

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 53.082.63+681.785

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОГО КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО ВОЛОКОННОГО ДОЗИМЕТРА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА¹

© 2020 г. А. В. Трегубов^{a,*}, В. В. Приходько^{a,**}, А. С. Алексеев^a,
А. В. Жуков^a, С. Г. Новиков^a, В. В. Светухин^b

^a Научно-исследовательский технологический институт им. С.П. Капицы
Ульяновского государственного университета
Россия, 432017, Ульяновск, Льва Толстого, 42

^b Государственный научный центр Научно-производственный комплекс “Технологический центр”
Россия, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

*e-mail: tregub@ulsu.ru

**e-mail: v_prikhodko@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2020 г.

После доработки 23.03.2020 г.

Принята к публикации 25.03.2020 г.

Приведены результаты исследования предложенной авторами концепции распределенного калориметрического волоконного дозиметра на основе эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. Конструкция сенсора представляет собой один или множество термоизолированных сферических чувствительных элементов из материала с высоким коэффициентом ослабления γ -излучения, закрепленных с фиксированным шагом на оптическом волокне. Контроль изменения температуры сенсора вследствие взаимодействия с ионизирующим излучением осуществляется с помощью анализатора вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна, что позволяет проводить измерение температуры на всем протяжении оптического волокна на расстояниях до нескольких десятков километров. Приводятся результаты модельных расчетов эффективности сферических сенсорных элементов, изготовленных из различных материалов. Выполнена оценка диапазона чувствительности предлагаемого дозиметра и проанализированы результаты предварительного эксперимента по взаимодействию сенсора с γ -излучением. Показано, что рабочий диапазон дозиметра по мощности дозы находится в пределах порядка 130 Гр/ч–700 кГр/ч.

DOI: 10.31857/S0032816220050067

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день активно ведутся исследования в области разработки волоконных дозиметрических сенсоров, которые по сравнению с классическими решениями (полупроводниковыми, сцинтилляционными сенсорами, ионизационными камерами) обладают рядом преимуществ: не требуют электрического питания [1–4]; имеют высокую электромагнитную помехозащищенность [3, 4], радиационную стойкость [5]; предоставляют возможность удаленного мониторинга и мультиплексирования [3, 4]. Описанные в литературе волоконные дозиметрические системы можно разделить, в зависимости от используемого физическо-

го эффекта, на сцинтилляционные [6] и сенсоры на основе эффекта Вавилова–Черенкова.

В физике элементарных частиц известен калориметрический метод [7], основанный на преобразовании поглощенной веществом сенсора энергии падающих частиц в другой, поддающийся измерению, физический параметр – количество теплоты, выделенное при взаимодействии и характеризующееся температурой тела сенсора [8]. Преимуществом калориметрических дозиметров является независимость от энергии частиц, простота конструкции и надежность.

Ранее авторами предложена концепция распределенного калориметрического дозиметра и проанализирована эффективность сенсорных элементов различной геометрической формы [9]. К преимуществам такого подхода относится возможность разработки распределенного волоконного дозиметра с использованием всего лишь одной протя-

¹ Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на третьей международной конференции “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2020” (<http://or-2020.permsc.ru/>, 22–24 сентября, Россия, Пермь).

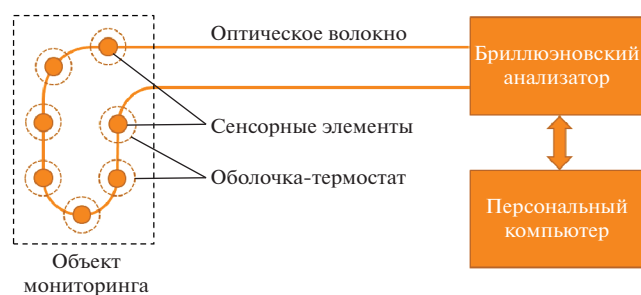


Рис. 1. Структурная схема калориметрического волоконного дозиметра.

женной волоконной линии. Для регистрации температуры вдоль оптического волокна предложено использовать анализатор на основе эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна, которые давно зарекомендовали себя как высокочувствительные сенсоры температуры и деформации [10]. Подобный тип распределенного дозиметра в литературе не отражен.

