высота<br><i>H</i> |
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>   |                                     |                    |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе <i>m</i> , шт.                                       | 500                                 | 500                |
| 1.2      | Минимальное значение <i>P</i> <sub>изм<sub>min</sub></sub> , Па   <i>H</i> <sub>min</sub> , м  | 9910,1                              | 15014,7            |
| 1.3      | Максимальное значение <i>P</i> <sub>изм<sub>max</sub></sub> , Па   <i>H</i> <sub>max</sub> , м | 9922,06                             | 15020,9            |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса <i>n</i> , шт.                                  | 10                                  | 10                 |

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>R<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , Па   м   | 1,2                                | 0,6                |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>  |                                    |                    |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя)<br>$\overline{P}_{изм}$ , Па   $\overline{H}$ , м | 9916,39                            | 15017,6            |
| 2.2      | Мода $M_o$ , Па   м   | 9916,57                            | 15017,5            |
| 2.3      | Медиана $M_e$ , Па   м  | 9916,36                            | 15017,6            |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>  |                                    |                    |
| 3.1      | Размах вариации $R$ , Па   м  | 12                                 | 6,2                |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , Па   м  | 1,8                                | 0,9                |
| 3.3      | Дисперсия $D$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>  | 5,088                              | 1,336              |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>                     | 5,098                              | 1,339              |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>               | 2,256                              | 1,156              |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , Па   м                                      | 2,258                              | 1,157              |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>   |                                    |                    |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %                                   | 99,98                              | 99,99              |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$  | 0,165                              | -0,147             |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$                                       | -0,083                             | 0,0916             |
| 4.4      | Экссесса $E_x$  | -0,31                              | -0,28              |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$                               | 0,755                              | 0,755              |

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений давления отличается от среднего значения равного 9916,39 в среднем на 2,256 и эквивалентная высота от 15017,6 в среднем на 1,156.

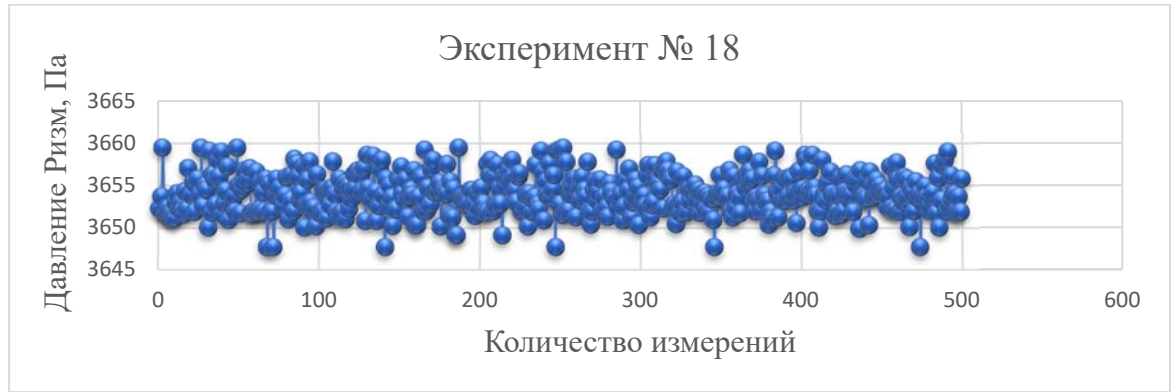
Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

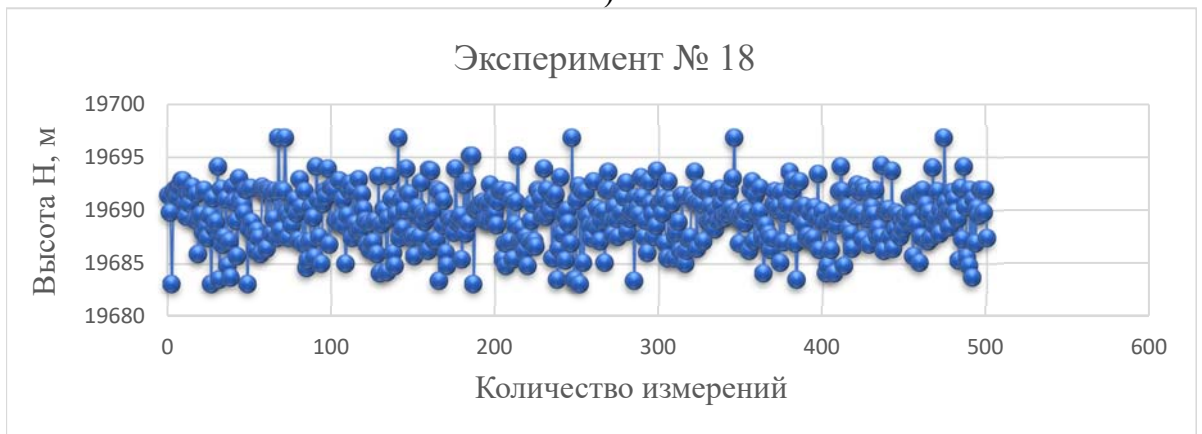
Вывод: Полученным результатам можно доверять.

