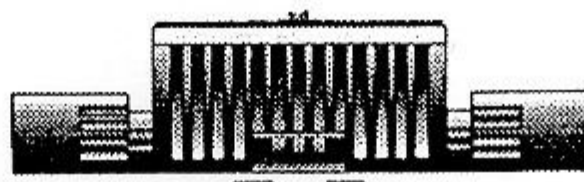


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН  
(ИЯФ СО РАН)**

**Д.А. Ворошилов, С. А. Глухов, Е.Б. Левичев,  
О.И. Мешков, А.И. Михайлов**

**ЧЕРЕНКОВСКИЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ  
КВАРЦЕВОГО ВОЛОКНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПОПЕРЕЧНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ  
В ЦИКЛИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ**

**ИЯФ 2015-6**



**НОВОСИБИРСК**

**2015**

## Оглавление

1. ВВЕДЕНИЕ.....	5
2. КОНСТРУКЦИЯ ДАТЧИКА.....	6
3. КАЛИБРОВКА ДАТЧИКА.....	8
4. ОЦЕНКА ОЖИДАЕМОЙ ЗАГРУЗКИ НА ВЭПП-4.....	9
5. ВЛИЯНИЕ КВАРЦЕВОГО ВОЛОКНА НА ПУЧОК.....	12
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	14
7. ЛИТЕРАТУРА.....	14

## Черенковский датчик на основе кварцевого волокна для исследования поперечного распределения частиц в циклическом ускорителе

*Д.А. Ворошилов, С. А. Глухов, Е.Б. Левичев,  
О.И. Мешков, А.И. Михайлов*

ИЯФ СО РАН  
630090, Новосибирск, Россия

### Аннотация

Предложен новый тип датчика для исследования поперечного распределения пучка в ускорителе в области с малой заселенностью (гало, «хвосты» функции распределения). Датчик представляет собой тонкую кварцевую нить, сканирующую некоторую область пучка. Частицы, попадающие в нить, генерируют черенковское излучение, часть которого испускается торцами нити и выводится из вакуумной камеры ускорителя через оптические окна. Излучение регистрируется двумя фотоумножителями, расположенными снаружи вакуумной камеры. Прототип датчика создан и планируется к постановке на накопитель ВЭПП-4М. Обсуждается конструкция датчика, вопросы его калибровки и оценка скорости счета на ВЭПП-4М.

## 1. Введение

Поперечное распределение частиц на больших амплитудах может оказывать существенное влияние на эффективность работы ускорительных комплексов, включая уменьшение времени жизни пучка, увеличение фона в детекторах коллайдера, ухудшение радиационной обстановки в протонных ускорителях и т.п. Считается, что, как правило, релятивистский пучок в ускорителе или накопителе имеет гауссово распределение по поперечным координатам. В реальности различные процессы, такие, как рассеяние частиц на остаточном газе, внутрисгустковое рассеяние, наличие сложной структуры нелинейных резонансов, взаимодействие встречных пучков, приводят к тому, что, начиная с некоторых амплитуд ( $\sim 6\sigma$ , где  $\sigma$  – характерный поперечный размер), плотность пучка может быть существенно больше той, которая соответствует нормальному распределению. Отдельную проблему составляет т.н. «гало» пучка, под которым понимают частицы, находящиеся в области неустойчивого движения, но, тем не менее, совершающие десятки или сотни оборотов, прежде чем погибнуть на внутренней поверхности вакуумной камеры.

Измерение «заселенности» гало и негауссовых «хвостов» функции распределения является важной задачей диагностики пучков заряженных частиц. Существуют различные датчики и методики для проведения таких измерений [1]. Поскольку плотность частиц на разном расстоянии от центра пучка изменяется на много порядков, от измерительной системы требуется большой динамический диапазон и хорошее пространственное разрешение. Распространенным способом измерения является сканирование пучка металлической (как правило, вольфрамовой) нитью с последующей регистрацией тормозного излучения расположенным далее по ходу пучка датчиком. В качестве последнего может применяться датчик черенковского излучения [2]. Черенковское излучение широко используется и для других, схожих, задач, связанных с исследованием потерь пучка и их азимутального распределения. Для этого черенковские радиаторы размещают снаружи вакуумной камеры на требуемом азимуте. В качестве радиатора часто используют кварцевый световод, проложенный вдоль ускорителя [3]. Если на обоих торцах такого распределенного радиатора поставить фотоумножители, то по разности времени прихода световых импульсов можно локализовать место потерь.

В предлагаемой статье мы рассматриваем возможность создания нового типа датчика, измеряющего поперечное распределение пучка в ускорителе на больших амплитудах, в котором в качестве нити, сканирующей пучок, ис-

пользуется тонкое кварцевое волокно. Частица высокой энергии, попадающая в такую нить, производит импульс черенковского света, который распространяется вдоль волокна и регистрируется на торцах парой фотоумножителей, включенных по схеме совпадения, что позволяет уменьшить число фоновых событий. Ниже мы приводим описание устройства и конструкции датчика, прототип которого создан и планируется к постановке на накопитель электронов ВЭПП-4М [4] в ближайшее время. Обсуждаются вопросы лабораторной калибровки датчика с помощью радиоактивного изотопа  $Sr^{90}$  и оценка ожидаемого сигнала на ВЭПП-4М с учетом гауссового и негауссового распределения пучка, вызванного взаимодействием циркулирующих электронов с остаточным газом.

