

УДК 539.1.71.002

Детектор на «теплой жидкости» для измерения дозных профилей от ионизирующих излучений

© 2019 г. В. В. Сиксин[§]

*Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,
Ленинский просп., д. 53, Москва, 119991, Россия*

Аннотация. Актуальным является применение «теплой жидкости» тетраметилсилана (ТМС) в ионизационных камерах для измерения дозных профилей в водных фантомах для подготовки ускорителя к сеансу протонной терапии. Одно из перспективных направлений лучевой терапии — протонная терапия. Для повышения конформности процедуры важно точно знать дозные распределения от энерговыведения протонного пучка в водном фантоме перед проведением сеанса протонной терапии. Повысить точность дозного распределения помогает внедренный на ускорителе «Прометеус» детектор телевизионного типа (ДТеТ), измеряющий профили пика Брэгга по глубине пучка в водном фантоме. Предлагается совместное использование многоканальной «пиксельной» ионизационной камеры на теплой жидкости — калибраторе измерителя дозного поля (КИДП), который будет применяться на ускорителе «Прометеус» при режиме работы методом активного сканирования «карандашным» протонным пучком. Применение совместной работы КИДП и ДТеТ, предназначено для моделирования облучения «мишени» в водном фантоме сканирующим «карандашным» протонным пучком для контроля перед сеансом лучевой терапии.

Данная приставка к ДТеТ позволит повысить качество подведения терапевтического пучка, благодаря точному знанию поглощенной дозы подводимой сканирующим пучком к каждому вокселю облучаемой мишени, и поэтому формируемое поле распределения высокой дозы будет соответствовать облучаемому объему у пациента и повысит конформность облучения. Дополнительная приставка к ДТеТ сконструирована на кремнийорганической «теплой жидкости» и представляет собой высокоточную ионизационную камеру с координатной чувствительностью по ширине водного фантома. Полностью отработанная технология получения «теплой жидкости» ТМС, позволяет создать «пиксельную камеру» КИДП работающую совместно с ДТеТ. Рассматриваемая приставка к детектору ДТеТ, КИДП может использоваться независимо от ДТеТ и с большой точностью измерять в водном фантоме дозные профили пика Брэгга, как по глубине так и по ширине. Также КИДП может применяться для измерения выходов вторичных «мгновенных» нейтронов и гамма-квантов вылетающих из водного фантома ортогонально направлению протонного пучка.

Ключевые слова: электроотрицательные примеси, «теплые жидкости», выход свободных электронов, тетраметилсилан, жидкостные ионизационные камеры, пик Брэгга, детектор телевизионного типа

Введение

Статья посвящена одному из актуальных современных материалов применяемых в электронной технике — так называемым «теплыми жидкостям». Тетраметилсилан (ТМС) [1—7], применяется при создании высокоточной координатно-чувствительной камеры для измерения дозного профиля в водном фантоме. ТМС в жидком состоянии при комнатных температурах ниже 26,65 °С, является неполярным диэлектриком и технология его очистки — ключевой фактор создания высокоточных определителей дозного поля. Обычно в лучевой те-

рапии для измерения дозных профилей в водных фантомах используют плоскостные воздушные камеры [8]. Так как плотность активного вещества ионизационных камер на воздухе приблизительно в 300 раз меньше плотности «теплых жидкостей» — эффективность регистрации основных носителей заряда и разрешение по определению дозы для воздушных камер будет в сотни раз меньше чем для дозиметров на теплых жидкостях. Применение ТМС позволит создать самые компактные и высокоэффективные камеры на «теплой жидкости», не требующие применения особо дорогих зарядочувствительных усилителей. Описываемую камеру на ТМС можно применять как для измерения профиля пика Брэгга в водном фантоме, так и для измерения вторичных нейтронов и гамма-квантов рождающихся в водном фантоме от пучка про-

Сиксин Виктор Валентинович[§] — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, e-mail: antktech@yandex.ru

[§] Автор для переписки

тонов проходящих от ускорителя через фантом. Также конструктивная особенность камеры снижает до минимума ионизационные потери и фон от самой камеры. Это достигается конструктивной особенностью катода и анода. Камера является координатно-чувствительной по ширине пучка: по координате x и y перпендикулярной направлению оси пучка оси z .

Из ТМС можно изготавливать высокоэффективные детекторы излучений определяющие сорта частиц и детекторы смешанных излучений [9]. В нашем случае, применяя одну или несколько таких многоканальных камер на ТМС, расположенных в водном фантоме, и, ортогонально водному фантому, рядом с ним, можно изучать выходы вторичных нейтронов и гамма-квантов и получать важную информацию для проведения сеанса лучевой терапии, а также изучению вторичного фона возникающего в фантоме.

ТМС (также как и благородные газы типа аргона Ar и ксенона Xe), является активным веществом для создания больших по объему детекторов — calorimeters для изучения слабозаимодействующих частиц. В последнее время очень актуальна протонная терапия, но она будет конформна только при точном подведении дозы к мишени, что данная многоканальная камера на ТМС и позволит осуществить. Точность определения дозного распределения и время затрачиваемое на эти измерения являются основным показателем качества применяемых дозиметров. ТМС как активная среда для таких детекторов идеальный материал [3, 6]. В статье рассматривается создание на ТМС координатно-чувствительного детектора под названием калибратор измеритель дозного поля (КИДП) — измерителя пика Брэгга в водном фантоме как по глубине, так и по ширине.

Возможность применения ТМС для создания таких детекторов обосновывается их самым большим выходом свободных носителей заряда и временем жизни электронов среди «теплых жидкостей». Для наполнения детектора КИДП особо чистой ТМС, использовалась технология описанная в работе [10]. Надо объяснить, что описываемая координатно-чувствительная камера на ТМС — КИДП, которая может использоваться в любых экспериментах, в данной статье описывается в совместном при- менении с детектором телевизионного типа (ДТеТ) описанного в работах [11, 12]. ДТеТ точно определяет дозный профиль в водном фантоме по глубине (по координате z вдоль оси пучка). КИДП работая вместе с ДТеТ, одновременно позволяет детектору ДТеТ быстро (в режиме on-line) выдавать

результат по дозному распределению по глубине z ширине по оси x и y .

