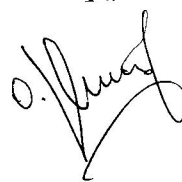


На правах рукописи



ДМИТРИЕВ Олег Анатольевич

**БЕСКОНТАКТНЫЙ ДАТЧИК МУТНОСТИ
ЖИДКИХ СРЕД С МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМ
КОЛЬЦЕВЫМ ФОТОДЕТЕКТОРОМ ДЛЯ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

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

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

Уфа – 2014

Работа выполнена на кафедре информационно-измерительной техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Научный
руководитель:

доктор технических наук, профессор
Фетисов Владимир Станиславович

Официальные
оппоненты:

доктор технических наук, доцент
Сушко Борис Константинович
кафедра статистической радиофизики и
связи
ФГБОУ ВПО «БашГУ»
профессор

кандидат технических наук, доцент
Емец Сергей Викторович
кафедра автоматизации технологических
процессов и производств
ФГБОУ ВПО «УГНТУ»
доцент

Ведущая организация:

ОАО «Нефтеавтоматика», г.Уфа

Защита состоится «24» июня 2014 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу:

450000, г. Уфа, ул. Карла Маркса, д. 12, корпус 1, актовый зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте <http://www.ugatu.ac.ru/>.

Автореферат разослан « »

2014 года.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять в диссертационный совет Д-212.288.02 по адресу: 450000, Уфа-центр, ул. Карла Маркса, д. 12, УГАТУ

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



А.В. Месропян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Жидкие дисперсные среды (ЖДС) – жидкости, содержащие в своей непрерывной фазе определенное количество взвешенных нерастворимых частиц. Во многих практических задачах технологического контроля и управления часто требуется определять концентрацию дисперсной фазы ЖДС. Примерами таких ЖДС, качество которых необходимо контролировать, являются: питьевая вода, сточные воды предприятий, обратная вода, закачиваемая в пласты на нефтепромыслах, авиационное топливо, различные эмульсии и суспензии, применяемые в химической, фармацевтической и пищевой промышленности и др. Концентрацию дисперсной фазы в ЖДС можно определить косвенно по оптической характеристике среды – мутности. Датчики и приборы, с помощью которых можно оценивать данный параметр среды, широко применяются в системах управления и контроля самых различных процессов. В разные годы вклад в изучение проблем измерения мутности и концентрации взвешенных частиц внесли многие исследователи: Шифрин К.С., Кулаков М.В., Беляков В.Л., Кленин В.И., Фетисов В.С., Clayton W., Ishimaru A., Rogner A. и другие.

На сегодняшний день широко распространены лабораторные турбидиметры (мутномеры). Однако промышленность нуждается в различных турбидиметрических датчиках, способных непрерывно работать в промышленных условиях и пропускать через себя большое количество жидкости. Такие датчики работают в жестких условиях эксплуатации: контактные оптические системы мутномеров выходят из строя вследствие налипания на них дисперсных отложений. При этом таким датчикам необходимо постоянное обслуживание, что, во-первых, увеличивает затраты на их содержание, во-вторых, не всегда оказывается эффективным. Поэтому в настоящее время на мировом рынке начали появляться поточные мутномеры с использованием бесконтактных методов, что позволяет почти полностью решить проблему длительной работы мутномеров без обслуживания.

Одним из перспективных бесконтактных методов является бесконтактный оптический метод с формированием струи жидкости. В датчиках, работающих по данному принципу, струя подсвечивается излучателем, а для оценки мутности жидкости измеряют рассеиваемый дисперсными частицами струи свет (нефелометрическая схема измерения).

Бесконтактные струйные нефелометры пока используются редко из-за недостатков существующих ныне конструкций и методов обработки получаемой информации. К другим недостаткам таких устройств относятся отклонения струи при перекосе или неровной установке датчика и микроотклонения (девиации) струи, например, из-за нестабильности расхода жидкости, что приводит к невысокой точности измерений. Несмотря на это, именно бесконтактные нефелометры имеют большой потенциал повышения точности полевых измерений при низких затратах на обслуживание.

Следовательно, усовершенствование конструкций и методов обработки сигналов бесконтактных струйных нефелометров является актуальной задачей, решение которой позволит улучшить состояние дел в области полевых измерений параметров ЖДС.

Одним из перспективных решений в области улучшения метрологической надежности нефелометрических датчиков является применение многоэлементных кольцевых фотодетекторов, которые были предложены несколько лет назад. Однако на практике они еще не используются, так как практически не изучены ни в теоретическом, ни в практическом плане. Отсутствуют математические модели таких преобразователей. Не определены их технические возможности. Нет разработанных практических конструкций, схем и алгоритмов. Теоретическое моделирование бесконтактного струйного нефелометра с многоэлементным кольцевым фотодетектором и соответствующие экспериментальные исследования в конечном счете позволят усовершенствовать данный подкласс нефелометрических датчиков.

Цель работы: разработка и исследование бесконтактного струйного нефелометрического датчика с многоэлементным кольцевым фотодетектором, обладающего уменьшенной дополнительной погрешностью, вызванной отклонениями струи от вертикального направления.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

1) аналитический обзор существующих средств измерения мутности жидких дисперсных систем и обоснование перспективности бесконтактных струйных нефелометров с многоэлементным кольцевым фотодетектором;

2) разработка математической модели многоэлементного кольцевого фотодетектора в виде зависимости его выходного сигнала от параметров отклонения струи;

3) разработка на основе анализа предложенной модели методов уменьшения влияния отклонений струи на результат измерений;

4) разработка структуры бесконтактного струйного нефелометрического датчика с многоэлементным кольцевым фотодетектором и другими элементами, улучшающими эксплуатационную надежность устройства; разработка принципиальной схемы бесконтактного датчика мутности и оценка его точностных параметров;

5) экспериментальные исследования многоэлементного кольцевого фотодетектора с проведением вычислительных экспериментов с предложенной моделью и натурных экспериментов на макете струйного нефелометрического датчика.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов основаны на том, что в теоретических построениях использовались общепризнанные и широко используемые в науке законы и подходы. Для вычислительных экспериментов на математической модели использовался известный пакет моделирования *Maple*. Верность введенных допущений обоснована с приведением фактов, известных из практики. При проведении экспериментов использовались общепринятые методики. Достоверность

опытов обусловлена использованием сертифицированных, аттестованных приборов и выполнением подготовки образцов и градуировки в соответствии с действующими российскими и международными стандартами: ГОСТ 29024-91, ISO 7027.

Методы исследований

Для решения поставленных задач применялось теоретическое моделирование с последующей проверкой полученных результатов на опытах.

