

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-207-213

## Использование многозондового модулированного лазерного излучения для идентификации сгустков веществ в потоке жидкости

В.А. Алексеев<sup>1</sup>, С.И. Юран<sup>2</sup>, В.П. Усольцев<sup>1</sup>, Д.Н. Шульмин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,  
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

<sup>2</sup>Удмуртский государственный аграрный университет,  
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия

Поступила 15.08.2023

Принята к печати 19.09.2023

Современные средства контроля систем обеспечения водой на предприятиях или в жилищной сфере используют лазерные системы зондирования жидкости. При этом, как правило, используются лабораторные анализы полученных проб жидкости, а также спектральные методы анализа при сканировании жидкости излучением разных длин волн. Эти подходы не позволяют проводить анализ в реальном масштабе времени движущегося потока жидкости (поточный анализ). В работе рассмотрен вариант построения системы обнаружения и идентификации аварийных сгустков загрязняющих веществ в потоке жидкости с использованием лазерного излучения в реальном масштабе времени. Приведены основные принципы построения системы, блок-схема структуры системы и параметры идентификации сгустков исследуемых веществ, протекающих в трубопроводах системы канализации или водоочистки на промышленных предприятиях. При построении системы используется несколько длин волн лазерного излучения, одновременно направленных в одну исследуемую точку сгустка исследуемого потока жидкости. Длины волн излучения определяются на стадии подготовки к исследованию. На этой начальной стадии процесса анализируются оптические спектры пропускания веществ, которые априори возможны в исследуемом потоке жидкости. Основным критерий выбора длин волн – различие оптических спектров пропускания веществ на выбранных длинах волн. Для возможности технического разделения сигналов на различных длинах волн зондирующего излучения производится модуляция потоков излучений. Создание эталонов идентификации веществ в сгустках потока жидкости производится в форме решетчатых функций, содержащих составляющие оптического спектра пропускания вещества на определенных длинах волн лазерного излучения. Модуляцию излучения предлагается проводить путём управления накачкой каждого из излучателей системы. Предлагаемая система найдет применение в нефтегазовой, перерабатывающей промышленности, в системах фильтрации и очистки водоснабжения, промышленных предприятиях и предприятиях переработки сельскохозяйственной продукции.

**Ключевые слова:** лазерное зондирование, модуляция лазерного излучения, анализ спектров веществ

---

**Адрес для переписки:**

Юран С.И.  
Удмуртский государственный аграрный университет,  
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия,  
e-mail: yuran-49@yandex.ru

**Address for correspondence:**

Yuran S.I.  
Udmurt State Agrarian University,  
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia  
e-mail: yuran-49@yandex.ru

**Для цитирования:**

В.А. Алексеев, С.И. Юран, В.П. Усольцев, Д.Н. Шульмин.  
Использование многозондового модулированного лазерного излучения для идентификации сгустков веществ в потоке жидкости.  
Приборы и методы измерений.  
2023. – Т. 14, № 3. – С. 207–213.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-207-213

**For citation:**

V.A. Alekseev, S.I. Yuran, V.P. Usoltsev, D.N. Shulmin.  
[The Use of Multi-Probe Modulated Laser Radiation for the Identification of Clots of Substances in the Fluid Flow].  
Devices and Methods of Measurements.  
2023, vol. 14, no. 3, pp. 207–213 (in Russian).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-207-213

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-207-213

## The Use of Multi-Probe Modulated Laser Radiation for the Identification of Substances' Clots in the Fluid Flow

V.A. Alekseev<sup>1</sup>, S.I. Yuran<sup>2</sup>, V.P. Usoltsev<sup>1</sup>, D.N. Shulmin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

<sup>2</sup>Udmurt State Agrarian University,  
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia

