

ЧЕРЕНКОВСКИЙ СЧЕТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ БАНЧЕЙ, ВЫВЕДЕННЫХ ИЗ УСКОРИТЕЛЯ ИФВЭ

С. П. Денисов, В. Н. Евдокимов, А. В. Козелов¹, Н. Н. Прокопенко,
М. М. Солдатов, Д. А. Стоянова, В. И. Якимчук

Описан черенковский счётчик для измерения числа протонов в банчах, выведенных из ускорителя ИФВЭ при помощи системы медленного вывода. Диапазон измерений от 1 до 10^6 частиц/банч. Максимальная частота банчей $6 \cdot 10^6$ 1/с. Черенковский свет регистрируется ФЭУ ХР 2020. Приведены результаты измерений амплитуды сигнала ХР 2020 от напряжения на нём, выполненные при помощи полупроводниковых источников света. Обсуждаются данные калибровки счётчика на пучке протонов.

Ключевые слова: черенковский счетчик, число протонов в банче.

Как известно, протоны в процессе ускорения в синхротроне ИФВЭ сгруппированы в банчи (сгустки). Минимальный интервал между банчами 165 нс, длительность банча ~ 30 нс. После завершения ускорения протоны либо наводятся на внутренние мишени, либо выводятся в каналы частиц. В последнем случае возможны несколько режимов. В одном из них банчируемый пучок протонов выводится в каналы при помощи системы медленного вывода. Длительность медленного вывода составляет 1–3 с, длительность цикла работы ускорителя 10 с, число банчей до $6 \cdot 10^6$ с⁻¹. Число частиц в банче зависит от полной интенсивности выводимого пучка и может изменяться от ~ 1 при низкой ($\leq 10^6$ прот/с) интенсивности до $\sim 10^6$ при высокой (до $\sim 10^{13}$ прот/с).

До настоящего времени при работе с высокой интенсивностью использовались мониторы (камеры вторичной эмиссии и ионизационные камеры), позволяющие измерять лишь интегральную за цикл интенсивность выведенного пучка, в то время как в ряде

Институт физики высоких энергий, Протвино.

¹ E-mail: Alexander.kozelov@ihep.ru.

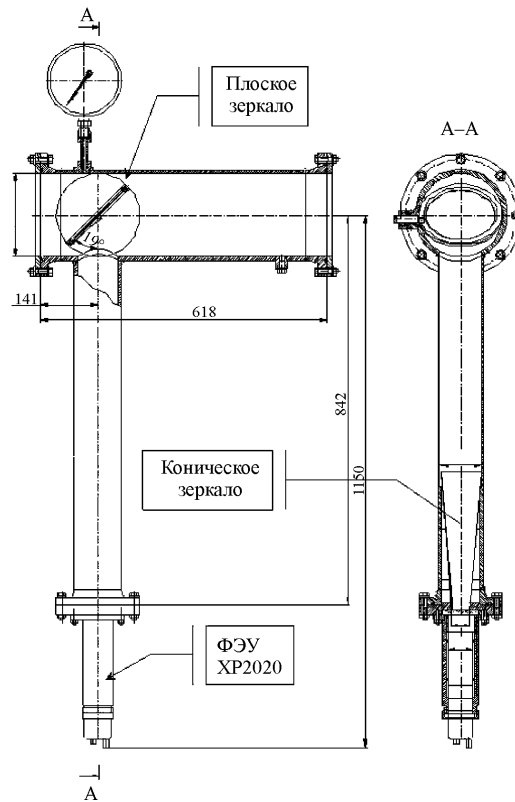


Рис. 1: Конструкция черенковского счётчика.

задач возникает необходимость знать число протонов в каждом банче (оно может меняться в несколько раз от банча к банчу в одном цикле). Кроме того, эти камеры требуют калибровки, которая проводится путем их облучения одновременно с алюминиевой фольгой с последующим измерением активности фольги [1]. Погрешность калибровки $\sim 20\%$.

