



УДК 681.7.068: 66.063.62

Поступила 08.05.2013

Е. И. МАРУКОВИЧ, ИТМ НАН Беларуси, С. С. СЕРГЕЕВ, А. П. МАРКОВ, К. ЗАХАРОВА, Белорусско-Российский университет, А. Г. СТАРОВОЙТОВ, РУП «Могилевэнерго»

СХЕМОТЕХНИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МУТНОМЕТРИИ ЖИДКИХ ИЛИ ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД

Рассматриваются модели и схемные реализации информационно-преобразовательных процессов опτικο-волоконной мутнометрии.

Models and circuit realizations of information and transforming processes of optical-fibrous turbidimetry are considered.

Введение. Применительно к задачам оперативной оценки состояния жидких и газообразных сред и масел неразрушающие методы и средства мутнометрии в большей мере соответствуют условиям автоматизированной обработки распределенной в пространственно-временных координатах среды первичной информации. Техника и технологии неразрушающего контроля предполагают оценку реального состояния без изменения структуры, свойств и параметров среды [1].

Оперативная информация о текущем состоянии среды обеспечивает возможность анализа производственных потерь, брака и отказов, а также позволяет выявить причины и механизмы загрязнений, проконтролировать и управлять состоянием среды и работоспособностью механизмов и машин.

Газообразные и смазочно-охлаждающие среды, а также технические масла как активная составляющая технологических процессов влияют и на весь производственный процесс, его эффективность, затратность и рентабельность. Досрочная замена, как и продолжительное использование масел с превышением установленных регламентов, снижают потенциальные возможности действующего оборудования и не исключают аварийных ситуаций.

Многофакторная работоспособность различных агрегатов определяется состоянием масел, коллоидных растворов, эмульсий, суспензий, охлаждающих жидкостей, для оценки качества которых используются методы и средства мутнометрии.

Современные способы мутнометрии и их схемная реализация. В ряде отраслей машино-

строения, целлюлозно-бумажной, нефтехимической, пищевой и других отраслях определение наличия концентраций взвесей в жидких, газообразных и других неоднородных средах и маслах имеет важное значение. Неоднородные среды являются слабо электропроводной системой и ее электропроводимость зависит определенным образом от содержания дисперсной фазы и плотности.

Первичная информация о состоянии неоднородных сред формируется на различных физических эффектах спектрально-энергетического взаимодействия однородной фазы и неоднородностей. Для оценки наличия и концентрации металлических включений используются емкостные и индукционные признаки изменчивости среды. Чувствительность такой проявляемости неоднородностей ограничивается обнаруживаемостью разностей плотностей и проводимостей. Неоднозначность и многофункциональная зависимость проводимости от степени загрязнения среды, нестабильность температурных флуктуаций и других случайных воздействий ограничивают применимость электромагнитных методов оперативной мутнометрии.

Сложность реализации калометрических концентратометров, их громоздкость и энергоемкость при значительных энергозатратах и инерционности лишают потребительского спроса и практического применения.

В ультразвуковых и радиоактивных методах неразрушающего контроля сред используется спектрально-энергетическая изменчивость излучения, воздействующего на среду. На проходящий через среду поток излучения влияют коэффициенты поглощения однородной среды и примесей,

размеры и форма частиц и дисперсной фазы, спектр излучения, способность среды поглощать или рассеивать воздействующее излучение и другие факторы. Конструктивные ограничения данного диапазона спектра обуславливают габаритность и энергозатратность такой мутнометрии.

