УДК 681.785: 504.064

Комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод

Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И., Шульмин Д.Н.

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия*

*Поступила 23.09.2017
Принята к печати 12.02.2018*

Статья содержит теоретические и практические технические предложения по созданию оптоэлектронного комплекса контроля аварийных сбросов загрязнений в сточные воды предприятий.

Показана актуальность задачи контроля сточных вод на наличие аварийных сгустков в сточных водах для сохранения водных источников. Приведена структурная схема комплекса контроля водной среды. Рассмотрена математическая модель комплекса оптоэлектронного контроля за водной средой на примере сточных вод предприятия. Комплекс контроля описывается случайной импульсной переходной функцией, содержащей две независимые составляющие, одна из которых определяет динамические свойства, другая учитывает стохастичность преобразования.

Приведен пример реализации оптоэлектронного комплекса контроля водной среды в системе сточных вод предприятия. Экспериментально показана эффективность комплекса при измерении изменений оптической плотности анализируемых сред. Для проведения эксперимента выбрано загрязнение воды растительным маслом. Анализ спектров поглощения воды и растительного масла показал, что в качестве излучателя целесообразно использовать лазеры с длинами волн в диапазоне 0,4–0,5 мкм, у которых минимальное поглощение излучения в водной среде и значительное поглощение в среде примеси, например фиолетовый лазер *STLL-MM*-405-200-52-*A* с длиной волны 0,405 мкм и мощностью 200 мВт. В качестве фотоприемника можно использовать, например, фотодиод типа *PDV-V*400-46.

Приведены результаты эксперимента исследования оптической плотности жидкой среды, содержащей сгустки из растительного масла. Они показывают функциональную связь загрязнения сточных вод с изменением оптической плотности водной среды при определенных длинах волн зондирующего лазерного излучения.

Ключевые слова: комплекс контроля, оптическая плотность, оптоэлектронный контроль загрязнения сточных вод, стохастическая зависимость**.**

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16

Адрес для переписки:
*Алексеев В.А.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: alekseevv@istu.ru*

Address for correspondence:
*Alekseev V.A.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: alekseevv@istu.ru*

Для цитирования:
Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И., Шульмин Д.Н.
Комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 7–16
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16

For citation:
Alekseev V.A., Usoltcev V.P., Yuran S.I., Shulmin D.N.
[Complex for monitoring of sewage optical density changes].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 7–16 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16

Complex for monitoring of sewage optical density changes

Alekseev V.A., Usoltcev V.P., Yuran S.I., Shulmin D.N.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

Received 23.09.2017
Accepted for publication 12.02.2018

Abstract

Article contains theoretical and practical technical sentences on creation of an optoelectronic complex of monitoring of emergency discharge of pollution in sewage of the enterprises.

The relevance of the task of monitoring of sewage on existence of emergency clots in sewage for saving water sources is shown. The structural scheme of a complex of monitoring of the water environment is provided. The mathematical model of a complex of optoelectronic monitoring over the water environment on the example of sewage of the enterprise is considered. The complex of monitoring is described by the random impulse transition function containing two independent components, one of which defines dynamic properties, another considers stochasticity of conversion.

The example of implementation of an optoelectronic complex of monitoring of the water environment in the system of sewage of the enterprise is given. Experimentally the efficiency of a complex in case of measurement of changes of optical density of the analysable environments is shown. For carrying out an experiment water pollution is selected by vegetable oil. The analysis of absorption spectra of water and vegetable oil showed that as a source of radiation it is expedient to use lasers with lengths of waves in the range of 0,4–0,5 μm which have the minimum absorption of radiation in the water environment and the considerable absorption in the environment of impurity, for example, the violet STLL-MM-405-200-52-A laser with wavelength of 0,405 μm and 200 mW. As the photo-sensor element, it is possible to use, for example, the PDV-V400-46 photodiode.

Results of an experiment of a research of optical density of the liquid environment containing clots from vegetable oil are given. They show the functional connection of pollution of sewage with change of optical density of the water environment with certain lengths of waves of a probing laser radiation.

Keywords: control complex, optical density, optoelectronic control of pollution of sewage, stochastic dependence.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16

Адрес для переписки:
Алексеев В.А.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: alekseevv@istu.ru

Address for correspondence:
Alekseev V.A.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: alekseevv@istu.ru

Для цитирования:
Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И., Шульмин Д.Н.
Комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 7–16.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16

For citation:
Alekseev V.A., Usoltcev V.P., Yuran S.I., Shulmin D.N.
[Complex for monitoring of sewage optical density changes].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 7–16 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16

Введение

Для мониторинга загрязнения сточных вод промышленных предприятий используется широкий спектр приборов, ряд которых применяется в системах контроля. В основе их работы лежат различные физическо-химические методы (кондуктометрические, диэлькометрические, потенциометрические, оптические и др.) [1, 2]. Среди них большими возможностями обладают оптические методы, работающие в ультрафиолетовом, рентгеновском, ближнем инфракрасном и ИК-диапазонах [3–5]. Известны оптические датчики для мониторинга водной среды, позволяющие выявить изменение прозрачности и цвета, связанные с возможным загрязнением водной среды [6, 7]. Выпускаются высокоточные и надежные как приборы, предназначенные для лабораторных анализов проб, так и проточные приборы, устанавливаемые на контролируемых объектах [8]. Наибольшее распространение нашли методы измерения мутности водной среды [9–11].

