

## Техническое обеспечение экологической безопасности территориально распределенных систем хранения опасных веществ

*В.В. Куревин, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев*

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ*

**Аннотация:** С позиций обеспечения экологической безопасности рассматриваются вопросы анализа и синтеза территориально распределенных систем хранения опасных веществ. Основное внимание в статье уделено техническому обеспечению экологической безопасности указанных систем, определяющему слой системы инструментального контроля (СИК) в каналах мониторинга экологической ситуации, параметров хранения опасных веществ и охраны периметров территории хранения. Функционирование СИК опирается на применение волоконно-оптических датчиков на основе волоконных решеток Брэгга в каждом из указанных каналов и методов их полигармонического зондирования. Определены принципы совместного измерения температуры и давления, как основных параметров хранения, оптико-абсорбционного измерения концентрации газов с использованием дистанционного многокомпонентного волоконно-оптического ИК-анализатора для контроля экологической ситуации. Приведены сведения о построении датчиков для систем охраны периметра территорий хранения. Показано, что предложенная структура СИК может быть использована при проектировании различных систем хранения опасных веществ, и направлена на решение вопросов обеспечения экологической безопасности при их эксплуатации.

**Ключевые слова:** территориально распределенные системы хранения, опасные вещества, обеспечение экологической безопасности, техническое обеспечение, волоконные решетки Брэгга, измерение температуры и давления, многокомпонентный волоконно-оптический ИК-анализатор газов.

### Введение

Экологический мониторинг представляет собой систему долгосрочных и оперативных наблюдений, контроля, оценки и прогноза состояния как окружающей природной среды в районе размещения объекта, так и состояния объектов хранения. Основной задачей инструментального контроля является обнаружение и регистрация источников экологических нагрузок, находящихся в зоне хранения. Кроме того, средства экологического мониторинга позволяют косвенно контролировать состояние технологической дисциплины на объектах, исправность технических систем и природоохранных устройств, поскольку все нарушения в режимах их эксплуатации будут сказываться на окружающей природной среде [1-3].

---

Эффективность инструментального экологического мониторинга может быть повышена путем оснащения объектов современными средствами, позволяющими обнаруживать и измерять широкий спектр загрязнений, выбора оптимальных маршрутов и мест наблюдений, отбора проб объектов окружающей среды, своевременной оценкой экологической обстановки в позиционном районе объекта и доведением её результатов до соответствующих начальников.

В настоящей работе рассмотрено техническое обеспечение системы инструментального контроля (СИК) автоматизированного рабочего места (АРМ) интегрированной системы обеспечения экологической безопасности (ИСОЭБ) территориально распределенных систем хранения опасных веществ, построенные на основе современных волоконно-оптических технологий [4-8].

### **Требования к системе инструментального**

#### **экологического мониторинга при хранении опасных веществ**

Для решения поставленных задач система инструментального экологического мониторинга при хранении опасных веществ должна:

- охватывать все основные объекты;
- обнаруживать и измерять интенсивность всех видов отрицательных экологических факторов и факторов, связанных с повседневной деятельностью объектов и чрезвычайными ситуациями;
- иметь минимальное время доведения информации о возникновении экологических нагрузок и обеспечивать своевременное принятие решения руководителем службы на предотвращение экологического ущерба.

Погрешность измерения параметров качества окружающей природной среды и параметров хранения определяется необходимостью распознавания слабых, сильных и чрезвычайно сильных экологически неблагоприятных и

---

технологических факторов и не должна превышать одного предельно допустимого значения по каждому виду воздействия.

Основой системы мониторинга являются экологические посты (стационарные и подвижные) наблюдения; АРМ, сопряженные в локальные сети и не режимные каналы управления, которые обрабатывают информацию от постов; линии связи и управления.

Технические средства экологического мониторинга весьма разнообразны. В их число входят контактные и дистанционные средства измерений. Контактные средства экологического мониторинга предназначены для обнаружения одиночных источников экологической опасности и локальных загрязнений окружающей природной среды. Они предполагают постоянный контроль параметров хранения на складах. Дистанционные средства реализуют такие способы мониторинга, как наблюдение за позиционным районом объекта в целом или отдельной его части, они позволяют достоверно обнаруживать факт появления и масштабы отрицательных экологических нагрузок. Активные спектрально-оптические методы дистанционного мониторинга атмосферы основаны на использовании процессов поглощения, рассеяния и флуоресценции, возникающих при прохождении излучения лазера через атмосферу.

Объединение дистанционных и контактных средств экологического мониторинга в единую систему позволяет повысить оперативность получения и достоверность информации, необходимой для оценки экологической безопасности на объекте хранения. Следует отметить, что все методы и дистанционные, и контактные должны быть реализованы на волоконно-оптических датчиках (ВОД), в том числе на волоконных решетках Брэгга (ВРБ) [9-12]. При хранении опасных веществ недопустимо применение в составе технического обеспечения АРМ средств, включая датчики, способных вызвать воспламенение в зоне хранения [4].

---

## Структурная схема СИК АРМ ИСОЭБ на основе волоконно-оптических технологий

СИК АРМ ИСОЭБ обеспечивает возможность подключения к персональному компьютеру эколога системы датчиков инструментального контроля экологических параметров, параметров обслуживания хранимых объектов и параметров охраны периметра. Всего в системе может быть организовано  $K$  каналов экологических датчиков,  $L$  каналов датчиков охраны периметра и  $N$  каналов контроля обслуживания хранимых объектов.

Интегрированная система обеспечения экологической безопасности позволяет автоматически выводить дежурному следующую информацию:

- а) дата и время опроса датчика;
- б) место датчика на графическом плане объекта;
- в) техническое средство охраны (датчик), зафиксировавшее нарушение;
- г) тип сигнала (тревога, неисправность и т.д.);
- д) видео изображение с телекамеры в зоне нарушения.

Структурная схема СИК АРМ ИСОЭБ представлена на рис. 1.