Отсутствие непосредственного контакта, высокая точность и быстроедействие, более высокий уровень автоматизированной обработки информации обеспечивают перспективу совершенствования оптико-электронной мутнометрии. Оптическая фотометрия и спектроскопия неоднородных сред успешно осваивают новые направления и схемные реализации преобразований первичных признаков изменчивых неоднородностей в отображения общепринятого вида. Рассеяние и поглощение излучения представляют динамический процесс информационного взаимодействия неоднородной среды и воздействующего излучения. Рассеянный свет представляет собой совокупность вторичных волн лучистого потока, воспринимаемых как собственное свечение неоднородной среды. И для эффективных параметрических преобразований информативных излучений необходимо управляемое спектрально-энергетическое взаимодействие всех компонент лучистого потока.

Модели взаимодействия излучений с неоднородной средой. В таких моделях отражается специфика физических свойств однородной и неоднородной (дисперсной) фаз. В различиях изменчивости физических параметров среды проявляется информационно-физический контраст, присущий некоторым признакам и эффектам взаимодействия излучений с неоднородностями. По характеру взаимодействия однородной среды и неоднородностей с энергией воздействующих внешних излучений формируются дифференцированные источники первичной информации.

Более эффективно изменчивость среды проявляется в спектрально-энергетическом взаимодействии лучистого потока с неоднородностями. Неоднородная среда может пропускать, поглощать и рассеивать по-разному все компоненты воздействующего излучения видимого диапазона и прилегающих к ним ультрафиолетовой и инфракрасной областей спектра. Изменчивость среды и соответствующие изменения излучения при воздействии на среду в общем случае обусловлены отражением, преломлением и дифракцией на рассеивающих неоднородностях. В отличие от поглощения в рассеянии не наблюдается переход энергии в другие виды. Тогда для рассеяния аналогично с поглощением вместо показателя поглощения α можно использовать показатель рассеяния ξ . Если в процес-

се формирования первичной информации имеют место поглощение и рассеяние, тогда пользуются показателем ослабления:

$$\mu = \alpha + \xi \text{ или } \tau = e^{-\mu l},$$

где l – толщина элементарного потока.

Для неоднородных сред их светорассеивающая способность определяется неоднородностями в исследуемом объеме. Она характеризуется показателем рассеяния самого излучения. Подобно показателю поглощения, показатель рассеяния в основном зависит от размеров неоднородности и длины волны воздействующего излучения. Как поглощение, так и рассеяние уменьшают мощность проходящего излучения. Тогда информативный поток равен:

$$\Phi_{\text{и}} = \Phi_0 e^{-\mu l},$$

где μ – показатель ослабления; l – толщина элементарного слоя.

Поток излучения любого спектрального состава представляет собой суммарный поток большого числа монохроматических излучений с мощностями $dP = P_\lambda d\lambda$. При этом каждая из составляющих оказывает свое специфическое воздействие и отраженная, пропущенная и поглощенная мощности связаны с соответствующими коэффициентами $\rho(\lambda)$, $\tau(\lambda)$ и $\alpha(\lambda)$, т. е. $\rho(\lambda)dP$, $\tau(\lambda)dP$, $\alpha(\lambda)dP$. Тогда формируемый при взаимодействии излучения Φ_0 с неоднородной средой информативный поток равен:

$$\Phi_0 = K \int V_i(\lambda) P_\lambda d\lambda,$$

а составляющие информативные потоки соответственно

$$\Phi_{\text{во}'} = K \int \rho(\lambda) V(\lambda) P_\lambda d\lambda,$$

$$\Phi_{\text{уп}p} = K \int \tau(\lambda) V(\lambda) P_\lambda d\lambda,$$

$$\Phi_{\text{ун}2} = K \int \alpha(\lambda) V(\lambda) P_\lambda d\lambda,$$

где $V(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность светоприемника; K – максимальная световая эффективность воздействующего излучения.

В общем случае световая эффективность излучения определяется его спектральным составом и чувствительностью светоприемника. Для излучения, несодержащего в потоке видимой части спектра, световая эффективность излучения равна нулю.