Перспективными являются методы и приборы на основе использования источников излучения с разной длиной волны, в частности двухчастотные измерители прозрачности и мутности воды [12], системы контроля загрязнений сточных вод нефтепродуктами в результате аварийных залповых сбросов [13]. Используются приборы на основе селективного оптического абсорбционного метода с применением трех источников излучения с разной длиной волны, позволяющие производить измерения концентрации воды в нефти в диапазоне от 0,2 до 40 % с погрешностью не более 2 %. При этом цикл измерения составляет более 10 с [14].

Находят применение и оптоэлектронные устройства на основе элементов нарушенного полного внутреннего отражения, работающие в инфракрасном диапазоне, которые позволяют определять наличие воды и ряда загрязнений в нефти и нефтепродуктах [15].

В ряде быстропротекающих аварийных ситуаций, сопровождающихся сбросом загрязняющих веществ в водную среду (залповые сбросы), описанные выше приборы не позволят вовремя зафиксировать прохождение аварийного сгустка загрязняющих веществ в зоне контроля, поскольку работают не в реальном масштабе времени. Это может повлечь за собой проникновение загрязняющих веществ в чистый водоем и существенное загрязнение дорогостоящих фильтров очистки.

Целью данной работы являлись разработка и испытание оптоэлектронного комплекса контроля загрязняющих веществ в сточных водах, работающего, в отличие от имеющихся, в реальном масштабе времени, который позволяет оперативно обнаруживать аварийные сбросы и тем самым существенно снижать их влияние на водную среду и фильтры очистки путем своевременного отведения загрязняющих веществ в отстойник.

Теоретический анализ

Основным требованием к выбираемым аппаратуре и методам является их применимость в широком интервале видов и концентраций загрязняющих веществ (элементов), включающих как следовые количества в незагрязненных объектах фоновых трендов, так и высокие значения концентраций в районах техногенного воздействия.

Для построения формализованной схемы комплекса контроля необходимо составить математическую формулировку задачи исследования с указанием искомых величин и оцениваемых зависимостей, описать характеристики процесса, систему параметров, определяющих процесс преобразования входного сигнала, зависимость между характеристиками комплекса и параметрами процесса преобразования с учетом влияющих факторов.

Для преобразования формализованной схемы в математическую модель все соотношения необходимо представить в аналитической форме. Выходной сигнал $y(t)$ связан с основными характеристиками комплекса контроля и действующим входным сигналом $x(t)$, имеющим случайный характер, интегральным соотношением:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{t} g(t,\tau)x(\tau)d\tau,$$

где $g(t,\tau)$– переходная функция комплекса контроля; τ – время контроля.

Комплекс контроля описывается случайной импульсной переходной функцией, содержащей две независимые составляющие, одна из которых определяет динамические свойства, другая учитывает стохастичность преобразования и представляет безынерционный преобразователь со случайным коэффициентом преобразования:

$$g_1(t,\tau) = g_0(t-\tau), \qquad g_2(t,\tau) = k_0(t)\delta(t-\tau).$$

Используя метод канонических разложений, случайную функцию можно представить в виде суммы так называемых элементарных случайных функций; тогда переходная функция примет вид:

$$g(t,\tau)=\int_{\tau}^{t} g_1(t,\tau)g_2(t,\tau)d\tau = k_0(t)g_0(t-\tau),$$

где $g_0(t–\tau)$ – нормированная импульсная переходная функция комплекса контроля; $k(t)$– случайный коэффициент преобразования, который в общем случае задается случайным образом и позволяет выразить случайную переходную функцию через неслучайную нормированную импульсную переходную функцию; $g_0(t–\tau)$ – дельта-функция;

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)dt = 1;$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\delta(t-\tau)dt = x(\tau).$$

В зависимости от выбранного измерительного параметра в комплексе контроля уточняется математическая модель комплекса контроля, из множества возможных реализаций выбирается конкретная, соответствующая конкретному параметру, обеспечивающему наиболее существенные критерии идентификации с точки зрения увеличения доверительной вероятности принятия правильного решения. На основании фотометрического метода, базирующегося на законе Бугера–Ламберта–Бера, сравниваем оптические плотности исследуемой жидкости и контрольной, используемой в качестве образца. В качестве информативного параметра комплекса контроля выбираем динамику изменения оптической плотности как меры ослабления света прозрачными объектами. Она вычисляется как натуральный логарифм отношения интенсивности излучения, падающего на объект, I_{in}, к интенсивности излучения, прошедшего через него, I_{out}.

Во многих случаях оказывается полезным использовать такую величину, как спектральная плотность потока излучения.