При разработке математической модели использовались законы геометрической оптики. При проектировании лабораторной установки использовались общеизвестные положения теоретических основ электротехники и электроники. При расчете погрешностей использовались данные из теории измерений и метрологии. Большая часть сложных математических вычислений и построений трехмерных графиков проводилась в компьютерной среде *Maple*.

Научная новизна

1. Предложена новая конструкция бесконтактного нефелометрического датчика, включающая в себя: многоэлементный кольцевой фотодетектор, двухосевой карданный подвес и систему термостатирования (Патент РФ на изобретение № 2463580), использование которой позволяет, в частности, устранить влияние статических отклонений струи.

2. Разработана математическая модель многоэлементного кольцевого фотодетектора в виде зависимости его выходного сигнала от параметров отклонения струи внутри датчика, что позволило оценить технические возможности датчика.

3. Определено рациональное количество фотоприемников в составе многоэлементного кольцевого фотодетектора.

4. Предложено два метода уменьшения влияния отклонений струи на выходной сигнал многоэлементного кольцевого фотодетектора: метод с дополнительным нелинейным преобразованием и метод с вычислением поправочного коэффициента. Оба метода теоретически и экспериментально исследованы с выдачей рекомендаций по их применению.

Практическую ценность имеют:

- расчетная программа для среды *Maple*, которая может использоваться для дальнейшей оптимизации измерительного тракта подобных датчиков;

- техническая документация (принципиальная и блок-схемы, калибровочная характеристика датчика, таблицы зависимостей погрешности таких датчиков от параметров отклонения струи), которая может быть использована как для дальнейших исследований, так и на практике;

- программа на языке Си для AVR-микроконтроллеров, реализующая метод нейтрализации влияния струи с вычислением поправочного коэффициента;

- созданные автором работы лабораторная установка и макет датчика, которые могут использоваться для дальнейших исследований.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель многоэлементного кольцевого фотодетектора в виде аналитической зависимости его выходного сигнала от параметров отклонения струи исследуемой жидкости.

2. Методы нейтрализации влияния девиации струи на выходной сигнал кольцевого фотодетектора, включая: метод прямого суммирования, метод с дополнительным нелинейным преобразованием, метод с вычислением поправочного коэффициента.

3. Результаты исследований, доказывающих состоятельность разработанной конструкции и математической модели, а также разработанных методов нейтрализации влияния струи.

4. Разработанная конструкция бесконтактного струйного нефелометрического датчика.

Реализация результатов работы.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в ООО НПФ «ФОТОН», г. Уфа. Отдельные результаты работы использованы в учебном процессе в Уфимском государственном авиационном техническом университете при изучении магистрантами дисциплины «Надежность и живучесть систем».

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на ряде научных конференций: на XX Всемирном Конгрессе ИМЕКО (Пусан, Южная Корея, 2012), на Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» в 2011 году, на 19-той Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2012», на IX международной научно-практической конференции «Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2013» в Праге, Чехия.

Публикации

Опубликовано 12 научных работ, из них 3 – в научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, получен патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 65 наименований и одиннадцати приложений. Материалы изложены на 189 страницах, содержат 83 иллюстрации и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, представлены результаты, выносимые на защиту, указано, в чем состоят научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе приведен обзор современных средств измерения концентрации дисперсной фазы (ДФ) в жидких дисперсных системах (ЖДС). Вывод о концентрации взвешенных частиц в жидкости можно косвенным образом сделать на основе измерений мутности жидкости. Мутность жидкости

– это показатель, характеризующий уменьшение её прозрачности в связи с наличием тонкодисперсных взвешенных частиц, рассеивающих дошедший до них свет в различных направлениях. На измерении мутности основана самая распространенная группа методов измерения концентрации дисперсных систем (ДС) – группа фотометрических методов. Сделан вывод, что среди полевых средств измерений, реализующих фотометрические методы измерения концентрации ДФ, одними из наиболее перспективных и удобных являются мутномеры-нефелометры (Рисунок 1). Мутномеры-нефелометры, в отличие от турбидиметров, вычисляют мутность на основе измерения количества света, рассеянного слоем жидкости, просвеченным излучателем. Калибруются такие устройства с помощью специальных образцов мутности – формазиновых суспензий.

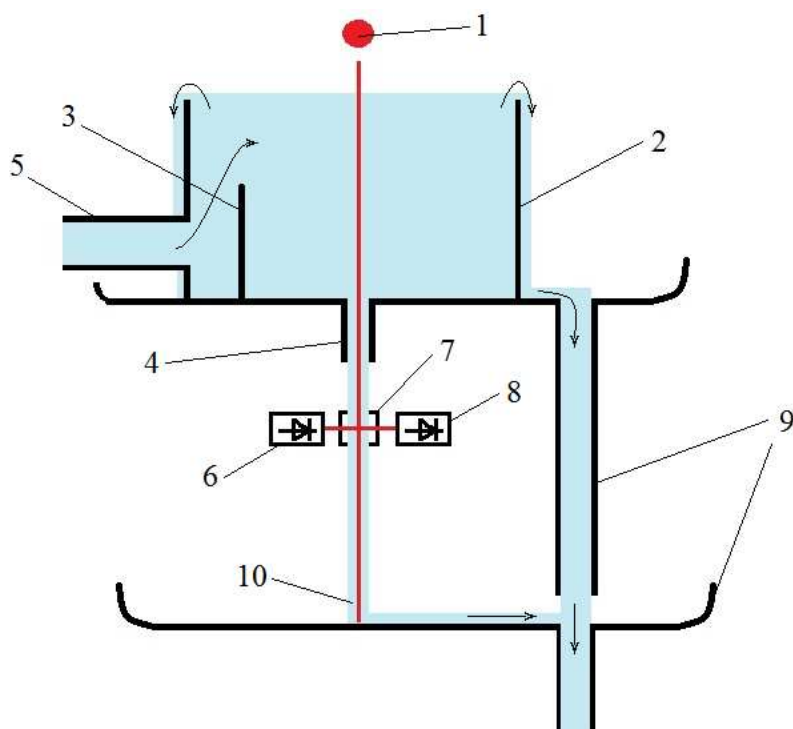


Рисунок 1 – Схема нефелометра с многоэлементным кольцевым фотодетектором:
1 – излучатель, 2 – сосуд-стабилизатор, 3 – перегородка в сосуде-стабилизаторе,
4 – донная горловина, 5 – входной патрубок, 6, 7, 8 – фотоприемники в составе
многоэлементного кольцевого фотодетектора, 9 – дренажная система,
10 – струя исследуемой жидкости

Были сформулированы основные требования к измерителям мутности в полевых/промышленных условиях:

- высокая эксплуатационная и метрологическая надежность;
- высокая степень автоматизации, то есть возможность работы без оператора, возможность дистанционного управления;
- надежные средства защиты от негативного влияния окружающей среды;
- обладание средствами передачи информации для их накопления в составе промышленных информационных систем для их возможной последующей обработки и накопления в базах данных.