Для излучения сложного многокомпонентного спектрального состава световой поток источника включает в себя элементарные световые потоки всех его монохроматических составляющих:

$$\Phi_0 = K_m \int V(\lambda) P_\lambda d\lambda.$$

Такая особенность позволяет эффективно реализовывать способы и средства спектрально-энергетического взаимодействия излучений с неоднородной средой.

Информационно-физические особенности оптико-электронной мутнометрии. Непосредственной задачей оптико-электронной мутнометрии является обнаружение и визуализация фактического состояния неоднородной среды.

При этом обеспечивается количественная и качественная оценка свойств неоднородностей, изменяющих физико-технические параметры однородной среды с технологически нормированными допусками.

За счет спектрально-энергетического излучателя при взаимодействии с неоднородностями формируется отображаемый неоднородной средой лучистый поток. Как носитель первичной информации лучистый поток характеризуется абсолютным значением (амплитудой, интенсивностью) этого потока и характером его спектрально-энергетического распределения. Соответственно и способы мутнометрии подразделяются на абсолютные, энергетические, относительные и спектрального отношения.

Если для энергетических способов прием и измерение интенсивности лучистого потока осуществляются в одном участке спектра излучения, то в спектральных – в большом (более двух) спектральном диапазоне. Тогда и способы спектрально-энергетического взаимодействия подразделяются на:

- интегральные, при приеме излучения с $\Delta\lambda \rightarrow \infty$;
- селективные, при приеме частичного излучения (монохроматические) с $\Delta\lambda = \text{const}$ и $\Delta\lambda \rightarrow 0$;
- спектральные, при приеме спектрально окрашенного излучения от нескольких источников (цветовые);
- смешанные, при приеме многоспектрального (многоцветного) излучения.

В этих способах мутнометрии первично отображаемое неоднородной средой излучение преобразуется в соответствующий носитель информации, визуализирующий фактическое состояние среды и комфортно воспринимаемый приемником (наблюдатель, система и другие средства). При этом информативное излучение, отражающее характер взаимодействия излучения с неоднородностями среды, определяется эффективным лучистым потоком и коэффициентом τ_λ спектрального согласования (восприятия и пропускания системой). В эффективном лучистом потоке находит отражение количественная сторона физико-технического взаимодействия излучения с неоднородностями, а в спектральном распределении – качественная.

В общем случае абсолютное значение информативного лучистого потока Φ_λ характеризуется эффектом суммарного воздействия на среду и может быть представлено выражением:

$$\Phi_\lambda = F \int_0^\infty b_\lambda \tau_\lambda d\lambda,$$

где F – эффективный коэффициент использования отображаемого средой лучистого потока; b_λ – плотность энергии отображаемого средой излучения; τ_λ – коэффициент спектрального преобразования излучения при взаимодействии со средой.

Из этого выражения следует, что для определения эффективного потока Φ_e в зависимости от принятого информативного параметра неоднородной среды необходимо вычислить интеграл:

$$\Phi_e = \int_0^\infty b_\lambda \tau_{i\lambda} d\lambda.$$

При этом неопределенность в функциональной зависимости b_λ и $\tau_{i\lambda}$ ограничивает возможность установления функциональной связи между Φ_e и физико-техническим состоянием неоднородной среды. Однако с учетом специфики неоднородностей и их спектрально-энергетического взаимодействия с излучением можно получить аналитические выражения Φ_e для различных по природе и геометрии неоднородностей в ограниченных диапазонах спектра и для каждого τ_λ .

Аппроксимируя зависимость коэффициента спектрального преобразования по выбранным спектральным участкам λ_i и λ_{i+1} , получаем зависимости τ_{λ_i} и $\tau_{\lambda_{i+1}}$ для этих участков.

Для некоторой эффективной длины волны $\lambda_{\text{эф}}$ отражаемое средой излучение более достоверно отображает состояние и свойства как неоднородностей, так и неоднородной среды. Именно в информативном излучении (его параметрах) и спектральном распределении лучистого потока сосредоточивается основная первичная информация. Тогда в сравнении экстремальных значений лучистых потоков $\Phi_{\text{эф}}$ и $\Phi_{\text{оп}}$ (опорный поток с минимальными значениями параметров) для ограниченного участка спектра более эффективно реализуется информационно-преобразовательный процесс.

