

На правах рукописи

БОБРОВНИКОВ Виктор Сергеевич

**ТЕСТОВЫЙ ПУЧОК ЭЛЕКТРОНОВ
КОМПЛЕКСА ВЭПП-4**

**01.04.01 – приборы и методы
экспериментальной физики**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

БЛИНОВ Владимир Евгеньевич – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

БУДНЕВ Николай Михайлович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», г. Иркутск, декан физического факультета.

СЕМЕНОВ Павел Александрович – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Протвино, старший научный сотрудник.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, г. Москва.

Защита диссертации состоится « 20 » декабря 2017 г. в « 12:15 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан « 18 » октября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

Актуальность темы

С момента проведения первых экспериментов в области физики элементарных частиц сменилось несколько поколений детекторов. Детекторы непрерывно усложняются и совершенствуются, при этом их масштаб и стоимость постоянно возрастают. В качестве примера можно привести детектор ATLAS, работающий на большом адронном коллайдере в CERN (Швейцария) и суммарные затраты на создание которого составили около 1 миллиарда долларов. При создании установок такого уровня цена ошибки становится значительной и требуется более тщательная проработка систем детектора перед их изготовлением.

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) последние несколько лет активно ведутся методические работы по разработке перспективных детекторов для физики высоких энергий и ядерных исследований. К ним относятся:

- детектор для регистрации черенковских колец – ФАРИЧ (от англ. FARICH – Focusing Aerogel Ring Image CHerenkov), который является перспективной системой идентификации частиц для проекта Супер Чарм–Тау фабрики (г. Новосибирск), переднего спектрометра детектора PANDA (Германия) и детектора HMPID (High Momentum Particle IDentification) для ALICE (Швейцария);
- приборы на основе микроканальных пластин для время пролетных систем с предельным временным разрешением, эти приборы планируется использовать для идентификации частиц и подавления наложение событий в калориметрах в условиях большой светимости, например, на большом адронном коллайдере;
- координатные детекторы на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ), данные детекторы активно применяются в экспериментах, проводимых в ИЯФ СО РАН.

При работе с прототипами детекторов, особенно на начальных этапах, наиболее эффективной является работа на тестовом пучке с перерывами для анализа полученных данных и последующим внесением необходимых изменений в конструкцию прототипа. Для исследовательских групп из ИЯФ СО РАН работа на тестовых пучках в международных центрах в таком режиме затруднена из-за того, что смены на тестовых пучках расписаны на годы вперед, стоимость смен и необходимые накладные расходы на перевозку оборудования велики.

Все вышеперечисленное делает актуальным создание специализированной установки для проведения измерений с тестовым пучком электро-

нов в ИЯФ СО РАН. В 2008 году был поставлен вопрос об актуальности тестового пучка в ИЯФ СО РАН.

Цель диссертационной работы

Создание тестового пучка электронов с энергий в диапазоне от 100 МэВ до 3500 МэВ на базе e^+e^- коллайдера ВЭПП–4М.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Автором были проведены необходимые расчеты для определения оптимальных параметров тестового пучка, выполнен цикл работ по калибровке и настройке научного оборудования установки. Автор принимал непосредственное участие в разработке и создании установки, руководил ее сборкой и вводом в эксплуатацию, а также принимал активное участие в измерениях с прототипами детекторов.

Научная новизна

Впервые в ИЯФ СО РАН создана физическая установка для получения тестового пучка электронов, которая оснащена всем необходимым для организации триггерного сигнала, измерения координат треков и энергии тестового пучка. Используемая для этого система сбора данных обеспечивает также регистрацию данных с измеряемых прототипов детекторов.

Создана математическая модель, с помощью которой проведена оптимизация рабочих параметров установки.

Проведены измерения интенсивности и энергетического разброса электронов тестового пучка. Измеренные параметры тестового пучка на комплексе ВЭПП–4 сравнимы с параметрами тестовых пучков в таких международных центрах как Frascati (Италия), ИИЭР Beijing (Китай) и Tohoku (Япония).

Реализована процедура управления конвертором, позволяющая получать стабильную скорость счета тестовых электронов в течении нескольких часов.

Научная и практическая ценность

Установка используется для проведения измерений с перспективными прототипами детекторов для экспериментов по физике элементарных частиц, создаваемых как в ИЯФ СО РАН, так и за рубежом.

Используемый метод измерения импульса тестовых электронов с помощью координатных измерений может быть использован в других научных центрах, где используются пучки электронов: DESY (Германия), ИИЭР Beijing (Китай), Tohoku (Япония) и т.п.

