

УДК 539.1.71.002

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ДЕТЕКТОРА ДТеТ НА ПУЧКЕ ПРОТОНОВ РАДИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

В. В. Сиксин

*Разработан, изготовлен и испытан опытный образец детектора телевизионного типа, проведена проверка его калибровочных возможностей на протонном ускорителе “Прометеус”, осуществлены двухкоординатные измерения области энерговыведения в фантоме с водой. Экспериментально определены размеры области энерговыведения в виде кривых Брэгга при импульсном облучении водного фантома пучком протонов с энергией от 65 до 192.5 МэВ.*

**Ключевые слова:** область энерговыведения, водный фантом, адаптивная телевизионная камера, профили пика Брэгга, детектор телевизионного типа.

*Введение.* В предыдущих работах [1–3] исследован эффект прямого наблюдения пика Брэгга энерговыведения в водном фантоме с помощью адаптивной телевизионной камеры при предельно низком свечении изображения, осуществлена видеозапись аналогового видеосигнала на созданных макетных установках. В настоящей работе рассматриваются результаты измерений на опытном образце детектора телевизионного типа (ДТеТ), представляющем собой прототип медицинского прибора с возможностью использования его для калибровки протонного ускорителя. Опытный образец ДТеТ позволяет измерять глубину прохождения протонов в воде с точностью, определяемой рекомендациями МАГАТЭ, а также поглощенную дозу и поперечные размеры области энерговыведения по траектории пучка протонов от входа в фантом до пика Брэгга. Опытный образец ДТеТ способен выдавать результат по координатному распределению энерговыведения в режиме on-line, а также дозовые характеристики после обработки результатов на компьютере (РС), который является частью детектора.

Координатные измерения осуществляются при помощи программного обеспечения (ПО) типа OSC16, ввод аналогового видеосигнала осуществляется при помощи устрой-

---

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: antktech@yandex.ru.

ства “Контраст-4USB”, снабженного WDM драйвером, формирующим данные в формате RGB24 [4]. Частью ПО также является разрабатываемая программа вычисления, осуществляющая определение поглощенной дозы за один импульс ускорителя, что было рассмотрено ранее в работе [3].

Измерения были проведены 28–30 марта 2018 г. на протонном терапевтическом ускорителе “Прометеус”. Характеристики ускорителя приводились в предыдущих работах [1, 2]. Пучок на входе в ДТет имел ширину на полувысоте 3 мм. Из полученных результатов, особенно для больших энергий (например, для 190 МэВ), видно, что пучок, имеющий ширину (сигму), равную 3 мм и интенсивность  $10^9$  протонов за импульс, в водном фантоме (в кювете) имеет малую расходимость и малые дозовые потери от входа в фантом до самого пика Брэгга, что обеспечивает его применимость для точного попадания в заданную точку пациента без повреждения здоровых тканей. Длительность импульса 0.5 секунды, время между импульсами – 1.5 секунды.

На рис. 1 приведено размещение ДТет на каталке (слева) и его положение относительно выходного окна ускорителя (справа).

Стрелками показаны окно вывода пучка и его направление до входа в ДТет. Детектор ДТет, установленный на каталке и выставленный кюветой на центр пучка, облучался в импульсном режиме при энергиях протонов 65, 67.5, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 140, 150, 160, 170, 180, 185, 190, 192.5 и 195 МэВ. Экспериментально было установлено, что граничные точки по энергии, такие как 65 и 195 МэВ, детектор не “видит”, так