Цель работы — создание приставки к детектору телевизионного типа — детектора КИДП — многоканальной камеры на ТМС и рассмотрению возможности его совместного применения на терапевтических ускорителях, а также рассмотрение возможности самостоятельного применения системы КИДП для калибровки ускорителя и протонного пучка перед проведением сеанса протонной терапии. Например для проверки метрологической обстановки в районе водного фантома. Это касается измерения вторичного фона исходящего от водного фантома — вторичных нейтронов и гамма-квантов — количество этого фона является проверкой конформности проведения сеанса лучевой терапии для данного конкретного ускорителя.

Способы тестирования очищенной «теплой жидкости» ТМС

Изучение вольт амперных характеристик основных диэлектрических жидкостей было исследовано в работе [9].

«Теплые жидкости» характеризуются следующими параметрами [9]: T — температура кипения, °C; ϵ — относительная диэлектрическая константа; μ — подвижность свободных носителей заряда, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; G_{fi} — выход пар свободных электронов; d — плотность жидкости, $\text{г}/\text{см}^3$.

В таблице приведено сравнение параметров наиболее применяемых «теплых жидкостей» с высокой степенью очистки.

Электронные свойства «теплых жидкостей» используемых в ионизационных камерах

[Electronic properties of «warm liquids» used in ionization chambers]

Жидкость	$T, ^\circ\text{C}$	ϵ	$\mu, \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	G_{fi}	$d, \text{г}/\text{см}^3$
Изооктан	99,24	1,936	$5,3 \cdot 10^{-4}$	0,33	0,69
Тетраметилпентан	140,3	2,05	$29 \cdot 10^{-4}$	0,42	0,72
Тетраметилсилан	26,65	1,84	$105 \cdot 10^{-4}$	0,74	0,65
Тетраметилгерманий	44,0	2,01	$90 \cdot 10^{-4}$	0,63	1,006

У ТМС больше выход свободных электронов (чем у остальных «теплых жидкостей»), поэтому применяя его нет необходимости в использовании особо дорогих электрометрических усилителей.

Основные способы тестирования применяемые для оценки качества очищенной «теплой жидкости» — измерение выхода свободных электронов G_{if} и снятие ВАХ. Наличие плато по напряжению у ВАХ указывает на то, что жидкость достаточно чистая, а линейный рост ВАХ указывает на обратное.

Выход электронов на каждые 100 эВ энергии, потерянной на ионизацию, вычислялся по формуле:

$$G_{if} = \frac{Q \cdot 10^{10}}{Ddv}, \quad (1)$$

где D — доза, поглощенная в рабочем объеме, мР/имп; d — плотность тетраметилсилана, г/см³; v — рабочий объем ячейки, см³.

Выход электронов G_{if} является одной из основных физических величин, используемых при проектировании ионизационных камер на «теплых жидкостях». Эта формула использовалась при расчете конструкции камеры КИДП.

Установка для наполнения КИДП ТМС

Система очистки ТМС создавались на основе работ [2—5, 10]. Пятый этап очистки жидкости описанный в работе [10] позволяет предварительно перед наполнением камер ТМС проводить дополнительную очистку и тестирование очищенного ТМС. Принципиальная схема пятой стадии из работы [10] показана на рис. 1. В пятой стадии измерительная ячейка совмещена с объемом 4, в котором сверхчистый до степени 24—50 ppb ТМС может храниться перед наполнением из него физических приборов — ионизационных камер и калориметров.

Приставка к ДТет — калибратор измеритель дозного поля

Предлагаемая многоканальная ионизационная камера на «теплой жидкости» ТМС предназначена для применения в практической дозиметрии при определении поглощенной дозы от радиотерапевтического пучка протонов в тканеэквивалентном фантоме, а также для применения в ядерной физике при регистрации вторичных рассеянных нейтронов и гамма-квантов с высокой чувствительностью к определению рассеянных частиц.

В настоящее время известны аналогичные многоканальные ионизационные камеры [13—15]. Они предназначены в первую очередь для мониторингования и определения профиля высокоинтенсивного протонного пучка на линейном ускорителе протонов Института ядерных исследований РАН, где интенсивность пучка в сотни раз превышает интенсивность терапевтического ускорителя «Прометеус» (интенсивность пучка не превышает 10⁹ протонов за импульс ускорителя). Поэтому в ионизационной камере,

описанной в работе [15], применяются такие высокие требования к изготовлению сверхтонких анода и катода из пленки толщиной несколько микрометров. При интенсивностях 10⁹ протонов за импульс на ускорителях с «карандашным» протонным пучком фон вторичных нейтронов и гамма-квантов в сотни раз меньше и нет необходимости изготавливать такие сверхтонкие анод и катод. Но самое главное отличие предлагаемой ионизационной камеры — применение в качестве активного вещества вместо воздуха — очищенной «теплой жидкости» ТМС.

Перечислим преимущества новой многоканальной камеры на ТМС — КИДП, перед камерой из работы [15]:

- приблизительно в 300 раз более высокая чувствительность камеры и пропорционально этому образованию большего числа свободных носителей заряда — это приводит к упрощению электронного тракта для съема информации, что в свою очередь приводит к возможности значительно уменьшить габариты КИДП для практического применения в водном фантоме;

- в десятки раз более высокая абсолютная точность определения поглощенной дозы в водном фантоме;

- возможность различать сорта частиц — протоны, нейтроны и гамма-кванты для случая использования КИДП для определения выхода вторичных частиц вылетающих из водного фантома.