В данной работе приводятся результаты дальнейшего исследования эффективности волоконного сенсора температуры для регистрации мощности дозы ионизирующего излучения с использованием модельных расчетов и эксперимента.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Авторами предложена следующая конструкция сенсора: сферические чувствительные элементы из материала с высоким коэффициентом ослабления γ -излучения устанавливаются на оптическое волокно с необходимым интервалом. Для снижения тепловых потерь чувствительные элементы сенсора размещаются в теплоизолирующих кожухах из высокопрозрачного для γ -квантов материала. Сенсорный элемент имеет центральное сквозное отверстие с диаметром, превышающим диаметр оптического волокна, и рассечен полуплоскостью, край которой совпадает с его осью вращения. Монтаж сенсора осуществляется его обжатием на оптическом волокне и фиксацией при помощи теплопроводящего эластичного клеящего состава.

Подобная конструкция дает возможность создания датчиков, которые содержат сенсорные элементы, распределенные по всей длине волокна, позволяя проводить измерения мощности дозы ионизирующего излучения вдоль траекторий протяженностью до нескольких десятков километров. Структурная схема предложенного дозиметра показана на рис. 1.

Данные о мощности дозы излучения в таком случае можно получить двумя способами:

1) оценить динамику приращения температуры калориметрического сенсора;

2) оценить разность температур сенсора и окружающей среды после достижения термодинамического равновесия.

Первый способ позволяет получать данные о динамике интенсивности ионизирующего излучения, однако чрезвычайно требователен к скорости измерений, из-за чего может быть не пригоден для работы с бриллюновским распределенным анализатором спектра.

Второй способ направлен на измерение статичного поля и позволяет проводить многократные измерения, увеличивая тем самым точность результата. При этом мощность поглощенной дозы будет пропорциональна температуре чувствительного элемента, а распределение температурных полей внутри элемента при достижении термодинамического равновесия в основном будет зависеть от следующих показателей:

- мощности дозы ионизирующего излучения;
- коэффициента ослабления γ -излучения материала сенсора;
- характеристик теплоизоляции сенсора;
- температуры окружающей среды.

Для оценки температуры внешней среды может быть использован соседний участок того же волокна, на котором смонтирован сенсорный элемент.

Основными требованиями к материалу для изготовления сенсорных элементов являются высокие значения коэффициента ослабления γ -излучения и коэффициента теплопроводности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модельный расчет

Для обоснования выбора материала был проведен модельный расчет энергии ионизирующего излучения, поглощенной веществом сенсора, выполненного из разных материалов: Al, Cu, Pb. Расчет взаимодействия ионизирующего излучения с веществом выполнялся с использованием численных методов Монте-Карло в реализации библиотек пакета моделирования Geant4.

В качестве высокоактивного источника радиационного излучения рассматривался источник на базе ^{60}Co , и задавались соответствующий энергетический спектр и геометрия источника. Энергетический спектр источника является дискретным, энергетические пики излучения приходятся на энергии 1.17 и 1.33 МэВ.

Плоский радиационный источник размерами 100×100 мм располагался на расстоянии 1000 мм от сенсорного элемента. При моделировании использовалась референсная физическая модель QGSP_BIC с использованием модели кварк-глюонных струн (QGS) и бинарного каскада (Binary Cascade), которая применима для энергий < 200 МэВ.

Моделирование проводилось с использованием двух различных подходов: в первом случае расчет проводился на основе стандартных классов G4MultiFunctionalDetector и G4PrimitiveScorer, позволяющих на высоком уровне определять величину поглощенной энергии в объеме сенсорного элемента по завершении процесса моделирования, во втором — использовался класс G4VSensitiveDetector, на базе которого в “ручном” режиме фиксировались акты взаимодействия (Hits) γ -фотонов с веществом, средствами класса G4Step определялись точка пространства, в которой произошло взаимодействие, и величина поглощенной энергии на этом шаге. Результаты, полученные при втором подходе, верифицировались на основе первого.

Получено распределение поглощенной энергии в теле сенсорного элемента в зависимости от его толщины с использованием алюминия, меди и свинца. Результаты модельного расчета приведены на рис. 2. Сенсор на основе свинца наиболее эффективен, при этом максимум поглощенной энергии приходится на внешний слой толщиной до 20 мм, а затем наблюдается резкое убывание по экспоненциальному закону.

Металлы Cu и Al обладают более высокими коэффициентами теплопроводности, чем у Pb. Однако скорость теплопереноса имеет значение только при переходных процессах, возникающих при изменении мощности дозы. В стационарном поле система приходит в термодинамическое равновесие. Таким образом, большее значение имеет коэффициент ослабления γ -излучения, а теплопроводность материала может играть роль лишь при быстрых нестационарных процессах.