В настоящей работе описан черенковский счетчик, позволяющий измерять число частиц в каждом из выведенных банчей, т.е. проводить до $6 \cdot 10^6$ измерений в секунду. Он не требует калибровки при помощи алюминиевой фольги, а точность измерения интенсивности (одного банча и интегральной за цикл) в несколько раз лучше, чем с ранее использованными детекторами. Счетчик предназначен для измерений интенсивности банчей протонов с энергией 50 ГэВ на канале № 23 ускорителя ИФВЭ.

Конструкция счётчика и результаты моделирования. Конструкция счётчика показана на рис. 1. Рабочими газами счетчика являются воздух или фреон CF_4 при давлении ~ 1 атм. Для протонов с энергией 50 ГэВ при 20°C и атмосферном давлении 760 Торр пороговое давление и угол черенковского излучения составляют 0.4 атм и 23.4 мрад для

фреона и 0.65 атм и 14.1 мрад для воздуха. Излучённый свет отражается от зеркала из тонкого (100 мкм) алюминизированного майлара, расположенного под 45° к пучку и попадает на ФЭУ ХР 2020 (рис. 1), работающий в аналоговом режиме. Для улучшения светосбора используется коническое зеркало, также изготовленное из алюминизированного майлара. Толщина счетчика вдоль пучка частиц составляет всего 0.07 г/см^2 или $1.7 \cdot 10^{-3}$ рад. длины, или $8.1 \cdot 10^{-4}$ яд. длины.

В интервале длин волн от 0.270 до 0.640 мкм, который соответствует полной ширине спектральной характеристики ХР 2020 [2], в счётчике в среднем на один протон излучится 25.6 и 9.3 фотонов при 1 атм фреона и воздуха соответственно. Расчёты методом Монте-Карло показывают, что при коэффициенте отражения от алюминизированного майлара 0.6 и распределениях частиц в пучке по радиусу и углу по закону Гаусса с $\sigma = 5 \text{ мм}$ и 5 мрад соответственно, входного окна ХР 2020 достигают 53% фотонов из воздуха и 41% из фреона. Лучший светосбор для воздуха связан с меньшим углом излучения: для воздуха почти все фотоны собираются на ФЭУ, минуя коническое зеркало, в то время как для CF_4 заметная доля света попадает на коническое зеркало. Полученный результат слабо зависит от разброса протонов по радиусу и углу. Например, при удвоении указанных выше значений σ эффективность светосбора меняется для воздуха на 10%, а для фреона остается почти на прежнем уровне. При среднем квантовом выходе ХР 2020 0.1 и 100% вероятности регистрации одного фотоэлектрона можно ожидать, что эффективность счётчика составит 0.39 и 0.65 для воздуха и фреона при 1 атм. Погрешность приведённых оценок составляет $\sim 20\%$.

Калибровка счетчика. Диапазон амплитуд $A \sim 10^6$ сложно перекрыть при фиксированных значениях давления P рабочего газа и напряжения HV на ФЭУ. Поэтому необходимо измерить зависимости $A(P)$ и $A(\text{HV})$. Для измерения $A(\text{HV})$ использовались два светодиода, излучающих свет в зеленом и синем диапазонах. Этот свет по оптическому волокну направлялся на фотокатод ХР 2020. Амплитуда сигнала с ФЭУ измерялась при помощи цифрового осциллографа с погрешностью не более 5%.

Полученная для одного из ХР 2020 (все измерения проводились с двумя ФЭУ) зависимость $A(\text{HV})$ показана на рис. 2. Как можно было ожидать, они хорошо следуют степенному закону [3] при изменении амплитуды на 5 порядков величины. Показатели степени близки к 10 и слабо зависят от длины волны света (см. табл. 1).