Программно-вычислительный уровень СИК представлен внешним модулем измерительного контроля. Программное обеспечение модуля обеспечивает сбор и обработку данных инструментального контроля, и управление процессом измерений. Физический уровень СИК представлен датчиками обслуживания объектов хранения (канал  $L$ ), датчиками контроля экологической обстановки (канал  $K$ ), датчиками охраны периметра (канал  $M$ ). Количество датчиков определяется требованиями системы и ограничена, с одной стороны, возможностями технологии волоконно-оптических систем со спектральным уплотнением (ВОСП-СП) по количеству каналов, а с другой, способностью системы с высокой точностью отслеживать температурные дрейфы спектральных характеристик оптических передатчиков, датчиков, фильтров, например, их центральной частоты.

---

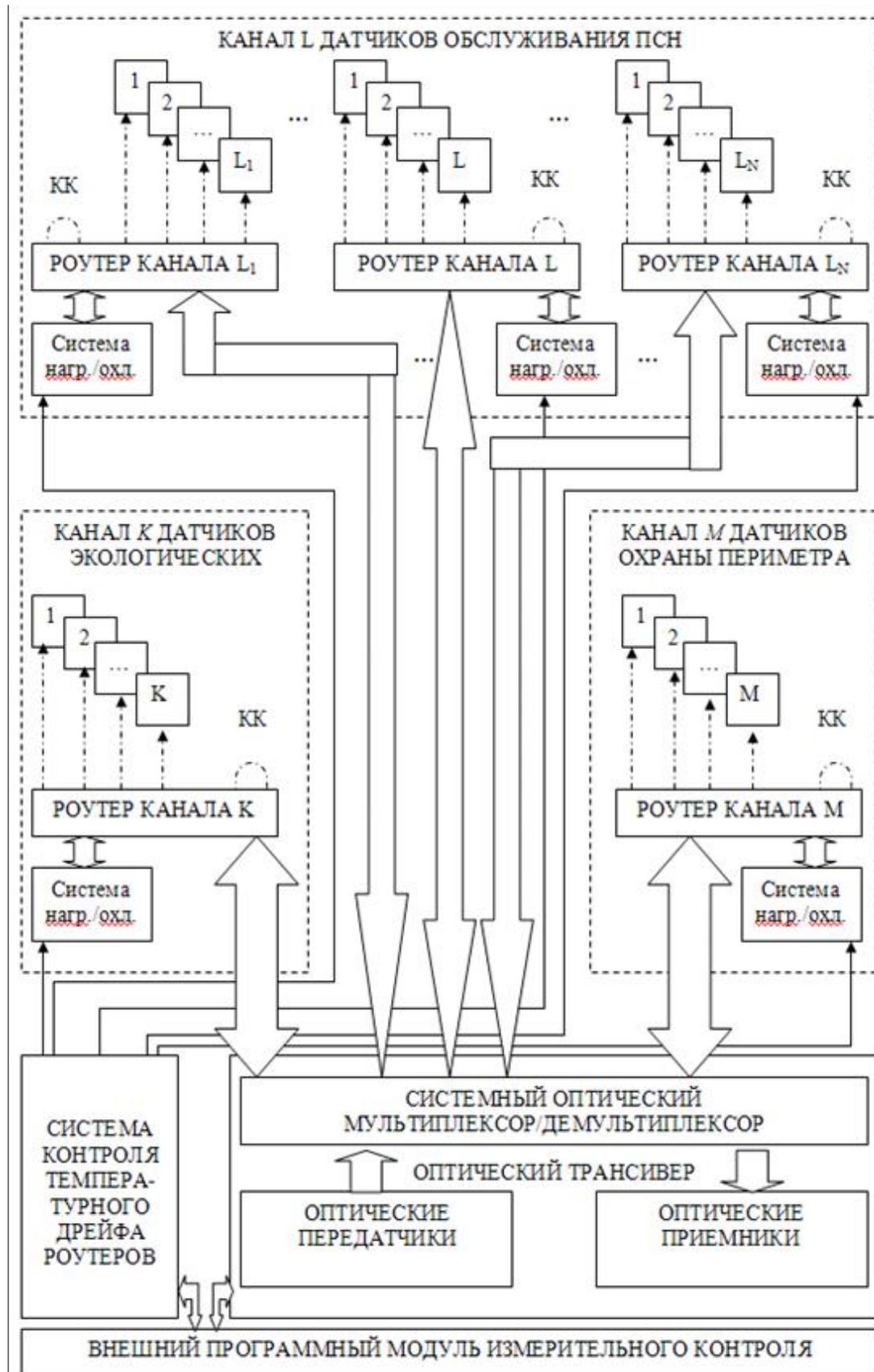


Рис. 1 – Структурная схема СИК АРМ ИСОЭБ

Транспортный уровень СИК представлен оптическими волокнами с построенными внутри них оптическими каналами связи ВОСП-СП, которые обеспечивают связь между оптическими передатчиками и приемниками с датчиками через системный оптический мультиплексор/демультиплексор и роутеры, также содержащие избирательные элементы ввода/вывода каналов. Указанные каналы могут быть построены по симплексным и/или дуплексным схемам. Характер зондирующих сигналов в каждом канале определяется типом физического поля, измеряемого конкретным ВОД.

Особое место в структуре СИК занимает система контроля температурного дрейфа, которая содержит в своем составе контрольные каналы для каждого из роутеров, расположенные в волокнах транспортного уровня, петлевые участки волокна (или зеркала) обеспечивающие возврат сигналов зондирования роутеров на соответствующие оптические приемники. Различие между зондирующим и принятым сигналом, проанализированное в программном модуле, в виде сигналов управления системы контроля температурного дрейфа роутеров поступает по электрическим или оптическим каналам на системы их нагрева/охлаждения. Отработанные сигналы рассогласования позволяют поддерживать центральную частоту избирательных цепей роутеров, настроенной в соответствии с начальной калибровкой системы. Как указывалось, это позволяет значительно увеличить общее число каналов системы.

Технологии измерения температуры, давления, влажности, требования к которым представлены в [4], с помощью ВОД могут быть реализованы с помощью полигармонических методов их зондирования [13-16], которые выгодно отличаются от методов широкополосного оптического спектрального анализа или методов со сканированием. Задачи газового анализа также могут быть решены с помощью волоконно-оптических технологий [17-18]. Рассмотрим их подробнее.

