

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.3.038.616

ДАТЧИК ЭНЕРГИИ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ, ОСНОВАННЫЙ
НА ЭФФЕКТЕ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА© 2024 г. Д. А. Бобылев^{a,b,*}, М. Д. Сиомаш^{a,b}, В. В. Ханкин^{b,c}, В. И. Шведун^{b,c}^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2^bЛаборатория электронных ускорителей Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Россия, 119992, Москва Ленинские горы, 1, стр. 77^cНаучно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

*e-mail: agava2309@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.03.2023 г.

После доработки 18.07.2023 г.

Принята к публикации 03.08.2023 г.

Представлены результаты разработки датчика энергии, предназначенного для контроля энергии выведенного в атмосферу пучка электронов ускорителей прикладного назначения. Принцип действия устройства основан на использовании излучения Вавилова–Черенкова, возникающего при прохождении пучка электронов через газ.

DOI: 10.31857/S0032816224010132, EDN: FRCQTO

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение пучков ускоренных электронов для обработки продукции требует тщательного контроля их энергии. Существует ряд методов измерения энергии пучка электронов, однако, большинство из них сопряжено со значительными временными затратами и требуют достаточно высокой квалификации персонала. Существует потребность в компактном устройстве, с помощью которого при настройке ускорителя можно за короткое время провести измерение энергии выведенного в атмосферу электронного пучка, при этом процесс измерения должен быть автоматизирован. В статье описан прототип датчика энергии и приведены результаты его испытаний на пучке линейного ускорителя электронов.

2. МЕТОД

В основе разработанного датчика энергии лежит метод измерения зависимости интенсивности излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ) от давления газа, сквозь который проходит пучок

электронов [1–4]. Интенсивность ИВЧ отдельного электрона в интервале частот ω , $\omega + d\omega$ определяется выражением [5, 6]

$$I(\omega)d\omega = v \frac{e^2}{c^2} \left[1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)} \right] \omega d\omega, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, v – его скорость, $n(\omega)$ – показатель преломления среды, c – скорость света в вакууме.

Излучение Вавилова–Черенкова возникает при условии

$$v > v_{thr} = \frac{c}{n(\omega)}, \quad (2a)$$

определяющем пороговую полную энергию электрона, при которой возникает ИВЧ:

$$E_{thr} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta_{thr}^2}}, \quad (26)$$

где $\beta_{thr} = \frac{v_{thr}}{c}$, m_0 — масса электрона.

Полную интенсивность излучения электрона можно получить интегрированием (1) по всем частотам, для которых выполняется условие (2а):

$$I_{tot} = v \frac{e^2}{c^2} \int_{n\beta > 1} \left[1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)} \right] \omega d\omega \quad (3)$$

Если пучок электронов имеет распределение частиц по скоростям $\beta = v/c$:

$$f(\beta) = \frac{dN}{N_0 d\beta}, \quad (4)$$

где N_0 — полное число частиц в пучке, то при условии регистрации излучения Вавилова—Черенкова в достаточно узком диапазоне частот, в котором зависимостью $n(\omega)$ можно пренебречь, интенсивность излучения равна

$$I(n) = D \int_{n\beta > 1} \left[1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right] f(\beta) d\beta, \quad (5)$$

где D является постоянной величиной, зависящей от граничных частот того спектрального диапазона, в котором проводятся измерения.

Основная идея метода, изложенного в [1–4], заключается в следующем. Как известно [7], показатель преломления большинства газов при не слишком высоком давлении P и температуре T с высокой степенью точности описывается формулой

$$n(P, T) = 1 + A_P P, \quad (6)$$

$$A_P = (n_0 - 1) \frac{1}{P_0} \frac{T_0}{T}, \quad (7)$$

где n_0 — показатель преломления при некоем давлении P_0 и температуре T_0 . Коэффициент A_P зависит от природы газа.

Как следует из формулы (6), показатель преломления газа линейно связан с его давлением. Поскольку ИВЧ создается лишь частицами, энергия которых превышает пороговое значение, определяемое формулой (2б), то,

комбинируя (2б) и (6), получаем, что при давлении газа P излучают лишь частицы с полной энергией:

$$E > \frac{nm_0 c^2}{\sqrt{n^2 - 1}} \approx \frac{m_0 c^2}{\sqrt{2A_P P}}. \quad (8)$$

Интенсивность этого излучения составляет, как следует из (5),

$$I(P) \approx D \int_{\frac{m_0 c^2}{\sqrt{2A_P P}}}^{\infty} \left[2A_P P - \left(\frac{m_0 c^2}{E} \right)^2 \right] g(E) dE, \quad (9)$$

где $g(E)dE = f(\beta)d\beta$, $g(E)$ — распределение частиц пучка по энергии.

