

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСКРОБЕЗОПАСНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРУПНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Е. А. Бадеева<sup>1</sup>, В. А. Бадеев<sup>2</sup>, Т. И. Мурашкина<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> badeeva\_elena@mail.ru, <sup>2</sup> vladbadeev4464@gmail.com, <sup>3</sup> timurashkina@mail.ru

**Аннотация.** Актуальность и цели. Мониторинг технического состояния ответственных и потенциально опасных крупных гражданских и специальных сооружений, таких как атомные электростанции, трубопроводы, мосты и многие другие, с целью определения их работоспособности и безопасной эксплуатации, предупреждения чрезвычайных ситуаций является важной научно-технической задачей. Система мониторинга технического состояния крупных объектов представляет собой совокупность технологий и инструментов, предназначенных для визуального и инструментального наблюдения за техническим состоянием конструкций для своевременного предупреждения негативных последствий путем выявления изменений и прогнозирования прочности и надежности элементов. Цель работы – доказать искробезопасность волоконно-оптической системы мониторинга параметров напряженно-деформированного состояния и положения ключевых элементов конструкции во время эксплуатации. Поставлена задача улучшения эксплуатационных характеристик данных систем в условиях воздействия внешних агрессивных влияющих факторов, а именно взрывоопасной среды. **Материалы и методы.** Основным подходом для достижения поставленной цели является энергетический расчет, доказывающий искробезопасность волоконно-оптической системы с учетом критериев искробезопасности, приведенных в ряде научно-технических источников. Для решения поставленной задачи предлагается волоконно-оптическая система мониторинга технического состояния крупных сооружений, включающая датчики температуры, давления, угла наклона и т.п., обеспечивающая оперативную оценку параметров. **Результаты.** Исследованы параметры искробезопасности волоконно-оптических датчиков различных физических величин, входящих в состав системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупных сооружений, эксплуатируемых в условиях возможной искровзрывопожароопасности. Доказано, что для обеспечения безопасной эксплуатации крупных гражданских сооружений максимальный допустимый уровень оптического сигнала составляет 10 мВт. Для этого предложено унифицированное схемно-конструктивное исполнение волоконно-оптических датчиков, у которых уровень оптических сигналов ниже данного значения. **Выводы.** Энергетический расчет оптической системы волоконно-оптических датчиков с открытым оптическим каналом, используемых для систем мониторинга технического состояния крупных сооружений, доказал их абсолютную искробезопасность, учитывая критерии искробезопасности среды измерения.

**Ключевые слова:** система мониторинга, техническое состояние, крупное сооружение, проектирование, волоконно-оптический датчик, искробезопасность, уровень оптического сигнала, энергетический расчет, открытый оптический канал

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00595, <https://rscf.ru/project/24-29-00595/>

**Для цитирования:** Бадеева Е. А., Бадеев В. А., Мурашкина Т. И. Проектирование искробезопасных волоконно-оптических датчиков для систем мониторинга технического состояния крупных сооружений // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 101–109. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-10

## DESIGNING INTRINSICALLY SAFE FIBER-OPTIC SENSORS FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF LARGE STRUCTURES

E.A. Badeeva<sup>1</sup>, V.A. Badeev<sup>2</sup>, T.I. Murashkina<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> badeeva\_elena@mail.ru, <sup>2</sup> vladbadeev4464@gmail.com, <sup>3</sup> timurashkina@mail.ru

**Abstract. Background.** Monitoring the technical condition of responsible and potentially dangerous large civil and special structures, such as nuclear power plants, pipelines, bridges, and many others, in order to determine their operability and safe operation, and to prevent emergencies is an important scientific and technical task. The monitoring

system for the technical condition of large facilities is a set of technologies and tools designed for visual and instrumental monitoring of the technical condition of structures in order to prevent negative consequences in a timely manner by identifying changes and predicting strength and the reliability of the elements. The purpose of the work is to prove the intrinsic safety of a fiber-optic monitoring system for the parameters of the stress-strain state and the position of key structural elements during operation. The task is to improve the operational characteristics of these systems under the influence of external aggressive influencing factors, namely an explosive environment. *Materials and methods.* The main approach to achieve this goal is an energy calculation that proves the intrinsic safety of a fiber-optic system, taking into account the intrinsic safety criteria given in a number of scientific and technical sources. To solve this problem, a fiber-optic monitoring system for the technical condition of large structures is proposed, including sensors for temperature, pressure, tilt angle, etc., providing an operational assessment of the parameters. *Results.* The intrinsic safety parameters of fiber-optic sensors of various physical quantities included in the monitoring system for the stress-strain state of large structures operating under conditions of possible spark and explosion hazard have been studied. It is proved that to ensure the safe operation of large civil structures, the maximum allowable optical signal level is 10 MW. For this purpose, a unified circuit design of fiber-optic sensors is proposed, in which the optical signal level is lower than this value. *Conclusions.* The energy calculation of the optical system of fiber-optic sensors with an open optical channel used for monitoring the technical condition of large structures has proved their absolute intrinsic safety, taking into account the intrinsic safety criteria of the measuring medium.