В последнем пункте требований имеется в виду то, что в настоящее время мутномеры часто используются в составе сложных систем контроля параметров жидких дисперсных сред, где кроме мутности необходимо измерять большое количество параметров и обрабатывать большой объем данных, например, данные о химическом составе жидкости, данные о работе фильтров очистки (Рисунок 2).

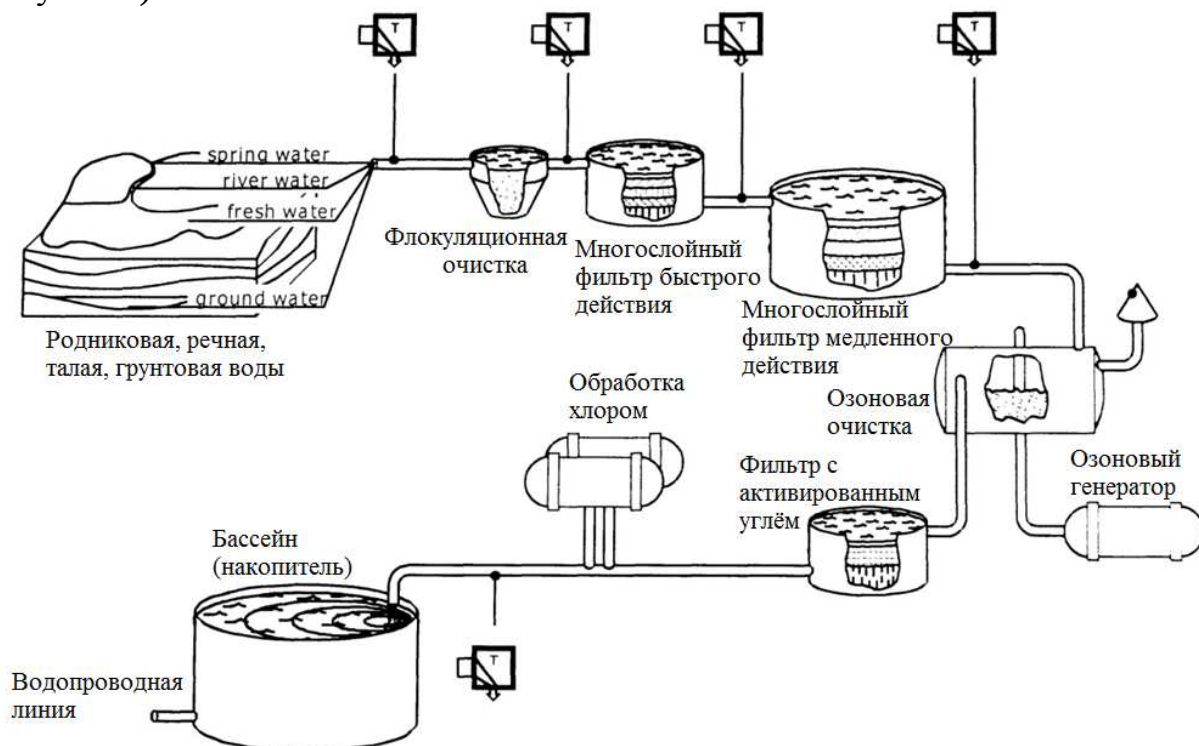


Рисунок 2 – Мутномеры (обозначены как T) в составе системы управления процессом очистки питьевой воды

В таких случаях целесообразно использовать нефелометр как удаленный датчик с распределением функций между системой и датчиком. Таким образом, датчик работает автономно в полевых условиях, периодически отсылая информацию по интерфейсу в диспетчерский пункт.

При эксплуатации мутномеров в полевых условиях наибольшие трудности вызывают воздействующие на датчик факторы:

- отсутствие ровной вертикальной/горизонтальной поверхности для надежной установки или крепления прибора, что сопряжено с возникновением погрешностей. Также в струйных моделях возможно забрызгивание внутренних деталей мутномера, в частности фотоприемников и излучателей.

- агрессивные дисперсные среды. Липкие, абразивные жидкости способны достаточно быстро загрязнить окна излучателей и фотоприемников (ФП) света, нанести на них царапины. Паразитные отложения солей на окнах излучателей и фотоприемников снижают точность измерений. Специально используемые прочищающие щетки на практике оказываются не всегда эффективными;

– низкие зимние температуры. Это приводит к неисправностям в механической и электрической частях прибора, а в крайнем случае может даже вести к замерзанию контролируемой жидкости и, следовательно, к прекращению процесса измерения и неисправности прибора.

Главной проблемой, являющейся следствием воздействия описанных выше неблагоприятных факторов, является короткий межрегламентный интервал, то есть время автономной работы датчика между сессиями технического обслуживания человеком. Возможным решением данной проблемы является использование бесконтактных струйных нефелометрических датчиков.

Проведен обзор существующих бесконтактных струйных нефелометрических датчиков. Рассмотрены: комплекс-анализатор мутности *DWA-3000A-TBD*, мутномер *Aquascap* фирмы *Sigris Photometer*, комплекс *GLI International Steady Stream 4*, нефелометр *FilterTrak* фирмы *HACH*.

Современные бесконтактные струйные измерители мутности имеют недостатки, ограничивающие их применение в полевых условиях. В частности, практически во всех рассмотренных моделях отсутствует система термостатирования или термокомпенсации. Так как в рассмотренных устройствах применяются одиночные нефелометрические фотоприемники, статические и случайные отклонения направления струи от вертикали порождают дополнительную погрешность. Уменьшение дополнительной погрешности измерения мутности, вызванной нестабильностью струи, в струйном нефелометрическом датчике можно обеспечить следующими путями:

- использованием группы фотоприемников (Рисунок 1) для измерения количества рассеиваемого струей света;
- разработкой методов нейтрализации влияния струи на показания мутномера.

Во **второй главе** даны рекомендации по установке датчиков: струйные нефелометрические датчики необходимо устанавливать на ровной, твердой поверхности таким образом, чтобы ось формирователя струи была сонаправлена с силой тяжести. Рекомендуется использовать деаэратор для удаления пузырьков воздуха из жидкости и расходомер для контроля расхода жидкости. Установлено, что для обеспечения ламинарного течения струи (для предупреждения возникновения турбулентности) допустимый расход жидкости через донную горловину не должен превышать значений порядка 0.4 л/мин. Однако различные ограничители и стабилизаторы расхода не полностью устраняют случайные девиации струи.