---

## Измерение температуры и давления

Физические свойства ВРБ позволяют использовать их в качестве ВОД температуры или деформации (давления). При прохождении лазерного излучения с непрерывным спектром через оптическое волокно с ВРБ часть его отражается на длине волны, соответствующей центральной длине волны ВРБ. Температурное и механическое воздействие на ВРБ (растяжение или сжатие) приводит к изменению интервала между узлами ВРБ, соответственно, изменяется длина волны отраженного от ВРБ излучения. По изменению длины волны отраженного излучения можно судить о величине температуры, направлению и величине деформации.

Величина периода ВРБ (или центральная длина волны отраженного сигнала) в невозмущенном состоянии является главной характеристикой, которая задается в момент создания ВРБ. Абсолютная величина центральной длины волны не имеет большого значения, важным является лишь изменение центральной длины волны относительно невозмущенного состояния. Таким образом, в системе могут быть использованы сразу несколько датчиков на основе ВРБ. Главным требованием к ним будет непересекающиеся диапазоны изменения центральных длин волн отраженных сигналов во всем диапазоне.

Использование совмещенных датчиков температуры и давления оправдано [19-20]. Причиной тому является тот факт, что внешняя температура датчика давления оказывает влияние на смещение центральной длины волны самого датчика давления. Для компенсации температурного ухода центральной длины волны датчика давления, необходимо рассматривать совмещенную систему, состоящую из пары «датчик давления и датчик температуры». В паре «датчик давления и датчик температуры» предполагается, что внешняя температура возле обоих датчиков одинакова.

---

Датчик температуры в этой паре является независимым, а показания датчика давления корректируются с учетом показаний температуры.

После создания конструкции совмещенного датчика температуры и давления, неизбежно появляется задача калибровки совмещенного датчика температуры и давления с тем, чтобы он отражал реальные значения температуры и давления, а не только показывал изменение центральных длин волн волоконно-оптических решеток Брэгга, входящих в их конструкцию. Калибровка всех датчиков температуры и давления производится на испытательном стенде. При калибровке используются сертифицированные датчик давления и термостатированная камера. Изменяя параметры температуры в температурной камере и параметры давления на датчике давления, на калибровочном стенде формируется набор контрольных измерений, которые образуют набор калибровочных данных  $\{\Delta\lambda_{T_i}, \Delta\lambda_{P_i}, T_i, P_i\}$ : смещение центральной длины волны для датчика температуры обозначено  $\Delta\lambda_{T_i}$ ; смещение центральной длины волны для датчика давления обозначено  $\Delta\lambda_{P_i}$ ; контрольное значение температуры  $T_i$ ; а  $P_i$  – контрольное значение давления. Параметр  $i$  – соответствует каждому контрольному измерению. Количество контрольных измерений задается исследователем, измерения проводятся для всех значений температуры и давления с заданным шагом измерений  $\Delta T_i$  и  $\Delta P_i$ , количество измерений равно  $N$ . Чем подробнее будут проведены калибровочные измерения, тем точнее мы сможем получить зависимости температуры и давления от смещения центральной длины волн датчиков температуры и давления. В результате получаем зависимость давления от смещения центральных длин волн датчиков температуры и давления  $(\Delta\lambda_T, \Delta\lambda_P)$  в виде:

$$P = F(\Delta\lambda_T, \Delta\lambda_P, c_{m,n}) = \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^3 c_{m,n} \cdot (\Delta\lambda_T)^m \cdot (\Delta\lambda_P)^n. \quad (1)$$

Раскроем двойную сумму в соотношении (1):

$$P = \begin{cases} c_{2,3} \cdot \Delta\lambda_T^2 \cdot \Delta\lambda_P^3 + c_{2,2} \cdot \Delta\lambda_T^2 \cdot \Delta\lambda_P^2 + c_{2,1} \cdot \Delta\lambda_T^2 \cdot \Delta\lambda_P + c_{2,0} \cdot \Delta\lambda_T^2 + \\ c_{1,3} \cdot \Delta\lambda_T \cdot \Delta\lambda_P^3 + c_{1,2} \cdot \Delta\lambda_T \cdot \Delta\lambda_P^2 + c_{1,1} \cdot \Delta\lambda_T \cdot \Delta\lambda_P + c_{1,0} \cdot \Delta\lambda_T + \\ c_{0,3} \cdot \Delta\lambda_P^3 + c_{0,2} \cdot \Delta\lambda_P^2 + c_{0,1} \cdot \Delta\lambda_P + c_{0,0} \end{cases} . \quad (2)$$

Дальнейшие преобразования имеют громоздкий характер и для упрощения их записи в соотношении (2), сделаем замену переменных  $x = \Delta\lambda_T$ ,  $y = \Delta\lambda_P$ . В результате, получим частный случай полинома пятой степени относительно  $x$  и  $y$  для аппроксимации давления через смещения центральных длин волн датчиков температуры и давления ( $x = \Delta\lambda_T$ ,  $y = \Delta\lambda_P$ ):

$$P = F(x, y, b_k) = \begin{cases} c_{2,3} \cdot x^2 \cdot y^3 + c_{2,2} \cdot x^2 \cdot y^2 + c_{2,1} \cdot x^2 \cdot y^1 + c_{2,0} \cdot x^2 + \\ c_{1,3} \cdot x \cdot y^3 + c_{1,2} \cdot x \cdot y^2 + c_{1,1} \cdot x \cdot y^1 + c_{1,0} \cdot x + \\ c_{0,3} \cdot y^3 + c_{0,2} \cdot y^2 + c_{0,1} \cdot y + c_{0,0} \end{cases} . \quad (3)$$

В соотношении (3)  $x$  и  $y$  представляют собой смещения центральных длин волн датчиков температуры и давления, а коэффициенты  $\{c_{m,n}\}$ ,  $m = \{2, 1, 0\}$ ,  $n = \{3, 2, 1, 0\}$  находятся из условий калибровки датчика давления. Калибровка датчика давления заключается в нахождении неизвестных коэффициентов аппроксимирующей поверхности (3) из условий минимальных отклонений контрольных измерений для совмещенных датчиков давления и температуры от нее.