## 2. Конструкция датчика

Схема датчика представлена на рис. 1. Кварцевая нить диаметром 1 мм (в будущем планируется уменьшить диаметр нити до 0.1 мм) и длиной 40 мм закреплена в вилке из нержавеющей стали. Поверхность нити, за исключением торцов, покрыта (методом напыления) алюминием для защиты от фоновой световой засветки синхротронным излучением пучка.

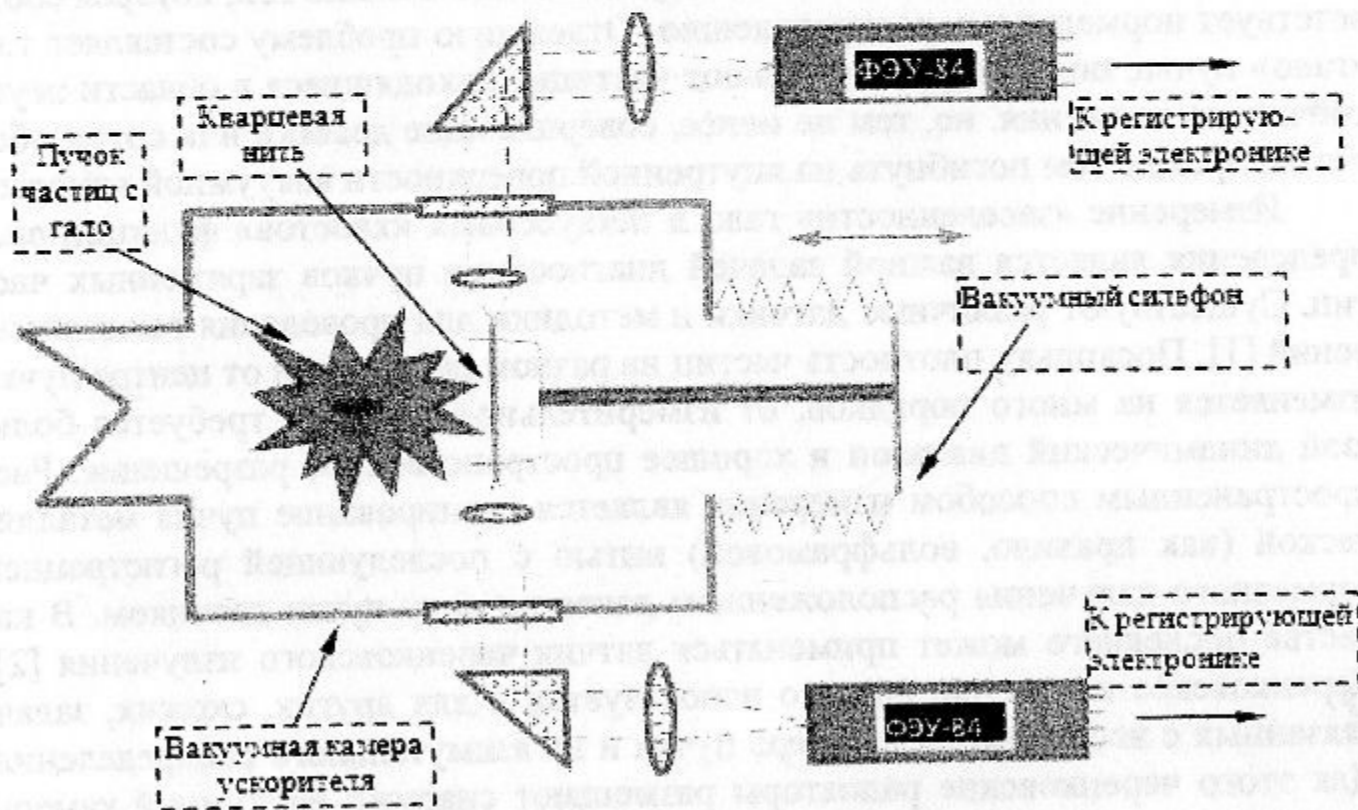


Рис. 1. Схема черенковского датчика.

На концах вилки закреплены короткофокусные линзы, коллимирующие черенковское излучение, испускаемое через торцы нити. Излучение выводится из вакуумной камеры через оптические окна и направляется призмами на фотокатоды электронных фотоумножителей ФЭУ-84. Сигналы ФЭУ подаются

ся на вход счетчика через дискриминатор, формирователь и схему совпадений. Все приборы выполнены в стандарте КАМАК. Данные счетчика считываются компьютером. Внешний вид прибора показан на рис. 2. Для перемещения нити внутри вакуумной камеры в горизонтальном направлении используется (через вакуумный сиффон) шаговый двигатель, причем совместно с кварцевой нитью передвигаются все оптические элементы, что позволяет сохранять юстировку датчика неизменной.