Описана авторская запатентованная конструкция бесконтактного струйного нефелометрического датчика (Рисунок 3). Описаны ее достоинства и отличительные особенности: многоэлементный кольцевой фотодетектор, система термостатирования, двухосевой карданный подвес. Достоинства конструкции:

- система термостатирования (датчик+нагреватель+блок управления) обеспечивает постоянную температуру внутри датчика;

– многоэлементный кольцевой фотодетектор 7 позволяет несколько скомпенсировать отклонения струи: удаляясь от одного фотоприемника, струя приближается к другому;

– двухосевой карданный подвес 2 всегда устанавливает ось датчика параллельно действию силы тяжести.

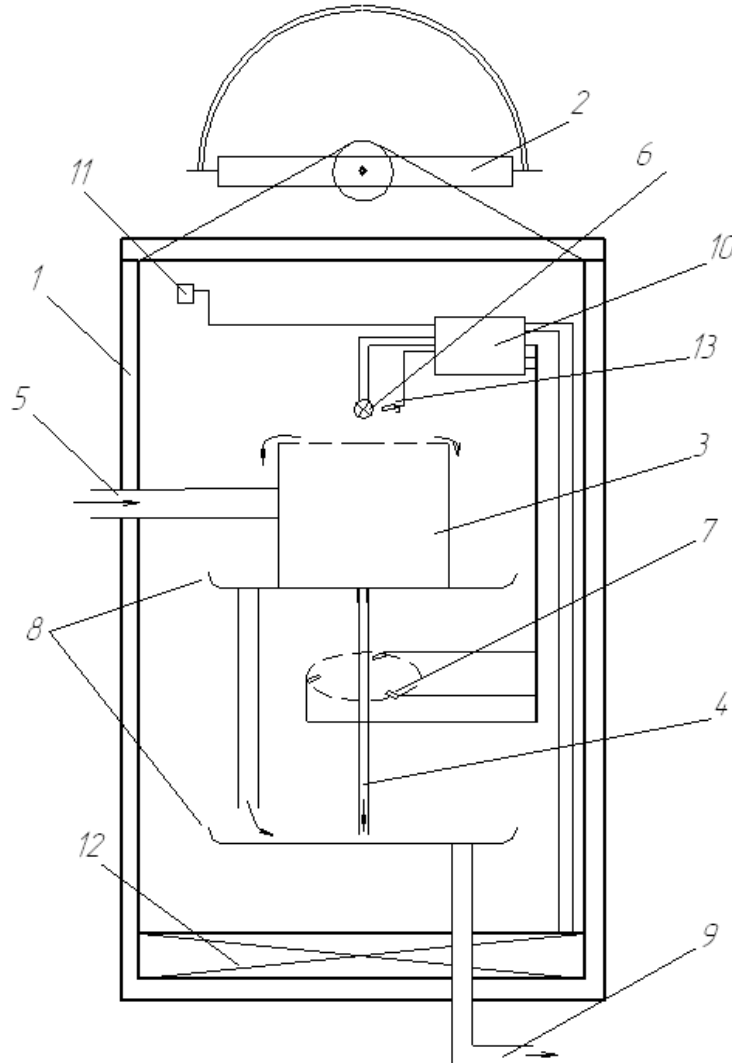


Рисунок 3 – Конструкция бесконтактного струйного нефелометрического датчика с кольцевым фотодетектором (Патент РФ на изобретение № 2463580):

- 1 – теплоизолированный корпус; 2 – двухосевой карданный подвес; 3 – сосуд-стабилизатор с донной горловиной; 4 – струя жидкости; 5 – подводящий патрубок; 6 – излучатель; 7 – многоэлементный кольцевой фотодетектор; 8 – дренажная система; 9 – патрубок для отвода жидкости; 10 – блок обработки и управления; 11 – датчик температуры; 12 – нагреватель; 13 – опорный ФП

Составлен алгоритм работы нефелометрического датчика и написана программа на языке Си, его реализующая.

Третья глава посвящена теоретическим исследованиям возможностей нейтрализации (девиаций) отклонений струи. На Рисунке 4 показано поперечное сечение струи в плоскости расположения фотоприемников струйного нефелометрического датчика с сосудом-стабилизатором, где

ф1..ф4 – фотоприемники кольцевого фотодетектора, A – идеальное положение струи, B – положение струи после смещения, R – радиус кольцевого фотодетектора, Δ – линейное отклонение струи (расстояние), α – угол (направление) отклонения струи, r – расстояние от струи до ФП, θ – угол между направлением падения света из струи и нормалью к поверхности ФП.

Разработана математическая модель многоэлементного кольцевого фотодетектора в виде зависимости его выходного сигнала от параметров отклонения струи:

$$u_i = \frac{f(I_0) \left(R - \Delta \cos \left(\frac{2\pi(i-1)}{N} - \alpha \right) \right) \cdot k_{\text{ФП}}}{\left(\Delta^2 + R^2 - 2R\Delta \cos \left(\frac{2\pi(i-1)}{N} - \alpha \right) \right)^{3/2}}, \quad (1)$$

где N – количество ФП в составе кольцевого фотодетектора, i – порядковый номер ФП, $k_{\text{ФП}}$ – коэффициент преобразования интенсивности света в фототок ФП, u_i – сигнал i -го фотоприемника, I_0 – интенсивность света источника. Суммарный сигнал всех фотоприемников в кольцевом фотодетекторе

$$u = \sum_{i=1}^N u_i.$$

Данная математическая модель разработана на основе законов геометрической оптики при следующих допущениях:

- 1) поперечное сечение струи считается точкой, излучающей свет;
- 2) освещенность поверхности ФП падающим на поверхность светом обратно пропорциональна квадрату расстояния между источником света и фотоприемником;
- 3) диаграмма направленности ФП достаточно узкая, и объем струи, попадающий в диаграмму направленности ФП, условно можно считать точкой.

