

УТВЕРЖДАЮ  
Директор Лаборатории физики высоких энергий  
им. В.И. Векслера и А.М. Балдина  
В.Д. Кекелидзе  
2014 года



### Заключение

Научно-технического совета Лаборатории Физики Высоких Энергий  
Объединенного института ядерных исследований

Диссертация «Разработка и создание регистрирующей электроники адронного торцевого калориметра установки ATLAS для экспериментальных исследований на ЛHC» выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина.

В период подготовки диссертации соискатель **Ладыгин Евгений Александрович** работал в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований в Серпуховском научно-исследовательском отделе заместителем начальника отдела.

В 1979 году Ладыгин Е.А. окончил Московский инженерно-физический институт по специальности автоматика и электроника.

Удостоверение №113/232 о сдаче кандидатских экзаменов выдано Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова в 2014 г.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Чеплаков Александр Павлович, начальник сектора «Физика на ATLAS» отделения № 4 Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

#### **По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

Диссертационная работа Ладыгина Е.А. посвящена разработке и созданию торцевого адронного калориметра для экспериментальной установки ATLAS на Большом Адронном Коллайдере. Работа проводилась в соответствии с проблемно - тематическими планами научно-исследовательских работ Объединенного института ядерных исследований 02-0-1007-94/2008 и 02-0-1081-2009/2013.

#### **Актуальность и научная новизна задачи:**

Несколько поколений физиков-экспериментаторов пыталось обнаружить новую элементарную частицу – так называемый «бозон Хиггса». С помощью установок ATLAS и CMS при энергиях протон-протонных взаимодействий 7-8 ТэВ и светимости ЛHC  $\sim 7 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  это стало возможным. Физики также намереваются найти экспериментальное подтверждение некоторых теорий, таких как суперсимметрия, квантовая гравитация и других.

Торцевой адронный калориметр (Hadronic End-Cap calorimeter, HEC) является важнейшей частью установки ATLAS. Еще на этапе создания к установке предъявлялись очень высокие требования. Необходимо было разработать и создать быстродействующий калориметр и специальную считывающую аппаратуру с высокой степенью интеграции, обеспечивающую устойчивую работу в сильных магнитных полях и при высоких радиационных нагрузках.

Перед диссертантом стояли следующие задачи:

- Разработать методику и создать аппаратную часть системы регистрации сигналов с торцевого адронного калориметра HEC установки ATLAS. Аппаратура должна быть надежной и радиационно устойчивой.
- Разработать методы совместного моделирования HEC-калориметра и электронных устройств к нему.
- Разработать методы и провести моделирование устойчивости усилительных каскадов с помощью программы PSPICE.
- Разработать и применить методы испытания электроники на надежность.
- Разработать и создать систему считывания данных эксперимента HiLumi для испытания модулей жидкоаргоновых калориметров установки ATLAS для работы с высокой интенсивностью пучков протонов на HL-LHC.

#### **Практическая ценность работы:**

Созданная аппаратура считывания позволила успешно включить торцевой адронный калориметр HEC в общую структуру установки ATLAS и обеспечить требуемые характеристики. Точность определения энергии адронных струй, измеренной в установке, согласуется с Монте-Карло моделированием с 10% точностью. Неопределенность энергетической шкалы в центральной области псевдобыстрот  $|\eta| < 0.8$  для струй с поперечным импульсом  $60 \div 800$  ГэВ/с составляет величину менее 2.5% и растет в передней области, достигая 4-8% при быстротах  $2.1 \div 2.5$ .

Разработанные соискателем методы моделирования калориметра и усилительных устройств могут найти широкое применение при разработке подобного типа аппаратуры для экспериментальных исследований.

**Научно-технический совет ЛФВЭ ОИЯИ отмечает следующие, наиболее важные результаты диссертационной работы, в получение которых Е.А.Ладыгин внес существенный вклад:**

- В процессе создания калориметра соискателем было проведено детальное моделирование детектора и сопутствующей ему электроники. Это позволило добиться требуемых характеристик электроники уже на этапе ее проектирования и сэкономило значительные средства и время на её производство и тестирование.
- Соискатель внес весомый вклад в разработку высоконадежного, быстродействующего, малошумящего предварительного усилителя. В

рамках этой работы им была разработана методология моделирования характеристик GaAs-усилителей при радиационном облучении. Используя такое моделирование, можно заранее корректировать схемотехнику усилителей, изготавливаемых по данной технологии.