Датчик, для проверки работоспособности, планируется установить на электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М. Размещение кварцевой нити с системой линз внутри вакуумного объема, готового для установки на накопитель, показано на рис.3. В настоящее время толщина нити выбрана 1 мм из соображений удобства изготовления и монтажа. Далее предполагается уменьшить диаметр волокна до 0.1 мм (для уменьшения возможного влияния нити на распределение пучка), поэтому оценки ниже приводятся для этих двух толщин.

Одной из проблем экспериментов по физике частиц на ВЭПП-4М с детектором КЕДР [5] (как и на любом коллайдере) являются фоновые события, связанные с потерями частиц пучка из хвостов распределения. Прямое измерение таких частиц весьма сложно, и мы надеемся, что описываемый датчик окажется пригодным для этих целей.

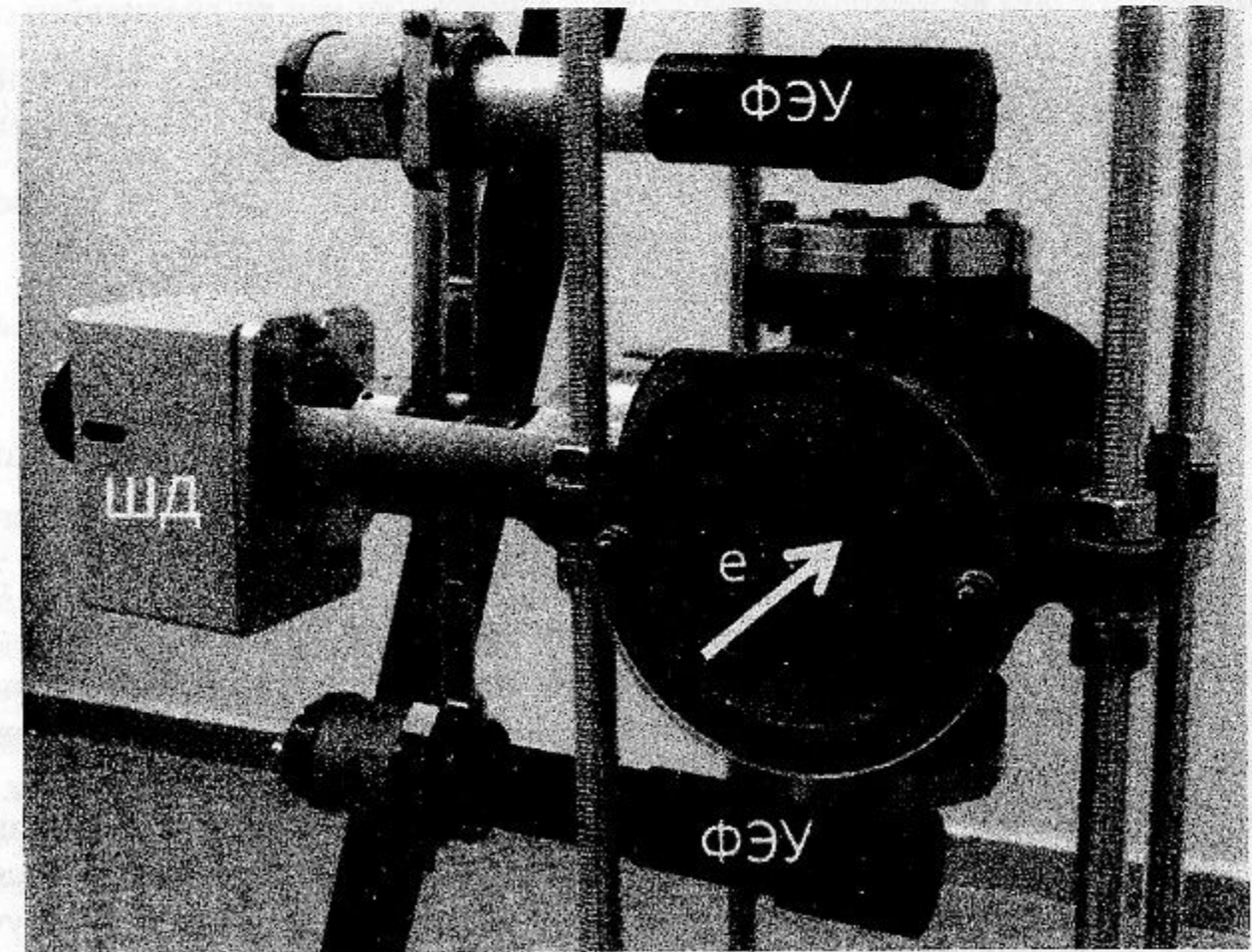


Рис. 2. Внешний вид черенковского датчика. Обозначены: входящий пучок, фотоумножители (ФЭУ) и блок шагового двигателя (ШД).

