

## Измеритель энергетических потерь ионизирующего излучения на основе акустического преобразователя

В. И. АЛБУЛ, В. Б. БЫЧКОВ, К. Е. ГУСЕВ, В. С. ДЕМИДОВ, Е. В. ДЕМИДОВА,  
А. Ф. КУРЧАНОВ, В. Е. ЛУКЬЯШИН, А. Ю. СОКОЛОВ

Предложено измерительное устройство на основе эффекта возникновения ультразвуковых волн в среде при прохождении через нее ионизирующего излучения. Регистрирующим элементом служит тонкая алюминиевая пластина (0,2 мм), вмонтированная в керамический акустический преобразователь (АП) в форме кольца толщиной 2 мм. Малая толщина пластины сводит к минимуму искажения параметров измеряемого пучка, а применение специальной технологии изготовления АП обеспечивает высокую чувствительность устройства. Проведена калибровка устройства на пучке протонов ускорителя ИТЭФ при энергии 200 МэВ, интенсивностях  $2 \cdot 10^9$  —  $6 \cdot 10^{10}$  частиц на импульс и длительности импульса 70 нс.

**Ключевые слова:** ионизирующее излучение, ультразвуковой сигнал, измерение интенсивности пучков протонов.

The suggested measuring device is based on the effect of ultrasonic signal production by pulse of ionizing radiation traversing media. The thin aluminium plate (0,2 mm) has been used as registering element. It's mounted in a ring-shaped ceramic acoustic transducer (AT) with the thickness of 2 mm. Small thickness of Al plate makes possible to minimize the distortion of measured beam parameters while the application of special technology of AT production guarantees the high sensitivity of the device. The device calibration was carried out at ITEP accelerator using 0,2 GeV proton beam with the intensity of  $2 \cdot 10^9$  —  $6 \cdot 10^{10}$  particles/pulse and bunch duration of 70 ns.

**Key words:** ionizing radiation, ultrasonic signal, measuring of intensity of proton beam.

Идея использования эффекта генерации акустических сигналов при прохождении короткого сгустка заряженных частиц через вещество для измерения параметров пучков заряженных частиц не нова. Научный интерес к проблеме невозмущающего контроля параметров выводимых пучков, пик которого в СССР и США пришелся на 1970-е годы, вызвал разработку устройств с использованием акустических преобразователей (АП) [1, 2]. Они предназначались, в ос-

новном, для определения токов выводимых пучков заряженных частиц, оценки пространственного и временного распределения пучка [3—5]. Для генерации акустических колебаний использовали алюминиевые диски толщиной 2—10 мм. По ним же звук передавался на АП. Практическое применение таких датчиков может быть довольно широким: от мониторинга пучков заряженных частиц в экспериментах по физике частиц высоких энергий на ускорителях до изме-

рения интенсивности нейтральных пучков в каналах импульсных нейтронных генераторов, где индуктивные и емкостные методы измерения нельзя использовать принципиально. Тем не менее, датчики на основе АП до настоящего времени не нашли широкого применения.

Данная статья посвящена физико-техническим подходам к разработке, а также экспериментальному исследованию образца ультразвукового датчика на выведенных пучках заряженных частиц ускорителей.

Одно из основных требований при измерении интенсивности пучков заряженных частиц состоит в минимизации влияния конструкции самого датчика на параметры пучка. Поэтому толщина помещаемой в зону пучка пластины должна быть минимальной. Однако при этом акустический сигнал, пропорциональный потерям энергии, также уменьшается, и его регистрация становится проблематичной.

В предлагаемом измерителе интенсивности пучка заряженных частиц в качестве мишени используется диск из алюминиевого сплава. Его толщина (200 мкм) выбрана как компромисс двух противоположных условий: уменьшить вносимые конструкцией датчика искажения пучка и сохранить ее физико-механические свойства как акустического волновода. Неизбежное при этом уменьшение амплитуды ультразвуковой волны компенсируется при помощи электрических схем усиления и фильтрации сигнала. Для уменьшения входной электрической емкости предусилителя его размещают в непосредственной близости к АП.

Конструкция чувствительного элемента датчика изображена на рис. 1. Мишень представляет собой алюминиевый диск диаметром 15 мм, вклеенный в кольцеобразный чувствительный элемент из пьезокерамики ЦТС-19. Толщина чувствительного элемента 300 мкм, внешний диаметр 30 мм. Фактически на поверхность пьезокерамики были нанесены два токосъемных кольцевых электрода, после чего она была радиально поляризована. Электрическая емкость чувствительного элемента составила 180 пФ. Для увеличения чувствительности датчика пьезокерамика вклеивалась в опорное кольцо, за которое датчик крепился в корпусе.

