

11. **Крамской, Э. И.** Гидравлические следящие приводы со струйными усилителями / Э. И. Крамской. Л. : Машиностроение, 1972. 104 с.
12. **Крымов, Б. Г.** Исполнительные устройства систем управления летательными аппаратами / Б. Г. Крымов, Л. В. Рабинович, В. Г. Стеблецов. М. : Машиностроение, 1987. 264 с.
13. **Месропян, А. В.** О приближенной постановке задач идентификации рулевой машины с высоконапорным струйным гидроусилителем / А. В. Месропян, В. А. Целищев // Вопросы управления и проектирования в информационных и кибернетических системах. Уфа. 1996.
14. **Нейман, В. Г.** Гидроприводы авиационных систем управления / В. Г. Нейман. М. : Машиностроение, 1973. 200 с.
15. **Рехтен, А. В.** Струйная техника / А. В. Рехтен. М. : Машиностроение, 1980. 238 с.
16. **Русак, А. М.** Струйные гидравлические рулевые машины для органов управления летательных аппаратов / А. М. Русак, В. А. Целищев // Интеллектуальные автономные системы: межд. научн. издание. Уфа : УГАТУ, 1996. С. 111–116.
17. **Русак, А. М.** Система автоматического регулирования двигательной установки на твердом топливе / А. М. Русак, В. А. Целищев // Оборонная техника. 1994. № 4.
18. **Соколов, Н. И.** Адаптивные системы автоматического управления летательными аппаратами : учеб. пособие для студентов авиац. спец. вузов / В. Г. Нейман, В. Ю. Рутковский, Н. Б. Судзиловский. М. : Машиностроение, 1988. 208 с. : ил.
19. **Темный, В. П.** Основы гидроавтоматики / В. П. Темный. М. : Наука, 1972. 224 с.
20. **Тимофеев, А. В.** Построение адаптивных систем управления программным движением / А. В. Тимофеев. Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. 88 с.
21. **Технический отчет** Государственного ракетного центра «КБ им. акад. В. П. Макеева». № 5-12/201-88.
22. **Фомичев, В. М.** Безразмерные гидравлические характеристики цилиндрических насадков, учитывающие кавитацию и число Рейнольдса / В. М. Фомичев и др. // Вестник машиностроения. М., 1975. № 11.
23. **Фомичев, В. М.** Современные электрогидравлические усилители мощности / В. М. Фомичев // Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. Вып. 5. М. : Машиностроение, 1978. С. 210–223.
24. **Целищев, В. А.** Теоретические и экспериментальные исследования рулевых приводов со струйным гидроусилителем / В. А. Целищев // Ракетно-космическая техника. Серия XIV. Вып. 3. Труды межотраслевого семинара. 1996.

ОБ АВТОРЕ



Месропян Арсен Владимирович, доцент каф. прикл. гидромеханики. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1996). Канд. техн. наук по системам приводов (Пермск. гос. тех. ун-т, 2000). Иссл. в обл. гидроприводов систем управления ЛА.

УДК 535.241.6

В. С. ФЕТИСОВ, Е. В. ЦИХ, О. В. МЕЛЬНИЧУК ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

Описаны современное состояние и проблемы полевых измерений концентрации жидких дисперсных сред с помощью фотометрических измерительных преобразователей. Представлены отдельные результаты разработок фотометрических преобразователей бесконтактного типа и преобразователей с переменной измерительной базой. *Фотометрический измерительный преобразователь; жидкие дисперсные среды; концентрация*

ВВЕДЕНИЕ

Большинство жидкостей в природе и технике существует в виде жидких дисперсных сред (ЖДС): эмульсий, суспензий, коллоидных растворов. Информация о концентрации взвешенных частиц (дисперсной фазы — ДФ) часто бывает очень важна для управления многими технологическими процессами, экологического мониторинга, в научных исследованиях. Наиболее типичными примерами областей и объектов, где требуются непрерывные измерения концентрации ДФ в ЖДС, являются:

- контроль качества питьевой воды на всех этапах ее подготовки;
- контроль физико-химических параметров сточных вод;
- контроль состояния различных фильтров;
- контроль качества подготовки обратной воды, закачиваемой в скважины на нефтепромыслах для подавления нефтеносных пластов;
- контроль процессов в пищевой промышленности, в частности, в пивоварении и виноделии;
- контроль качества топлива в авиации;

- контроль процесса осаждения взвеси в резервуарах-отстойниках цехов химводоочистки ТЭЦ;
- измерения и контроль концентрации взвешенных частиц органического и неорганического происхождения в медицине и биологии;
- исследования концентрации органических и неорганических взвесей в гидрографии и океанологии и т. д.