Received 15.08.2023

Accepted for publication 19.09.2023

### Abstract

Modern tools of water supply systems monitoring at enterprises or in the housing sector use laser liquid sensing systems. In this case, as a rule, laboratory analyses of the obtained liquid samples are used, as well as spectral analysis methods when scanning the liquid with light for different wavelengths. These approaches do not allow for real-time analysis of a moving fluid flow (flow analysis). The paper considers a version for constructing of a system for online detecting and identifying emergency clots of pollutants in a liquid stream using laser radiation. The basic principles of the system construction, the block diagram of the system structure and parameters for identification of clots of substances under study flowing in the pipelines of the sewage or water treatment system at industrial enterprises are given. When constructing the system, several wavelengths of laser radiation are used, simultaneously directed to the one point of the studied clot of the studied fluid flow. Light wavelengths are determined at the stage of preparation for the study. At this initial stage of the process, optical transmission spectra of substances that are a priori possible in the studied fluid flow are analyzed. The main criterion for wavelengths choose is difference in substances optical transmission spectra at the se selected wavelengths. For the possibility of technical separation of signals at different wavelengths of the emitting radiation, the radiation fluxes are modulated. Creation of standards for identification substances in fluid flow clusters is carried out in the form of lattice functions containing the components of the substance optical transmission spectrum at certain wavelengths of laser radiation. Modulation of radiation is proposed to be carried out by controlling the pumping of each emitters of the system. The proposed system will find application in the oil and gas, processing industry, water filtration and purification systems, industrial enterprises and agricultural processing enterprises.

**Keywords:** laser probing, laser radiation modulation, substance spectrum analysis

---

#### Адрес для переписки:

Юран С.И.  
Удмуртский государственный аграрный университет,  
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия,  
e-mail: yuran-49@yandex.ru

#### Address for correspondence:

Yuran S.I.  
Udmurt State Agrarian University,  
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia  
e-mail: yuran-49@yandex.ru

#### Для цитирования:

В.А. Алексеев, С.И. Юран, В.П. Усольцев, Д.Н. Шульмин.  
Использование многозондового модулированного лазерного  
излучения для идентификации сгустков веществ в потоке  
жидкости.  
Приборы и методы измерений.  
2023. – Т. 14, № 3. – С. 207–213.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-207-213

#### For citation:

V.A. Alekseev, S.I. Yuran, V.P. Usoltsev, D.N. Shulmin.  
[The Use of Multi-Probe Modulated Laser Radiation  
for the Identification of Clots of Substances in the Fluid Flow].  
Devices and Methods of Measurements.  
2023, vol. 14, no. 3, pp. 207–213 (in Russian).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-207-213

## Введение

В ряде задач обнаружения сгустков веществ в потоке жидкости используются лазерные методы идентификации веществ. Одним из направлений построения систем обнаружения и идентификации сгустков каких-либо веществ является зондирование жидкости лазерным лучом с различными длинами волн излучения. Получаемый при подобном зондировании оптический спектр пропускания исследуемых веществ позволяет идентифицировать вещество, а, следовательно, и обнаружить это вещество в потоке жидкости [1–3]. В дальнейшем в статье рассматриваются оптические спектры пропускания различных веществ.

Но существует ряд технических проблем, которые ограничивают применение известных технологий лазерного зондирования исследуемых сред.

Во-первых, зондирование производится множеством лазерных лучей с различными длинами волн, соответствующих оптическому спектру обнаруживаемых веществ. При этом последовательное зондирование лучами с различными длинами волн излучения исключает возможность обнаружения веществ в реальном масштабе времени. Параллельное зондирование лучами с разными длинами волн излучения приводит к сложным схемам реализации систем и усложнению конструкции аппаратуры.

Во-вторых, существует еще проблема, связанная с необходимостью зондирования потока жидкости лазерными лучами в одной точке сгустка вещества [4–7]. Это особенно важно при высокой скорости движения потока жидкости, а также при небольших размерах регистрируемого вещества, сравнимого с размерами апертуры оптоэлектронных пар – «излучатель-фотоприёмник» [8, 9].

