

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 681.7.068:66.62

А. П. Марков

ОСОБЕННОСТИ СВЕТОВОДНОЙ МУТНОМЕТРИИ

UDC 681.7.068:66.62

A. P. Markov

FEATURES OF LIGHT GUIDE TURBIDITY

Аннотация

Дан сравнительный анализ методов и средств контроля мутности жидких сред. Определены основные информативные параметры зондирующего излучения. На основе проведенных исследований сделаны выводы о целесообразности использования датчика рассеянного в обратном направлении излучения для увеличения диапазона измерения турбидиметра.

Ключевые слова:

турбидиметр, нефелометр, мутномер, волоконно-оптический датчик, световод, технические масла.

Abstract

The comparative analysis of methods and techniques of monitoring the turbidity of liquid mediums is given. Basic informative parameters of probe radiation are determined. Based on the research carried out, the conclusions are made concerning the appropriateness of using a meter of radiation scattered in the opposite direction to increase the measuring range of a turbidimeter.

Key words:

turbidimeter, nephelometer, haze meter, fiber-optical sensor, light guide, engineering oils.

Для производств машиностроительного комплекса, нефтехимической, бумажной и других отраслей важное значение имеет оперативный контроль состояния технических сред и масел, сопутствующих отдельным технологическим операциям [1, 2]. В большом разнообразии гидравлических, редукторных и циркуляционных масел широко представлены закалочные масляные и водосмешиваемые смазочно-охлаждающие жидкости литейного производства.

Экспресс-контроль непосредственно в производственном процессе позволяет получать необходимую инфор-

мацию о работоспособности оборудования и характере выполнения технологических операций и оперативно корректировать и управлять параметрами используемых технических сред и масел. По их текущим значениям можно проанализировать работоспособность отдельных блоков и узлов, технологического оборудования, производственный брак, отказы и потери.

Состояние и свойства технических сред и масел позволяют выявить причины и механизмы появления и развития различных отклонений, сказывающихся на нормированном ресурсе безотказной работы оборудования.

Современные технологии контроля дисперсных сред используют основной физической эффект наличия и концентрации неоднородностей – прозрачность в спектральной области некоторых излучений. Различия в оптических эффектах взаимодействия излучения с однородной средой и неоднородностями позволяют получать достоверные данные о средах.

Для непрерывных измерений концентрации мелкодисперсных сред, содержание твердых частиц в которых составляет 100 мг/л и менее, наиболее эффективны и перспективны оптические концентратометры [3]. Они воспринимают рассеянное дисперсной средой в боковом направлении – нефелометры или прошедшее через нее излучения – турбидиметры. В нефелометрах используется зависимость информативного излучения рассеяния от определенного угла к направлению потока воздействующего излучения. На этой основе строятся информационно-измерительные приборы для определения мутности, а также концентрации и распределения частиц. По своей природе нефелометры являются средствами относительных измерений, что требует наличия определенных эталонов (стандартов) мутности. Эти стандарты по форме, размерам и распределению частиц, а также по коэффициенту преломления должны строго согласовываться с характеристиками контролируемой жидкости.

На зависимости коэффициента рассеяния от размеров, формы, числа частиц и от разности коэффициентов преломления среды и частиц основывается оптический метод измерения мутности – турбидиметрический. Сущность его состоит в следующем: если через мутную среду пропускать световой поток, то часть света рассеивается взвешенными частицами и чем выше концентрация взвеси в контролируемой среде, тем большая часть света его рассеивается. При этом мерой concentra-

ции взвешенных частиц является ослабление интенсивности прошедшего через слой контролируемой среды светового потока [4].

Для контроля концентрации дисперсной среды (нерастворенных взвешенных частиц) в жидкостях данный метод применяется довольно широко. Турбидиметры используются для контроля мутности, являющейся комплексной характеристикой содержания твердой фазы средой. Диапазон измерения прибора позволяет работать со средами от низкой до высокой степени мутности (но не более 1100 FNU) [5].

Средства контроля мутности (рис. 1, а) [5] определяются условиями применения и фирмой-изготовителем. Условно они делятся на лабораторные, переносные и портативные. Соответственно, чем выше класс прибора, тем большую точность измерения он может обеспечить, однако мобильность в данном случае уменьшается с увеличением массогабаритных характеристик. Для размещения проб неоднородных сред используются специальные кюветы. Забор проб и их транспортировка осуществляются с помощью пробоотборников (рис. 1, б), что в некоторой мере улучшает ограниченную мобильность мутномеров, но не решает проблем экспресс-контроля полностью. В промышленных образцах современных турбидиметров применяются встраиваемые волоконно-оптические датчики (рис. 1, в). Для мобильных систем контроля данные датчики неприменимы.