Для решения задачи выбора участков эффективной длины волны и опорной необходимо исследовать спектрально-энергетические особенности информативного лучистого потока во всем спектральном диапазоне взаимодействия излучений и неоднородностей. Эффективность проявления физико-технических свойств неоднородной среды во многом обусловлена характером спектрально-

энергетических взаимодействий воздействующего излучения и информационно-физических преобразований первичной информации. В сравнении информативного излучения для $\lambda_{эф}$, в котором сосредоточена оптически контрастная зона и $\lambda_{оп}$, выступающего в роли фона, особенно проявляется качественная сторона неоднородной среды.

При спектрально-энергетическом воздействии селективного излучателя с варьируемыми λ_i отраженное и рассеянное излучение как результат взаимодействия с неоднородностями представляется совокупностью элементарных излучателей в виде разносветящихся точек. В свою очередь поглощенная часть энергии излучения преобразовывается в другие виды. Тогда по соотношению лучистых потоков поглощенного неоднородностями, рассеянного ими и пропущенного средой определяется долевое значение каждой составляющей в информативном излучении.

Долевое спектрально-энергетическое распределение составляющих информативного излучения зависит от природы, структуры, геометрии и концентрации неоднородностей, а также от соотношения спектральных составляющих воздействующего на среду излучения.

Структура и схемы первичных преобразований. Функциональное назначение устройств, связанных со средой и первичной информацией, определяется структурно-алгоритмической реализацией оптико-электронных преобразований и пространственно-распределенной обработкой информативных излучений.

Для схемных реализаций управляемого взаимодействия излучений с неоднородностями необходима информационная среда передачи, смешивания и разделения лучистых потоков, входящих в воздействующее на неоднородности излучение. При большом многообразии неоднородностей и неоднородных сред дифференцированное взаимодействие их с различными компонентами спектрально-энергетического излучения позволяет эффективно идентифицировать количественные и качественные показатели среды и строить управляемый процесс трансформации информативных излучений. В таких структурах имеется реальная возможность варьировать параметрами и схемами информационно-физических преобразований уже на первичном уровне [2].

Методы и технологии волоконной оптики в комбинации с оптико-электронными импульсными и лазерными излучателями, современными фотоприемниками и источниками энергии позволяют строить информационно-измерительные каналы, адаптированные к отдельным структурам, опера-

циям, технологическим процессам и неоднородным средам. Более простыми по структуре и в схемной реализации являются способы, основанные на прямых преобразованиях по одноканальной схеме. В них излучение одного источника с выбранными спектрально-энергетическими параметрами канализуется световодным излучателем с направленным воздействием на неоднородную среду. Формируемое при взаимодействии информативное излучение локализуется и канализуется для направленной передачи непосредственно на фотоприемник [3].

В такой структуре информационный канал строится на последовательном преобразовании и передаче компонент информативного излучения, при котором выходная величина предшествующего элемента одновременно и последовательно воспринимается как входная величина для последующего элемента (рис. 1). Излучение источника мощностью P_0 световодным каналом воспринимается мощностью $P_и$ системой оптических моноволокон, сформированных в виде световодного излучателя. Излучатель ориентированно воздействует на неоднородную среду, где в процессе взаимодействия формируется первичная информация. Информативное излучение воспринимается световодным приемником, непосредственно связанным с фотоприемником.

В схеме прямого преобразования излучение мощностью $P_и$ источника 1 по световоду 2 расщепляется моноволоконками на элементарные световые потоки, которые непосредственно взаимодействуют с некоторым ослабителем 3. В качестве ослабителя выступает калибровочный ослабитель при испытаниях или поверке, или технологическая проба неоднородной среды при контроле. Результат взаимодействия проявляется в выходном излучении, которое по приемному световоду 4 передается элементарными моноволоконками на вход фотоприемника 5 (рис. 1).