Оценка чувствительности метода

Основываясь на технических характеристиках существующих распределенных датчиков температуры DSTS BOTDA(R), проведена оценка нижнего порога чувствительности сенсора.

Производителем оборудования заявляется точность измерения температуры $(2\sigma) \pm 0.1^\circ\text{C}$ (OZ-Optics BOTDA Модуль) для одномодового волокна с нулевой деформацией.

Для оценки практической возможности достижения указанной точности проведена серия экспериментов измерений температуры с помощью оптического волокна SMF28, размещенного в термостате. Погрешность измерения зависит от количества усредняемых результатов в каждом измерении. Минимальная достигнутая на практике [10] точность измерения температуры составила $\sim 1^\circ\text{C}$. Расхождение с заявленными характеристиками прибора возможно из-за недостаточной изоляции кабеля от механических воздействий.

Таким образом, проведение измерения калориметрическим дозиметром мощности дозы из-

Поглощенная энергия, кэВ

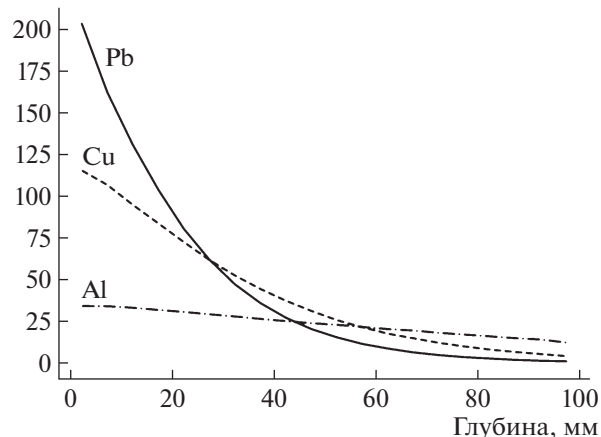


Рис. 2. Распределение поглощенной энергии в теле сенсорного элемента в зависимости от глубины для следующих материалов: алюминия, меди и свинца.

лучения с помощью бриллюэновского волоконного анализатора спектра возможно при изменении температуры сенсора не менее 1°C .

При нулевых теплотериях такое изменение температуры соответствует поглощению шарообразным сенсорным элементом из свинца радиусом 5 мм количества энергии, равного

$$Q = cm\Delta T = 127.5 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right] \frac{4}{3} \pi (0.005 [\text{м}])^3 \times 11340 [\text{кг}/\text{м}^3] \times 1 [^\circ\text{C}] = 0.76 \text{ Дж}, \quad (1)$$

где Q — поглощенная энергия, c — удельная теплоемкость сенсорного элемента, m — его масса, ΔT — изменение температуры элемента.

При массе сенсорного элемента 5.93 г эта энергия соответствует поглощенной дозе величиной 130 Гр. Таким образом, грубой оценкой нижней границы чувствительности рассматриваемого дозиметра по дозе является величина порядка 130 Гр. Для оценки чувствительности по мощности дозы требуется информация о времени, за которое данное значение дозы будет поглощено, что может быть получено либо расчетным путем, либо в ходе эксперимента (см. ниже).

Для оценки верхней границы по дозе следует принять во внимание эффекты сдвига частоты и изменения ширины бриллюэновской линии вследствие взаимодействия оптического волокна с ионизирующим излучением. Согласно данным литературы [11], поглощенная волокном доза порядка 700 кГр приводит к изменению частоты и ширины линии на величину порядка 1 МГц, что соответствует возникновению погрешности измерения температуры, равной приблизительно 1°C . Поэтому в качестве грубой оценки верхней



Рис. 3. Внешний вид тестовой сборки.

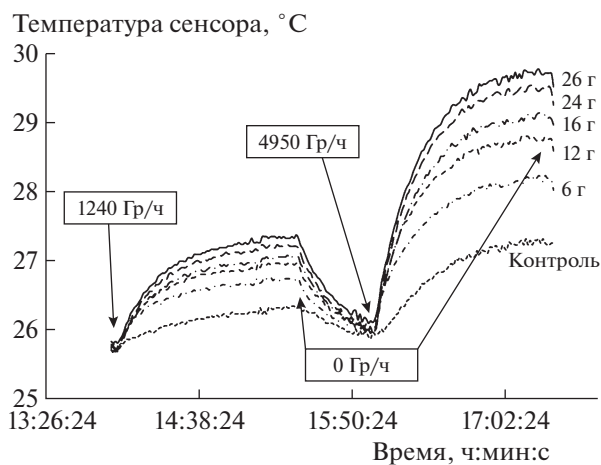


Рис. 4. Динамика нагрева и остывания сенсорных элементов при различных мощностях дозы излучения

