

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.016.01  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г. И. БУДКЕРА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,  
подведомственного Минобрнауки России, по диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 09.10.2020 г. № 5

О присуждении ПУРЫГА ЕКАТЕРИНЕ АЛЕКСАНДРОВНЕ ученой степени  
**кандидата технических наук.**

Диссертация «**Системы регистрации сигналов томсоновского рассеяния в плазменных ловушках ИЯФ СО РАН**» по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 30.06.2020 г., выписка из протокола заседания № 3 диссертационным советом Д 003.016.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, подведомственного Минобрнауки России, 630090, проспект академика Лаврентьева, 11, г. Новосибирск (Приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012 г., приказ о частичном изменении состава совета № 569/нк от 01.07.2019 г.).

**Соискатель** – Пурыга Екатерина Александровна 1986 года рождения, работает научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, подведомственного Минобрнауки России. В 2009 году соискатель окончила Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Новосибирский государственный технический университет.

Диссертация выполнена в научно-исследовательской лаборатории 9 - 1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, подведомственного Минобрнауки России.

**Научный руководитель** – доктор технических наук, Хильченко Александр Дмитриевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирское отделение Российской академии наук, научно-исследовательская лаборатория 9 – 1, ведущий научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

1. Семенов Игорь Борисович, кандидат физико-математических наук, доцент, Частное учреждение Росатома «Проектный Центр ИТЭР», Отдел автоматизированных систем управления ИТЭР, начальник отдела;
2. Гусев Василий Константинович, доктор физико-математических наук, Старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук, лаборатория физики высокотемпературной плазмы, главный научный сотрудник.

Оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), г. Москва. В своем положительном заключении, подписанном Соколовым Михаилом Михайловичем, кандидатом физико-математических наук, начальником лаборатории информационно-управляющих систем курчатовского комплекса термоядерного энергетики и плазменных технологий (ККТЭиПТ), указала, что «диссертационная работа Пурыга Е.А. «Системы регистрации сигналов томсоновского рассеяния в плазменных ловушках ИЯФ СО РАН» отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Пурыга Екатерина Александровна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 — «Приборы и методы экспериментальной физики». Диссертация, автореферат диссертации рассмотрены и обсуждены на открытом научном семинаре Отдела Т-10 Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт», а отзыв обсужден и одобрен открытым голосованием (единогласно) на заседании Ученого совета по физике токамаков НИЦ «Курчатовский институт» 27 августа 2020 года (протокол 27 августа 2020 г. №84)».

Соискатель имеет 45 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 19 работ, 12 из них опубликованы в материалах международных и всероссийских конференций и 7 работ, опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Работы посвящены разработке электронного оборудования и его применению на физических установках. Авторский вклад Пурыга Е. А. в подавляющем большинстве является существенным и определяющим. **Наиболее значимые работы по теме диссертационной работы:**

1. Е.А. Пурыга, А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев, С.В. Иваненко, А.А. Иванова. Многофункциональный быстродействующий регистратор ADC12500. // Приборы и техника эксперимента, 2012, № 2, с. 75-83.
2. E.A. Puryga, Yu.S. Sulyaev, A.D. Khilchenko, A.N. Kvashnin, S.V. Polosatkin, A.F. Rovenskikh, A.V. Burdakov, E.S. Grishnyaev // Multi-Purpose Fast Neutron Spectrum Analyzer with Real-Time Signal Processing – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, V. 720, 2013, Pages 23–25.
3. А.А. Иванова, П.В. Зубарев, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, А.И. Котельников, Д.В. Моисеев, Е.А. Пурыга, А.Д. Хильченко, В.А. Хильченко, В.Г. Швырев. Регистратор импульсных сигналов для диагностики высокотемпературной плазмы // Приборы и техника эксперимента, 2016, № 3, С. 24 – 31.
4. Е. А. Пурыга, А. Д. Хильченко, А. Н. Квашнин, П. В. Зубарев, В.В. Приходько, С. В. Иваненко, Д. В. Моисеев, А. А. Касатов, В. В.