При давлении столь высоком, что

$$\frac{m_0 c^2}{\sqrt{2A_P P}}$$

меньше самой малой энергии частиц в пучке $E_{\min}$, интенсивность излучения линейно зависит от давления газа (так как при меньших энергиях, очевидно, $g(E)=0$):

$$I(P) = P \left(D \int_{E_{\min}}^{\infty} 2A_P g(E) dE \right) - D \int_{E_{\min}}^{\infty} \left(\frac{mc^2}{E} \right)^2 g(E) dE = AP - B, \quad (10)$$

где A и B не зависят от давления.

В качестве иллюстрации на рис. 1б приведены зависимости $I(P)$, рассчитанные по формулам (5)–(7) для модельных спектров с различной шириной и положением максимума, показанных на рис. 1а. Расчет проводился для углекислого газа при температуре 300 К в качестве рабочего вещества. Показатель преломления при давлении газа в 1 атм взят равным 1.0004095 в соответствии с [8, 9]. Все зависимости нормированы на соответствующие значения при давлении, равном 5 атм.

Рассчитанные зависимости состоят из трех участков: горизонтального, где ИВЧ отсутствует; линейного по давлению, на котором

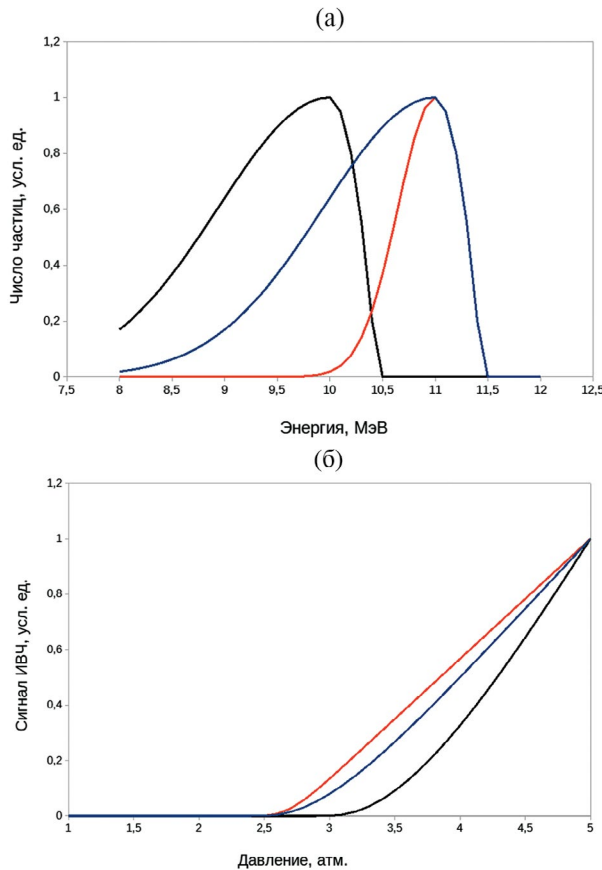


Рис. 1. а) Модельные энергетические спектры пучка электронов, различающиеся положением максимумов и шириной. **б)** Рассчитанная интенсивность ИВЧ в зависимости от давления углекислого газа для данных энергетических спектров.

все частицы в пучке излучают в соответствии с формулой (10); и нелинейного участка, соединяющего два предыдущих, на котором излучают лишь те частицы, для которых выполняется условие (26) или, более грубо, (8). Зависимость интенсивности ИВЧ от давления на этом участке описывается формулой (9). Известно [2–4], что по зависимости $I(P)$ на данном участке можно восстановить энергетический спектр пучка, однако, эта задача является некорректно поставленной и даже при высокой точности измерений требует использования тех или иных методов регуляризации для получения разумного приближения к реальному спектру [10].