Волоконные световоды используются для каналирования излучения, обеспечивают его передачу в нужную точку пространства, т. е. решают задачу передачи излучения на расстояние по необходимой траектории.

В настоящее время практически не производятся приборы измерения мутности с выносными оптическими датчиками для экспресс-контроля. Между тем потребность в недорогом и универсальном приборе для такого рода работ воз-

растает. Данное средство измерения должно обладать следующими характеристиками: небольшая масса и габариты, долгое время автономной работы, погрешность измерения не ниже 2 %, широкий диапазон измерения, наличие

выносных волоконно-оптических зондов, возможность контроля в видимом диапазоне, низкая (не более 500 долл.) цена. Исходя из этих требований и производится разработка устройства.



Рис. 1. Средства контроля мутности: а – турбидиметры; б – пробоотборники; в – волоконно-оптические датчики

На данный момент существуют стандарты измерения мутности, определяющие единицы, параметры источника излучения и способы детектирования (рис. 2) [6].

При этом основным является так называемый формазиновый стандарт, где одной единице соответствует 1 мг формазина, растворенный в 1 л воды. Реже применяется взвесь каолина. Стандартные взвеси данных веществ используются для калибровки как турбидиметров, так и нефелометров. Основные источники излучения – вольфрамовая лампа и ИК светодиод. Применение инфракрасного света позволяет контролировать окрашенные растворы и взвеси. Ряд методик контроля технических масел использует диапазон 500...540 Н·м. Стандартизированы также и углы приема излучения: 90, 135, 180 и 275° от оси излучателя [6]. Согласно существующим стандартам

определены и основные информативные потоки излучения (рис. 3).

Для разработки переносного турбидиметра с волоконно-оптическим датчиком необходимо: определить спектральный диапазон зондирующего излучения; выбрать источники, приемники и трансляторы излучения с учетом решаемых задач; определить, какие именно информативные параметры зондирующего излучения будут использоваться для проведения контроля с учетом выбранной элементной базы; провести экспериментальные исследования и моделирование волоконно-оптического датчика; разработать способ контроля мутности на основе проведенных исследований.

Основной источник излучения для приборов данного типа – светодиод. Обладая достаточной мощностью при малых габаритах, он без проблем согласуется с волоконно-оптическим жгутом, имея выходную апертуру, аналогичную входной апертуре жгута (30°).