### А.18. Эксперимент № 18

Эксперимент по измерению давления (рис. А.18а) и эквивалентной высоты (рис.А.18б) на отметке 20000 метров.



а)



б)

**Рис. А.18.1. Результат измерений:**

Результаты статистического обработки экспериментальных данных представлены в таблицах А.18.1.

**Таблица А.18.1.**

| №        | Наименование  | Значение                |                    |
|----------|---|-------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>Ризм</i> | Высота<br><i>Н</i> |
| <b>1</b> | <b>Определение числа групп</b>                                |                         |                    |
| 1.1      | Количество значений участвующих в анализе <i>m</i> , шт.      | 500                     | 500                |
| 1.2      | Минимальное значение $R_{изм\min}$ , Па   $H_{\min}$ , м      | 3647,69                 | 19683,1            |
| 1.3      | Максимальное значение $R_{изм\max}$ , Па   $H_{\max}$ , м     | 3659,45                 | 19696,8            |
| 1.4      | Число групп определяемое по формуле Стэрджесса <i>n</i> , шт. | 10                      | 10                 |

| №        | Наименование  | Значение                           |                    |
|----------|---|------------------------------------|--------------------|
|          |   | Давление<br><i>R<sub>изм</sub></i> | Высота<br><i>H</i> |
| 1.5      | Ширина интервала $h$ , Па   м   | 1,18                               | 1,4                |
| <b>2</b> | <b>Показатели центра распределения</b>  |                                    |                    |
| 2.1      | Средняя взвешенная (выборочная средняя)<br>$\overline{P}_{изм}$ , Па   $\overline{H}$ , м | 3654,01                            | 19689,4            |
| 2.2      | Мода $M_o$ , Па   м   | 3654,08                            | 19689,4            |
| 2.3      | Медиана $M_e$ , Па   м  | 3653,96                            | 19689,5            |
| <b>3</b> | <b>Показатели вариации</b>  |                                    |                    |
| 3.1      | Размах вариации $R$ , Па   м  | 11,8                               | 14                 |
| 3.2      | Среднее линейное отклонение $d$ , Па   м  | 1,77                               | 2                  |
| 3.3      | Дисперсия $D$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>  | 5,065                              | 6,707              |
| 3.4      | Несмещенная оценка дисперсии $S^2$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>                     | 5,075                              | 6,72               |
| 3.5      | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , Па <sup>2</sup>   м <sup>2</sup>               | 2,251                              | 2,59               |
| 3.6      | Оценка среднеквадратического отклонения $s$ , Па   м                                      | 2,253                              | 2,592              |
| <b>4</b> | <b>Показатели формы распределения</b>   |                                    |                    |
| 4.1      | Относительный показатель квартильной вариации $K_q$ , %                                   | 99,96                              | 99,99              |
| 4.2      | Моментный коэффициент асимметрии $A_s$  | 0,127                              | -0,0944            |
| 4.3      | Структурный коэффициент асимметрии Пирсона $A_{sp}$                                       | -0,0312                            | -0,00303           |
| 4.4      | Экссесса $E_x$  | -0,27                              | -0,22              |
| 4.5      | Среднеквадратическая ошибка коэффициента эксцесса $S_{E_x}$                               | 0,755                              | 0,755              |

Анализ полученных данных показывает, что каждое значение совокупности измерений давления отличается от среднего значения равного 3654,01 в среднем на 2,251 и эквивалентная высота от 19689,4 в среднем на 2,59.

Среднее значение примерно равно моде и медиане, а также моментный коэффициент асимметрии и эксцесс мало отличаются от нуля, что свидетельствует о нормальном распределении выборки.

Поскольку коэффициент вариации меньше 30%, то совокупность однородна.

Вывод: Полученным результатам можно доверять.



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

(обязательное)

**Акты внедрения**

Общество с ограниченной ответственностью  
**«Малое инновационное предприятие  
 «МИКРОЭЛЕКТРОННЫЙ КОНТРОЛЬ»**  
 (ООО «МИП МЭлКон»)  
 Тел: 8-917-637-54-11

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Директор ООО «Малое инновационное  
 предприятие «Микроэлектронный контроль»  
 А.М. Низаметдинов  
 08 2019 г.