**Keywords:** monitoring system, technical condition, large structure, design, fiber-optic sensor, intrinsic safety, optical signal level, energy calculation, open optical channel

**Financing:** the research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-00595, <https://rscf.ru/project/24-29-00595>

**For citation:** Badeeva E.A., Badeev V.A., Murashkina T.I. Designing intrinsically safe fiber-optic sensors for monitoring the technical condition of large structures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):101–109. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-10

## Введение

Мониторинг технического состояния ответственных и потенциально опасных гражданских и специальных сооружений, таких как атомные электростанции, трубопроводы, мосты и другие, с целью определения их работоспособности и безопасной эксплуатации, обеспечивается постоянным автоматическим сбором и регистрацией данных об объекте с помощью специализированного измерительного дистанционного оборудования [1–7]<sup>1</sup>.

Создание безопасных условий эксплуатации и предупреждение аварийных ситуаций на крупных объектах гражданского и специального строительного назначения достигается посредством точной технической диагностики их текущего состояния. В ходе мониторинга контролируются различные физические величины (температура, угол наклона, деформация, давление и т.п.) и процессы как непосредственно в конструкциях объектов, так и в грунте [1–6]. Датчики физических величин систем мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) и положения ключевых элементов конструкции являются первоисточниками, сообщающими о возникших негативных изменениях конструкций сооружений.

Мониторинг НДС и положения ключевых элементов конструкции потенциально опасных крупных гражданских и специальных объектов можно проводить с помощью современных перспективных волоконно-оптических датчиков (ВОД). В последние годы все большее внимание уделяется волоконно-оптическим системам передачи данных и замене устаревших искропожароопасных электрических цепей и элементов. В состав волоконно-оптической системы мониторинга (ВОСМ) технического состояния крупных сооружений могут входить измерительные приборы – датчики давления, деформаций, температуры, линейных перемещений, угла наклона, а также система термометрии, анализаторы сигналов, волоконно-оптический мультиплексор и т.п. [7–9].

В число основных требований, предъявляемых к ВОСМ технического состояния крупных сооружений гражданского и стратегического назначения, входят показатели безотказной работы, приближенной к единице, прочности конструкции при долговечности составляющей 25...60 лет [9, 10]. Конструктивные особенности размещения оптического оборудования допускают его нахождение в зоне потенциально взрывоопасной или в непосредственной близи от нее, при этом генерируемое оборудованием излучение может распространяться в пределах взрывоопасной среды [9, 10]. А определенные типы излучения могут воспламенить взрывоопасную среду [9, 10]<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

<sup>2</sup> ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006. Взрывоопасные среды. Часть 28. Защита оборудования и передающих систем, использующих оптическое излучение (IEC 60079-28:2006, IDT).

При эксплуатации крупных сооружений присутствует риск воспламенения горючих смесей воздуха с окислителем, обусловленных наличием широкого спектра потенциальных источников инициирования горения, к которым относятся пламя, электрические разряды, термическое воздействие, расплавленные, ударные волны и т.п. Вышеуказанные процессы приводят к повышению температуры части горючей смеси, инициируя реакции горения в соседних слоях, приводя к распространению пламени по всему объему смеси [10].

Цель работы – доказать искробезопасность ВОСМ параметров НДС и положения ключевых элементов конструкции во время эксплуатации.

### **Материалы и методы**

Основным подходом для достижения поставленной цели является энергетический расчет, доказывающий искробезопасность ВОСМ с учетом критериев искробезопасности, приведенных в ряде научно-технических источников, отдельные положения которых приведены ниже. Согласно п. 3.14 ГОСТ 31937–2024, «мониторинг технического состояния уникальных зданий (сооружений) – это система наблюдения и контроля, проводимая по определенной программе для обеспечения безопасного функционирования уникальных зданий или сооружений за счет своевременного обнаружения на ранней стадии тенденции негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкций и грунтов оснований или крена, которые могут повлечь за собой переход объектов в ограниченно-работоспособное или в аварийное состояние, а также для получения необходимых данных для разработки мероприятий по устранению выявленных негативных явлений и процессов»<sup>1</sup>.