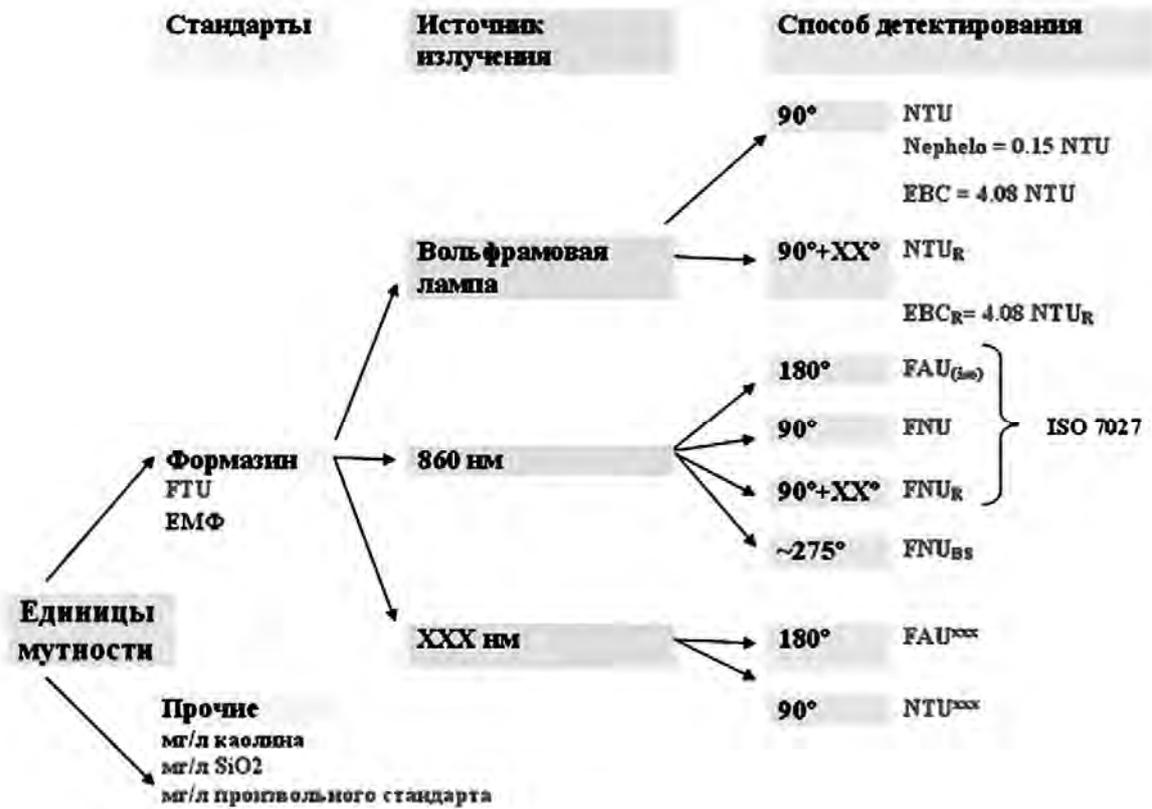


Рис. 2. Единицы и стандарты измерения мутности

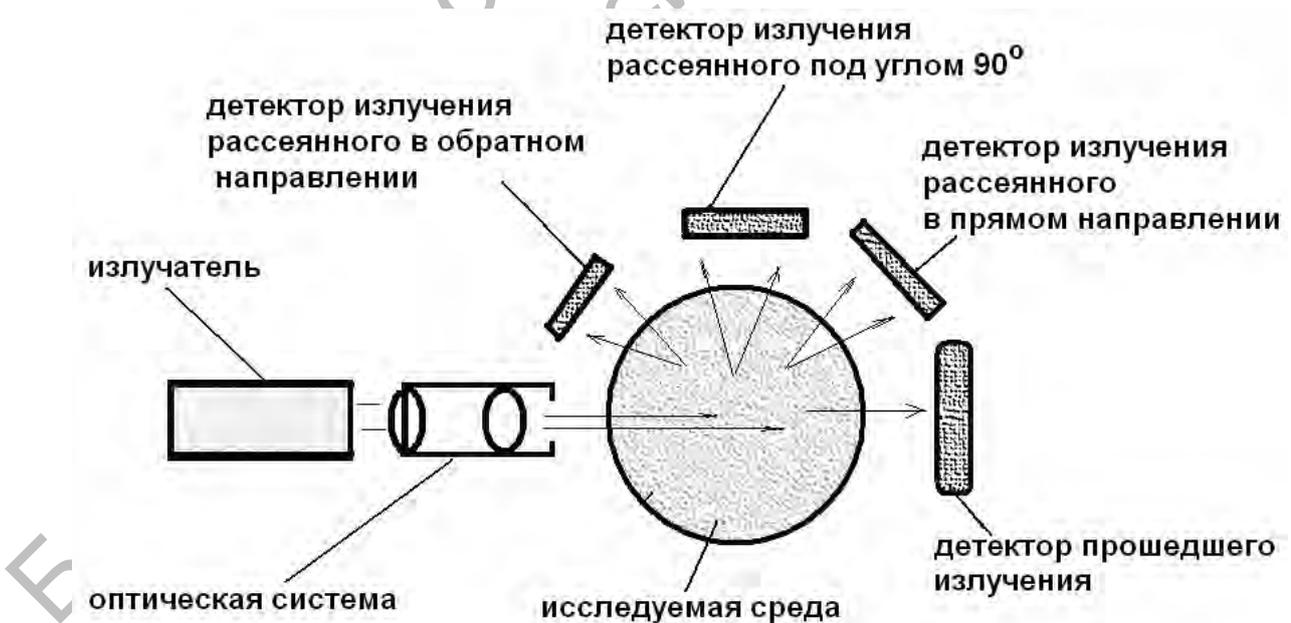


Рис. 3. Схема направленности основных информативных потоков излучения и расположения детекторов

Выпускаются светодиоды с длинами волн излучения от 430 до 980 нм. Ряд методик контроля технических масел использует диапазон 500...540 нм, поэтому логично выбрать для проектируемого прибора диапазон зондирующего излучения 500...880 нм и применять для этих целей именно светодиоды.

В качестве приемника используем кремниевый фотодиод, подходящий по своим спектральным характеристикам выбранному нами диапазону излучения. Вместе с тем накладываются определенные ограничения на применяемые электронные компоненты в ценовом диапазоне.

При анализе световодного тракта передачи оптической информации необходимо учитывать спектральные характеристики его составных элементов. При использовании спектрально «окрашенной» информации общая эффективность передачи оптической системы повышается. Выбор и систематизация методов и схем осуществляются по следующим группам характеристик:

- спектральные (излучательные и отражательные) способности объектов контроля;
- спектральные характеристики источников излучения;
- спектральные способности про-

пускания излучения основными разновидностями трансляторов оптической информации и элементами первичного преобразователя;

- спектральные характеристики фотоприемных элементов.

Напротив, если имеет место спектральное рассогласование приемопередающих элементов оптического тракта датчика, а также трансляторов излучения, общая эффективность работы системы существенно снижается.

Спектральные характеристики ряда волокон представлены на рис. 4 [7].