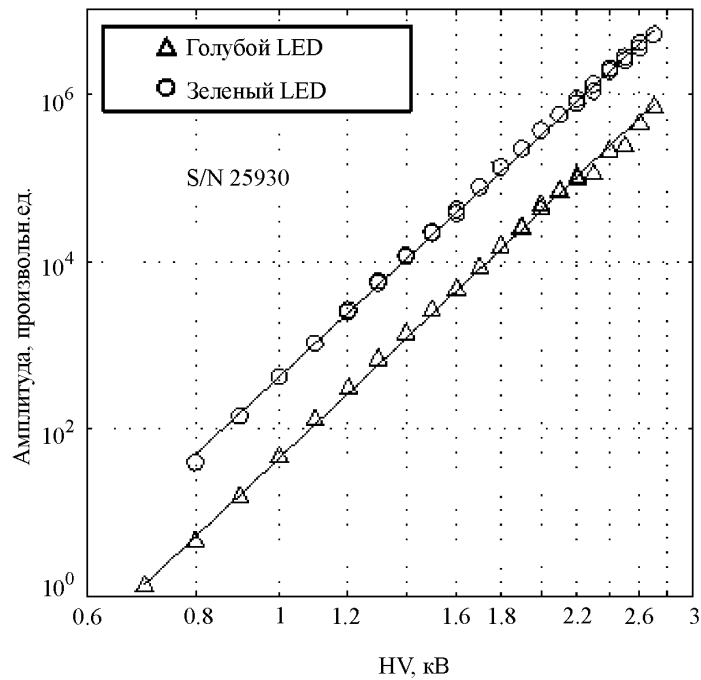


Рис. 2: Зависимость амплитуды сигнала с ФЭУ от напряжения. Амплитуда сигнала от зелёного светодиода для наглядности увеличена в 10 раз.

Т а б л и ц а 1

Показатель степенной функции, описывающей зависимость амплитуды сигнала с ФЭУ от напряжения

Номер ФЭУ	25930	25933
Синий светодиод	9.75 ± 0.03	9.99 ± 0.03
Зелёный светодиод	9.59 ± 0.03	9.78 ± 0.03
Пучковые данные	9.82 ± 0.02	9.84 ± 0.03

Чтобы связать измеренные амплитуды с сигналом черенковского счётчика от одного протона, был проведен специальный эксперимент на канале № 2В ускорителя ИФВЭ. Растянутый во времени (небанчиворванный) пучок протонов с энергией 50 ГэВ и средней интенсивностью $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ проходил через 3 триггерных сцинтилляционных счётчика S1, S2, S3 и исследуемый черенковский счётчик С. Триггерный сигнал $T=S1 \cdot S2 \cdot S3$ использовался для запуска системы сбора информации в ПК, а отношение $ТС/T$ определяло эффективность черенковского счётчика, где ТС – совпадение сигнала Т с сигналом от черенковского счётчика.

Сигналы с ФЭУ черенковского счетчика поступали на преобразователь амплитуда-код (АЦП) LeCroy 2249a, стробируемый сигналом Т длительностью 50 нс. Вероятность того, что за это время через счетчик пройдут 2 протона, была значительно меньше 1%. Система сбора информации позволяла регистрировать до 1500 событий за цикл работы ускорителя. Эксперимент состоял в измерении эффективности черенковского счетчика и амплитудных распределений его сигналов при разных величинах давления рабочего газа и напряжения на ФЭУ. Для каждого значения P и HV набиралось ~ 50000 событий.