Для нахождения коэффициентов используем метод наименьших квадратов, так, чтобы поверхность (3) максимально точно описывала поведение датчика давления при различных наборах температуры и давления. Метод наименьших квадратов состоит в том, чтобы найти такие коэффициенты  $\{c_{m,n}\}$ ,  $m = \{2, 1, 0\}$ ,  $n = \{3, 2, 1, 0\}$ , для которых справедливо

было бы условие минимума суммы квадратов отклонений контрольных измерений от аппроксимирующей поверхности (3):

$$\Phi = \sum_{i=1}^N (P - P_i)^2 = \sum_{i=1}^N (F(x, y, c_{m,n}) - P_i)^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

В соотношении (4) суммирование  $m, n$  не ведется. Значения смещения центральных длин волн для датчиков давления и температуры и величины давления, являются известными.

В исходных данных известные смещения длин волн и давление определяется исходным набором контрольных измерений  $\{\Delta\lambda_{T_i}, \Delta\lambda_{P_i}, T_i, P_i\}, i = \overline{1, N}$ , или в терминах замены переменных  $\{x_i, y_i, T_i, P_i\}, i = \overline{1, N}$ .

В ходе натурального эксперимента была апробирована модель аппроксимации температуры и давления соотношениями (1) и (5).

Зависимость температуры от смещения центральной длины волны датчика температуры имеет квадратичный характер, такой как приведенный ниже:

$$T = f(\Delta\lambda_T, c_2, c_1, c_0) = c_2 \cdot (\Delta\lambda^T)^2 + c_1 \cdot \Delta\lambda^T + c_0. \quad (5)$$

Калибровочные данные  $\{\Delta\lambda_{T_i}, T_i\}$  получаем при калибровке датчика температуры на калибровочном стенде.

Контрольные измерения были проведены для совмещенного датчика температуры и давления Smart Fiber. Диапазон изменения температуры от 40°C до 150°C, диапазон изменения давления от 100 атм до 600 атм. Центральная длина волны датчика температуры  $\Delta\lambda_T^0 = 1547.8765$  нм, центральная длина волны датчика давления  $\Delta\lambda_P^0 = 1539.2242$  нм.

Исходный набор калибровочных данных приведен в таблице №1.

Таблица №1

## Исходный набор калибровочных данных

Температура	Давление	Смещение ЦДВ датчика температуры	Смещение ЦДВ датчика давления	ЦДВ датчика температуры	ЦДВ датчика давления
$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{атм}$	$\Delta\lambda_T, \text{нм}$	$\Delta\lambda_P, \text{нм}$	$\lambda_T, \text{нм}$	$\lambda_P, \text{нм}$
39.90	100	-1.0943	-1.2156	1555.618	1532.998
39.90	200	-1.0953	-1.3486	1555.619	1533.131
39.90	300	-1.0963	-1.4846	1555.620	1533.267
39.90	400	-1.0963	-1.6236	1555.620	1533.406
39.90	500	-1.0973	-1.7656	1555.621	1533.548
39.90	600	-1.0983	-1.9056	1555.622	1533.688
95.00	100	-2.5293	-2.6256	1557.053	1534.408
95.00	200	-2.5303	-2.7636	1557.054	1534.546
95.00	300	-2.5303	-2.9016	1557.054	1534.684
95.00	400	-2.5323	-3.0406	1557.056	1534.823
95.00	500	-2.5323	-3.1866	1557.056	1534.969
95.00	600	-2.5333	-3.3296	1557.057	1535.112
150.0	100	-4.0573	-4.1376	1558.581	1535.920
150.0	200	-4.0583	-4.2776	1558.582	1536.060
150.0	300	-4.0593	-4.4176	1558.583	1536.200
150.0	400	-4.0603	-4.5616	1558.584	1536.344
150.0	500	-4.0613	-4.7106	1558.585	1536.493
150.0	600	-4.0623	-4.8556	1558.586	1536.638

Для приведенного набора данных коэффициенты уравнения аппроксимации датчика температуры равны  $c_2 = -0.288382$ ,  $c_1 = -4.455588$ ,  $c_0 = -41.352543$ . Коэффициенты уравнения для аппроксимации датчика давления равны:  $c_{23} = -28.52708$ ,  $c_{22} = -221.08491$ ,  $c_{21} = -715.40515$ ,  $c_{20} = -935.25047$ ,  $c_{13} = -159.07346$ ,  $c_{12} = -1084.51812$ ,  $c_{11} = -3030.09325$ ,  $c_{10} = -2850.56499$ ,  $c_{03} = -212.68662$ ,  $c_{02} = -1301.19359$ ,  $c_{01} = -3829.49271$ ,  $c_{00} = -3135.77322$ .

Полученные коэффициенты были подставлены в исходные уравнения и вычисленные значения температуры и давления были сравнены с контрольными значениями температуры и давления (таблица №2).

Таблица №2

Сравнение данных контрольных измерений  
и аппроксимированных величин температуры и давления.