Далее в статье будет рассмотрено одно из применений КИДП, применение как приставки работающей совместно с известным детектором теле-

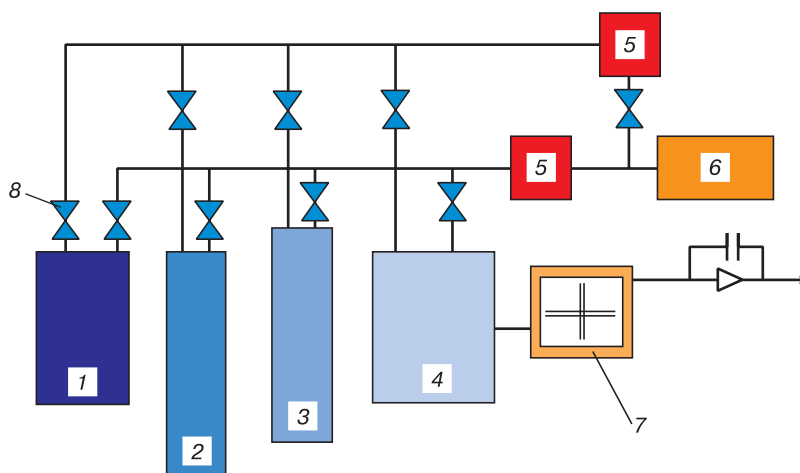


Рис. 1. Принципиальная схема установки по тонкой очистке и наполнению камер — пятая стадия:

1 — переносной объем исходного продукта после четвертой стадии; 2 — колонна с молекулярным ситом 1 нм; 3 — колонна с молекулярным ситом 0,4 нм; 4 — объем для приема конечного сверхчистого до степени 24—50 ppb ТМС для хранения; 5 — азотная ловушка; 6 — вакуумный турбомолекулярный насос; 7 — измерительная ячейка; 8 — вентили

Fig. 1. Schematic diagram of the installation for fine cleaning and filling chambers, fifth stage:

(1) portable volume of the initial product after the fourth stage; (2) column with a molecular sieve of 1 nm; (3) column with a molecular sieve of 0.4 nm; (4) volume for receiving the final ultrapure to a degree of 24—50 ppb TMS for storage; (5) nitrogen trap; (6) vacuum turbomolecular pump; (7) measuring cell; (8) valves

визионного типа ДТеТ [11, 12]. КИДП определяет поглощенную дозу выделяющуюся в данном вокселе фантома за один импульс ускорителя. КИДП постоянно работает совместно с ДТеТ и выдает все дозные распределения включая и «дозные профили» по ширине энергосвыделения в водном фантоме.

Применения микродозиметров для определения дозного профиля пика Брэгга известно, например, из работ [3, 7].

Известен способ измерения энергосвыделения от ионизирующих излучений, в котором измерение энергосвыделения от ионизирующих излучений осуществляют прямым измерением длины пробега частиц по пику Брэгга для определения поглощенной дозы из расчетного соотношения пробег—энергия при визуализации свечения области энергосвыделения матричным телевизионным ПЗС—фотоприемником с оптикой сопряжения, используя режимы объединения пикселей и сложения телевизионных кадров [16].

Наиболее близким является телевизионный детектор ионизирующих излучений [17], содержащий светозащитный кожух с входным окном из материала, непроницаемого для света, но пропускающего упомянутый пучок ионизирующего излучения, внутри которого установлены телевизионная камера на ПЗС—матрице, снабженная оптической линзовой системой и выполненная с возможностью объединения сигналов от группы пикселей упомянутой ПЗС—матрицы и суммирования кадров до выходного каскада ПЗС—матрицы, и тканеэквивалентный фантом, предназначенный для приема пучка ионизирующего излучения, обращенный своей продольной осью на входное окно, при этом объектив оптической системы обращен на тканеэквивалентный фантом перпендикулярно его продольной оси.

Недостатком известного детектора является отсутствие возможности восстанавливать дозное распределение в пике Брэгга по ширине — по координатам x и y . Мишень пациента имеет свои размеры. При облучении онкологических больных методом конформной протонной лучевой терапии важно знать точную ширину пучка в районе облучаемой мишени у пациента. Пучок терапевтического ускорителя, имеющий свою ширину — в районе мишени, может выйти за пределы обозначенного контура и задеть здоровые ткани пациента. Для этого КИДП работая совместно с ДТеТ, корректирует ДТеТ и передает в его вычислитель точное значение поглощенной дозы (ПД) за один импульс ускорителя.

Известен также измеритель пика Брэгга по глубине в водном фантоме фирмы РЕАКFINDER (PTW, Германия) [8], который представляет собой водную колонку, в которой с помощью прецизионных датчиков движения перемещается плоскопараллельная воздушная ионизационная камера. Чувствительная

область этой камеры около 3 мм по глубине и заявляемая точность прибора по глубине достигается, только за счет очень сложного алгоритма — расчетного метода.

К недостаткам этого прибора относятся высокие финансовые затраты на приобретение и обслуживание, а также отсутствие возможности измерять распределение пика Брэгга по ширине (осям x и y). На получение результата прибор затрачивает около 10 мин времени, и не работает при глубинах в водном фантоме более 350 мм.

Задача разработки многоканальной камеры КИДП состоит в повышении точности в определении дозы за минимальное время для калибровки ускорителя перед сеансами лучевой терапии по глубине и ширине пика Брэгга.

Основной результат предлагаемой совместной работы КИДП и детектора ДТеТ заключается в повышении точности измерения дозы по глубине и ширине пика Брэгга за минимальное время. Детектор телевизионного типа ДТеТ с подключенным к нему устройством калибровки КИДП позволяет определять дозу по глубине до 400 мм с точностью по глубине менее 100 мкм.

Указанный технический результат достигается в применении телевизионного детектора ионизирующих излучений — ДТеТ, содержащего светозащитный кожух с входным фланцем, в котором установлены тканеэквивалентный фантом и телевизионная камера на ПЗС—матрице с оптической линзовой системой, объектив которой обращен на тканеэквивалентный фантом, при этом к тканеэквивалентному фантому дополнительно подключено устройство КИДП, состоящее из ионизационной камеры, заполненной кремнийорганической «теплой жидкостью». Устройство КИДП всегда располагается перед детектором ДТеТ — соосно оси пучка.

Требования МАГАТЭ по точности для измеряемой координаты по глубине составляют 1 мм [18]. Точность ДТеТ по определению дозы будет на порядок выше, чем у аналога, так как точность дозиметров (эффективность регистрации камер на «теплых жидкостях») в 10—100 раз выше, чем у воздушных камер типа Т34080. Применяя информацию, записанную КИДП в память вычислителя при калибровке, ДТеТ за несколько импульсов ускорителя (один импульс 300 мс и интервал 2 с) будет выдавать дозный профиль пика Брэгга по глубине и ширине на пульт (или персональный компьютер) ДТеТ.

Для реализации совместной работы ДТеТ и его приставки КИДП предлагается ДТеТ, представленный на рис. 2.