Измерения концентрации ДФ ЖДС в полевых (промышленных) условиях имеет свою специфику и резко отличается от лабораторных измерений концентрации. Часто измерения проводятся в жестких условиях эксплуатации: в непрерывном потоке с большим расходом жидкости, при больших давлениях, в условиях коррозионной активности среды, абразивной или липкой ДФ и изменяющейся дисперсности частиц, наличии паразитных отложений солей или вязких фракций среды на датчиках. При этом доступ к датчикам часто затруднен или невозможен без остановки технологического процесса. При таких условиях весьма важны высокая надежность (и, в частности, метрологическая надежность) систем измерения концентрации, и в первую очередь это относится к первичным измерительным преобразователям. Наиболее эффективно используются те средства измерения концентрации, принцип действия которых основан на рассеянии различных зондирующих излучений, в первую очередь, радиоволновых, оптических и акустических. Однако пока не созданы достаточно надежные полевые концентратометры, удовлетворяющие всем современным требованиям, и эта задача еще ждет своего решения.



Рис. 1. Классификация концентратометров ЖДС по сферам применения

Усилия авторов данной статьи сосредоточены, в основном, на исследовании и создании измерительных преобразователей концентрации однокомпонентных разбавленных ЖДС, т.е. жидкостей, дисперсная фаза в которых однородна и ее концентрация не превышает значений порядка 0,1% об. Для полевых измерений concentra-

ций таких ЖДС наиболее приемлемыми преобразователями с точки зрения соотношения «стоимость/качество измерений» являются фотометрические преобразователи. Поэтому авторы наибольшее внимание уделяют усовершенствованию именно этого класса преобразователей, особенно в части их метрологической надежности [1, 2].

Классифицировать концентратометры ЖДС по сферам их применения можно следующим образом (рис. 1).

Наиболее интересны, с точки зрения полноты получаемой информации и обеспечения качественного контроля технологических процессов, непрерывные измерения концентрации, выполняемые без пробоотбора и пробоподготовки. Такие полевые средства измерений, как правило, рассчитываются на длительный период автоматизированной необслуживаемой работы. Их датчики могут иметь исполнения: погружное (для работы в открытых резервуарах и водоемах) или поточное, которое, в свою очередь, может различаться для устройств, предназначенных для работы в трубопроводной магистрали или резервуаре под давлением, в параллельной линии или на дренажном отводе. Портативные концентратометры могут использоваться как в лабораторных, так и полевых условиях; они рассчитаны на периодическое использование.

1. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЖДС

Средиоптических методов измерения концентрации ЖДС наибольшее практическое значение имеют фотометрические методы.

Любой фотометрический преобразователь содержит как минимум один излучатель и один фотоприемник. В качестве излучателей в последнее время в подавляющем большинстве разработок применяют светодиоды или полупроводниковые лазеры, иногда лампы накаливания с вольфрамовой нитью. Длина волны зондирующего излучения выбирается чаще в видимой или ближней инфракрасной областях. В качестве фотоприемников чаще всего используют фотодиоды, реже (там, где нужна высокая чувствительность) — фотоумножители. Из фотометрических методов чаще всего используются турбидиметрический или нефелометрический методы. Соответствующие средства измерения могут быть построены по схеме турбидиметра (фотоприемник расположен на оси излучения и воспринимает проходящее ослабленное излучение) или нефелометра (приемник расположен под углом к оси излучения и воспринимает рассеянное излучение).

Основным аналитическим выражением для турбидиметрического метода является выражение, связывающее интенсивность прошедшего через мутную среду света с концентрацией взвешенных частиц:

$$I = I_0 e^{-\varepsilon \chi CL}, \quad (1)$$

где I_0 , I — интенсивности падающего потока и прошедшего через слой среды соответственно;

ε_λ — удельная экстинкция — параметр, показывающий ослабление света на единичной толщине зондируемого слоя в среде с единичной концентрацией дисперсной фазы на данной длине волны λ ; C — концентрации взвешенных частиц; L — толщина зондируемого слоя.

Нефелометрический метод основан на зависимости, открытой Рэлеем:

$$I = I_0 \frac{CV^2}{r^2\lambda^4} (1 + \cos^2 \theta) m, \quad (2)$$

где I_0 — интенсивность падающего света, I — интенсивность света, рассеянного единицей объема среды под углом θ к направлению распространения падающего света при расстоянии от рассеивающего объема до точки наблюдения r , C — концентрация частиц, V — объем одной частицы, λ — длина волны света, m — коэффициент, зависящий от показателей преломления дисперсной фазы и дисперсной среды.