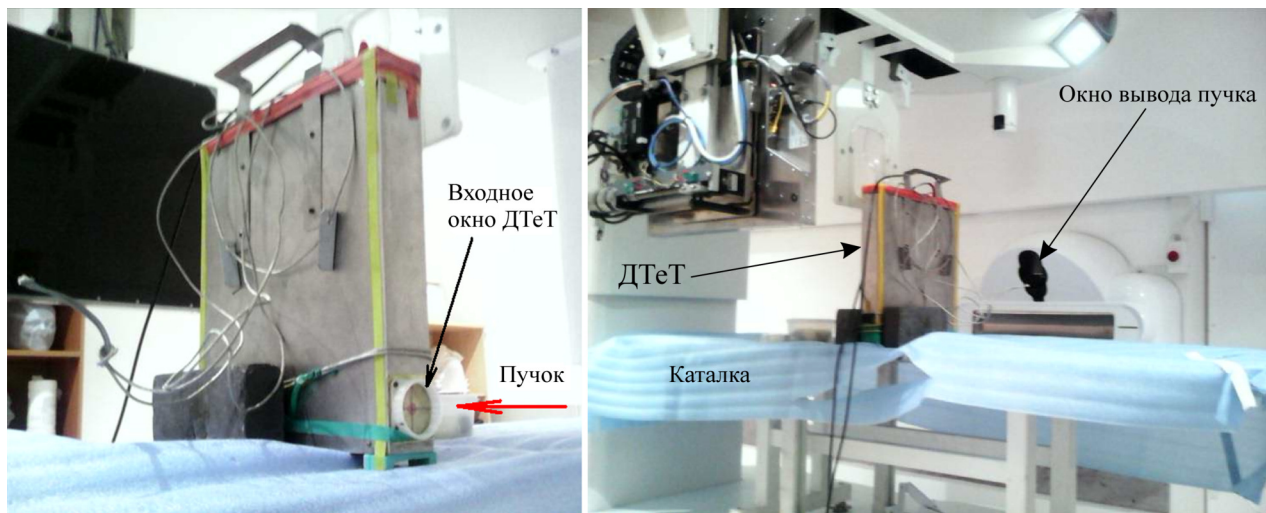


Рис. 1: Детектор ДТет на каталке пациента (слева), детектор ДТет на каталке с механизмом перемещения по вертикали и выходное окно ускорителя (справа).

как объектив ТВ камеры был настроен на центральную область размером  $\sim 220$  мм при полном размере кюветы 280 мм, т.е. в начале и в конце кюветы имелись “мертвые зоны” размером по  $\sim 30$  мм. Уменьшение зоны захвата было обусловлено исследованием возможностей ДТеТ по увеличению точности определения координаты участка энерговыделения за счет изменения параксиального увеличения объектива. При этом достигнутая точность измерения составляла менее 1 мм по глубине.

Далее, по полученным и записанным видеокдрам, измерялись координаты на изображении протонного пучка для каждой энергии с помощью ПО OSC16. Измерялась глубина пробега протонов от входа в кювету до пика Брэгга (координата по  $X$ ), также измерялись поперечные размеры пика Брэгга (координата по  $Y$ ), т.е. измерялся контур области энерговыделения, включая головку пика Брэгга.

