

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук
Мишагина Константина Геннадьевича на диссертацию
Купалова Дмитрия Сергеевича, выполненную на тему:
«Разработка и исследование спектро스코па для атомных
стандартов частоты фонтанного типа»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.15 – «Метрология и метрологическое обеспечение»

Актуальность темы представленной диссертационной работы вызвана перспективами широкого использования стандартов частоты фонтанного типа на холодных атомах рубидия в качестве хранителей единиц времени и частоты в эталонных комплексах, что в свою очередь делает особо важными задачи улучшения нестабильности частоты и расширения диапазона рабочих температур стандартов данного типа.

В настоящее время для хранения единиц времени, частоты и формирования шкал времени используются водородные генераторы с суточной нестабильностью $< (3-5) \cdot 10^{-16}$. Главным недостатком таких стандартов является медленное изменение (дрейф) выходной частоты, которое ограничивает метрологические характеристики прибора. Уменьшение погрешности хранения единиц времени и частоты связано с совершенствованием и созданием новых технических средств, имеющих минимальный дрейф и способных месяцами работать без перезапуска. Этим требованиям отвечают рубидиевые стандарты частоты фонтанного типа.

Следует отметить, что на сегодняшний день в основе определения секунды используется микроволновый переход атома ^{133}Cs . Однако, в отличие от атомов ^{133}Cs атомы ^{87}Rb обладают значительно меньшим столкновительным сдвигом, что делает рубидиевые стандарты частоты фонтанного типа более перспективными по сравнению с цезиевыми «фонтанами».

Поэтому диссертационная работа Купалова Д.С., **цель** которой заключается в уменьшении нестабильности хранителя единицы времени и частоты фонтанного типа на основе охлажденных атомов рубидия, является актуальной. Полученные новые научные результаты имеют существенное значение для широкой группы потребителей, в первую очередь, навигационной системы ГЛОНАСС в части обеспечения единства время-частотных измерений, а также для совершенствования эталонной базы в области хранения и воспроизведения единиц времени и частоты.

Для достижения поставленной цели автором определена **основная научная задача**:

Разработка и исследование спектроскопа стандартов частоты фонтанного типа, обеспечивающего достижение нестабильности $(1-2) \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 16 суток.

Поставленная задача потребовала решения следующих трех **частных научных задач**:

1. Оценка необходимого числа рабочих атомов и значения отношения сигнал-шум для достижения рубидиевым фонтаном заданной нестабильности.
2. Разработка магнитооптической ловушки, используемой как источник холодных атомов рубидия-87 и исследование импульсного режима ее работы.
3. Разработка перестраиваемого СВЧ резонатора.

Объектом исследований является хранитель единиц времени и частоты фонтанного типа на основе охлажденных атомов рубидия.

Предметом исследований являются методы определения метрологических характеристик рубидиевых стандартов частоты фонтанного типа, используемых в качестве хранителей единиц времени и частоты.

Диссертация **состоит из** введения, четырех глав, в которых автор доказывает основные научные положения выносимые на защиту, заключения, списка цитируемой литературы из 71 наименования и двух приложений.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обозначена практическая значимость и личный вклад автора, приведен краткий анализ применения квантовых стандартов в области хранения единиц времени и частоты.

В **главе 1** рассмотрен общий принцип построения квантовых стандартов частоты и метод спектроскопии Рэмси, лежащий в основе атомных «фонтанов». Рассмотрен цикл работы стандарта частоты фонтанного типа и перечислены его основные составные части с указанием их функционального назначения.

В **главе 2** подробно рассмотрена конструкция атомного спектроскопа. Описаны фундаментальные принципы лазерного охлаждения нейтральных атомов, позволяющего исключить эффект Доплера первого порядка в атомных «фонтанах». На основе анализа физических эффектов, приводящих к сдвигу измеряемой частоты, сформулированы технические требования к блокам и узлам спектроскопа. Также рассмотрены конструктивно-технологические решения, принятые в атомном спектроскопе, позволяющие достичь хранителем единиц времени и частоты заданных метрологических характеристик.

В **главе 3** изложены результаты экспериментальных исследований отдельных узлов, блоков, систем спектро스코па, а также описана процедура измерения одной из важнейших характеристик атомного «фонтана» – эффективной температуры атомного облака, которая составила < 3 мК.

Раздел 3.1 посвящен результатам экспериментов, которые подтверждают необходимость использования источника атомов на основе магнитооптической ловушки в составе спектроскопа. Подробно описана схема экспериментальной установки, позволяющая измерить основные характеристики источника: скоростное распределение атомов в пучке, расходимость пучка атомов и плотность потока атомов ^{87}Rb .

Раздел 3.1.5. посвящен описанию импульсного режима работы источника медленных атомов на основе магнитооптической ловушки. На основе полученных автором экспериментальных результатов следует доказательство **научного положения № 2**, выносимого на защиту:

Импульсный режим работы вспомогательной магнитооптической ловушки увеличивает на 20 % число детектируемых атомов по сравнению с непрерывным режимом работы.

В разделе 3.3 продемонстрированы результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов, позволяющим рассчитать внутренние размеры основного СВЧ резонатора и получить более разряженный спектр его собственных частот. Из приведенной в данном разделе уникальной конструкции перестраиваемого СВЧ резонатора, а также результатов экспериментальных исследований следует доказательство **научного положения № 3**, выносимого на защиту:

Применение перестраиваемого СВЧ резонатора в конструкции спектроскопа позволяет адаптировать атомный «фонтан» к эксплуатации в помещениях с температурой воздуха от 21 до 28 °С.