Из выражения (2) видно, что интенсивность рассеянного света пропорциональна концентрации частиц и при угле рассеяния $\theta = 90^\circ$ достигается минимум этой интенсивности. Однако это верно только для достаточно разбавленных коллоидных систем (с размером частиц менее 0,1 мкм). Если же частицы становятся сравнимыми или большими длины волны (обычно 0,4–0,9 мкм), то формула (2) перестает работать: симметрия рассеяния нарушается, происходит резкое уменьшение интенсивности обратного рассеяния, на диаграммах направленности рассеянного излучения реальных полидисперсных сред часто бывает множество боковых лепестков. Диаграмма направленности (индикатриса рассеяния) зависит также от формы частиц, которая далеко не всегда близка к сферической, от показателей преломления ДФ и дисперсионной среды [3]. Поэтому концентратометры на базе измерителей мутности, работающие в полидисперсных средах, весьма полезно индивидуально градуировать на месте по известным концентрациям диспергированного вещества.

С точки зрения чувствительности турбидиметрический метод уступает нефелометрическому. При малых концентрациях ДФ он неэффективен. И наоборот, он может оказаться предпочтительным при измерении больших концентраций и в тех случаях, когда дисперсность мутной среды нестабильна. Нефелометрический метод работает при этом не лучшим образом: при больших концентрациях на характеристике «выход фотоприемника–концентрация» появляется сильная нелинейность и даже ее обратный ход, что не дает возможности проводить однозначные измерения, а нестабильность дисперсности частиц может привести к сильным изменениям направления максимума рассеивания. Среди нефелометров существует много разновидностей для различных применений: например, особо выделяются нефелометрические устройства и системы малых углов рассеяния (FS-анализаторы — Forward Scattering), особенно распространенные в океанологии и метеорологии и часто снабжаемые спектрометрами [4, 5]. Особенность FS-анализаторов

в том, что они позволяют оценить распределение частиц по их размерам, от которых зависит дифракционная картина на малых углах рассеяния (до $5-6^{circ}$). Многие нефелометры снабжены устройствами, позволяющими менять угол между осями приемника и излучателя, а также рабочий участок спектра. Это позволяет получать подробную информацию не только о концентрации взвешенных частиц, но и их размерах и форме [6].

Главными проблемами фотометрических полевых измерений концентрации ЖДС являются недостаточная метрологическая надежность и короткий период необслуживаемой работы датчиков. Первой и главной причиной низкой метрологической надежности является накопление частиц взвешенной фазы на прозрачных окнах преобразователей, непосредственно соприкасающихся с жидкостью. Борьба с этим явлением довольно тяжело, особенно в случае липкой дисперсной фазы. Но несмотря на такую очевидную трудность непосредственного применения простейших фотометрических преобразователей, сами фотометрические методы остаются перспективными для полевых измерений. Причина заключается в возможности повышения метрологической надежности измерений за счет достаточно простых и эффективных структурных и алгоритмических усовершенствований этих методов, позволяющих обеспечить инвариантность измерений при относительно невысокой стоимости.

2. ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ПОЛЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОМЕТРОВ ЖДС

Авторами проанализировано большое количество существующих технических решений по повышению надежности и живучести средств измерения концентрации ЖДС [7]. Выяснено, что в любом известном способе повышения надежности измерительных преобразователей концентрации ЖДС (фотометрических в том числе) реализуется в том или ином виде один из трех принципов: принцип непосредственного устранения действия влияющего фактора, принцип инвариантности измерений; принцип обеспечения избыточности.

Возможными способами *непосредственного устранения действия влияющего фактора* являются, например: периодическая очистка датчиков от загрязнений (механическая, ультразвуковая, химическая, термическая); перевод измерений из контактных в бесконтактные; дополнительное диспергирование ЖДС перед измерениями (для устранения влияния дисперсности) и т. д.

Принцип инвариантности измерений реализуется обычно путем выполнения других частных принципов: принципа многоканальности или принципа селективной инвариантности. Известными способами, основанными на многоканальности, являются: совместные измерения, логометрические и дифференциальные измерения. Примеры обеспечения селективной инвариантности:

использование рабочих частот преобразователя, для которых паразитные отложения на датчике прозрачны; стробирование сигналов.

Принцип обеспечения избыточности реализуется самыми разными способами и на разных уровнях: на уровне запаса прочности отдельных элементов, структуры, измеряемых параметров, алгоритмов, запаса времени восстановления. Типичными способами повышения надежности, реализующими этот принцип, являются, например: резервирование элементов преобразователей (избыточность на уровне структуры); применение развертывающих преобразований с регистрацией большого количества отсчетов (избыточность на уровне измеряемых параметров); дополнение измерительных алгоритмов алгоритмами самодиагностики и прогнозирования (избыточность на уровне алгоритмов).