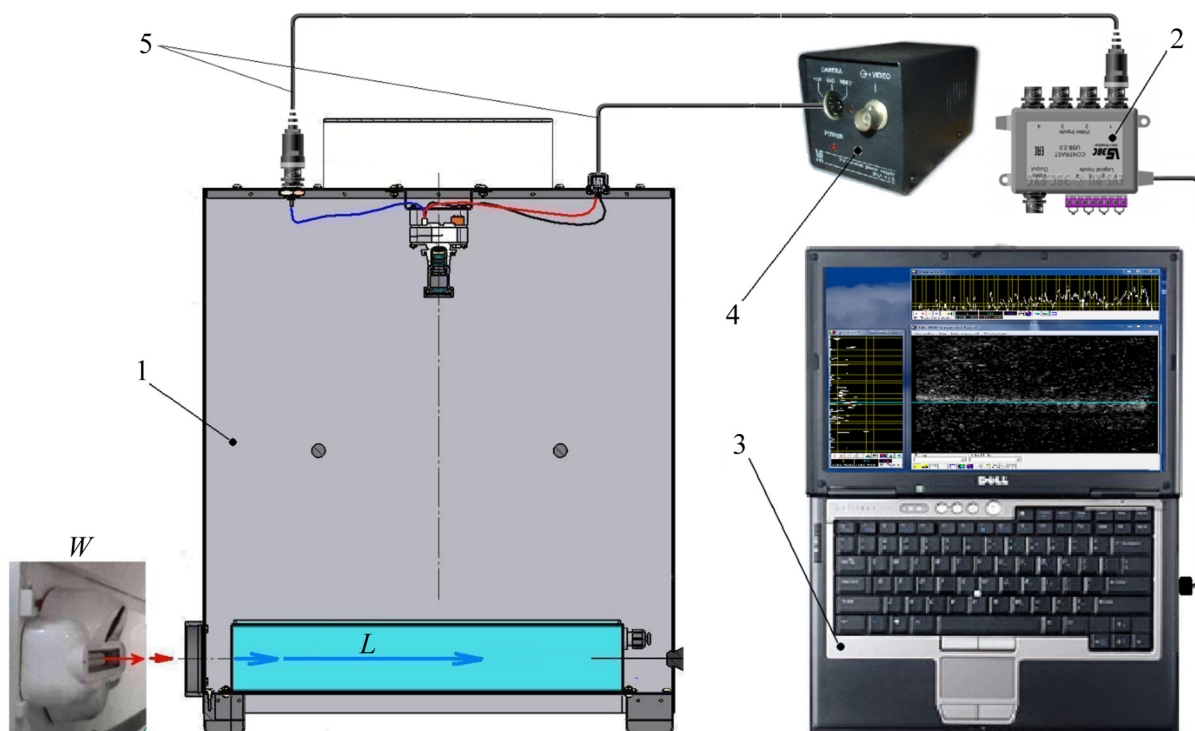


Рис. 2: Комплект детектора ДТеТ: 1 – блок регистрации, установленный на каталке пациента в зоне вывода пучка, 2 – устройство видеоввода “Контраст-4USB”, 3 – блок обработки (компьютер PC с ПО OSC16), 4 – блок питания, 5 – соединительные кабели между блоком регистрации, установленным в зоне облучения пациента на каталке, и пультавой, где располагаются блок обработки, “Контраст-4USB” и блок питания;  $L$  – глубина пика Брэгга,  $W$  – выходное окно ускорителя.

Детектор ДТеТ для определения области энерговыделения. На рис. 2 приводится блок-схема размещения комплекта ДТеТ.

В блоке регистрации используется адаптивная телевизионная камера (ТВК), подробно описанная в [1, 2]. В кювету залита дистиллированная вода, верхний ее край закрыт прозрачным для ТВК стеклом, ТВК располагается по осевой линии кюветы над центром водного отсека. В варианте конструкции ДТеТ использован объектив с изменяемым фокусным расстоянием от 4-х до 12 мм, что позволило осуществить регулировку величины видимого участка кюветы с точками остановки протонов в диапазоне от 67.5 до 192.5 МэВ. Результаты, полученные на опытном образце ДТеТ, показали существенное улучшение по идентификации размеров энерговыделения по  $X$  (глубина) и  $Y$  (ширина) координатам прохождения протонов по сравнению с результатами, полученными на макетах в предыдущих работах [1, 2].