Созданная математическая модель установки, может быть использована для проведения расчетов как существующих, так и перспективных тестовых пучков в разных центрах.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Создана математическая модель установки для получения пучка тестовых электронов. Результаты, в рамках этой модели, были использованы при создании установки. В настоящее время, модель используется для оптимизации условий проведения измерений с различными прототипами.
2. Установка спроектирована, изготовлена, запущена в эксплуатацию. Получены следующие параметры тестового пучка электронов:
 - диапазон энергий в зависимости от режима работы установки:
 - низкая энергия – от 100 МэВ до 1000 МэВ,
 - высокая энергия – от 1000 МэВ до 3500 МэВ.
 - средняя скорость счета тестовых электронов 50 Гц;
 - энергетический разброс равен 7.8% для энергии 100 МэВ и 2.6% – для энергии 3000 МэВ.
3. Предложена и реализована процедура измерения энергии тестовых электронов. Для режима высокой энергии получено разрешение по энергии лучше 1.8% для энергии электронов 1000 МэВ и выше. В режиме низкой энергии разрешение, полученное из моделирования, составляет 2.0% при энергии электрона 100 МэВ.
4. Начиная с 2011 года на установке успешно проводятся различные измерения с прототипами детектора черенковских колец ФАРИЧ, детектора на основе микроканальных пластин с предельным временным разрешением и калибровки прототипов детекторов на основе ГЭУ.

Апробация работы

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН, а также на следующих международных конференциях: International Workshop on

New Photon-detectors (LAL Orsay (Франция), 2012), сессии–конференции секции ядерной физики ОФН РАН (г. Москва, 2013), Instrumentation on Colliding Beam Physics (г. Новосибирск, 2014, 2017)

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 6 научных печатных работ, включая статьи в зарубежных журналах и в сборниках трудов международных конференций, из них 6 в реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации 109 страниц машинописного текста, включая 108 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 51 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе приводится обзор существующих тестовых пучков, которые работают в международных центрах, приводятся их параметры и приводится сравнение с параметрами тестового пучка в ИЯФ СО РАН.

Вторая глава посвящена описанию метода получения пучка тестовых электронов, который заключается в следующем. В гало пучка электронов ВЭПП–4М (3, Рисунок 1) вводится подвижной конвертор (4, Рисунок 1), в котором образуются тормозные гамма-кванты (5, Рисунок 1). Обратная конверсия тормозных гамма-квантов в электрон–позитронные пары производится в экспериментальном зале установки на конверсионной мишени (8, Рисунок 1), которая расположена на расстоянии около 28 м от конвертора. Для отбора электронов с определенным импульсом используется дипольный поворотный магнит (9, Рисунок 1). Прототип детектора и все необходимое научное оборудование располагается вдоль предварительно рассчитанной траектории движения тестовых электронов, которая называется центральной траекторией.

В главе описано расположение установки относительно комплекса ВЭПП–4. На экспериментальном промежутке коллайдера ВЭПП–4М находится только подвижной конвертор, который, вместе с необходимым для его работы оборудованием, установлен в конце прямолинейного участка северного полукольца коллайдера ВЭПП–4М. Основная часть оборуду-

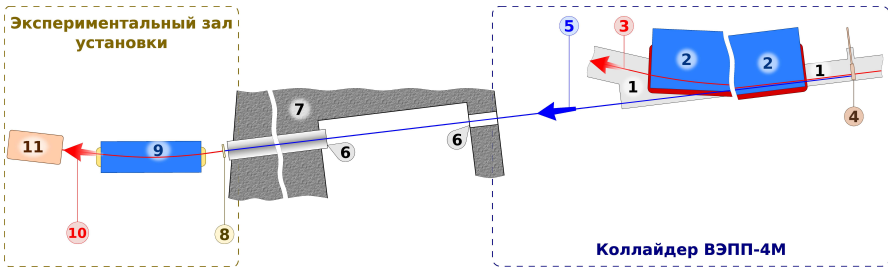


Рис. 1. Схема получения тестового пучка электронов: 1 – вакуумная камера, 2 – дипольные магниты коллайдера ВЭПП–4М, 3 – первичные электроны, 4 – подвижной конвертор, 5 – тормозные гамма-кванты, 6 – каналы, 7 – бетонная стена (радиационная защита), 8 – конверсионная мишень, 9 – поворотный магнит, 10 – тестовые электроны, 11 – прототип детектора.