Как правило, реализация в отдельности одного из названных принципов не приводит к радикальному повышению надежности преобразователей. Показано, что заметный синергетический эффект может дать комплексное применение этих принципов. Именно в этом и состоит обоснованная нами общая концепция построения полевых высоконадежных средств измерения концентрации ЖДС. Для конкретных условий наиболее эффективным может оказаться то или иное сочетание способов, реализующих эти принципы. В рамках данной работы рассмотрим два важных направления повышения метрологической надежности фотометрических преобразователей концентрации: 1) реализация бесконтактных измерений; 2) реализация логометрических измерений посредством устройств с подвижными элементами (с переменной измерительной базой).

3. БЕСКОНТАКТНЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ КОНЦЕНТРАТОМЕРЫ ЖДС

Это особый подкласс фотометрических концентратометров ЖДС, в которых отсутствует прямой контакт окон излучателей и приемников с исследуемой средой: они отделены от нее воздушным промежутком. Уже одно это сильно повышает ресурс работы концентратомера. Сохраняется, однако, вероятность запотевания и забрызгивания окон, поэтому применение логометрического принципа измерений здесь полезно, как и во всех других случаях [8, 9].

Бесконтактные концентратомеры весьма просто могут быть построены для тех условий, где возможна организация отвода от трубы и слив прошедшей через преобразователь жидкости в дренажную систему [10]. Большинство промышленных бесконтактных концентратометров ЖДС являются нефелометрами и строятся по одной из двух основных схем: 1) с просвечиванием свободной поверхности жидкости и измерением рассеянного излучения через эту же поверхность [11, 12] (так называемые поверхностные концентратометры — рис. 2, а); 2) с измерением интенсивности излучения, рассеиваемого подсвечиваемой струей жидкости [10, 13] (так называемые

струйные концентратометры — рис. 2, б). Последние имеют высокую чувствительность и предназначены для работы в почти прозрачных средах. Серийно эти перспективные устройства выпускаются, в частности, фирмами Sigrist Photometer (Швейцария) и GLI International (США). Авторами исследованы и оптимизированы различные модификации таких устройств.

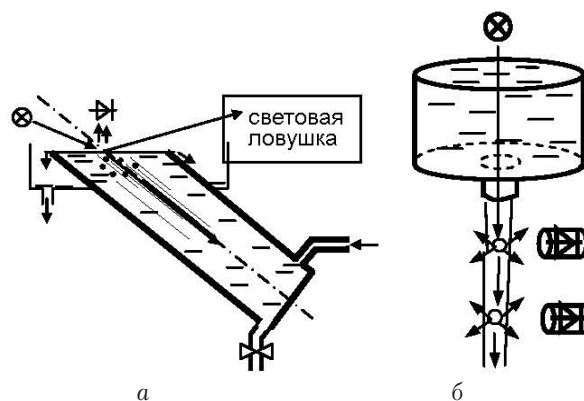


Рис. 2. Примеры поверхностного а и струйного б бесконтактных измерительных преобразователей концентрации ЖДС

Наиболее подробно изучены струйные преобразователи с продольным просвечиванием струи. Вычислительные и натурные эксперименты показали эффективность применения устройств данного подкласса для измерения малых концентраций взвеси (до 10 мг/л). В отношении данного подкласса концентратометров выявлено и предложено следующее:

1) Датчики, сигналы которых образуют логометрические отношения, могут быть разнесены по длине струи, либо один из них расположен рядом с ней, а второй — в непосредственной близости с излучателем. Второй вариант оказался предпочтительнее, так как световой поток, переизлучаемый струей, очень слабо изменяется по ее длине.

2) Для повышения уровня полезного сигнала и соотношения «сигнал/шум» целесообразно направлять фотоприемники на струю не перпендикулярно, а под углом $\approx 30^\circ$, а для независимости результата от колебаний формы и направления струи предложено выполнять фотоприемные устройства в виде кольцевых фотоприемных матриц. Экспериментально доказана повышенная метрологическая надежность таких матриц по сравнению с одиночными фотоприемниками: они обеспечивают заданный уровень приведенной погрешности (2%) в условиях таких влияющих факторов как забрызгивание излучателей и приемников, нестабильность направления струи и расхода жидкости.

На рис. 3 схематично показано предлагаемое устройство (Пат. РФ № 2235991). Оно содержит открытый сверху сосуд-стабилизатор 1, имеющий патрубок 2 в нижней боковой части для подачи жидкости, и сливную горловину 3 в дне для формирования свободно падающей равномерной

струи 4, дренажную систему 5 для отвода жидкости, переливающейся через верх основного сосуда 1 и утекающей в виде падающей струи 4, излучатель 6, свет от которого посредством разветвленного световода 7 проходит через поверхность жидкости и просвечивает сверху падающую струю 4. Второй отвод направляет свет от излучателя на опорный фотоприемник 8, сигнал которого усиливается усилителем 10 и направляется в контроллер 12. Многоэлементное фотоприемное устройство (матрица) 9 охватывает струю 4, причем фотоприемники в нем соединены параллельно и подключены ко входу усилителя 11, выход которого соединен с контроллером 12. Управляющий выход контроллера 12 подключен к излучателю 6.