Авторами были проведены исследования методов обнаружения и фиксации аварийных сгустков различных сбросов в реальном масштабе времени. Были предложены различные подходы к определению некоторых видов сгустков за счёт анализа оптической плотности сред на выбранных априорно длинах волн лазерного излучения. При этом анализировались оптические спектры предполагаемых сбросов с выделением таких признаков формы спектра сигнала как экстремумы, чередование впадин и возвышенностей формы кривой.

Дальнейшее развитие методов заключалось в использовании нескольких выбранных длин волн излучения в характерных точках оптического спектра исследуемого вещества. Был предложен математический аппарат с использованием относительного описания спектров сигналов, который позволил создавать эталоны идентифицируемых веществ в виде относительного описания. Было предложено использовать вероятностную модель для описания регистрируемых параметров сгустков в виде оптической плотности исследуемой среды. Рассматривались различные вещества при аварийных сбросах: растительное масло, нефть, антибиотики, микрочастицы пластика и др.

Оставалась нерешённой проблема фиксации оптического спектра сгустка в одной точке среды параллельно на нескольких априори выбранных длинах волн, что и рассматривается в настоящей публикации.

В работе рассмотрен один из возможных вариантов реализации системы идентификации сгустков веществ в потоке жидкости в реальном масштабе времени [10].

## Основные принципы построения системы

### *Подготовка к организации процесса зондирования среды в виде потока жидкости*

Условием является поиск веществ из априори известного списка, заданного оператором. По указанным в списке веществам составляется перечень оптических спектров веществ. Производится анализ оптического спектра веществ на отличия по отдельным спектральным составляющим. Далее составляется обобщенный список длин волн  $L$  из оптического спектра каждого из веществ, по которому возможно идентифицировать вещество:

$$L = \{L_1, L_2, L_3, \dots, L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{ik}, \dots, L_n\};$$

$$L_i = \{L_{i1}, L_{i2}, L_{i3}, \dots, L_{ik}\},$$

где  $i$  – номер вещества,  $i = 1, 2, \dots, m$  ( $m$  – количество веществ);  $k_i$  – индекс спектральной составляющей ( $k = 1, \dots, k_i$ );  $n$  – длина списка длин волн, которая равна  $n = \sum_{(i=1)}^m k_i$ , где  $k_i$  равно количеству выбранных длин волн для вещества  $i$ , когда длины волн различных веществ не повторяются.

Опыт показывает, что для каждого вещества будет отобрано не более 3–5 длин волн. Необходимо учитывать, что количество веществ, которые рассматриваются как потенциальные сбросы в систему очистки предприятия не превышает 3–5 веществ.

*Создание эталонов для каждого из анализируемых сгустков веществ*

Предполагаются три возможных варианта построения эталонов:

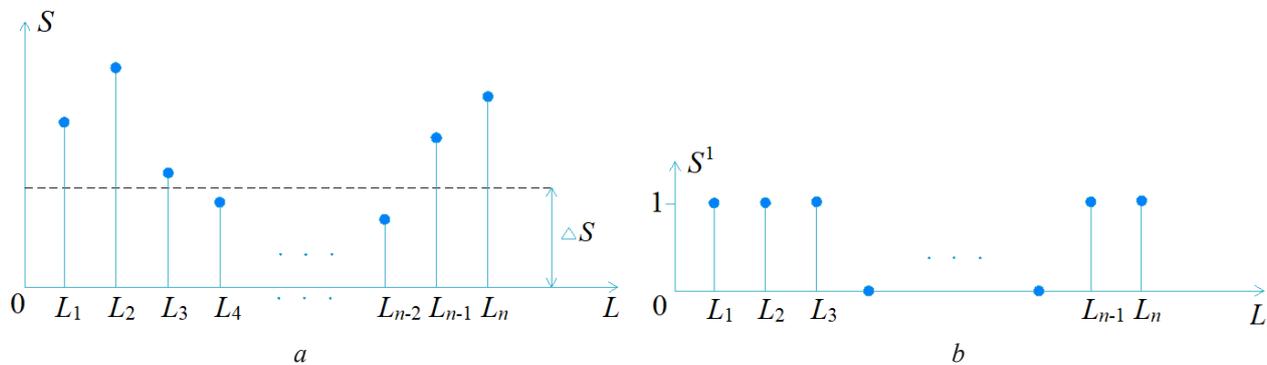
- в виде решетчатой функции с полученными значениями амплитуд составляющих для выбранных длин волн для каждого из веществ;
- в виде соотношений между амплитудами составляющих решетчатой функции для каждо-