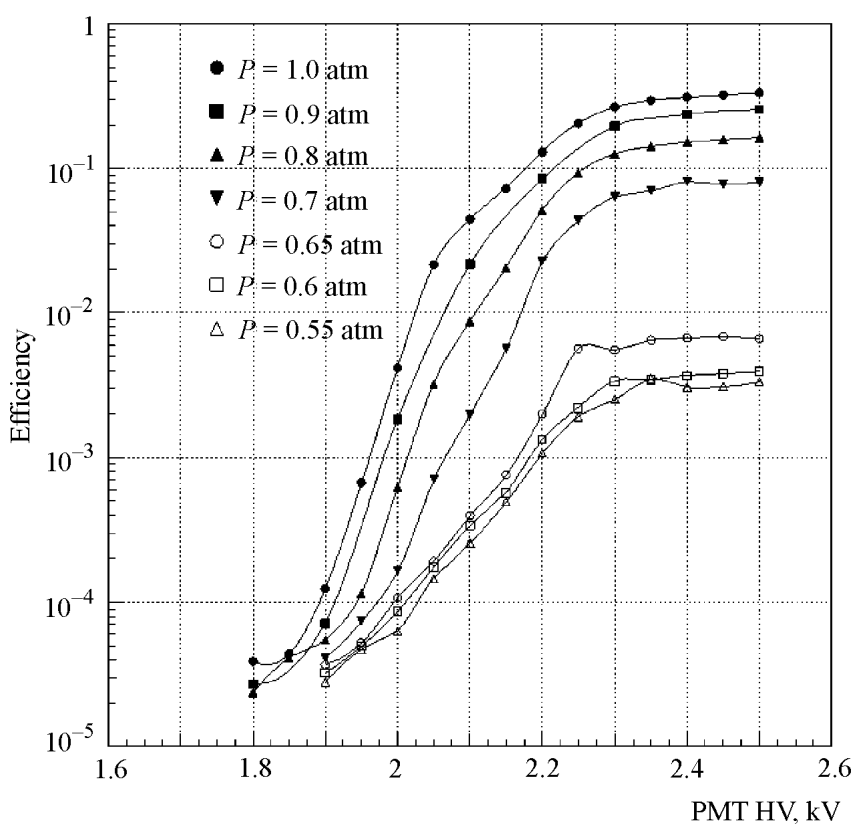


Рис. 3: Зависимости эффективности счётчика от напряжения на ФЭУ.

Результаты калибровки на пучке частиц. Зависимости эффективности счётчика от напряжения на ФЭУ при разных давлениях воздуха показаны на рис. 3. Видно, что при напряжениях > 2.3 кВ они выходят на плато, что указывает на близкую к 1 вероятность регистрации одного фотоэлектрона. Зависимости эффективности счётчика от давления газов для одного из фотоумножителей приведены на рис. 4. При условии

регистрации каждого фотоэлектрона они описываются зависимостью

$$\varepsilon(P) = \begin{cases} 1 - \exp[-a(P - P_0)], & P \geq P_0, \\ 0, & P < P_0, \end{cases}$$

где P_0 – пороговое давление и $a(P - P_0)$ – среднее число фотоэлектронов. Результаты подгонки представлены в табл. 2. Видно, что величины порогового давления и эффективности счётчика при атмосферном давлении воздуха и фреона близки к ожидаемым.

Т а б л и ц а 2

Результаты аппроксимации кривых эффективности при $HV = 2.6$ кВ

ФЭУ	Газ	a	P_0 (атм)	ε (при 1 атм)
25930	Воздух	1.19 ± 0.05	0.666 ± 0.003	0.33 ± 0.02
	CF ₄	1.86 ± 0.03	0.392 ± 0.003	0.68 ± 0.02
25933	Воздух	1.11 ± 0.04	0.668 ± 0.003	0.31 ± 0.02
	CF ₄	1.72 ± 0.03	0.390 ± 0.003	0.65 ± 0.02