Устройство работает следующим образом. Через патрубок 2 в основной сосуд 1 непрерывно подается контролируемая жидкость. Жидкость поднимается вверх и затем переливается через стенки вниз, где собирается и удаляется с помощью дренажной системы 5. Кроме того, жидкость стекает в виде ровной и непрерывной струи 4 через сливную горловину 3. Этому способствует то, что в верхней части сосуда 1 создается свободная поверхность жидкости фиксированного уровня. Поскольку уровень не изменяется, то и гидростатическое давление на дне сосуда 1 неизменно, и расход через горловину 3 нормализован. Жидкость, сливающаяся в виде струи 4, также собирается и отводится с помощью дренажной системы 5. В начале цикла измерения по сигналу контроллера 12 включается излучатель 6, излучение которого просвечивает объем жидкости в сосуде 1 и стекающую струю 4, а также подается на опорный фотоприемник 8. Фотоприемная матрица 9 воспринимает рассеянное взвешенными частицами излучение в сечениях струи. Так как фотоприемники в матрице включены параллельно, то их фототоки суммируются. Сумма фототоков подается на вход усилителя 11, где преобразуется в напряжение и усиливается. Такое суммирование фототоков фотоприемников, расположенных по окружности вокруг струи, позволяет существенно увеличить уровень сигнала. Кроме того, изменения конфигурации сечения струи и отклонения ее от вертикального направления практически не изменяют суммарный фототок матрицы, и он остается постоянным при разных искривлениях струи. Усиленные сигналы подаются на соответствующие входы контроллера 12, где они подвергаются аналого-цифровому преобразованию и дальнейшей вычислительной обработке. Эта обработка заключается, прежде всего, в нахождении отношения двух сигналов: $R = U_1/U_2$, где U_1 — напряжение на выходе усилителя 11, U_2 — напряжение на выходе усилителя 10. Найденное отношение R свободно от нестабильности излучателя. Затем по заложенной в памяти контроллера (в табличном или аналитическом виде) функциональной (градуировочной) зависимости определяется искомая концентрация взвешенных частиц $C = f(R)$. На этом цикл измерения заканчивается. Вычисленное значение индицируется на встроенном индикаторе контроллера 12 или, при необходимости,

передается во внешние информационные сети. На время вычислений излучатель 6 гасится в целях его более экономичной работы. Затем цикл повторяется.

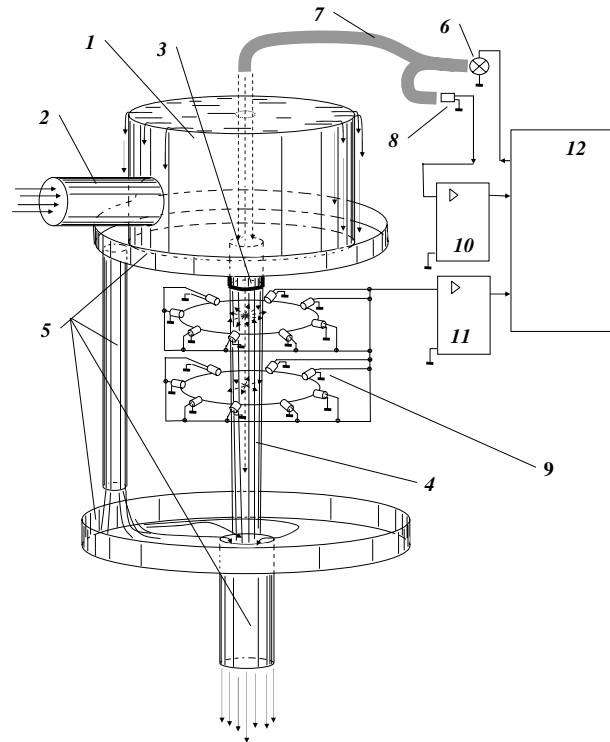


Рис. 3. Струйный концентромер с кольцеобразной фотоприемной матрицей

Существенным отличительным элементом предлагаемого устройства является фотоприемная матрица, которая включает в себя множество фотоприемников (например, фотодиодов), расположенных по окружности вокруг струи. Количество фотоприемников предпочтительно выбирать от трех и более, и они должны быть распределены равномерно по окружности. Раскрыв диаграммы направленности фотоприемников полезно делать как можно шире; по крайней мере, он должен быть таким, чтобы при любых возможных деформациях и отклонениях струи ее поперечное сечение вписывалось в угол раскрытия диаграммы направленности каждого фотоприемника. Расстояние от фотоприемников до струи выбирается таким, чтобы исключить забрызгивание фотоприемников. Предпочтительно выбирать диаметр окружности для расположения фотоприемников равным 1,5–2 диаметра струи. Лучшие результаты получаются при большем количестве фотоприемников. В этом случае чувствительность к мутности будет выше, а погрешность от нестабильности струи меньше. Случайные забрызгивания отдельных фотоприемников при большом их количестве не будут существенно влиять на результат. Изменения формы струи и отклонения ее от вертикали также не изменяют результат. В предельном случае матрица фотоприемников может быть заменена сплошным кольцеобразным фотоприемником с равно-

мерной внутренней воспринимающей поверхностью, направленной на струю.