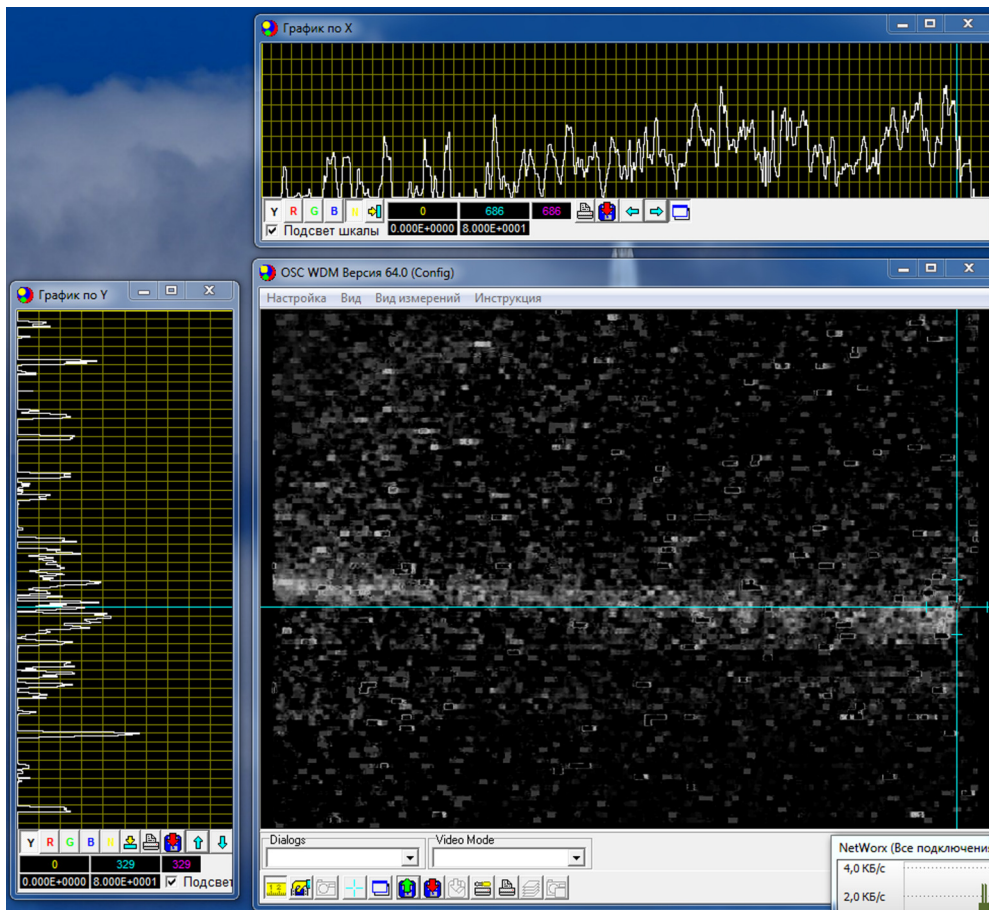


Рис. 3: Расположение окон ПО OSC16 при измерении координат области энерговыделения.

*Определение профиля энерговыделения.* При прохождении пучка протонов через кювету ДТет осуществлялась цифровая видеозапись события. По видеокадрам, зафиксировавшим прохождение пучка, строилось изображение области энерговыделения. С помощью специализированного ПО OSC16 осуществлены измерения профилей пиков Брэгга по координатам  $X$  и  $Y$ . Пример расположения окон ПО на экране РС показан на рис. 3.

Здесь показаны три окна: основное окно ПО OSC16 с введенным в него видеокадром с изображением траектории протонного пучка, окно “График по  $X$ ” и окно “График по  $Y$ ”, в которых проводятся собственно измерения профиля пика Брэгга в пикселях формата существующего фотоприемника. Перевод числа пикселей в мм осуществлялся по калибровочному графику. Калибровке ДТет посвящен следующий раздел.