В такой структуре излучение источника направленно воспринимается и канализуется системой оптических волокон (излучательный световод). Калибровочный ослабитель (объект, эталон), встраиваемый в измерительную цепь, непосредственно воздействует на воспринятое излучение. Информативное излучение на выходе воспринима-

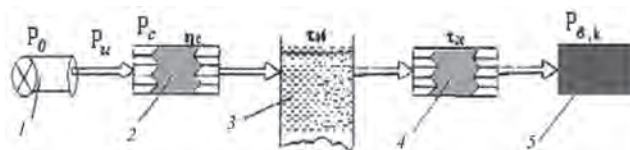


Рис. 1. Схема прямого световодного преобразования: 1 – источник излучения; 2, 4 – световоды; 3 – среда; 5 – фотоприемник

ется системой оптических волокон (приемный световод) и передается на приемник излучения.

Полная мощность $P_{\text{и}}$ источника излучения в телесном угле 2π равна:

$$P_{\text{и}} = 2\pi r_c^2 L_e n, \quad P_{\text{и}} = 2\pi S_3 L_e,$$

где L_e – энергетическая яркость излучения источника; r_c – радиус сердцевины моноволокна:

$$r_c = \sqrt{\frac{S_3}{\pi n}},$$

где S_3 – эффективная площадь приемной части световода; n – число моноволокон.

Фактически по такой схеме оценка мутности среды строится на измерении коэффициента ослабления $\tau_{\text{об}}$ по двукратному измерению мощности излучения $P_{\text{в}}$ с калибровочным ослабителем $P_{2\text{в}}$ и пробой неоднородной среды $P_{1\text{в}}$. Значения этих мощностей определяются выражениями:

$$P_{1\text{в}} = P_{\text{в}} \tau_{1\text{в}} \tau_{\text{об}} \tau_{2\text{в}} k,$$

$$P_{2\text{в}} = P_{\text{в}} \tau_{1\text{в}} \tau_{\text{кл}} \tau_{2\text{в}} k,$$

где k – коэффициент ослабления калибра (образца, эталона).

Соотношение мощностей в схеме прямого преобразования с пробой и калибром равно:

$$k_c = \frac{P_{1\text{в}}}{P_{2\text{в}}} = \frac{\tau_{\text{об}}}{\tau_{\text{кл}}} - \text{коэффициент ослабления среды.}$$

При этом погрешность преобразования составляет:

$$\frac{\Delta k_c}{k_c} = \frac{\Delta k_0}{k} + \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta x}{x}.$$

Интегральная составляющая $\Delta x/x$ учитывает точность преобразователя, связанную с погрешностью отсчета результатов (погрешность шкалы), чувствительностью приемника, воздействием фона, а также с флуктуацией мощности источника:

$$\Delta x = \Delta x_{\text{из}} + \Delta x_{\text{ш}} + k \Delta P,$$

где $\Delta x_{\text{из}}$ – погрешность измерительного преобразователя; $\Delta x_{\text{ш}}$ – воздействие шума приемника; ΔP – флуктуации источника излучения.

Тогда полная максимальная погрешность всего волоконно-оптического тракта прямого преобразования определяется выражением:

$$\frac{\Delta k_c}{k_c} = \frac{\Delta k_0}{k_0} + \frac{\Delta x_0}{x_0} + \frac{x_{\text{ш}}}{x_0} + \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta x_{\text{из}}}{x} + \frac{x_{\text{из}}}{x} + \frac{2\Delta P_0}{P_0}.$$

Таким образом, при построении световодного тракта по схеме прямого преобразования увеличение погрешности связано с нелинейностью функции преобразования и нестабильностью источника

излучения. С увеличением пути прохождения l излучения через среду соотношение мощностей изменяется и погрешность отсчета (шкала отсчета увеличивается) уменьшается. При этом в схеме прямого преобразования даже с увеличением пути l излучения влияние нелинейности и нестабильности источника не устраняется

$$k_c = \frac{P_0}{P_1} = \frac{\tau_{\text{кл}}}{\tau_0},$$

где $\tau_{\text{кл}}$, τ_0 – соответственно калибровочный параметр пропускания эталона и среды.