Более предпочтительным является использование световодных жгутов на основе флинтгов исходя из меньшего затухания излучения в выбранном диапазоне.

Могут быть использованы также и кварцевые волокна, светопотери в которых минимальны, но неравномерность спектральной характеристики в области 500...700 нм может нивелировать это преимущество. Применение полимерных световодов нецелесообразно из-за неравномерной спектральной характеристики и высоких потерь излучения в волокне. Спектральные характеристики приемников излучения представлены на рис. 5.

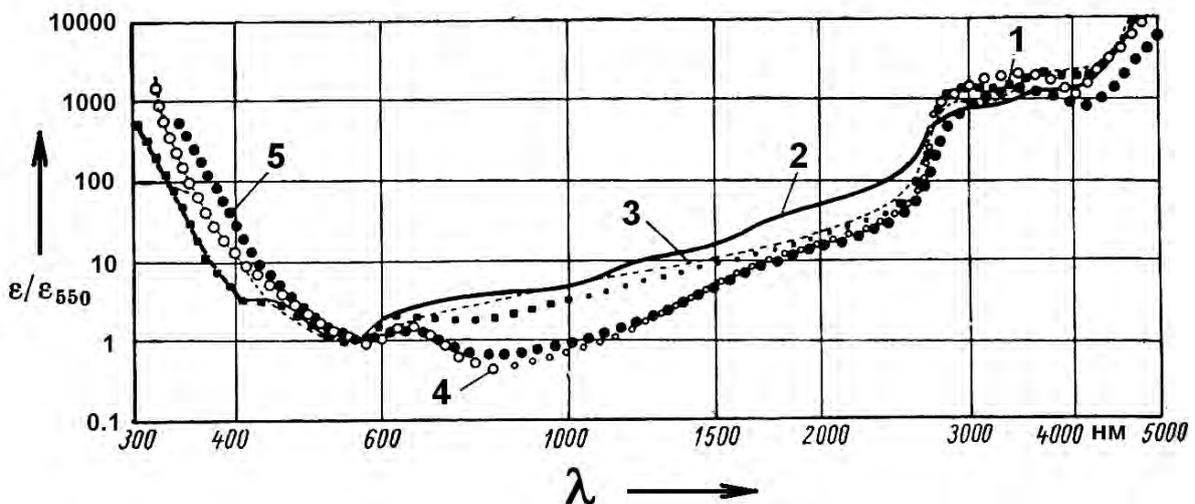


Рис. 4. Средние относительные спектральные кривые коэффициента светопоглощения ϵ/ϵ_{550} оптических стекол: 1 – кроны; 2 – баритовые кроны; 3 – тяжелые кроны; 4 – флинтги; 5 – тяжелые флинтги