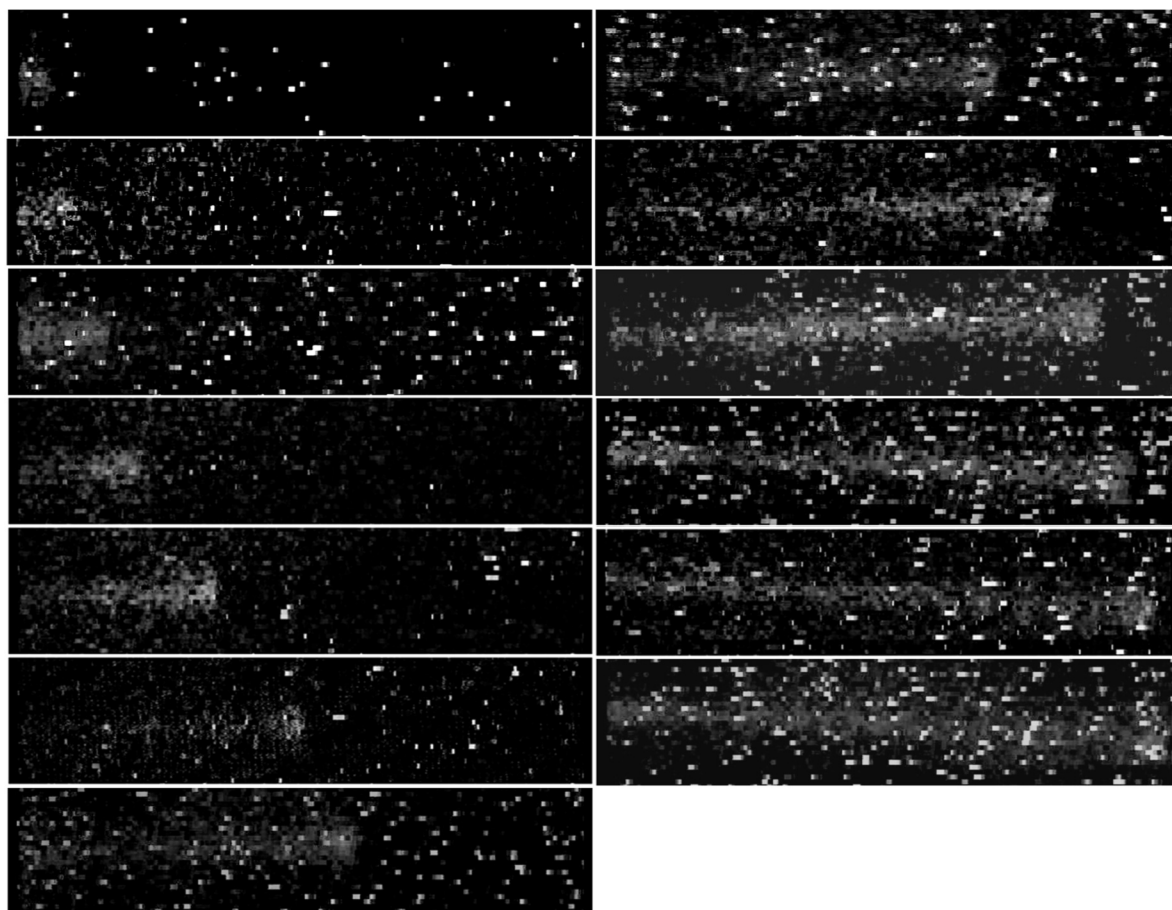


Рис. 4: Фрагменты кадров с областью свечения траектории протонного пучка для диапазона энергий  $E$  протонов от 70 до 192.5 МэВ 29 марта 2018 г. (значения  $E$  см. в табл. 1).

Система координат базировалась на границе левой стенки кюветы, в которую входит пучок протонов. Значение “мертвой зоны” со стороны входа в кювету прибавлялось к измеренной глубине как константа. Длительность импульса настраивалась на 500 мс, интервал между импульсами составлял 1.5 с, что позволило осуществлять быструю запись для всех значений энергии пучка протонов. На рис. 4 приведены изображения, полученные ДТет, являющиеся исходными для координатных измерений.

Результаты попиксельного измерения глубины пика Брэгга, точки по координате в максимуме пика Брэгга и диаметры головки профиля пика Брэгга – точки по  $Y$  координате, приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Энергия, МэВ	$X$ координата пика Брэгга, пкс/мм	$X$ координата пика Брэгга, мм, расчетное значение [6]	Ширина головки пика Брэгга $Y$ , пкс/мм	Масштабный коэффициент для $Y$ , пкс на 1 мм
70	55 / 40.5	41	65.7 / 25.2	2.6
80	86 / 52.0	52	66.0 / 24.4	2.7
90	120 / 63.6	64	70.3 / 25.1	2.8
100	153 / 76.4	77	66.0 / 22.7	2.9
120	253 / 106.4	107	76.0 / 23.7	3,2
140	359 / 138.5	140	75.3 / 21.5	3.5
150	418 / 156.5	157	72.4 / 21.2	3.4
160	478 / 175.0	176	69.0 / 21.5	3.2
170	547 / 197.0	196	63.5 / 21.1	3.0
180	602 / 215.0	216	66.0 / 23.5	2.8
185	639 / 227.0	227	67.4 / 24.9	2.7
190	670 / 237.5	237	60.4 / 23.2	2.6
192.5	688 / 243.5	243	64.6 / 25.8	2.5

Координата глубины пика Брэгга определялась следующим образом. На спаде пика Брэгга от максимума до нуля определялась точка на полувысоте спада. Эта точка являлась координатой по  $X$ , которой соответствовала длина пробега по глубине (приведена во втором столбце табл. 1), измеренная в пикселях и рассчитанная в мм по формуле (1). Измерения координаты по  $Y$  осуществлялись с учетом масштабного коэффициента, учитывающего дисторсию в точке пика Брэгга.