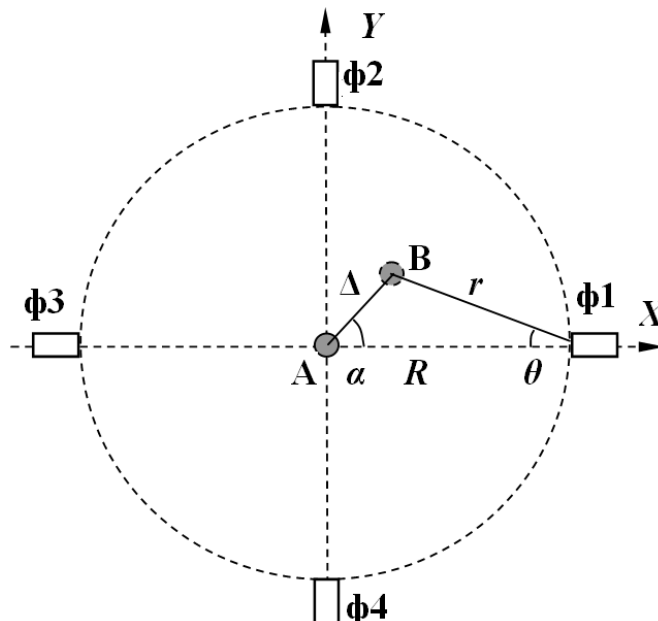


Рисунок 4 – Поперечное сечение струи в плоскости расположения фотоприемников

Установлено, что увеличение количества ФП в кольцевом фотодетекторе ведет к уменьшению неопределенности его сигнала, вызванной колебаниями струи. Однако при $N > 8$ увеличение количества фотоприемников перестает быть эффективным (Рисунок 5).

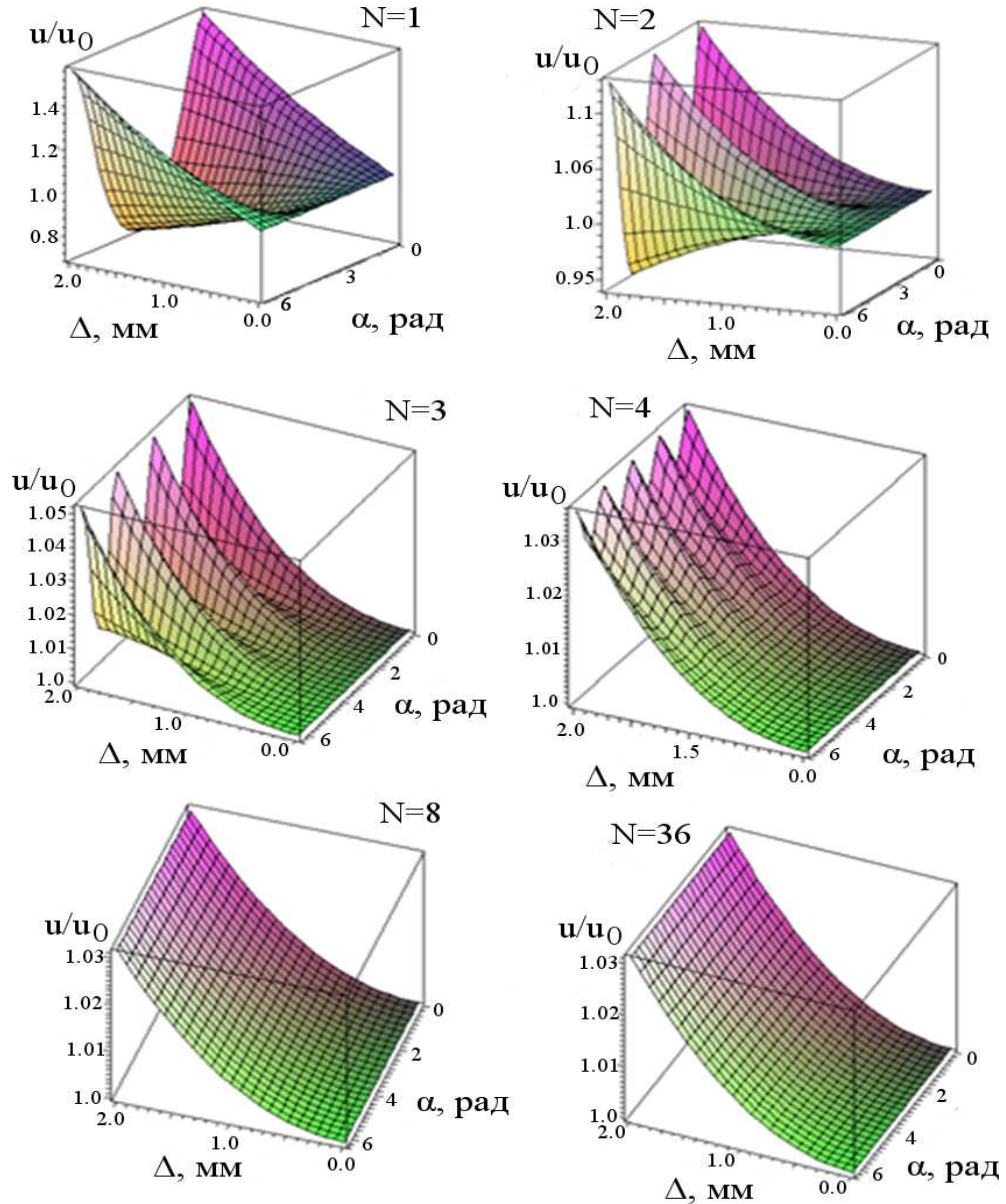


Рисунок 5 – Зависимость относительного отклонения выходного сигнала кольцевого фотодетектора от параметров отклонения струи и количества фотоприемников в кольцевом фотодетекторе (u_0 – суммарный сигнал фотоприемников при отсутствии отклонения струи)

Выявлено рациональное количество фотоприемников в кольцевом фотодетекторе – от 4 до 8. При использовании прямого суммирования сигналов ФП относительная неопределенность выходного сигнала фотодетектора при $\Delta=2$ мм и $R=10$ мм составляет 3.5% для 4-х ФП и 3% для 8-ми ФП (для сравнения для единичного ФП эта неопределенность составляет 60%).

Кроме метода с прямым суммированием, разработаны еще два метода, способные компенсировать влияние колебаний струи: метод с дополнительным

нелинейным преобразованием (извлечением квадратного корня из значения сигнала каждого ФП) и метод с вычислением поправочного коэффициента, основанном на автоматическом вычислении коэффициента, на который необходимо умножить выходной сигнал кольцевого фотодетектора для нейтрализации погрешности, вызванной отклонением струи.