На основании п. 3.22 ГОСТ 31937–2024 «система мониторинга инженерно-технического обеспечения – это совокупность технических и программных средств, позволяющая осуществлять сбор и обработку информации о различных параметрах работы системы инженерно-технического обеспечения здания (сооружения) в целях контроля возникновения в ней дестабилизирующих факторов и передачи сообщений о возникновении или прогнозе аварийных ситуаций собственнику или иному лицу, определенному собственником»<sup>2</sup>.

В соответствии с п. 4.9 ГОСТ Р 22.1.12–2005 «системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений подлежат обязательной установке на потенциально опасных, особо опасных, технически сложных и уникальных объектах, таких как ядерно- и/или радиационно-опасные объекты (атомные электростанции, исследовательские реакторы, предприятия топливного цикла, хранилища временного и долговременного хранения ядерного топлива и радиоактивных отходов); объекты космической инфраструктуры; аэропорты и объекты их инфраструктуры; объекты инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования; магистральные газо-, нефте- и продуктопроводы и многие другие»<sup>3</sup>.

По ГОСТ 31610.11 искробезопасность – это «вид взрывозащиты, основанный на ограничении электрической энергии в оборудовании и соединительной проводке, которые подвергаются воздействию потенциально взрывоопасной среды, до значения ниже уровня, вызывающего воспламенение от искрения или нагрева»<sup>4</sup>.

Система мониторинга технического состояния крупных объектов – это совокупность технологий и инструментов, предназначенных для визуального и инструментального наблюдения за техническим состоянием конструкций с целью своевременного выявления изменений, оценки и прогноза прочности и надежности элементов, предупреждения и устранения последствий негативных процессов.

### **Результаты**

Согласно ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006, искробезопасное оптическое излучение – это «видимое или инфракрасное излучение, которое неспособно в нормальных условиях или указанных условиях неисправности приводить к образованию энергии, достаточной для воспламенения

<sup>1</sup> ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> ГОСТ Р 22.1.12–2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования.

<sup>4</sup> ГОСТ 31610.11–2014. (IEC 60079-11:2011). Взрывоопасные среды. Часть 11. Оборудование с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «i» (IEC 60079-11:2011, MOD).

указанной опасной»<sup>1</sup>. Поэтому подход к безопасности основывается на ограничении интенсивности пучка оптического излучения. Для этого разработаны схемно-конструктивные исполнения ВОД с открытым оптическим каналом (ООК) [7, 8, 11, 12], унифицированная структурная схема которых приведена на рис. 1 и в которых в качестве источников излучения используются инфракрасные светодиоды малой мощности и согласованные с ними по спектру фотодиоды, что обеспечивает возможность расположения их во взрывоопасной зоне.