Телевизионный детектор ДТеТ ионизирующих излучений размещен внутри светозащитного кожуха 5 и содержит телевизионную камеру 6 на ПЗС—матрице. Телевизионная камера 6, выполнена

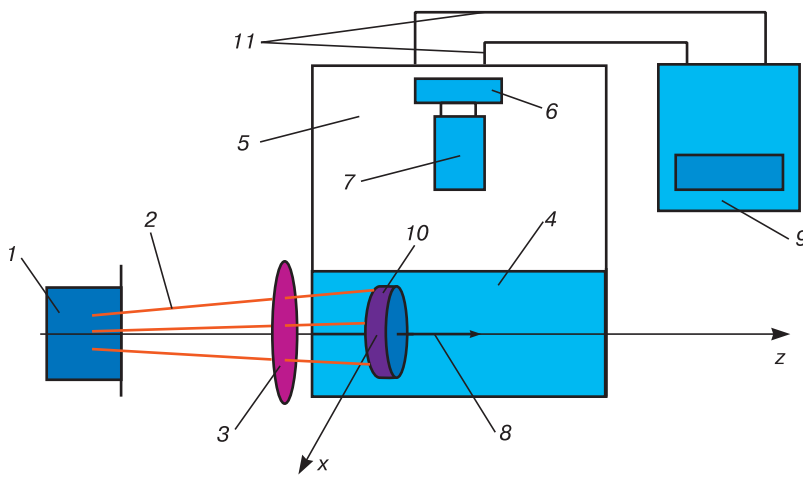


Рис. 2. Схема совместной работы ДТет и его приставки КИДП:
1 — сканирующие магниты; 2 — направление пучка протонов на данный воксель в мишени 10; 3 — многопиксельная камера КИДП установленная перед детектором ДТет 5; 4 — водный фантом (далее по тексту)

Fig. 2. Collaboration scheme of a television-type detector and its calibrator meter of the dose field: (1) scanning magnets; (2) direction of the proton beam to a given voxel in target 10; (3) multipixel camera calibrator meter of the dose field installed in front of the television-type detector 5; (4) water phantom (see further in the text)

с возможностью объединения сигналов от группы пикселей ПЗС-матрицы (биннинг) и суммирования кадров (накопление) до выходного каскада камеры 6. Объектив оптической системы 7 обращен на водный фантом 4 перпендикулярно его продольной оси. Фантом 4 установлен внутри светозащитного кожуха 5, и обращен своей продольной осью на входной фланец выполненный из материала непроницаемого для света, но пропускающего пучок 2 ионизирующего излучения, испускаемого источником ионизирующего излучения. К входному фланцу посредством резьбового соединения подсоединено устройство калибровки КИДП 3. Телевизионный детектор может содержать вычислительное средство 9, к которому соединительными кабелями 11 подключен выход телевизионной камеры 6. В качестве такого вычислительного средства может быть использован, например, персональный компьютер, либо специализированное устройство (пульт), выполненное на контроллере. Вычислительное средство 9 может быть запрограммировано для расчета геометрических размеров светящейся области 8 в тканеэквивалентном фантоме, возникающей при его облучении пучком 2 ионизирующего излучения и воспринимаемой телевизионной камерой 3. Светящаяся область 8 простирается от входа пучка 2 ионизирующего излучения в тканеэквивалентный фантом 4 до пика Брэгга, за которым следует резкий спад интенсивности свечения. Вычислительное средство 9 рассчитывает по измеренной координате глубины пика Брэгга поглощенную дозу, а также на основе записанной в него через КИДП «карты дозы», выдает результат дозных профилей по ширине пика Брэгга.

КИДП — устройство, представляющее собой матрицу пикселей прецизионных микродозиметров на «теплой жидкости» закрепленную перед входным фланцем ДТет соосно оси пучка — оси z . Пиксельная камера чувствительная по координатам x и y состоит из ионизационной камеры с одним чувствительным объемом, которая заполнена «теплой жидкостью». Анод камеры, разделенный на пиксели (пады), позволяет измерять число частиц и дозу пучка проходящего через данный пиксель за каждый импульс ускорителя. При процедуре калибровки ДТет с помощью КИДП по заданной программе сканируют все воксели мишени в фантоме и весь объем мишени по глубине и ширине. Все дозные профили для каждого фиксированного значения по глубине записываются вычислителем 9. Такую процедуру проводят для набора

применяемых энергий ускорителя от минимальной до максимальной.

Технический результат работы детектора ДТет с приставкой КИДП заключается в том, что при сканировании каждого вокселя, ДТет точно определяет координату глубины пика Брэгга, а КИДП — ПД и число протонов прошедших через воксель за импульс. На рис. 3 приведен принцип совместной работы ДТет и КИДП.

Ионизационная многоканальная камера КИДП 3, каждым своим пикселем (падом) 4, определяет количество протонов прошедших за один импульс и дозу в абсолютных единицах и запускает детектор ДТет, который высветит в каком вокселе водного фантома остановился пучок протонов (пик Брэгга на высоте d_{80} дистальной части). На рис. 3 поясняется принцип совместной работы двух детекторов ДТет и КИДП. Из рис. 3 видно, что сканирующие магниты 1 разводят по заданной программе пучок 2 за каждый импульс по нужным вокселям в мишени 6.

