

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.785: 504.064

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-1-4-9

### Система мониторинга сточных вод промышленного предприятия

*В. А. Алексеев*, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В. П. Усольцев*, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*С. И. Юран*, доктор технических наук, профессор, ИжГСХА, Ижевск, Россия

*Д. Н. Буранов*, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Д. Н. Шульмин*, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В статье рассматриваются принципы построения существующих систем мониторинга сточных вод, в том числе в аварийной ситуации на предприятии. Проведенный анализ систем показал их недостатки, где выделяется низкая достоверность контроля загрязнений. Предлагается устранить этот недостаток путем применения определенного количества оптоэлектронных датчиков, имеющих источники излучения с разной длиной волны. Это позволяет более точно определять состав загрязняющего вещества. Для решения задачи идентификации сгустка загрязняющего вещества и направления его на определенный фильтр используются системы распознавания сгустка по его соотношению отдельных составляющих. Для этого используется матрица отношения порядка на составляющие в виде решетчатой функции. При этом предлагается использовать гомоморфный эталон матрицы отношения, например, в виде диагоналей.*

*В процессе контроля сигналы с датчиков, пропорциональные значениям оптической плотности контролируемой среды, обрабатываются и преобразуются в виде решетчатой функции, которая отражает амплитудные значения оптической плотности контролируемой среды на различных частотах излучения. Далее из значений решетчатой функции формируется текущая матрица отношения. Значения этой матрицы отношения поступают в блок распознавания, в котором сравниваются значения текущей матрицы отношения со значениями эталонных матриц отношений, хранящихся в блоке эталонов. Если в результате сравнения произошло совпадение элементов текущей матрицы с элементами какой-либо эталонной матрицы или элементами нескольких матриц, в блоке управления задвижками вырабатываются сигналы управления на закрытие задвижки на основном трубопроводе и открытие одной или нескольких задвижек на отводах, что позволяет отвести протекающие в данный момент сточные воды с выявленным составом загрязнений на соответствующие фильтры для устранения выявленных компонентов загрязнений. Если в результате сравнения не произошло совпадений элементов текущей матрицы с элементами эталонных матриц, водная среда направляется на общий фильтр после открытия заслонки.*

**Ключевые слова:** аварийные сбросы, матрица отношения, относительное описание формы сигнала, оптическая плотность, спектроскопия.

#### Введение. Постановка задачи

Проведение анализа сточных вод затруднено не только их сложным составом, но и большим диапазоном изменений концентрации входящих в их состав примесей, а также зависимости состава сточных вод от времени [1]. Определение некоторых загрязняющих веществ, ухудшающих качество воды даже в небольших количествах, представляет достаточно сложную задачу.

Как правило, аналитические методы контроля работы очистных сооружений занимают значительное время. Кроме того, часто анализ проб затруднен присутствием в водной среде допол-

нительных веществ, не предусмотренных в используемых методиках контроля.

Разработка и внедрение автоматизированных систем мониторинга водной среды позволяет сократить время на проведение анализа загрязнений сточных вод и успешно вести оперативный контроль работы очистных сооружений [2–5].

В целях мониторинга широко используются различные системы и устройства контроля загрязнения путем измерения концентрации загрязняющего компонента в воде с помощью переносных приборов или стационарных многопараметрических анализаторов [6–8] и [авт. свид. 1134547 СССР, МПК C02F 1/00, G01N

33/18. Автоматическая станция контроля качества природных и сточных вод / Белогуров В.П., Попов Л.Е., Микоткин Б.Г. Заявка: 3542717, 25.01.1983. опубл. 1985. Бюл. № 2].

Так, например, для измерения (контроля) загрязнения реки сточными водами [пат. 2415420 РФ, МПК G01N 33/18, G01N 1/00. Способ измерения загрязнения реки сточными водами / Мазуркин П.М., Воронцова З.В. Заявка: 2009133899/15, 09.09.2009; опубл. 2011, бюл. № 9], осуществляют отбор проб воды в запланированных местах наблюдений, проводят анализ этих проб, далее для оценки результатов измерений в динамике вдоль русла реки подвергают их статистическому моделированию для выявления биотехнических закономерностей изменения концентрации загрязняющих веществ в речной воде.