дования установки расположена в двух помещениях (экспериментальном зале и пультовой), непосредственно примыкающих к экспериментальному промежутку коллайдера ВЭПП–4М.

Рассмотрены два режима работы установки, которые предназначены для получения тестовых электронов с низкой (100 – 1000 МэВ) и высокой (1000 – 3500 МэВ) энергией.

Приведены параметры экспериментального оборудования, используемого на установке: подвижного конвертора, поворотного магнита, триггерной системы на основе сцинтилляционных счетчиков, координатной системы и калориметра полного поглощения.

В качестве координатных детекторов применяются проволочные дрейфовые камеры или детекторы на основе ГЭУ. Дрейфовые камеры, разработанные специально для установки в ИЯФ СО РАН, измеряют одну координату трека тестового электрона и имеют пространственное разрешение $\sigma_x \simeq 0.4$ мм. Детекторы на основе ГЭУ могут измерить две координаты, поперечную x и вертикальную z , с точностью $\sigma_x \simeq 0.1$ мм и $\sigma_z \simeq 0.2$ мм, соответственно. Описана процедура выставки координатных детекторов в экспериментальном зале установки.

Для отбора тестовых электронов по импульсам используется дипольный поворотный магнит, максимальная величина поля в рабочей области которого достигает 15.8 кГс при токе в катушке равном 1600 А. Для получения необходимого значения магнитного поля было проведено измерение зависимости величины магнитного поля от тока, подаваемого в катушку. Проведенная калибровка позволяет задать магнитное поле с точностью $\sigma_H \simeq 0.5\%$ для получения тестовых электронов в диапазоне

импульсов 100 – 2400 МэВ/с, и $\sigma_H \simeq 0.8\%$ для электронов с импульсами 2400 – 3500 МэВ/с. Измерение распределения магнитного поля дало следующие результаты:

- профиль магнитного поля вдоль продольной оси y меняет свою форму в зависимости от значения тока подаваемого в катушки;
- неоднородность поля в рабочей области апертуры составила $\pm 3.5\%$ для значения 520 А, $\pm 0.2\%$ для значения тока 1010 А и $\pm 2.5\%$ для тока 1600 А;
- краевой эффект вдоль оси y имеет характерный размер $\simeq 60$ мм, за пределами которого магнитное поле уменьшается до значения ниже 2 Гс.

Для измерения энергии электронов на установке используются ВГО и NaI – калориметры полного поглощения. В главе описана методика их калибровки, которая проводилась по измерению положения края спектров тормозного излучения пучка электронов ВЭПП–4М и гамма–квантов обратного комптоновского рассеяния. В измерениях использовался импульсный твердотельный лазер на основе Nd:YAG, имеющий две гармоники излучения с длинами волн: I гармоника – 1064 нм, II гармоника – 532 нм. Значения краев комптоновского спектра и тормозного излучения для трех значений энергии ВЭПП–4М приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Значения краев комптоновского рассеяния и тормозного излучения для трех значений энергии ВЭПП–4М.

Энергия ВЭПП–4 [МэВ]	Край тормозного излучения [МэВ]	Край комптоновского спектра	
		I гармоника [МэВ]	II гармоника [МэВ]
1850	1850	59	115
3000	3000	152	290
4000	4000	267	500

На Рисунке 2 показаны измеренные положения краев спектра комптоновского рассеяния и тормозного излучения, которые использовались для калибровки энергетической шкалы. Калибровка электроники калориметрического тракта была выполнена с точностью $\sigma_{ch \rightarrow MeV} \simeq 0.5\%$. Для каждого значения энергии разрешение калориметра определялось как отношение ширины края спектра к его положению. На Рисунке 2 показан результат калибровки энергетического разрешения ВГО–калориметра (σ_{res}). Экспериментально измеренное энергетическое разрешение ВГО–калориметра находится в хорошем согласии с результатами моделирования.

