

УДК 681.2.08, 681.758.6, 681.7.08, 539.1.074, 621.039.743

А.В. Трегубов, С.Г. Новиков, В.В. Светухин, А.С. Алексеев, А.В. Беринцев,
В.В. Приходько, А.Н. Фомин, А.Б. Муралев, Д.В. Марков

КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СУХИХ ХРАНИЛИЩ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА¹

Трегубов Алексей Викторович, главный инженер Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета. Окончил инженерно-физический факультет УлГУ. Имеет публикации в области компьютерного моделирования, волоконных датчиков. [e-mail: tregub@ulsu.ru].

Новиков Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории твердотельной электроники НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Окончил физико-технический факультет филиала Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в г. Ульяновске. Область научных интересов: микроэлектроника, негatronика, оптоэлектроника, полупроводниковые приборы с положительной обратной связью. [e-mail: novikovsg@ulsu.ru].

Светухин Вячеслав Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Окончил физико-технический факультет филиала МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Ульяновске. Область научных интересов: дефектообразование в полупроводниках, радиационная физика и технология. Имеет статьи в области физики полупроводников, физического материаловедения. [e-mail: slava@sv.uven.ru].

Алексеев Александр Сергеевич, аспирант УлГУ. Окончил инженерно-физический факультет УлГУ. Стажер-исследователь НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Область научных интересов: полупроводниковые приборы, оптоэлектроника, микроэлектроника. [e-mail: granik@ua.ru].

Беринцев Алексей Валентинович, кандидат технических наук. Окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного политехнического института. Инженер НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Область научных интересов: оптоэлектроника, микроэлектроника, полупроводниковые приборы. Имеет научные публикации и изобретения в области автоматизации измерений и исследования оптоэлектронных приборов. [e-mail: berints@mail.ru].

Приходько Виктор Владимирович, кандидат физико-математических наук, начальник управления информационных технологий и телекоммуникаций, старший научный сотрудник НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Окончил физико-математический факультет филиала МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Ульяновске. Область научных интересов: физика твердого состояния, оптика, телекоммуникации. [e-mail: vvp@ulsu.ru].

Фомин Александр Николаевич, кандидат технических наук. Окончил физико-математический факультет Ульяновского государственного педагогического университета им. И.Н. Ульянова. Директор НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Область научных интересов: радиационные технологии. [e-mail: mr.fominan@yandex.ru].

Муралев Артем Борисович, окончил инженерно-физический факультет УлГУ. Младший научный сотрудник Лаборатории моделирования поведения неорганических материалов НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Область научных интересов: компьютерное моделирование, радиационная физика и технология. [e-mail: a.b.muralev@yandex.ru].

Марков Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук. Окончил физико-технический факультет Уральского политехнического университета. Директор АО «Институт реакторных материалов». Область научных интересов: реакторное материаловедение. [e-mail: irm@irmatom.ru].

Аннотация

Разработан программно-аппаратный комплекс мониторинга состояния сухих хранилищ отработанного ядерного топлива (СХОЯТ), предназначенный для получения данных о пространственном распределении температурных и дозовых полей в помещении хранилища. Программная часть комплекса позволяет проводить математическое моделирование пространства СХОЯТ с учетом активностей топливных сборок и поглощающих характеристик материалов. Аппаратная часть комплекса выполнена на базе волоконных датчиков и используется для верификации результатов расчетов, кон-

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (шифр проекта RFMEFI57714X0074).

троля граничных условий и проверки качества математической модели. Основной отличительной особенностью разработанного комплекса является использование распределенного волоконного датчика температуры на основе эффекта Мандельштама-Бриллюэна и волоконных датчиков мощности дозы на основе сцинтилляторов и спектросмещающих волокон. Все сенсорные элементы датчиков имеют высокую радиационную стойкость и выполнены с использованием специализированных волокон. Разработанный комплекс представляет собой стабильную, отказоустойчивую систему, не требующую постоянного обслуживания.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики, дозиметр, температура, система мониторинга.

SYSTEM FOR MONITORING THE STATE OF SPENT NUCLEAR FUEL DRY STORAGE FACILITY

Aleksei Viktorovich Tregubov, Chief Engineer at Scientific Research Technological Institute named after S.P. Kapitsa of Ulyanovsk State University; graduated from the Faculty of Physics and Engineering of Ulyanovsk State University; an author of articles in the field of computer simulation and fiber sensors. e-mail: tregub@ulsu.ru.

Sergei Gennadievich Novikov, Candidate of Engineering, Chief of Solid State Electronics Laboratory at Scientific Research Technological Institute named after S.P. Kapitsa of Ulyanovsk State University; graduated from the Faculty of Physics and Engineering of Ulyanovsk Affiliate of Lomonosov Moscow State University; interested in microelectronics, negatronics, optoelectronics, semiconductor devices with positive feedback. e-mail: novikovsg@ulsu.ru.

Viacheslav Viktorovich Svetukhin, Doctor of Physics and Mathematics; Professor; graduated from the Faculty of Physics and Engineering of Ulyanovsk Affiliate of Lomonosov Moscow State University; Senior Scientist at Scientific Research Technological Institute named after S.P. Kapitsa of Ulyanovsk State University; interested in defect formation in semiconductor devices, radiation physics and technology; an author of semiconductor physics and physical material science. e-mail: slava@sv.uven.ru.

Aleksandr Sergeevich Alekseev, Postgraduate Student of Ulyanovsk State University; graduated from the Faculty of Physics and Engineering of Ulyanovsk State University; Research Assistant at Scientific Research Technological Institute named after S.P. Kapitsa of Ulyanovsk State University; interested in semiconductor devices, optoelectronics and microelectronics. e-mail: granik@ya.ru.

Aleksei Valentinovich Berintsev, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Engineer at Scientific Research Technological Institute named after S.P. Kapitsa of Ulyanovsk State University; interested in optoelectronics, microelectronics, semiconductor devices; an author of articles and inventions in the field of measurement automation and optoelectronic devices research. e-mail: berints@mail.ru.