Конструкция камеры КИДП

Детектор КИДП — это большая ионизационная камера с чувствительными «пикселями» (падами) размером $6,9 \times 6,9 \text{ мм}^2$ и чувствительной областью — $140 \times 140 \text{ мм}^2$. КИДП располагается соосно перед ДТет на расстоянии около 60 см от выхода пучка в процедурную комнату, сразу за сканирующими магнитами, и полностью перекрывает рабочую область на входе фантома по ширине. Схема совместной работы детектора ДТет и КИДП представлена на рис. 2. КИДП за один импульс ускорителя измеряет дозу сканирующего пучка, направленного на

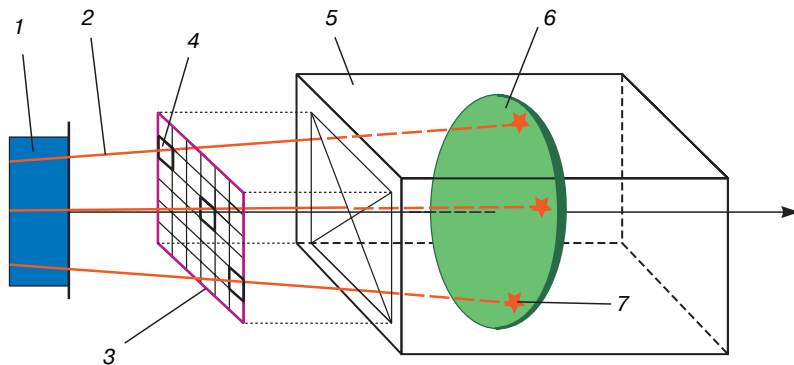


Рис. 3. Принцип работы детектора КИДП совместно с детектором ДТет: 1 — сканирующие магниты; 2 — направление пучка за один импульс ускорителя на данный воксель, где останавливается пучок и детектор ДТет определяет его глубину; 3 — многопиксельная камера КИДП; 4 — пиксель матрицы КИДП, через которую прошел пучок и который определяет поток и ПД; 5 — водный фантом детектора ДТет; 6 — область мишени которую сканируют по заданной программе сканирующие магниты 1; 7 — точка остановки пучка в данном вокселе, где выделилась энергия пика Брэгга

Fig. 3. The principle of operation of the calibrator meter of the dose field together with the television-type detector: (1) scanning magnets; (2) direction of the beam for one accelerator pulse to the given voxel, where the beam stops and the television-type detector determines its depth; (3) multipixel camera calibrator meter of the dose field; (4) pixel of the calibrator meter of the dose field matrix through which the beam passed and which determines the flux and absorbed dose; (5) water phantom of the television-type detector; (6) target area which is scanned according to a given program by the scanning magnets 1; (7) point where the beam stops in this voxel, where the Bragg peak energy was released

определенный воксель в мишени 10, находящейся в водном фантоме 4, который за этот один импульс определит глубину ($Z_{ДТЕТ}$). Далее сканирующий пучок 2 будет облучать другой воксель и синхронно КИДП определит дозу, а ДТет глубину $Z_{ДТЕТ}$ для данного вокселя.

Наполнение камеры КИДП «теплой жидкостью», было проведено после контроля на установке (см. рис. 1), так называемый «пятый способ очистки». Степень очистки при заполнении ТМС должна быть не хуже 50 ppb. Для заполнения изооктаном можно использовать очищенный на заводе изооктан до степени 99,9 % и проводить заполнение камеры на установке (см. рис. 1) не подвергая изооктан дополнительной очистке. Сигнал — количество заряда собранное при равных условиях для изооктана будет примерно в 4 раз меньше чем для ТМС.

Схематически камера КИДП устроена следующим образом. В корпусе — из нержавеющей трубы с фланцами с двух сторон закреплен на расстоянии 2—5 мм катод и анод. Анод состоит из тонкой плоскопараллельной пластины толщиной около 0,7 мм представляющей специальный состав высокопрочной керамики.

На анодный электрод нанесены изолированные друг от друга палладиевые пиксели обращенные металлической частью к катоду. Катод выполнен из полиамидной пленки покрытой сплошным слоем палладия. Толщина полиамидной пленки катода составляет 20 мкм. Расстояние (d) между катодом и

анодом можно регулировать в пределах от 2 до 5 мм. Расстояние d подбирается так, чтобы оптимизировать отношение сигнала к шуму. Рабочее значение напряженности электрического поля между электродами составляет около 5 кВ/см. Толщина нанесенного слоя палладия на пленку катода и многоканального анода составляет 0,6 мкм. Сначала на полиамидную пленку и керамику наносится основа — слой меди толщиной 0,2 мкм. По внешнему периметру анода на пленку наносилось охранное кольцо (заземление) для выравнивания электрического поля между анодом и катодом.

Керамическая пластина анодного электрода с нанесенными изолированными друг от друга палладиевыми пикселями внутри активной части детектора имеет токовыводящие дорожки, с каждого пикселя подсоединенные с внутренней части корпуса (активной части) к специальному — особочистому разъему («ОСЧВ-разъем»). Через этот «ОСЧВ-разъем», расположенный на небольшом расстоянии от матрицы

с пикселями — анода, сигналы с пикселей выводятся на внешнюю сторону корпуса КИДП и поступают на электронику считывания (ЭС). На внешней поверхности корпуса камеры КИДП нанесены охлаждающие кольца для поддержания заданной температуры «теплой жидкости» внутри активной области детектора .

Один из вариантов ЭС КИДП представлен на рис. 4.

Ионизационная камера КИДП заполнена очищенной «теплой жидкостью» например, тетраметилсиланом, содержит катод 13 и анод 12. Катод подключают к источнику высокого напряжения. Пространство между анодом и катодом заполнено «теплой жидкостью» 14. Плоскости анода и катода перпендикулярны оси пучка z . Анодная плоскость 12 имеет 20×20 (400 пикселей размером $6,9 \times 6,9 \text{ мм}^2$) изолированных друг от друга, которые подключаются (каждый пиксель) к зарядово-чувствительному преусилителю 15. К анодному электроду — к каждому его пикселю подключается СЭ.

Система считывания КИДП состоит из усилителей-мультиплексоров — 15 и 16 расположенных на внешнем корпусе КИДП и соединяются с пикселями через герморазъемы установленные на корпусе КИДП. ЭС имеет дополнительную плату подсоединенную к компьютеру 9 и состоящую из следующих узлов: схемы формирования выходных ТТЛ-сигналов 17, аналогового мультиплексора 18 для коммутирования парафазных сигналов