Целью работы является разработка системы, позволяющей повысить достоверность контроля состава сточных вод предприятий, в том числе при аварии на предприятии.

#### **Используемые подходы**

В патенте [пат. 153362 РФ, МПК G01N 15/06. Устройство устранения аварийного выброса / Алексеев В. А., Девятов Н. А., Юран С. И., Усольцев В. П., Заявка: 2014141487/28, 14.10.2014. Опубл. 20.07.2015 Бюл. № 20] описано устройство, позволяющее предотвратить попадание загрязняющих веществ, образующихся в результате аварийного сброса, в водоем. В данном устройстве выполняется измерение оптической плотности водной среды как в основном канале движения жидкости, так и в отводах, сравнении текущих значений оптической плотности с эталонными значениями оптической плотности контролируемой среды, хранящимися в блоке обработки и управления. Если оптическая плотность жидкости не превышает допустимого порогового значения, контролируемая среда фильтруется с помощью фильтра очистки, который расположен в основном канале. В случае выхода величины текущей оптической плотности за допустимые пороги, что может произойти, например, при аварии на объекте контроля, формируются управляющие сигналы на те элементы блокировки контролируемой среды (задвижки), в отводах которых установлены дополнительные фильтры, предназначенные для фильтрации соответствующих компонентов, содержащихся в продуктах аварийного сброса. При открытии соответствующих задвижек компоненты аварийного сброса фильтруются дополнительными фильтрами, установленными в этих отводах, после чего очи-

щенная вода поступает в окружающую среду. В случае выхода величины текущей оптической плотности возможных остатков загрязняющего вещества за допустимый порог они вместе с контролируемой средой утилизируются.

Существенным недостатком приведенных методов и устройств, предназначенных для этих целей, является низкая достоверность контроля загрязнений, так как не учитывается состояние водной среды в промежутках времени между анализами, то есть когда производится взятие, хранение взятых проб и обработка полученных результатов. При этом загрязнение вообще может не попасть в пробу или в зону контроля. В случае контроля оптической плотности водной среды не обеспечивается необходимая достоверность контроля, поскольку контролируется только один параметр водной среды, а именно, оптическая плотность, измеренная на одной длине волны излучения [9–11]. Представляет интерес построение системы контроля, использующей множество датчиков с различными волнами зондирующего излучения.

#### **Структурная схема системы**

Структурная схема разработанной системы контроля и фильтрации сточных вод приведена на рисунке. Система содержит основной канал 2 движения контролируемой среды 1, например, трубопровод, элемент блокировки движения контролируемой среды (задвижку) 3 и фильтр очистки 4, отводы (ответвления) 5 от канала 2, снабженные элементами блокировки движения контролируемой среды (задвижками) 6 и фильтрами очистки 7 соответствующих компонентов загрязнений, анализатор оптической плотности контролируемой среды 8, включающий  $n$  оптоэлектронных датчиков, имеющих источники излучения с различной длиной волны (датчики в канале 2 установлены до расположения первого отвода (ответвления) 5), и устройств обработки и преобразования, блок распознавания 9, блок подготовки эталонов 10 и блок эталонов 11, блок управления элементами блокировки движения контролируемой среды (задвижками) 12. Для повышения точности контроля в анализаторе оптической плотности контролируемой среды 8 может быть использовано, например, 5–6 источников излучения (лазеров) с различной длиной волны. В этом случае может быть более точно установлен состав загрязняющего вещества или сгустка, которые появились в водной среде в результате, например, аварии на контролируемом предприятии.