Наиболее эффективны такие фотоприемные матрицы, в которых оси приемников повернуты относительно направления излучения на угол $\approx 30^\circ$ (рис. 4). Выигрыш по принятой мощности относительно варианта с нормальным направлением осей приемников составляет более 1 порядка.

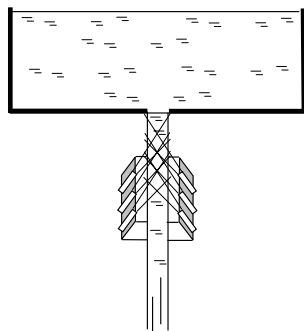


Рис. 4. Фотоприемная матрица с острым углом расположения элементов

При практическом применении бесконтактных измерительных преобразователей необходимо учитывать следующее:

- невозможность непосредственного зондирования внутри исследуемого объема и необходимость организации системы отвода и слива жидкости;
- принципиальная необходимость сброса давления при отводе жидкости от объекта, что сопровождается переходом газов из растворенного состояния в свободное; выделяющиеся газовые пузырьки могут сильно исказить результат;
- невозможность работы при температурах ниже точки замерзания жидкости: при этом требуется размещение преобразователя в термостатируемой камере.

4. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ КОНЦЕНТРАТОМЕРЫ ЖДС С ПЕРЕМЕННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ БАЗОЙ

Авторами исследованы фотометрические концентратометры ЖДС, общим признаком которых является переменная измерительная база. Они не выделены в отдельный подкласс; по физической основе функционирования они могут быть турбидиметрами или нефелометрами, по характеру взаимодействия со средой — контактными или бесконтактными, по способу получения результата — с непосредственным измерением или с применением логометрического принципа. Под измерительной базой здесь понимается расстояние между приемником и излучателем для устройств турбидиметрического типа или угол между их осями для устройств нефелометрического типа. Цель введения переменной измерительной базы (два или более ее значений) — обеспечение инвариантности измерений концентрации ДФ относительно загрязнения окон приемника/излучателя и (или) относительно параметров дисперсности.

На рис. 5 приведена схема турбидиметра, реализующего логометрический способ измерения концентрации с помощью подвижного элемента [14, 15]. Коллимированный пучок света излучателя 1 проходит через прозрачное окно 2, которое может перемещаться под действием привода 3 таким образом, что толщина слоя исследуемой жидкости, который проходит луч (от окна 2 до окна 4), может изменяться от L_1 до L_2 . Сигнал с фотоприемника 5 поступает на контроллер 6, который вычисляет искомую концентрацию и управляет работой привода 3.

Сигналы фотоприемника измеряются при двух положениях окна 2, соответствующих расстояниям L_1 и L_2 между фотоприемником и излучателем. Эти сигналы подчиняются следующим зависимостям:

$$U_1 = kA_0e^{-\varepsilon L_1 C}, \quad (3)$$

$$U_2 = kA_0e^{-\varepsilon L_2 C}, \quad (4)$$

где U_1, U_2 — сигналы, измеренные на выходе фотоприемника; C — искомая концентрация частиц; A_0 — яркость излучения излучателя; ε — удельная экстинкция; k — коэффициент преобразования, зависящий, в частности, от степени прозрачности (загрязнения) окон фотоприемника и излучателя.

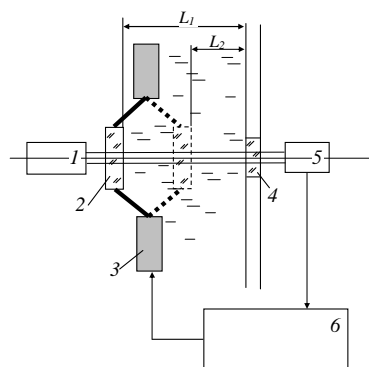


Рис. 5. Логометрический турбидиметр с подвижным элементом

В функции контроллера входит и вычисление итогового результата:

$$C = \frac{\ln\left(\frac{U_2}{U_1}\right)}{\varepsilon(L_1 - L_2)}. \quad (5)$$

Как видим, сократились нестабильные составляющие k и A_0 , т.е. не требуется высокая стабильность излучения и канала преобразования, и влияние загрязнения окон приемника и излучателя на результат преобразования сводится к минимуму. Знаменатель выражения 5 содержит только константы.