В схемах преобразователей, построенных на проходящем излучении, световоды используются для направленной передачи излучения источника к приемнику и приема информативного излучения $\Phi_{\text{пр}}$. В таких схемах модулированное неоднородной средой излучение на выходе световода определяет его контролируемые параметры и свойства.

Для таких структур преобразователей выходной световой поток $\Phi_{\text{в}}$ определяется выражением:

$$\Phi_{\text{в}} = \sum \Phi_{\text{пр}i} = S_{3i} \pi L_e \sin^2 A_{\text{вх}} \tau_1 \tau_{\text{об}} \tau_2 k_{\lambda},$$

где S_{3i} – эффективная площадь входного торца осветительного световода:

$$S_{3i} = S_0 n_{\text{в}};$$

$n_{\text{в}}$ – число волокон выходного торца; L_e – яркость источника излучения; $A_{\text{вх}}$ – числовая апертура, определяющая максимальный угол, который может быть принят данной системой; τ_1 , $\tau_{\text{об}}$, τ_2 – соответственно коэффициент светопропускания осветительного световода, среды и приемного световода; k_{λ} – спектральная чувствительность приемника излучения и фильтра.

Данная зависимость показывает, что первичная информация, формируемая по такой схеме, определяется тремя группами факторов: состояние и свойства неоднородной среды; элементы оптической схемы ($S_{\text{пр}}$, τ_1 , τ_2 , k_{λ}); среда, передачи излучения от предыдущего к последующему элементу системы.

При этом суммарная погрешность преобразования и передачи информативных излучений определяется и помехами каждого отдельно взятого элемента измерительной цепи при их последовательном соединении.

В двухканальной схеме с пространственным разделением световодов (рис. 2) наряду с каналом формирования первичной информации вводится дополнительный (избыточный) эталонный канал. Выходной поток $\Phi_{\text{пр}i}$ информационного канала, образованного источником излучения I , светово-

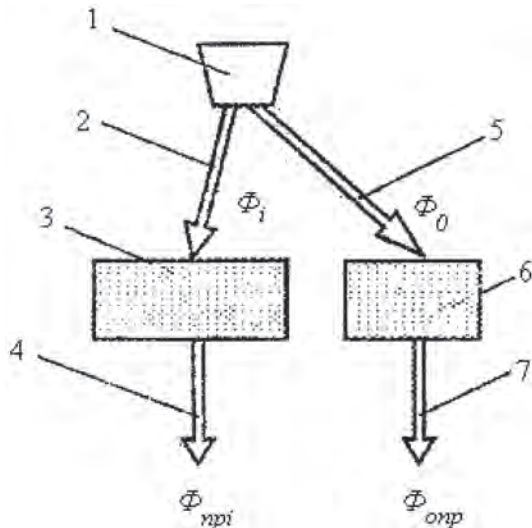


Рис. 2. Схема двухканального оптического преобразователя: 1 – источник излучения; 2, 5 – световоды; 3 – среда; 4, 7 – световод приемный; 6 – эталон

дами 2, средой неоднородной 3 и приемным световодом 4, определяет характеристики объекта контроля. Избыточный канал, выступающий в виде опорного, образуется световодами 5, эталоном или образцом 6 и приемным световодом 7, имеющим светопропускание τ_2 . При этом световой поток $\Phi_{0пр}$ несет информацию о характеристиках однородной среды.