Предусилитель датчика собран на четырех дискретных элементах. В качестве входного активного элемента использован низкошумящий полевой транзистор. Коэффициент усиления усилителя равен 47, полоса пропускания по уровню  $-3$  дБ составляет  $100$  кГц —  $1$  МГц, максимальный уровень униполярного выходного сигнала (размах) равен  $0,7$  В.

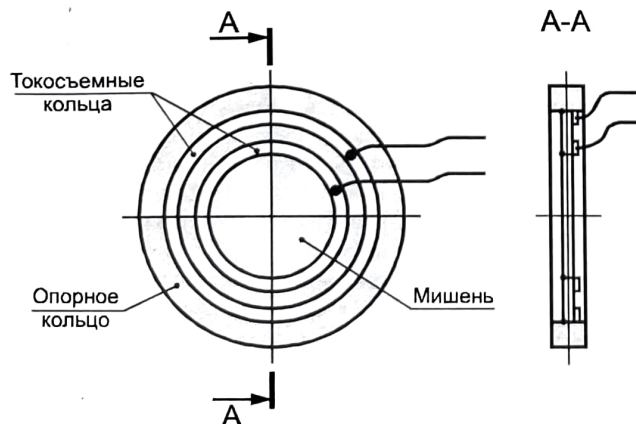


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента датчика

Выходной каскад усилителя рассчитан на работу с коаксиальным кабелем, имеющим волновое сопротивление  $50$  Ом. Длинный ( $15$  м в эксперименте) кабель позволяет удалить устройство обработки информации от датчика. Во время эксперимента датчик, объединяющая АП и предусилитель закрепляли в зоне выхода пучка из коллиматора в радиационно опасной зоне.

Измеритель интенсивности градуировали на внешнем импульсном пучке протонов ускорителя ИТЭФ. Цель калибровки — получить зависимость отклика измерителя на прохождение пучка от интенсивности пучка, измеренной индукционным способом.

Пучок протонов имел следующие параметры:

энергия частиц	200 МэВ,
период повторения импульсов пучка	4,2 с,
интенсивность протонов на импульс	$2 \cdot 10^9$ — $6 \cdot 10^{10}$ ,
длительность сброса пучка	70 нс,
диаметр коллиматора пучка	10 мм.

Электрический сигнал для дальнейшей обработки регистрировали с помощью цифрового осциллографа TDS3032. Сигнал калибруемого измерителя подавали на один из каналов осциллографа. Другой канал служил для записи интенсивности пучка протонов на входе в мишень, к нему подводили импульсный сигнал от индукционного датчика. Во всем диапазоне изменения интенсивности точность измерения тока пучка не превышала  $5\%$ .

Запуск осциллографа осуществлялся импульсом, который по времени совпадал с моментом входа пучка частиц в мишень с точностью не более  $20$  нс. Сигналы записывались в стандартном режиме по  $10^4$  точек с частотой развертки луча  $100$  МГц. Всего было выполнено  $58$  измерений при различных интенсивностях пучка протонов.

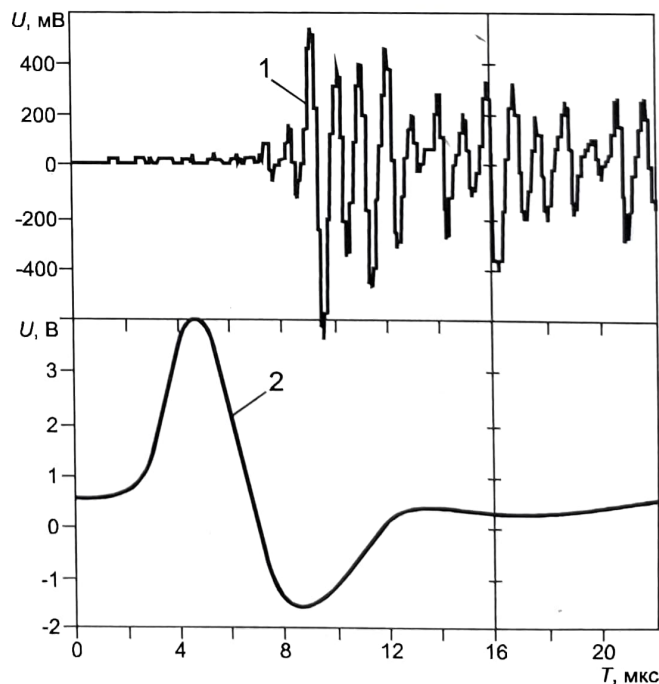


Рис. 2. Осциллограммы сигналов, полученных при интенсивности пучка  $5,4 \cdot 10^{10}$  протонов за сброс:

1 — отклик акустического датчика; 2 — сигнал от индукционного датчика



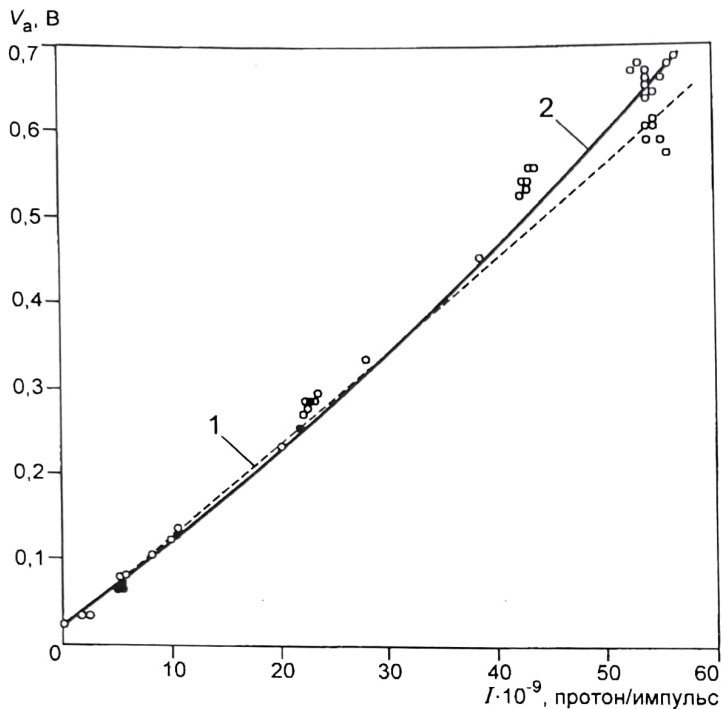


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала ультразвукового датчика  $V_a$  от интенсивности пучка протонов, аппроксимированная прямой (1) и параболой (2)

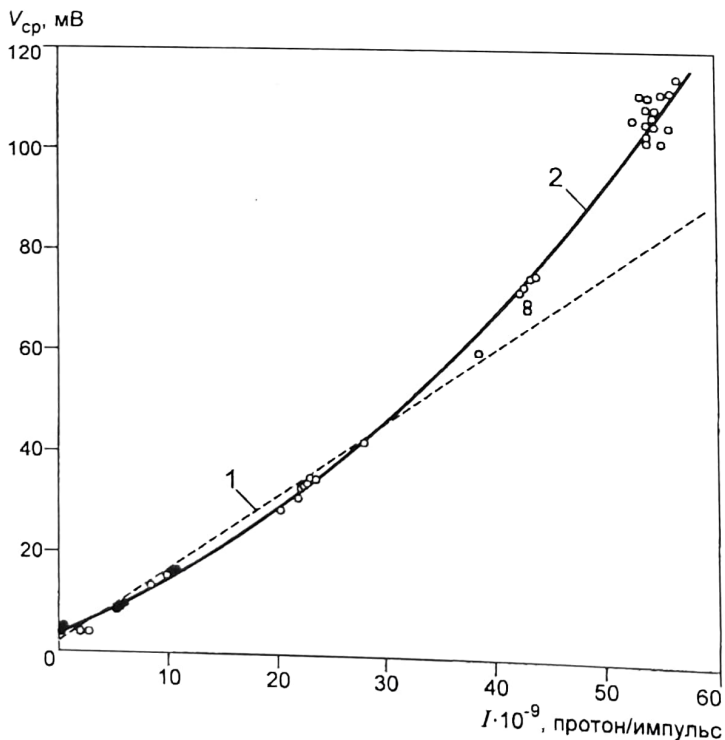


Рис. 4. Зависимость среднего эффективного значения сигнала датчика  $V_{cp}$  от интенсивности пучка протонов, аппроксимированная прямой (1) и параболой (2)

На рис. 2 показана типичная осциллограмма сигналов, полученная при интенсивности пучка протонов  $5,4 \cdot 10^{10}$  протонов за сброс, что соответствует энерговыделению в мишени  $1,1 \cdot 10^{16}$  эВ. На верхней осциллограмме представлен отклик калибруемого измерителя, на нижней — сигнал от индукционного датчика. Амплитуда положительного полупериода этого сигнала пропорциональна интенсивности пучка и служит для ее измерения.

Отклик измерителя имеет вид модулированного сигнала с несущей частотой около 1 МГц. Огибающая сигнала формируется под влиянием, по крайней мере, двух факторов: затухания сигнала при распространении его в мембране и отражения от границы мембрана — преобразователь. Длительность сигнала определяется добротностью механической колебательной системы и составляет около 50 периодов несущей. За это время амплитуда сигнала, в большинстве случаев, уменьшается в  $e$  раз.