На данном этапе в нашем устройстве вместо полного восстановления спектра пучка определялась лишь средняя энергия по спектру. Для этого специальная программа аппроксимирует методом наименьших квадратов (МНК)

зависимость $I(P)$ двумя прямыми и степенной функцией между ними, которая соответствует нелинейному участку этой зависимости. Пересечение прямых дает среднюю энергию, которая, как следует из (10), соответствует давлению

$$\bar{P} = \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \left(\frac{mc^2}{E} \right)^2 g(E) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} 2A_P g(E) dE}, \quad (11)$$

которое, в свою очередь, соответствует энергии

$$E_{\text{mean}} \approx \frac{m_0 c^2}{\sqrt{2A_P \bar{P}}} = \sqrt{\frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} g(E) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{1}{E^2} g(E) dE}}. \quad (12)$$

Отметим, что величина, определяемая по формуле (12), строго говоря, средней энергией не является. “Истинная” средняя энергия $\langle E \rangle$ определяется по формуле

$$E = \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E g(E) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} g(E) dE}. \quad (13)$$

Однако величины E_{mean} и $\langle E \rangle$ близки для реальных спектров частиц от ускорителя. Так, для спектров, приведенных на рис. 1а, получены величины, приведенные в табл. 1.

Таким образом, даже для широких спектров отличие $\langle E \rangle$ от E_{mean} составляет не более примерно 70 кэВ, что составляет около 0.7% от величины энергии. Отличие энергии, определенной по точке пересечения прямых, от средней энергии составляет не более примерно 150 кэВ, что составляет приблизительно 1.5% от величины энергии.

Отметим, что формулы (12), (13) получены в предположении, что зависимостью $n(\omega)$ можно пренебречь. В общем случае, когда данная зависимость принимается во внимание, а спектральная чувствительность элемента, регистрирующего ИВЧ, известна и равна $k(\omega)$, в формуле (12) следует брать не величину A_P из (7), а величину

Таблица 1. Энергии, определенные для модельных спектров, показанных на рис. 1

Цвет спектра на рис. 1а	$\langle E \rangle$, МэВ	E_{mean}	Энергия, определенная из аппроксимации рис. 1б, МэВ
Синий	10.35	10.28	10.27
Красный	10.90	10.89	10.81
Черный	9.43	9.37	9.29

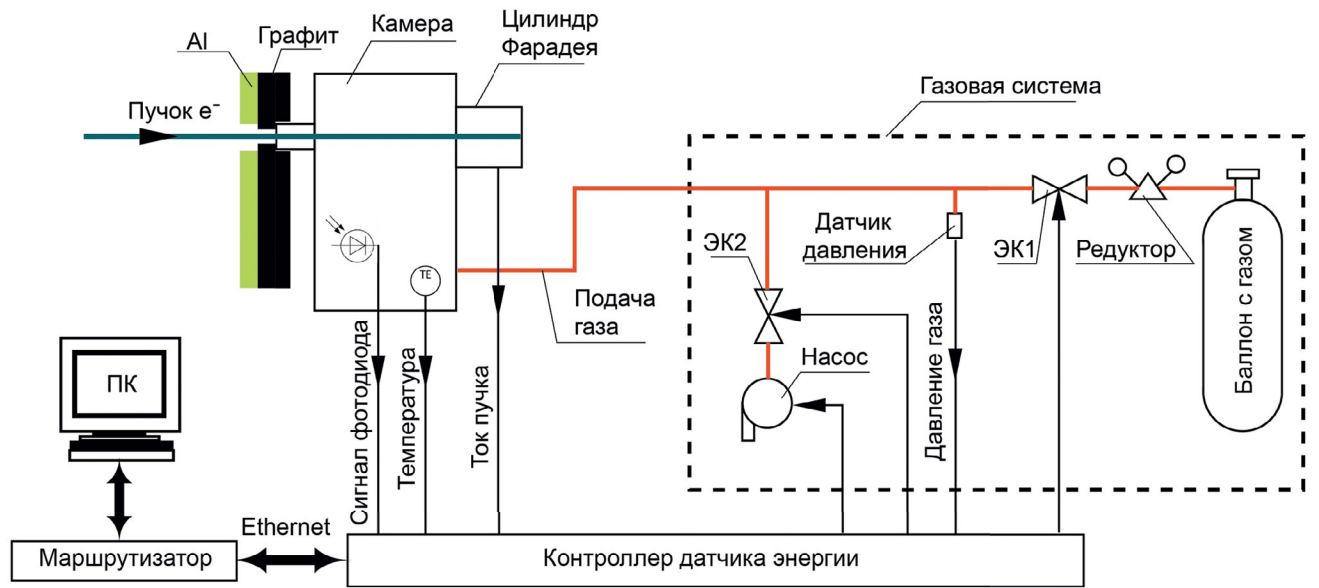


Рис. 2. Блок-схема датчика энергии пучка электронов: ЭК₁ и ЭК₂ – клапаны с электромагнитным управлением.

$$\bar{A} = \frac{1}{P_0} \frac{T}{T_0} \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} (n_0(\omega) - 1) \omega k(\omega) d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega k(\omega) d\omega}, \quad (14)$$

где ω_1 и ω_2 – соответственно нижняя и верхняя границы чувствительности регистрирующего элемента.