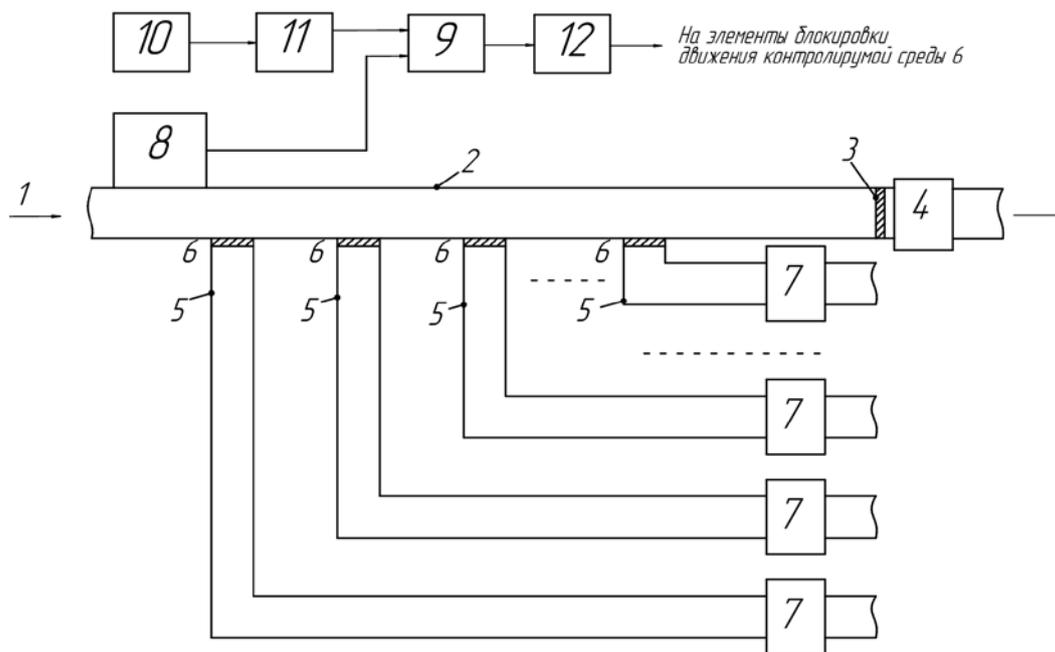
В случае возникновения аварийного сброса в виде сгустка, состоящего из нескольких загряз-

няющих веществ, возникает задача идентификации сгустка для направления его в выделенный для него фильтр. При этом в течение времени концентрация компонентов сгустка может изменяться, а состав сгустка, то есть соотношение между его компонентами, остается без изменения. В этом случае использование оптоэлектронных датчиков с несколькими длинами волн излучения позволяет точнее определить состав сгустка по соотношению спектральных составляющих выходных сигналов.

Блок подготовки эталонов, блок эталонов и блок распознавания могут быть реализованы в виде микропроцессорной системы, реализую-

щей алгоритм распознавания. В памяти системы хранятся виртуальные эталоны возможных загрязняющих веществ. Блок управления элементами блокировки движения контролируемой среды может быть реализован в виде промышленного контроллера.

В анализаторе оптической плотности контролируемой среды 8 сигналы с  $n$  датчиков, пропорциональные значениям оптической плотности контролируемой среды на различных частотах излучения, обрабатываются и представляются в виде решетчатой функции, которая отражает амплитудные значения оптической плотности на разных частотах излучения.



Структурная схема системы мониторинга

Каждая решетчатая функция имеет свою форму огибающей. Форму решетчатой функции удобно анализировать с помощью матрицы отношения составляющих решетчатой функции, построенную через отношения порядка между составляющими решетчатой функции [12]. Представление решетчатой функции в виде матрицы отношения инвариантно к линейным изменениям решетчатой функции, что имеет существенное значение для анализа характеристик потоков с различной плотностью сточных вод.

Рассмотрим модельный эксперимент. Предположим, на предприятии хранятся вещества в цистернах – фенол и дизельное топливо. Произошла запроектная авария, и одно из веществ при разливе цистерны попало в сточную трубу предприятия. Необходимо обнаружить сгусток вещества в трубе и идентифицировать его для

выработки сигнала управления для направления сгустка к выделенному для данного вещества фильтру.