В данной схеме информативный поток $\Phi_{пр}$ определяется выражением:

$$\Phi_{пр} = \sum \Phi_{прi} = S_{0n} \pi B_{вх} \sin^2 a_{вх} S_{\lambda 0} \tau_3,$$

а соотношение световых потоков информационного и опорного каналов определяет коэффициент пропускания неоднородной среды как объекта:

$$\tau_{об} = \frac{\tau_3}{\tau_1 \tau_2} \frac{S_{\lambda 3}}{S_{\lambda}} \frac{\Phi_{0пр}}{\Phi_в}$$

Представленная схема при некотором структурном усложнении обеспечивает улучшенные метрологические характеристики преобразователей при расширенных функциональных возможностях. Принцип относительных измерений в таком преобразователе упрощает процесс мутнометрии, особенно операций градуировки и испытаний мутномеров.

В схеме двухлучевого преобразования в качестве образца (эталона) используется регулируемый ослабитель с линейным или функциональным преобразованием (рис. 3).

Однако из-за погрешностей образцового ослабителя (эталона) полной компенсации мощностей в двухлучевом преобразователе достигнуть невозможно. Тогда абсолютная погрешность тако-

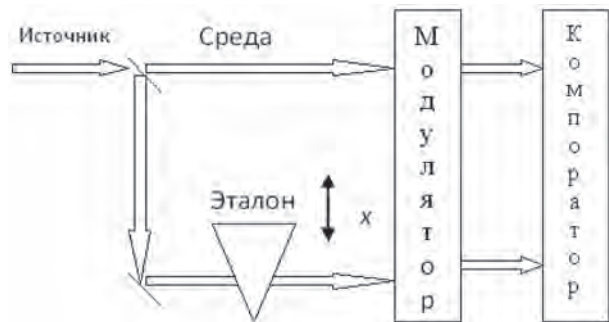


Рис. 3. Схема двухлучевого компенсационного преобразователя

го преобразователя рассчитывается следующим образом:

$$\Delta P = \frac{P_0}{\tau_x} - \frac{P_0}{\tau_0 + \Delta \tau_0},$$

где τ_0 – погрешность образцового регулируемого ослабителя; τ_x – измеренное ослабление неоднородной среды.

Представим относительную погрешность образцового регулируемого ослабителя в виде:

$$\beta = \frac{\Delta \tau_0}{\tau_0}.$$

Тогда

$$\Delta P = \frac{P_0}{\tau_x} - \frac{P_0}{\tau_0 \left(1 + \frac{\Delta \tau_0}{\tau_0}\right)} = \frac{P_0}{\tau_0} \left(\frac{\beta}{1 + \beta} \right).$$

Таким образом, изменяя в поперечном направлении положение x эталонного ослабителя относительно светового луча, добиваются полной компенсации мощностей (нулевого значения индикатора).

Существенное влияние оказывает чувствительность ослабителя. Очевидно, при $\beta \ll 1$ $\Delta k_c \ll k_{0c}$, а погрешность шума $\Delta P_{ш} < \Delta P \leq \frac{P_0}{\tau_0} \beta$ и величина

$$\tau_{max} < \frac{P_0}{\Delta P_{ш}}.$$

В таких схемах разбаланс в двухлучевом преобразователе может появляться из-за неточности установки равенства интенсивностей, если флуктуации источника очень велики. Тогда неточности согласования в плечах световодного преобразователя значительны и результирующая погрешность оценивается зависимостью:

$$\Delta P_{и} = \frac{P_0 + \Delta P_{и}}{\tau_x} - \frac{P_0 + \Delta P_{и}}{\tau_p + \Delta \tau_p},$$

где $\Delta P_{и}$ – флуктуации источника излучения; τ_p – флуктуации разбаланса.