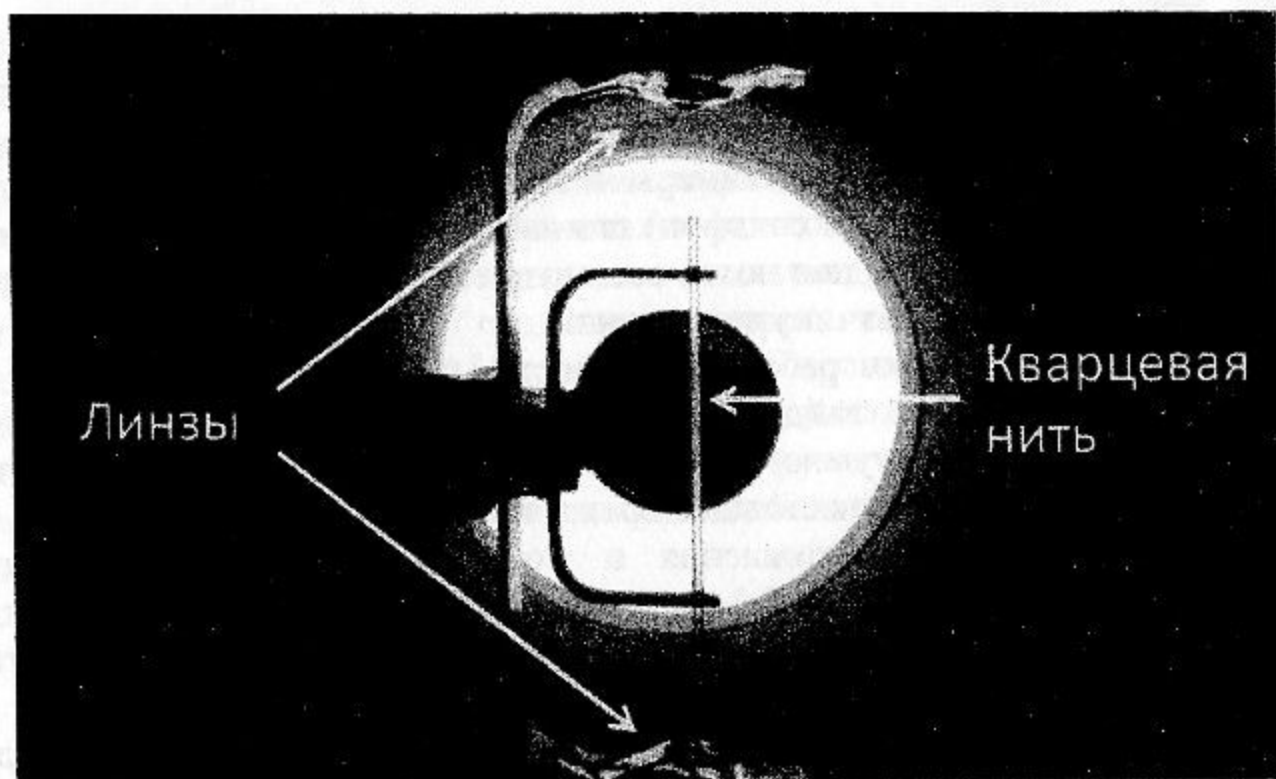


Рис. 3. Кварцевая нить, закрепленная в вилке, внутри вакуумной камеры и линзы, фокусирующие черенковское излучение, испускаемое торцами нити.

### 3. Калибровка датчика

Несложно оценить среднее число фотонов черенковского излучения, рождающегося при прохождении релятивистского электрона сквозь волокно толщиной  $d$  [6]

$$N_{ph} \approx \frac{\pi^2 \alpha d}{2} \left( \frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – постоянная тонкой структуры,  $\lambda = \lambda_{\min} \dots \lambda_{\max} = 300 \dots 700$  нм – диапазон длин волн, воспринимаемых ФЭУ,  $n = 1.5$  – показатель преломления кварца. Тогда  $N_{ph} = 38$  для толщины кварцевой нити  $d = 1$  мм и  $N_{ph} = 3.8$  для  $d = 0.1$  мм. Однако реально с учетом потерь в световоде, квантовой эффективности фотокатода, и других факторов, число регистрируемых фотонов будет гораздо меньше, и проще всего его получить с помощью калибровки датчика в лабораторных условиях.

Датчик калибровался изотопным источником  $Sr^{90}$  с паспортной активностью  $10^7$  Бк. Изотоп, помещенный в коллимирующую трубку, подносился к кварцевому волокну толщиной  $d = 1$  мм на расстояние 1 см. При этом, с учетом геометрических факторов и возраста источника, через нить проходило около  $10^6$  электронов в секунду. Один цикл измерений длился 1 мин; результаты калибровки представлены на рис. 4.