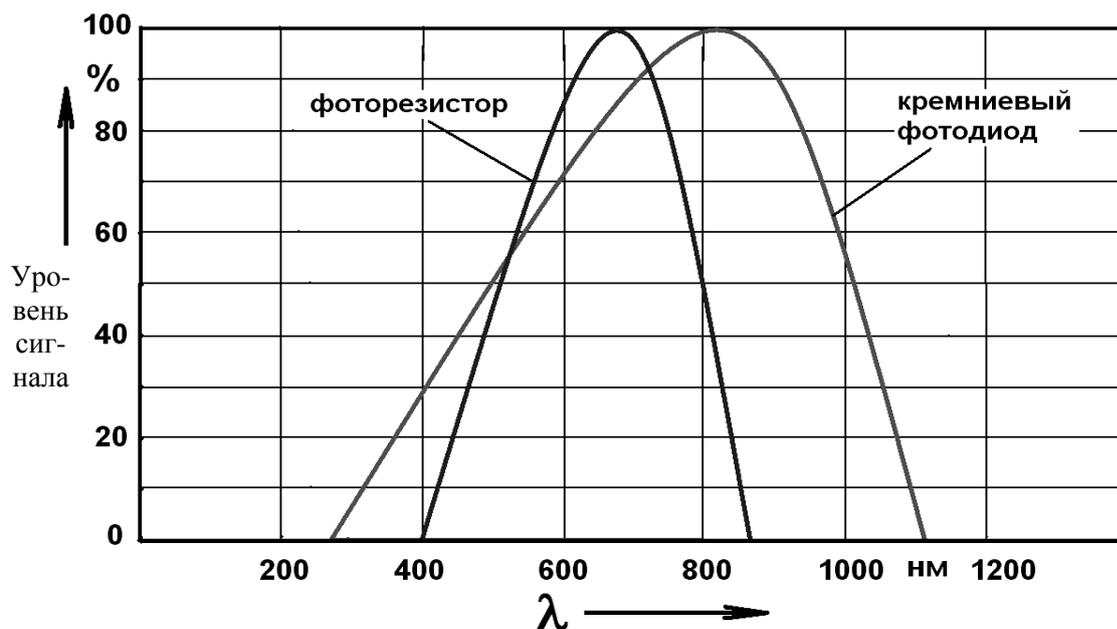


Рис. 5. Спектральные характеристики приемников излучения

В выбранном спектральном диапазоне кремниевый фотодиод более применим для преобразования информативного излучения, но снижение чувствительности на длине волны 500 нм, по сравнению с 800, требует соответствующих технических решений для nivelирования разницы. Светодиоды в диапазоне излучения 500...900 нм современных приборов сигнал с одного из датчиков является основным, а другие – вспомогательными (рис. 6). Наиболее широко применяется нефелометрический детектор, обладающий квазилинейной характеристикой при контроле слабо мутных сред и имеющий предел измерения при мутности 2000 FNU. Основной недостаток – низкий уровень сигнала, особенно при малых уровнях мутности (до 50 FNU). Угол наклона кривой графика зависит от оптических характеристик среды, в том числе рассеивающей и отражающей способностей частиц.

Турбидиметрический детектор применяется при контроле уровней мутности до 1100 единиц. Он обладает высокой чувствительностью и большим уровнем сигнала при малых уровнях

ладают полушириной спектральной характеристики 20...30 нм.

Для выбора информативных потоков излучения требуется провести исследования возможности регистрации потоков с помощью волоконно-оптических датчиков.

В оптико-электронных схемах

мутности. Характер кривой имеет вид экспоненты, но при больших уровнях мутности чувствительность такого способа падает.

В большинстве схем детекторы прямого и обратного рассеяния применяются как вспомогательные. С их помощью компенсируются погрешности, связанные с нарушением закона Бугера при попадании на детектор рассеянного в прямом направлении излучения. В других случаях использование вспомогательного детектора позволяет увеличить диапазон измерения, когда сигналы прочих детекторов выходят за его пределы. Теоретически с помощью детектора обратнорассеянного излучения возможно измерять уровни мутности до 10000 единиц по формазину.

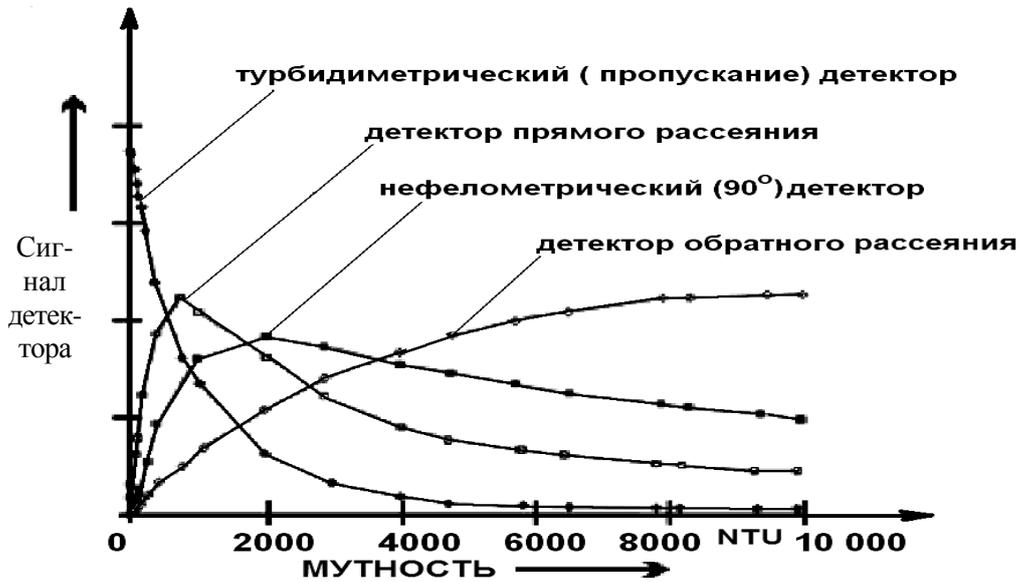


Рис. 6. Графики выходных сигналов детекторов

Применение детекторов прямого рассеяния связано с некоторыми особенностями. Во-первых, в ряде случаев характерен более слабый, чем у нефелометрического детектора, сигнал, во-вторых – особые требования к оптической схеме по параллельности потока зондирующего излучения. При выходной апертуре световодов в жидкостях от

20 до 23° полностью выполнить эти требования не представляется возможным без включения в оптический тракт дополнительных элементов.

Решение задачи контроля уровней сигналов производилось с помощью установки, схема которой представлена на рис. 7.