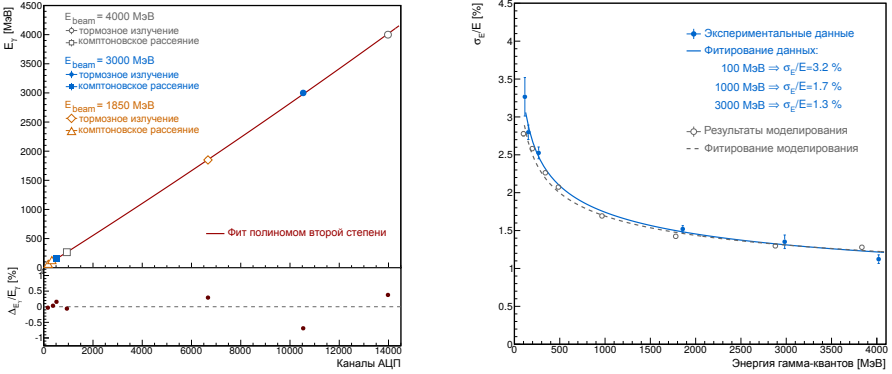


Рис. 2. Результаты калибровки энергетической шкалы, в нижней части рисунка показано отклонение фита от экспериментальных данных $100\%(E_{fit} - E)/E$, (слева) и полученное энергетическое разрешение BGO-калориметра в сравнении с результатами моделирования (справа).

В главе также описана процедура определения положения пучка тормозных гамма-квантов на входе в экспериментальный зал установки. Проведение этих измерений необходимо для выставки поворотного магнита и научного оборудования установки с целью получения максимальной скорости счета тестовых электронов, и обусловлено следующими причинами:

- нестабильностью положения орбиты электронов в коллайдере ВЭПП-4М в течении рабочего сезона;
- зависимостью положения орбиты электронов в месте расположения подвижного конвертора от энергии. На энергии 4000 МэВ орбита смещается по направлению к центру кольца, а на энергии 1800 МэВ – наружу.

В течение рабочего сезона, продолжительность которого составляет 6 – 8 месяцев, требуется провести измерение положения пучка гамма-квантов 2 – 3 раза .

Дано подробное описание аппаратной части и программного обеспечения системы сбора данных установки.

В третьей главе описана математическая модель, которая использовалась для выбора оптимальных параметров установки с целью получения максимальной скорости счета тестовых электронов при минимально возможном уровне фоне в области прототипа детектора. Для этого определялись:

- оптимальная толщина подвижного конвертора, который вводится в гало пучка;
- оптимальная толщина и место расположения конверсионной мишени.

Для решения этих задач использовалась среда Geant4 (версия 9.6). На языке программирования C++ был написан программный пакет, который состоит из четырех частей, описывающих: геометрию и материалы, физические процессы, генератор вторичных электронов, систему регистрации.

Увеличение толщины конвертора с одной стороны приводит к увеличению эффективности образования тормозных гамма-квантов, а с другой стороны – увеличивается угловой разброс гамма-квантов из-за многократного рассеяния первичных электронов в материале конвертора. Последнее, по причине большого расстояния от подвижного конвертора до конверсионной мишени (около 28 м), приводит к уменьшению числа тормозных гамма-квантов дошедших до конверсионной мишени и, как следствие, понижает скорость счета тестовых электронов. На основе проведенного моделирования толщина конвертора была выбрана равной 17% X_0 .

Моделирование было проведено для двух вариантов расположения конверсионной мишени: на входе в канал в экспериментальном промежутке ВЭПП-4М и в экспериментальном зале установки на выходе из канала. Расстояние от мишени до магнита для этих двух случаев было равно 19.2 м и 0.5 м, соответственно. Полученные из моделирования результаты показали, что вариант расположения мишени на входе в канал дает намного худшие результаты и от него отказались. Расположение конверсионной мишени на входе в экспериментальный зал увеличивает скорость счета тестовых электронов примерно в два раза, толщина мишени при этом должна быть 40% X_0 .

В четвертой главе описана процедура измерения энергии и энергетического разброса в пучке тестовых электронов. Применяемая методика получения тестовых электронов дает диапазон по импульсу $\Delta p = p_{max} - p_{min}$ относительно значения импульса p , который соответствует центральной траектории. Измерение значения разброса энергии тестовых электронов было проведено с помощью ВГО-калориметра. Схема измерения энергетического разброса тестового пучка σ_{spectr} показана на Рисунке 3 и определяется как:

$$\sigma_{spectr} = \sqrt{\sigma_{spread}^2 + \sigma_{res}^2 + \sigma_{ch \rightarrow MeV}^2 + \sigma_{path}^2}, \quad (1)$$

где: σ_{res} и $\sigma_{ch \rightarrow MeV}$ – собственное разрешение калориметра и ошибка связанная с точностью калибровки электроники; σ_{path} – величина разброса энергии электронов, обусловленная флуктуациями потерь энергии при прохождении электроном вещества, расположенного на участке от конверсионной мишени до калориметра (воздух, материалы сцинтилляционного счетчика и координатного детектора); σ_{spread} – измеряемая величина характеризующая разброс энергии в пучке тестовых электронов. Для получения величины σ_{path} было проведено моделирование установки, для различных значений энергий первичных электронов.