Глава 4 посвящена нестабильности частоты (СКДО) стандартов времени и частоты, а также методам ее измерения. В разделах 4.3 и 4.4 изложены результаты экспериментальных исследований атомного «фонтана», направленных на оценку его нестабильности частоты. График СКДО рубидиевого «фонтана» Rb1 относительно рубидиевого «фонтана» Rb2, построенный на основании измерительной информации, полученной на интервале времени наблюдения 5 месяцев, доказывает выносимое на защиту **научное положение № 1**:

Применение разработанного атомного спектроскопа обеспечивает нестабильность рубидиевого хранителя единиц времени и частоты фонтанного типа не более $2 \cdot 10^{-16}$ за время измерения 16 суток.

В **заключении** кратко и объективно изложены основные результаты выполненной диссертационной работы.

В **приложении А** приводится паспорт государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018, который подтверждает внедрение атомных «фонтанов» с разработанным и исследованным атомным спектро스코пом в состав государственного эталона.

В **приложении Б** дается протокол исследований метрологических характеристик первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени подтверждающий полученные в диссертационном исследовании результаты.

Обоснованность и **достоверность** научной составляющей полученных результатов подтверждается экспериментальными методиками, выполненными на основе калиброванного и сертифицированного измерительного оборудования, а также современных прецизионных приборов. Кроме того, большинство полученных экспериментальных результатов находятся в согласии с предварительно проведенными теоретическими исследованиями.

В процессе исследований соискатель получил **новые и оригинальные результаты**:

1. *Впервые* предложен и реализован импульсный режим работы вспомогательной магнитооптической ловушки, увеличивающий на 20 % число детектируемых атомов по сравнению с непрерывным режимом работы.
2. *Впервые* разработан и применен перестраиваемый СВЧ резонатор, позволивший адаптировать атомный «фонтан» к эксплуатации в помещениях с температурой воздуха от 21 до 28 °С.

В **публикациях** автора, три из которых в изданиях, рекомендованных ВАК, отражены основные научные результаты выполненного автором диссертационного исследования. Кроме того, основные положения и результаты диссертации докладывались на 2 международных и 3 всероссийских научных конференциях. Полный список работ, опубликованных автором по теме диссертации, приведен в автореферате.

Практическая значимость и ценность выполненной научной работы обусловлена тем, что атомные спектроскопы со вспомогательными магнитооптическими ловушками и перестраиваемыми СВЧ резонаторами входят в состав хранителя единиц времени и частоты на основе «фонтанов» атомов рубидия (Rb1 и Rb2) из состава ГЭТ1-2018.

Личный вклад автора заключается в том, что все экспериментальные и теоретические результаты, представленные в настоящей работе, получены автором лично. Автор принимал активное участие в разработке и исследовании атомного спектроскопа, его сборке и отладке, в частности, вспомогательной ловушки, используемой как источник медленных атомов и перестраиваемого СВЧ резонатора.

Тема и содержание диссертационной работы соответствует специальности 05.11.15 – «Метрология и метрологическое обеспечение».

Диссертация соответствует общим требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней.

Содержание автореферата отражает основные положения диссертационной работы.

В процессе рецензирования диссертационной работы возникли следующие замечания:

1. В положении №1 автор утверждает, что «применение разработанного атомного спектро스코па обеспечивает нестабильность рубидиевого хранителя единиц времени и частоты фонтанного типа не более $2 \cdot 10^{-16}$ за время измерения 16 суток», однако из текста диссертации не понятно, почему для характеристики нестабильности выбран интервал 16 суток, который не является рекомендованным согласно ГОСТ 8.567.
2. В работе подробно описана конструкция и характеристики СВЧ резонатора, позволяющего осуществлять перестройку в достаточно широком диапазоне – 5 МГц, однако, не обоснован выбор диапазона температур в помещении 21 – 28 °С.
3. К сожалению, автор не приводит сравнения характеристик разработанных рубидиевых «фонтанов» с «цезиевыми» фонтанами, входящими в состав ГЭТ 1-2018. Сравнение графиков СКДО позволило бы подчеркнуть преимущества использования рубидиевых «фонтанов».
4. Следует отметить, что в тексте присутствуют названия метрологических характеристик, не точно соответствующие ГОСТ 8.567, а также опечатки. Например, в названии главы 4, а также на страницах 6, 9, 22, 64, 90, 91 употребляется термин «нестабильность» вместо «нестабильность (меры) частоты», на страницах 9, 91, 95 и рисунках 63 и 65 вместо «интервал времени измерения» употребляется «время измерения».

Отмеченные замечания не снижают общего положительного впечатления от работы. Диссертация написана понятно, аккуратно оформлена. По каждой главе и диссертации в целом сделаны выводы.

Заключение

Диссертация Дмитрия Сергеевича Купалова является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача, имеющая важное практическое применение. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

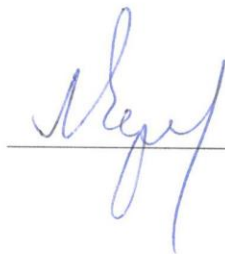
По моему мнению, диссертационная работа «Разработка и исследование спектро스코па для атомных стандартов частоты фонтанного типа» удовлетворяет требованиям абзаца 2 пункта 9 постановления Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 «Положение о порядке присуждения учёных степеней» для учёной степени кандидата наук, а её автор – Купалов Дмитрий Сергеевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.15 – «Метрология и метрологическое обеспечение».

Официальный оппонент, к.ф.-м.н., доцент,
доцент кафедры теории колебаний и
автоматического регулирования
радиофизического факультета ННГУ

 Мишагин К.Г.

« 17 » октября 2018 г.

Подпись Мишагина К.Г. заверяю.
Ученый секретарь Ученого совета ННГУ,

 Черноморская Л.Ю.

« 17 » октября 2018 г.