го вещества, которые могут быть приведены к бинарной форме представления;

- в виде бинарной решетчатой функции, полученной при сравнении амплитуд решетчатой функции с определенным уровнем порога для каждого из веществ.

Рассмотрим последний из перечисленных вариантов.

Эталон на каждое вещество содержат значения амплитуд  $S$  составляющих оптического спектра по всем длинам волн списка  $L$  (рисунок 1). Вводится порог определения значений оптического спектра веществ ( $\Delta S$ ), что позволяет составить эталоны в виде бинарной решетчатой функции  $S^1$  со значениями  $\langle 0,1 \rangle$ . Пример получения эталона в виде бинарной решетчатой функции приведён на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Представление решетчатой функции:  $a$  – исходная решетчатая функция;  $b$  – бинарная решетчатая функция

**Figure 1** – Representation of a lattice function:  $a$  – the original lattice function;  $b$  – the binary lattice function

Превышение составляющей оптического спектра  $S_i$  порога  $\Delta S$  приводит к значению эталона равному 1; если же значение составляющей оптического спектра ниже порога  $\Delta S$ , то значение эталона приравнивается 0.

*Сведение излучений разных длин волн к одной точке зондирования сгустка в потоке жидкости*

Эта задача может решаться с помощью установки излучателей в одной плоскости сечения трубы по окружности трубы или излучатели собираются в один световодный канал с направлением на условную точку исследования потока жидкости зондирующим лазерным излучением.

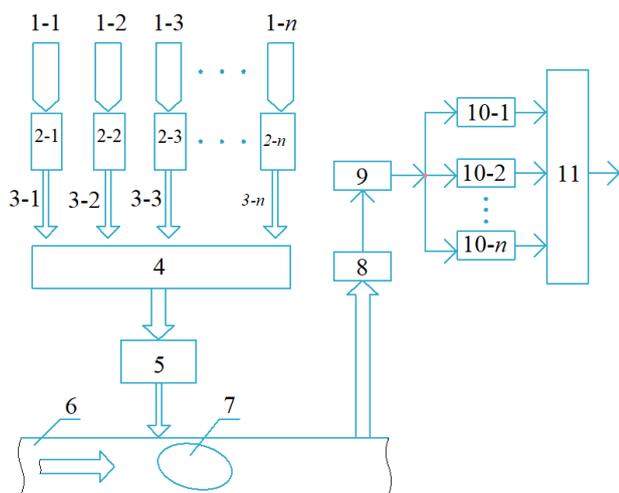
При этом во втором случае потоки излучения с разными длинами волн смешиваются. Следовательно, необходимо в дальнейшем

разделение потоков после фиксации их фотоприёмником. Это возможно при цифровой обработке сигнала с использованием быстрого преобразования Фурье.

Другой подход – модуляция потоков сигналов на определённых частотах, а после получения общего сигнала его демодуляция по известным частотам модуляции. При реализации используется прямая модуляция с частотным диапазоном не выше 1 ГГц для обеспечения линейного процесса модуляции. Для большинства динамических процессов, происходящих в жидкой среде с образованием сгустков, частоты переходных процессов движения сгустков находятся ниже частоты модуляции. При этом количество частот модуляции равно количеству выбранных длин волн для всех веществ.

## Структура системы обнаружения и идентификации сгустков веществ в потоке жидкости

Система содержит (рисунок 2)  $n$  лазерных излучателей 1-1, ..., 1- $n$ , например, лазерных диодов, количество которых определено на стадии подготовки к зондированию. Опыт построения данных систем показывает, что количество излучателей не превышает одного десятка при идентификации 1–5 веществ в потоке жидкости.