**АКТ**  
 о внедрении результатов кандидатской диссертации  
 Борисова Руслана Андреевича

Настоящий акт составлен в том, что результаты кандидатской диссертации Р.А. Борисова на тему: «Разработка и исследование эффективных аэрометрических устройств на основе оригинальных конструкций их упругих элементов и вторичных фотодатчиков» использованы при выполнении научно-исследовательской опытно-конструкторской работы (НИОКР) ООО «МИП «МЭлКон».

Так, полученные в процессе подготовки кандидатской диссертации результаты были использованы при разработке приспособления для автоматических выключателей ВА50-41, АЗ790 и ВА50-43 регулировки и контроля провалов между подвижными и малоподвижными контактами (договор №75 от 5 февраля 2018 г.). Предложенная конструкция и способ оптического измерения перемещений позволила проводить измерения провалов между подвижными и малоподвижными контактами с погрешностью  $\pm 1$ мкм после ударных воздействий более 5G.

Инженер ООО «МИП «МЭлКон»

А.В. Малявин

*Рис. Б.1. Акт внедрения результатов диссертационного исследования в ООО «МИП МЭлКон».*



Общество с ограниченной ответственностью  
«Специальный Технологический Центр»  
(ООО «СТЦ»)

16.08.2021  
день, месяц, год;

№ 113/08/01ЛИК  
рег. номер

Санкт-Петербург

**АКТ  
О ВНЕРЕНИЯ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЙ  
БОРИСОВА РУСЛАНА АНДРЕЕВИЧА**

Результаты диссертационных исследований Борисова Руслана Андреевича послужили основой при разработке методик и программ летных испытаний беспилотных воздушных судов, в частности, методика расчета упругих чувствительных элементов учитывающая закономерность изменения измеряемых давлений с учетом функциональных возможностей вторичного преобразователя, позволила осуществить предварительную оценку точностных характеристик систем воздушных сигналов.



Заместитель генерального директора по летной  
работе – Начальник ЛИК

Лешан В.В.

*Рис. Б.2. Акт внедрения результатов диссертационного исследования в ООО  
«Специальный Технологический Центр».*

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

(рекомендуемое)

### Фрагмент программного кода Си

```

830 void opticalSpotSearchX1(parametersOpticalSpot* nameStructure)
831 {
832     nameStructure->errSerchCoordinate = 0;
833     for(uint16_t i = nameStructure->saveCenterOfTheOpticalSpot_x - nameStructure->rangeReport_Right_Left;
834         i < nameStructure->saveCenterOfTheOpticalSpot_x + nameStructure->rangeReport_Right_Left; i++){
835         if(mas_DATA[i] <= nameStructure->amplitude){
836             if(abs(mas_DATA[i-1]-nameStructure->amplitude) >= abs(mas_DATA[i]-nameStructure->amplitude)){
837                 nameStructure->saveCoordinate_x1 = i;
838                 nameStructure->errSerchCoordinate = 1;
839             }
840             if(abs(mas_DATA[i-1]-nameStructure->amplitude) < abs(mas_DATA[i]-nameStructure->amplitude)){
841                 nameStructure->saveCoordinate_x1 = i-1;
842                 nameStructure->errSerchCoordinate = 1;
843             }
844             break;
845         }
846     }
847 }

```

*Рис. В.1. Поиск первой координаты оптического пятна.*

```

848 void opticalSpotSearchX2(parametersOpticalSpot* nameStructure) {
849     for(uint16_t i = nameStructure->saveCoordinate_x1+10; i < nameStructure->saveCenterOfTheOpticalSpot_x
850         + nameStructure->rangeReport_Right_Left; i++){
851         if(mas_DATA[i] >= nameStructure->amplitude){
852             if(abs(mas_DATA[i-1]-nameStructure->amplitude) >= abs(mas_DATA[i]-nameStructure->amplitude)){
853                 nameStructure->saveCoordinate_x2 = i;
854             }
855             if(abs(mas_DATA[i-1]-nameStructure->amplitude) < abs(mas_DATA[i]-nameStructure->amplitude)){
856                 nameStructure->saveCoordinate_x2 = i-1;
857             }
858             break;
859         }
860     }
861 }

```

*Рис. В.2. Поиск второй координаты оптического пятна.*

```

862 void opticalSpotSearchCentr(parametersOpticalSpot* nameStructure) {
863     nameStructure->centerOfTheOpticalSpot_x = (nameStructure->coordinate_x1
864         + nameStructure->coordinate_x2)/2;
865     nameStructure->saveCenterOfTheOpticalSpot_x = nameStructure->centerOfTheOpticalSpot_x;
866 }