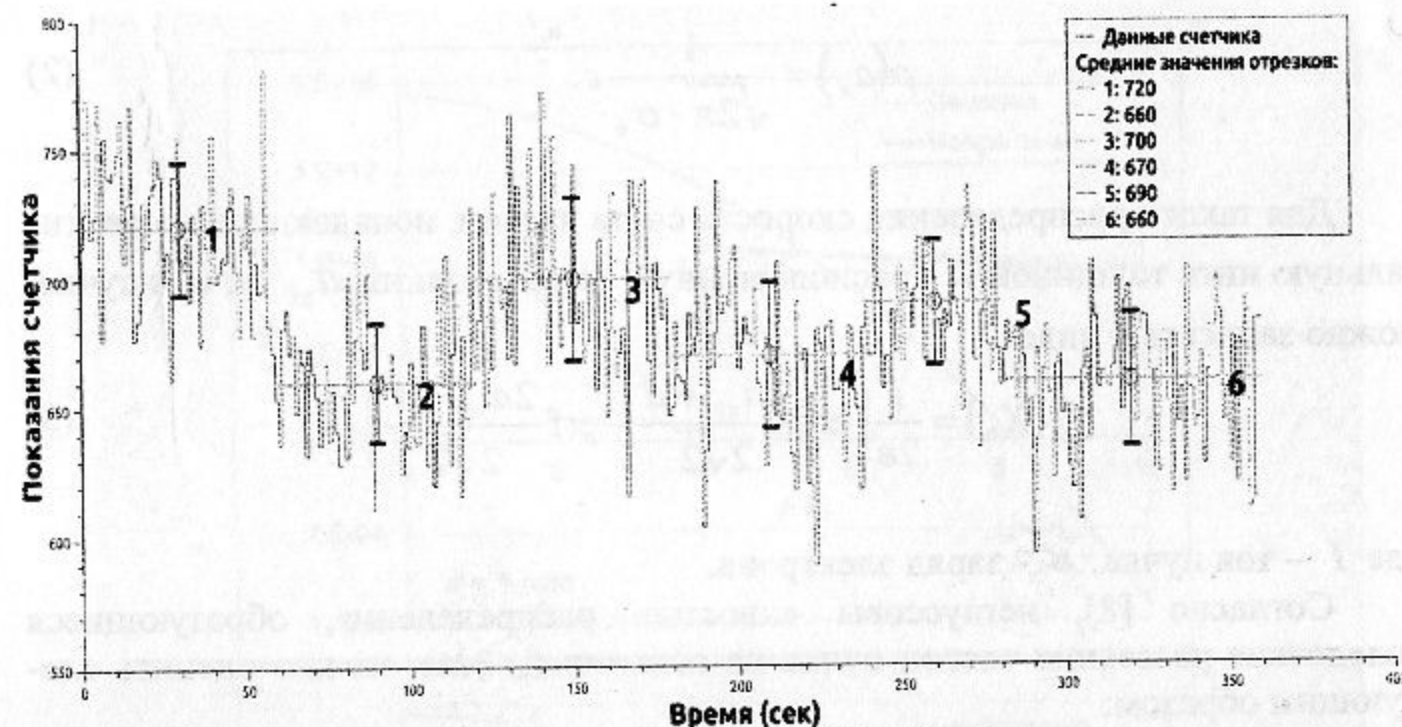


Рис. 4. Шесть циклов измерения сигнала с ФЭУ. Четные точки – изотоп отодвинут от кварцевой нити, нечетные – изотоп придвинут к нити.

Несмотря на то, что измерения велись в темноте и светочувствительные части монитора были закрыты светонепроницаемым чехлом, от фона полностью избавиться не удалось (точки с четными номерами на рис.4). Это может объясняться, в частности, собственными шумами ФЭУ, поскольку их оптимизация по этому параметру не проводилась. Использование менее «шумящих» и более чувствительных фотоумножителей может улучшить ситуацию. Несмотря на присутствие фона, полезный сигнал хорошо выделяется (нечетные точки) и составляет  $\dot{N}_{ph} \approx 40$  Гц при потоке электронов, пересекающих нить, около  $\dot{N}_e \approx 10^6$  частиц в секунду.

### 4. Оценка ожидаемой загрузки на ВЭПП-4

Поперечное распределение релятивистских электронов в накопителе определяется синхротронным излучением и, если нет других эффектов, является гауссовым [7]. Столкновение частиц пучка друг с другом (внутрипучковое рассеяние), взаимодействие с атомами остаточного газа, наличие нелинейных резонансов приводит к тому, что на больших амплитудах закон распределения частиц отличается от гауссового. Здесь мы оцениваем уровень загрузки детектора для гауссового распределения и для его искажения из-за взаимодействия частиц пучка с остаточным газом.

Пусть  $a_x = x/\sigma_x$  – расстояние от оси пучка по горизонтали, выраженное в единицах горизонтального размера пучка на азимуте размещения датчика. Тогда распределение частиц по горизонтальной координате дается формулой

$$\rho(a_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_x} e^{-\frac{a_x^2}{2}}. \quad (2)$$

Для такого распределения скорость счёта частиц, попадающих на вертикальную нить толщиной  $d$ , расположенную на расстоянии  $a_{x0}$  от оси пучка, можно записать в виде:

$$f_G(X_0) = \frac{I}{2e} \left( \operatorname{erf} \frac{2a_{x0} + d}{2\sqrt{2}} - \operatorname{erf} \frac{2a_{x0} - d}{2\sqrt{2}} \right), \quad (3)$$

где  $I$  – ток пучка,  $e$  – заряд электрона.

