



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИЯИ РАН)**

пр-т 60-летия Октября, д. 7а, Москва, 117312  
тел. 8(499)135-77-60, 8(495)850-42-00 (дирекция);  
8(495)850-42-16, 8(916)139-29-97 (отдел делопроизводства и документооборота)  
факс: 8(499)135-22-68, e-mail: inr@inr.ru / www.inr.ru  
ОКПО 02699122 ОГРН 1027739758562 ИНН/КПП 7728116437/772801001

14.05.2026 № 2699122-28-08-510

На № \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Зам. директора ИЯИ РАН  
кандидат физико-математических наук  
Александр Григорьевич Панин



**ОТЗЫВ**

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)  
на диссертацию Мальцева Тимофея Владимировича

**«Координатные детекторы высокого разрешения на основе газовых электронных  
умножителей»,**

представленную в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики»

**Актуальность работы** не вызывает сомнений, поскольку она посвящена изучению газовых электронных усилителей (ГЭУ) — элементов координатных детекторов (трекеров), необходимых для восстановления треков заряженных частиц с высоким пространственным разрешением и высокой эффективностью в условиях больших загрузок во многих современных экспериментах физики высоких энергий. Детекторы на основе ГЭУ используются в экспериментах в ЦЕРН (COMPASS, CMS, ALICE, LHCb, TOTEM), в ОИЯИ (BM@N), а также в ИЯФ СО РАН: в системе регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М, в координатной системе установки ДЕЙТРОН и на установке Тестовый пучок электронов. Они также предлагаются для модернизации торцов координатной системы детектора КМД-3 ускорительного комплекса ВЭПП-2000 и для внутреннего трекера детектора в проекте Супер Чарм-Тау Фабрики. Кроме того, ГЭУ широко используются и вне физики высоких энергий: в медицине (радиография и дозиметрия), а также в мюонной томографии различных объектов.

### **Научная и практическая значимость диссертации**

Целью данной диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное изучение основных характеристик детекторов на основе ГЭУ, используемых или планирующихся к использованию на установках ИЯФ СО РАН, а также численное моделирование работы внутреннего трекера детектора для проекта Супер Чарм-Тау Фабрики.

Для достижения поставленной цели соискателем проведены численное моделирование и экспериментальные измерения коэффициента газового усиления, эффективности регистрации и пространственного разрешения детекторов для установки ДЕЙТРОН и для Тестового пучка на основе ГЭУ, собранных в ИЯФ СО РАН. Для моделирования диффузии были рассмотрены варианты с одиночным и трехкаскадным ГЭУ, а также вариант с однородным электрическим полем. Для определения пространственного разрешения подробно исследованы систематические погрешности, связанные как с многократным рассеянием электронов, так и со смещением или поворотом исследуемых детекторов на основе ГЭУ.

В результате получены отличные параметры этих детекторов: стабильная работа в пропорциональном режиме при коэффициенте газового усиления до  $5 \times 10^4$ ; эффективность на уровне 99% для коэффициента усиления, превышающего  $2 \times 10^4$ .

Измеренный коэффициент эффективной поперечной диффузии электронов при дрейфе в рабочем газе детектора на основе трёхкаскадных ГЭУ составляет  $300 \pm 20$  мкм/ $\sqrt{\text{см}}$  (для газа Ar(70%)-CO<sub>2</sub>(30%) при стандартных условиях).

Пространственное разрешение детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ для Тестового пучка электронов достигло уровня 15–30 мкм при регистрации ортогональных треков релятивистских электронов.

Расчёты, проведенные соискателем для цилиндрического детектора Супер Чарм-Тау Фабрики, показали, что минимальный пороговый импульс пи-мезона, допускающий его стабильную регистрацию во внутреннем трекере на основе время-проекционной камеры, равен 55 МэВ/с. Было получено, что газовая смесь Ar(45%)-iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(15%)-CF<sub>4</sub>(40%) обеспечивает минимальные искажения траектории электронов ионизации в рабочем газе внутреннего трекера детектора Супер Чарм-Тау Фабрики и что характерная максимальная величина искажений составляет 2 мм на 30 см дрейфа.

Полученные результаты, а также методы определения пространственного разрешения ГЭУ с учётом различных геометрических параметров (ширина и шаг полосок) и с корректировкой традиционного метода определения координаты по центру тяжести (для устранения нелинейности) имеют высокую значимость не только для конкретных детекторов и экспериментов, описанных в диссертации, но и для будущих экспериментов физики высоких энергий, а также для других отраслей, где применяются координатные системы на основе ГЭУ (медицина, мюонная томография, астрофизика и др.).

### **Научная новизна, степень обоснованности и достоверность выводов**

Исследования соискателя продемонстрировал новизну полученных результатов: было обнаружено, что работа трёхкаскадных ГЭУ эффективно сужает облако электронов ионизации (сужение по сравнению с однородным полем может достигать 30% в случае одного каскада ГЭУ и 15% в случае трёх каскадов ГЭУ); применение корректировки дифференциальной нелинейности к методу центра тяжести при восстановлении координаты треков позволяет получить пространственное разрешение на уровне 10 мкм, что представляется физическим пределом для детекторов данного типа; величина 55 МэВ/с порогового импульса пи-мезона

получена для варианта вакуумной трубы, состоящей из 3 мм бериллия и 0,5 мм парафина, при этом внутренняя стенка время-проекционной камеры состоит из 50 мкм каптона, 100 мкм тефлона и 5 мкм меди.