С учетом частотных диапазонов источника и приемника излучения комплекса контроля загрязнений сточных вод и необходимости защиты источника излучения от помех получим:

$$D_i = A\ln\frac{\int_{\lambda_{1m}}^{\lambda_{1n}} \Phi_{1\lambda}(\lambda)\tau_{1i}(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_m}^{\lambda_n} \Phi_{\lambda}(\lambda)\tau_i(\lambda)d\lambda} = A\ln\int_{\lambda_{1m}}^{\lambda_{1n}} \Phi_{1\lambda}(\lambda)\tau_{1i}(\lambda)d\lambda - A\ln\int_{\lambda_m}^{\lambda_n} \Phi_{\lambda}(\lambda)\tau_i(\lambda)d\lambda,$$

где D_i– оптическая плотность с учетом частотных диапазонов источника и приемника излучения; $\tau_{1i}(\lambda)$ – спектральная характеристика оптической защиты источника излучения от влияния помех в водной среде в оптическом тракте аппаратуры контроля, например, защитного стекла с заданной спектральной характеристикой; $\Phi_{1i}(\lambda)$ – спектральная плотность светового потока источника излучения; , λ_{1n}, λ_{1m} – пределы интегрирования (границы зон спектра источника); $\tau_i(\lambda)$ – спектральная характеристика оптической защиты приемника излучения от влияния водной среды; $\Phi_i(\lambda)$ – спектральная плотность светового потока, поступившего на приемник излучения; λ_n, λ_m – пределы интегрирования (границы зон спектра фотоприемника), A – коэффициент для перевода десятичных логарифмов в натуральные, равный 0,434.

Приняв, что оптическая защита источника и приемника излучения не изменяет их спектральные характеристики, значением $\tau_i(\lambda)$ можно пренебречь.

Отличие предлагаемого комплекса контроля сточных вод заключается в целевой ориентации контроля на определенное вещество, попадающее в сточные воды при аварийной ситуации. Предварительно происходит настройка комплекса на данное вещество, заключающаяся в определении длины волны лазерного зондирующего излучения.

В отличие от всех известных зарубежных и российских разработок комплекс позволяет проводить измерения в реальном масштабе времени, что имеет значение для ликвидации запроектных аварийных ситуаций со сбросом загрязнений в сточные воды. Комплекс обнаруживает сгусток загрязнений, отслеживает его движение в сточной трубе и, открывая специальную заслонку в трубе, сбрасывает сгусток в отстойник.

Такой подход обеспечивает сохранность фильтров очистки системе сточных вод и уменьшает вероятность сброса загрязнений в водоемы.

Пример реализации оптоэлектронного комплекса

Разработан оптоэлектронный комплекс контроля сточных вод с управлением исполнительным устройством – заслонкой в сточной трубе [16]. Схема комплекса представлена на рисунке 1. В структурной схеме оригинальными элементами являются устройство преобразования и борьбы с помехами и исполнительное устройство, управляемое микроконтроллером. Первый элемент позволяет выделить полезный сигнал статистической обработкой данных с использованием априорных сведений о характере сигнала и эталона, полученного с использованием относительного описания [17] в виде отношения, заданного на множестве признаков или составляющих дискретных функционально-регрессионных зависимостей параметров зарегистрированных процессов (изменение оптической плотности водной среды при определенной длине волны излучения) и истинных параметров загрязнений (вида и степени загрязнений) с использованием аппарата теории вероятностей и математической статистики.

Математически это выражается следующим образом:

$$R_m(Q_1, Q_2, ..., Q_m) = \varphi\left[R_j(Y_1, Y_2, ..., Y_j)\right],$$

где R_m – идентификационные параметры изменения оптической плотности при определенной длине волны излучения, зарегистрированные оптоэлектронным комплексом контроля сточных вод (выходной сигнал); R_j – параметры загрязнения (входной сигнал); Q_1, Q_2,..., Q_m – идентификационные параметры изменения оптической плотности; Y_1, Y_2,..., Y_j – виды и уровни загрязнений; m – количество идентификационных параметров изменения оптической плотности; j – количество параметров загрязнения; φ – функционально-корреляционная зависимость, связывающая параметры регистрируемых процессов с параметрами загрязнения.

Созданная алгоритмическая база комплекса позволяет решать следующие задачи, обеспечивающие обнаружение аварийного сброса, выведение сгустка загрязнений из сточной трубы и принятие решений по дальнейшей фильтрации сточной жидкости:

– распознавание типа сгустка загрязнений для принятия решения об управлении заслонкой;

– слежение за движением сгустка по сточной трубе;

– управление заслонкой, расположенной между сточной трубой и отстойником, для выделенных загрязнений;

– прогнозирование новых сгустков в данной аварийной ситуации.

Все указанные задачи выполняются в реальном масштабе времени, что отличает данный комплекс от известных систем автоматического контроля сточных вод.

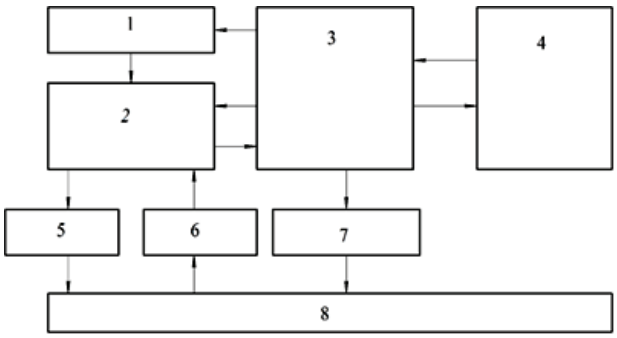


Рисунок 1 – Схема комплекса контроля: 1 – устройство управления; 2 – устройство преобразования и борьбы с помехами; 3 – микроконтроллер; 4 – компьютер; 5 – источник излучения; 6 – приемник излучения; 7 – исполнительное устройство; 8 – гидросистема