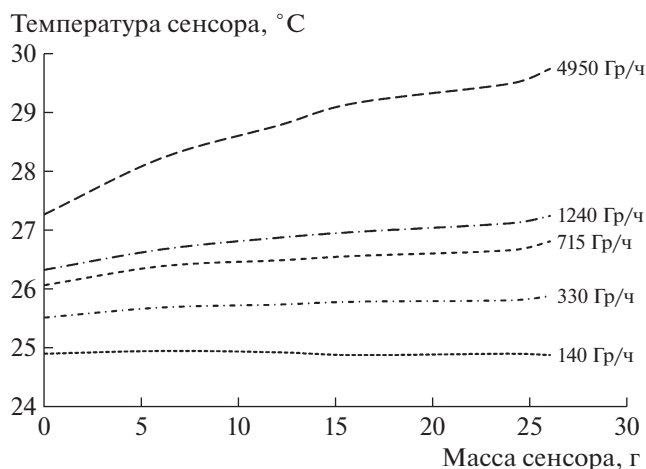


Рис. 5. Зависимость температуры сенсорного элемента от его массы.

границы рабочего диапазона калориметрического дозиметра можно принять значение 700 кГр.

Эксперимент

Для проведения эксперимента были изготовлены сенсорные элементы калориметрического дозиметра, представляющие собой свинцовые сферы с отверстиями по центру для установки термопар с целью контроля температуры. Изготовлены 5 элементов с массой 6, 12, 16, 24 и 26 г, а также из экструдированного пенополистирола матрица-термостат, представляющая собой многослойный параллелепипед размером $100 \times 100 \times 80$ мм (рис. 3). Сенсорные элементы равномерно размещены внутри термостата на окружности $\varnothing 60$ мм. Плоскость окружности параллельна одной из сторон куба и смещена от нее на глубину 40 мм.

Измерение температуры проводилось с помощью многоканального измерителя температуры МИТ-12 — устройства, представляющего собой коммутатор с 12 входами для подключения термопар и выходом для подключения к компьютеру через интерфейс RS-232.

Эксперимент по облучению подготовленных образцов проведен на базе ВНИИ радиологии и агроэкологии (Обнинск). Объекты испытания подвергались облучению γ -квантами ^{60}Co со следующими значениями мощности дозы [Гр/ч]: 130, 330, 700, 1240, 4950 с относительной погрешностью не более 7%.

Эксперимент проводился по следующей схеме: тестовая сборка выдерживалась в поле ионизирующего излучения до момента стабилизации температуры. После этого поле отключалось, и сборка остывала до температуры окружающей среды (25°C). Мощность поля регулировалась расстоянием от сборки до источника и контролировалась ферросульфатным дозиметром.

Результаты эксперимента представлены на рис. 4–6.

С целью теоретического описания результатов эксперимента получены кинетические уравнения, описывающие процессы нагрева и остывания.

Для случая остывания:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_E), \quad (2)$$

где T — температура объекта, T_E — температура окружающей среды, k — коэффициент теплопроводности:

$$k = \frac{\alpha S}{cm}, \quad (3)$$

где α — коэффициент теплопередачи, S — площадь поверхности тела, c — удельная теплоемкость сенсорного элемента, m — его масса.

Решение уравнения (2) записывается следующим образом:

$$T(t) = T_E + (T_0 - T_E)e^{-kt}, \quad (4)$$

где T_0 — начальная температура объекта.

Для случая нагрева:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_E) + \frac{P}{cm}, \quad (5)$$

где P — мощность дозы ионизирующего излучения.

Решением (5) является:

$$T(t) = R + (T_0 - R)e^{-kt}, \quad (6)$$

где

$$R = T_E + \frac{P}{\alpha S}. \quad (7)$$

При сопоставлении выражений (4) и (6) с результатами эксперимента обнаружено, что теория предсказывает больший (на десятки процентов) нагрев сенсорных элементов по сравнению с наблюдаемым. Данный факт можно объяснить появлением дополнительного канала отвода тепла по термопаре. Для эксперимента использованы компенсационные кабели с достаточно большим сечением $2 \times 0.5 \text{ мм}^2$, что обусловлено необходимостью использования термопар длиной не менее 6 м для обеспечения безопасности экспериментатора при работе с ионизирующим излучением.