Viktor Vladimirovich Prikhodko, Candidate of Physics and Mathematics, graduated from the Faculty of Physics and Mathematics of Ulyanovsk Affiliate of Lomonosov Moscow State University; Head of Information Technology and Telecommunications Department, Senior Researcher at Scientific Research Technological Institute named after S.P. Kapitsa of Ulyanovsk State University; interested in solid state physics, optics, telecommunications. e-mail: vvp@ulsu.ru.

Aleksandr Nikolaevich Fomin, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Physics and Mathematics at Ulyanovsk State Pedagogical University named after I.N. Ulyanov; Director of Scientific Research Technological Institute named after S.P. Kapitsa of Ulyanovsk State University; interested in radiotechnologies. e-mail: mr.fominan@yandex.ru.

Artem Borisovich Muralev, Junior Scientist at Scientific Research Technological Institute named after S.P. Kapitsa of Ulyanovsk State University; graduated from the Faculty of Physics and Engineering of Ulyanovsk State University; interested in computer simulation, radiation physics and technology. e-mail: a.b.muralev@yandex.ru.

Dmitrii Vladimirovich Markov, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Physics and Engineering at the Ural State Technical University; Director of Joint Stock Company "Institute of Nuclear Materials"; interested in reactor material science. e-mail: irm@irmatom.ru.

Abstract

A hardware and software system for monitoring the state of a spent nuclear fuel dry storage facility (SFSF) has been designed by the team of authors to obtain data on the spatial distribution of temperature and dose fields in the storage facility. The software part of the system allows for the mathematical modeling of SFSF space taking into account the activities of the fuel assemblies and the absorbing properties of materials. The hardware part of the system is based on optic fiber sensors and used in verification the results of computer simulation, control of the boundary conditions and check of the quality of the

mathematical model. The main feature of the system developed is the use of a distributive fiber temperature sensor based on Brillouin scattering and fiber sensors of radiation intensity based on scintillators and wavelength shifting fibers. All sensing elements of sensors have high radiation hardness and are made with the use of specific fibers. The system developed is a stable and fault-tolerant complex that does not require regular maintenance.

Key words: fiber optic sensors, dosimeter, temperature, monitoring system.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не теряет актуальности проблема безопасности объектов атомной энергетики. Решение вопросов безопасности и предотвращения чрезвычайных ситуаций в отрасли основывается сегодня на применении технических систем, созданных несколько десятилетий назад. Часть оборудования систем мониторинга и анализа ситуаций на объектах требуют серьезной модернизации. По этой причине задача разработки новых систем мониторинга состояний хранилищ отработанного ядерного топлива, как потенциально опасных объектов, является весьма востребованной. К современным системам длительного мониторинга таких объектов предъявляется ряд жестких требований по помехозащищенности, стойкости, надежности и долговечности в условиях высоких уровней радиационного излучения. При этом одним из требований, предъявляемым к современным системам, является наличие моделей, способных прогнозировать динамику состояний контролируемого объекта в течение длительного времени и вести непрерывный мониторинг текущих состояний.

Основопологающим документом для разработки подобных систем является ГОСТ Р МЭК 61559-1-2012 [1] (Аппаратура радиационной безопасности ядерных объектов. Централизованные системы радиационного контроля). В полной мере требованиям ГОСТ отвечают системы мониторинга, основанные на оптоволоконных сенсорах [2–4]. В частности, основой таких систем могут выступать брегговские датчики деформации и температуры [5, 6], калориметрические дозиметры на их основе, сцинтилляционные радиационно-чувствительные волокна. В качестве чувствительного элемента может выступать само волокно [7–9] (бриллюэновские распределенные датчики температуры и деформации).

В рамках НИР «Разработка оптоволоконных систем мониторинга состояния сухих хранилищ отработанного ядерного топлива (СХОЯТ)» коллективом авторов разработан программно-аппаратный комплекс мониторинга состояния СХОЯТ, предназначенный для получения данных о пространственном распределении температурных и дозовых полей в пространстве хранилища.

К основным функциям разработанного комплекса относятся следующие:

- ведение непрерывного мониторинга распределения температурных и радиационных полей в пространстве хранилища;
- прогнозирование распределения температурных и радиационных полей в пространстве хранилища;
- оповещение об отклонениях реального состояния от расчетного и фиксация таких ситуаций;
- накопление данных о состоянии хранилища на протяжении времени его эксплуатации.

Основной отличительной особенностью разработанного комплекса является использование распределенного волоконного датчика температуры на основе эффекта Манделштама-Бриллюэна и волоконных датчиков мощности дозы на основе сцинтилляторов и спектросмещающих волокон. Сенсорные элементы температурных датчиков имеют высокую радиационную стойкость и выполнены на основе изотропного оптического световода 1550(R) производства ООО «НПО Оптолинк». Использование волоконных сенсоров снижает уровень собственных шумов, обеспечивает электромагнитную устойчивость и помехозащищенность, а также обеспечивает более длительный срок эксплуатации сенсоров в условиях сильных радиационных полей. Волоконные датчики не содержат активных элементов, не требуют подведения электропитания и способны функционировать при большой протяженности линий связи. Эта особенность позволяет разместить измерительную аппаратуру в помещениях с нормальным уровнем ионизирующего излучения, что повышает надежность системы и упрощает ее обслуживание.

1 ПРОГРАММНАЯ ЧАСТЬ КОМПЛЕКСА

Разработанный комплекс СХОЯТ включает в себя две подсистемы – программную и аппаратную.