- Максимов, Л.Н. Вячеславов // Измерительный комплекс для диагностики Томсоновского рассеяния установок ГОЛ-3 и ГДЛ - Приборы и техника эксперимента. №6, 2018, Стр. 34-42.
5. Е.А. Пурыга, С.В. Иваненко, А.А. Лизунов, А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев, Д.В. Моисеев // Быстродействующий регистратор на основе технологий масштабно-временного преобразования для диагностики томсоновского рассеяния на установке ГДЛ, - ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, стр. 77-88.
  6. E.A. Puryga, A.A. Lizunov, S.V Ivanenko, A.D. Khilchenko, Kvashnin, A.N., P.V. Zubarev, D.V. Moiseev // Data acquisition system for thomson scattering diagnostics on GDT – IEEE Transactions on Plasma Science, 2019 Volume 47, Issue 6, Pages 2883-2889.
  7. Lizunov A., Berbassova T., Khilchenko A., Maximov V., Puryga E., Zubarev P. // Integrated polychromator and data acquisition system for the Thomson scattering diagnostic (2019) Journal of Instrumentation, 14 (7), статья № C07010.

**На диссертацию поступили 2 отзыва и один дополнительный отзыв на автореферат.** Первый отзыв подписан Семеновым Игорем Борисовичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом, начальником отдела автоматизированных систем управления ИТЭР, частного учреждения Росатома «Проектного Центра ИТЭР». В отзыве кратко описывается содержание диссертации, перечисляются ее наиболее значимые результаты. В отзыве также имеются замечания, которые не снижают общей положительной оценки работы и квалификации автора. Указывается, что представленная диссертационная работа Е.А. Пурыга является законченным научным исследованием и полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям.

Второй отзыв подписан Гусевым Василием Константиновичем, доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником лаборатории физики высокотемпературной плазмы федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе. В отзыве приводиться краткий обзор содержания диссертации и отмечается практическая значимость представленных в диссертации систем регистрации. В отзыве также приводится ряд замечаний, которые не меняют общей положительной оценки диссертационной работы. Сказано, что результаты работы опубликованы в высокорейтинговых научных журналах, в том числе из списка ВАК РФ, а также неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях. А ее автор, заслуживает присуждения научной степени кандидата технических наук.

В дополнительном отзыве на автореферат отмечается, что работа посвящена актуальной тематики – разработке широкополосных многоканальных систем регистрации экспериментальных данных в виде сигналов томсоновского рассеяния. Автор Голицын Александр Андреевич, кандидат технических наук, сотрудник Конструкторско-технологического института прикладной микроэлектроники указывает, что автореферат содержит новые результаты и

положения. В отзыве также имеется ряд замечаний, которые не снижают общего высокого уровня диссертационной работы. Отмечено, что работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата технических наук.

**Выбор официальных оппонентов** обосновывается их компетентностью в соответствующей отрасли науки, наличием публикаций по теме защищаемой диссертации и их согласием на оппонирование. Выбор ведущей организации обусловлен широкой известностью своими достижениями в соответствующей отрасли науки и способностью определить научную и практическую ценность защищаемой диссертации.

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований **разработаны**:

- Синхронные многоканальные системы сбора данных для диагностических комплексов томсоновского рассеяния установок ГОЛ-3 и ГДЛ ИЯФ СО РАН на основе быстродействующих регистраторов формы импульсов ADC12500. Данные измерений, полученные при их помощи, впервые сделали возможными ряд исследований. На ГОЛ-3 были реализованы измерения температуры и плотности электронов по сигналам рассеяния с многократно превышающим их по амплитуде уровнем фонового излучения плазмы. На ГДЛ система регистрации томсоновского рассеяния впервые обеспечила достоверные измерения электронной температуры 1 кэВ, достигнутой в открытой магнитной ловушке с использованием микроволнового нагрева плазмы;
- Система регистрации сигналов томсоновского рассеяния нового поколения, включающая в свой состав: малошумящие детекторы на основе лавинных фотодиодов, быстродействующие регистраторы для фиксации высокочастотной компоненты рассеянного сигнала и восьмиканальные регистраторы для фиксации низкочастотной фоновой компоненты. Система регистрации оптимизирована для использования в диагностиках томсоновского рассеяния с большим числом пространственных точек наблюдения, характерных для современных крупномасштабных экспериментов по физике плазмы и УТС.