Сложность формы сигнала обусловлена, по-видимому, тем, что мишень датчика и его чувствительный элемент выполнены из разных материалов, у которых скорости распространения ультразвуковой волны и собственные резонансные частоты различны. Это приводит к интермодуляционным искажениям регистрируемого сигнала. Время взаимодействия протонного пучка с мишенью крайне мало и его воздействие на мишень может рассматриваться как дельта-функция. Импульсный характер первичного воздействия на полирезонансную систему приводит к возникновению искажений в виде квазигармонических осцилляций. Регистрируемый выходной сигнал приобретает синусоидальную модулированную форму за время равное нескольким периодам колебаний на низшей резонансной частоте.

При интерпретации отклика измерителя важно правильно выбрать параметр  $V$  модулированного сигнала, наиболее адекватно отображающего энергетические потери в мембране. Были опробованы два алгоритма обработки экспериментальных данных, результаты которых приведены на рис. 3 и 4, где по оси абсцисс отложена интенсивность пучка  $I$ , которая пропорциональна амплитуде положительной полуволны сигнала индукционного датчика.

На рис. 3 по оси ординат отложена максимальная амплитуда модуля сигнала измерителя, зарегистрированная в течение 5 мкс от начала его реакции на акустический сигнал. Экспериментальные точки аппроксимированы прямой  $V_a = a_1 + a_2 I$  (сплошная линия) и параболой  $V_a = b_1 + b_2 I + b_3 I^2$  (пунктир).

На рис. 4 по оси ординат отложен другой параметр  $V_{cp}$  — среднее эффективное значение напряжения сигнала, усредненное по 50 периодам несущей частоты, взятым в интервале 50 — 100 мксек от момента его регистрации. Здесь так же представлены результаты аппроксимации полиномами первой (пунктир) и второй (сплошная линия) степени.

Результаты аппроксимации экспериментальных данных полиномами представлены в таблице. Вычисленные методом наименьших квадратов коэффициенты  $a_i$ ,  $b_i$  и соответствующие значения  $\chi^2$  на степень свободы для амплитуд импульсов (рис. 2) приведены во втором столбце таблицы. В третьем столбце показаны результаты для средних значений.

Результаты аппроксимации данных по рис. 3 и 4

Параметр	Расчет параметров разными способами	
	по максимальной амплитуде	по 50 периодам
	аппроксимация прямой	
$a_1$	0,0165±0,0005	0,0025±2·10 <sup>-5</sup>
$a_2$	0,011±0,0001	0,0014±1,4·10 <sup>-5</sup>
$\chi^2/N$	5,1	16,8
	аппроксимация параболой	
$b_1$	0,019±0,0006	0,0043±0,0001
$b_2$	0,0095±0,0002	0,0008±0,00003
$b_3$	4,2·10 <sup>-5</sup> ±5·10 <sup>-6</sup>	2,0·10 <sup>-5</sup> ±7·10 <sup>-7</sup>
$\chi^2/N$	3,67	0,96

Для обоих способов представления результатов калибровки при вычислении значений  $\chi^2$  в знаменатель в качестве стандартного отклонения подставляли значение, равное 5 % от  $V$ , что, по-видимому, соответствует реальной погрешности измерения интенсивности акустическим датчиком.

В порядке обсуждения результатов заметим, что априори в идеальном случае следовало бы ожидать линейную зависимость отклика датчика от интенсивности пучка без постоянного члена ( $a_1 = b_1 = 0$ ). Однако появление в эмпирических зависимостях постоянных членов свидетельствует о наличии фона на выходе предусилителя даже при отсутствии пучка протонов, который не оказывает влияния на ка-

чество работы измерителя. Квадратичная составляющая появляется, возможно, из-за конечных поперечных размеров пучка, сравнимых с размерами мишени и чувствительного элемента.

В заключение отметим, что описанный в статье датчик может быть применен для фундаментальных и прикладных задач, в числе которых:

исследование взаимодействия проникающего излучения с веществом;

регистрация космических частиц за пределами земной атмосферы, в частности при проведении параллельных измерений во внутренней и внешней среде орбитальной станции.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 02-02-17148.

#### Литература

1. Sulak L. e. a. // Nucl. Instrum. and Methods. — 1979. — V. 161. — P. 203.
2. Боршковский И. А. и др. // Письма в ЖЭТФ. — 1971. — Т. 13. — С. 546.
3. Протасов А. К., Рыбин В. М. // Автоматизация управления технологическими процессами. — 1979. — Вып. 3. — С. 76.
4. Арменский Е. В. и др. // ЖТФ. — 1973. — № 2. — С. 44.
5. Артемов В. И. и др. // ЖТФ. — 1976. — Т. 46. — № 6. — С. 1327.

Дата одобрения 05.02.2003 г.