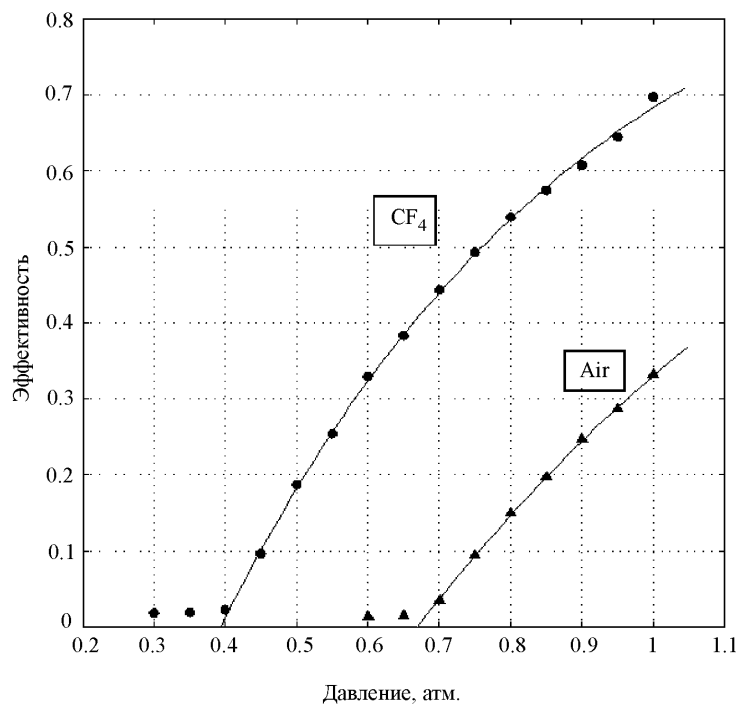


Рис. 4: Кривые эффективности для воздуха и фреона при $HV = 2.6$ кВ.

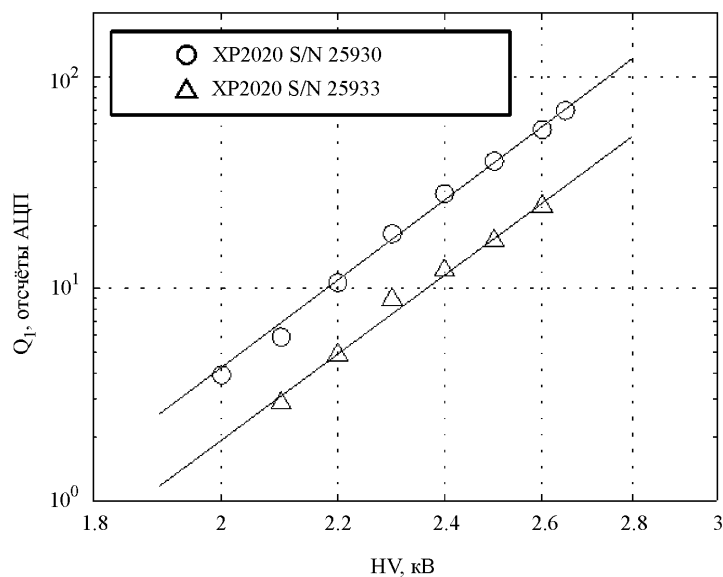


Рис. 5: Зависимость средней амплитуды сигнала от напряжения на ФЭУ при давлении газов 1 атм.

На рис. 5 показаны зависимости средней амплитуды сигнала черенковского счетчика от высокого напряжения для двух фотоумножителей. Они хорошо следуют степенному закону. Найденные показатели степени приведены в табл. 1 (последняя строка). Они хорошо согласуются с полученными в результате измерений при помощи светодиодов.

Полученные в калибровочных опытах данные позволяют определить среднюю амплитуду от одной частицы в широком диапазоне значений высокого напряжения на ФЭУ и давления рабочего газа в счётчике.

Результаты измерений на канале № 23. Черенковский счётчик использовался для измерения интенсивности банчей, выводимых из ускорителя в канал № 23, в ноябрьском сеансе 2008 г. В измерениях использовалось новое АЦП, специально разработанное для измерения амплитуд с частотой до 6 МГц. Его основные характеристики: динамический диапазон преобразования 12 бит, максимальный измеряемый заряд 650 пК, интегральная нелинейность преобразования менее 0.1%, длительность строб-импульса 70 нс (формируется внутри модуля), емкость внутренней памяти 32 МБ. Модуль АЦП имеет входы для сигнала триггера, связывающего регистрируемое событие с банчем, в котором оно произошло, и для 6 МГц частоты ускоряющих станций У-70, которая используется для выработки строб-импульса и синхронизации работы АЦП и ускорителя. В специальном опыте был измерен коэффициент преобразования отсчётов АЦП,