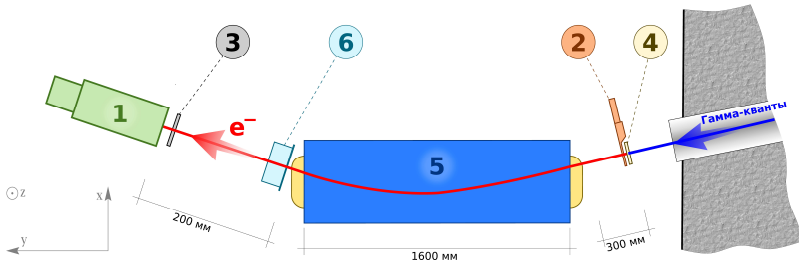


Рис. 3. Схема измерения разброса по энергии (изображено не в масштабе): 1 – ВГО-калориметр, 2 – триггерный сцинтилляционный счетчик, 3 – координатный детектор на основе ГЭУ, 4 – конверсионная мишень, 5 – поворотный магнит, 6 – проволочная дрейфовая камера.

Полученные по формуле (1) значения разброса энергии σ_{spread} в пучке тестовых электронов для режимов работы установки на высокой и низкой энергии представлены на Рисунке 4. Измеренное значение разброса энергии для режима низкой энергии в два раза меньше, чем для режима высокой энергии. Это объясняется тем, что углы поворота центральной траектории α отличаются для режимов низкой и высокой энергии примерно в два раза и составляют 33.2° и 13.8° , соответственно. Большее значение угла поворота дает лучшую фокусировку электронов по импульсу и, следовательно, обеспечивает более однородное распределение импульса в пучке электронов.

Точное измерение энергии электрона с помощью калориметра полного поглощения становится невозможным при тестировании прототипов калориметров или прототипов детекторов имеющих большое количество материала ($\gtrsim 0.5 X_0$) на пути пучка. В этом случае, определение импульса электрона может быть выполнено с помощью координатных измерений. Импульс электрона связан с индукцией магнитного поля и радиусом

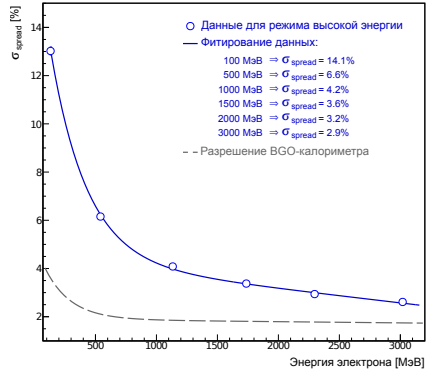
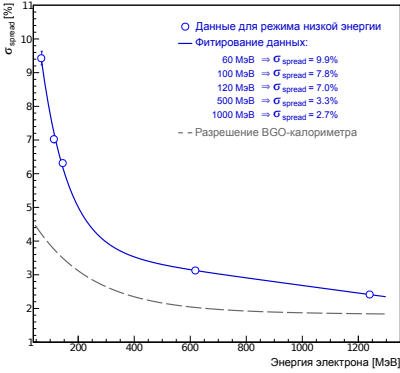


Рис. 4. Полученное значение величины σ_{spread} для режима низкой (слева) и высокой (справа) энергии. Пунктирной линией показано разрешение BGO-калориметра.

кривизны следующим выражением:

$$pc = 300 HR, \quad (2)$$

где: p – импульс электрона [эВ/ c]; H – величина индукции магнитного поля [Гс]; R – радиус кривизны трека электрона в магнитном поле [см]. Радиус кривизны R можно определить измеряя координаты трека электрона в двух точках до поворотного магнита и в двух точках после. Для измерения координат тестовых электронов использовались четыре детектора на основе ГЭУ. Основные факторы, дающие вклад в ошибку измерения импульса электрона:

- относительная точность выставки и собственное пространственное разрешение детекторов на основе ГЭУ.
- отклонение траектории тестовых электронов, обусловленное многократным рассеянием на воздухе, в материалах детекторов на основе ГЭУ и триггерном счетчике.
- неоднородность магнитного поля на краях магнита вдоль оси y . В используемой процедуре магнитное поле однородно в пределах внутреннего объема магнита и имеет нулевое значение вне, что отличается от реального распределения. Поэтому, вычисленный в этой модели угол поворота тестовых электронов больше, чем в расчетах, что приводит к систематической ошибке измерения энергии на уровне нескольких процентов.