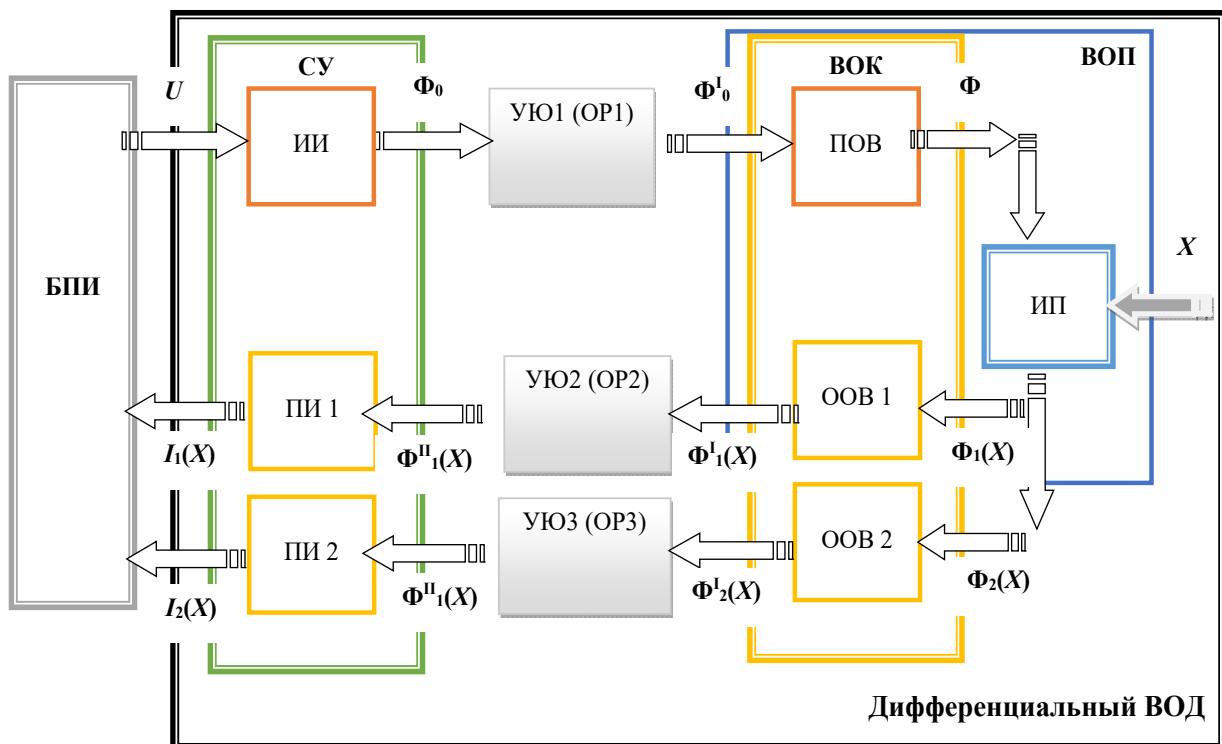


Рис. 1. Унифицированная структурная схема ВОД, в которых в качестве источников излучения используются инфракрасные светодиоды малой мощности и согласованные с ними по спектру фотодиоды:  
 БПИ – блок преобразования информации; ВОД – волоконно-оптический датчик;  
 СУ – согласующее устройство; ИИ – источник излучения, ПИ – приемник излучения;  
 УЮ – узел юстировки (ОР – оптический разъем); ВОП – волоконно-оптический измерительный преобразователь; ВОК – волоконно-оптический кабель (ПОВ – подводящее оптическое волокно, ООВ – отводящее оптическое волокно); ИП – измерительный преобразователь

Необходимым условием оценки искробезопасности оптического излучения является проведение энергетического расчета тракта волоконно-оптических элементов и средств измерений, которые входят в состав измерительной системы и располагаются в зоне, где может произойти воспламенение элементов. ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006 регламентирует четыре механизма воспламенения (рис. 2). В конструируемых ВОД используется инфракрасное излучение, и источником излучения выступают светодиоды малой мощности, поэтому с учетом предписаний ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006 два последних механизма воспламенения не будут рассматриваться и наиболее вероятным механизмом воспламенения может выступать первый. Обоснование соответствия системы мониторинга на основе ВОД нормативным требованиям взрывобезопасности являются критерии по уровню мощности оптического излучения, которые широко освещены в исследованиях [9–13]<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006. Взрывоопасные среды. Часть 28. Защита оборудования и передающих систем, использующих оптическое излучение (IEC 60079-28:2006, IDT).

<sup>2</sup> ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006. Взрывоопасные среды. Часть 28. Защита оборудования и передающих систем, использующих оптическое излучение (IEC 60079-28:2006, IDT) ; ГОСТ Р 22.1.12–2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования ; ГОСТ 31610.11–2014. (IEC 60079-11:2011). Взрывоопасные среды. Часть 11. Оборудование с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «i» (IEC 60079-11:2011, MOD).

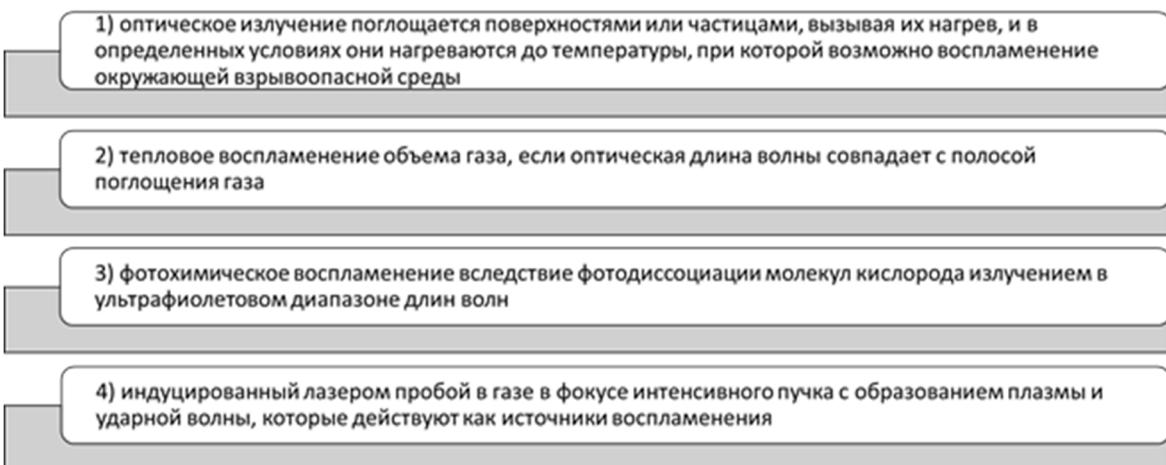


Рис. 2. Механизмы воспламенения

Для ряда газов и паров минимальная температура самовоспламенения локализуется в диапазоне от 100 до 550 °С, при этом взрывобезопасным уровнем мощности является уровень в пределах от 70 до 400 мВт (табл. 1) [14]. Таким образом, если оптическая мощность составляет от 70 мВт и выше, при распространении оптического излучения в потенциально взрывоопасной среде, то сохраняется риск воспламенения или взрыва<sup>1</sup>.