Процесс исследования подробно описан в диссертационной работе Мальцева Т.В.: результаты моделирования сравнивались с физическими измерениями, а также с известными экспериментальными результатами для средних характеристик моделируемых процессов. Результаты моделирования одних и тех же процессов проверялись в разных программах, таких как GEANT4 и NEED. Измерения характеристик детекторов проводились многократно и в разных конфигурациях как в лаборатории, так и в сопутствующем режиме во время экспериментов, при этом получались согласованные результаты, которые оставались стабильными с течением времени. Всё изложенное демонстрирует высокую степень обоснованности и достоверности научных положений и заключений, сформулированных в диссертации.

#### **Публикации и апробация результатов**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 научных статьях в международных журналах, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки Российской Федерации. Представленные результаты докладывались и обсуждались на 10 международных конференциях.

В целом работа Мальцева Т.В. написана понятным языком, даны все необходимые определения и приведены обоснованные выводы. За время подготовки диссертации соискатель работал как экспериментатор, проводя измерения на установках, освоил статистические методы обработки информации, а также методы моделирования физических процессов и детекторов с помощью различных программных продуктов.

**Структурно** диссертация Т. В. Мальцева состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (всего 174 страницы, включая 126 рисунков и 42 таблицы; в списке литературы 77 ссылок).

**Содержание автореферата соответствует содержанию диссертационной работы.**

#### **Замечания**

К сожалению, не обошлось без некоторых недостатков, которые перечислены ниже.

1. Во **Введении** автор упоминает о прогрессе в разработке «микроструктурных газовых детекторов» и сразу переходит к ГЭУ, не сказав ни слова об альтернативной концепции газового электронного усиления, а именно о МикроMEгас (MicroMEgas), которая также активно применяется в физике высоких энергий.

2. Композиция диссертации выглядит не совсем оптимальной с точки зрения распределения материала: три первых главы занимают около 50 страниц, четвертая — 100 страниц, а пятая — 12 страниц. При этом пятая глава о моделировании детектора для проекта Супер Чарм-Тау Фабрики не совсем стыкуется с предыдущими (нет логического продолжения предыдущего текста).

3. Есть несколько замечаний к стилю и несколько опечаток:

стр. 8: "Измерения характеристик детекторов проводились многократно и в разных **постановках** как в лаборатории, так и в сопутствующем режиме во время экспериментов, при этом **результаты согласовывались** и оставались стабильными с течением времени."

"в разных постановках" - имеется в виду "в разных КОНФИГУРАЦИЯХ"?

"результаты согласовывались" - имеется в виду "получались СОГЛАСОВАННЫЕ результаты"

(иначе звучит так, что кто-то с кем-то согласовывал результаты)?

стр. 9-10:

[3] эта ссылка URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/06/C06051> НЕВЕРНА ("1" на конце не нужна)

правильная ссылка: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/06/C06015>

стр. 10:

[4] и эта ссылка <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.66> неправильная (пропущен ноль в "066")

ПРАВИЛЬНАЯ: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.066>

[Следует отметить, что ссылки на обе эти работы в основном списке литературы (на стр. 168-169) правильные]

стр. 49: "**Сравнивая** значения коэффициента поперечной диффузии для однородного поля и для каскадных структур, **был сделан вывод...**"

Правильно: "**При сравнении** ... был сделан вывод..."

стр. 57-58: "рассеянием электронов **на окружающем воздухе** можно пренебречь."

Наверное в научной работе было бы уместней сказать: "на **МОЛЕКУЛАХ** воздуха в зазорах между детекторами"

стр. 85: Подпись к Рис. 58: "...в составе трековой системе." -> систем**Ы**

стр. 158: "**Выбирая** в качестве внутреннего трекера время-проекционную камеру (Time Projection Chamber (TPC)), **возникает задача...**"

Звучит так, будто "задача, выбирая ..., возникает".

Правильно сказать: "**При выборе...** возникает задача..."

---

Но все приведенные замечания **НИКАК** не влияют на качество диссертационной работы Мальцева Т.В.

#### **Заключение ведущей организации**

Диссертация Мальцева Тимофея Владимировича «Координатные детекторы высокого разрешения на основе газовых электронных умножителей» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой совокупность полученных результатов следует классифицировать как решение важных научных проблем, связанных с методикой регистрации элементарных частиц детекторами на основе газовых электронных умножителей и детекторами на основе время-проекционной камеры.

Диссертационная работа Т. В. Мальцева **полностью соответствует требованиям** и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, установленным «Положением о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор, Мальцев Тимофей Владимирович, **заслуживает** присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики».

Отзыв составил старший научный сотрудник Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН, кандидат физико-математических наук Хабибуллин Марат Марсович.

Старший научный сотрудник  
Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН,  
кандидат физико-математических наук,  
специальность 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц»  
Адрес: 117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, д. 7а  
Тел.: +7(495)850-42-48  
Эл. почта: marat@inr.ru

«13» мая 2026 г.

Марат Марсович Хабибуллин

Диссертационная работа Мальцева Тимофея Владимировича «Координатные детекторы высокого разрешения на основе газовых электронных умножителей» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики» была изучена сотрудниками ИЯИ РАН, а доклад по материалам диссертации был заслушан на семинаре в рамках заседания Научно-технического совета Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН 12 мая 2026 г. (протокол №3-26 от 12.05.2026).

Председатель Научно-технического совета  
Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН,  
член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук,  
специальность 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц»  
Адрес: 117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, д. 7а  
Тел.: +7(495)850-42-47  
Эл. почта: kudenko@inr.ru

«13» мая 2026 г.

Юрий Григорьевич Куденко

**Подпись Хабибуллина Марата Марсовича заверяю**

Заведующая Отделом кадров ИЯИ РАН



Елена Александровна Горшкова