Программная часть решает задачу расчета распределения температуры и мощности дозы внутри помещения хранилища, а также производит корректировку расчетов с учетом данных аппаратных средств измерения. Программная часть (рис. 1) работает согласно следующему алгоритму:

1. При первоначальной настройке комплекса или изменении конфигурации моделируемого помещения оператор создает или актуализирует трехмерную математическую модель помещения. Модель создается с учетом источников излучения и контрольных датчиков. Построение математической модели пространства СХОЯТ производится в системе автоматизированного проектирования FreeCAD, функциональность которой расширена с помощью подключенных Python-скриптов. Подготовленная во FreeCAD модель в виде полигональной сетки передается в расчетные модули для вычисления распределения температуры и уровней ионизирующего излучения;

2. Используя расчетные модули, оператор задает граничные и начальные условия. Для модели распределения температуры указываются температуры объектов, имеющаяся вентиляция, источники тепла. Для модели распределения ионизирующих излучений – параметры генераторов первичных частиц (радиационные источники), тип испускаемых частиц, граничные условия для генерации вторичных частиц, параметры и дискретизация детектора. Для температурных расчетов используется пакет Elmer

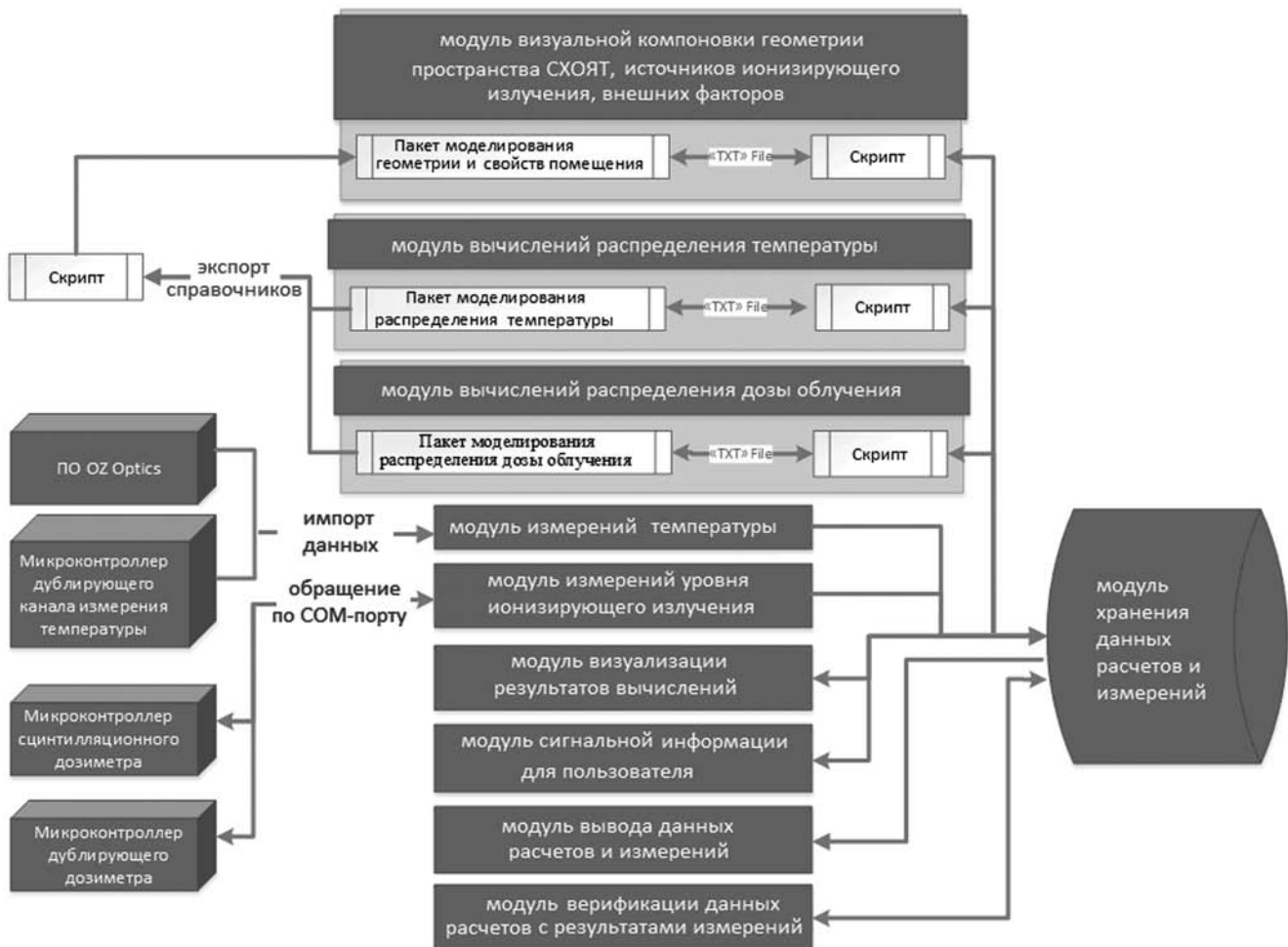


Рис. 1. Структурная схема программной части комплекса

FEM, позволяющий проводить математическое моделирование физических процессов и расчета конструкций при помощи метода конечных элементов. Вычисление данных о распределении ионизирующих излучений производится с помощью пакета Geant4, предназначенного для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло. Модуль вычисления значений уровня ионизирующего излучения представляет собой программную оболочку, позволяющую импортировать и экспортировать необходимые данные и производить запуск и остановку расчета;

3. Результаты расчетов накладываются на трехмерную модель помещения СХОЯТ (рис. 2). Возможен также вывод информации в виде табличных



Рис. 2. Интерфейс модуля визуализации результатов вычислений: 1 – секция отображения информации о текущих параметрах; 2 – 3D-сцена, включающая в себя прототип хранилища, датчики, рассчитанные распределения температуры и мощности дозы

данных. Таким образом, оператор может оценить значения уровня ионизирующего излучения и температуры в любой его точке и динамику этих параметров.

Математическая модель, однако, не может спрогнозировать возникновение внештатной ситуации. Информация о подобных событиях может быть получена только при помощи непосредственных измерений. Эту задачу решает аппаратная часть системы. Результаты измерений также используются для контроля качества математической модели.

2 АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ КОМПЛЕКСА

Аппаратная часть системы (рис. 3) представлена двумя независимыми блоками:

- распределенная волоконно-оптическая система измерения температуры (СИТ);
- квазираспределенная система измерения мощности дозы ионизирующего излучения (СИМД).

2.1 СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

СИТ выполняет автоматизированные измерения температуры по всей длине сенсорного элемента с пространственным разрешением 1 м. СИТ содержит в себе основной и контрольный каналы.