Таблица 1

Наименьшие температуры самовоспламенения некоторых газов в смеси с воздухом при атмосферном давлении и минимальная воспламеняющая мощность

Газ	Температура самовоспламенения, °С	Минимальная воспламеняющая мощность, мВт
Пропан	500	390
Водород	530	200
Диэтилэфир	160	120
Сероуглерод	100	70

В целях повышения безотказной надежной работы системы и точности производимых измерений, для предотвращения второго механизма воспламенения, описанного в ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006, рекомендуется применять светоизлучающие диоды, длина волны оптического излучения которых не соответствует длине волны поглощения газа, присутствующего в зоне измерений.

### Обсуждение

На участке системы мониторинга технического состояния объектов (рис. 3) на основе проектируемых ВОД с ООК, включающих волоконно-оптические и другие элементы для исключения проявления механизмов воспламенения с помощью энергетического расчета, оценена ее искробезопасность [7, 8, 11, 12, 15, 16]. Обеспечение энергетического баланса оптической мощности в тракте передачи информации между источником излучения и приемником является необходимым условием для функционирования искробезопасной системы мониторинга.

Оптический сигнал, двигаясь по элементам тракта системы по пути от источника излучения до приемника излучения, проходя по волоконно-оптическому кабелю, минует несколько узлов юстировки, при этом каждый элемент участка системы вносит определенный процент потерь потока света  $\eta_n$ . В непосредственной зоне измерения волоконно-оптического преобразователя также присутствуют некоторые потери светового потока. Произведена оценка возможного значения затухания потока, вносимых элементами тракта источников потерь системы мониторинга технического состояния (табл. 2). По оценке суммарные световые потери системы мониторинга будут составлять  $\eta_{\Sigma} = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 Q + \eta_6 Q + \eta_7 Q)N$ . Затухание во всем ВОК составляет 0,05–0,2 дБ/км

<sup>1</sup> ГОСТ 31610.28-2012/IEC 60079-28:2006. Взрывоопасные среды. Часть 28. Защита оборудования и передающих систем, использующих оптическое излучение (IEC 60079-28:2006, IDT).

и ввиду того, что длина оптических волокон в зоне измерения не более 1 м, поэтому можно допустить, что  $\eta_2 \approx \eta_6 \approx 0$ .