Предварительно проводится подготовка системы к возможным авариям. Для этого анализируются спектры веществ, которые могут появиться в трубе при запроектной аварии. В данном примере – это фенол и дизельное топливо. В результате спектрального анализа этих веществ выделяются несколько экстремальных значений спектров для каждого из выбранных веществ. Например, экстремумы спектров дизельного топлива и фенола находятся в ИК-диапазоне. Для дизельного топлива это: 3,3 мкм, 3,5 мкм, 6,8 мкм. Для фенола: 2,8 мкм, 3,3 мкм, 3,4 мкм. Полученные значения определяют длины волн излучателей оптоэлектронных датчиков системы, которые располагаются последовательно вдоль трубы по возрастанию длин волн

излучения. Тогда общая шкала длин волн зондирующего излучения будет содержать: 2,8 мкм, 3,3 мкм, 3,4 мкм, 3,5 мкм, 6,8 мкм.

При зондировании сточной воды наличие сгустка фиксируется в виде амплитуды сигнала с фотоприемника оптоэлектронного датчика, превышающего заранее определенный уровень сигнала. От каждого зондирующего излучения оптоэлектронного датчика будут зафиксированы величины сигналов: (S1, S2, S3, S4, S5). Построенная решетчатая функция РФ будет содержать набор величин S.

На базе полученной РФ может быть получена матрица отношений составляющих РФ в виде

$$[R]= \begin{bmatrix} S_1R_{12}S_2 & S_1R_{13}S_3 & S_1R_{14}S_4 & S_1R_{15}S_5 \\ & S_2R_{23}S_3 & S_2R_{24}S_4 & S_2R_{25}S_5 \\ & & S_3R_{34}S_4 & S_3R_{35}S_5 \\ & & & S_4R_{45}S_5 \end{bmatrix}.$$

Для идентификации вещества используем главную диагональ матрицы отношений с переводом в изображающие числа: (0,1). Далее идет сравнение полученной последовательности чисел из главной диагонали с эталоном, заложенным в компьютер заранее.

Рассмотрим пример. Пусть в результате зондирования среды заданными длинами волн излучения на основании сигналов с фотодатчика системы получена РФ для дизельного топлива, которая в условных единицах представлена значениями 3, 12, 9, 2, 5.

Построим матрицу отношений  $[R]_{и}$  для этого случая в виде изображающих чисел. При этом значения элементов матрицы  $P_{ij}$  определяются с использованием следующего условия

$$P_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } S_i \geq S_j, \\ 0, & \text{если } S_i < S_j; \end{cases}$$

$$[R]_{и} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ & 1 & 1 & 1 \\ & & 1 & 1 \\ & & & 0 \end{bmatrix}.$$

Главная диагональ матрицы будет иметь вид: [0110]. Она и является образом, который сравнивается с эталоном.

Блок эталонов 11 формируется заранее с помощью блока подготовки эталонов 10 на основе экспериментального исследования значений оптической плотности контролируемой среды,

содержащей возможные компоненты загрязняющих веществ контролируемого предприятия, на различных длинах волн излучения. Основным элементом блока 10 является спектрофотометр. На основе полученных значений оптической плотности формируется решетчатая функция для каждого из возможных компонентов загрязняющих веществ, и на ее основе строится матрица отношения. После этого матрицы отношений всех возможных компонентов загрязняющих веществ контролируемого предприятия заносятся в блок эталонов 11. Возможно создание атласа матриц отношений спектров различных веществ, которые могут находиться на предприятии для данного вида производства. Для этого предварительно создается банк спектральной оптической плотности веществ. Из полученного банка спектров выделяются экстремальные значения спектров каждого вещества, на базе которых и строятся решетчатые функции и матрицы отношений. Полученные значения длин волн являются основой для выбора длин волн источников излучения в системе. При этом рассматриваются несколько спектров веществ.

В блоке распознавания 9 производится сравнение текущих матриц отношений, полученных в результате измерений оптических плотностей контролируемой среды и матриц отношений, хранящихся в блоке эталонов 11.

Следует сказать, что главная диагональ матрицы отношения достаточно полно характеризует решетчатую функцию. Поэтому для оперативности контроля можно вместо сравнения всех элементов матриц отношений ограничиться сравнением элементов только главной диагонали текущей и эталонных матриц отношений.

### Выводы

Процесс сравнения с использованием представления компонентов загрязнений в виде матрицы отношения занимает незначительное время. Это позволяет оперативно выбирать соответствующий фильтр и тем самым повысить качество очистки сточных вод.