Figure 1– Scheme of a complex of control: 1 – control device; 2 – device of transformation and fight against hindrances; 3 – microcontroller; 4 – computer; 5 – radiation source; 6 – the receiver of radiation; 7 – actuating device; 8 – hydrosystem

При включении комплекса контроля микроконтроллер 3 по заданной программе настраивает устройство управления 1. С устройства управления командный сигнал поступает на устройство преобразования и борьбы с помехами 2, задавая выходной ток источника излучения 5; туда же поступает тактовый сигнал, который модулирует выходной ток излучателя. В результате на излучателе формируются импульсы с определенной частотой (4000 Гц) и стабильной амплитудой тока. Модулирующее излучение, пройдя водную среду гидросистемы 8, поступает на приемник излучения 6. Ток с приемника излучения поступает на устройство преобразования и борьбы с помехами, коэффициент преобразования которого изменяется устройством управления. С выхода устройства преобразования и борьбы с помехами преобразованный сигнал поступает в микроконтроллер. Оцифрованный сигнал служит для управления коэффициентом преобразования через устрой-

ство управления. Процесс регулировки продолжается до тех пор, пока сигнал не установится в номинальное значение. Оцифрованный сигнал передается в персональный компьютер 4, после обработки которого осуществляется мониторинг и автоматическое управление исполнительным устройством 7.

Комплекс контроля позволяет:

– задавать допустимое отклонение уровня информативного сигнала;

– задавать время аварийной задержки;

– задавать время сброса после аварийного включения;

– задавать время между циклами автоподстройки;

– перестраивать регулируемые источники и приемники оптического излучения, работающие в ультрафиолетовой (менее 0,4 мкм), видимой (0,40–0,72 мкм), ближней и средней инфракрасной (0,72–20 мкм), длинноволновой (более 20 мкм) областях спектра электромагнитного излучения;

– передавать данные в цифровом виде в компьютер;

– вырабатывать команды управления для разделения и утилизации потоков жидкости на выходе.

Для проверки адекватности полученных аналитических выражений исследуемому процессу проведено сравнение значений сигналов на выходе комплекса и численных значений, полученных в результате расчетов при тех же входных воздействиях. В программе и методике эксперимента сформулированы требования к методу, аппаратуре и условиям проведения эксперимента, чувствительности и порогу срабатывания, произведен выбор исследуемых точек по диапазону измерений, числу измерений в точке, получению представительной выборки, установлено факторное пространство, построен план эксперимента для оценки функции влияния.

Для проведения эксперимента выбрано загрязнение воды растительным маслом. Анализ спектров поглощения воды [18] (рисунок 2) и растительного масла «Олейна» [19] (рисунок 3) показал, что в качестве излучателя целесообразно использовать лазеры с длинами волн в диапазоне 0,4–0,5 мкм, у которых минимальное поглощение излучения в водной среде и значительное поглощение в среде примеси, например фиолетовый лазер *STLL-MM*-405-200-52-*A* с длиной волны 0,405 мкм и мощностью 200 мВт. В качестве фотоприемника можно использовать, например, фотодиод типа *PDV-V*400-46.

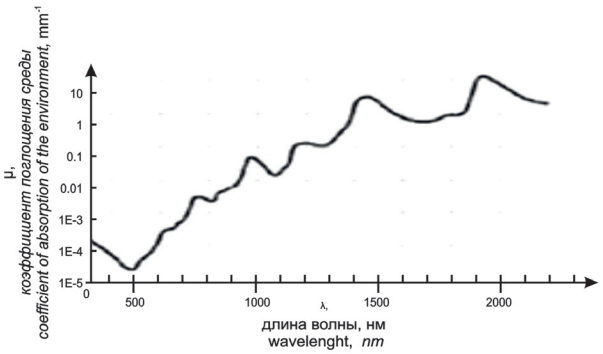


Рисунок 2 – Спектр поглощения воды [18]

Figure 2 – Absorption spectrum of water [18]

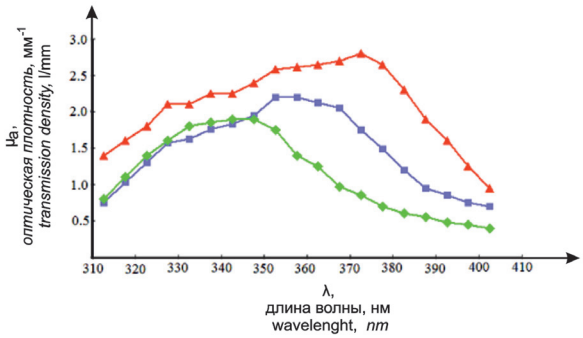


Рисунок 3 – Спектр поглощения растительного масла: ♦ – холодное масло; ■ – масло после тепловой обработки; Δ – осадок после тепловой обработки масла [19]

Figure 3 – Absorption spectrum of vegetable oil: ♦ – cold vegetable oil; ■ – oil after thermal treatment; Δ – a sediment after thermal treatment of oil [19]

Вследствие того, что во время эксперимента режимы работы комплекса остаются неизменными, для оценки неопределенности показаний в статическом режиме и нормальных условиях эксплуатации для однопараметрического сигнала получим:

$$y = k_0 x \tag{1}$$

где k_0 – реализация случайного коэффициента преобразования.