Реализовать механическое движение одного из элементов пары «приемник–излучатель» при сохранении герметичности (часто в условиях больших давлений и агрессивности среды) довольно непросто. В предлагаемой авторами конструк-

ции турбидиметра эта проблема решается с помощью стального сильфона. Любые технические решения, связанные с использованием сальниковых уплотнений, здесь не подходят из-за их малого ресурса.

На рис. 6 приведен чертеж общего вида экспериментального образца турбидиметра с переменной измерительной базой.

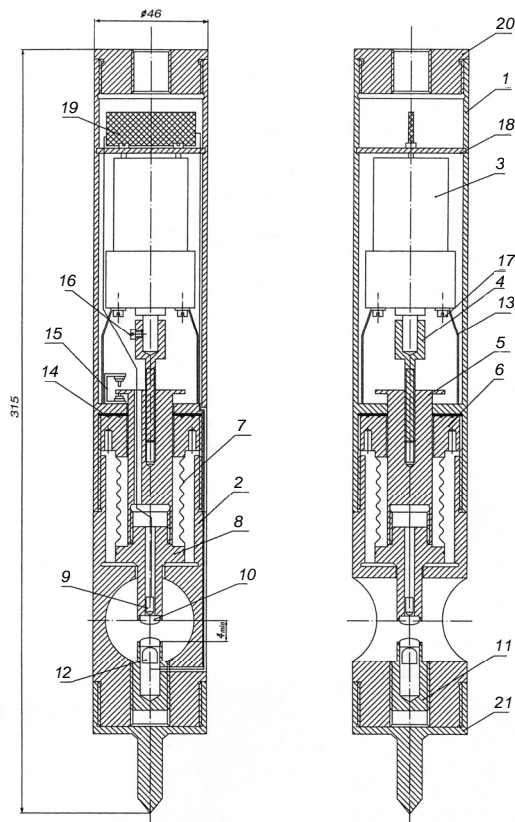


Рис. 6. Чертеж общего вида турбидиметра с переменной измерительной базой: 1 — основание корпуса; 2 — рабочая часть корпуса; 3 — электродвигатель с редуктором; 4 — приводная насадка; 5 — скользящий управляемый толкатель; 6 — основание сильфонного узла; 7 — сильфон; 8 — держатель фотодиода; 9 — фотодиод; 10 — линза; 11 — держатель светодиода; 12 — светодиод; 13 — стойка-упор; 14 — прокладка; 15 — узел концевых выключателей; 16 — винт М3; 17 — винт М4; 18 — пластина-упор; 19 — плата преобразователя; 20 — переходник для подводящей трубки $\varnothing 16$; 21 — подпирющий наконечник

Испытывался ряд экспериментальных образцов турбидиметров, работающих по логометрическому принципу, предназначенных для поточных измерений концентрации нефти в воде. Диапазон возможных концентраций составлял 0–100 мг/л при основной приведенной погрешности 2%, максимальное гидростатическое давление внутри трубопровода — 1,6 МПа. Расстояния L_1 и L_2 составляли соответственно 4 и 32 мм. В качестве источников излучения и фотоприемников испытывались полупроводниковые свето- и фотодиоды соответственно, работающие в различных диа-

пазонах спектра: от синего до ближнего инфракрасного. Практически пригодными для использования в условиях накопления на окнах нефтяных осадений оказались только приборы с красным и инфракрасным излучением. Причем слой осадений оказался наиболее прозрачным для инфракрасного излучения с длиной волны 0,93 мкм. В более длинноволновой области инфракрасного диапазона резко усиливается поглощение излучения водой, поэтому там выбирать рабочую длину волны нецелесообразно. Испытания показали независимость результатов измерения мутности водонефтяной среды от загрязнений на окнах толщиной слоя до 0,5 мм. При толстослойных отложениях погрешность все же увеличивается, что, очевидно, связано как с затуханием излучения в загрязняющем слое (что ухудшает соотношение «сигнал/шум»), так и с появлением диффузной составляющей рассеяния внутри слоя (что изменяет характер зависимости $C = f(U_2/U_1)$). Поэтому при сильных загрязнениях весьма полезным может оказаться сочетание логометрического принципа измерения с различными средствами очистки окон оптических элементов.