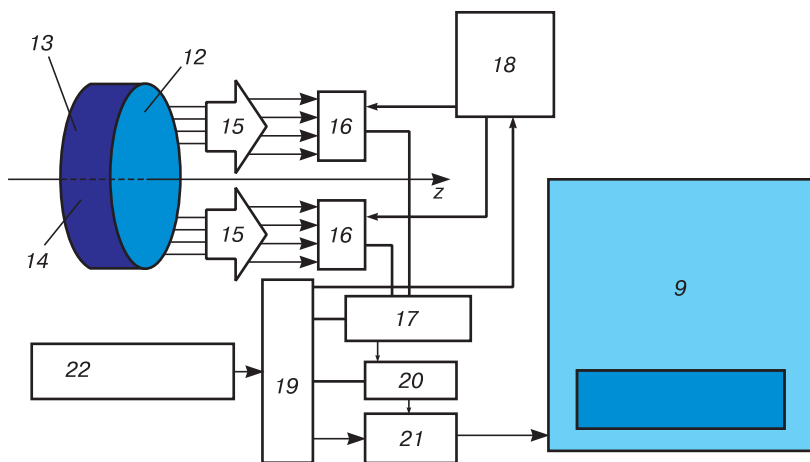


Рис. 4. Схема устройства и электроники считывания КИДП
 Fig. 4. Schematic diagram of the device and electronics for reading the calibrator meter of the dose field

входов на один выходной канал, микропроцессора 19, двенадцатиразрядного аналого-цифрового преобразователя 20, буферной памяти событий 21. Мультиплексоры состоят из частей, каждая из которых включает линейку по четыре независимых зарядочувствительных усилителя 15 и линейку мультиплексоров 16, которые коммутируют выходной усиленный сигнал на вход блока 17. Запуск системы считывания производится синхроимпульсом от ускорителя 22, этот сигнал подается на микропроцессор 19. По алгоритму заложенному в его программу микропроцессор 19 начинает управлять системой считывания.

Ось пучка z проходит через геометрические центры плоскостей катода и анода. При калибровке детектора ДТеТ устройство КИДП по заданной программе сканирует все воксели мишени в фантоме. Матрица пикселей анода КИДП измеряет дозное распределение пика Брэгга по оси x и y для каждого вокселя по ширине и глубине мишени. Анодный электрод 12 можно назвать считывающим электродом. Корпус ионизационной камеры устройства КИДП закреплен на фланце входного окна ДТеТ вдоль оси z . Таким образом, телевизионный детектор ионизирующих излучений ДТеТ позволяет за несколько импульсов ускорителя восстанавливать поглощенную дозу по глубине для каждого вокселя.

Второй вариант ЭС, проектируемый для работы детектора КИДП, разработан по КМОП-технологии [19] (рис. 5). В этом варианте ЭС, также предлагается вынесение элементов электронного тракта ЭС из активной зоны детектора, где расположена матрица с пикселями, на внешнюю стенку детектора через токовыводящие дорожки до «ОСЧВ-разъема». Это сделано для снижения облучения пучком протонов компонентов ЭС. Вариант исполнения одного канала ЭС с одного пикселя (пада) приведен на рис. 5.

Использование предложенного телевизионного детектора ионизирующих излучений позволяет повысить точность измерения дозы по глубине и ширине пика Брэгга за счет совместной работы ДТеТ и КИДП и применения записи «карты дозного поля» специальным калибратором КИДП, в состав которого входит ионизационная камера, заполненная кремнийорганической «теплой жидкостью», обладающая повышенной чувствительностью и эффективностью к регистрации абсолютной дозы ионизирующего излучения. После отключения устройства КИДП телевизионный детектор с помощью измеренной координаты глубины пика Брэгга и «карты дозного поля» восстанавливает «дозный профиль» пика Брэгга по глубине и ширине с повышенной точностью. Подводя итог можно сказать, что телевизионный детектор ионизирующих излучений ДТеТ, содержащий светозащитный кожух с входным фланцем, в котором установлены тканеэквивалентный фантом и телевизионная камера на ПЗС-матрице с оптической линзовой системой, объектив которой обращен на тканеэквивалентный фантом, имеет дополнительную опцию отличающуюся тем, что к тканеэквивалентному фантому дополнительно подключено устройство — КИДП, которое будет применяться на ускорителе «Прометеус» при режиме работы методом активного сканирования «карандашным»

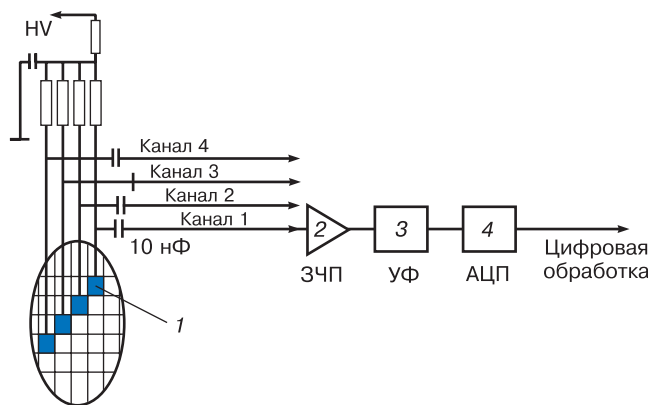


Рис. 5. Блок-схема одного канала электронного тракта детектора КИДП:
 1 — пиксель (пад) первого канала; 2 — зарядочувствительный предусилитель; 3 — усилитель формирования; 4 — аналого-цифровой преобразователь. Все компоненты ЭС находятся вблизи на внешней стороне корпуса КИДП

Fig. 5. Block diagram of one channel of the electronic path of the calibrator meter of the dose field:
 (1) pixel (pad) of the first channel; (2) charge-sensitive preamplifier; (3) amplifier shaper; (4) analog-to-digital converter. All components of the reading electronics are located close to the outside of the calibrator meter of the dose field case

пучком. Применение совместной работы КИДП и ДТетТ предназначено для моделирования облучения мишени в водном фантоме сканирующим «карандашным» протонным пучком.

Тестирование камеры КИДП

Было проведено последовательное тестирование пикселей камеры КИДП при облучении камеры источником ^{60}Co при подключении каждого отдельного пикселя к одноканальному сертифицированному немецкому клиническому дозиметру «Dose-1». В процессе тестирования измерялась мощность поглощенной дозы (МПД). Изменяя расстояние от источника до камеры, подбирались МПД в пределах от 0,1 до 0,7 Гр/мин. Была получена практически линейная зависимость величины собранного заряда от изменения величины МПД. Это говорит о совпадении полученных результатов с теоретическими расчетами по формуле (1), где, для чистой «теплой жидкости» по известным величинам, приведенным в таблице, можно определить величину собранного заряда (тока) от дозы прошедшей через данный пиксель (пад). Измеренный заряд при равных условиях для изоктана был в 4 раза меньше чем для ТМС.