При изменении входного сигнала на величину Δx выходной сигнал изменится на величину Δy с учетом новой реализации случайного коэффициента преобразования k_1, в общем случае,

учитывающем возможность изменения условий эксперимента (загрязнение оптики, нелинейные процессы в водной среде, динамические изменения потока сточных вод и др.):

$$y + \Delta y = k_1(x + \Delta x), \tag{2}$$

где k_1 – последующая реализация случайного коэффициента преобразования.

Разделив почленно полученные выражения (2) и (1), получим выражение для расчета относительного изменения выходного сигнала:

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{k_1(x + \Delta x)}{k_0 x} - 1 . \tag{3}$$

В эксперименте входным сигналом является степень загрязнения водной среды растительным маслом, выходным сигналом – оптическая плотность водной среды. В статическом режиме и нормальных условиях эксплуатации начальными (исходным) считаем отсутствие загрязнений водной среды (содержание растительного масла нуль процентов) и соответствующее этим условиям значение оптической плотности. Изменение входного сигнала производится введением загрязнения на заданную относительную величину от исходного (в процентах), при этом определяется относительное изменение в процентах выходного сигнала от исходного, полученного при отсутствии загрязнения.

Для экспериментального определения зависимости относительного изменения выходного сигнала от относительного изменения входного сигнала проведен эксперимент при загрязнении воды растительным маслом в соотношении 0 %, 60 %, 100 %. В эксперименте использовались в качестве источника излучения полупроводниковый лазер с длиной волны λ = 0,619 мкм, в качестве фотоприемника – фотодиод типа ФД-К-155, диапазон спектральной чувствительности которого 0,4–1,1 мкм, максимальная спектральная чувствительность в области 0,75–0,85 мкм, расстояния между защитными окнами источника излучения и фотоприемника 15 мм.

Полученные графики изменения оптической плотности водной среды приведены на рисунке 4.

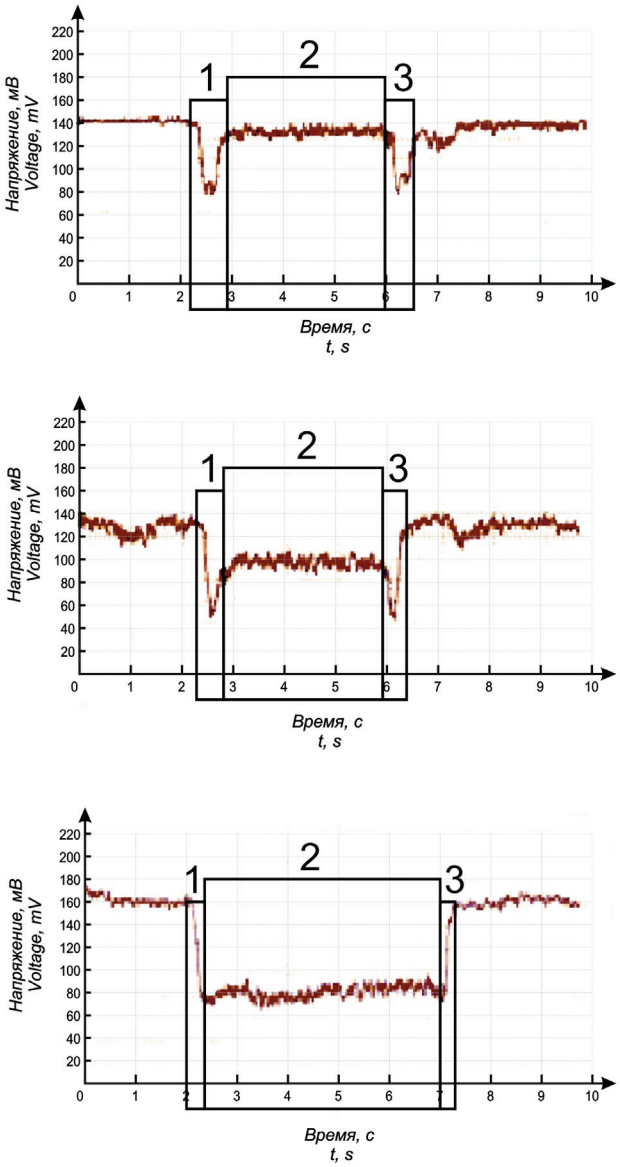


Рисунок 4 – Графики изменения оптической плотности водной среды при загрязнении воды растительным маслом в соотношении: *a* – 0 %; *b* – 60 %; *c* – 100 %; 1 – начало прохождения через оптический тракт потока водной среды, загрязненной маслом; 2 – прохождение потока загрязнения через оптический тракт; 3 –окончание прохождения потока масла через оптический тракт

Figure 4 – Schedules of change of optical density of the water environment at water pollution by vegetable oil in the ratio: *a* – 0 %; *b* – 60 %; *c* – 100 %; 1 – the beginning of passing through an optical path of a stream of the water environment polluted by oil; 2 – passing of a stream of pollution through an optical path; 3 – the end of passing of a stream of oil through an optical path

На графиках область, обозначенная цифрой 1, соответствует моменту начала прохождения через оптический тракт потока водной среды, загрязненной маслом, и связанному с этим изменением коэффициентов пропускания, отра-

жения и поглощения жидкой среды. Область 2 соответствует прохождению потока загрязнения через оптический тракт. Среднее значение оптической плотности при прохождении потока масла через оптический тракт выше, чем при прохождении потоков чистой воды, соответственно, уровень сигнала снижается. Область 3 соответствует моменту окончания прохождения потока масла через оптический тракт.