Для определения вклада вышеперечисленных факторов в точность измерения импульса тестовых электронов было проведено моделирование прохождения электронов через установку, в котором для вычисления разрешения по энергии тестовых электронов использовалась величина Δ_E , определяемая как:

$$\Delta_E = 100\% \frac{E_{reco} - E_{calo}}{E_{calo}}, \quad (3)$$

где: E_{reco} – значение восстановленной энергии по координатным измерениям; E_{calo} – энергия измеряемая со 100% точностью виртуальным калориметром. Из распределения Δ_E извлекались:

- поправочный коэффициент, который определяется из положения максимума распределение и характеризует систематический сдвиг полученного значения энергии тестового электрона из-за отличия реального магнитного поля от однородного;
- ширина распределения, характеризующая энергетическое разрешение используемого метода измерения энергии (σ_E/E).

Полученные из моделирования значения σ_E/E и величины сдвига энергии для двух режимов работы установки показаны на Рисунке 5. Энергетическое разрешение для электронов с $E = 100$ МэВ в режиме низкой и высокой энергии составляет до 4% и 12%, соответственно, и объясняется вкладом эффекта многократного рассеяния в веществе. Лучшая точность измерения энергии в режиме низкой энергии объясняется более сильной фокусировкой электронов по импульсу в этом случае. С ростом

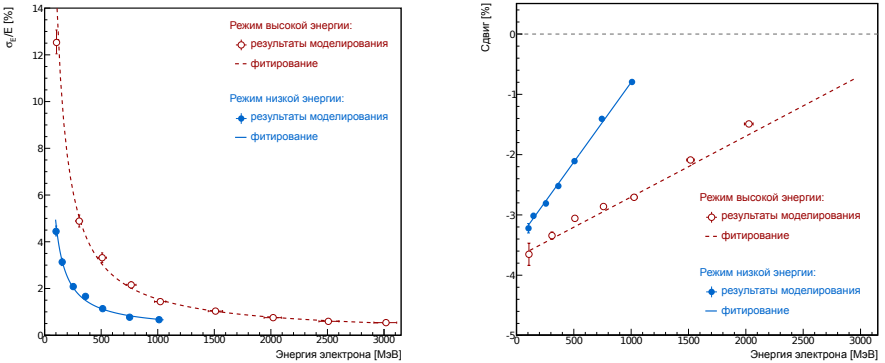


Рис. 5. Разрешение по энергии (слева) и систематический сдвиг энергии (справа) тестовых электронов в зависимости от их энергии для двух режимов работы установки, полученное из моделирования.

энергии электронов величина систематического сдвига уменьшается, что связано с уменьшением вклада неоднородности магнитного поля на краях магнита.

Для режима высокой энергии была проведена экспериментальная проверка используемой процедуры, для измерения энергии электронов применялся ВГО–калориметр. Ошибка измерения энергии электронов определяется выражением:

$$\sigma_{calo} = \sqrt{\sigma_{res}^2 + \sigma_{ch \rightarrow MeV}^2}, \quad (4)$$

где: σ_{res} – собственное разрешение калориметра; $\sigma_{ch \rightarrow}$ – ошибка калибровки электроники калориметрического тракта. Ошибка измерения энергии из-за конечного координатного разрешения детекторов, многократного рассеяния и вклада нестабильности магнитного поля имеет вид

$$\sigma_{reco} = \sqrt{\sigma_{reco}'^2 + \sigma_{field}^2}, \quad (5)$$

где: σ_{reco}' – ошибка, учитывающая вклады от многократного рассеяния и собственного разрешения детекторов (соответствующая разрешению из моделирования); σ_{field} – ошибка связанная с нестабильностью магнитного поля в процессе набора данных. Измеренное разрешение в зависимости от энергии $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{calo}^2 + \sigma_{reco}^2}$ показано на Рисунке 6.

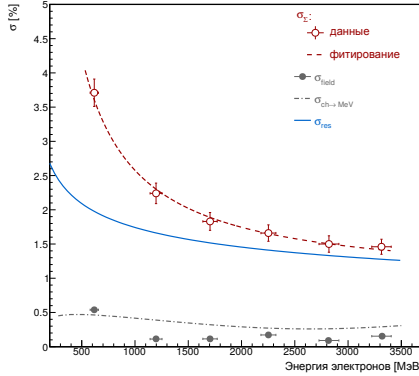


Рис. 6. Измеренное разрешение в зависимости от энергии для режима работы установок на высокой энергии: σ_{Σ} – измеренное разрешение по энергии, σ_{field} – ошибка, обусловленная дрейфом магнитного поля, $\sigma_{ch \rightarrow MeV}$ – ошибка калибровки электроники калориметрического тракта, σ_{res} – собственное разрешение ВГО–калориметра.