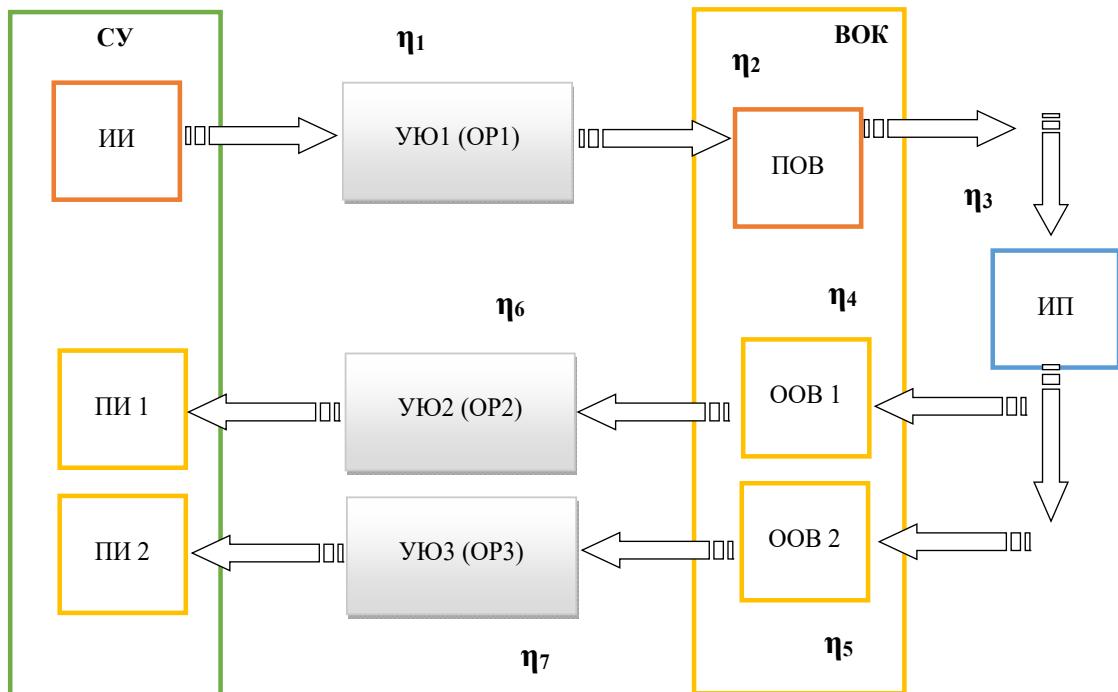


Рис. 3. Расчетная схема участка системы мониторинга с ВОД

Таблица 2

Суммарные световые потери системы мониторинга

Элемент тракта	Суммарное затухание, дБ при $N$ – количество повторений
Ввод излучения от светодиода в кабель, узел юстировки	$\eta_1 = (10...11)N$
Волоконно-оптический кабель, при длине $Q$ одиночного волокна до 100 м	$(\eta_2 + \eta_6 Q)N = ((0,15 - 0,06)2Q)N$
Ввод излучения от кабеля в преобразователь, узел юстировки	$\eta_3 = (3...6)N$
Зона измерения, волоконно-оптический преобразователь	$\eta_4 N = (5...7)N$
Ввод излучения от преобразователя в кабель, узел юстировки	$\eta_5 = (10...11)N$
Ввод излучения от кабеля в фотодиод, узел юстировки	$\eta_7 = (10...11)N$

Угол раскрытия луча светодиода ( $60\dots140^\circ$ ) значительно превосходит апертурный угол оптических волокон ( $12^\circ$ ), вследствие данного факта значительные потери светового потока происходят в элементе тракта при вводе излучения в ВОД и первом узле юстировки, т.е.  $\eta_1 = 10\dots11$  дБ [12]. В узлах юстировки присутствуют потери светового потока, которые составляют от 0,5...0,7 до 2 дБ [12]. Количество точек разветвления (объединения) равно  $N - 1$ , тогда суммарные потери в них составят  $\eta_3 = 2(N - 1)$  дБ,  $\eta_9 = (0,5 - 0,7)(N - 1)$  дБ. В соответствии с данными, приведенными в табл. 2: минимальные суммарные потери определяются как  $\eta_{\Sigma\min} \approx 10(N + 1)$  дБ, а максимальные суммарные потери определяются как  $\eta_{\Sigma\max} \approx 13(N + 1)$  дБ, тогда суммарные потери в оптических трактах: при  $N = 1$   $\eta_\Sigma \approx 20\dots26$  дБ; а при  $N = 3$   $\eta_\Sigma \approx 40\dots52$  дБ.

Диапазон чувствительности приемника излучения составляет от минус 38 до минус 56 дБ. В оптическое волокно необходимо вводить мощность светового потока не менее 0,05...0,1 мВт. Для надежной работы системы при чувствительности приемника излучения около 45 дБ необходимо обеспечить вводимую в волокно оптическую мощность минус 5 дБ. Чтобы компенсировать потери мощности в тракте источник излучения должен выдавать 0,63 мВт. На основе ранних исследований [10, 12] выбираются маломощные инфракрасные светодиоды и фотодиоды, согласованные с ними по оптическому спектру излучения (табл. 3).

Таблица 3

## Рекомендованные маломощные свето- и фотодиоды

Светодиод	Фотодиод
ЗЛ107Б	ФД256
ЗЛ107Б	КФДМ
ЗЛ107Б	ФД-20-32К
ЗЛ119	ФД19КК

Дополнительно необходимо отметить, что приведенные в табл. 2 элементы имеют повышенную надежность, подтвержденную их использованием на изделиях ракетно-космической техники.

ВОСМ технического состояния крупных сооружений соответствует требованиям искробезопасности. Поскольку, во-первых, максимальная мощность в зоне расположения электронных компонентов (10 мВт) значительно ниже критического значения (70 мВт). Во-вторых, мощность в зоне измерения существенно ниже допустимого значения (0,05...0,1 мВт << 70 мВт) [17, 18].

**Заключение**

В соответствии с установленными критериями искробезопасности сред, в которых производится измерение параметров крупных сооружений гражданского и специального назначения, в ходе исследования по результатам выполненного энергетического расчета оптической системы ВОД подтверждено, что обеспечена искробезопасность ВОСМ технического состояния сооружений при использовании ВОД с открытым оптическим каналом, при использовании в своем составе в качестве источников излучения ИК-светодиоды малой мощности.