#### **Предложены:**

- уникальные возможности регистратора ADC12500, основанные на программном управлении параметрами измерительных трактов (амплитудный диапазон, частота дискретизации) и режимами работы (однократный или страничный). Это позволяет интегрировать систему регистрации в диагностику томсоновского рассеяния с импульсно-периодическими лазерами;
- возможность программной модификации алгоритма обработки данных регистратора ADC12500 при помощи загружаемого в ПЛИС цифрового узла конфигурационного файла. Это позволяет использовать его не только в качестве основного элемента измерительного комплекса томсоновского рассеяния, но и в других диагностиках;
- нетрадиционный подход к построению систем регистрации диагностического комплекса томсоновского рассеяния, основанный на методе масштабно-временного преобразования. Это позволило создать инновационную систему регистрации сигналов, оптимизированную для размещения на борту спектрометра томсоновского рассеяния или аналогичного прибора;

- схемотехническое решение для быстродействующего детектора излучения ближнего ИК диапазона на основе лавинных фотодиодов и усилителей, благодаря которому основной вклад в шумовые характеристики детектора вносит шумовая компонента тока лавинного фотодиода.

**Доказана** перспективность использования разработанных автором систем регистрации в исследованиях по физике плазмы и УТС в составе диагностических комплексов современных и будущих термоядерных установок.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

Внесен существенный вклад в развитие метода высокоскоростной регистрации импульсных сигналов малой амплитуды на основе принципов прямой оцифровки, а также масштабно-временного преобразования. Проведён сравнительный анализ технологий и решений в области микроэлектроники, актуальных на сегодняшний день для решения этой задачи. Разработанные подходы и методики обладают значительной вариативностью и имеют большой потенциал развития. Применение регистраторов на основе масштабно-временного преобразования теоретически способно значительно улучшить амплитудное разрешение и динамические характеристики системы.

Разработанные автором системы регистрации данных для лазерных диагностик плазмы будут активно использоваться в экспериментах по измерению температуры и плотности плазмы для получения новых физических результатов, которые могут внести существенный вклад развитие физики плазмы и УТС.

**Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)** использован комплекс существующих базовых методов и экспериментальных методик регистрации сигналов томсоновского рассеяния.

**Изложены** основные этапы развития, используемых в диагностике томсоновского рассеяния методов регистрации сигналов рассеяния. Рассмотрены принципы построения современной аппаратуры регистрации для диагностики томсоновского рассеяния.

**Раскрыты** основные проблемы, возникающие при реализации различных методов построения аппаратуры регистрации для диагностических комплексов томсоновского рассеяния.

**Изучены** возможности улучшения характеристик аппаратуры регистрации за счет использования в цифровом узле потоковой обработки данных дополнительных процедур калибровки и фильтрации при построении аппаратуры регистрации.

**Рассмотрены** основные возможности увеличения величины соотношения сигнал/шум в системе регистрации на основе метода масштабно-временного преобразования.