Заключение

Создана приставка к детектору телевизионного типа — детектор КИДП — многоканальная пиксельная камера на ТМС и других «теплых жидкостях» и рассмотрены возможности ее применения на терапевтических ускорителях.

Рассмотрены возможности самостоятельного применения камеры КИДП для калибровки ускорителя и протонного пучка перед проведением сеанса протонной терапии. Например для проверки метрологической обстановки в районе водного фантома. Это касается измерения вторичного фона исходящего от водного фантома — вторичных нейтронов и гамма-квантов, количество этого фона является проверкой конформности проведения сеанса лучевой терапии для данного конкретного ускорителя.

Библиографический список

1. Eberle K., Engler J., Hartmann G., Hofmann R., Hörandel J. R. First tests of a liquid ionization chamber to monitor intensity modulated radiation beams // *Phys. Med. Biol.* 2003. V. 48, N 21. P. 3555—3564. DOI: 10.1088/0031-9155/48/21/007
2. Матвеева О. В., Сиксин В. В. Полупромышленная установка для получения тетраметилсилана (ТМС) — рабочего вещества в адронной калориметрии: препринт ИФВЭ 90–17. Протвино, 1990.

3. Сиксин В. В., Ендовин Ю. П. Создание микродозиметров для лучевой терапии на основе сверхчистого тетраметилсилана и проверка его электропроводности // *Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.* 2018. Т. 45, № 6. С. 42—49.

4. Сиксин В. В. Установка по очистке тетраметилсилана (ТМС) от электроотрицательных примесей и система контроля за электропроводностью ТМС после очистки: препринт ИФВЭ ОНФ 90–112. Протвино, 1990.

5. Воробьев А. П., Матвеева О. В., Сиксин В. В. Автоматизированная ректификационная установка и очистка жидкостей методом разделения»: препринт ИФВЭ ОНФ, 88–90. Серпухов, 1988.

6. Сиксин В. В. Дозовые характеристики ионизационной камеры на основе «теплой» жидкости ТМС // *Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.* 2018. № 4. С. 26—30.

7. Benítez E. M., Casado F. J., García-Pareja S., Martín-Viera J. A., Moreno C., Parra V. Evaluation of a liquid ionization chamber for relative dosimetry in small and large fields of radiotherapy photon beams // *Radiation Measurements.* 2013. V. 58. P. 79—86. DOI: 10.1016/j.radmeas.2013.08.009

8. PWT Wasser- und Abwassertechnik GmbH. URL: www.pwt.de

9. Hummel A., Schmidt W. F. Ionization of dielectric liquids by high-energy radiation studied by means of electrical conductivity methods // *Radiation Res. Rev.* 1974. V. 5. P. 199—300.

10. Сиксин В. В. Пилотная установка по очистке «теплой жидкости» тетраметилсилана и проведения «неускорительных экспериментов» // *Изв. вузов. Материалы электрон. техники.* 2019. Т. 22, № 2. С. 118—127. DOI: 10.17073/1609-3577-2019-2-118-127

11. Сиксин В. В. Пути совершенствования детектора ДТетТ // *Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.* 2018. № 12. С. 78—82.

12. Сиксин В. В. Измерение профилей пиков Брэгга детектором ДТетТ // *Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.* 2019. Т. 46, № 2. С. 47—52.

13. Brusasco C., Cattai A., Cirio R., Dellacasa G., Donetti M., Isoardi P., Marchetto F., Peroni C., Rolando V., Ruspa M., Solano A., Zambardi C. Strip ionization chambers as 3-D detector for hadron therapy // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 1997. V. 389, Iss. 3. P. 499—512. DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00348-3

14. Brusasco C., Voss B., Schardt D., Krämer M., Kraft G. A dosimetry system for fast measurement of 3D depth-dose profiles in charged-particle tumor therapy with scanning techniques // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 2000. V. 168, Iss. 4. P. 578—592. DOI: 10.1016/S0168-583X(00)00058-6

15. Potashev S. I., Akulinichev S. V., Burmistrov Yu. M., Mor-dovskoy M. V., Drachev A. I. A thin-walled air-ionization chamber for proton therapy // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 2004. V. 535, Iss. 1–2. P. 115—120. DOI: 10.1016/j.nima.2004.07.116

16. Пат. RU2654838 (РФ). Способ измерения энерговыделения от ионизирующих излучений / В. В. Сиксин, 2018.

17. Пат. RU179244 (РФ). Телевизионный детектор ионизирующих излучений / А. В. Гринкевич, В. В. Сиксин, 2018.

18. Международные практические рекомендации по дозиметрии, основанные на эталонах единицы поглощенной дозы в воде. При поддержке IAEA, WHO, PAHO и ESTRO // *Серия технических докладов № 398.* Вена: Международное агентство по Атомной энергии, 2004. URL: https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/trs398r_web.pdf

19. Цыцулин А. К., Адамов Д. Ю., Манцетов А. А., Зубакин И. А. Твердотельные телекамеры: накопление качества информации. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 271 с.

Автор благодарит А. И. Львова за консультации по проведению разработки электронного тракта детектора КИДП на ТМС.

Статья поступила в редакцию 21 ноября 2019 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 228—236.
DOI: 10.17073/1609-3577-2019-3-228-236

“Warm liquid” detector for measuring dose profiles from ionizing radiation

V. V. Siksin^{1,§}

¹ *Lebedev physical Institute of the Russian Academy of Sciences,
53 Leninsky Prospekt, Moscow 119991, Russia*