**Рисунок 2** – Структура системы: 1-1, 1-2, 1-3, ..., 1- $i$ , ..., 1- $n$  – лазерные излучатели; 2-1, 2-2, 2-3, ..., 2- $i$ , ..., 2- $n$  – модуляторы излучения; 3-1, 3-2, 3-3, ..., 3- $i$ , ..., 3- $n$  – оптоволоконный канал; 4 – блок суммирования потоков излучений; 5 – оптический блок формирования узконаправленного потока излучения; 6 – канал движения водной среды; 7 – сгусток загрязняющего вещества; 8 – фотоприёмник; 9 – усилитель сигнала; 10-1, 10-2, 10-3, ..., 10- $i$ , ..., 10- $n$  – демодуляторы сигнала; 11 – блок опознавания вещества

**Figure 2** – The structure of the system: 1-1, 1-2, 1-3, ..., 1- $i$ , ... 1- $n$  – laser emitters; 2-1, 2-2, 2-3, ..., 2- $i$ , ..., 2- $n$  – radiation modulators; 3-1, 3-2, 3-3, ..., 3- $i$ , ..., 3- $n$  – fiber optic channel; 4 – the radiation flux summation unit; 5 – optical unit for the formation of a narrowly directed radiation flux; 6 – the channel of movement of the aquatic environment; 7 – a clot of a polluting substance; 8 – photodetector; 9 – signal amplifier; 10-1, 10-2, 10-3, ..., 10- $i$ , ..., 10- $n$  – signal demodulators; 11 – substance identification unit

Излучение от каждого излучателя модулируется с частотой  $f_n$  в модуляторе излучения 2-1, ..., 2- $n$  и подаётся по оптоволоконному каналу 3-1, ..., 3- $n$  в блок 4 суммирова-

ния потоков излучений [11]. С блока суммирования потоков лазерное излучение через оптический блок формирования узконаправленного потока излучения 5 направляется в поток жидкости, распространяющийся по каналу движения водной среды 6, в котором возможно появление сгустка загрязняющего вещества 7.

Составляющие отражённого и рассеянного оптических излучений поступают в фотоприёмник 8, который формирует электрический сигнал, который, пройдя через усилитель сигнала 9, направляется в  $n$  демодуляторов сигнала 10-1, ..., 10- $n$ .

На выходе демодуляторов получается сигнал в виде решетчатой функции, каждая из составляющих которой показывает значение амплитуды для одного из излучателей с длиной волны излучения  $L$ .

Полученная решетчатая функция в виде параллельного кода направляется в блок опознавания вещества 11, где происходит сравнение полученной решетчатой функции с каждым из эталонов анализируемых веществ, содержащих значения амплитуд составляющих оптического спектра по всем длинам волн списка  $L$ .

Блок эталонов содержит  $m$  эталонов веществ в виде решетчатых функций или бинарных решетчатых функций. Получение бинарных решетчатых функций производится в блоке опознавания путём специальной цифровой обработки поступающих данных в виде решетчатой функции.

В блоке опознавания происходит преобразование полученной решетчатой функции к бинарным решетчатым функциям двух видов.

В первом случае, происходит сравнение амплитуд составляющих решетчатой функции с некоторым порогом, который определяется на стадии предварительной подготовки эталонов и зависит от шумов, возможных наводок и засветок.

Во втором случае, происходит построение бинарной решетчатой функции путём сравнения амплитуд составляющих решетчатой функции  $S_i$  по правилу:

$$\begin{cases} S_i > S_j \rightarrow 1 \\ S_i \leq S_j \rightarrow 0 \end{cases},$$

где  $i$  – номер составляющей решетчатой функции;  $i, j = 1, \dots, n$ , где  $n$  – количество составляющих решетчатой функции.