Контрольная температура	Аппроксимация температуры	Погрешность аппроксимации температуры	Контрольное давление	Аппроксимация давления	Погрешность аппроксимации давления
T, °C	P, атм	T, °C	P, атм	P, атм	P, атм
39.90	39.82092	+ 0.079076	100	99.89991	+ 0.100092
39.90	39.86049	+ 0.039507	200	200.3078	- 0.307760
39.90	39.90006	- 0.000060	300	299.8017	+ 0.198299
39.90	39.90006	- 0.000060	400	399.7317	+ 0.268345
39.90	39.93963	- 0.039630	500	500.4100	- 0.410040
39.90	39.97919	- 0.079190	600	599.8484	+ 0.151595
95.00	94.92559	+ 0.074413	100	99.80889	+ 0.191106
95.00	94.96282	+ 0.037183	200	200.3448	- 0.344760
95.00	94.96282	+ 0.037183	300	300.4970	- 0.497000
95.00	95.03727	- 0.037270	400	398.3919	+ 1.608120
95.00	95.03727	- 0.037270	500	501.3390	- 1.338990
95.00	95.07450	- 0.074500	600	599.6185	+ 0.381493
150.0	149.9131	+ 0.086950	100	99.71683	+ 0.283168
150.0	149.9478	+ 0.052209	200	200.8457	- 0.845750
150.0	149.9825	+ 0.017470	300	299.5441	+ 0.455896
150.0	150.0173	- 0.017270	400	399.1967	+ 0.803286
150.0	150.0520	- 0.052000	500	501.0427	- 1.042730
150.0	150.0867	- 0.086740	600	599.6544	+ 0.345625

Максимальная погрешность аппроксимации температуры составила  $0.086950^{\circ}\text{C}$ , среднее значение погрешности аппроксимации температуры не превысило  $0.047110^{\circ}\text{C}$ , что составляет 0.08% и 0.03% от полной шкалы измерения температуры, соответственно. Максимальная погрешность аппроксимации давления составила 1.608120 атм, среднее значение погрешности аппроксимации давления не превысило 0.531892 атм, что составляет 0.26% и 0.08% от полной шкалы измерения давления, соответственно. Точность аппроксимации и ее относительная погрешность позволяют считать, что предложенный метод успешно применим для калибровки как совмещенных датчиков, так и датчиков температуры.

Специализированный датчик давления, аналогичный контрольному, представлен на рис. 2.



Рис. 2 – Конструкция специализированного датчика давления

Измерительные характеристики датчика, полученные с учетом калибровочных процедур, указанных выше, представлены на рис. 3.

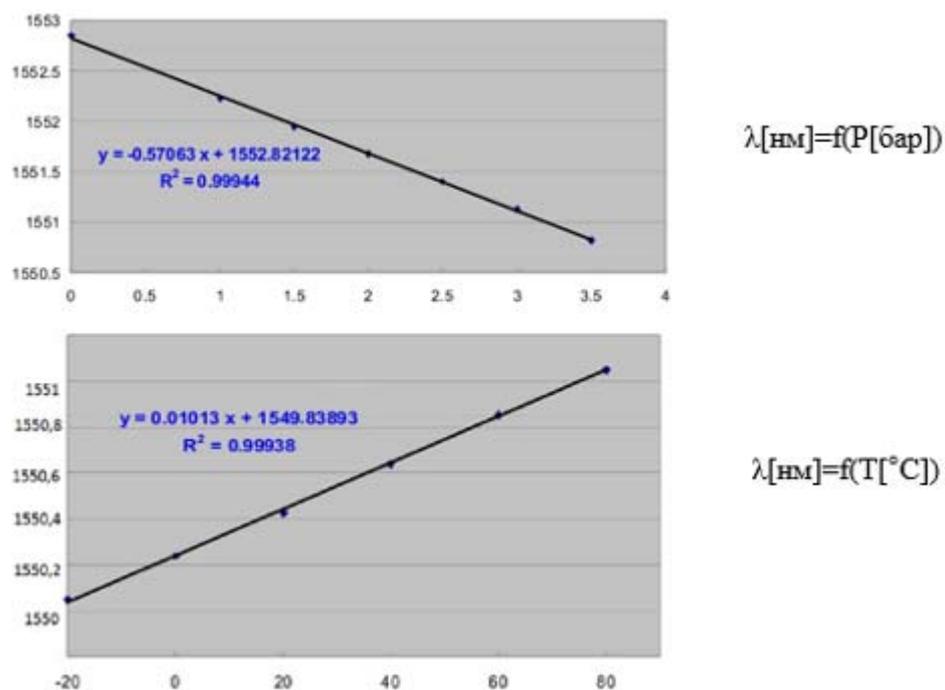


Рис. 3 – Измерительные характеристики датчика

Методы калибровки и уточнения положения центральной длины волны подвергались проверке на повторяемость результатов измерений. В ходе экспериментов были сделаны более трех тысяч измерений центральной длины волны при фиксированной температуре. Максимальное отклонение по всем измерениям не превышало 1,5 пм от математического ожидания.

### **Многопараметрический волоконно-оптический ИК-анализатор газов**

В связи с ужесточением экологических требований на содержание вредных и загрязняющих веществ задача высокоточного определения их концентрация в режиме реального времени крайне актуальна. Кроме того, в условиях хранения появление в воздушной смеси дополнительных газов может свидетельствовать об утечках хранимых веществ, или начале химических реакции, или горения, что способно вызвать существенные экологические последствия.

Существующие газоанализаторы, как правило, контактные и используют электрохимические сенсоры для анализа концентраций оксидов азота, углекислого газа, метана, пропана и др. газов. Существенным недостатком датчиков данного типа является низкий срок службы (1 год), вызванный «отравлением» чувствительного элемента. Использование оптико-абсорбционного метода позволяет увеличить срок службы на порядок и достичь более высоких характеристик чувствительности.

В работах [21-23] представлен широкий спектр газоанализаторов, построенных на различных принципах оптико-абсорбционной ИК-спектроскопии (TDLAS, CEAS, DOAS). Общим недостатком данных работ является отсутствие рекомендаций по выбору оптической длины кюветы, которая позволит обеспечить необходимую чувствительность, так же не учтены эффекты температурного ослабления поглощения, которые имеют место при нагреве газов. Лишь в некоторых работах приведены данные по

---

чувствительности при использовании одноходовой оптической кюветы. Так в работе [23] при  $L=21$  см получена чувствительность 2,7-5 ppm для NO.

Таким образом, основным направлением наших исследований является разработка структуры и математической модели оптико-абсорбционного ИК-газоанализатора, построенного по принципу модуляционного зондирования, с целью определения минимальной длины оптического пути, при которой будут достигнуты требуемые характеристики по чувствительности для CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и CH<sub>x</sub>. Кроме этого необходимо сделать это устройство дистанционным с учетом, того, что при хранении опасных веществ недопустимо применение в составе технического обеспечения АРМ средств, включая измерительные датчики, способных вызвать воспламенение в зоне хранения.