Реализация системы позволяет с большей степенью вероятности распознать эти загрязнения за счет более точного описания параметров известных заранее загрязнений, появившихся в водной среде, что повышает достоверность контроля и позволяет правильно (целенаправленно) выбрать варианты очистки водной среды от этих загрязнений. В результате при эксплуатации данной системы снижается вероятность пропуска заранее известных загрязнений, которые могут появиться в сточных водах, напри-

мер, в результате аварии на промышленном предприятии и, следовательно, повышается качество очистки сточных вод за счет оперативного выбора соответствующего фильтра очистки.

### Библиографические ссылки

1. Александровская Л. Н., Розенталь О. М. Риск-ориентированный контроль содержания в воде загрязняющих веществ // Аналитика и контроль. 2016. Т. 20. № 1. С. 6–14.
2. Комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод / В. А. Алексеев, В. П. Усольцев, С. И. Юран, Д. Н. Шульмин // Приборы и методы измерений. 2018. № 9 (1). С. 7–16. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16.
3. Skouteris G., Webb D. Patrick, Shin Kei Lok Felix, Rahimifard Sh. Assessment of the capability of an optical sensor for in-line real-time wastewater quality analysis in food manufacturing // Water Resources and Industry. 2018. Vol. 20. December. P. 75-81. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wri.2018.10.002>.
4. Автоматический контроль очищенных сточных вод / И. О. Тихонова, Т. В. Гусева, Я. П. Молчанова, М. В. Бегак // Экология производства. 2018. № 4. С. 52–59.
5. Tomperi J., Koivuranta E., Leiviskä K. Predicting the effluent quality of an industrial wastewater treatment plant by way of optical monitoring // Journal of Water Process Engineering. 2017. Vol. 16. April. P. 283-289. DOI: 10.1016/J.JWPE.2017.02.004.
6. Козлов В. Л., Кугейко М. М. Прозрачномеры-газоанализаторы на двухволновом полупроводниковом лазере // Приборы и методы измерений. 2011. № 2 (3). С. 5–12.
7. Оптоэлектронные методы измерения и контроля технологических параметров нефти и нефтепродуктов / Н. Р. Рахимов, В. А. Жмудь, В. А. Трушин, И. Л. Рева, И. А. Сатволдиев // Автоматика и программная инженерия. 2015. № 2 (12). С. 85–108.
8. Измеритель содержания воды в нефти и нефтепродуктах на основе инфракрасных оптоэлектронных пар светодиод – фотодиод / М. В. Богданович, Д. М. Кабанов, Е. В. Лебедев, П. В. Шпак, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, М. А. Щемелев, И. А. Андреев, Е. В. Куницына, Э. В. Иванов, Ю. П. Яковлев // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 2. С. 315–318. DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44146.1791.
9. Bhargava R. Infrared Spectroscopic Imaging: The Next Generation // Applied Spectroscopy. 2012. Vol. 66. № 10. P. 1091–1120. <https://doi.org/10.1366/12-06801>.
10. 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, 520–527. URL: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.09.045>.
11. Thomas O., Constant D. Trends in optical monitoring // Water Science & Technology. 2004. V.49 № 1. P. 1-8. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0001>.

12. Alekseev V.A., Yuran S.I., Usoltsev V.P., Shulmin D.N. System of Laser Monitoring of Water Pollution with Application of Relative Description of Signal Shape // Devices and Methods of Measurements. 2020. № 11(2). P. 114–121. URL: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2020-11-2-114-121>.