Представим $\frac{\Delta P_{\text{и}}}{P_0} = \gamma$ – относительная погрешность источника излучения. Тогда

$$\Delta P_{\text{и}} = \frac{P_0}{\tau_0} \beta (1 + \gamma),$$

$$\Delta P_{\text{и}} - \Delta P < \frac{\Delta P}{k}, \quad 1 + \gamma - \frac{1}{1 + \beta} < \frac{1}{k(1 + \beta)},$$

$$1 + \gamma \leq \frac{1}{1 + \beta} \left(1 + \frac{1}{k} \right) \text{ при } \beta \ll 1, \quad \gamma \leq \frac{1}{k}.$$

Таким образом, для компенсационного метода и схем построения световодного преобразователя относительная погрешность исключительно определяется погрешностью образцового ослабителя:

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\Delta P_x}{P_x}.$$

Разновидностью компенсационной схемы двухлучевого преобразователя является двухканальная схема с временным разделителем оптических каналов.

В двухканальной системе временное разделение каналов строится на поочередной подаче светового потока в информационный канал и канал сравнения. По соотношению потоков $\Phi_{\text{опр}}$ и $\Phi_{\text{в}}$ находим коэффициент пропускания неоднородной среды:

$$\tau = \frac{\tau_3}{\tau_1 \tau_2} \frac{\Phi_{\text{опр}}}{\Phi_{\text{в}}}.$$

С учетом метрологических и информационных характеристик выбирается та или иная схема световодных преобразователей применительно к задачам оперативной мутнометрии жидких и газообразных неоднородных сред.

Выводы

1. В решении стратегических задач контролеобеспечения и контролеспособности неоднородных сред определяющую роль играют схемотехника и технологии оперативного контроля. Для оперативного контроля особенно в полевых и нестационарных условиях весьма эффективна световодная мутнометрия. Мобильная переносная и портативная аппаратура существенно сказывается на трудоемкости и затратности при улучшенной эргономике. Техника и технологии мутнометрии в большинстве своем представляют весьма напряженную и рутинную работу, требующую ответственных и высококвалифицированных исполнителей.

2. С учетом пространственно-временной неопределенности в зарождении и распределении неоднородностей среды особенно перспективны переносные мутномеры погружного типа. Путем зондирования среды обеспечивается возможность оценки ее состояния в любой зоне, что позволяет выявить топологию сосредоточения неоднородностей, динамику нарастания мутности и оперативно принимать решения по дальнейшему ее использованию.

3. В технико-экономическом отношении более употребительными и конкурентоспособными являются компактные, не габаритные, низкоэнергетические и нематериалоемкие, надежные в эксплуатации и простые в обслуживании оптико-волоконные мутномеры. Структура и схемы информационно-преобразовательных операций в них неразрывно связаны с окружающей средой, средой трансформации и дистанцирования информативных излучений, средой дестабилизирующих внутри- и внешнесистемных воздействий. И вся эта структурно-алгоритмическая реализация оптимально согласовывается по спектрально-энергетическим параметрам и характеристикам.

Литература

1. Марукович Е. И. Некоторые направления совершенствования технологического контроля в литейном производстве оптоволоконными средствами / Е. И. Марукович, А. П. Марков, Д. А. Горбунов, А. А. Кеткович и др. // *Литье и металлургия*. 2006. № 2. Ч. 2. С. 107–111.
2. Сергеев С. С. Некоторые особенности информационного анализа и синтеза волоконно-оптических систем технологического контроля / С. С. Сергеев, А. И. Потапов, А. П. Марков, А. В. Коннов // *Вестник МГТУ*. 2006. № 2 (11). С. 164–168.
3. Марков А. П. Анализ схем световодных преобразователей / А. П. Марков, А. Г. Старовойтов, А. И. Потапов // *Неразрушающий контроль и диагностика окружающей среды, материалов и промышленных изделий: Межвуз. сб. СПб: СЗТУ*. 2004. Вып. 10. С. 3–12.