Поскольку только ИВЧ в данном случае обладает ярко выраженным пороговым характером, вклад других видов излучения будет представлять собой фон, либо практически не зависящий от давления газа (например, переходное излучение на границах газа и входного окна), либо зависящий от давления линейно (тормозное излучение, люминесценция газа). Таким образом, другие виды излучения не смогут существенно повлиять на определение средней энергии пучка.

3. УСТРОЙСТВО ДАТЧИКА ЭНЕРГИИ

Блок-схема датчика энергии пучка электронов показана на рис. 2. Датчик энергии состоит из камеры взаимодействия, газовой системы,

контроллера и персонального компьютера с программным обеспечением.

Пучок электронов попадает в камеру взаимодействия (см. также рис. 3а, б) через входную фольгу, рассчитанную на давление газа до десяти атмосфер. Проходя через рабочий газ, пучок электронов создает ИВЧ, интенсивность которого регистрируется фотодиодом. Для контроля температуры газа в камере установлен датчик температуры. Прошедший через газ пучок поглощается охлаждаемым цилиндром Фарадея. Поскольку поперечные размеры пучка электронов могут превышать диаметр входного окна, перед ним установлен поглотитель с отверстием для прохождения пучка, состоящий из слоя графита и охлаждаемой алюминиевой плиты. Использование материалов с малым атомным номером позволяет снизить попадающий на фотодиод фон тормозного излучения. Также при прохождении пучка через газ при его взаимодействии с зеркалом и цилиндром Фарадея образуется фон электронов и рентгеновского излучения. Для защиты фотодиода от этого

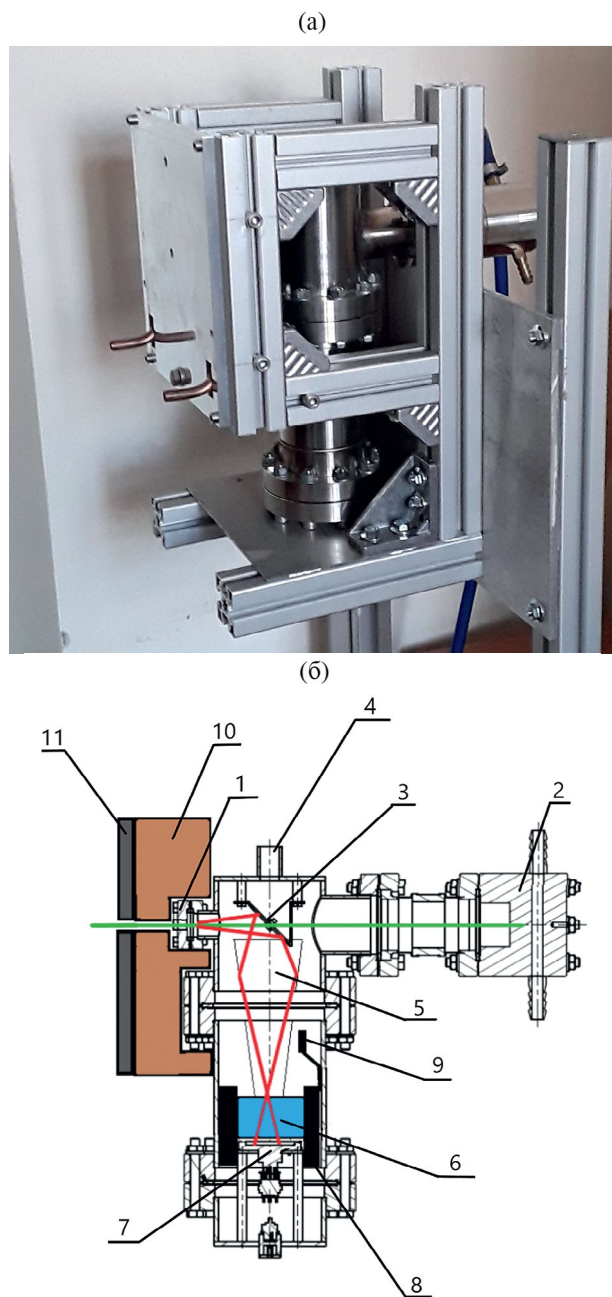


Рис. 3. Фотография (а) и схематический чертеж (б) камеры взаимодействия: 1 — входная титановая фольга толщиной 50 мкм, 2 — охлаждаемый цилиндр Фарадея, 3 — зеркало, отражающее ИВЧ, 4 — штуцер для подачи газа, 5 — зеркальный конус (фокон), собирающий ИВЧ, 6 — радиационно-стойкое стекло, 7 — фотодиод PIN-25-DP, 8 — свинцовая защита фотодиода от внешнего потока рентгеновских лучей, 9 — датчик температуры, 10 — слой графита, 11 — охлаждаемая алюминиевая плита.