Abstract. The use of “warm liquid” tetramethylsilane (TMS) in ionization chambers for measuring dose profiles in water phantoms to prepare the accelerator for a proton therapy session is relevant. One of the promising areas of radiation therapy is proton therapy. To increase the conformality of proton therapy, it is important to know exactly the dose distributions from the energy release of the proton beam in the water phantom before conducting a proton therapy session. A television-type detector (TTD), which measures the profiles of the Bragg peak by the depth of the beam in the water phantom, helps to increase the accuracy of the dose distribution knowledge. To accurately determine the profile of the Bragg peak by the beam width in the water phantom, an additional method is proposed that will allow TTD to quickly determine the profile by the width of the Bragg peak in on-line mode. This prefix to the TTD will improve the quality of summing up the therapeutic beam—thanks to accurate knowledge of the profile by width, and therefore the formed high-dose distribution field will correspond to the irradiated volume in the patient and will increase the conformality of irradiation. The additional prefix to the TTD is designed on an organosilicon “warm liquid” and represents a high-precision ionization chamber with coordinate sensitivity along the width of the water phantom. The fully developed technology for obtaining “warm liquid” TMS allows creating both microdosimeters for proton therapy and detectors for measuring “dose profiles” in water phantoms during accelerator calibration. The considered prefix to the TTD detector – the calibrator meter of the dose field (KIDP) – can also be used independently of the TTD and with great accuracy measure the dose profiles of the Bragg peak in the water phantom, both in depth and width. KIDP can also be used to measure the outputs of secondary “instantaneous” neutrons and gamma quanta emitted from the water phantom orthogonally to the direction of the proton beam.

Keywords: electronegative impurities, “warm liquids”, free electron yield, tetramethylsilane (TMS), liquid ionization chambers, Bragg peak profiles, television-type detector

References

- Eberle K., Engler J., Hartmann G., Hofmann R., Hörandel J. R. First tests of a liquid ionization chamber to monitor intensity modulated radiation beams. *Phys. Med. Biol.*, 2003, vol. 48, no. 21, pp. 3555—3564. DOI: 10.1088/0031-9155/48/21/007
- Matveeva O. V., Siksin V. V. Semi-industrial plant for producing tetramethylsilane (TMS) — a working substance in hadron calorimetry: preprint IFVE-90-17. Protvino: Institute of High-Energy Physics, 1990. (In Russ.)
- Siksin V. V., Endovin Yu. P. Development of microdosimeters for beam therapy based on superpure tetramethylsilane and testing of its conductivity. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2018, vol. 45, no. 6, pp. 190—194. DOI: 10.3103/S1068335618060064
- Siksin V. V. Installation for the purification of tetramethylsilane (TMS) from electronegative impurities and the TMS conductivity monitoring system after purification: preprint ONF 90-112. Protvino: Institute of High-Energy Physics, 1990. (In Russ.)
- Vorob'ev A. P., Matveeva O. V., Siksin V. V. Automated distillation unit and purification of liquids by separation method: preprint ONF 88-90. Serpukhov: Institute of High-Energy Physics, 1988. (In Russ.)
- Siksin V. V. Dose characteristics of the ionization chamber based on TMS «warm liquid». *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2018, vol. 45, no. 4, pp. 112—114. DOI: 10.3103/S1068335618040048
- Benítez E. M., Casado F. J., García-Pareja S., Martín-Viera J. A., Moreno C., Parra V. Evaluation of a liquid ionization chamber for relative dosimetry in small and large fields of radiotherapy photon beams. *Radiation Measurements*, 2013, vol. 58, pp. 79—86. DOI: 10.1016/j.radmeas.2013.08.009
- PWT Wasser- und Abwassertechnik GmbH. URL: www.pwt.de
- Hummel A., Schmidt W. F. Ionization of dielectric liquids by high-energy radiation studied by means of electrical conductivity methods. *Radiation Res. Rev.*, 1974, vol. 5, pp. 199—300.
- Siksin V. V. Pilot installation for the purification of the «warm liquid» of tetramethylsilane and conducting «non-accelerating experiments». *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 118—127. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2019-2-118-127
- Siksin V. V. Ways to improve the TV-type detector. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2019, vol. 46, no. 1, pp. 19—22. DOI: 10.3103/S1068335619010068
- Siksin V. V. Measurement of the Bragg peak profiles by the TTD. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2019, vol. 46, no. 2, pp. 47—52. (In Russ.)
- Brusasco C., Cattai A., Cirio R., Dellacasa G., Donetti M., Isoardi P., Marchetto F., Peroni C., Rolando V., Ruspa M., Solano A., Zambarnardi C. Strip ionization chambers as 3-D detector for hadron therapy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1997, vol. 389, no. 3, pp. 499—512. DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00348-3
- Brusasco C., Voss B., Schardt D., Krämer M., Kraft G. A dosimetry system for fast measurement of 3D depth-dose profiles in charged-particle tumor therapy with scanning techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2000, vol. 168, no. 4, pp. 578—592. DOI: 10.1016/S0168-583X(00)00058-6
- Potashov S. I., Akulinichev S. V., Burmistrov Yu. M., Mor-dovskoy M. V., Drachev A. I. A thin-walled air-ionization chamber for proton therapy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2004, vol. 535, no. 1-2, pp. 115—120. DOI: 10.1016/j.nima.2004.07.116
- Patent RU2654838 (RF). *Sposob izmereniya energoydeleniya ot ioniziruyushchikh izluchenii* [A method of measuring energy release from ionizing radiation]. V. V. Siksin, 2018. (In Russ.)
- Patent RU179244 (RF). *Televizionnyi detektor ioniziruyushchikh izluchenii* [TV detector of ionizing radiation]. A. V. Grinkevich, V. V. Siksin, 2018. (In Russ.)
- Mezhdunarodnye prakticheskie rekomendatsii po dozimetrii, osnovannye na etalonakh edinitsy pogloshchennoi dozy v vode* [International practical recommendations on dosimetry based on standards for absorbed dose units in water. With support from IAEA, WHO, PAHO and ESTRO]. Technical Report Series No. 398. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004. (In Russ.). URL: https://www-pub.iaea.org/mtdc/publications/pdf/trs398r_web.pdf
- Tsytsulin A. K., Adamov D. Yu., Mantsvetov A. A., Zubakin I. A. Tverdotel'nye telekamery: nakoplenie kachestva informatsii [Solid state television cameras: accumulation of information quality]. St. Petersburg: Izd-vo SPbGETU “LETI”, 2014. 271 p. (In Russ.)

Information about author:

Viktor V. Siksin^{1,§}; Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher (antktech@yandex.ru)

§ Corresponding author

Acknowledgment: *The author of the article are grateful to A. I. Lvov for consultations on the development of the electronic path of the Bragg peak width calibration detector on tetramethylsilane.*

Received November 21, 2019