```

*Рис. В.3. Поиск центра оптического пятна.*

```

899 void calculationOpticalSpotCentroid(parametersOpticalSpot* nameStructure) {
900     double summaAmplitud_x = 0;
901     double summaAplituda_Pixse_x = 0;
902     for( uint16_t i = (nameStructure->centerOfTheOpticalSpot_x - nameStructure->reportPixelsToTheLeft);
903         i < (nameStructure->centerOfTheOpticalSpot_x + nameStructure->reportPixelsToTheRight); i++ ){
904         summaAmplitud_x = summaAmplitud_x + (double)mas_DATA[i];
905         summaAplituda_Pixse_x = summaAplituda_Pixse_x + (double)mas_DATA[i]*i;
906     }
907     nameStructure->centroid = summaAplituda_Pixse_x/summaAmplitud_x;
908 }
909 }

```

*Рис. В.4. Расчет центроида оптического пятна*

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(не обязательное)

## Патенты на изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2653596

**ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ  
ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
ИНФОРМАЦИИ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Ульяновский государственный технический университет"*  
(RU)

Авторы: *Антонец Иван Васильевич (RU), Гориков Геннадий  
Михайлович (RU), Борисов Руслан Андреевич (RU)*

Заявка № 2017111362

Приоритет изобретения 04 апреля 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 мая 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 04 апреля 2037 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности


 Г.П. Ивлиев

Рис. Г.1. Патент на изобретение № 2653596.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2684683

**ДАТЧИК АЭРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ульяновский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Антонец Иван Васильевич (RU), Борисов Руслан Андреевич (RU), Горшков Геннадий Михайлович (RU), Черторийский Алексей Аркадьевич (RU)*

Заявка № 2017139645

Приоритет изобретения 14 ноября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 апреля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 14 ноября 2037 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Изrael

Рис. Г.2. Патент на изобретение № 2684683.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2702808

**ДАТЧИК АЭРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ульяновский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Антонец Иван Васильевич (RU), Борисов Руслан Андреевич (RU), Горшков Геннадий Михайлович (RU)*

Заявка № 2018131388

Приоритет изобретения 30 августа 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 октября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 30 августа 2038 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иванев

Рис. Г.3. Патент на изобретение № 2702808.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2736736

**ДАТЧИК АЭРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ульяновский государственный технический университет"* (RU)

Авторы: *Антонец Иван Васильевич (RU), Борисов Руслан Андреевич (RU), Гориков Геннадий Михайлович (RU), Шайхутдинов Булат Рутстемович (RU)*

Заявка № 2019129417

Приоритет изобретения 17 сентября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 19 ноября 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 17 сентября 2039 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности


 Г.П. Ильин

Рис. Г.4. Патент на изобретение № 2736736.

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2712777

## Датчик аэрометрических давлений

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Антонец Иван Васильевич (RU), Борисов Руслан Андреевич (RU), Черторийский Алексей Аркадьевич (RU)*

Заявка № 2019114581

Приоритет изобретения 13 мая 2019 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 31 января 2020 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 13 мая 2039 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



Рис. Г.5. Патент на изобретение № 2712777.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(не обязательное)

## Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2019612079**

**Программа управления микроконтроллерами семейства STM32F4, обеспечивающая измерение линейных перемещений чувствительных элементов датчиков, использующих оптические преобразователи.**

Правообладатель: **Борисов Руслан Андреевич (RU)**

Авторы: **Борисов Руслан Андреевич (RU),  
Антонец Иван Васильевич (RU)**

Заявка № **2018660953**  
Дата поступления **03 октября 2018 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **11 февраля 2019 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности



*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев

Рис. Д.1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019612079.

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019663045

**Программа для расчета упругих чувствительных элементов  
датчиков аэрометрических давлений**

Правообладатели: **Борисов Руслан Андреевич (RU), Антонец Иван  
Васильевич (RU)**

Авторы: **Борисов Руслан Андреевич (RU),  
Антонец Иван Васильевич (RU)**

Заявка № 2019619234

Дата поступления 18 июля 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 октября 2019 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Рис. Д.2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019663045.

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021611914

**Программа управления микроконтроллерами семейства STM32F4, обеспечивающая измерение линейных перемещений чувствительных элементов датчиков, использующих линейки фотоэлектронных приемников**

Правообладатель: **Борисов Руслан Андреевич (RU)**

Авторы: **Борисов Руслан Андреевич (RU), Антонец Иван Васильевич (RU)**

Заявка № **2021611007**

Дата поступления **19 января 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **08 февраля 2021 г.**



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Рис. Д.3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611914.