*Калибровка детектора ДТет.* Перед проведением исследований на ускорителе детектор ДТет был подвергнут калибровке с целью компенсации дисторсии оптической

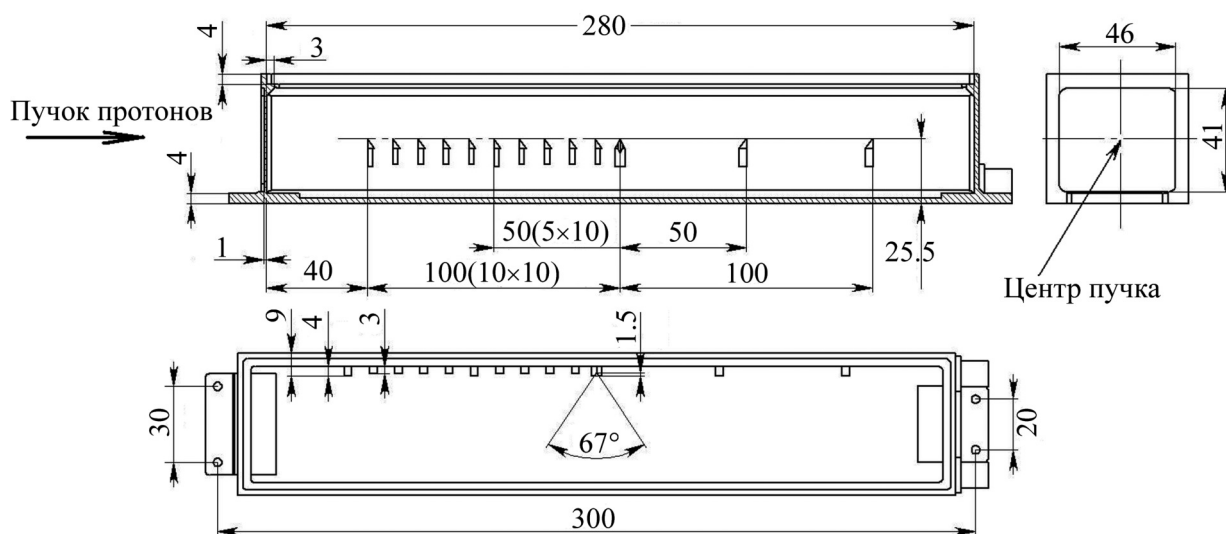


Рис. 5: Фрагмент чертежа кюветы с калибровочными метками.

системы по  $X$  координате. Для этого на внутренней стенке кюветы были нанесены калибровочные метки (рис. 5).

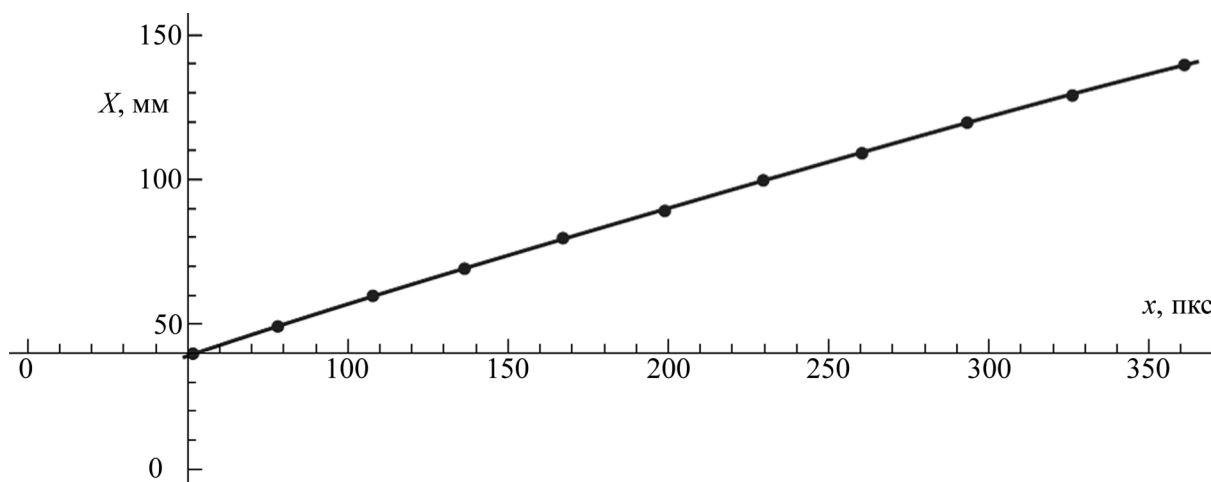


Рис. 6: Калибровочный график попиксельного пересчета в мм по меткам.