Для осуществления многопараметрического анализа газовой пробы (определения концентраций нескольких компонент) предложено использовать многоканальный приемник оптического сигнала с набором специализированных узкополосных фильтров (фильтры на измеряемый газ плюс фильтр опорного канала). Наиболее технологичным исполнением данной системы является пироэлектрический приемник со встроенными узкополосными фильтрами, нанесенными на входные окна приемника. Особенностью их применения в совокупности с волоконно-оптическим трактом является то, что необходимо обеспечить равномерную передачу излучения от выходной апертуры волокна на все четыре окна приемника.

Исходя из вышеизложенных требований была предложена следующая обобщенная структурная схема газоанализатора, представленная на рис. 4.

Принцип работы устройства заключается в следующем. Источник оптического излучения 1 генерирует широкополосное излучение охватывающие спектры поглощения всех исследуемых газов. Это излучение с помощью коллимирующей системы 2 вводится в передающее оптическое волокно 3, соединенное с измерительной газовой кюветой 4.

---

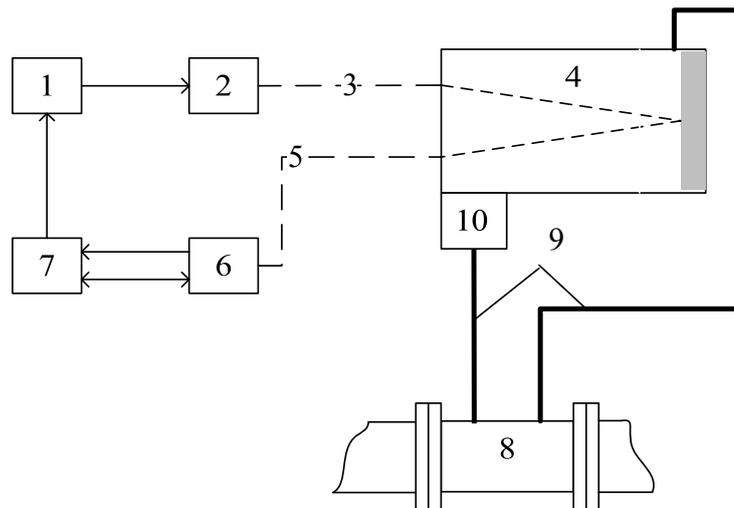


Рис. 4 – Обобщенная структурная схема газоанализатора

Излучение из волокна 3 проходит через измеряемый газ, отражается от сферического зеркала и попадает на входной торец приемного волокна 5. Зеркало работает в автоколлимационном режиме, тем самым обеспечивается перенос энергии по принципу «из точки – в точку». Излучение из приемного волокна попадает на узел приемника 6, включающий в себя сам пироэлектрический приемник, а также шаговый двигатель, осуществляющий его поворот относительно торца волоконного световода. Полученный с четырех каналов электрический сигнал, а также информация с датчика температуры внутри кюветы (на схеме не показан) поступает в блок обработки 7, где происходит усреднение по каждому каналу и вычисление концентрации по формуле (6):

$$k_i = -\alpha K(T) \ln(U_i/U_0), \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент (частично зависит от длины оптической кюветы, подбирается эмпирически),  $K(T)$  – коэффициент, учитывающий изменение поглощательной способности веществ при изменении температуры,  $U_i$  – напряжение  $i$ -го измерительного канала,  $U_0$  – напряжение опорного канала.

Как видно из расчетного выражения, использование приемника со встроенным опорным фильтром позволяет обеспечить автоматическую

калибровку измерителя при загрязнении элементов оптического тракта или флуктуации мощности источника без использования дополнительных элементов (опорной кюветы или опорного узкополосного излучателя).

Газовый тракт системы включает в себя пробоотборник 8 (устанавливается в разрыв вытяжной трубы), подводы сильфонного типа 9, механический фильтр 10, который конструкционно совмещен с измерительной газовой кюветой 4.

Волоконно-оптический световод выполнен из халькогенидного стекла (прозрачного в требуемой области ИК спектра), внешний вид представлен на рис. 5.



Рис. 5 – Халькогенидный волоконный световод CIR 500/550

Для определения требуемой длины оптического пути было проведено моделирование работы газоанализатора. При реализации многокомпонентного газоанализатора необходимая длина оптической кюветы рассчитывается исходя из погрешностей измерения канала с минимальной измеряемой объемной долей газа. В нашем случае это канал  $\text{NO}_x$ .

Алгоритм моделирования заключался в следующем:

1. Из спектра поглощения газа выделяется участок, перекрываемый фильтром приемника (справочные данные).

2. Моделируются два спектра поглощения, соответствующие двум значениям концентрации, отличным на величину требуемой абсолютной погрешности, спектры перемножаются на спектральную характеристику фильтра.

3. Полученные спектры поглощения интегрируются, тем самым определяется результирующий коэффициент поглощения  $k_{res}$ .

4. Используя уравнение Бугера (7) рассчитывается мощность на входе приемника для двух значений концентрации.

$$P_i = P_0 \exp^{-k_{res}L}. \quad (7)$$

5. Вычисляется нормированное значение разности  $\Delta P_{abs} = |P_1 - P_2|$ , показывающей относительное изменение мощности оптического сигнала на входе приемника при изменении концентрации исследуемого газа на величину, соответствующую требуемой чувствительности.

6. Варьируя значение длины оптического пути  $L$  в формуле (7) получают такое значение  $\Delta I_{norm}$ , которое может быть разрешено приемником при заданных значениях характеристик самого приемника (чувствительности и уровня собственных шумов), а так же заданного отношения сигнал шум (ввиду того, что описываемая система построена на амплитудных измерениях, примем повышенное значение отношения сигнал/шум  $\sim 10$ ).

Ввиду того, что спектральная характеристика пропускания фильтра высокочастотная, то, для упрощения расчетов, ее можно принять прямоугольной. Проведя интегрирование спектров поглощения получим результирующие значения коэффициента поглощения:  $k_{res10ppm} = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$  и  $k_{res20ppm} = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ .

Для дальнейших расчетов необходимо провести расчет минимальной оптической мощности на входе приемника, приводящей к изменению

выходного напряжения на величину на порядок большую собственных шумов. Учитывая характеристики приемника [12], проведя несложные алгебраические расчеты получим  $\Delta P_{optmin}=800$  нВт. В данном случае минимальная необходимая длина оптической кюветы составляет величину 25 см при температуре газов 25 °С и около 95 см при возможном изменении температуры до 300 °С.

Внешний вид изготовленного ИК-анализатора газов представлен на рис. 6.



Рис. 6 – Общий вид многопараметрического волоконно-оптического ИК-анализатора газов

### **Заключение**

В работе рассмотрены вопросы анализа и синтеза территориально распределенной системы хранения (ТРСХ) опасных веществ с позиций технического обеспечения экологической безопасности ее работы. Рассмотрены интегрированные ресурсы материального слоя системы, взаимосвязанного с обеспечением нормального функционирования экологических лабораторий, модулей инструментального контроля и т.п.

Разработана и предложена структура СИК, позволяющая реализовать измерительные технологии ОЭБ. Физический уровень СИК представлен датчиками обслуживания объектов хранения, датчиками контроля экологической обстановки, датчиками охраны периметра. Количество датчиков определяется требованиями системы и ограничена, с одной стороны, возможностями технологии волоконно-оптических систем со спектральным уплотнением (ВОСП-СП) по количеству каналов, а с другой, способностью системы с высокой точностью отслеживать температурные дрейфы спектральных характеристик оптических передатчиков, датчиков, фильтров, например, их центральной частоты.

Дано достаточно полное описание структур и алгоритмов работы ВОД для указанных каналов. Определены принципы совместного измерения температуры и давления, как основных параметров хранения, минимальные длины кювет для оптико-абсорбционных технологий мониторинга исследуемых газов с использованием дистанционного волоконно-оптического ввода/вывода зондирующего излучения для контроля экологической ситуации. Сведения о построении ВОД для систем охраны периметра и контроля утечек могут быть найдены в работах [10-11, 24-28].

Предложенная типовая структура СИК может быть использована при проектировании ТРСХ различных типов, ориентированных на хранение опасных веществ, и направлена на решение организационных, измерительных и контролирующих вопросов обеспечения экологической безопасности при их эксплуатации.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки РФ на выполнение НИР в КНИТУ-КАИ на 2014-2016 годы (программа «Радиофотоника», 3.1962.2014/К), договора от 12 февраля 2013 г. № 02.G25.31.0004 и госконтракта №14.Z50.31.0023 в рамках Постановления Правительства РФ № 220 от 09.04.2010 г.

---

## Литература

1. Виноградов В.Ю., Морозов О.Г., Галимов Э.Р. и др. Перспективы внедрения экологически безопасного способа эксплуатации сливоналивного устройства // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 14. С. 61-62.

2. Виноградов В.Ю., Морозов О.Г., Галимов Э.Р. и др. Экологическая безопасность при эксплуатации газоперекачивающих аппаратов насосных станций // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 15. С. 249-252.

3. Виноградов В.Ю., Морозов О.Г., Галимов Э.Р. и др. Перспективы внедрения экологического способа сжигания углеводородных топлив в пульсирующем потоке // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 21. С. 155-156.

4. Куревин В.В. Волоконно-оптические технологии развития интегрированных систем управления экологической безопасностью // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. URL: science-education.ru/118-14444.

5. Куревин В.В., Морозов О.Г., Просвирин В.П. и др. Структурная минимизация волоконно-оптических сенсорных сетей экологического мониторинга // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 3. С. 46-52.

6. Куприянов В.Г., Степущенко О.А., Куревин В.В. и др. Волоконно-оптические технологии в распределенных системах экологического мониторинга // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4-4. С. 1087-1091.

7. Алашеев М.А., Ляковский В.Л., Морозов О.Г. и др. Вопросы создания интегрированных автоматизированных систем организационного управления // Инфокоммуникационные технологии. 2007. Т. 5. № 2. С. 62-64.

---

8. Morozov O.G., Morozov G.A., Kourevin V.V. et al. Structural minimization of fiber optic sensor nets for monitoring of dangerous materials storage // Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. P. 79920E.

9. Vasil'ev S.A. et al. Fibre gratings and their applications // Quantum Electronics. 2005. V. 35(12). pp. 1085-1103.

10. Касимова Д.И., Кузнецов А.А., Крыницкий П.П. и др. Оценка возможностей применения волоконных решеток Брэгга с гауссовым профилем отражения в качестве датчика температуры // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 2 (18). С. 73-81.

11. Куприянов В.Г., Морозов О.Г., Нуреев И.И. и др. Маломодовое зондирование датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 4. С. 322-325.

12. Алюшина С.Г., Денисенко П.Е., Морозов О.Г. и др. Волоконные решетки Брэгга с фазированной структурой в распределенных информационно-измерительных системах // Нелинейный мир. 2011. Т. 9. № 8. С. 522-528.

13. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. Синтез двухчастотного излучения и его применения в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 3. С. 84-91.

14. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Просвирин В.П. и др. Амплитудно-фазовые методы формирования зондирующих излучений для систем анализа волоконно-оптических структур // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 3. С. 119-124.

15. Morozov O.G., Aibatov D.L. Two-frequency scanning of FBG with arbitrary reflection spectrum // Proc. of SPIE. 2007. V. 6605. P. 660506.

---

16. Морозов О.Г. Амплитудно-фазовое преобразование частоты в системах временной и частотной рефлектометрии волоконно-оптических информационных и измерительных сетей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2004. Т. 7. № 1. С. 63-66.

17. Кузнецов А.А., Морозов О.Г., Нуреев И.И. и др. Модуляционный оптико-абсорбционный газоанализатор выхлопных газов. Принцип работы и математическая модель // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2014. № 4. С. 45-49.

18. Кузнецов А.А., Морозов О.Г., Нуреев И.И. и др. Математическая модель и структура модуляционного оптико-абсорбционного газоанализатора выхлопных газов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. URL: [science-education.ru/119-14742](http://science-education.ru/119-14742).