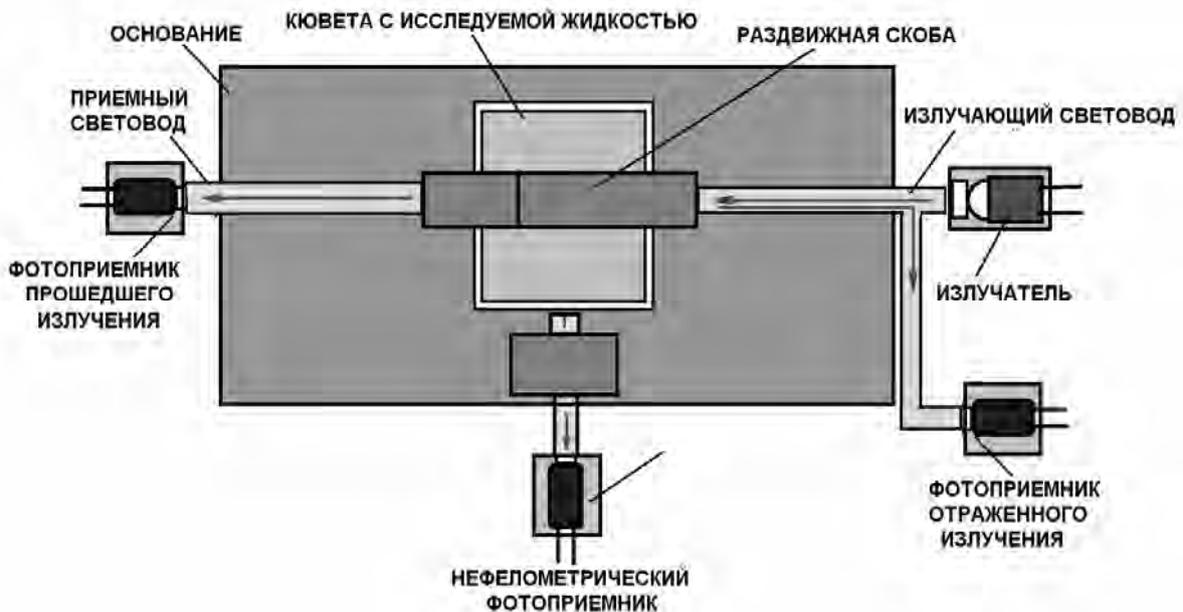


Рис. 7. Схема экспериментальной установки

В качестве исследуемых образцов использовались водные взвеси полимерных порошков, глин и растворы масел. Исследовались уровни сигналов при различных концентрациях взвесей с различными детекторами.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что использование нефелометрического детектора нецелесообразно из-за малой интенсивности излучения. Для сравнения: амплитуды сигнала турбидиметрического и нефелометрического датчиков на экспериментальных образцах при концентрации частиц 50 мг/л составляли 950 и 35 мВ; 890 и 24 мВ; 865 и 26 мВ и 790 и 34 мВ соответственно. Данное соотношение наблюдалось при двукратном увеличении площади световода приемного канала нефелометрического детектора по сравнению с турбидиметрическим.

При высоких значениях мутности (более 800 FNU) целесообразно применение детектора обратного рассеяния как основного и расширения за счет этого диапазона измерения прибора. Но данное условие выполняется только в исследуемых образцах, мутные среды которых обладают достаточной для регистрации информативного излучения отражающей способностью. При снижении уровня сигнала рассеянного в обратном направлении излучения ниже определенного порога использование его как информативного параметра невозможно. С подобными проблемами сталкиваются и в нефелометрах, т. к. угол наклона кривой нефелометрического датчика (а соответственно, и чувствительности) напрямую зависит от коэффициента рассеяния частицами излучения под углом 90^0 . В результате более темные частицы (например, включения сажи) будут давать более слабый сигнал, чем частицы мела.

Таким образом, в качестве информативных параметров для волоконно-оптического датчика выбираем характе-

ристики прошедшего и рассеянного в прямом направлении излучений.

Рассмотрим турбидиметрический канал. Согласно данному методу, количественное соотношение между входным световым потоком и выходным определяется уравнением

$$\Phi_{\text{п}} = \Phi_0 \exp(-k L N),$$

или

$$\text{Lg}(\Phi/\Phi_0) = k L_0 N = D, \quad (1)$$

где Φ_0 и $\Phi_{\text{п}}$ – входной и выходной световые потоки; L_0 – толщина просвечиваемого слоя; N – количество частиц в единице объема; D – оптическая плотность слоя; k – коэффициент ослабления.

Для канала рассеянного в обратном направлении (отраженного) излучения

$$\Phi_{\text{р}} = \Phi_0 k_0 N, \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{р}}$ – световой поток рассеянного в обратном направлении излучения; k_0 – коэффициент, учитывающий оптические характеристики частиц и среды.