Основной канал СИТ содержит волоконный сенсорный элемент и бриллюэновский анализатор DSTS-C-01/50-1/100. Оптическое волокно сенсорного элемента изме-

няет свои свойства, такие как показатель преломления и скорость распространения акустической волны в волокне под действием температуры. При этом значения указанных параметров в различных точках волокна воспроизводят распределение температуры вдоль волокна. Для получения информации о значениях термочувствительных параметров используется бриллюэновский импульсный анализатор (Brillouin Optical Time Domain Analyzer).

Эффект рассеяния Мандельштама-Бриллюэна относится к нелинейным эффектам и заключается в том, что оптическое излучение, направляемое в оптическое волокно, рассеивается на акустической колебательной моде, приобретая сдвиг по частоте, соответствующий частоте этой моды. Рассеяние возникает за счёт модуляции показателя преломления среды при распространении в ней звуковой волны. В случае, когда световое излучение имеет высокую интенсивность и степень когерентности, в результате действия сил электрострикции возникает акустическая волна, которая тоже когерентна. В результате в среде появляются периодические изменения показателя преломления, эффективность рассеяния резко возрастает, и наблюдается эффект вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). ВРМБ наблюдается только тогда, когда плотность мощности излучения превышает некоторый пороговый уровень. Для обычного волокна оптической связи на 1550 нм пороговая мощность будет составлять ~ 2 мВт.

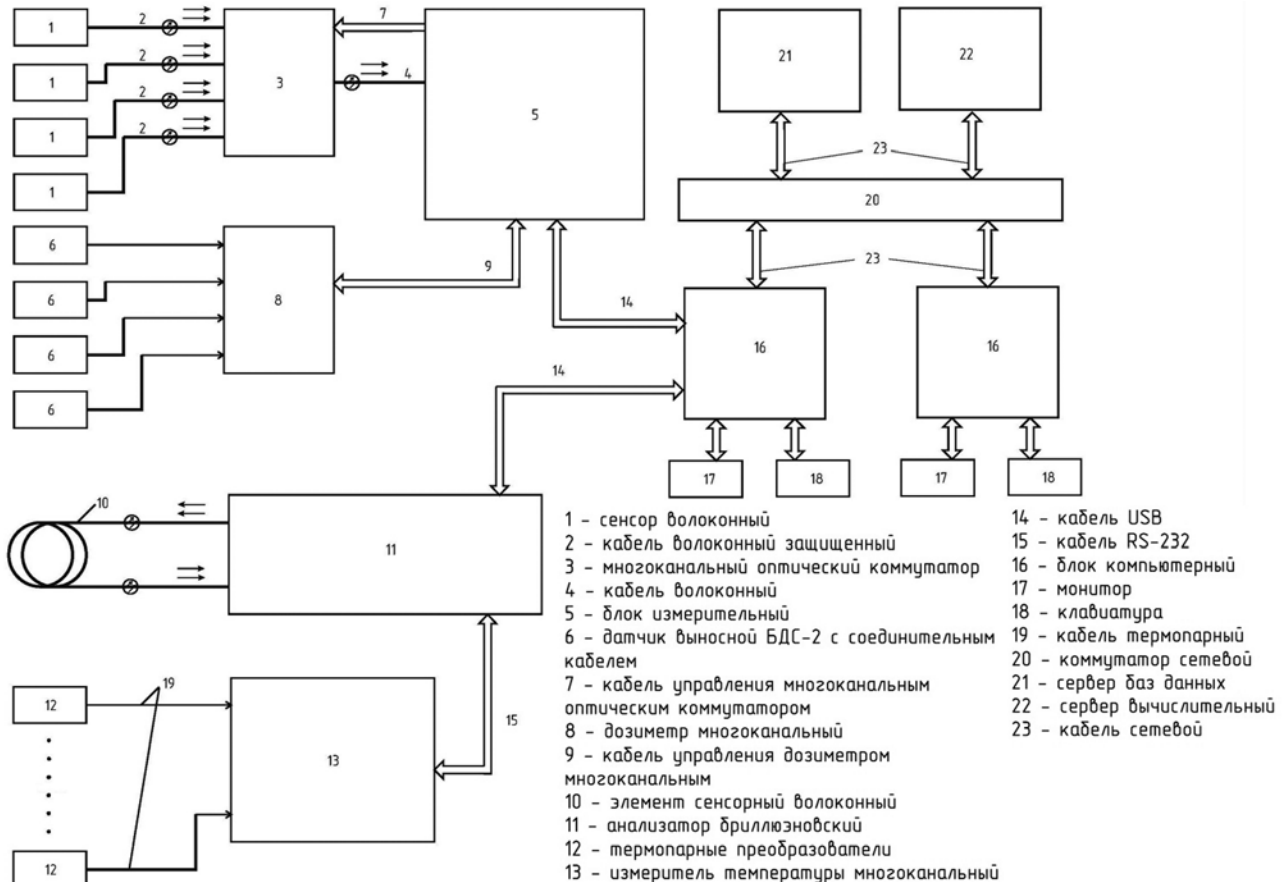


Рис. 3. Структурная схема аппаратной части комплекса мониторинга состояния СХОЯТ

При спонтанном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна частоты рассеянных волн (стоксовой и антистоксовой) отличаются от частоты излучения накачки на величину частоты акустической волны ν_a . Частота акустической волны является функцией температуры и механического напряжения в волокне. Любые изменения температуры или механического напряжения будут влиять на изменение частоты акустической волны. Соответствующие температурные и механические коэффициенты, определяющие зависимость сдвига частоты акустической волны от температуры оптического волокна T и относительно механической деформации ε , определяются выражениями:

$$K_T = \frac{dV_a}{dT} = \frac{2}{\lambda_{\text{нак}}} \left(V_a \frac{dn}{dT} + n \frac{dV_a}{dT} \right),$$

$$K_\varepsilon = \frac{dV_a}{d\varepsilon} = \frac{2}{\lambda_{\text{нак}}} \left(V_a \frac{dn}{d\varepsilon} + n \frac{dV_a}{d\varepsilon} \right),$$

где $\lambda_{\text{нак}}$ – длина волны накачки, V_a – скорость акустической волны, n – показатель преломления. Указанные зависимости используются при создании рассматриваемого типа распределенного волоконно-оптического датчика.