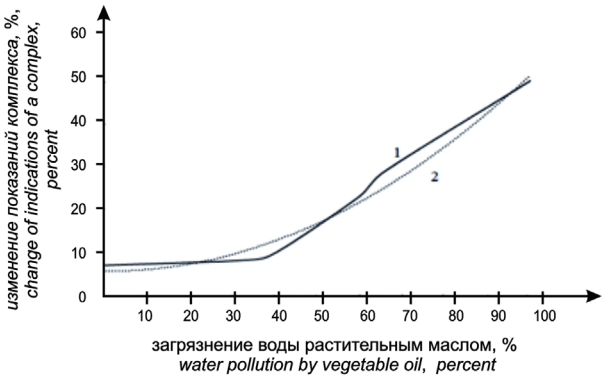
Результаты и их обсуждение

В результате обработки приведенных кривых по выражениям (1)–(3) рассчитана зависимость изменения оптической плотности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом, график которой приведен на рисунке 5.

Для определения аналитических выражений применен метод интерполяции и экстраполяции с использованием аппроксимации по методу наименьших квадратов с выполнением условия:

$$F = \sum_{i=1}^{n} [Y_i - y(t_i)]^2 \to \min,$$

где F – минимизируемая функция; Y_i – эмпирические точки статистической зависимости; $y(t_i)$ – аналитическая функциональная зависимость.



ности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом: 1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

Figure 5 – Schedule of dependence of change of optical density of the water environment on extent of its pollution by vegetable oil: 1 – experimental curve; 2 – calculated curve

Зависимость изменения оптической плотности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом (рисунок 5) с достаточной степенью точности аппроксимируется полиномиальным выражением второго порядка $y = 0,0047x^2 - 0,0167x + 5,7737$.

В диапазоне от 30 % до 100 % (рисунок 6) зависимость изменения оптической плотности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом с большой степенью точности аппроксимируется линейной зависимостью $y = 0,6304x - 13,485$.

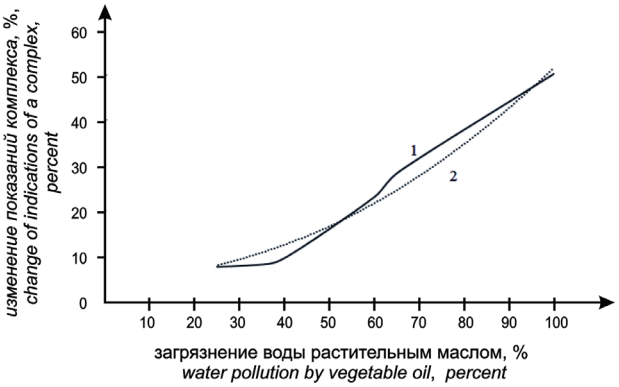


Рисунок 6 – Зависимость изменения оптической плотности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом в диапазоне от 30 % до 100 %: 1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

Figure 6 – Schedule of dependence of change of optical density of the water environment on extent of its pollution by vegetable oil in the range from 30 % to 100 %: 1 – experimental curve; 2 – calculated curve

В диапазоне от 0 % до 35 % (рисунок 7) зависимость изменения оптической плотности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом с большой степенью точности аппроксимируется линейной зависимостью $y = 0,0364x + 7,1$.

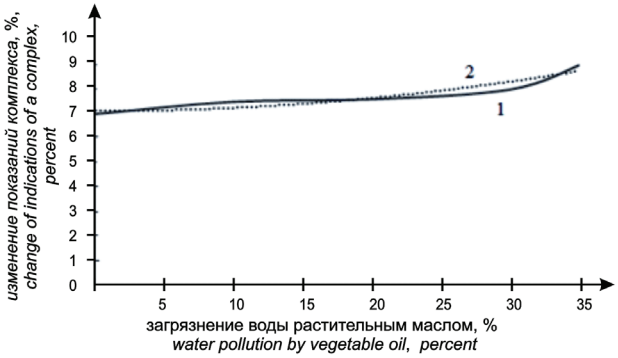


Рисунок 7 – Зависимость изменения оптической плотности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом в диапазоне от 0 % до 35 %: 1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

Figure 7 – Schedule of dependence of change of optical density of the water environment on extent of its pollution by vegetable oil in the range from 0 % to 35 %: 1 – experimental curve; 2 – calculated curve

Повышение эффективности оптоэлектронного контроля загрязнения сточных вод, повы-

шение достоверности, объективности, оперативности, снижение длительности процедуры контроля, исключение влияния методики и аппаратуры контроля на санитарно-бактериологические свойства контролируемых проб обеспечивается учетом стохастической зависимости между видом и степенью загрязнения и реакцией экосистемы. В результате анализа спектров поглощения воды как основного компонента сточных вод и загрязнителей в виде масел, нефти и нефтепродуктов выбран рабочий диапазон частот от 0,25 до 0,60 мкм. В этом диапазоне вода достаточно прозрачна, что позволяет оптическому излучению проникать на большую глубину, а следы загрязнений, даже небольшого размера, хорошо различимына фоне естественных природных трендов.