фона он закрыт слоем 2-сантиметрового радиационно-стойкого стекла, пропускающего видимое ИВЧ и отсекающее рентгеновские лучи и

рассеянные электроны, и дополнительно окружен свинцовым экраном.

Стекло поглощает коротковолновую часть ИВЧ, что позволяет при расчетах не учитывать вклада ИВЧ в область коротких длин волн (меньше примерно 300 нм). В области длинных волн спектр ИВЧ, регистрируемого фотодиодом, ограничен спектральной чувствительностью самого фотодиода значением около 1100 нм. Учитывая эти ограничения, на основании известной спектральной чувствительности $k(\omega)$ фотодиода PIN-25-DP [11] и $n(\omega)$ для используемого газа по формуле (14) можно рассчитать параметр $\bar{A}$.

Фотография и схематичный чертеж камеры взаимодействия приведены на рис. 3а, б.

Газовая система (рис. 2) обеспечивает предварительную откачку камеры взаимодействия с помощью диафрагменного насоса при открытом электромагнитном клапане ЭК₂ и последующую подачу порций газа от газового баллона посредством открытия клапана ЭК₁ на заданный интервал времени. Контроль давления в системе осуществляется с помощью электронного мановакуумметра. Газовая система выполнена в виде единого блока, соединенного с камерой взаимодействия гибким шлангом.

Измерение сигналов с фотодиода, датчика температуры, цилиндра Фарадея, датчика давления, а также подача питающих напряжений на электромагнитные клапаны и насос осуществляется с помощью специально разработанного контроллера. Измерение величины сигнала фотодиода проводится методом выборки-хранения в фиксированный момент времени после начала импульса тока пучка. Контроллер функционирует под управлением специальной программы, установленной на персональном компьютере, обеспечивающей прием и обработку данных, а также графический интерфейс оператора. Вид графического интерфейса оператора показан на рис. 4. Оператор дает команду на начало измерений, которые проводятся в автоматическом режиме с последующей выдачей оцененного значения средней энергии пучка. Полный цикл измерений занимает около 2–3 минут, что значительно быстрее, чем при использовании других методов измерения энергии.

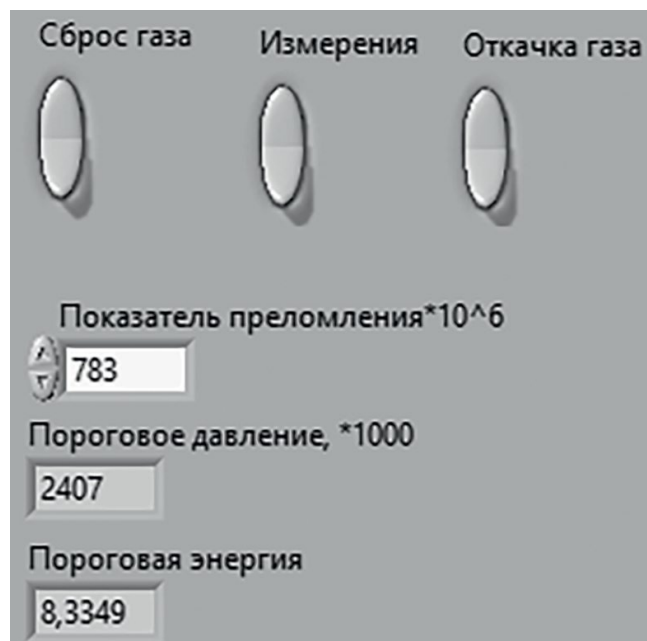


Рис. 4. Интерфейс управляющей программы: команды управления процессом измерений и результаты определения средней энергии.