Согласно [8], негауссовы «хвосты» распределения, образующиеся вследствие рассеяния частиц пучка на остаточном газе, можно оценить следующим образом:

$$\rho(a_x) \approx \frac{\pi Z^2 r_e c \tau_x n}{4 \bar{\sigma}_x^2 \gamma^2} \frac{1}{a_x^3} = \frac{k}{a_x^3}, \quad a_x \rightarrow \infty, \quad (4)$$

где  $Z = 7$  – среднее зарядовое число атомов остаточного газа,  $n$  – его концентрация,  $\tau_x$  – время затухания горизонтальных бетатронных колебаний,  $\bar{\sigma}_x$  – усреднённый по кольцу разброс поперечных горизонтальных скоростей в пучке,  $\gamma$  – релятивистский фактор. Число электронов, попадающих на вертикальную нить толщины  $d$ , расположенную на расстоянии  $a_{x0}$  от оси пучка, в этом случае можно записать так:

$$f_{NG}(a_{x0}) \approx \frac{I}{2e} \left( \frac{k}{a_{x0}^2} - \frac{k}{(a_{x0} + d/\sigma_x)^2} \right), \quad (5)$$

Получим численные оценки для накопителя электронов ВЭПП-4М при энергии пучка  $E_0 = 1.8$  ГэВ. В этом случае  $\tau_x = 0.139$  с,  $\bar{\sigma}_x = 10^{-4}$  рад,  $\sigma_x = 4.9 \cdot 10^{-4}$  м. Концентрацию остаточного газа будем считать равной  $3.2 \cdot 10^{13}$  м $^{-3}$  (что соответствует среднему давлению остаточного газа  $10^{-9}$  Торр). Для этих величин коэффициент  $k \approx 3.2 \cdot 10^{-6}$ .

Число частиц, падающее за секунду на нить толщиной  $d = 1$  мм и  $d = 0.1$  мм, в зависимости от ее положения относительно центра пучка (в нормализованных единицах), для гауссового и негауссового пучка, приведено на рис.5 для тока пучка 1 мА.