В принципе, формула расчета светового потока рассеянного в обратном направлении излучения похожа на аналогичную, используемую в нефелометрии. Естественно, коэффициенты будут разные.

Применительно к волоконно-оптическим датчикам математическую основу волоконно-оптических преобразователей (ВОП) составляет модель функции преобразования, которая по аналогии с моделью оптрона может быть представлена зависимостью тока фотоприемника от множества параметров внешних факторов

$$I_{\text{ф}}(x_1 \dots x_n) = \Phi_0 t F(x_1 \dots x_n) S_{\text{и}}, \quad (3)$$

где Φ_0 – поток, испускаемый источником; t – коэффициент спектрального согласования элементов ВОП; $F(x_1 \dots x_n)$ – функция передачи оптического тракта; $S_{\text{и}}$ – интегральная чувствительность фотоприемника.

Очевидно, что максимальное теоретическое значение тока фотоприемника с бесконечно-линейной световой характеристикой

$$I_{\Phi} = \Phi_0 S_{\Pi} t = \text{const.} \quad (4)$$

В этом случае функция преобразования может оцениваться по поведению функции передачи оптического тракта, которую можно назвать условной функцией преобразования ВОП.

В свою очередь,

$$F(x_1 \dots x_n) = T T(x_1 \dots x_n), \quad (5)$$

где T – коэффициент передачи световодного тракта; $T(x_1 \dots x_n)$ – функция коэффициента передачи тракта «передающий торец световода – объект контроля – приемный торец световода».

Следовательно, функция преобразования ВОП определяется отношением потока излучения, попадающего в приемный световод, к потоку излучения, выходящему из передающего световода.

Для практических расчетов световодного первичного преобразователя датчика выведена формула

$$\Phi = \Phi_0 (t_1 t_2 t_3 t_4 t_5 t_6 R_p) : (td(A) L + R_i), \quad (6)$$

где R_p – радиус приемного световода; L – расстояние до отражателя (база датчика); A – апертурный угол; R_i – радиус излучающего световода; t_1 – коэффициент ввода излучения в световод; t_2 – коэффициент пропускания световодов; t_3 – коэффициент ввода излучения в фотоприемник; t_4 – коэффициент спектрального согласования фотоприемника и излучателя; t_5 – коэффициент пропускания излучения средой; t_6 – коэффициент, учитывающий изменение топографии распределения светового потока в пространстве в зависимости от типа излучателя.

При применении датчика отраженного излучения t_5 , соответственно, – коэффициент обратного рассеяния средой.

Для практических расчетов целесообразно (при применении стандартных световодов и источников излучения) принять общий коэффициент передачи оптического тракта, который найдется экспериментально для каждого типа световода, приемника и излучателя ($T_0 = t_1 t_2 t_3$).

В предлагаемом методе при выборе схем мутнометрии в качестве определяющего критерия принимается чувствительность или диапазон. При этом оптическая база первичного преобразователя (рис. 8) выбирается исходя из условия $\Phi_p = \Phi_n$, когда в нижней границе диапазона измерений по турбидиметрической схеме сигналы с выходов датчиков уравниваются. Практически это условие обеспечивается при мутности исследуемой среды, составляющей 90 % мутности образца.

В конструкции преобразователя выбор максимально возможной оптической базы определяется необходимостью увеличения чувствительности датчика. При снижении сигнала турбидиметрического канала до некоторого значения в качестве информативного параметра используется сигнал с датчика обратного рассеяния, что позволяет увеличить диапазон измерения. Однако, если в пределах заданной мутности среды сигнал с датчика обратного рассеяния не превышает уровень сигнала турбидиметрического, применение данного метода неэффективно. Интенсивность отраженного неоднородностями излучения в значительной мере зависит от отражающей способности частиц и самой среды, т. е., чем чище среда и чем лучше частицы отражают и рассеивают свет – тем больше интенсивность отраженного излучения и наоборот.

Практическая реализация данного метода позволила расширить диапазон измерения контролируемых образцов (взвесь полимерного порошка) в 1,5...4 раза в зависимости от вида порошка. Например, в пробе № 1, состоящей из частиц белого полимера размерами от 5 до 20 мк,

диапазон измерения увеличился с 1,2 до 4,5 г/л; в пробе № 2 (серый порошок) – с 1,1 до 3,2 г/л; в пробе № 3 (темно-серый порошок) – с 1,1 до 2,5 г/л. Контроль с применением данного метода моторных

и гидравлических масел невозможен, т. к. частицы загрязнений имеют низкую отражающую способность и условие равенства сигналов не выполняется.