Полученное представление решетчатой функции обладает инвариантностью к сжатию, растяжению амплитуд составляющих решетчатой функции. Это важно, поскольку проводимые измерения происходят в условиях шумов и помех. Поэтому существует разброс получаемых значений в определенном диапазоне, который можно описать трубкой погрешности на составляющих решетчатой функции.

Таким образом, реализуется построение эталонов в виде бинарной решетчатой функции.

## Заключение

Применение модуляции многозондового лазерного излучения позволило решить следующие задачи при обнаружении и идентификации вредных веществ в различных задачах науки и техники:

– обнаружение и идентификация сгустка вещества в реальном масштабе времени;

– возможность одновременного многозондового воздействия лазерного излучения на одну точку сгустка в жидкости при фиксации сгустка вещества;

– обеспечение защиты зондирующего излучения от внешних помех и засветок.

При этом предварительно анализируются оптические спектры исследуемых веществ и строятся эталоны для идентификации при выбранных длинах волн лазерного излучения. Для большинства задач количество длин волн не превышает десяти.

Удобно использовать для опознавания оптических спектров веществ представление в виде решетчатых функций в бинарном отношении наличия составляющих спектра. Модуляция лазерного излучения может проводиться путём управления накачкой лазера или с использованием специальных модуляторов луча на электрооптических или магнитооптических световых затворах.

Существует определённый класс задач, в которых необходима идентификация вещества в реальном масштабе времени. К ним можно отнести:

– обнаружение вредных веществ, которые попадают в систему питьевого водоснабжения;

– обнаружение отдельных, заранее известных веществ, в системах сточных вод в случае аварийных ситуаций на промышленных предприятиях;

– обнаружение вредных загрязнителей при производстве пищевых продуктов, в процессе переработки сельхозпродуктов;

– обнаружение вредных сбросов на химически опасных производствах, на складах хранения химических реактивов;

– обнаружение утечек нефти и нефтепродуктов на добывающих и перерабатывающих нефть предприятиях;

– обнаружение утечек различных веществ при транспортировке по морскому, воздушному и железнодорожному путям;

– контроль технологических процессов, где используется несколько различных веществ и др.

В большинстве подобных задач могут быть использованы лазерные системы идентификации веществ. Предложенный выше вариант построения лазерной системы решает задачу идентификации веществ в реальном масштабе времени.

## Список использованных источников

1. Журавель В.И. Об идентификации источников нефтяных загрязнений / В.И. Журавель, В.Р. Маричев // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Section 10. Technical Sciences. – 2015. – № 9-10. – С. 65–68.

2. Бочаров В.Н. Исследование многомерных абсорбционных аналитических сигналов бензинов в среднем ИК-диапазоне / В.Н. Бочаров [и др.] // Журнал аналитической химии. – 2019. – Т. 74. – № 5. – С. 356–364. DOI: 10.1134/S1061934819020047

3. Alekseev V.A. System Eliminating Emergency Discharges in Industrial Facilities Waste Waters Using Relative Signal Description / V.A. Alekseev, S.I. Yuran, V.P. Usoltsev, D.N. Shulmin // Devices and Methods of Measurements, 2022, vol. 13, no. 2, pp. 105–111. DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-2-105-111

4. Кигель А.А. Поточный анализ и контроль ТП: Методы анализа, преимущества и специфика применения / А.А. Кигель, Д.А. Чернокозинский, И.И. Зильберман // Автоматизация в промышленности. – 2016. – № 2. – С. 42–46.

5. Кигель А.А. Контроль содержания нефтепродуктов в системах оборотного водоснабжения / А.А. Кигель, Д.А. Чернокозинский // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 30–33.

6. Gu Z. Application of Raman spectroscopy for the detection of acetone dissolved in transformer oil / Z. Gu, W. Chen, L. Du [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy, 2018, vol. 85, no. 2, pp. 205–211.

DOI: 10.1007/s10812-018-0636-2

7. Сорокин Ф.Г. Использование фотометрической технологии в процессе поточного анализа качества нефтепродуктов / Ф.Г. Сорокин // Автоматизация в промышленности. – 2013. – № 10. – С. 19–21.