4. ИСПЫТАНИЯ ДАТЧИКА ЭНЕРГИИ

Испытания датчика энергии проводились на линейном ускорителе [12, 13] с энергией пучка, регулируемой в диапазоне от 4 до 12 МэВ за счет изменения уровня ускоряющего поля посредством регулировки выходной СВЧ-мощности клистрона, питающего ускоряющую структуру. Импульсный ток ускоренного пучка составляет около 400 мА, длительность импульса 8 мкс, частота следования импульсов в испытаниях изменялась в диапазоне от 2 до 5 Гц во избежание перегрева устройства.

На рис. 5 показаны спектры ускоренного пучка электронов при различных уровнях ускоряющего поля, измеренные при помощи прецизионного спектрометра, взятые из работы [12]. Спектры различаются положением максимумов и шириной. Отметим важную особенность спектров — они имеют значительную ширину на половине высоты максимума. Выполненные ранее измерения энергии пучка электронов с использованием зависимости интенсивности ИВЧ от давления проводились с узкими спектрами пучков классического микротрона [1] или разрезного микротрона [3, 4], ширина спектра при этом не превышала 1%.

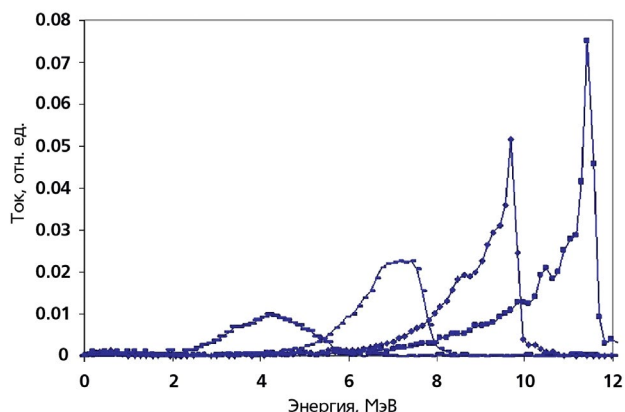


Рис. 5. Спектры ускоренного пучка электронов линейного ускорителя при различных уровнях ускоряющего поля [12].

С целью выбора оптимального газа были проведены предварительные измерения с аргонном, углекислым газом, гексафторидом серы (элегазом) и фреоном. В итоге мы остановили выбор на углекислом газе в качестве рабочего ввиду его доступности, дешевизны, достаточно большого значения показателя преломления, равного приблизительно 1.00045 при нормальных условиях, и отсутствия воздействия продуктов разложения на элементы устройства, расположенные в камере. Согласно (8), при использовании углекислого газа в качестве рабочего в диапазоне давлений до 10 атмосфер и температуре около 300 К можно измерять энергию электронов приблизительно от 6 МэВ до 15 МэВ, т.е. практически весь возможный диапазон энергий ускорителя [12, 13].

Для каждого установленного значения давления проводилось порядка 10 измерений величины сигнала фотодиода, которые затем усреднялись. Ширина шага при повышении давления регулировалась временем открытия клапана напуска. После закрытия клапана напуска перед измерениями величины сигнала фотодиода выдерживалась пауза около 1 с, необходимая для установления давления в системе.

Поскольку интенсивность ИВЧ пропорциональна числу излучающих частиц, т.е. току пучка, в ходе испытаний устройства сигнал с цилиндра Фарадея использовался для контроля стабильности тока пучка. “Быстрые” колебания тока от импульса к импульсу сглаживаются в процессе усреднения результатов