**Проведена модернизация** традиционных принципов и подходов к построению систем регистрации экспериментальных данных для диагностики томсоновского рассеяния. Для построения аппаратуры регистрации традиционно используются: интегрирующий метод и метод прямой оцифровки. Однако регистраторы на основе матриц емкостных накопителей являются технически конкурентоспособной альтернативой, более выгодной с экономической точки зрения и энергоэффективности.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что разработаны и внедрены:**

- Системы регистрации диагностики томсоновского рассеяния установок ГОЛ-3 и ГДЛ, построенные на основе восьмиканальных измерительных модулей АЦП прямого преобразования с амплитудным динамическим диапазоном 12 бит и частотой дискретизации до 500 МГц. Система позволяет фиксировать форму импульса рассеянного излучения длительностью 20-50 нс на фоне излучения плазмы в 2-3 раза, превышающего по амплитуде полезный сигнал. Данные системы регистрации используются на установках ГОЛ-3 и ГДЛ уже более восьми лет;
- Регистраторы формы импульса ADC12500 с программной конфигурацией алгоритма обработки данных, позволяющей их широкое применение в диагностических комплексах физических установок. Регистраторы используются в нейтронной диагностике, гамма-спектроскопии, регистрация излучения плазмы на двойной плазменной частоте на установках ИЯФ СО РАН;
- Система регистрации модернизированной диагностики томсоновского рассеяния ГДЛ, состоящая из шести восьмиканальных измерительных модулей АЦП с амплитудным динамическим диапазоном 10 бит и частотой дискретизации до 5 ГГц. Измерительные модули АЦП построены на базе матриц емкостных накопителей, реализующих принцип масштабно-временного преобразования. Система позволяет фиксировать форму импульса длительностью около 10 нс при частоте следования измерений до 10 Гц. Ввод системы регистрации в диагностический комплекс томсоновского рассеяния на установке ГДЛ планируется IV квартале 2020 г.

**Определены** перспективы использования разработанных автором диссертации систем на экспериментальных комплексах ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, на импульсных электрофизических установках и исследовательских комплексах других исследовательских организаций и центров.

**Создана** система практических рекомендаций по области применимости систем регистрации, построенных на основе различных методов. Метод, основанный на интегрировании сигналов ТР, наиболее подходит для использования на плазменных установках, на которых фоновый сигнал, обусловленный собственным излучением плазмы, фактически отсутствует или же спектры полезного и фонового сигнала существенно различаются. Для установок, в которых сигнал рассеяния сопровождается мощной фоновой компонентой, предпочтительнее использование регистраторов, построенных на основе быстродействующих АЦП. Регистраторы на основе матриц емкостных накопителей являются технически конкурентоспособной альтернативой, более выгодной с экономической точки зрения.

**Представлены** предложения по дальнейшему развитию систем регистрации данных для диагностических комплексов томсоновского рассеяния и улучшению их характеристик. В качестве примера можно указать концепцию диагностики томсоновского рассеяния с лазерным импульсом малой длительности ~1 нс и высокой частотой повторения с пространственной локализацией области

наблюдения за счёт времяпролетной задержки импульса (LIDAR). Ярким примером такого подхода является диагностика на токамаке JET.

**достоверность результатов исследования** и разработок автора диссертации подтверждается их практическим использованием в экспериментальных исследованиях по физике плазмы и УТС на установках ИЯФ СО РАН.

**теория** построена на известных, проверяемых фактах и согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации.

**идея базируется** на анализе практики и обобщения передового опыта.

**использованы** сравнения характеристик, разработанных автором диссертации систем регистрации, с мировыми аналогами.

**установлено** качественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

**использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации.

#### **Личный вклад соискателя:**

состоит в разработке структурных решений, положенных в основу построения приборной составляющей созданных систем. Автор занимался аппаратной разработкой большинства элементов систем регистрации томсоновского рассеяния. Автором были реализованы алгоритмы цифровой обработки сигналов, выполняемые на базовых логических элементах вентильных матриц (ПЛИС). Автор занимался тестированием, отладкой и вводом в эксплуатацию всех элементов систем регистрации.

На заседании 09.10.2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Пурыга Е. А. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 4 доктора наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту «0» человек, проголосовали: за - 16, против - 0, воздержавшихся - 0.

Председатель диссертационного совета Д 003.016.01 д.ф.-м.н.



Е. Б. Левичев

Ученый секретарь диссертационного совета Д 003.016.01 д.ф.-м.н.

П. А. Багрянский

09. 10. 2020 г.