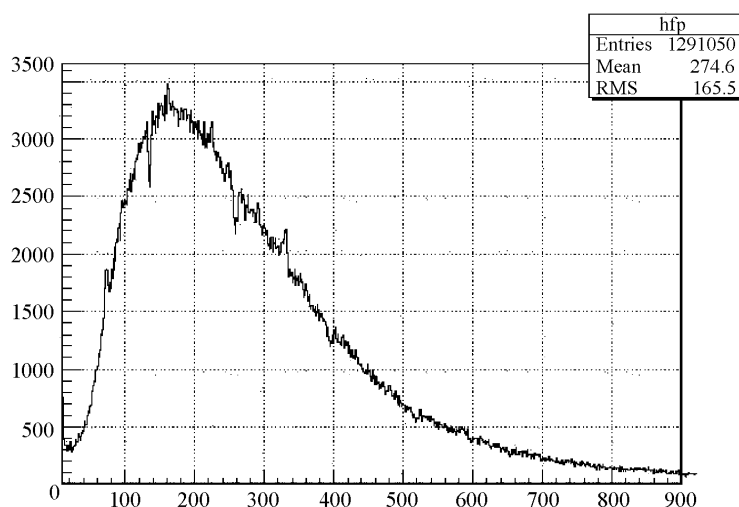


Рис. 6: Спектр амплитуд сигналов в одном из циклов ускорителя при напряжении на ФЭУ 2.1 кВ ($P = 1$ атм, воздух) при интенсивности пучка $6 \cdot 10^8$ протонов/с.

использованного при калибровке на канале № 2В, к отсчётам нового АЦП. Он оказался равным 1.98.

Амплитудный спектр банчей, измеренный в одном из циклов работы ускорителя, показан на рис. 6. Видно, что число частиц в банчах может отличаться в несколько раз даже в одном цикле.

Сравнение измерений интенсивности протонного пучка при помощи черенковского счетчика и ионизационной камеры в диапазоне 10^8 – 10^{11} протонов/цикл показало, что черенковский счетчик дает на 20–30% меньшие значения, что находится в пределах точности калибровки камеры в данном сеансе.

Заключение. Разработан, изготовлен и исследован простой черенковский счётчик для измерения числа частиц в банчах выведенного из ускорителя ИФВЭ пучка протонов при частоте банчей до $6 \cdot 10^6$ Гц и интенсивности $> 10^7$ с⁻¹. Погрешность определения числа частиц в банче и интегральной интенсивности протонного пучка/цикл может быть доведена до 2–3%, что значительно лучше других методов.

Авторы благодарны П. Шахту, предоставившему ФЭУ ХР2020, А. В. Левину, В. И. Суздальеву, И. Н. Белякову, Н. М. Белякову, П. И. Галуху, С. А. Звягинцеву, В. В. Константинову, О. Н. Ромашову и И. В. Швабовичу за участие в проектировании, изготовлении, юстировке и монтаже черенковского счётчика на каналах частиц и Т. З. Гуровой за помощь в подготовке публикации. Данная работа поддержана грантом РФФИ 09-02-00303-а.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. V. Cumming, J. Hudis, A. M. Poskanzer, et al., Phys. Rev. **128**, 2392 (1962);
Г. И. Крупный, Д. В. Снитко, А. А. Янович, Атомная энергия **89**(5), 418 (2000);
препринт ИФВЭ 2000-13 (ИФВЭ, Протвино, 2000).
- [2] <http://www.photonis.com/upload/industryscience/pdf/pmt/XP2020.pdf>
- [3] S. O. Flyckt and C. Marmonier, "Photomultiplier tubes principles & applications"
(Photonis, Brive Cedex, France, 2002).

Печатается по материалам конференции "II Черенковские чтения: Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике элементарных частиц" (Москва, ФИАН, 14 апреля 2009 г.).

Поступила в редакцию 4 ноября 2009 г.