Авторами предложен также адаптивный алгоритм работы турбидиметра с переменной измерительной базой, который значительно увеличивает ресурс механизма и одновременно позволяет вычислять концентрацию с приемлемой погрешностью в различных диапазонах ее изменения [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фетисов, В. С.** Фотометрические полевые средства измерений концентрации жидких дисперсных систем / В. С. Фетисов. Уфа: УГАТУ, 2005. 233 с.
2. **ГОСТ 29024-91.** Анализаторы жидкости турбидиметрические и нефелометрические. Общие технические требования и методы испытаний.
3. **Шифрин, К. С.** Введение в оптику океана / К. С. Шифрин. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 278 с.
4. **ЛАСКА-техно:** Лазерный анализатор микрочастиц [Электронный ресурс]: реклам. проспект. ЛЮМ-ЭКС, Россия, 2001. (<http://www.lumex.ru>).
5. **Kazovsky, L. G.** Particle analysis using forward scattering data / L. G. Kazovsky // *Applied Optics*. 1984. V. 23 (3). P. 448–454.
6. **Фетисов, В. С.** Пат. РФ на ПМ № 42320. Поточный измеритель концентрации взвешенной фазы в жидкой среде / В. С. Фетисов, А. С. Насибуллин. Опул. 2004. Бюл. № 33.
7. **Фетисов, В. С.** Принципы построения концентратометров для систем контроля параметров эмульсий и суспензий / В. С. Фетисов // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2004. № 11. С. 42–46.
8. **Фетисов, В. С.** Средства измерения мутности жидких сред: теоретические и практические аспекты / В. С. Фетисов // *Датчики и системы*. 2003. № 12. С. 49–57.
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. **Rogner, A.** Turbidity measurement in drinking water applications new requirements and approaches [Электронный ресурс] / A. Rogner // *Int. Environmen-*

- tal Technol. 1998. Vol. 8, No.6. P. 9–10. (<http://www.photometer.com>).
11. **US Patent 5400137.** Photometric means for monitoring solids and fluorescent material in waste water using a stabilized pool water sampler. Publ. 11.08.93. US. Cl. 356–318.
 12. **Фетисов, В. С.** Пат. РФ на изобр. № 2235310. Бесконтактный поточный мутномер / В. С. Фетисов. Опубл. 2004. Бюл. № 24.
 13. **Фетисов, В. С.** Пат. РФ на изобр. № 2235991. Бесконтактный мутномер / В. С. Фетисов. Опубл. 2004. Бюл. № 25.
 14. **US Patent 4981362.** Particle concentration measuring method and device. Publ. 01.01.91. Int. Cl. G01N 21/00.
 15. **Fetisov, V.** Ratiometric in-line turbidimeters: principle of measurement and variants of realization / V. Fetisov // Proc. of XVII IMEKO World Congr. Dubrovnik, Croatia, 2003. P. 1202–1205.

ОБ АВТОРАХ



Фетисов Владимир Станиславович, проф., каф. информ.-измерит. техники. Дипл. инж.-электр. (УАИ, 1986). Д-р техн. наук по элем. и устройствам выч. техн. и систем управления (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. измерительных систем.



Тих Елена Владимировна, аспирантка той же каф. Дипл. инж. по биотехн. и мед. аппаратам и системам (УГАТУ, 2003). Готовит дис. в обл. средств измерения свойств и состава жидких дисперсных сред.



Мельничук Ольга Васильевна, магистрант той же каф. Дипл. бакалавр техн. и технол. по приборостроению (УГАТУ, 2005). Готовит магист. дис. в обл. средств измерения свойств жидких дисперсных сред.

УДК 004.891

Е. Б. СТАРЦЕВА

ЭТАПЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ БАЗЫ ЗНАНИЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Представлены три этапа формирования базы знаний экспертной системы. Предложено реализовать базу знаний по модульному принципу. Модули базы знаний предложено формировать в соответствии с иерархией процессов принятия решений, установленной в процессной модели. *База знаний; экспертная система; модульный принцип; структурный анализ; процессная модель*

Современные информационные управляющие системы строятся на основе интеграции в их структуру элементов интеллектуальных технологий. Средства искусственного интеллекта выполняют функции анализа данных, выявляют отклонения от нормальных режимов функционирования объектов, осуществляют классификацию данных, моделирование ситуаций, поддержку принятия решений. Одним из таких средств искусственного интеллекта являются экспертные системы (ЭС). В настоящее время разработано множество подходов к проектированию экспертных систем, одним из наиболее интересных является модульный принцип построения базы знаний (БЗ) экспертной системы [3]. При таком подходе размер-

ность базы знаний удается существенно уменьшить за счет того, что отдельные модули БЗ содержат только характерную для них экспертную информацию. Деление уже разработанной БЗ на модули — это очень сложная задача, поэтому в данной работе предлагается подход к формированию отдельных модулей базы знаний ЭС на основе системного проекта.

Первым этапом создания экспертной системы (ЭС) является анализ предметной области. Для анализа предметной области в современном мире используются два подхода: структурный и объектный. Объектный подход поддерживается методологией UML и чаще применяется для проектирования баз данных и систем интеллектуального