При применении метода с дополнительным нелинейным преобразованием относительная неопределенность выходного сигнала фотодетектора для 4-х ФП – 0.65%, для 8-ми ФП – 0.5%. При применении метода с вычислением поправочного коэффициента это значение составляет 1.5% для 4-х ФП и 0.6% для 8-ми ФП.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям бесконтактного струйного нефелометра с многоэлементным кольцевым фотодетектором. Главной целью экспериментов являлось установление реальной зависимости сигналов фотоприемников и многоэлементного фотодетектора в целом от параметров отклонения струи. С помощью полученных экспериментальных данных была также проведена проверка адекватности разработанной математической модели. Автором была разработана лабораторная установка, внешний вид которой изображен на Рисунке 6. В качестве фотоприемников использовались четыре отечественных фотодиода типа ФД256А. Для удобства проведения эксперимента (для визуального контроля излучения) в качестве излучателя был выбран красный светодиод *DFL-3014URD-6*. На выход каждого фотодиода был подключен преобразователь «ток-напряжение» (ПТН) на основе малошумящего прецизионного операционного усилителя *OP37*. В качестве измерительного блока был использован цифровой осциллограф *Gwinstek*. Применялось модулированное (пульсирующее) оптическое излучение, что необходимо для разграничения полезного излучения, воспринимаемого фотоприемниками, и паразитной фоновой засветки. В качестве модулятора использовался генератор прямоугольных импульсов на таймере *KP1006ВИ1*.

Было проведено четыре одинаковых опыта. Выполнялось измерение выходного напряжения каждого измерительного канала (ФП+ПТН) и их суммы без отклонения струи (пробирки). Полученное значение принималось в качестве опорного, которое соответствует значению u_0 .

Во всех описанных далее измерениях использовалась водная суспензия формазина с постоянным значением мутности 100 ЕМФ. Изготовление суспензии проводилось по стандарту ГОСТ 29024-91. Затем выставлялось отклонение пробирки в соответствии с разметкой координатной сетки (по Δ и α) и опять проводились измерения выходных напряжений измерительных каналов и вычисления сумм их значений, то есть выполнялось определение параметра u . Измерения проводились для значений угла отклонения струи $\alpha=0..180^\circ$ с шагом 15° и для значений измеряемого линейного отклонения $\Delta_n=0..12$ мм, с шагом 2 мм в диапазоне $\Delta_n=0..4$ мм и с шагом 4 мм в диапазоне

$\Delta_{\text{и}}=4..12$ мм. После этого вычислялось значение $\varepsilon = \left| \frac{u}{u_0} - 1 \right| \cdot 100\%$, то есть процентное значение изменения сигнала вследствие отклонения струи жидкости. При этом значения линейного отклонения находились в диапазоне $\Delta=0..4$ мм.

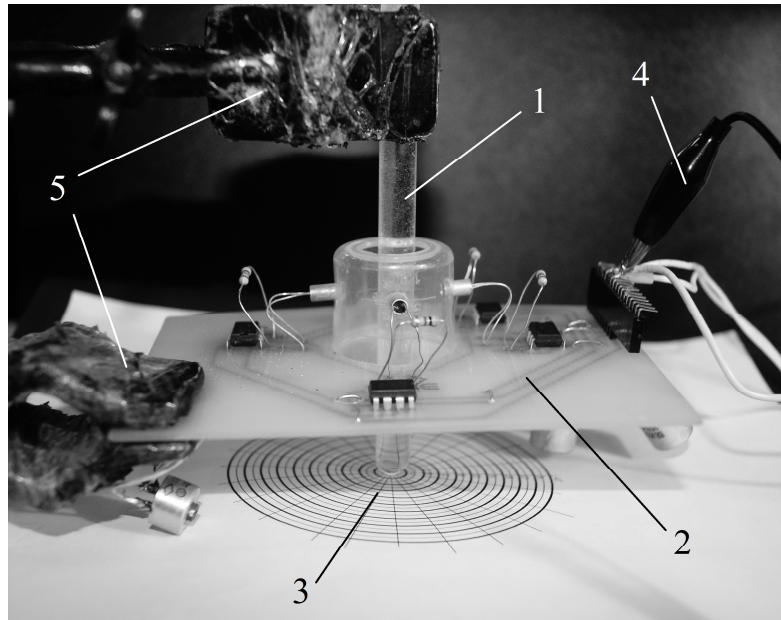


Рисунок 6 – Внешний вид лабораторной установки:

1 – пробирка с жидкостью; 2 – печатная плата с кольцевым фотодетектором и преобразователями электрического сигнала; 3 – координатная сетка; 4 – щуп осциллографа; 5 – штатив с держателями

Затем строились зависимости относительного отклонения выходного сигнала кольцевого фотодетектора ε от угла отклонения струи α при различных значениях линейного отклонения струи Δ (Рисунок 7).

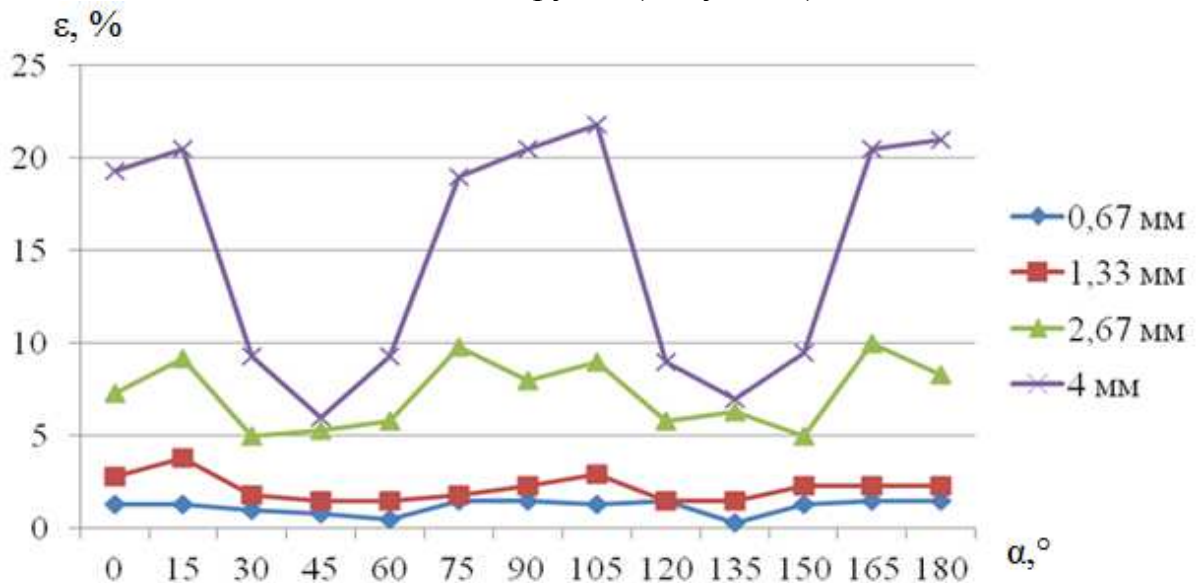


Рисунок 7 – Графики экспериментальной зависимости неопределенности выходного сигнала кольцевого фотодетектора от угла отклонения струи α и линейного отклонения струи Δ

Затем с использованием экспериментальных и теоретических данных была проверена адекватность модели с применением критерия Фишера.