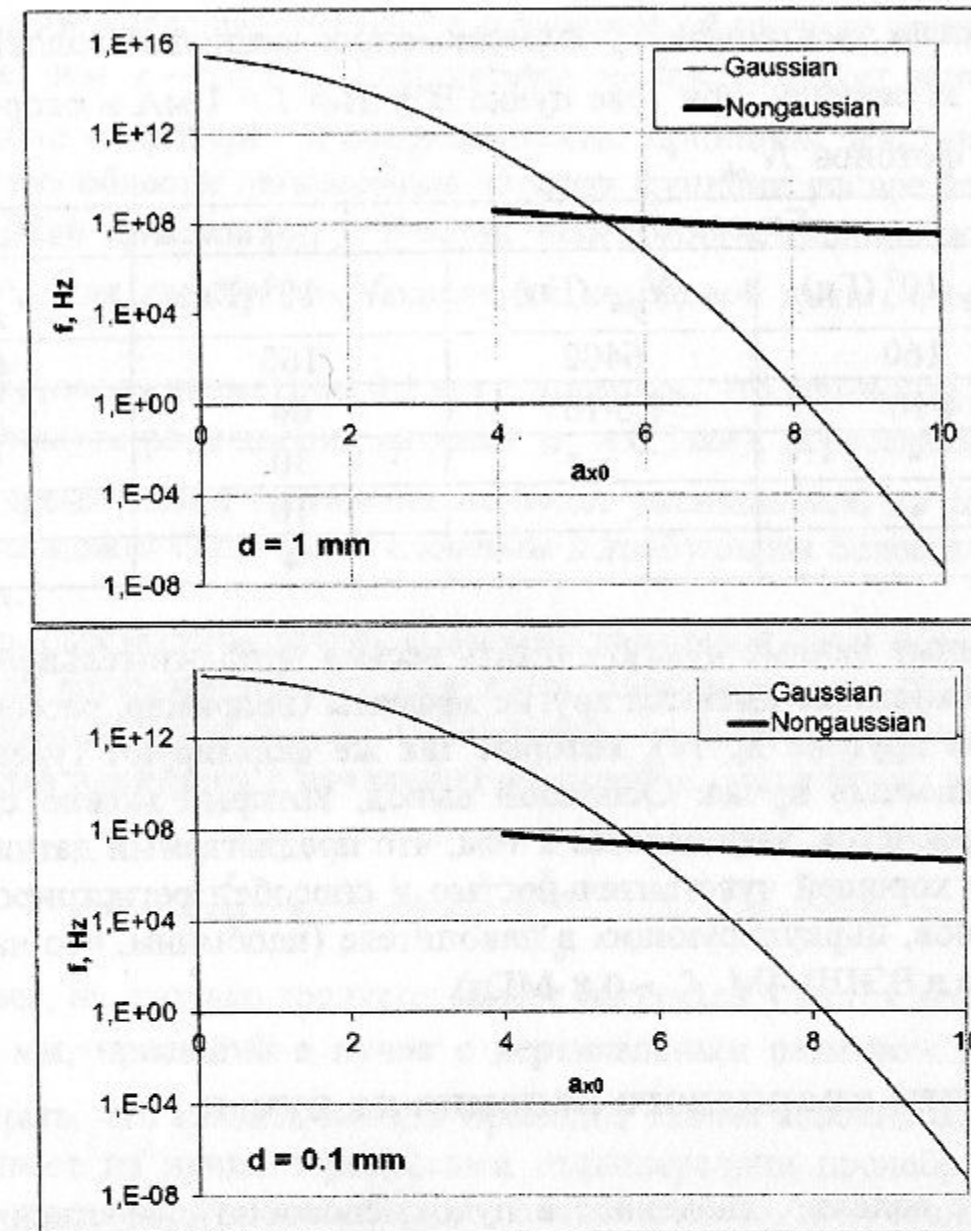


Рис. 5. Число электронов, попадающих в нить толщиной 1 мм (слева) и 0.1 мм в секунду при указанных выше параметрах ВЭПП-4М. Показано гауссово распределение и негауссов «хвост» (начиная с  $a_{x0} \approx 4\sigma_x$ ) из-за рассеяния частиц на газе.

В точке равенства двух распределений  $a_{x1} \approx 5.5\sigma_x$  и число электронов, пересекающих нить,  $f_{NG}(a_{x1}) \approx f_G(a_{x1}) \approx 2 \cdot 10^8$  е $^-$ /с для  $d = 1$  мм и  $\approx 2 \cdot 10^7$  е $^-$ /с для  $d = 0.1$  мм. При увеличении расстояния от оси пучка скорость счёта в гауссовой модели падает экспоненциально и быстро становится пренебрежимо малой. С учетом рассеяния на газе скорость счёта падает медленнее и при  $a_{x0} \approx 10$  она приблизительно в 5 раз меньше, чем при  $a_{x1}$ .

Оценочная скорость счёта датчика во время эксперимента на ВЭПП-4М с учетом результатов калибровки датчика для двух рассмотренных моделей распределения приведена в Таблице 1.

Таблица 1. Число электронов  $\dot{N}_e$  пересекающих кварцевое волокно толщиной  $d = 1$  мм за секунду, при токе пучка ВЭПП-4  $I = 1$  мА и скорость счета черенковских фотонов  $\dot{N}_{ph}$

$X_0$	Гаусс		Рассеяние на газе	
	$\dot{N}_e \cdot 10^6$ (Гц)	$\dot{N}_{ph}$ (Гц)	$\dot{N}_e \cdot 10^6$ (Гц)	$\dot{N}_{ph}$ (Гц)
5.45	160	6400	160	6400
8	$4 \cdot 10^{-6}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	60	2400
10	-	-	30	1200
15	-	-	10	400
20	-	-	4	160

Приведенные данные нужно считать весьма приблизительной оценкой, поскольку в ускорителе имеются другие эффекты (например, рассеяние электронов сгустка друг на друге), которые так же формируют (увеличивают) негауссовы «хвосты» пучка. Основной вывод, который можно сделать из проделанных расчетов, заключается в том, что предлагаемый датчик обладает достаточно хорошей чувствительностью и способен регистрировать единицы электронов, циркулирующих в накопителе (напомним, что частота обращения пучка в ВЭПП-4М  $f_0 \approx 0.8$  МГц).

## 5. Влияние кварцевого волокна на пучок

Кварцевое волокно, введенное в пучок, способно существенно уменьшить время жизни частиц в зависимости от толщины нити и расстояния до оси пучка. И наоборот, энергия, выделяемая электронами в кварцевом световоде, может привести к его нагреву и разрушению.

Для оценки степени влияния кварцевой нити на пучок воспользуемся формулой Мольер, описывающей среднеквадратичный угол рассеяния электрона при столкновении с волокном [9]

$$\theta_{xrms} \approx \frac{13.6(MэВ)}{pc} \cdot Z \cdot \sqrt{\frac{t}{X_0}} \cdot \left( 1 + 0.038 \cdot \ln \left( \frac{t}{X_0} \right) \right), \quad (6)$$

где  $Z \approx 10$  – эффективный заряд ядра среды,  $X_0 = 8.47$  см – радиационная длина для кварца,  $t$  – толщина вещества, которую, для круглой нити, для оценки можно взять как  $t \approx d/2$ . Тогда для световода, диаметром  $d = 1$  мм,  $\theta_{xrms} \approx 50$  мрад, а для  $d = 0.1$  мм,  $\theta_{xrms} \approx 1$  мрад. Поскольку углы рассеяния для диаметра 1 мм многократно превышают собственный угловой разброс в пучке ( $\bar{\sigma}_x = 0.1$  мрад), рассеявшиеся частицы с большой вероятностью попадают за пределы акцептанса накопителя и теряются. То есть нить можно рассматривать, как ограничение апертуры, приводящее к сильному уменьшению

времени жизни, когда расстояние от сканирующей нити до центра пучка станет меньше, чем  $x \sim 5 + 6\sigma_x$ . Это, однако, не препятствует выполнению основной задачи – проверке и подтверждению принципа действия датчика, и исследованию области негауссовых хвостов функции распределения и гало пучка ВЭПП-4 при  $x > 10\sigma_x$ . Резкую зависимость времени жизни удобно использовать для калибровки положения кварцевой нити относительно оси пучка.