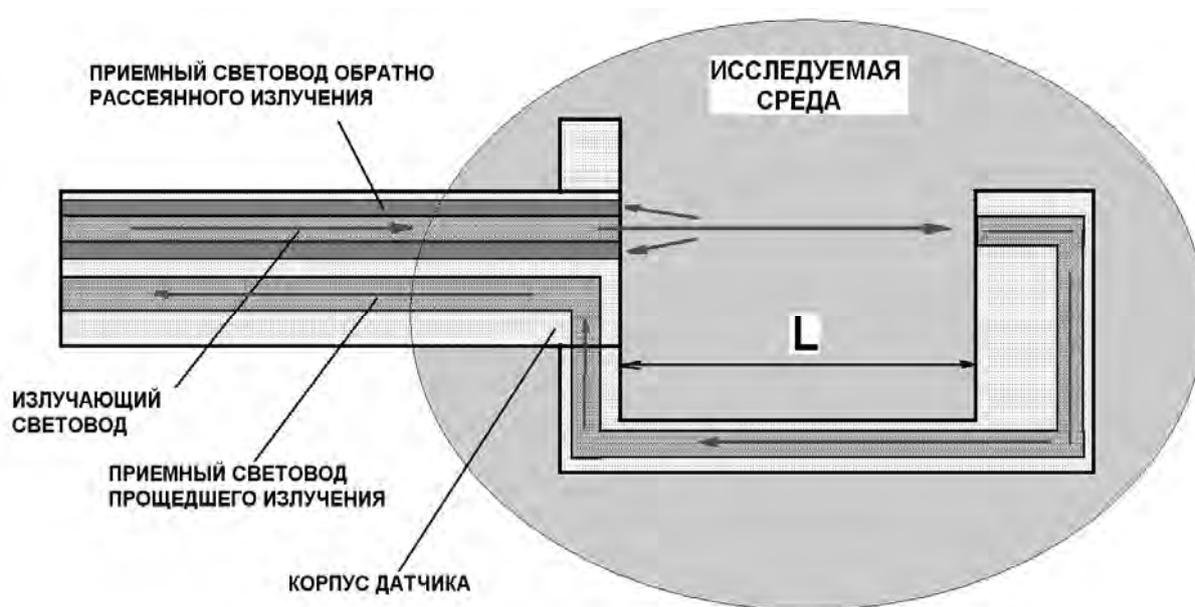


Рис. 8. Первичный преобразователь волоконно-оптического датчика

Выводы

В результате проведенных исследований и анализа исходных данных определен спектральный диапазон зондирующего излучения (500...880 нм); выбраны источники, приемники и трансляторы излучения с учетом решаемых задач; определены информа-

тивные параметры зондирующего излучения; проведены экспериментальные исследования и моделирование волоконно-оптического датчика, на основе которых разработан метод, позволяющий увеличить чувствительность и расширить диапазон измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максименко, А. Н. Оптико-волоконный контроль технических сред и масел строительно-дорожных машин и агрегатов / А. Н. Максименко, А. П. Марков, А. Г. Старовойтов // Метрология и приборостроение. – 2005. – № 3. – С. 20–24.
2. Барковский, В. Ф. Основы физико-химических методов анализа / В. Ф. Барковский, Т. Б. Горденцева, Н. Б. Топорова ; под ред. В. Ф. Барковского. – М. : Высш. шк., 1983. – 247 с.
3. Андреев, В. С. Лабораторные приборы для исследования жидких сред / В. С. Андреев, Е. П. Попечителей. – Л. : Машиностроение, 1981. – 312 с.
4. Ван де Хюлст, Г. Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван де Хюлст. – М. : Иностран. лит-ра, 1961. – 536 с.
5. Сайт компании «ЭкоИнструмент» [Электронный ресурс] / Украина, 03067, г. Киев, Машиностроительная 50. – Режим доступа : file : // localhost / F : / новая%20статья / веб / Теория%20и%20практика%20измерения%20мутности.%20Турбидиметрия%20и%20нефелометрия..mht. – Дата доступа : 05.09.2012.

6. Сайт компании «ЭкоИнструмент» [Электронный ресурс] / Украина, 03067, г. Киев, Машиностроительная 50. – Режим доступа : file : // localhost / F : / новая%20статья / веб / Единицы%20измерения%20мутности.mht. – Дата доступа : 05.09.2012.

7. **Вейнберг, В. Б.** Оптика световодов / В. Б. Вейнберг, Д. К. Саггаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 320 с.

8. **Зак, Е. А.** Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е. А. Зак. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.

Статья сдана в редакцию 9 октября 2012 года

Алексей Петрович Марков, науч. сотрудник НИЧ, Белорусско-Российский университет.
Тел.: 8-0222-25-38-46. E-mail: alexM7788@yandex.ru.

Aleksei Petrovich Markov, research worker of the Research Division, Belarusian-Russian University.
Tel.: 8-0222-25-38-46. E-mail: alexM7788@yandex.ru.