Работая в импульсном режиме и измеряя зависимость интенсивности вынужденного бриллюэновского рассеяния от сдвига частоты формируемой анализатором акустической волны в различных точках волокна, анализатор позволяет получить профиль распределения температуры вдоль волоконного сенсорного элемента. Аналого-цифровой преобразователь, расположенный в блоке вычислительного модуля, осуществляет оцифровку аналогового сигнала, поступающего с выхода анализатора. Результаты измерений транслируются в базу данных комплекса.

Высокая чувствительность волоконного сенсорного элемента накладывает некоторые требования на условия эксплуатации: сенсор должен быть смонтирован таким образом, чтобы динамические механические воздействия на него были исключены. Авторами разработано оригинальное решение, позволяющее производить укладку

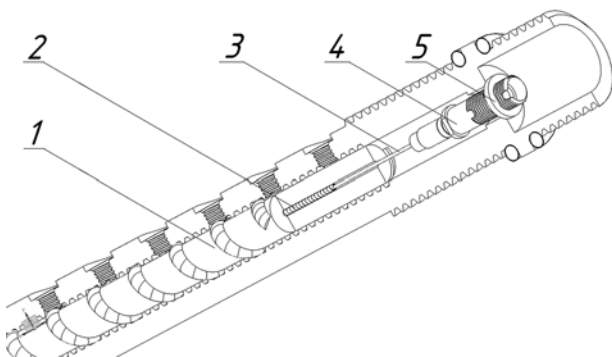


Рис. 4. Внешний вид композитной строительной арматуры, оснащенной оптоволоконным сенсором с герметичным оптическим разъемом (в разрезе): 1 – композитная строительная арматура; 2 – защитный металлический рукав; 3 – оптический кабель; 4 – оптический коннектор; 5 – оптическая розетка

сенсора еще на этапе монтажа строительных конструкций [10, 11]. В основе технологии лежит использование композитной арматуры, представляющей собой стекловолокно-армированный ровинг, пропитанный эпоксидной смолой. Процесс производства такой арматуры позволяет внедрить в ее тело оптическое волокно, которое жестко связывается с ней в процессе полимеризации. Конечное изделие (рис. 4) представляет собой композитную арматуру (1) с размещенным внутри металлическим спиральным рукавом (2), защищающим оптическое волокно в буферной оболочке (3). Волокно соединено с оптическим разъемом (4), который, в свою очередь, соединен с оптическим адаптером (розеткой) (5). Описанная конструкция размещается внутри герметичного защитного кожуха, оснащенного цапговым зажимом.

Для подтверждения возможности применения такой конструкции в качестве сенсорного элемента в составе распределенной волоконно-оптической СИТ изготовлены макеты сенсоров и проведены их экспериментальные исследования. Установлено, что разработанный сенсорный элемент имеет хорошую чувствительность к внешним температурным воздействиям. Чувствительность составляет величину 0,1 МГц на °С (рис. 5). При этом датчик способен с точностью до 1 м локализовать точку нагрева.

Многоканальный измеритель температуры на основе сертифицированного прибора МИТ-12ТП обеспечивает дублирующий канал измерения распределения температуры вдоль волоконного сенсорного элемента с помощью термпарных преобразователей, установленных в контрольных точках в непосредственной близости с волоконным сенсорным элементом.

2.2 СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ДОЗЫ

СИМД выполняет автоматизированные измерения мощности дозы источника ионизирующего излучения (ИИИ) в выбранных точках пространства. СИМД также содержит в себе основной и контрольный каналы.

Роль основного канала СИМД выполняет квазираспределенный волоконный дозиметр [7, 8]. Дозиметр содержит сцинтилляционные волоконные сенсоры, соединенные посредством отдельных защищенных оптово-

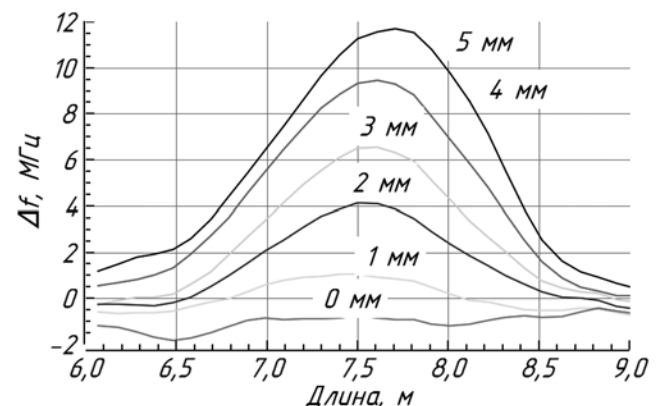


Рис. 5. Результаты измерения температуры композитной арматурой, оснащенной волоконным сенсором

локонных кабелей с входами управляемого оптического коммутатора Leoni MOL 1x16 S200 UV/VISN37 19. Оптический выход коммутатора соединен с измерительным блоком дозиметра, который содержит в себе счетчик фотонов COUNT-100B-FC и узел микроконтроллера. Входные фотоны вызывают генерацию соответствующих электрических импульсов, которые могут быть считаны с выхода. Узел микроконтроллера осуществляет подсчет этих импульсов, переключает каналы коммутатора согласно командам и передает данные об измерениях в вычислительный модуль. Результаты измерений транслируются в базу данных комплекса.