Энергетическое разрешение, обусловленное используемой методикой восстановления энергии, определяется формулой:

$$\sigma'_{reco} = \sqrt{\sigma_{\Sigma}^2 - \sigma_{calo}^2 - \sigma_{field}^2}. \quad (6)$$

Сравнение измеренного значения σ'_{reco} с данными моделирования приведено на Рисунке 7, полученные отличия можно объяснить следующими эффектами:

- в моделировании не заложена зависимость пространственного разрешения детекторов на основе ГЭУ от угла трека электрона с плоскостью детектора, в то время как в реальности пространственное разрешение варьируется от 0.1 мм для перпендикулярного падения до 0.25 мм для угла 0.25 радиан;
- точная толщина используемых детекторов неизвестна.

Отличие измеренной величины сдвига энергии от полученного в моделировании, и его разброс, можно объяснить вкладами следующих эффектов:

- систематической ошибкой выставки детекторов на основе ГЭУ при проведении геометрических измерений.
- ошибкой в измерении энергии с помощью ВГО–калориметра, обусловленной зависимостью световыхода в кристалле ВГО от температуры окружающей среды (примерно 1.5%/градус). Разница между минимальным и максимальным значениями температуры в период проведения измерений составила 2°C.

Ошибка измерения энергии тестовых электронов с помощью ВГО и NaI–калориметров полного поглощения в сравнении с процедурой измерения энергии с помощью координатных измерений приведена на Рисунке 8.

Полученное энергетическое разрешение для режима высокой энергии лучше 1.8% для тестовых электронов с энергией $E > 1000$ МэВ. Проведенные измерения и моделирование, позволили сформулировать необходимые для получения проектных параметров тестового пучка требования к конструкции координатных детекторов.

Полученная средняя скорость счета электронов составила около 50 Гц.

В пятой главе описана хронология работ по созданию установки и распределение времени между различными измерениями. Дан обзор измерений с прототипом детектора ФАРИЧ, которые позволили:

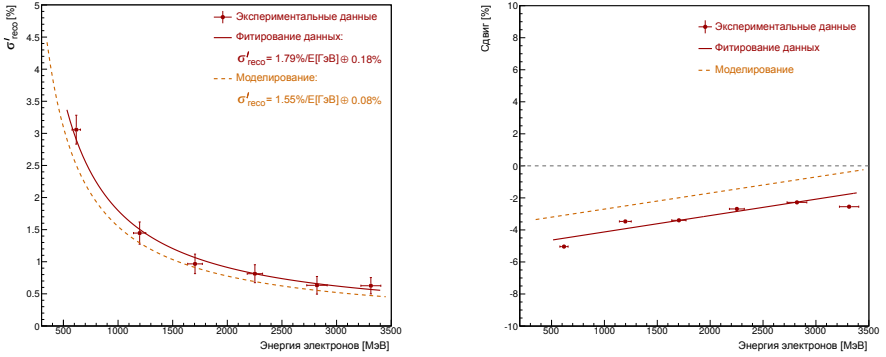


Рис. 7. Сравнение измеренного значения σ'_{reco} (слева) и сдвига энергии (справа) с моделированием для режима высокой энергии.

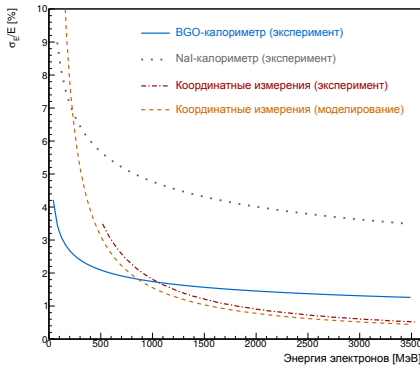


Рис. 8. Зависимость ошибки измерения энергии тестовых электронов от энергии для двух способов измерения энергии: с помощью BGO и NaI-калориметров полного поглощения и с помощью координатных измерений. Данные приведены для режима высокой энергии.