С помощью ПО OSC16 проведено измерение координат 11-ти калибровочных меток (одной центральной, находящейся на оптической оси объектива, и 10-ти меток со стороны входа пучка) в кювете, заполненной водой. По значениям действительных размеров калибровочных меток в мм и по измеренным значениям положения тех же меток на изображении видеокadra в пикселях осуществлено построение калибровочного графика (рис. 6).



Калибровочная кривая была профитирована полиномом 4-степени. Получена следующая зависимость:

$$X(\text{мм}) = 19.0667 + 0.426464x - 0.000645005x^2 + 1.885 \cdot 10^{-6}x^3 - 2.24224 \cdot 10^{-9}x^4, \quad (1)$$

где  $x$  – значение величины в пикселях, определяемое из ПО OSC16.

Координаты противоположной стороны от центральной метки зеркально-симметричны по дисторсии относительно калиброванных меток.

*Основные результаты.*

1. Показана способность детектора ДТеТ регистрировать сверхмалую интенсивность свечения (на уровне 0,00003 люкса в видимой и ближней инфракрасной области спектра) области энерговыделения при прохождении протонного пучка через водный фантом импульсами короткой длительности, что позволяет визуально наблюдать и измерять профили – координаты пика Брэгга.

2. Геометрические размеры области энерговыделения по  $X$  и  $Y$  координатам, зафиксированные и измеренные на видеокадрах для 13-ти энергий, совпадают с расчетными величинами [6] с точностью инструментальной ошибки, не превышающей заданную в нормативных актах МАГАТЭ [5].

3. Полученные результаты показывают, что детектор ДТеТ может применяться для точного определения области энерговыделения и кривой Брэгга при калибровке ускорителя, что может служить важным дополнением к методам, применяемым на ускорителях в настоящий момент (метод ионизационной камеры, алмазный детектор, светодиоды и др.).

4. Детектор ДТеТ обеспечивает быструю (не более 5 мин) установку и настройку, способен визуализировать также пучки электронов с измерением геометрических размеров области энерговыделения. Детектор легко устанавливается на любом типе терапевтических ускорителей, быстро определяет поглощенную дозу, портативен, легок в настройке и обслуживается одним человеком без применения специального оборудования.

*Применение детектора ДТеТ.* Впервые разработанный детектор телевизионного типа предназначен для on-line контроля области энерговыделения при калибровке ускорителя перед сеансом лучевой терапии.

Автор выражает благодарность В. Е. Балакину за возможность испытаний опытного образца ДТеТ в сеансе 28–30 марта 2018 г. на ускорителе “Прометеус”, а также А. Е. Шевякову за помощь в управлении ускорителем при работе с ДТеТ.



Автор выражает благодарность А. И. Львову за консультации по проведению сеанса в г. Протвино в марте 2018 г. и поддержку работы.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. В. Гринкевич, В. В. Сиксин, Краткие сообщения по физике ФИАН **44**(2), 3 (2017).
- [2] А. В. Гринкевич, В. В. Сиксин, Краткие сообщения по физике ФИАН **44**(5), 8 (2017).
- [3] А. В. Гринкевич, В. В. Сиксин, Краткие сообщения по физике ФИАН **45**(2), 47 (2018).
- [4] [http://www.evs.ru/kat\\_podr.php?kat=4\\_2](http://www.evs.ru/kat_podr.php?kat=4_2)
- [5] Серия Технических Докладов №398. Международные практические рекомендации по дозиметрии, основанные на эталонах единицы поглощенной дозы в воде. При поддержке IAEA, WHO, PAHO и ESTRO, Международное агентство по Атомной энергии, Вена, 2004. [https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/trs398r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/trs398r_web.pdf)
- [6] J. F. Janni, At. Data Nucl. Data Tables **27**, 147 (1982).

Поступила в редакцию 12 апреля 2018 г.