### References

1. Aleksandrovskaya L.N., Rozental O.M. [Risk-oriented control the concentration of pollutants]. *Analitika i kontrol*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 6-14 (in Russ.)
2. Alekseev V.A., Usol'cev V.P., YURAN S.I., SHul'min D.N. (2018). [Complex for monitoring of sewage optical density changes]. *Pribory i metody izmerenij*, 2018, no. 9(1), pp. 7–16 (in Russ.). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16>.
3. Skouteris G., Webb D. Patrick, Shin Kei Lok Felix, Rahimifard Sh. [Assessment of the capability of an optical sensor for in-line real-time wastewater quality analysis in food manufacturing]. *Water Resources and Industry*, 2018, vol. 20, December. Pp. 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2018.10.002>.
4. Tihonova I.O., Guseva T.V., Molchanova YA.P., Begak M.V. [Automatic control of treated wastewater]. *Ekologiya proizvodstva*, 2018, no. 4, pp. 52-59.
5. Tomperi J., Koivuranta E., Leiviskä K. [Predicting the effluent quality of an industrial wastewater treatment plant by way of optical monitoring]. *Journal of Water Process Engineering*, 2017, vol. 16, April, pp. 283-289. DOI:10.1016/J.JWPE.2017.02.004
6. Kozlov V.L., Kugejko M.M. [Transparency meters and gas analyzers based on two-wavelength semiconductor lasers]. *Pribory i metody izmerenij*, 2011, no. 2(3), pp. 5-12 (in Russ.).
7. 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]. *Avtomatika i programmnaya inzheneriya*, 2015, no. 2 (12), pp. 85-108 (in Russ.).
8. Bogdanovich M.V., Kabanov D.M., Lebedok E.V., SHpak P.V., Ryabcev A.G., Ryabcev G.I., SHChemelev M.A., Andreev I.A., Kunicyna E.V., Ivanov E.V., YAKovlev YU.P. [Water content meter in oil and petroleum products based on infrared optoelectronic pairs LED-photodiode]. *ZHurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2017, vol. 87, № 2, pp. 315-318. DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44146.1791 (in Russ.).
9. Bhargava R. [Infrared Spectroscopic Imaging: The Next Generation] *Applied Spectroscopy*. 2012, vol. 66, no. 10, pp. 1091-1120. <https://doi.org/10.1366/12-06801>.
10. 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>.
11. Thomas O., Constant D. [Trends in optical monitoring]. *Water Science & Technology*, 2004, vol. 49, № 1, pp. 1-8. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0001>.

12. Alekseev V.A., Yuran S.I., Usoltsev V.P., Shulmin D.N. [System of Laser Monitoring of Water Pollution with Application of Relative Description of Signal Shape]. *Devices and Methods of Measurements*, 2020, no. 11(2), pp. 114–121. [https://doi: 10.21122/2220-9506-2020-11-2-114-121](https://doi.org/10.21122/2220-9506-2020-11-2-114-121).

\*\*\*

### Wastewater Monitoring System of Industrial Enterprises

V. A. Alekseev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia  
V. P. Usoltsev, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia  
S. I. Yuran, DSc in Engineering, Professor, Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia  
D. N. Buranov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia  
D. N. Shulmin, PhD applicant, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The paper discusses the principles of the structure of existing wastewater monitoring systems at the enterprise, including emergency situations. The analysis of the systems showed their shortcomings, where the low reliability of pollution control is distinguished. It is proposed to eliminate this drawback by using a certain number of optoelectronic sensors having radiation sources of different wavelength. This makes it possible to more accurately determine the composition of the pollutant. To solve the problem of identifying a clot of a contaminant and directing it to a certain filter, clot recognition systems are used based on its ratio of individual components. To do this, a matrix of the ratio of order to components in the form of a lattice function is used. In this case, it is proposed to use a homomorphic standard of the relation matrix, for example, in the form of diagonals.*

*In process of control, signals from sensors proportional to values of optical density of controlled medium are processed and converted in the form of a lattice function, which reflects amplitude values of optical density of controlled medium at different frequencies of radiation. Next, the current ratio matrix is formed from the values of the lattice function. The values of this ratio matrix are supplied to a recognition unit in which the values of the current ratio matrix are compared with the values of the reference ratio matrices stored in the reference unit. If, as a result of the comparison, the elements of the current matrix coincide with elements of any reference matrix or elements of several matrices, in the gate control unit, control signals are generated for closing the gate valve on the main pipeline and opening one or more gate valves on the branches; this allows to divert currently flowing waste water with detected contamination composition to appropriate filters for elimination of detected contamination components. If the comparison does not match the elements of the current matrix with the elements of the reference matrices, the water medium is sent to the common filter after opening the damper.*

**Keywords:** emergency discharges, relationship matrix, relative description of the signal shape, optical density, spectroscopy.

Получено: 17.12.2020