**Список литературы**

- Горпинченко В. М., Егоров М. И. Мониторинг технического состояния конструкций социально значимых большепролетных сооружений Москвы // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 8. С. 16–19.
- Платова С. В. Новые технологии мониторинга оборудования АЭС // Атомная техника за рубежом. 2017. № 6. С. 3–14.
- Калижанова А. У., Караганова Г. Б., Козбакова А. Х. [и др.]. Анализ и исследование существующего опыта проектирования и использования различных современных волоконно-оптических датчиков для контроля состояния механических и строительных конструкций // Вестник КазАТК. 2021. № 3. С. 112–123.
- Берберова М. А., Чунеко В. В., Золотарев О. В. [и др.]. Разработка программы мониторинга (контроля) обеспечения безопасности атомных электростанций // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2020. № 2. С. 50–56.
- Бурсов Н. Г., Обухов А. Е., Димитриади Н. П. Мониторинг напряженно-деформированного состояния зданий и сооружений на стадии возведения // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / под ред. О. Н. Лешкевича [и др.]. Минск, 2014. Вып. 6. С. 45–58.
- Хидиров С. Т. Мониторинг напряженно-деформированного состояния оснований зданий и сооружений как фактор обеспечения безопасной эксплуатации // Инновации и инвестиции. 2020. № 12. С. 291–294.
- Бадеева Е. А., Бадеев В. А. Волоконно-оптические датчики для систем мониторинга напряженно-деформированного состояния крупных сооружений // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты : сб. тр. III Нац. науч.-практ. конф. (г. Москва, 27–28 мая 2024 г.). М. : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. профессора Н. Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА им. профессора Н. Е. Жуковского, 2024. С. 671–673.
- Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Бадеев В. А. Конструктивно-технологическое решение волоконно-оптического датчика для экспресс-анализа качества нефти и нефтепродуктов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 108–115. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-12
- Bothe H., Schenk S., Hawksworth S. [et al.]. The safe use of optics in potentially explosive atmospheres // International Conference on Explosion Safety in Hazardous Areas. 1999. № 469. doi: 10.1049/cp:19991066
- Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Бадеев В. А., Кукушкин А. Н. Искробезопасность волоконно-оптических датчиков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2025. Т. 2. С. 288–292.
- Бадеев В. А., Мурашкина Т. И. Микрорефрактометрический измерительный преобразователь для определения качества жидкостных сред // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 474–476.
- Бадеева Е. А., Гориш А. В., Мурашкина Т. И. [и др.]. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом : монография / под общ. ред. Т. И. Мурашкиной, А. В. Гориша. М. : МГУЛ, 2004. 246 с.

13. Задворнов С. А., Соколовский А. А. О пожаробезопасности волоконно-оптических гибридных измерительных систем // Датчики и системы. 2007. № 3. С. 11–14.
14. Илюшов Н. Я. Пожаровзрывобезопасность. Горение веществ и материалов : учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. 142 с.
15. Патент на изобретение RU 2795841 C1. Волоконно-оптический датчик температуры / Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Серебряков Д. И., Дудоров Е. А., Хасаншина Н. А., Бадеев В. А. № 2022101971 ; заявл. 28.01.2022 ; опубл. 12.05.2023, Бюл. № 14.
16. Патент на изобретение RU 2786690 C1. Волоконно-оптический датчик деформации / Бадеева Е. А., Бадеев В. А., Мурашкина Т. И., Серебряков Д. И., Толова А. А., Кукушкин А. Н. № 2022102897 ; заявл. 07.02.2022 ; опубл. 23.12.2022, Бюл. № 36.
17. Фокина Е. А., Трофимов А. А., Пономарев В. Н., Здобнов С. А. Проектирование имитационной модели датчика температуры при воздействии критических температур и синусоидальной вибрации // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 66–72.
18. Кубасов И. А., Лекарь Л. А. Проектирование системы автоматического мониторинга подвижных территориально разнесенных объектов // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 5–14.