- сравнить разные типы фотонных детекторов и способы считывания сигналов с них;
- провести сравнение точности измерения радиуса черенковских колец для различных блоков аэрогеля;
- продемонстрировать эффект фокусировки на блоке многослойного аэрогеля с переменным показателем преломления, ошибка восстановления радиуса черенковского кольца составила $\sigma_r = 1.1$ мм. Для однослойного блока аэрогеля с такой-же толщиной эта же величина равна $\sigma_r = 2.1$ мм;

- впервые в мире определена ошибка измерения радиуса черенковского кольца для блока аэрогеля с непрерывно меняющимся по толщине показателем преломления, которая равна $\sigma_r = 1.8$ мм.

Целью исследования приборов на основе микроканальных пластин (МКП) на тестовом пучке было измерения временного разрешения и эффективности регистрации электрона с помощью МКП. В этих исследованиях:

- не требуется точное измерение энергии тестовых электронов;
- не требуется триггерный сигнал, так как используется самозапуск.

Поэтому, возможен набор статистики в параллель с другими экспериментами на пучке. Для этого исследуемый образец детектора располагался немного в стороне от центральной траектории тестовых электронов. В общей сложности было испытано 15 образцов различной конструкции, среди них были обычные ФЭУ с МКП, так и специально изготовленные приборы на основе МКП. Достигнуто временное разрешение на один электрон лучше 30 пс, при этом эффективность регистрации для лучших приборов составила около 70 %.

Изучение координатных детекторов на основе ГЭУ проводилось для измерения их пространственного разрешения и толщины детекторов. Они содержат очень малое количество вещества, которое не было точно известно и составляет около $t/X_0 \simeq 0.15$ %. Для измерения толщины строилось распределение угла многократного рассеяния электронов в материале детектора. Измеренное значение толщины детектора равно $t/X_0 = (0.203 \pm 0.003)\%$. Измеренное значение пространственного разрешения для разных детекторов составило (35 – 50) мкм.

В заключении приведены основные результаты работы.

Создана математическая модель установки для получения пучка тестовых электронов. Полученные результаты были использованы при создании установки. В настоящее время модель используется для оптимизации условий проведения измерений с различными прототипами.

Установка спроектирована, изготовлена и запущена в эксплуатацию. Полученная для тестовых электронов энергия находится в диапазоне от 100 МэВ до 3500 МэВ, при этом энергетический разброс в пучке равен 7.8% и 2.6%, соответственно. Средняя скорость счета электронов равна 50 Гц,

Предложена и экспериментально проверена процедура измерения энергии тестовых электронов с помощью координатных измерений. Получена точность определения энергии лучше 1.8% для энергии электронов

1000 МэВ. Для энергии электронов 100 МэВ моделирование дает точность измерения энергии около 2.0%.

С 2011 года на установке успешно проводятся различные измерения с прототипами детектора черенковских колец ФАРИЧ, детектора на основе микроканальных пластин с предельным временным разрешением и калибровки прототипов детекторов на основе ГЭУ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. G.N. Abramov, . . . , V.S. Bobrovnikov et al. Extracted electron and gamma beams in BINP // JINST. – 2014. – Vol. 9. – P. C08022.
2. G.N. Abramov, . . . , V.S. Bobrovnikov et al. Measurement of the energy of electrons extracted from the VEPP-4M accelerator // JINST. – 2016. – Vol. 11, no. 03. – P. P03004.
3. L. Shekhtman, . . . , V. Bobrovnikov et al. High resolution micro-pattern gas detectors for particle physics // JINST. – 2017. – Vol. 12, no. 07. – P. C07037.
4. V.S. Bobrovnikov, V.N. Kudryavtsev, T.V. Maltsev, L.I. Shekhtman. Development of high-resolution GEM-based detector for the extracted electron beam facility at the VEPP-4M collider // JINST. – 2017. – Vol. 12, no. 07. – P. C07036.
5. A.Yu. Barnyakov, . . . , V.S. Bobrovnikov et al. Impact of polishing on the light scattering at aerogel surface // Nucl. Instrum. Meth. – 2016. – Vol. A824. – P. 123–124.
6. A.Yu. Barnyakov, . . . , V.S. Bobrovnikov et al. Tests of FARICH prototype with precise photon position detection // Nucl. Instrum. Meth. – 2014. – Vol. A766. – P. 88–91.

БОБРОВНИКОВ Виктор Сергеевич

Тестовый пучок электронов комплекса ВЭПП-4

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 6.10.2017 г.

Подписано к печати 9.10.2017 г.

Формат 60×90 1/16 Объём 1,0 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 10

Обработано на IBM PC и отпечатано

на ротапинтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.