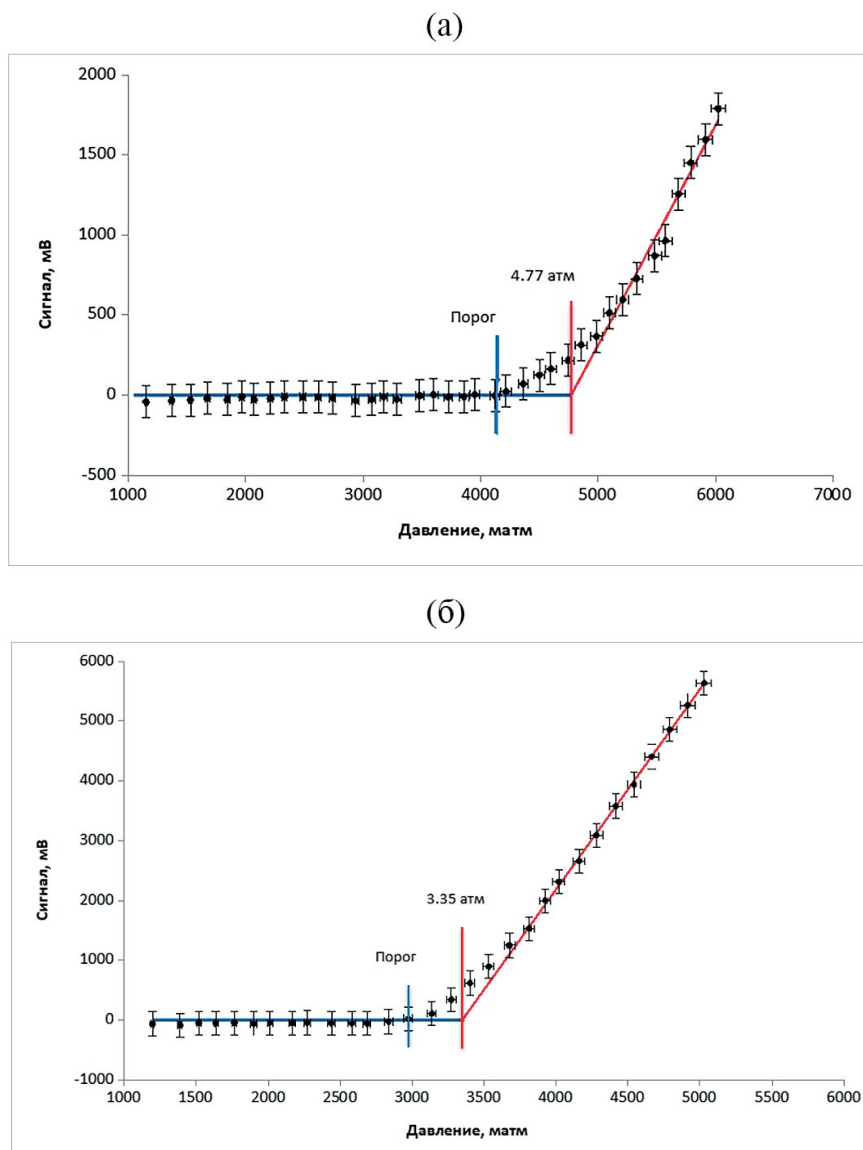


Рис. 6. Результаты измерения зависимости величины сигнала с фотодиода от давления для двух уровней ускоряющего поля: **а** соответствует меньшей энергии, **б** — большей.

10 измерений, а “медленные” колебания (с периодом в несколько секунд) будут заметны как шумы на зависимости сигнала фотодиода от давления. Поскольку данная зависимость аппроксимируется двумя прямыми по методу наименьших квадратов (МНК), эти шумы оказывают слабое влияние на итоговое значение средней энергии пучка.

На рис. 6 приведены результаты измерения зависимости величины сигнала с фотодиода от давления газа для двух уровней ускоряющего поля с вычтенным постоянным фоновым сигналом, обусловленным тормозным излучением,

а также переходным и люминесцентным излучениями, генерируемыми пучком при прохождении через границы раздела сред и газ соответственно. Рисунок 6а соответствует меньшей энергии, а рис. 6б — большей.

Оценки значения $\bar{P}$ составляют 4.77 атм и 3.35 атм (соответственно на рис. 6а и 6б), что соответствует средней кинетической энергии пучка 7.7 ± 0.3 МэВ и 9.2 ± 0.3 МэВ. Оценка погрешности измерения энергии учитывает точность приближения в выражении (8), неидеальность газа, т. е. наличие нелинейных членов в (6), влияние примесных газов, влияние

остаточного воздуха в камере, погрешность измерения температуры газа, погрешности измерения давления, шумы фотодиода, фон от рентгеновского излучения и колебания тока пучка. Суммарные потери энергии при прохождении пучка через выходную фольгу ускорителя и входную фольгу камеры (титан, толщина 50 мкм) дают систематический сдвиг, составляющий около 70 кэВ.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Контроль энергии ускоренного пучка электронов исключительно важен при радиационной обработке продукции как с точки зрения обеспечения равномерности распределения сообщенной дозы по глубине, так с точки зрения соблюдения санитарных норм, запрещающих обработку определенных видов продукции электронами с энергией выше 10 МэВ для исключения появления наведенной активности.

В настоящее время в соответствии с ГОСТ Р ИСО/АСТМ 51431-2012 [14] для контроля энергии ускоренного пучка электронов с помощью дозиметрической (радиохромной) пленки проводится измерение распределения дозы по глубине с использованием алюминиевого клина или стопки алюминиевых пластин. Энергия электронов рассчитывается по эмпирической формуле, через пробег электронов, оцененный с помощью измеренного распределения дозы.