19. Нуреев И.И. Постановка задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры // Нелинейный мир. 2015. Т. 13. № 8. С. 26-31.

20. Сахабутдинов А.Ж., Салахов Д.Ф., Нуреев И.И., Морозов О.Г. Процедура решения задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры // Нелинейный мир. 2015. Т. 13. № 8. С. 32-38.

21. Fitzpatrick C., Dooly G. and Lewis E. Hazardous exhaust gas monitoring using a deep UV based differential optical absorption spectroscopy (DOAS) system // Journal of Physics: Conference Series. 2007. no. 76. pp. 15-21.

22. Kasyutich V.L., Holdsworth R.J., Martin P.A. Mid-infrared laser absorption spectrometers based upon all-diode laser difference frequency generation and a room temperature quantum cascade laser for the detection of CO, N<sub>2</sub>O and NO // Appl. Phys. 2008. no. B92. pp. 271–279.

23. Mędrzycki R., Wojtas J., Rutecka B., Bielecki Z. Detection of nitric oxide in exhaled air using cavity enhanced absorption spectroscopy // Proc. of SPIE. 2013. V. 8902. pp. 92-113.

24. Stepustchenko O.A., Morozov O.G., Gorshunova A.N. et al. Optical refractometric FBG biosensors: problems of development and decision courses // Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. P. 79920D.

25. Нуреев И.И. Радиофотонные амплитудно-фазовые методы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Инженерный вестник Дона. 2016. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3581.

26. Садыков И.Р., Морозов О.Г., Садеев Т.С. и др. Волоконно-оптический рефрактометрический датчик // Труды МАИ. 2012. № 61. С. 18.

27. Морозов О.Г., Степущенко О.А., Садыков И.Р. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решеток брэгга с фазовым сдвигом // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2010. № 3. С. 3-13.

28. Нуреев И.И. Сенсорные пассивные оптические сети и ключевые вопросы применения в них волоконных брэгговских решеток // Инженерный вестник Дона. 2016. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3605.

### References

1. Vinogradov V.YU., Morozov O.G., Galimov E.H.R. i dr. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. V. 18. № 14. pp. 61-62.

2. Vinogradov V.YU., Morozov O.G., Galimov E.H.R. i dr. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. V. 18. № 15. pp. 249-252.

3. Vinogradov V.YU., Morozov O.G., Galimov E.H.R. i dr. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. V. 18. № 21. pp. 155-156.

4. Kurevin V.V. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. № 4. URL: www.science-education.ru/118-14444.

5. Kurevin V.V., Morozov O.G., Prosvirin V.P. i dr. Infokommunikacionnye tekhnologii. 2009. V. 7. № 3. pp. 46-52.



6. Kupriyanov V.G., Stepushchenko O.A., Kurevin V.V. i dr. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2011. V. 13. № 4-4. pp. 1087-1091.
7. Alasheev M.A., Lyaskovskij V.L., Morozov O.G. i dr. Infokommunikacionnye tekhnologii. 2007. V. 5. № 2. pp. 62-64.
8. Morozov O.G., Morozov G.A., Kourevin V.V. et al. Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. P. 79920E.
9. Vasil'ev S.A. et al. Quantum Electronics. 2005. V. 35(12). pp. 1085-1103.
10. Kasimova D.I., Kuznecov A.A., Krynickij P.P. i dr. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikacionnye sistemy. 2013. № 2 (18). pp. 73-81.
11. Kupriyanov V.G., Morozov O.G., Nureev I.I. i dr. Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya. 2013. № 4. pp. 322-325.
12. Alyushina S.G., Denisenko P.E., Morozov O.G. i dr. Nelinejnyj mir. 2011. V. 9. № 8. pp. 522-528.
13. Morozov O.G., Ajbatov D.L., Sadeev T.S. Fizika volnovyh processov i radiotekhnicheskie sistemy. 2010. V. 13. № 3. pp. 84-91.
14. Morozov O.G., Ajbatov D.L., Prosvirin V.P. i dr. Fizika volnovyh processov i radiotekhnicheskie sistemy. 2007. V. 10. № 3. pp. 119-124.
15. Morozov O.G., Aibatov D.L. Proc. of SPIE. 2007. V. 6605. P. 660506.
16. Morozov O.G. Fizika volnovyh processov i radiotekhnicheskie sistemy. 2004. V. 7. № 1. pp. 63-66.
17. Kuznecov A.A., Morozov O.G., Nureev I.I. i dr. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva. 2014. № 4. pp. 45-49.



18. Kuznecov A.A., Morozov O.G., Nureev I.I. i dr. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. № 5. URL: [www.science-education.ru/119-14742](http://www.science-education.ru/119-14742).
19. Nureev I.I. *Nelinejnyj mir*. 2015. V. 13. № 8. pp. 26-31.
20. Sahabutdinov A.ZH., Salahov D.F., Nureev I.I., Morozov O.G. *Nelinejnyj mir*. 2015. V. 13. № 8. pp. 32-38.
21. Fitzpatrick C., Dooly G. and Lewis E. *Journal of Physics: Conference Series*. 2007. no. 76. pp. 15-21.
22. Kasyutich V.L., Holdsworth R.J., Martin P.A. *Appl. Phys.* 2008. no. B92. pp. 271–279.
23. Mędrzycki R., Wojtas J., Rutecka B., Bielecki Z. *Proc. of SPIE*. 2013. V. 8902. pp. 92-113.
24. Stepustchenko O.A., Morozov O.G., Gorshunova A.N. et al. *Proc. of SPIE*. 2011. V. 7992. P. 79920D.
25. Nureev I.I. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2016. №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3581](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3581).
26. Sadykov I.R., Morozov O.G., Sadeev T.S. i dr. *Trudy MAI*. 2012. № 61. P. 18.
27. Morozov O.G., Stepushchenko O.A., Sadykov I.R. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikacionnye sistemy*. 2010. № 3. pp. 3-13.
28. Nureev I.I. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2016. №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3605](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3605).