- Соискателем разработан предварительный формирователь, позволяющий компенсировать зависимость сигнала от емкости детектирующей ячейки калориметра. Это значительно упростило способ выработки триггерных сигналов и позволило создавать их прямым аналоговым суммированием.

- Разработан гибридный прототип основного формирователя сигналов, который использовался в тестах предварительных усилителей и модулей калориметра HES, включая сеансы с тестовыми пучками на ускорителе SPS.

- Разработан высоконадежный модуль передачи триггерных сигналов, позволяющий передавать аналоговые сигналы на расстояние свыше 70 метров. Данный модуль используется в триггерных системах адронного калориметра HES и переднего калориметра FCAL в ATLAS.

- Разработана методика и создана электронная модель ячейки калориметра и отдельных узлов системы считывания. В дальнейшем, во время работы на LHC, представление ячейки калориметра как сложной R-C структуры позволило смоделировать ложные сигналы, обнаруженные в эксперименте.

- Предложен алгоритм, позволяющий с помощью программы PSPICE еще на этапе моделирования оценить устойчивость усилительных каскадов к самовозбуждению.

- Проведено исследование созданной электроники на безотказность ее работы и устойчивость к радиационным воздействиям.

- С помощью электроники, разработанной для пучковых тестов в ЦЕРН и адаптированной соискателем к условиям работы на ускорителе У-70 ГНЦ РФ ИФВЭ, успешно проведен эксперимент HiLumi по изучению поведения модулей жидкоаргоновых калориметров ATLAS при повышенной интенсивности пучков протонов в HL-LHC.

**Достоверность** представленных в диссертации результатов подтверждается:

- успешной и безотказной работой HES-калориметра: за пять лет работы установки ATLAS на LHC была набрана статистика, соответствующая полной светимости около  $30 \text{ фбн}^{-1}$ . Ни одной поломки в каналах регистрации HES калориметра за это время зафиксировано не было. Результаты, получаемые на установке, доказывают, что разработчики, одним из которых является соискатель, действительно создали новейшую установку на высоком техническом уровне.

- востребованностью накопленного автором опыта в работах по модернизации некоторых узлов установки в связи с переходом коллайдера LHC на повышенную светимость.



**НТС считает**, что диссертация Е.А.Ладыгина является законченной работой, выполненной на высоком уровне и отвечающей требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в части, касающейся кандидатских диссертаций. В диссертационной работе представлены предложенные автором новые принципы и методы разработки электронных узлов для экспериментальных установок, которые были успешно реализованы и обеспечили дальнейшую эффективную работу торцевого жидкоаргонового адронного калориметра установки ATLAS.

Главные результаты диссертации могут быть квалифицированы как значительный вклад в развитие электроники для экспериментальной физики.

Основные результаты работы торцевого жидкоаргонового калориметра НЕС и созданной для него электроники неоднократно докладывались на международных конференциях, они опубликованы в препринтах ОИЯИ и ЦЕРН, в журнале Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (NIM) и в статьях журнала Journal of Instrumentation (JINST).

Диссертация Ладыгина Евгения Александровича «Разработка и создание регистрирующей электроники адронного торцевого калориметра установки ATLAS для экспериментальных исследований на LHC» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Заключение принято на заседании Научно-технического совета Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина Объединенного института ядерных исследований. Присутствовало на заседании 22 члена НТС ЛФВЭ из полного состава численностью 40 человек. Результаты голосования: «за» - 22 чел., «против» - 0 , «воздержалось» - 0 , протокол № 7 от 14 октября 2014 г.

Председатель НТС ЛФВЭ  
доктор физ.-мат. наук



Ю.А.Панебратцев

Ученый секретарь НТС ЛФВЭ  
кандидат физ.-мат. Наук



Е.В.Земляничкина

Заключение подготовил кандидат физ.-мат. наук ведущий научный сотрудник ЛФВЭ ОИЯИ В.В.Кухтин.