8. Feng J. Method of correlation coefficient optimization used in UV-VIS spectrophotometric analysis for effluent in catalytic ozonation / J. Feng, H. Chen, X. Zhang // Journal of Applied Spectroscopy, 2018, vol. 85, no. 4, pp. 683–693. DOI: 10.1007/s10812-018-0716-3

9. Корсаков В.С. Инфракрасная on-line спектроскопия для анализа водных растворов / В.С. Корсаков, Д.Я. Гулько, М.С. Корсаков, Л.В. Жукова // Бултеровские сообщения. – 2016. – Т. 48. – № 12. – С. 115–120.

10. Патент 2792152 РФ, МПК G01N 21/31. Устройство контроля аварийных сбросов / С.И. Юран, В.А. Алексеев, В.П. Усольцев // Заявитель Удмуртский ГАУ. Заявка № 2022122806 от 24.08.2022. Оpubл. 17.03.2023. Бюл. № 8.

11. Паргачев И.А. Электрооптические модуляторы лазерного излучения на основе высокоомных кристаллов  $\text{KTiOPO}_4$  / И.А. Паргачев, Ю.В. Кулешов, В.А. Краковский [и др.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Доклады ТУСУР). – 2012. – № 2(26). – Ч. 2. – С. 90–93.

## References

1. Zhuravel VI, Marichev VR. On identification of sources of oil pollution. Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2015; 9–10, section 10:65-68. (In Russ.).

2. Bocharov VN, Ganeev AA, Konyushenko IO, Nemets VM, Peganov SA. Study of multidimensional absorption analytical signals of gasolines in the mid-IR region. Journal of Analytical Chemistry. 2019;74(5):356-364. (In Russ.). DOI: 10.1134/S1061934819020047

3. Alekseev VA, Yuran SI, Usoltsev VP, Shulmin DN. System Eliminating Emergency Discharges in Industrial Facilities Waste Waters Using Relative Signal

Description. Pribory i metody izmereniy = Devices and Methods of Measurements. 2022;13(2):105-111.

DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-2-105-111

4. Kigel AA, Chernokozinsky DA, Zilberman II. Flow analysis and control of TP: Methods of analysis, advantages and specifics of application. Automation in industry. 2016;(2):42-46. (In Russ.).

5. Kigel AA, Chernokozinsky DA. Control of the content of petroleum products in circulating water supply systems. Automation in industry. 2014;(5):30-33. (In Russ.).

6. Gu Z, Chen W, Du L, Shi H, Wan F. Application of Raman spectroscopy for the detection of acetone dissolved in transformer oil. Zhurnal prikladnoj spektroskopii = Journal of Applied Spectroscopy. 2018;85(2): 205-211. DOI: 10.1007/s10812-018-0636-2

7. Sorokin FG. The use of photometric technology in the process of in-line analysis of the quality of petroleum products. Automation in industry. 2013;(10):19-21 (In Russ.).

8. Feng J, Chen H, Zhang X. Method of correlation coefficient optimization used in UV-VIS spectrophotometric analysis for effluent in catalytic ozonation. Zhurnal prikladnoj spektroskopii = Journal of Applied Spectroscopy. 2018;85(4):683-693.

DOI: 10.1007/s10812-018-0716-3

9. Korsakov VS, Gulko DYa, Korsakov MS, Zhukova LV. Infrared on-line spectroscopy for the analysis of aqueous solutions. Butlerovskie soobshcheniya = Butlerov Communications. 2016;48(12):115-120. (In Russ.).

10. Yuran SI, Alekseev VA, Usoltsev VP. Emergency discharge monitoring device. Patent RF, no. 2792152, 2023.

11. Pargachev IA, Kuleshov YuV, Krakovsky VA, et al. Electrooptical modulators of laser radiation based on high-resistance  $\text{KTiOPO}_4$  crystals. Doklady Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki (Doklady TUSUR) = Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Reports of TUSUR). 2012;2(26), part 2,90-93. (In Russ.).