Данный метод достаточно трудоемок, его сложно использовать для оперативной настройки ускорителя. Кроме того, распределение дозы по глубине существенно зависит от спектра электронного пучка и не позволяет точно определять максимальную энергию спектра.

Учитывая, что спектр пучка линейного ускорителя электронов в силу особенностей динамики пучка имеет четко выраженную максимальную энергию, метод, основанный на ИВЧ, позволяет не только определять среднюю энергию пучка, но и с хорошей точностью оценивать максимальную энергию спектра, поскольку именно частицы с максимальной энергией первыми начинают генерировать ИВЧ при повышении давления газа.

На рис. 6 стрелками показаны значения давления, соответствующие появлению ИВЧ от частиц с наибольшей энергией. Чувствительность

метода весьма высока. Для использованного в данной работе газа изменение энергии в 1 МэВ (при самой энергии пучка около 10 МэВ) соответствует изменению порогового давления примерно в 0.6 атм. При этом величина давления у разработанного нами датчика может контролироваться с точностью 0.05 атм.

Как было отмечено выше, переходной участок между двумя прямыми (рис. 6) содержит информацию о спектре электронов. Видно, что для пучка с меньшей энергией (рис. 6а) ширина переходного участка больше, чем для пучка с большей энергией (рис. 6б), что коррелирует с полученными ранее результатами измерений спектров, показанными на рис. 5. Устойчивый метод извлечения информации о спектре может быть основан на предположении о той или иной форме спектра.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в данной работе датчик энергии позволяет осуществлять оперативную настройку ускорителя, по окончании которой параметры пучка могут быть верифицированы методикой, соответствующей ГОСТ. Датчик энергии может быть сертифицирован для применения в качестве устройства для контроля энергии пучка. Для этого необходимо детальное сравнение результатов определения средней и максимальной энергии пучка данным детектором с результатами измерений другими методами, включая метод измерения распределения дозы по глубине и метод магнитного спектрометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bhiday M.R., Jennings R.E., Kalmus P.I.* // Proc. Phys. Soc. 1958. V. 72. P. 973.
<https://doi.org/10.1088/0370-1328/72/6/305>
2. *Труханов К.А.* Черенковские детекторы и их применение в науке и технике. Докл. семинара, 11-17 июля 1984 г. / под ред. А. М. Балдина. М.: Наука, 1990. С. 380. ISBN 5-02-000166-X.
3. *Trukhanov K.A., Shvedunov V.I.* // Radiation Physics and Chemistry. 2006. V. 75. № 8. P. 899.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2005.12.018>
4. *Trukhanov K.A., Poliektov V.V., Shvedunov V.I.* // Proceedings XIX Russian Particle Accelerator Conference RuPAC. 2004. P. 106
5. *Болотовский Б.М.* // УФН. 2009. Т. 179. С. 1161.

- <https://doi.org/10.3367/UFNr.0179.200911c.1161>
6. Зрелов В.П. Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М.: Атомиздат, 1968.
 7. Ляликов Ю.С. Физико-химические методы анализа: Учеб. пособие для хим. и металлургич. техникумов. М.: Химия, 1964.
 8. Bideau-Mehu A., Guern Y., Abjean R., Johannin-Gilles A. // Optics Communications. 1973. V. 9. № 4. P. 432.
[https://doi.org/10.1016/0030-4018\(73\)90289-7](https://doi.org/10.1016/0030-4018(73)90289-7)
 9. Old J. G., Gentili K. L., Peck E. R. // J. Opt. Soc. Am. 1971. V. 61. P. 89.
<https://doi.org/10.1364/JOSA.61.000089>
 10. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
 11. Photoconductive series. Planar diffused silicon photodiodes. OSI Optoelectronics. <http://osioptoelectronics.com/Libraries/Datasheets/Photoconductive-Photodiodes.sflb.ashx>
 12. Alimov A.S., Alimov E.A., Kamanin A.N., Khankin V.V., Pakhomov N.I., Shvedunov V.I., Gryzlov A.V., Lamonov S.V., Musatov A.P., Sigalaev V.N. // Proceedings of RuPAC. 2008. P. 269
 13. Ermakov A.N., Khankin V.V., Alimov A.S., Ovchinnikova L.Yu., Pakhomov N.I., Shvedunov N.V., Shvedunov V.I., Klementiev V.V., Pavshenko Yu.N., Simonov A.S. // Proceedings of RuPAC. 2016. P. 99.
 14. ГОСТ Р ИСО/АСТМ 51431-2012. Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов электронными пучками и рентгеновским (тормозным) излучением.