Волоконный сенсор для квазираспределенного волоконного дозиметра (рис. 6) представляет собой листовой пластиковый сцинтиллятор (3) Saint-Gobain BC-412 размером 300x300x3 мм, в котором сделана спиральная канавка глубиной 1,5 мм. В канавке при помощи оптического цемента BC-600 закреплено спектросмещающее оптическое волокно (1) BCF-91A в сборе с оптической вилкой (2). Листовой пластиковый сцинтиллятор помещен между двух металлических зеркал (4). Вся конструкция размещается в металлическом корпусе (6) с демпфирующими прокладками (5). Рабочий конец волокна через проточку

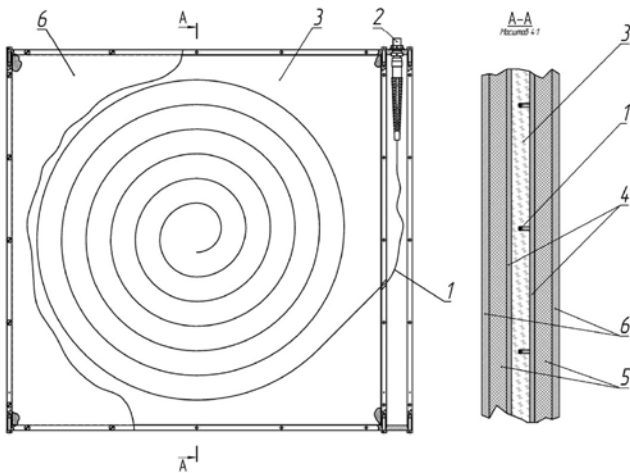


Рис. 6. Внешний вид волоконного сенсора для квазираспределенного волоконного дозиметра

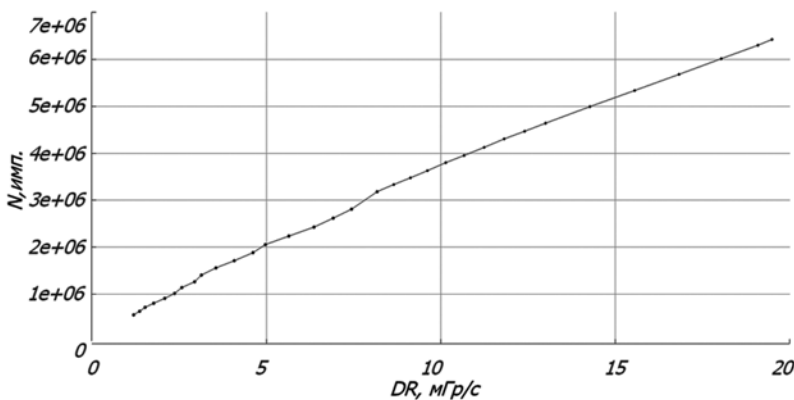


Рис. 7. Калибровочная кривая волоконного дозиметрического сенсора. Зависимость количества импульсов от мощности дозы

во внутренней стенке корпуса выводится во вспомогательный прямоугольный отсек корпуса с расположенным там оптическим разъемом-розеткой.

Взаимодействие ионизирующего излучения с материалом пластикового сцинтиллятора вызывает возникновение фотонов с длиной волны 434 нм. Большая длина затухания света в материале сцинтиллятора и наличие отражающих элементов, установленных на торцах сцинтиллятора, увеличивают вероятность захвата фотонов оптическим волокном. Поглощенные спектросмещающим волокном фотоны вызывают генерацию вторичных фотонов с длиной волны 494 нм. Торца волокна достигнут только фотоны в сердцевине волокна, которые испытывают полное внутреннее отражение от границы с оболочкой под углом в 21,4°.

Эффективность выхода фотонов из волокна зависит также от качества полировки торца волокна и от ослабления, связанного с оптическими потерями на длине транспортно-го волокна L , соединяющего сенсор и счетчик фотонов.

Проведенные испытания показали, что разработанный сенсор отличается высокой линейностью во всем диапазоне измеряемых мощностей дозы (рис. 7).

Контрольный канал СИМД представляет собой сцинтилляторные детекторы излучения типа БДС-2, соединенные с многоканальным сигнализатором ионизирующего излучения ПСД-8. Данный прибор предназначен для регистрации мощности экспозиционной дозы гамма-излучения по восьми независимым каналам. Результаты измерений передаются на вычислительный модуль и транслируются в базу данных комплекса.

Технические характеристики СИМД:

- число измерительных каналов	16
- диапазон измеряемых мощностей дозы	от 1 до 100 мГр/с
- точность измерения мощности дозы	20%
- число дублирующих каналов	8
- периодичность обновления информации о мощности дозы источников ионизирующего излучения на каждом канале	10 мин
- время готовности к работе	не более 10 мин

3 ИСПЫТАНИЯ КОМПЛЕКСА

Разработанный измерительный комплекс изготовлен в виде стойки (рис. 8) с смонтированными в ней измерительными блоками, что обеспечивает удобность монтажа и обслуживания, а также размещение комплекса практически в любом помещении, удаленном от контролируемого пространства. Соединение всех сенсорных элементов комплекса осуществляется при помощи волоконных кабелей и проводов, помещенных в защитные металлические рукава.

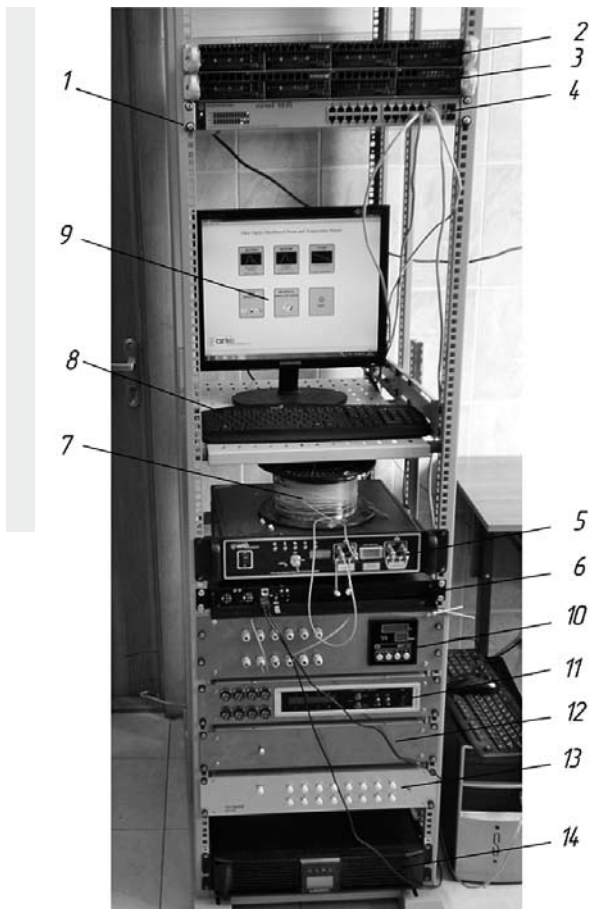


Рис. 8. Внешний вид аппаратной части комплекса:

- 1 – монтажная стойка;
- 2 – расчетный сервер;
- 3 – сервер баз данных;
- 4 – сетевой коммутатор;
- 5 – бриллюэновский анализатор спектра;
- 6 – персональный компьютер;
- 7 – волоконный сенсорный элемент;
- 8 – клавиатура;
- 9 – монитор;
- 10 – многоканальный измеритель температуры;
- 11 – многоканальный дозиметр;
- 12 – дозиметр квазираспределенный волоконный;
- 13 – многоканальный оптический коммутатор;
- 14 – источник бесперебойного питания

Для проверки работоспособности комплекса были проведены следующие работы:

- в тестовом помещении смонтированы сенсорные элементы. Для создания градиента температуры установлен нагревательный элемент с заданной тепловой мощностью. Величина ионизирующего излучения соответствует естественному фону в помещении;
- построена трехмерная модель помещения с учетом положения сенсоров и нагревательного элемента;
- вычислительные и коммутационные блоки размещены в отдельном помещении – аппаратной комнате;
- проведены непрерывные испытания комплекса в течение одного месяца (рис. 9).

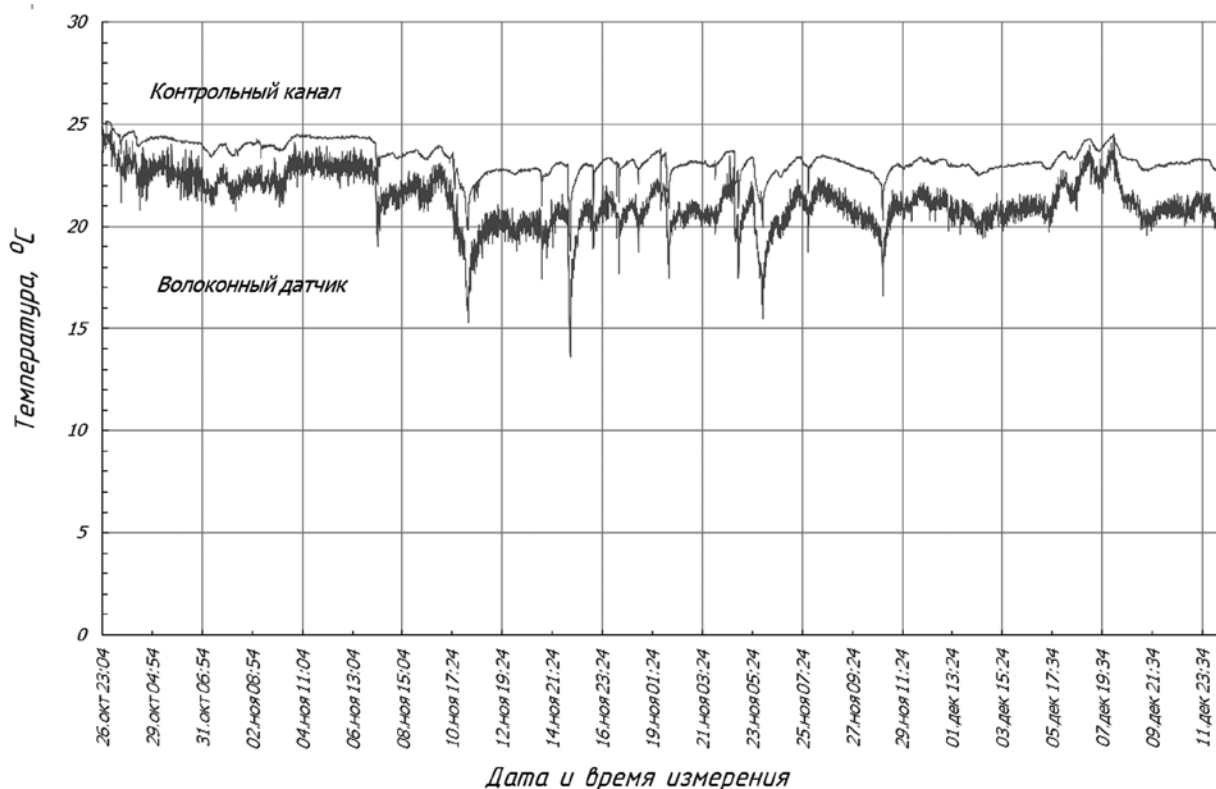


Рис. 9. Пример данных температурных датчиков в одной из точек помещения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных испытаний подтверждены расчетные характеристики комплекса:

- пространственное разрешение по температуре не хуже 1 м;
- точность измерения температуры – 10%;
- число дозиметрических каналов – 16;
- диапазон измеряемых мощностей дозы – от 1 до 100 мГр/с;
- точность измерения мощности дозы – 20%.