Была проверена эффективность разработанных в Главе 3 методов нейтрализации влияния неустойчивости струи на выходной сигнал кольцевого фотодетектора. Метод с дополнительным нелинейным преобразованием в виде извлечения квадратного корня и метод с вычислением поправочного коэффициента эффективны применимо к опытным данным. Они позволяют снизить относительное отклонение выходного сигнала кольцевого фотодетектора, вызванное неустойчивостью струи, как минимум в два раза. Автором разработана программа на языке Си, реализующая метод с вычислением поправочного коэффициента. Она пригодна для использования, например, в контроллерах типа AVR фирмы *Atmel*.

Разработана принципиальная схема бесконтактного нефелометрического датчика, которая может быть использована в дальнейших исследованиях и производстве.

Выведена пересчетная формула для расчета мутности $\tau_{\text{изм}}$ через суммарный сигнал u нефелометрического датчика с четырьмя фотоприемниками в виде:

$$\tau_{\text{изм}} = -k_{\text{ед}} \cdot W\left(-\frac{u \cdot Y \cdot S \cdot l \cdot R_1^2}{4 \cdot J_{\text{оп}} \cdot r_{\text{пгн}} \cdot V \cdot Z \cdot k_{\text{пот}} \cdot R_2^2}\right) / l, \quad (2)$$

где $k_{\text{ед}}$ – коэффициент, зависящий от выбора единицы измерения, $W(x)$ – функция Ламберта, J – ток одного ФП в составе кольцевого фотодетектора 7, R_1 – радиус кольцевого фотодетектора, Z – коэффициент, учитывающий часть переотраженного света от частиц, распространяющуюся в направлении ФП, $k_{\text{пот}}$ – коэффициент потерь на границе среда-воздух, V – объем жидкости в струе 4, «видимый» фотоприемнику, Y – коэффициент, учитывающий, какая часть света от излучателя 1 направлена в сторону опорного фотоприемника 2, R_2 – расстояние от опорного фотоприемника до излучателя (оба параметра зависят лишь от геометрических параметров установки), S – площадь чувствительной поверхности опорного ФП (зависит от типа ФП), $J_{\text{оп}}$ – ток опорного фотоприемника, l – расстояние от излучателя до сечения струи.

Для того же датчика определена калибровочная характеристика $u = \varphi(\tau)$ и определена суммарная погрешность всего тракта измерения (Рисунок 8). Рассчитана погрешность при различных значениях мутности (в разных точках диапазона): 10, 30, 60, 90, 100 ЕМФ. Приведенная результирующая погрешность нефелометрического датчика для диапазона измеряемой мутности 0÷100 ЕМФ $\varepsilon_{\text{прив}} = 3.4\%$. При использовании метода нейтрализации влияния струи с вычислением поправочного коэффициента $\varepsilon_{\text{прив}} = 1.6\%$.

Оценена динамическая погрешность предложенного датчика. Для диапазона измерения мутности 0÷100 ЕМФ приведенная динамическая погрешность будет равна 0.5%.

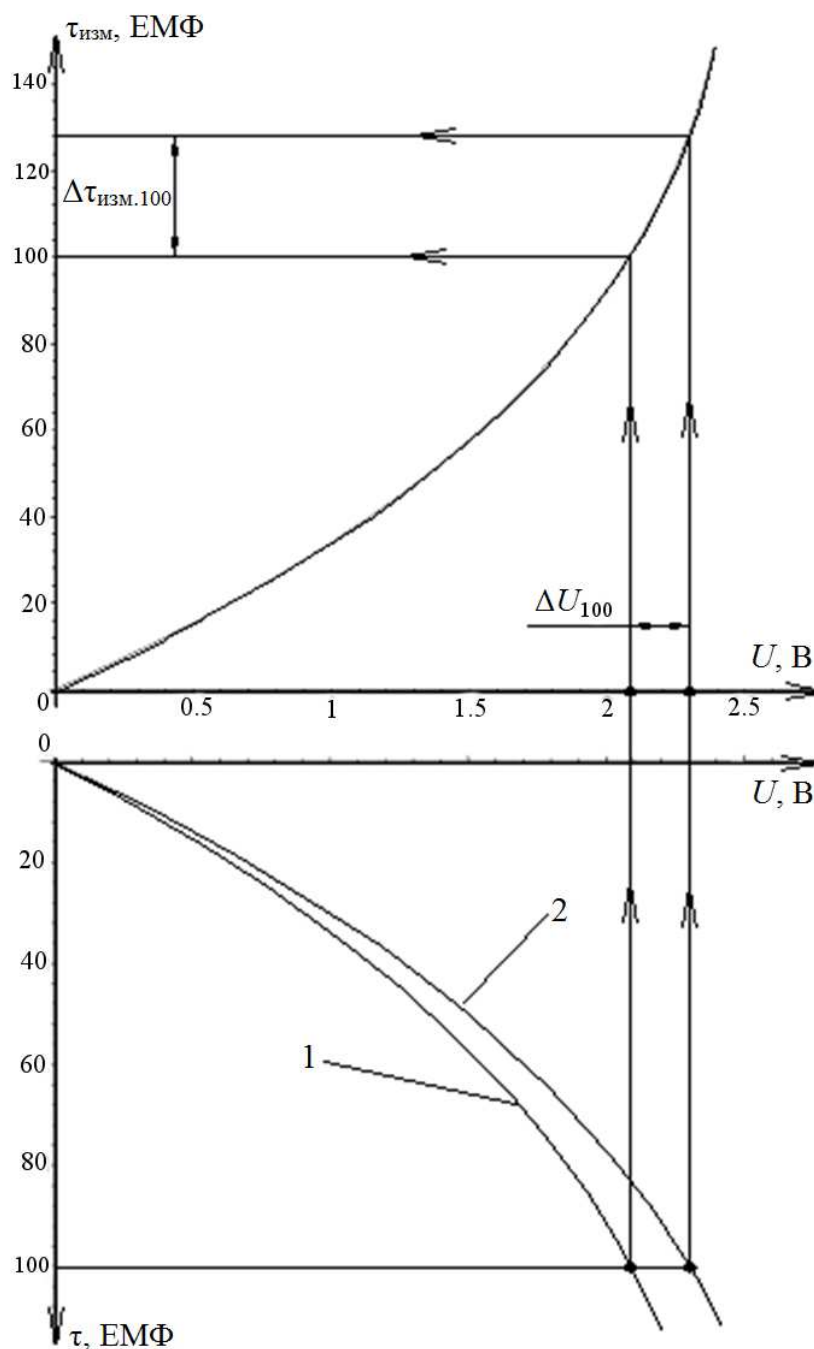


Рисунок 8 – Нахождение погрешности, вызванной расхождением зависимости $u=\varphi(\tau)$ вследствие влияния нестабильности струи: 1 – характеристика при $\Delta=0$ мм и $\alpha=0^\circ$; 2 – характеристика при $\Delta=3$ мм и $\alpha=0^\circ$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:

1. Проведен обзор существующих средств измерения мутности ЖДС. Сделано обоснование перспективности бесконтактных струйных нефелометров с кольцевым фотодетектором для полевых измерений. Рассмотрены место и роль датчика мутности в составе крупных систем технологического контроля и управления. Определены требования к полевым бесконтактным нефелометрическим датчикам.

2. Разработана математическая модель многоэлементного кольцевого фотодетектора в виде зависимости его выходного сигнала от параметров отклонения струи. Установлено, что рациональное количество ФП в его составе равно восьми: при $\Delta=2$ мм, $R=10$ мм и количестве фотоприемников $N=8$ достигается наименьшее значение отклонения уровня выходного сигнала – 3%. При дальнейшем увеличении числа ФП результат не улучшается. При 4-х ФП компенсация отклонения сигнала также имеет неплохие результаты (3,5% при тех же условиях), следовательно, такое количество ФП также может быть использовано на практике.

3. Разработаны методы нейтрализации влияния струи, способные уменьшить влияние отклонений струи на результат измерений: метод с дополнительным нелинейным преобразованием (снижает относительное отклонение выходного сигнала кольцевого фотодетектора с восемью ФП до 0,5% при $\Delta=2$ мм, $R=10$ мм) и метод с вычислением поправочного коэффициента (1% при тех же условиях).

4. Разработана и запатентована структура бесконтактного струйного нефелометрического датчика с многоэлементным кольцевым фотодетектором, системой термостатирования и карданным подвесом. Наличие данных элементов способно улучшить эксплуатационную надежность датчика, в частности, за счет устранения статических отклонений струи.

Разработана принципиальная схема бесконтактного струйного датчика мутности. Определена калибровочная характеристика этого датчика, с помощью которой рассчитана приведенная дополнительная погрешность измерения мутности, обусловленная нестабильностью струи. Приведенная дополнительная погрешность ($\Delta=1$ мм, $N=4$, $R=10$ мм) для диапазона измеряемой мутности $0 \div 100$ ЕМФ $\varepsilon_{\text{прив}}=3.4\%$. Приведенная погрешность при использовании метода с вычислением поправочного коэффициента нейтрализации влияния нестабильности струи в диапазоне мутности $0 \div 100$ ЕМФ $\varepsilon_{\text{прив}}=1.6\%$. Динамическая погрешность в этом же диапазоне равна 0.5%. Данные значения погрешностей удовлетворяют типовым требованиям к элементам систем управления технологическими процессами.

5. Адекватность разработанной математической модели многоэлементного кольцевого фотодетектора подтверждена серией экспериментов с использованием специального макета бесконтактного струйного нефелометрического датчика с последующим применением критерия Фишера.

Разработана программа реализации метода нейтрализации влияния струи с вычислением поправочного коэффициента для микроконтроллеров AVR.

При апробировании на опытных данных установлено, что применение обоих методов нейтрализации влияния струи эффективно во всем диапазоне изменения параметров отклонения струи. Установлено, что данные методы обладают примерно одинаковой эффективностью.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Дмитриев О.А.** Струйный нефелометр как средство поточного контроля качества воды / О.А.Дмитриев, В.С.Фетисов // Экологические системы и приборы. – 2012. – №12. с. 3 – 9.
2. **Дмитриев О.А.** Перспективные поточные измерители мутности воды / О.А.Дмитриев // Научное обозрение. – 2012. – №6. с. 300 – 304.
3. **Дмитриев О.А.** Методы нейтрализации влияния отклонений струи в бесконтактных струйных нефелометрах / О.А.Дмитриев, В.С.Фетисов, О.В.Мельничук // Экологические системы и приборы. – 2013. – №5. с. 38 – 43.

Патенты:

4. Пат. 2463580 Российская Федерация. МПК G 01 N 21/49. Бесконтактный нефелометр с карданным подвесом / Фетисов В.С., Дмитриев О.А., заявитель и патентообладатель Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – №2011124652/28, заявл. 16.06.2011, опубл. 10.10.2012, Бюл. №28.

В других изданиях:

5. **Дмитриев О.А.** Нейтрализация влияния отклонения струи в бесконтактных струйных нефелометрах / О.А.Дмитриев, З.И.Харисова // Материалы IX международной научно-практической конференции «VĚDA A TECHNOLOGIE: KROK DO BUDOUCNOSTI – 2013». – Praha, Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2013. – с. 34 – 38.
6. **Дмитриев О.А.** Поточный контроль качества воды с помощью струйных нефелометров / В.С.Фетисов, О.А.Дмитриев, З.И.Харисова // Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сборник статей IV Международной научно-практической конференции / редкол.: Л.В.Шульга [и др.]. – Курск, Юго-Зап. Гос. Ун-т., 2012. – 336 с.
7. **Дмитриев О.А.** Средства измерения концентрации жидких дисперсных сред / В.С.Фетисов, О.А.Дмитриев // Альманах современной науки и образования. - 2010. - №11(42) : в 2-х ч. Ч. 2. – Тамбов: Грамота, 2010. – с. 104 – 106.
8. **Dmitriyev O.** Improvements in contactless turbidimeters with free-falling stream technology/ O.Dmitriyev, V.Fetisov // Proceedings of XX IMEKO World Congress.
9. **Dmitriyev O.** Effective cleaning of windows in field turbidimeters / O.Dmitriyev, V.Fetisov, O.Melnichuk // Proceedings of XX IMEKO World Congress.

Диссертант



О.А.Дмитриев

ДМИТРИЕВ Олег Анатольевич

БЕСКОНТАКТНЫЙ ДАТЧИК МУТНОСТИ
ЖИДКИХ СРЕД С МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМ
КОЛЬЦЕВЫМ ФОТОДЕТЕКТОРОМ ДЛЯ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 24.04.2014. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 274.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12