Для световода диаметром 0.1 мм (напомним, что горизонтальный размер пучка на азимуте размещения датчика  $\sigma_x \approx 0.5$  мм), пересекающего кварцевую нить, время жизни частиц так же будет уменьшаться, но характер этого уменьшения может быть более сложным и требующим более детального исследования.

Теперь рассмотрим вопрос о нагреве кварцевой нити пересекающим ее пучком. Для рассматриваемых импульсов электронов преобладающим процессом взаимодействия частиц с веществом является тормозное излучение. При этом для электрона с начальной энергией  $E_0$  нити будет передано и нагреет ее

$$\Delta E = E_0(1 - e^{-t/X_0}) \approx E_0 \cdot \frac{t}{X_0}, \quad t/X_0 \ll 1. \quad (7)$$

Оценим, на сколько градусов может нагреться участок волокна диаметром  $d = 1$  мм, попавший в пучок с вертикальным размером  $\sigma_y \approx 5 \cdot 10^{-5}$  м.

Будем считать, что каждая частица проходит сквозь волокно один раз, после чего выбывает из пучка. Процессами теплопередачи пренебрежём, считая, что нагрев происходит очень быстро, следовательно, полученная оценка будет оценкой сверху. Пусть  $\Delta m$  – масса нагретого участка волокна,  $\Delta E$  – энергия, выделяющаяся при однократном прохождении через него одного электрона,  $N_e = 7.5 \cdot 10^9$  – количество частиц в пучке при токе 1 мА, тогда

$$\Delta T = \frac{N_e \cdot \Delta E}{c \cdot \Delta m} = \frac{2}{\pi} \frac{N_e \cdot E_0}{c \cdot X_0 \rho \sigma_y d} \approx 170 \text{ К},$$

где  $c = 741$  Дж/(кг·К) – удельная теплоёмкость кварца,  $\rho = 2649$  кг/м<sup>3</sup> – его плотность. Небольшой, по сравнению с температурой плавления кварца (1470 К), нагрев нити при попадании волокна в область с большой плотностью частиц, позволяет надеяться, что при токе 1 мА нить останется неповрежденной – пучок погибнет быстрее, чем будет достигнута температура плавления.

Для более точной оценки необходимо учитывать как скорость потерь частиц в зависимости от положения нити, так и процесс излучения нагретой нитью.

## 6. Заключение

Предложен новый тип датчика для измерения поперечного распределения пучка в ускорителе заряженных частиц на больших амплитудах, где плотность частиц мала. Рабочим элементом датчика является отрезок кварцевого световода, перемещаемого шаговым двигателем в горизонтальной плоскости перпендикулярно пучку. Частицы пучка, пересекая кварцевую нить, генерируют черенковское излучение, регистрируемое фотоумножителями с обоих торцов волокна. Прототип датчика разработан, изготовлен и готов к установке на накопителе ВЭПП-4 для проверки идеи регистрации и работоспособности устройства, а также, для исследования гало пучка электронов и позитронов, создающего фоновые события в детекторе КЕДР. Калибровка датчика в лабораторных условиях показала, что чувствительность монитора позволяет регистрировать отдельные электроны, циркулирующие в накопителе.

## 7. Литература

- [1] P. Camron, K. Wittenburg, "Halo Diagnostics Summary", 29<sup>th</sup> ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Beam Halo Dynamics and Collimation, HALO'03, May 19-23, 2003, Long Island, NY.
- [2] S. Liu, P. Bambade et al. Beam halo measurement using wire scanners at ATF2, Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, 3445-3447.
- [3] F. Wulf and M. Korfer, Beam loss and beam profile monitoring with optical fibers. Proc. of DIPAC09, Basel, Switzerland, 411-417.
- [4] А.Н. Алешаев и др. Ускорительный комплекс ВЭПП-4, Препринт ИЯФ 2011-20, 2011 г., ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, 136 с.
- [5] V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, E.M. Baldin et al. The KEDR detector. 46 pp. Phys. Part. Nucl. 44 (2013) 657-702.
- [6] А.П. Онучин. Экспериментальные методы ядерной физики. Изд-во НГТУ, 2010. – 210 с. (Серия «Учебники НГТУ»).
- [7] Г. Брук. Циклические ускорители заряженных частиц. М., «Атомиздат», 1970 г.
- [8] K. Hirata, K. Yokoya, Non-Gaussian Distribution of Electron Beams due to Incoherent Stochastic Processes, KEK Preprint 91-212, 1992.
- [9] B. Rossi, High energy particles, Prentice-Hall, 1952.



*Д.А. Ворошилов, С. А. Глухов, Е.Б. Левичев,  
О.И. Мешков, А.И. Михайлов*

**Черенковский датчик на основе кварцевого волокна для исследования поперечного распределения частиц в циклическом ускорителе**

**ИЯФ 2015-6**

Ответственный за выпуск А.В. Васильев  
Работа поступила 7.06. 2015 г.

---

Сдано в набор 7.06. 2015 г.

Подписано в печать 8.06. 2015 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 2 печ.л., 1.5 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 6

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапинтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11