Таким образом, при использовании волоконно-оптических сенсоров удалось построить автономную систему мониторинга состояния СХОЯТ, обеспечивающую ведение непрерывного мониторинга распределения температурных и радиационных полей в пространстве хранилища, прогнозирование распределения температурных и радиационных полей в пространстве хранилища, фиксацию и оповещение оператора об отклонениях реального состояния от расчетных, а также накопление данных о состоянии хранилища на протяжении времени его эксплуатации, отвечающую требованиям ГОСТ Р МЭК 61559-1-2012. При этом выполненная работа была необходима для обоснования применения указанных научно-технических решений для построения промышленных систем мониторинга. Также в процессе работы подтверждено, что программно-аппаратный комплекс мониторинга состояния СХОЯТ является работоспособным решением и представляет собой стабильную, отказоустойчивую систему, не требующую постоянного обслуживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р МЭК 61559-1-2012. Аппаратура радиационной безопасности ядерных объектов. Централизованные системы радиационного контроля. Часть 1. Общие требования. – М. : Стандартинформ, 2014. – 28 с.
2. Буймистряк Г.Я. Принципы построения интеллектуальных волоконно-оптических датчиков // Фотон-Экспресс. – 2011. – № 6. – С. 33–34.
3. ГОСТ Р 8.673-2009. Датчики и системы измерительные интеллектуальные. – М. : Стандартинформ, 2010. – 13 с.
4. Буймистряк Г.Я. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий // ControlEngineering Россия. – 2013. – Т. 2. – С. 34–40.
5. Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers / L. Thevenaz, M. Nikles, A. Fellay et al. // Proc. SPIE 3330, Smart Structures and Materials 1998: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, 301 (July 21, 1998). 1998, pp. 301–314.
6. Shiach G., Nolan A. Advanced systems for in-well optical fibre sensing // Journal of Physics. 2007. Vol. 76. pp. 1–6.
7. Новиков С.Г., Черторийский А.А., Беринцев А.В. Опволоконная дозиметрическая система на базе сцин-

тиллиационного оптического волокна // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 4 – С. 1017–1023.

8. Опволоконная дозиметрическая система : пат. 138047 Российская Федерация / Новиков С.Г., Коробко Д.А., Беринцев А.В., Черторийский А.А. ; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный университет (RU). – № 2013147952/28 ; заявл. 28.10.2013 ; опубл. 27.02.2014.

9. Strain measurement in a concrete beam by use of the Brillouin-scattering-based distributed fiber sensor with single-mode fibers embedded in glass fiber reinforced polymer rods and bonded to steel reinforcing bars / X. Zeng, X. Bao, C.Y. Chhoa et al. // Applied optics. 2002. Vol. 41. pp. 5105–5114.

10. A novel fiber optic distributed temperature and strain sensor for building applications / A.V. Tregubov, V.V. Svetukhin, S.G. Novikov, A.V. Berintsev, V.V. Prikhodko // Results in Physics. 2016 Vol. 6, pp. 131–132.

11. Волоконно-оптический сенсор температуры и деформации для строительных конструкций : заявка на полезную модель / Трегубов А.В., Беринцев А.В., Приходько В.В., Новиков С.Г., Светухин В.В. – № 2016126903/20(0402079) ; заявл. 04.07.2016.

REFERENCES

1. GOST R MEK 61559-1-2012. Apparatura radiatsionnoi bezopasnosti iadernykh obektov. Tsentralizovannye sistemy radiatsionnogo kontrolya. Chast 1. Obshchie trebovaniya [State Standard 61559-1-2012. Radiation Protection Instrumentation in Nuclear Facilities. Generalized Systems for Continuous Monitoring of Radioactivity. Part 1: General Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 28 p.
2. Buimistriuk G.Ia. Printsipy postroeniia intellektualnykh volokonno-opticheskikh datchikov [Construction Principles of Intelligent Fiber Optic Sensors]. Foton-Ekspress [Foton-Ekspress], 2011, no. 6, pp. 33–34.
3. GOST R 8.673-2009. Datchiki i sistemy izmeritelnye intellektualnye [State Standard 8.673-2009. Intelligent Sensors and Intelligent Measuring Systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 13 p.
4. Buimistriuk G.Ia. Volokonno-opticheskie datchiki dlia ekstremalnykh uslovii [Fiber-Optical Sensors for the Use under Extreme Conditions]. ControlEngineering Rossiia [Control Engineering Russia], 2013, vol. 2, pp. 34–40.
5. Thevenaz L., Nikles M., Fellay A. et al. Truly Distributed Strain and Temperature Sensing Using Embedded Optical Fibers. Smart Structure and Materials Conference. San Diego USA, SPIE, vol. 3330, pp. 301–314.
6. Shiach G., Nolan A. Advanced Systems for In-well Optical Fiber Sensing. Journal of Physics, 2007, vol. 76, pp. 1–6.
7. Novikov S.G., Chertoriiskii A.A., Berintsev A.V. Optovolokonnaia dozimetricheskaiia sistema na baze stsintillatsionnogo opticheskogo volokna [Fiber Optic Dosimetry System Based on Scintillation Optical Fiber]. Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii

nauk [Proc. of the Samara Sci. Center of the Russian Academy of Sciences]. 2013, vol. 4, pp. 1017–1023.

8. Russian Federation Patent 138047. *Optovokonnaia dozimetriceskaia sistema* [Fiber Optic Dosimetry System]. Inventors: Novikov S.G., Korobko D.A., Berintsev A.V., Chertoriiskii A.A. Applicant and Proprietor: Ulyanovsk State University (RU). No. 2013147952/28. Date of Filing: October 28, 2013. Date of Publication: February 27, 2014.

9. Zeng X., Bao X., Chhoa C.Y. et al. Strain Measurement in a Concrete Beam by Use of the Brillouin-Scattering-Based Distributed Fiber Sensor with Single-Mode Fibers Embedded in Glass Fiber Reinforced Polymer Rods and Bonded to

Steel Reinforcing Bars. *Applied Optics*, 2002, vol. 41, pp. 5105–5114.

10. Tregubov A.V., Svetukhin V.V., Novikov S.G., Berintsev A.V., Prihodko V.V. A Novel Fiber Optic Distributed Temperature and Strain Sensor for Building Applications. *Results in Physics*, 2016, vol. 6, pp. 131–132.

11. Tregubov A.V., Berintsev A.V., Prihodko V.V., Novikov S.G., Svetukhin V.V. *Volokonno-opticheskii sensor temperatury i deformatsii dlia stroitelnykh konstruktsii*. Zaiavka na poleznuiu model no. 2016126903/20(0402079) [Fiber Optical Temperature and Deformation Sensors for Building Structures. Application for a Utility Model no. 2016126903/20(0402079)]. Date of Filing: July 04, 2016.