## References

1. Gorpichenko V.M., Yegorov M.I. Monitoring of the technical condition of structures of socially significant large-span structures in Moscow. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo = Industrial and civil engineering*. 2006;(8):16–19. (In Russ.)
2. Platova S.V. New technologies for monitoring NPP equipment. *Atomnaya tekhnika za rubezhom = Nuclear technology abroad*. 2017;(6):3–14. (In Russ.)
3. Kalizhanova A.U., Kashaganova G.B., Kozbakova A.Kh. et al. Analysis and research of existing experience in designing and using various modern fiber-optic sensors to monitor the condition of mechanical and building structures. *Vestnik KazATK = Bulletin of KazATK*. 2021;(3):112–123. (In Russ.)
4. Berberova M.A., Chuyenko V.V., Zolotarev O.V. et al. Development of a program for monitoring (control) safety of nuclear power plants. *Avtomatizatsiya i modelirovaniye v proyektirovaniii i upravlenii = Automation and modeling in design and management*. 2020;(2):50–56. (In Russ.)
5. Bursov N.G., Obukhov A.E., Dimitriadi N.P. Monitoring of the stress-strain state of buildings and structures at the construction stage. *Problemy sovremennoego betona i zhelezobetona: sb. nauch. tr. = Problems of modern concrete and reinforced concrete : collection of scientific papers*. Minsk, 2014;(6):45–58. (In Russ.)
6. Khidirov S.T. Monitoring of the stress-strain state of the foundations of buildings and structures as a factor in ensuring safe operation. *Innovatsii i investitsii = Innovations and investments*. 2020;(12):291–294. (In Russ.)
7. Badeyeva E.A., Badeyev V.A. Fiber-optic sensors for monitoring systems of the stress-strain state of large structures. *Fundamentalnyye, poiskovyye, prikladnyye issledovaniya i innovatsionnyye proyekty: sb. tr. III Nats. nauch.-prakt. konf. (g. Moskva, 27–28 maya 2024 g.) = Fundamental, exploratory, applied research and innovative projects : proceedings of the III National Scientific and Practical Conference (Moscow, May 27-28, 2024)*. Moscow: Assotsiatsiya vypusknikov i sotrudnikov VVIA im. professora N.E. Zhukovskogo sodeystviya sokhraneniyu istori-cheskogo i nauchnogo naslediya VVIA im. professora N.E. Zhukovskogo, 2024:671–673. (In Russ.)
8. Murashkina T.I., Badeyeva E.A., Badeyev V.A. Constructive and technological solution of a fiber-optic sensor for rapid quality analysis of oil and petroleum products. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):108–115. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-12
9. Bothe H., Schenk S., Hawksworth S. et al. The safe use of optics in potentially explosive atmospheres. *International Conference on Explosion Safety in Hazardous Areas*. 1999;(469). doi: 10.1049/cp:19991066
10. Badeyeva E.A., Murashkina T.I., Badeyev V.A., Kukushkin A.N. Intrinsic safety of fiber-optic sensors. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2025;2:288–292. (In Russ.)
11. Badeyev V.A., Murashkina T.I. Microrefractometric measuring transducer for determining the quality of liquid media. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:474–476. (In Russ.)
12. Badeyeva E.A., Gorish A.V., Murashkina T.I. et al. *Teoreticheskiye osnovy proyektirovaniya amplitudnykh volokonno-opticheskikh datchikov davleniya s otkrytym opticheskim kanalom: monografiya = Theoretical foundations of designing amplitude fiber-optic pressure sensors with an open optical channel : monograph*. Moscow: MGUL, 2004:246. (In Russ.)
13. Zadvornov S.A., Sokolovskiy A.A. On fire safety of fiber-optic hybrid measuring systems. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2007;(3):11–14. (In Russ.)
14. Ilyushov N.Ya. *Pozharovzryvobezopasnost. Goreniiye veshchestv i materialov: ucheb. posobiye = Fire and explosion safety. Gorenje substances and materials : a textbook*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2017:142. (In Russ.)

15. Patent na izobreteniye RU 2795841 C1. Fiber-optic temperature sensor. Murashkina T.I., Badeyeva E.A., Serebryakov D.I., Dudorov E.A., Khasanshina N.A., Badeyev V.A. № 2022101971; appl. 28.01.2022; publ. 12.05.2023, Bull. № 14. (In Russ.)
16. Patent na izobreteniye RU 2786690 C1. Fiber-optic strain sensor. Badeyeva E.A., Badeyev V.A., Murashkina T.I., Serebryakov D.I., Tolova A.A., Kukushkin A.N. № 2022102897; appl. 07.02.2022; publ. 23.12.2022, Bull. № 36. (In Russ.)
17. Fokina E.A., Trofimov A.A., Ponomarev V.N., Zdobnov S.A. Designing a simulation model of a temperature sensor under the influence of critical temperatures and sinusoidal vibration. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(3):66–72. (In Russ.)
18. Kubasov I.A., Lekar L.A. Designing an automatic monitoring system for mobile geographically dispersed objects. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):5–14. (In Russ.)

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Елена Александровна Бадеева**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: badeeva\_elena@mail.ru

**Elena A. Badeeva**

Doctor of technical sciences, associate professor, professor of the sub-department of radio engineering and radio electronic systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Владислав Александрович Бадеев**

лаборант-исследователь, научно-технический центр «Нанотехнологии волоконно-оптических систем», Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: vladbadeev4464@gmail.com

**Vladislav A. Badeev**

Research assistant, Nanotechnology of Fiber-Optic Systems Scientific and Technical Center, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Татьяна Ивановна Мурашкина**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: timurashkina.pgu@mail.ru

**Tatyana I. Murashkina**

Doctor of technical sciences, professor, professor of the sub-department of instrument making, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 07.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 30.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 19.05.2025**