Проведение натурных экспериментов на специализированной экспериментальной установке, разработанной на основе имитационной модели поступления загрязнения сточных вод на очистные сооружения, позволяющей имитировать любое из распространенных загрязнений, вид, содержание и концентрацию загрязнений, влияние факторов, снижающих достоверность контроля, позволило экспериментально обосновать правильность выбора точности, чувствительности, диапазона измерения, быстродействия, функциональных возможностей комплекса контроля изменений оптической плотности сточных вод.

Заключение

В данной работе вместо традиционных приборов измерения мутности жидкости предлагается оптико-электронный комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод промышленного предприятия, позволяющий выявлять аварийные сбросы загрязнений в виде сгустков в сточных водах.

В отличие от имеющихся аналогов комплекс работает в реальном масштабе времени и позволяет управлять исполнительным устройством в сточной трубе для сброса сгустка загрязнений для утилизации. Разработанный комплекс контроля сточных вод и промышленных стоков, использующий в качестве информативного параметра изменение оптической плотности, достаточно перспективен в комплексном обеспечении стабильности функционирования экосистемы, даже при экспресс-контроле состава жидких сред с близкими оптическими характеристиками, например загрязненной воды, оптическая плотность которой 0,40 и нерафинированного подсолнечного масла, оптическая плотность которого 0,36.

Список использованных источников

1. *Казин, В.Н.* Физико-химические методы исследования в экологии и биологии / В.Н. Казин, Г.А. Урванцева. – Ярославль : Яросл. гос. ун-т, 2002. – 173 с.

2. *Hussain, S.* Instrumental methods used for environmental monitoring / S. Hussain, M. Farooqui // Journal of Industrial Pollution Control. – 2005. – Vol. 21, no. 2. – P. 273 – 276.

3. *Bhargava, R.* Infrared Spectroscopic Imaging: The Next Generation / R. Bhargava // Applied Spectroscopy. – 2012. – Vol. 66, no. 10. – P. 1091–1120.
doi: 10.1366/12-06801

4. *Mizaikoff, B.* Infrared optical sensors for water quality monitoring / B. Mizaikoff // Water Science and Technology. – 2003. – Vol. 47, no. 2. – P. 35–42.

5. *O'Toole, M.* Absorbance Based Light Emitting Diode Optical Sensors and Sensing Devices / M. O'Toole, D. Diamond // Sensors. – 2008. – No. 8. – P. 2453–2479.
doi: 10.3390/s8042453

6. *Murphy, K.* A low-cost autonomous optical sensor for water quality monitoring / K. Murphy [et al.] // Talanta. – 2015. – Vol. 132. – P. 520–527.

7. Колориметр портативный Hach DR 900 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ecoinstrument.ru. – Дата доступа: 10.11.2017.

8. Оптические датчики контроля и мониторинга различных жидкостей, питьевой воды и сточных вод «Optek» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http//optek.com. – Дата доступа: 05.11.2017.

9. *Фетисов, В.С.* Бесконтактные поточные датчики мутности жидких сред / В.С. Фетисов, Е.В. Цих // Датчики и системы. – 2004. № 7. – С. 61–65.

10. Измерители и датчики мутности Mettler Toledo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mt.com. – Дата доступа: 07.11.2017.

11. Датчик мутности VisoTurb 700 IQ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ecoinstrument.ru/catalog/datchiki_iq_sensor_net/datchikmutnostivisoturb700iq. – Дата доступа: 10.11.2017.

12. *Козлов, В.Л.* Прозрачномеры-газоанализаторы на двухволновом полупроводниковом лазере / В.Л. Козлов, М.М. Кугейко // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2 (3). – С. 5–12.

13. *Алексеев, В.А.* Контроль загрязнений сточных вод и промышленных стоков с использованием двухчастотного лазерного зондирования / В.А. Алексеев, В.П. Усольцев, С.И. Юран // Безопасность в техносфере. – 2017. – № 1. – С. 3–9.
doi: 10.12737/article_5901928bac1f44.76816878

14. *Кабанов, Д.М.* Прибор на основе GaInAsSb светодиодов для измерения содержания воды в неф-

ти / Д.М. Кабанов [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8. – № 2. – С. 142–150.
doi: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-142-150

15. *Рахимов, Н.Р.* Оптоэлектронные методы измерения и контроля технологических параметров нефти и нефтепродуктов / Н.Р. Рахимов [и др.] // Автоматика и программная инженерия. – 2015. – № 2 (12). – С. 85–108.

16. Патент №153362 РФ на полезную модель. МПК G01N15/06. Устройство устранения аварийного выброса / В.А. Алексеев, Н.А. Девятов, С.И. Юран, В.П. Усольцев. – Заявка на полезную модель 2014141487. – Дата подачи заявки: 14.10.2014. Опубликовано: 20.07.2015. Бюл. № 20.