Данные эксперимента позволяют выполнить оценку чувствительности распределенного калориметрического дозиметра по мощности дозы. Выше был предложен расчет рабочего диапазона по дозе, приблизительно равного 130 Гр—700 кГр. Учитывая, что выход на насыщение по температуре происходит за время порядка 1 ч (см. рис. 4), в качестве грубой оценки чувствительности метода по мощности дозы можно принять диапазон 130 Гр/ч—700 кГр/ч.

Использование оптического волокна позволит избежать теплотерь подобного рода в силу значительно меньших значений диаметра и коэффициента теплопроводности волокна. Подготовка и постановка эксперимента с оптическим волокном и анализатором вынужденного рассеяния Мандельштама—Бриллюэна будет являться предметом ближайших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложенная концепция распределенного калориметрического дозиметра показала свою эффек-

Температура сенсора, °С

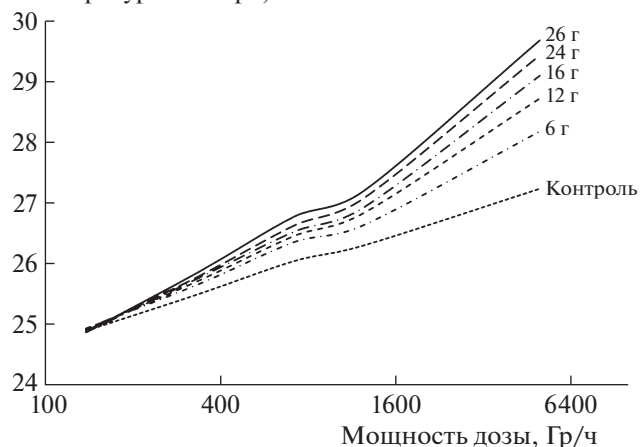


Рис. 6. Зависимость температуры сенсора от мощности дозы.

тивность на практике и представляет перспективной для дальнейшего изучения.

2. Наиболее эффективным материалом для сенсорных элементов из проанализированных является свинец, несмотря на худшие показатели теплопроводности.

3. Использование термопар вносит заметный вклад (до десятков процентов) в зависимость температуры сенсора от мощности дозы, причём эффект наиболее заметен для образцов с малой массой. Данный эффект обусловлен потерями тепла через компенсационные кабели. Использование оптоволокну в силу меньшей площади контакта сенсорных элементов с волокном и значительно меньшей теплопроводности позволит избежать дополнительных теплотерь.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Ульяновской области (грант 18-48-730038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Beierholm A.R.* Pulse-resolved radiotherapy dosimetry using fiber-coupled organic scintillators (Ph.D. thesis). Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi, 2011.
2. *Beierholm A.R., Lindvold L., Andersen C.* // Radiation Measurements. 2011. V. 12. P. 46. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.04.016>
3. *Carrasco P., Jornet N., Jordi O., Lizondo M., Latorre-Musoll A., Eudaldo T., Ruiz A., Ribas M.* // Medical physics. 2015. V. 42. P. 297. <https://doi.org/10.1118/1.4903757>

4. *O'Keeffe S., McCarthy D., Woulfe P.* // The British journal of radiology. 2015. V. 88. P. 20140702. <https://doi.org/10.1259/bjr.20140702>
5. *Beddar A.S.* // Radiation Measurements. 2006. V. 41. P. S124. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.01.002>
6. *Трегубов А.В., Светухин В.В., Беринцев А.В., Приходько В.В., Фомин А.Н., Муралев А.Б., Марков Д.В.* // Автоматизация процессов управления. 2017. № 2 (48). С. 62.
7. ГОСТ 26307-84. Источники гамма-излучения радионуклидные закрытые. Методы измерения параметров (с Изменением N 1). М.: Изд-во стандартов, 1985.
8. *Fabjan Ch.W., Gianotti F.* // Rev. Mod. Phys. 2003. V. 75. № CERN-EP-2003-075. P. 1243. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.1243>
9. *Алексеев А.С., Приходько В.В., Трегубов А.В.* // Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 344. <https://doi.org/10.24411/2308-6920-2019-16180>
10. *Tregubov A.V., Svetukhin V.V., Prikhodko V.V., Novikov S.G., Berintsev A.V.* // Results in Physics. 2016. V. 6. P. 131. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.01.008>
11. *Alasia D., Fernandez A.F., Brichard B., Abrardi L., Thevenaz L.* // Proceedings 17th International Conference on Optical Fibre Sensors. 2005. V. 5855. <https://doi.org/10.1117/12.623703>