17. *Алексеев, В.А.* Автоматизация регистрации и обработки измерительной информации при испытаниях техники на ударное воздействие: монография / В.А. Алексеев, В.И. Заболотских. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2006. – 184 с.

18. *Niemz, M.H.* Laser – Tissue Interactions: Fundamentals and Applications / M.H. Niemz / – Berlin : Springer, 1996. – 302 p.

19. *Перевозников, Е.Н.* Влияние тепловой обработки на физические характеристики и полимеризацию растительных масел / Е.Н. Перевозников, В.В. Слугин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 3 (45). – Ч. 3. – С. 94–96.

References

1. Kazin V.N., Urvantseva G.A. *Fiziko-khimicheskie metody issledovaniya v ekologii i biologii* [Physical and chemical methods of research in ecology and biology]. Yaroslavl, Yaroslavl. State University, 2002, 173 p. (in Russian).

2. Hussain S. Farooqui M. Instrumental methods used for environmental monitoring. *Journal of Industrial Pollution Control,* 2005, vol. 21, no. 2, pp. 273–276.

3. Bhargava R. Infrared Spectroscopic Imaging: The Next Generation. *Applied Spectroscopy,* 2012, vol. 66, no. 10, pp. 1091–1120. **doi:** 10.1366/12-06801

4. Mizaikoff B. Infrared optical sensors for water quality monitoring. *Water Science and Technology,* 2003, vol. 47, iss. 2, pp. 35–42.

5. O'Toole M., Diamond D. Absorbance Based Light Emitting Diode Optical Sensors and Sensing Devices. *Sensors,* 2008, no. 8, pp. 2453–2479. **doi:** 10.3390/s8042453

6. Murphy K., Heery B., Sullivan T., Zhang D., Paludetti L., Lau K.T., Diamond D., Costa E., O'Connor N., Regan F. A low-cost autonomous optical sensor for water quality monitoring. *Talanta,* 2015, vol. 132, pp. 520–527. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.09.045

7. *Kolorimetr portativnyj Hach DR 900* [Portable colorimeter Hach DR 900]. Available at: http://www.ecoinstrument.ru (accessed: 10.11.2017) (in Russian).

8. *Opticheskie datchiki kontrolya i monitoringa razlichnykh zhidkostei, pit'evoi vody i stochnykh vod «Optek»* [Optical sensors of control and monitoring of various liquids, drinking water and Optek sewage]. Available at: http//optek.com (accessed: 05.11.2017) (in Russian).

9. Fetisov V.S., Cih E.V. [Contactless in-line sensors of turbidity of liquid media]. *Sensors & Systems,* 2004, no. 7, pp. 61–65 (in Russian).

10. *Izmeriteli i datchiki mutnosti Mettler Toledo* [Measuring instruments and sensors of turbidity Mettler Toledo]. Available at: https://www.mt.com (accessed: 07.11.2017) (in Russian).

11. *Datchik mutnosti VisoTurb 700 IQ* [Turbidity sensor VisoTurb 700 IQ]. Available at: http://www.ecoinstrument.ru/catalog/datchiki_iq_sensor_net/datchikmutnostivisoturb700iq (accessed: 10.11.2017) (in Russian).

12. Kozlov V.L., Kugejko M.M. [Transparency meters and gas analyzers based on two-wavelength semiconductor lasers]. *Devices and Methods of Measurements,* 2011, no. 2 (3), pp. 5–12 (in Russian).

13. Alekseev V.A., Usol'cev V.P., Yuran S.I. [Wastewaters Pollution Control Using Two-Frequency Laser Sounding]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere], 2017, no. 1, pp. 3–9 (in Russian).
doi: 10.12737/article_5901928bac1f44.76816878

14. Kabanov D.M., Lebiadok Y.V., Shpak P.V., Zhuk S.M., Stashkevich S.P. [Device based onGaInAsSb LEDs for measurement of water concentration in oil]. *Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 142–150 (in Russian).
doi: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-142-150

15. Rahimov N.R., ZHmud' V.A., Trushin V.A., Reva I.L., Satvoldiev I.A. [Optoelectronic Measurement and Control of Technological Parameters of Crude Oil and Petroleum Products]. *Automatics & Software Enginery,* 2015, no. 2 (12), pp. 85–108 (in Russian).

16. Alekseev V.A., Devyatov N.A, Yuran S.I., Usoltsev V.P. *Ustroistvo ustraneniya avariinogo vybrosa* [The device of elimination of emergency emission]. Patent RF, no. 153362, 2015.

17. Alekseev V.A., Zabolotskih V.I. *Avtomatizatsiya registratsii i obrabotki izmeritel'noi informatsii pri ispytaniyakh tekhniki na udarnoe vozdeistvie: monografiya* [Automation of registration and processing of measuring information at tests of the equipment for shock influence]. Izhevsk, Izhevsk State Technical University, 2006, 184 p. (in Russian).

18. Niemz M.H. Laser – Tissue Interactions: Fundamentals and Applications. Berlin, Springer Publ., 1996, 302 p.

19. Perevoznikov E.N., Slugin V.V. [Influence of thermal treatment on physical characteristics and polymerization of vegetable oils]. *International Research Journal,* 2016, no. 3 (45), part 3, pp. 394–96 (in Russian).